

Nina Rinne

# KESTÄVÄ KEHITYS ELEKTRONIIKKA- LAITTEEN TUOTESUUNNITTELUSSA

Kandidaatintyö  
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta  
Tarkastaja: Katja Laine  
Toukokuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Nina Rinne: Kestävä kehitys elektroniikkalaitteen tuotesuunnittelussa  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Tieto- ja sähkötekniikan tutkinto-ohjelma  
Toukokuu 2022

---

Elektroniikka on nykyään niin yleistynyttä, ettei sen olemassaoloa oikeastaan tule edes erikseen ajatelleeksi. Viime vuosikymmenten hurjan teknologian kehityksen vuoksi elektroniikkalaitteet ovat vanhentuneet nopeasti, jonka vuoksi niitä päätyy yhä enemmän romuksi. Elektroniikkalaiteromua tuotetaan jopa 50 miljoonaa tonnia vuosittain, ja määrä tulee tuplaantumaan vuoteen 2050 mennessä, ellei ongelmaan puututa.

Elektroniikkalaiteromu sisältää haitallisia aineita, kuten raskasmetalleja ja myrkyllisiä palonestoaineita, jotka ovat vaarallisia niin luonnolle kuin ihmisen terveydelle. Maailmanlaajuisesti romusta vain 20 % kerätään ja kierrätetään asianmukaisesti. Loput päätyvät kaatopaikoille tai kuljetettavaksi köyhempiin maihin, joissa ne aiheuttavat mittavia ympäristö- ja terveysongelmia.

Tämä työ on kirjallisuuskatsaus, jossa perehdytään kestävän kehityksen periaatteisiin elektroniikassa. Erityisesti työssä keskitytään elektroniikkaromun hyödyntämiseen ja sen synnyn ehkäisemiseen kestävän tuotesuunnittelun avulla.

Kestävällä tuotesuunnittelulla ja niin sanotulla vihreällä elektroniikalla tähdätään ympäristöystävällisten elektroniikkalaitteiden tehokkaaseen tuottamiseen. Tavoitteella on kolme pääperiaatetta: energiantuotannon ja -kulutuksen minimointi, materiaalinkäytön vähentäminen ja haitallisten aineiden käytön välttäminen. Elektroniikkalaiteromun syntyä voidaan ehkäistä kiertotalouden mallia noudattaen, joka käytännössä tarkoittaa vanhojen laitteiden hyödyntämistä uudelleentuotannossa joko osakokoonpanojen uudelleenkäytön tai materiaalien kierrätyksen muodossa.

Työssä tarkastellaan tuotesuunnittelua laitteen purkamisen, kokoamisen, modulaarisuuden, uudelleenkäytön, materiaalien ja kierrätyksen kannalta. Työssä käy ilmi, että elektroniikkaromun hyödyntämättä jättäminen on resurssien tuhlaamista, sillä se sisältää paljon arvokkaita komponentteja ja materiaaleja. Samalla tutkielmassa todetaan, että kestävä kehitys vaatii kuitenkin ponnisteluja tuotesuunnittelun lisäksi myös liiketoimintamallien ja toisaalta lainsäädännön osalta.

Avainsanat: elektroniikkaromu, kestävä kehitys, tuotesuunnittelu

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ALKUSANAT

Tämän työn aihe on kaikessa ajankohtaisuudessaan myös tärkeä itselleni, sillä haluan osaltani lisätä kestäväen kehityksen tuntemusta alalla. Haluan kiittää ohjaajaani Katja Lainetta hänen tuestaan ja kannustavasta palautteestaan kirjoitustyön eri vaiheissa. Sain häneltä apua aiheen rajauksessa ja hyvien lähteiden löytämisessä. Lisäksi kiitoksen ansaitsee siskoni, jolta olen saanut vastauksia ja apua kaikenlaisiin kysymyksiini opintojeni aikana.

Tampereella, 23.5.2022

Nina Rinne

# SISÄLLYSLUETTELO

|  |    |
|--|----|
| 1. JOHDANTO .....  | 1  |
| 2. KESTÄVÄ KEHITYS ELEKTRONIIKASSA .....   | 3  |
| 3. SÄHKÖ- JA ELEKTRONIIKKALAITEROMU .....  | 5  |
| 3.1 Sähkö- ja elektroniikkalaiteromun määritelmä ja sitä koskevat<br>säädökset .....         | 5  |
| 3.2 Sähkö- ja elektroniikkalaiteromun ympäristö- ja terveyshaitat .....                      | 8  |
| 3.3 Sähkö- ja elektroniikkalaiteromun hyödyntäminen ja sen tarjoamat<br>mahdollisuudet ..... | 11 |
| 4. ELEKTRONIIKKAROMUN MINIMOINTI TUOTESUUNNITELULLA .....                                    | 12 |
| 4.1 Tuotteen purkaminen .....  | 13 |
| 4.2 Tuotteen kokoaminen .....  | 14 |
| 4.3 Tuotteen korjaus, modulaarisuus ja osien uudelleenkäyttö .....                           | 17 |
| 4.4 Tuotteen materiaalivalinnat ja kierrätys .....   | 19 |
| 5. TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT .....   | 21 |
| 6. YHTEENVETO .....  | 23 |
| LÄHTEET .....  | 25 |

# KUVALUETTELO

|  |    |
|--|----|
| <i>Kuva 1. Kiertotaloutta havainnollistava malli [8].</i>  | 4  |
| <i>Kuva 2. Elektroniikkaromun käsittelyä Guiyussa [21].</i>  | 9  |
| <i>Kuva 3. Saastunut joki Guiyussa 2015 [23].</i>  | 10 |
| <i>Kuva 4. Suljettua toimitusketjua havainnollistava malli [24].</i>   | 12 |
| <i>Kuva 5. Aaltojuotoksen periaate, muokattu lähteestä [28].</i>   | 15 |
| <i>Kuva 6. Tuotantokulut laitetta kohden vuosittaisen tuotantomäärän funktiona, muokattu lähteestä [26].</i>         | 16 |
| <i>Kuva 7. Alakappaletta muokkaamalla priikkaa ei tarvitse kohdistaa ennen kiinnitystä, muokattu lähteestä [26].</i> | 16 |
| <i>Kuva 8. Jousi putoaa paikoilleen alakappaleeseen tehtyjen viistojen vuoksi, muokattu lähteestä [26].</i>          | 17 |
| <i>Kuva 9. Flip chip-tekniikka anisotrooppista liimaa käyttäen, muokattu lähteestä [33].</i>                         | 19 |

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

|                  |  |
|------------------|--|
| ADIR             | <i>engl.</i> automated disassembly, separation and recovery, EU:n rahoittama projekti            |
| BBP              | butyylibentsyyliiftalaatti   |
| CFC-yhdisteet    | <i>engl.</i> <i>chlorine-fluorine-carbon</i> eli freonit, otsonikerrosta tuhoavia yhdisteitä     |
| Cr6+             | kuudenarvoinen kromi   |
| DBP              | dibutyyliftalaatti   |
| DEHP             | bis(2-etyyliheksyyli)ftalaatti   |
| DfA              | <i>engl.</i> Design for Assembly   |
| DfD              | <i>engl.</i> Design for Disassembly  |
| DIBP             | di-isobutyyliftalaatti   |
| IPCC             | <i>engl.</i> Intergovernmental Panel on Climate Change   |
| LCA              | <i>engl.</i> life cycle assessment, elinkaariarviointi   |
| LIBS-tekniikka   | <i>engl.</i> laser induced breakdown spectroscopy, laserindusoitu hajoamisspektri                |
| PACE             | <i>engl.</i> Platform for Accelerating the Circular Economy                                      |
| PBB              | polybromatut bifenyylit  |
| PBDE             | polybromatut difenyylieetterit   |
| PCB-yhdisteet    | polyklooratut bifenyylit   |
| PCCD/F           | polyklooratut dibentso-para-dioksiinit ja polyklooratut dibentsofuraanit                         |
| reflow-tekniikka | juotostekniikka, jossa komponentit liitetään piirilevyyn reflow-uunissa kuumentamalla            |
| RoHS-direktiivi  | <i>engl.</i> Restriction of Hazardous Substances, haitallisia aineita rajoitettava EU-direktiivi |
| SER              | sähkö- ja elektroniikkalaiteromu   |
| SiC              | <i>engl.</i> silicon carbide, piikarbidi   |
| WEEE-direktiivi  | <i>engl.</i> Waste Electric and Electronical Equipment, elektroniikkaromua koskeva EU-direktiivi |
| <i>Cd</i>        | kadmium  |
| <i>Hg</i>        | elohopea   |
| <i>Pb</i>        | lyijy  |

# 1. JOHDANTO

Ihmisen vaikutusta luontoon ja ympäristöön on tarkkailtu jo vuosikymmeniä. Esimerkiksi 1960-luvulla tarkkailun kohteeksi päätyi maatalouden myrkylliset torjunta-aineet, joiden käyttöä myöhemmin vastustettiin jo laajasti. Seuraavalla vuosikymmenellä todettiin CFC-kaasujen tuhoavan otsonikerrosta, ja ennustettiin laskennallisesti kerroksen ohentuminen. [1] 1980-luvulla raportoitii ensimmäisen kerran otsoniaukosta Etelämanneren yllä ja ennustettiin maapallon keskilämpötilan nousevan tulevaisuudessa [2][3]. Vuonna 1990 IPCC:n (Intergovernmental Panel on Climate Change) julkaisemassa raportissa (IPCC First Assessment Report) todettiin ihmisistä johtuvien päästöjen lisäävän kasvihuonekaasuja merkittävästi, vaikuttaen ilmaston lämpenemiseen nopeuttavasti [4].

Tällä vuosituhannella kestävästä kehityksestä on tullut vakiintunut termi, joka määritellään sellaisena ympäristöllisenä, taloudellisenä ja sosiaalisena kehityksenä, joka takaa ihmisen hyvinvoinnin maapallon resurssien puitteissa. Seuraaville sukupolville on jätettävä yhtä hyvät, ellei paremmat lähtökohdat hyvään elämään. Kestävä kehitys onkin 2000-luvun yksi merkittävimmistä, globaalisia tavoitteita, jonka on vastattava ihmiskuntaa uhkaaviin ongelmiin, kuten luonnonvarojen ehtymiseen, ilmaston lämpenemiseen ja ympäristön tuhoutumiseen.

Vaikka suurin ilmastokritiikki kohdistuu fossiilisten polttoaineiden ympärille, on elektroniikkateollisuudella pitkä matka ympäristöystävällisyyteen ja hiilineutraaliuteen. Energiantuotanto on yhä teollisuuden suurin saastuttaja, ja sitä tarvitaan elektroniikan tuotantoon sekä itse laitteiden käyttöön. Sen lisäksi tuotannossa käytetään uusiutumattomia materiaaleja, joista osa on haitallisia luonnolle ja ihmisen terveydelle, kuten lyijy ja elohopea. Kenties yksi suurimmista elektroniikan ympäristöongelmista on kuitenkin kaatopaikoille päätyvä elektroniikkaromu. Sen lisäksi, että jätteestä on haittaa ympäristölle, on se käsittelemättömänä myös valtavaa resurssien hukkaan heittämistä. Työssä tutkitaan, miten tuotesuunnittelulla voitaisiin ehkäistä elektroniikkajätteen syntymistä ja toisaalta, miten romun sisältämä potentiaali ja resurssit voitaisiin hyödyntää.

Työn toisessa luvussa esitellään kestävästä kehityksestä periaatteita elektroniikan näkökulmasta sekä niin sanotun vihreän elektroniikan tavoitteita. Kolmannessa luvussa käsitellään elektroniikkalaiteromun määritelmää ja sitä koskevaan lainsäädäntöä. Lisäksi luvussa perehdytään elektroniikan sisältämiin haitallisiin aineisiin sekä niiden ympäris-

tö- ja terveysvaikutuksiin. Neljännessä luvussa paneudutaan kestävään tuotesuunnitteluun sekä elektroniikkaromun ehkäisemiseen ja viidennessä luvussa tarkastellaan tulevaisuuden näkymiä alalla. Viimeisessä kootaan yhteen tärkeimmät havainnot.



## 2. KESTÄVÄ KEHITYS ELEKTRONIIKASSA

Teknologian nopean kehityksen vuoksi elektroniikan määrä on 2000-luvulla kasvanut räjähdysmäisesti. Uusia laitteita on kehitetty valtava määrä, ja lisää tulee markkinoille jatkuvasti. Elektroniikka on korvannut useita kodin askareita, jotka ennen on täytynyt suorittaa käsin. Joka kodista löytyy imuri, jolla pölyt poistetaan lattioilta rikkalapion sijaan, useimmissa kodeissa tiskit pesee astianpesukone. Myös olemassa oleviin laitteisiin on lisätty elektroniikkaa vähintäänkin samaa tahtia: esimerkiksi 2020-luvun autoissa on huomattavasti enemmän sähköisiä osia kuin vielä 20 vuotta sitten. Nykyään penkkien asennot ja sijainnit säädetään napin painalluksilla, kun aiemmin ne veivattiin käsin.

Koska kehitys on ollut niin nopeaa, ja elektroniikan kirjo on niin laaja, vanhenevat erilaiset laitteet hyvin nopeasti ja jäävät käyttämättömiksi. Esimerkiksi älypuhelimet saavat uuden malliston käytännössä puolen vuoden välein, ja on jo melko tavallista, että kuluttaja päivittää sen uuteen vuoden käytön jälkeen. Erilaisten sovellusten kehittyessä yhä vaativimmiksi, vaaditaan monilta laitteiltakin enemmän tehoa ja suorituskykyä. Videopelit ovat nykyään hyvin erilaisia kuin 2000-luvun alussa, ja esimerkiksi tietokoneiden näytönohjainten tehonkulutus on moninkertaistunut muutamasta watista yli 200 wattiin viimeisen 25 vuoden aikana [5].

Ympäristöystävällisen eli niin sanotun vihreän elektroniikan tuotannon tavoitteet ovat yksinkertaiset: tuottaa ympäristöystävällisiä elektroniikkalaitteita mahdollisimman tehokkaasti ja jätteen syntymistä välttäen. Vihreä elektroniikka keskittyy muutamaankin peruserätyyseen, joilla pyritään optimoimaan elektroniikan tuotanto ja energiatehokkuus. Ympäristöystävällisessä elektroniikassa pyritään vähentämään laitteen osien sekä laitteessa käytettävän materiaalin määrää ja toisaalta lisäämään komponenttien uudelleenkäyttöä. [6] Näin tuotannossa tarvitaan vähemmän uutta raakamateriaalia. Lisäksi materiaalivalinnassa pitäisi suosia ympäristöystävällisimpiä vaihtoehtoja, kuten uusiutuvia tai kierrätettyjä materiaaleja, ja välttää haitallisten aineiden käyttöä.

Energiaa kuluttaa tuotantoprosessien lisäksi myös elektroniikkalaitteet itse. Käyttöajan aikana laitteiden päästöt syntyvät pääosin niiden käyttämän energian tuotannosta, jonka muotoon suunnittelijat tai tuottajat eivät voi vaikuttaa. [7] Näin ollen laitteiden ener-

giankulutus ja -tehokkuus ovat tuotesuunnittelun kannalta merkittävimpiä tekijöitä laitteen käytön aikaisten ympäristövaikutuksien minimoimiseksi.

Ottamalla tuotesuunnittelussa huomioon laitteiden purkamisen ja kokoamisen helppous sekä modulaarisuus, voidaan tuotteiden uudelleenkäyttöä ja kierrätystä parantaa. Näin myös tuotteiden elinikä pitenee [8]. Tällaisia liiketoimintamalleja, joissa hyödynnetään tuotteita mahdollisimman pitkälle, kutsutaan kiertotaloudeksi. Mallia on havainnollistettu kuvassa 1.



**Kuva 1.** Kiertotaloutta havainnollistava malli [8].

Liiketoimintamallien käyttöönotto on siis aloitettava tuotesuunnittelun tasolla. Helposti purettavissa ja koottavissa olevat, modulaariset laitteet varmistavat niiden tehokkaan korjauksen ja räätälöinnin. Toisaalta kierrätettävät materiaalit, sekä haitalliset aineet saadaan kerättyä talteen, ja tärkeät, käyttökelpoiset komponentit uudelleenkäytettyä ja tarvittaessa ehostettua. Kestävää tuotesuunnittelua käsitellään tarkemmin luvussa 4.

## 3. SÄHKÖ- JA ELEKTRONIKKALAITEROMU

Sähkö- ja elektroniikkalaiteromu on yksi nopeimmin kasvavista jätteen lähteistä maailmassa. Arviolta 50 miljoonaa tonnia sähkö- ja elektroniikkalaiteromua, lyhyemmin e-jätettä, tuotetaan vuosittain. Vain noin 20 % dokumentoidaan, kerätään ja kierrätetään asianmukaisesti. Loppu päätyy kaatopaikoille tai kuljetettavaksi maihin, joissa ympäristölait ovat löyhempiä tai puuttuvat kokonaan. PACE:n (Platform for Accelerating the Circular Economy) raportin mukaan seuraavan 28 vuoden aikana romun määrä tulee kasvamaan 120 miljoonaan tonniin vuosittain, ellei ongelmaan puututa. [9]

### 3.1 Sähkö- ja elektroniikkalaiteromun määritelmä ja sitä koskevat säädökset

Sähkö- ja elektroniikkalaiteromu eli SER tarkoittaa kaikkia sellaisia sähköllä tai akulla toimivia laitteita ja komponentteja, jotka ovat syystä tai toisesta poistuneet käytöstä [10]. Euroopan unionin asettaman WEEE-direktiivin (Waste Electrical and Electronical Equipment) mukaan sähkö- ja elektroniikkalaiteromu voidaan jakaa kymmeneen kategoriaan, jotka on lueteltu taulukkoon 1 [11]. E-jätettä tulee pääasiassa kolmesta lähteestä: kotitalouksista, yritystoiminnasta sekä hallinnoilta.

Taulukko 1. *WEEE-direktiivin kategoriat elektroniikkalaitteille [11].*

| Kategoria | Kuvaus                             |
|-----------|------------------------------------|
| 1.        | Suuret kodinkoneet                 |
| 2.        | Pienet kodinkoneet                 |
| 3.        | ATK ja mobiiliteknologian tuotteet |
| 4.        | Kulutustavarat                     |
| 5.        | Valaistustuotteet                  |
| 6.        | Sähköiset työkalut                 |
| 7.        | Lelut ja urheilutuotteet           |
| 8.        | Sairaanhoitotuotteet               |
| 9.        | Monitorointilaitteet               |
| 10.       | Automaattiset jakelijat            |

Taulukon 1 mukainen luokittelu on kuitenkin hieman vanhentunut ja osittain epärelevantti. Ensimmäiset kategoriat, kuten suuret ja pienet kodinkoneet, ovat edelleen päteviä luokkia elektroniikalle, mutta esimerkiksi monitorointilaitteiden tai automaattisten jakelijoiden lajittelu omiksi osioikseen ei ole enää ajankohtaista. Kategoriat uusittiinkin vuonna 2018, ja siitä lähtien niitä on ollut enää 6 [11]. Uudistetut luokat on listattu taulukkoon 2.

Taulukko 2. *WEEE-direktiivin kategoriat elektroniikkalaitteille [11].*

| Kategoria | Kuvaus                                 |
|-----------|--|
| 1.        | Lämmitys- ja jäähdytyslaitteet         |
| 2.        | Näyttöpäätteet ja monitorit            |
| 3.        | Lamput                                 |
| 4.        | Suuret laitteet                        |
| 5.        | Pienet laitteet                        |
| 6.        | Pienet tieto- ja teletekniset laitteet |

Ensimmäisen taulukon kategorioista automaattijakelijat voidaan toiminnosta riippuen lajitella taulukon 2 kategoriaan 4 tai kategoriaan 1, jos automaatissa on jäähdytyslaite [11]. Esimerkiksi virvokeautomaatti, josta saadut juomat ovat kylmiä, lajiteltaisiin kategoriaan 1. Erilaiset monitorointilaitteet, kuten palohälyttimet tai teollisuuden valvontalaitteet, voidaan koosta riippuen lajitella luokkaan 4 tai 5.

Direktiivillä on kolme päätavoitetta, joista ykkösprioriteetti on ehkäistä sähkö- ja elektroniikkalaiteromun syntymistä kaiken kaikkiaan. Lisäksi direktiivin on tarkoitus edistää laitteiden uudelleenkäyttöä ja kierrätystä sekä parantaa ympäristönsuojelun tasoa kaikkien toimijoiden osalta, laitteen koko elinkaaren ajalta. Tähän kuuluvat tuottajien, jakelijoiden ja kuluttajien lisäksi laiteromun kerääjät ja kierrättäjät. Direktiivi asettaa määräyksiä ja tavoitteita elektroniikkajätteen keräykselle ja käsittelylle ja pyrkii vaikeuttamaan laitonta jäteviientä EU:n ulkopuolelle. [11] Esimerkiksi melkein kaikista elektroniikkalaitteista löytyvä merkintä, jäteastia yli vedetyllä ristillä, on erilliskierrätystä merkitsevä kuvatunnus ja WEEE-direktiivin määrittelemä [11].

Toinen elektroniikkajätettä koskeva säädös EU:ssa on RoHS-direktiivi (The Restriction of the use of certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment), joka nimensä mukaan rajoittaa haitallisten aineiden käyttöä sähkö- ja elektroniikkalaitteissa. Rajoitetut aineet sallittuine enimmäispitoisuuksineen on lueteltu taulukossa 3.

Taulukko 3. *RoHS-direktiivissä rajoitetut aineet sekä enimmäispitoisuudet [12].*

| <b>Haitallinen aine</b>              | <b>Enimmäispitoisuus (%)</b> |
|--------------------------------------|------------------------------|
| kadmium, Cd                          | 0,01                         |
| lyijy, Pb                            | 0,1                          |
| elohopea, Hg                         | 0,1                          |
| kuudenarvoinen kromi, Cr6+           | 0,1                          |
| polybromatut bifenyylit, PBB         | 0,1                          |
| polybromatut difenyylietterit, PBDE  | 0,1                          |
| bis(2-etyyliheksyyli)ftalaatti, DEHP | 0,1                          |
| butyylibentsyyliftalaatti, BBP       | 0,1                          |
| dibutyyliftalaatti, DBP              | 0,1                          |
| di-isobutyyliftalaatti, DIBP         | 0,1                          |

Enimmäispitoisuudet ovat ilmaistuna painoprosentteina homogeenisessa materiaalis-  
sa. Homogeenisella materiaalilla tarkoitetaan tässä tapauksessa koostumukseltaan ta-  
saista materiaalia, jota ei voida erotella mekaanisesti eri materiaaleiksi, esimerkiksi  
älypuhelimien tai kannettavan tietokoneen muovikotelo, juotokset tai johtojen kuparijoh-  
timet. Mekaanisella erottelulla tarkoitetaan esimerkiksi kiertämistä, leikkaamista tai jau-  
hamista [12].

EU on elektroniikkajätteen käsittelyssä ja lainsäädännössä melko edistynyt. Yhdisty-  
neet kansakunnat on arvioinut, että esimerkiksi Yhdysvaltojen sähkö- ja elektroniikka-  
laiteromusta 10–40 % viedään maasta, vaikka sitä vastaan on olemassa kansainvälisiä  
lakeja. Syynä lienee se, ettei elektroniikkaromun vientiä ole saatu tehtyä laittomaksi,  
sillä yrityksistä huolimatta e-jätettä koskevia lakiehdotuksia ei ole hyväksytty USA:n  
kongressissa. [13] Noin 25 osavaltiosta löytyy jonkinlainen lainsäädäntö koskien elekt-  
roniikkaromua, mutta koska liittovaltiollinen laki uupuu, ovat romun käsittely- ja kierrä-  
tyskäytännöt hyvin epäjohdonmukaisia [14]. Muualla maailmassa elektroniikkajätettä  
koskevat lait ovat hyvin vaihtelevia tai puuttuvat kokonaan. Esimerkiksi Intiassa otettiin  
käyttöön useita romua koskevia säädöksiä vuonna 2012, mutta niiden vaikutus laa-  
jemmin jäi pieneksi. [15]

### 3.2 Sähkö- ja elektroniikkalaiteromun ympäristö- ja terveys- haitat

Sähkö- ja elektroniikkalaiteromun vaikutuksia maaperään, veteen, ilmaan sekä ihmiseen on tutkittu 2000-luvulla runsaasti. Ympäristön saastumista aiheutuu välittömästi romun vääränlaisesta käsittelystä, esimerkiksi polttamisesta, ja toisaalta välillisesti sen kuljettamisesta ulkomaille, tyypillisesti köyhiin, kehittyviin maihin. Elektroniikkajätteen oikeanlainen käsittely ja kierrätys on vielä melko kallista työtä, jonka vuoksi sitä myydään esimerkiksi Kiinaan ja Intiaan. Tällaisissa elektroniikkajätkekeskitymissä työntekijät ovat usein heikko-osaisia ja puutteellisesti suojattuja, joten he altistuvat useille terveysriskeille. [16] Luvun lopussa esitellään tarkemmin edellä mainittu tapaus Kiinan Guiyusta.

Elektroniikasta löytyvät raskasmetallit, kuten kadmium ja lyijy, ovat alkuaineita eivätkä poistu luonnon kiertokulusta koskaan. Ne kertyvät luonnossa eläviin organismeihin sekä eläinten ja kalojen elimistöihin. Raskasmetalleja esiintyy ympäristössä luonnollisesti, mutta esimerkiksi teollisuus ja kaivostoiminta on lisännyt metalleille altistumista merkittävästi. Haitallista ainetta päätyy ihmisen verenkiertoon saastuneen ruuan ja veden kautta, mutta myös hengitysteitse, sillä jotkin raskasmetallit pystyvät sitoutumaan ilmassa leijuviin hiukkasiin. [17]

Ihmisen terveydelle haitallisia, yleisiä elektroniikan raskasmetalleja ovat juuri lyijy, elohopea ja kadmium, joista kadmium on luokiteltu syöpää aiheuttavaksi, lyijy todennäköisesti ja elohopea mahdollisesti syöpää aiheuttavaksi aineeksi. Ne vaikuttavat erityisesti lapsilla keskushermostoon sekä munuaisiin, ja esimerkiksi kadmiumin vaikutus sikiöihin on huolestuttavaa. [18] Tapauksia eri raskasmetalleille altistumisista on ilmennyt ja tutkittu runsaasti ympäri maailman. Esimerkiksi 1950-luvulla Japanissa syntyi vaikeasti kehitysvammaisia lapsia, kun odottavia äitejä altistui elohopealle syötyään saastunutta kalaa. [19]

Elektroniikan muoviosissa käytetyt bromatut palonestoaineet, polybromatut difenyylietterit eli PBDE:t, ovat aineita, jotka poistuvat luonnosta ja elimistöistä hitaasti. Niiden välittömästä myrkyllisyydestä ei juurikaan löydy näyttöä, mutta koska niiden on todettu kertyvän luontoon ja elimistöön, on niiden käyttöä rajoitettu EU:ssa RoHS-direktiivillä. [20] Polyklooratut bifenyylit, eli PCB-yhdisteet ovat öljymäisiä kestäviä nesteitä, jotka palavat huonosti. Niillä on pitkä puoliintumisaika, ne kertyvät ravintoketjussa ja ovat erityisen myrkyllisiä vesieliöille. Elimistössä PCB-yhdisteet kertyvät rasvakudokseen ja maksaan, ja ne aiheuttavat myös syöpää. [21] Yhdisteitä on tyypillisesti käytetty läm-

pöeristeinä kondensaattoreissa ja muuntajissa, mutta niitä sisältävien sähkölaitteiden valmistus on nykyään useissa maissa kiellettyä, Suomi mukaan lukien. [22] Lisäksi direktiivissä on rajoitettu muoviosien pehmentämiseen käytettyjä ftalaatteja, kuten dibutyyliftalaattia, vaikka sen puoliintumisaika on nopea ja sille voi altistua esimerkiksi maitotuotteita syötäessä. Tutkimusten mukaan ftalaateille altistuminen voi olla kytköksissä esimerkiksi lisääntymisjärjestelmän häiriöihin, astmaan tai kohonneeseen rintasyöpäriskiin. [23]

CFC-yhdisteet (englanniksi *chlorine-fluorine-carbon*, CFC) eli freonit ovat otsonikerrosta tuhoavia yhdisteitä. Yläilmakehään joutuessaan yhdisteestä irtoaa UV-säteilyn vaikutuksesta klooriradikaali, joka vapautuessaan kykenee hajottamaan kolmeatomisia happimolekyylejä eli otsonia. Yksi klooriradikaali pystyy hajottamaan 100 000 otsonimolekyyliä, mikä tekee siitä tehokkaan otsonikadon aiheuttajan. [24] Sen käyttö on laajalti jo lopetettu, mutta sitä löytyy esimerkiksi vanhoista kylmälaitteista.

Kiinan Guiyu on yksi maailman tunnetuimmista elektroniikkalaiteromun käsittelykeskuksista. Elektroniikkaromu on tärkeä elinkeino pienessä kaupungissa, ja sitä pyöritetään pienten, perheomisteisten kojujen voimin. Vaikka arvokkaiden osien erottelu ja myynti on kriittinen tulonlähde asukkaille, romun vääränlainen käsittely ja puutteelliset suojarusteet ovat alueelle mittava ympäristö- ja terveysuhka. Materiaaleja erotellaan toisistaan esimerkiksi polttamalla, jolloin myrkyllisiä aineita ja yhdisteitä vapautuu ilmaan. Kuvassa 2 nähdään esimerkkejä ihmisten työolosuhteista Guiyussa.



**Kuva 2.** Elektroniikkaromun käsittelyä Guiyussa [25].

Guiyun saastumisesta on tehty useita tutkimuksia. Greenpeacen raportin mukaan kaupungin ilmasta löydettiin useita eri raskasmetalleja ja muita myrkyllisiä yhdisteitä [22]. Partikkeleita sekä myrkyllisiä yhdisteitä vapautuu ilmaan tyypillisesti, kun elektroniikkaromua poltetaan ja sulatetaan, kuten kuvassa 2. Eräitä tällaisia yhdisteitä ovat polyklooratut dibentso-para-dioksiinit ja polyklooratut dibentsofuraanit (PCDD/F), ja arvion

mukaan kaupungin asukkaiden hengittämä määrä ylittää suositellun turvallisen tason 15–56-kertaisesti. Raskasmetalleista esimerkiksi kromin pitoisuus Guiyun ilmassa oli 36 kertaa suurempi kuin teollisuusalueella Korean Tajionissa.

Ilman lisäksi myös Guiyun maaperä ja vesistöt ovat raportin mukaan saastuneita. Alueet, joilla elektroniikkaromua poltettiin ja sulatettiin, sisälsivät runsaasti PBDE- ja PCB-yhdisteitä sekä raskasmetalleja, mutta saastuttavia aineita löydettiin huomattavasti myös ympäröiviltä alueilta. Vaikka yhdisteet maaperässä vähenivät kauemmas siirryttäessä, saasteiden määrä esimerkiksi Guiyua ympäröivillä riisipelloilla ylitti puhtaiden vertailukohteiden raja-arvot. Yhdisteiden lisäksi ympäristöstä löytyi palaneita johtoeristeitä ja muovin jämiä sekä muuta roskaa. [26] Kuvassa 3 nähdään Guiyussa sijaitseva saastunut joki. [27]



**Kuva 3.** Saastunut joki Guiyussa 2015 [27].

Kuten jo aiemmin kappaleessa mainittiin, raskasmetalleista muun muassa lyijy on ihmiselle myrkyllistä. Huolestuttavaa on muun muassa sen vaikutus kognitiiviseen kehitykseen ja älykkyydosamäärään. Lyijylle altistumista mitataan tyypillisesti verestä, ja yli 10 µg/dl on pidetty kohonneena, mahdollisesti haitallisena tasona. Guiyun lasten keskimääräinen lyijypitoisuus veressä oli 15,3 µg/dl, ja 82 %:lla testattavista pitoisuus ylitti turvallisen tason. Lapset olivat alle 6-vuotiaita, eivätkä he työskennelleet elektroniikkaromupajoilla. Kaupungin lapset altistuivat suhteettomasti vakavammin lyijylle kuin muualla Kiinassa.



### 3.3 Sähkö- ja elektroniikkalaiteromun hyödyntäminen ja sen tarjoamat mahdollisuudet

Sen lisäksi, että elektroniikkaromu ei ole biohajoavaa ja sisältää ympäristölle ja terveydelle haitallisia aineita, on sen nykyinen käsittely valtavaa resurssien hukkaan heittämistä. Huolta on herättänyt muun muassa tiettyjen raaka-aineiden saatavuus tulevaisuudessa, vaikka samaan aikaan elektroniikkaromu sisältää useita arvokkaita materiaaleja, kuten platinaa, kobolttia ja muita maametallimineraaleja. Tuhat kilogrammaa älypuhelimia sisältää enemmän puhdasta kultaa kuin tuhat kilogrammaa kultamalminia. Arvion mukaan maapallon kullasta jopa 7 % löytyy elektroniikkaromusta. [9, s. 11]

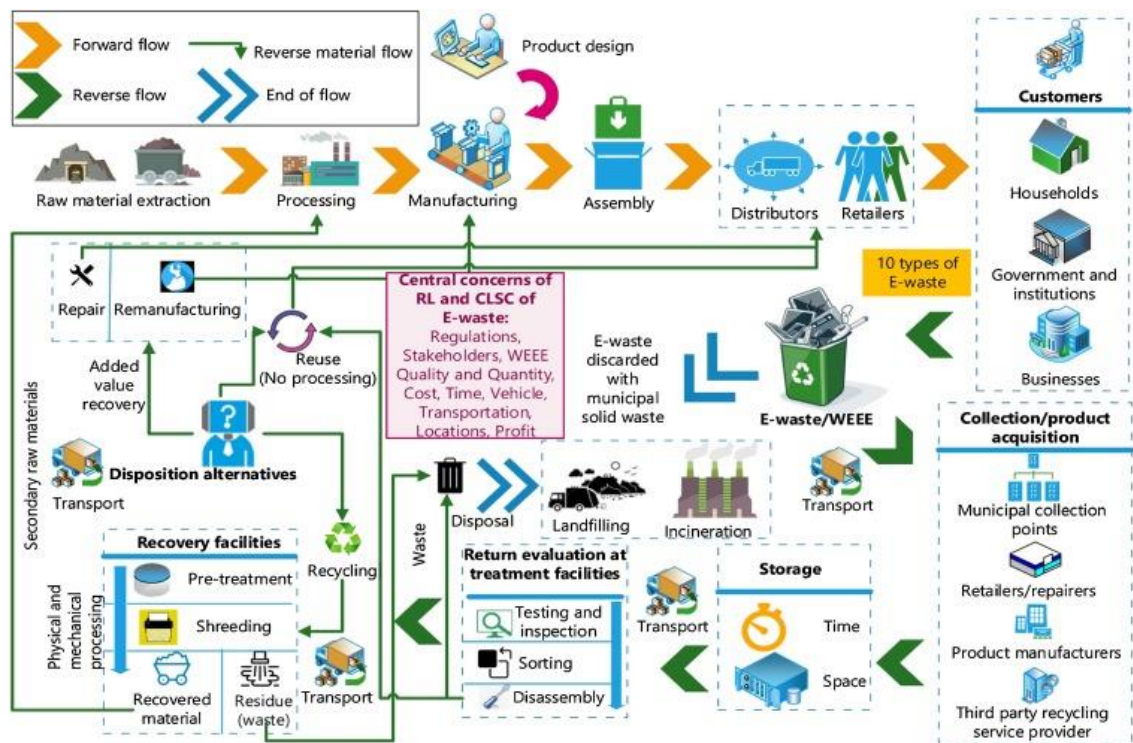
Kobolttia taas käytetään muun muassa kannettavien tietokoneiden ja älypuhelimien akuissa, ja sitä on työlästä louhia. Silti sen talteenotto-prosentti on vain 30 % luokkaa, vaikka tekniikka mahdollistaisi 95 %:n kierrätyksen. Kierrätysmetallin energiatehokkuus on 2–10-kertainen verrattuna malmista jalostettuun metalliin. Lisäksi metallien kerääminen elektroniikkaromusta synnyttää 80 % vähemmän hiilidioksidipäästöjä kuin niiden louhiminen kaivoksista. [9, s. 11]

Kaiken kaikkiaan elektroniikkaromun arvo on useita miljardeja dollareita. Vuonna 2017 pelkästään älypuhelimia myytiin 1,46 miljardia kappaletta, joiden komponenttien arvo oli noin 100 dollaria yhtä laitetta kohden. Kierrätettynä raakamateriaalien arvo voisi ylittää jopa 11 miljardiin dollariin. Kuitenkin parempi arvo komponenteille ja materiaaleille saadaan tuotteiden uudelleenkäytön kautta. [9, s. 15]

Kiertotalouteen tähtäävillä, paremmilla liiketoimintamalleilla elektroniikan hintaa voitaisiin pienentää kuluttajille jopa 7 % vuoteen 2030 mennessä. Elektroniikkaromun kierrätys on jo mahdollistanut tuhansia turvallisia työpaikkoja useissa maissa. Iso osa uusista työpaikoista olisi matalapalkkaisia, mutta alan kehittyessä ja laajentuessa syntyisi tarve uusille suunnittelijoille ja asiantuntijoille. [9, s. 18]

## 4. ELEKTRONIKKAROMUN MINIMOINTI TUOTE-SUUNNITELULLA

Edellisessä luvussa läpi käytyjen asioiden valossa on selvää, että elektroniikkalaiteromu on erittäin haitallista ympäristölle ja terveydelle. Siksi onkin tärkeää, että vanhat elektroniikkalaitteet saataisiin kierrätettyä ja hyötykäytettyä niin, ettei jätettä enää synny. Kuvassa 4 on esitetty suljetun toimitusketjun malli elektroniikkaromulle.



**Kuva 4.** Suljettua toimitusketjua havainnollistava malli [28].

Keltaiset nuolet kuvaavat uusien tuotteiden kulkua markkinoille ja vihreät nuolet kuvaavat käytettyjen tuotteiden kulkua takaisin tuotantoon. Käytettyjä tuotteita voidaan tarkastuksen jälkeen käyttää joko uudelleen sellaisenaan tai purettuina osina uudelleen-tuotannossa. Lisäksi tuotteista voidaan ottaa talteen materiaaleja, esimerkiksi metalleja ja muovia, joita voidaan käyttää tuotantoprosessissa uusien tuotteiden valmistukseen. Osa tuotteista ja materiaaleista päättyy toimitusketjun ulkopuolelle, esimerkiksi kaatopaikoille tai poltettavaksi. Kuvassa tätä on havainnollistettu sinisillä nuolilla, ja ihanteellisesti tällaista jätettä ei syntyisi ollenkaan.

Uusien kierrätys- ja talteenottomenetelmien, automatisoitujen laitteistojen, robottien ja muiden innovaatioiden lisäksi täytyy ongelmaa lähestyä myös tuotesuunnittelun kannalta. Suunnitteluvaiheessa määräytyy suurin osa tuotteen taloudellisista kuluista ja saman voidaan arvioida pätevän ympäristövaikutuksiin [29]. Kestävässä suunnittelussa on otettava huomioon tuotteen koko elinkaari, ei pelkästään tuotantoa tai käyttöä. Olennaisia asioita ovat muun muassa tuotteiden tehokas uudelleenkäyttö ja kierrätys. Seuraavissa aliluvuissa käsitellään keskeisimpiä tuotesuunnittelun strategioita jätteen eliminoimiseksi ja kestävän kehityksen edistämiseksi.

## 4.1 Tuotteen purkaminen

Elektroniikkalaitteet sisältävät lähes poikkeuksetta useita eri materiaaleja ja komponentteja, mikä monimutkaistaa laitteiden uudelleen hyödyntämistä. Sähköisten komponenttien kiinnitys piirilevyyn on hyvin erilaista kuin piirilevyn kiinnitys koteloon, ja toisaalta johdon kiinnitys molempiin tukevasti ja kestävästi vaatii myös erilaisen kiinnitystavan. Tuotteen osiin purkamisen vaikeus onkin merkittävä tekijä tuotteen kierrätyksen kannalta. Laitteiden purkamiselle on kolme olennaista hyötyä kestävän kehityksen kannalta: hyväkuntoisia komponentteja käytetyistä laitteista voidaan ottaa talteen ja käyttää sellaisenaan uusissa laitteissa, komponentteja tai osakokoonpanoja voidaan ehostaa uudelleenkäyttöä varten ja toisaalta purettavista laitteista voidaan kerätä hyödyllisiä materiaaleja, kuten muovia, kierrätystä varten. [30]

Design for Disassembly eli DfD keskittyy tuotesuunnittelussa laitteen purkamiseen liittyviin tekijöihin. Laitteen purkutavat voidaan jaotella karkeasti kahteen kategoriaan: laitetta vaurioittavaan ja ei-vaurioittavaan purkuun. Jälkimmäinen voidaan jaotella vielä kahteen kategoriaan: kokopurkuun ja selektiiviseen purkuun. Laitteen purkaminen kokonaan osiksi ei yleensä ole käytännöllistä, sillä se vaatii liikaa resursseja, kuten aikaa, rahaa ja työtunteja. [30] Lisäksi purku on usein manuaalista työtä, ja työntekijöiden altistumista elektroniikkaromun haitallisille aineille tulisi välttää. Näiden syiden takia purkua suunniteltaessa on huomioitava, mitä prosessilla halutaan saavuttaa: jos tavoitteena on esimerkiksi materiaalien kierrätys, ei välttämättä kannata tuhjata resursseja laitteen huolelliseen, ei-vaurioittavaan purkuun. [30]

Selektiivisessä purussa laitteita puretaan siten, että ne ovat vielä koottavissa takaisin. Prosessissa halutut perusrakennneosat irrotetaan laitekokoonpanosta niin, etteivät mitkään muutkaan osat vaurioidu purkamisen johdosta. Tämä johtaa pienempien, yksinkertaisempien osakokonaisuuksien syntymiseen. Selektiivisellä purkamisella voidaan saavuttaa useita hyötyjä, joista olennaisimpia ovat laitteen parempi korjattavuus ja kierrätettävyyys. Selektiivisellä purkamisella pyritään usein helpottamaan tuotteen huoltoa,

vian diagnosointia ja korjausta. Huoltohelppous lisää tuotteen ikää, asiakastyytyvyyttä ja vähentää esimerkiksi takuukuluja. Toisaalta osakokoonpanot voivat toimia varaosina tai niitä voidaan jopa käyttää uusien laitteiden komponentteina. Kierrätettäväksi tarkoitettujen materiaalien irrotusta sekä lian ja epäpuhtauksien poistamista pyritään helpottamaan, jolla maksimoidaan hyödynnettävän materiaalin määrä. Esimerkiksi asiakaskäytöstä palautetut suuret kopiokoneet voidaan selektiivisesti purkaa siten, että arvokkaat osakokoonpanot kuten moottorit puretaan ehjänä uudelleenkäyttöä varten, mutta kierrätyksessä murskattavaksi päätyvä muovi voidaan purkaa voimakkein. [31] Selektiivisellä purkamisella voidaan noudattaa myös ympäristömääräyksiä, joilla pyritään estämään saasteiden päätymistä luontoon, josta esimerkkinä voitaisiin mainita vaikkapa jäähdytysnesteen tai moottoriöljyn talteen kerääminen. [30]

## 4.2 Tuotteen kokoaminen

Yksinkertaisetkin elektroniikkalaitteet koostuvat monista perusrakenneosista. Kuitenkin suurin osa elektroniikasta nykyään on rakenteeltaan monimutkaista ja sisältää useita funktionaalisia lohkoja, jotka muodostavat lopullisen tuotteen. Esimerkiksi kannettava tietokone sisältää kymmeniä toiminnallisia lohkoja, kuten näyttö, näppäimistö, prosessori ja virransyöttö. Niistä jokainen osakokoonpano on tärkeä laitteen toiminnan kannalta.

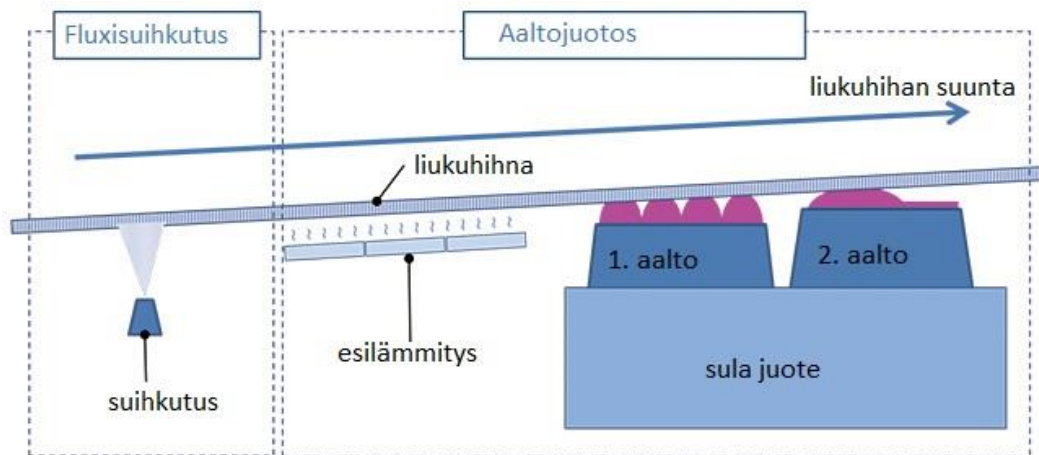
DfA (*engl.* Design for Assembly) tarkoittaa tuotesuunnittelua kokoamisen helppouden näkökulmasta. Laitteen tuotantonopeus riippuu suoraan siitä, kuinka nopeasti tuote voidaan koota, ja toisaalta helposti koottava tuote valmistuu todennäköisesti lyhyemmässä ajassa. DfA:n rooli on kestävän kehityksen kannalta merkittävä siitäkin syystä, että tuotteen kokoamista tarvitaan niin valmistuksessa, kuin vaikkapa laitetta korjattaessa tai uusiotuotannossa. [30]

DfA:n päätarkoitus on pienentää tuotantokuluja yksinkertaistamalla ja helpottamalla tuotteen kokoamista. Usein toimet johtavat muihinkin hyötyihin, kuten laadun ja luotettavuuden paranemiseen sekä tuotantovälineiden vähenemiseen ja osavarastojen pienemiseen. Tuotantoprosessin suunnittelussa on otettava huomioon muun muassa haluttu tuotantonopeus, työvoiman saatavuus, tuotteen elinikä suhteessa tuotantonopeuteen ja siihen käytetyt resurssit. On siis löydettävä tasapaino tuotteen toimivuuden, tuotannon ja koottavuuden välillä. [30]

Tuotteen kokoaminen voidaan pääsääntöisesti toteuttaa kolmella tavalla: manuaalisesti, automatisoidusti tai robotisoidusti. Manuaalisessa kokoamisessa käytetään apuvälineinä korkeintaan yksinkertaisia työkaluja, kuten ruuvimeisseleitä tai pihtejä. Tuotanto-

kulut laitetta kohden pysyvät vakiona tuotantomäärästä riippumatta, ja kiinteät kulut koostuvat lähinnä työkalujen hankinnasta. Tuotannon nopeus riippuu työntekijöiden määrästä, jonka takia manuaalinen kokoaminen suurella volyymillä ei välttämättä ole kannattavaa. [30]

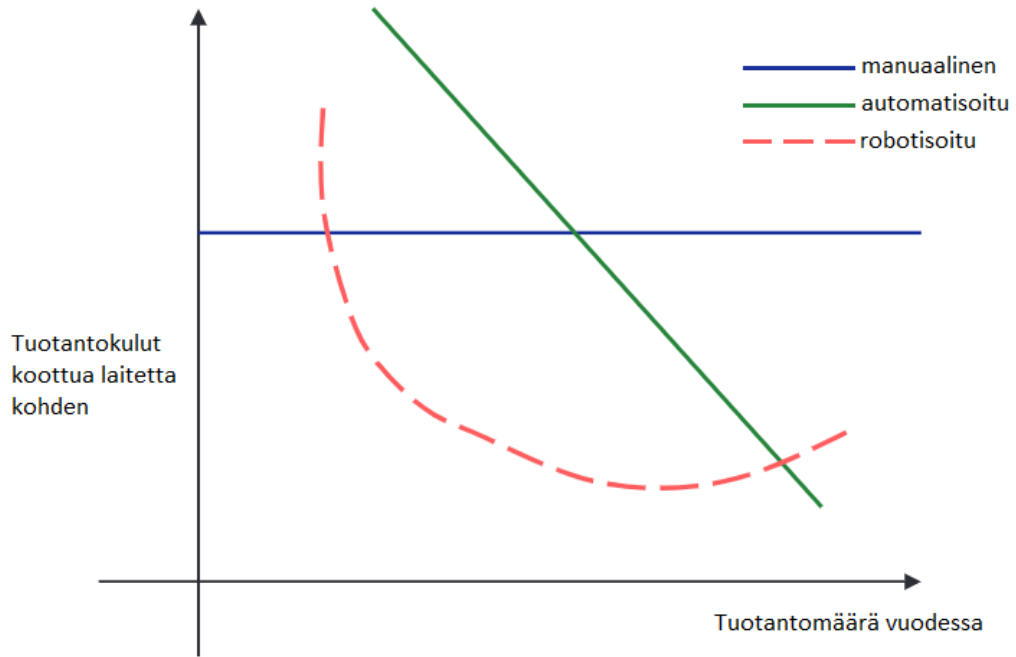
Automatisoidulla kokoamisella tarkoitetaan automatisoitua laitteistoa tai konetta, joka on tyypillisesti suunniteltu yhden tuotteen kokoamiseen. Esimerkiksi piirilevyille suoritettu juotostekniikka, aaltojuotos, voidaan suorittaa automatisoidulla laitteistolla. Sen periaate nähdään kuvasta 5.



**Kuva 5.** Aaltojuotoksen periaate, muokattu lähteestä [32].

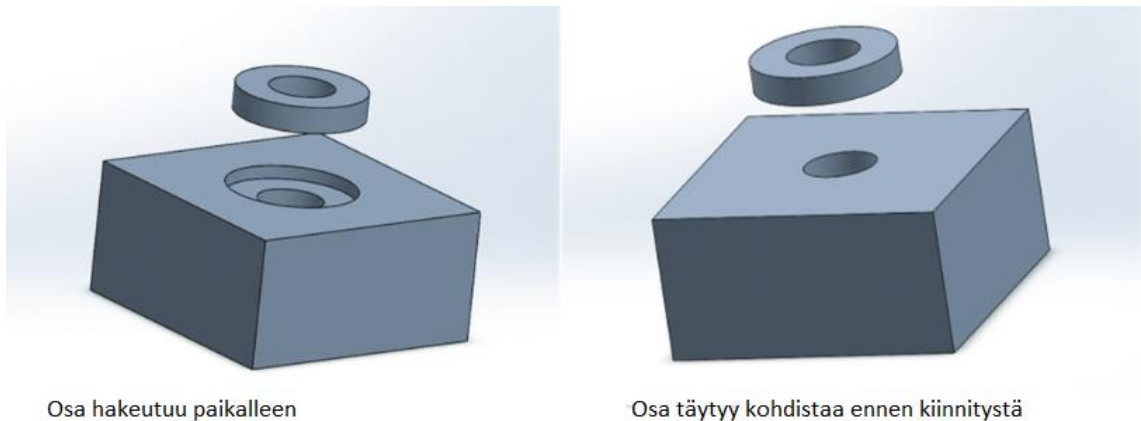
Prosessissa ruiskutetaan piirilevyn juotettavalle puolelle juoksute, jonka jälkeen se lämmitetään. Esilämmitetty piirilevy ohjataan juoteaallon yli, joka liittää komponentit piirilevyn juotettaville pinnoille. Tämän jälkeen levy vielä jäähdytetään. [32] Automatisoitu laitteisto on usein kallis investointi, mutta se tarjoaa manuaalista työtä nopeamman tuotantotahdin, ja toisaalta kulut valmistettua laitetta kohden pienenevät, kun tuotantovolyymia kasvatetaan [30].

Robotisoitu tuotanto on kallein vaihtoehto, mutta tarjoaa muutamia hyötyjä kilpailijoihinsa nähden. Robotit ovat uudelleenohjelmoitavissa, niillä ylletään automatisoitujen laitteistojen tuotantonopeuteen tai jopa yli ja ne ovat monipuolisempia. [30] Kuvassa 6 on havainnollistettu kulujen ja tuotantomäärän suhdetta kullakin tuotantometodilla.

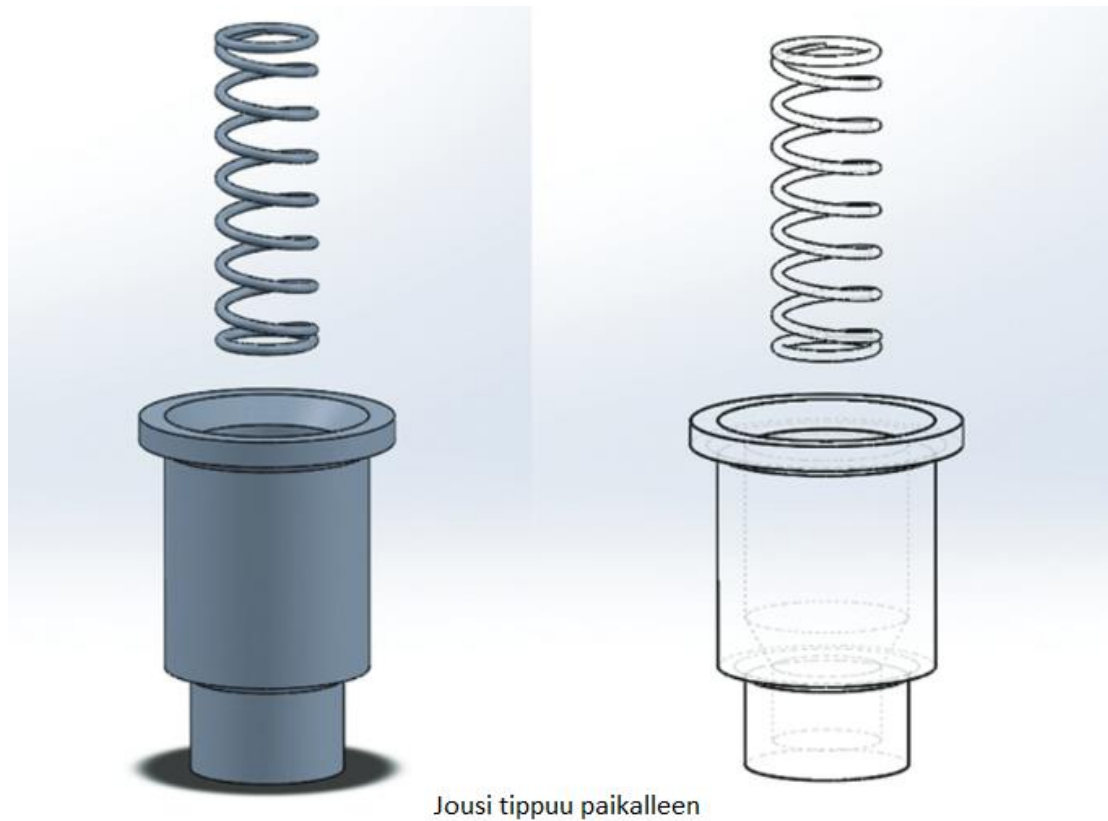


**Kuva 6.** Tuotantokulut laitetta kohden vuosittaisen tuotantomäärän funktiona, muokattu lähteestä [30].

Tuotantotapaa valittaessa on siis punnittava laitteistojen hankintahintaa, työvoiman hintaa, haluttua tuotantomäärää ja -tahtia sekä esimerkiksi laitteen yksinkertaisuutta tai monimutkaisuutta. Lisäksi jokaisella tuotantotavalla on omia suunnittelussa huomioon otettavia kriteereitä ja keinoja, joilla kokoamisesta saadaan tehokkaampaa. Kuvissa 7 ja 8 on havainnollistavia suunnitteluesimerkkejä, joilla helpotetaan osien kokoamista.



**Kuva 7.** Alakappaletta muokkaamalla priikkaa ei tarvitse kohdistaa ennen kiinnitystä, muokattu lähteestä [30].



**Kuva 8.** Jousi putoaa paikoilleen alakappaleeseen tehtyjen viistojen vuoksi, muokattu lähteestä [30].

Tuotetta koottaessa osien, kuten ruuvien, asettaminen paikoilleen kannattaa tehdä vertikaalisesti, sillä näin voidaan parhaiten hyödyntää painovoimaa. Itsekseen paikalleen hakeutuvia osia, kuten kuvassa 7 oleva jousi, tulee hyödyntää mahdollisimman paljon. Osien liittäminen toisiinsa tulee olla yksinkertaista ja kokoamisprosessin aikaista osien uudelleen orientoimista ja asentamista tulisi välttää. Osien kannattaa olla joko täysin symmetrisiä tai selkeästi epäsymmetrisiä helpon orientoimisen saavuttamiseksi. [33]

### 4.3 Tuotteen korjaus, modulaarisuus ja osien uudelleenkäyttö

Kuten aiemmissa luvuissa on todettu, elektroniikkalaitteet ovat kehittyneet ja monimutkaistuneet valtavasti viime vuosikymmenten aikana. Samalla niiden huolto on hankaloitunut. Esimerkiksi autoissa monia toimintoja valvotaan ja ohjataan erilaisten sensoreiden ja tietokoneiden avulla. Korjaus vaatii yleensä aina ammattitaitoista työntekijää, ja on yksi ainoista osioista, joka vaatii manuaalista työtä. Se on usein myös kallista kuluttajille. Taulukkoon 4 on koottu älypuhelinien yleisten korjausten hintoja Suomessa.

Taulukko 4. Kolmen yleisen älypuhelinmallin korjaushintojen vertailua [34].

| Älypuhelimien malli    | Huolto              | Hinta (€) |
|------------------------|---------------------|-----------|
| Samsung Galaxy Note 10 | näyttölasiin vaihto | 489       |
|                        | akun vaihto         | 89        |
|                        | takakuoren vaihto   | 99        |
| Iphone 11              | näyttölasiin vaihto | 299       |
|                        | akun vaihto         | 89        |
|                        | takakuoren vaihto   | 199       |
| Nokia 8.1              | näyttölasiin vaihto | 169       |
|                        | akun vaihto         | 59        |
|                        | takakuoren vaihto   | 79        |

Kuten taulukosta käy ilmi, näyttölasiin vaihto on kallista verrattuna muihin korjauksiin, vaikka se on yleisin syy älypuhelimien huoltoon joutumiselle [35]. Usein se on myös kohtuuttoman kallista, sillä esimerkiksi käytetyn, hyväkuntoisen Samsung Galaxy Note 10:n hinta taulukon huoltoliikkeessä on 539 euroa. Kuluttajan näkökulmasta uuden laitteen hankkiminen rikkoutuneen tilalle on monesti taloudellisesti kannattavinta.

Sulautettujen järjestelmien yhteydessä puhutaan usein modulaarisuudesta ja sen tarjoamista hyödyistä. Modularisointi tarkoittaa yksinkertaisesti systeemin jaotteluja pienempiin osiin, moduuleihin, joita voi yksilöllisesti luoda, muokata, korvata tai vaihtaa toisiin moduuleihin. [30] Lohkoilla tulisi olla selkeä funktio, ja niiden testaaminen erillisenä yksikkönä helpottaa tuotteen suunnittelua. Esimerkiksi pöytätietokoneen virtalähde voidaan ajatella moduuliksi ja sen toiminta voidaan testata ilman muita tietokoneen osia. Modulaarisuus vähentää suunnittelukuluja, sillä funktionaalisia lohkoja voi käyttää uudelleen tai muokata ja skaalata sopiviksi uusiin tuotteisiin. Kun uusia lohkoja kehitetään harvoin, vanhat tulevat testatuksi useammin ja viat vähenevät. [33]

Modulaarisuudella voidaan tehostaa tuotteen osien ja komponenttien uudelleenkäyttöä. Sen saavuttamiseksi tärkeimpiä huomioon otettavia tekijöitä ovat teknologian stabiilius, toiminnallisuuden päivityksen mahdollisuus, osan pitkäikäisyys ja tuotteen laadun takaamisen sekä huollon helpous. Jos osia on vaikea irrottaa, puhdistaa ja ehostaa tai teknologia on vanhentunutta, voi niiden uudelleenkäyttö käydä taloudellisesti kannattamattomaksi. [30]

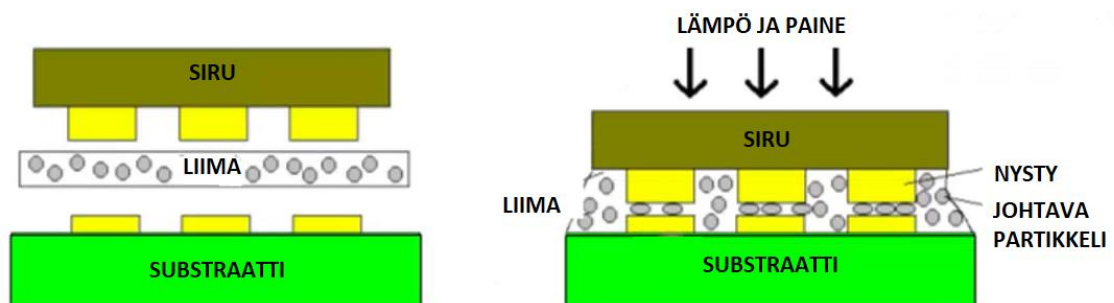


#### 4.4 Tuotteen materiaalivalinnat ja kierrätys

Osien uudelleenkäytön lisäksi elektroniikkalaitteet voidaan purkaa siten, että niissä käytetyt materiaalit voidaan kierrättää. Kuten luvussa 4.1 todettiin, materiaalin erottelun ja kierrätyksen kannalta ei laitteen ja sen osien ehjyydellä ole merkitystä. Näin ollen kierrätettävien osien purku ei vaadi varovaisuutta ja on usein halvempaa verrattuna purkutapoihin, joissa ei vaurioiteta tuotetta. Yleisiä kierrätystapoja ovat murskaaminen ja silppuaminen, joista silppuamista käytetään esimerkiksi autojen kierrätyksessä. Silppuamisen jälkeen ferromagneettiset aineet kerätään talteen magneettien avulla. Murskaamisen ja silppuamisen etuina ovat työn halpuus, mutta haittana epäpuhtauksien päätyminen kierrätysmateriaalin joukkoon. [31, Luku 6]

Tuotesuunnittelussa kierrätystä helpottavat muutamat periaatteet, jotka suurilta osin seuraavat DfA:n, DfD:n ja modulaarisuuden suunnitteluperiaatteita. Haitallisten aineiden, purkamiseen vaadittavien erityistyökalujen ja -mekanismien sekä huonosti kierrätettävien materiaalien käyttöä tulisi välttää. Kierrätysmekanismit ovat pitkälti standardisoituja, ja sellaisia ovat aiemmin mainitut murskaaminen ja silppuaminen. Kierrätysominaisuuksiltaan samanlaiset ja samalla tavalla kierrätettävät materiaalit tulisi näin ollen ryhmitellä yhteen. Elektroniikkalaitteiden sisältämät useat eri materiaalit hankaloittavat kierrätystä, joten tuotteet tulisi suunnitella niin, että kierrätettävät osat on helppo purkaa erilleen. Lisäksi tuotteen kierrätystä koskevaa informaatiota tulisi levittää mahdollisimman laajasti ja tehokkaasti niin kuluttajille kuin kierrättäjillekin. [30]

Materiaalien ja haitallisten aineiden kannalta merkittävä muutos elektroniikassa on ollut lyijyn käytöstä luopuminen juotteissa. Sen tilalle on tullut lyijyttömiä juotteita sekä sähköä johtavia liimoja. [36] Johtavien liimojen myötä yleistyi mikropiirien eli sirujen kiinnitys pakkaukseen flip chip-tekniikalla. Kuvassa 9 esitetään tekniikan peruseriaate.



**Kuva 9.** Flip chip-tekniikka anisotrooppista liimaa käyttäen, muokattu lähteestä [37].

Flip chip-tekniikka tarkoittaa, että siru kiinnitetään koteloon aktiivinen puoli alaspäin johtavien nystyjen avulla. Kiinnitys voi tapahtua reflow -tekniikalla tai johtavia liimoja käyttäen. Kuvan 8 tapauksessa kiinnityksessä on käytetty anisotrooppista liimaa, joka alkaa

johtaa vasta sitten, kun siru painetaan koteloon kiinni ja nystyjen väliin jää johtavia partikkeleita. Reflow -tekniikassa piirilevyille levitetään juotepastaa juotettaviin kohtiin, jonka jälkeen komponentit asetetaan paikalleen. Piirilevy ohjataan reflow -uunin läpi, jonka oikeanlainen lämpöprofiili sulattaa juotteen ja liittää siten komponentit piirilevyyn rikkomatta niitä. Flip chip -tekniikalla voidaan tehdä pienempiä ja matalampia komponentteja kuin perinteisemmän lankaliitostekniikan avulla. [37]

## 5. TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT

Elektroniikkaromun käsittelyyn on kehitetty useita erilaisia tekniikoita. Perinteisen murskaamisen tai polttamisen sijasta purkamiseen voidaan käyttää robotteja. Apple julkaisi vuonna 2018 Daisy-nimisen robotin, joka kykenee purkamaan jopa 200 iPhonea tunnissa [38]. Robotti koostuu neljästä moduulista, joissa ensimmäisessä irrotetaan puhelimesta näyttö ja toisessa akku. Kolmannessa moduulissa poistetaan ruuvit ja viimeisessä vaiheessa irrotetut osat ja komponentit päätyvät liukuhihnalle, josta ne lajitellaan manuaalisesti. [39] Samantyylistä automatisoitua, urbaania louhintaa on tutkittu myös Euroopassa. Automated disassembly, separation and recovery eli ADIR oli EU:n rahoittama projekti, johon osallistui useita yrityksiä. Sen tarkoitus oli tutkia ja kehittää teknologiaa elektroniikkaromun tehokkaampaan hyödyntämiseen. [40] Laitteisto poimii kännykän liukuhihnalta, purkaa sen kotelon ja irrottaa siitä akun. Piirilevy ohjataan seuraavaan vaiheeseen, jossa siitä otetaan 2D- ja 3D-kuvia lasereiden avulla. Niin sanotulla laserindusoidulla hajoamisspektrillä eli LIBS-tekniikalla (*engl.* laser induced breakdown spectroscopy) mitataan ja analysoidaan piirilevyn sisältämiä arvokkaita materiaaleja, kuten tantaalia kondensaattoreissa, jonka perusteella halutut komponentit paikannetaan, irrotetaan ja kerätään talteen. [41] Hanke päättyi vuonna 2019 ja sai EU:lta yli 5 miljoonaa euroa [40], mutta projektin yhteenveto ja tulokset ovat huonosti saatavilla.

Kuten luvussa 3.3 mainittiin, elektroniikkaromusta kerätyn metallin ympäristövaikutukset ovat pienemmät kuin maan kuoresta louhittuna. Jyväskylän yliopiston kemian laitoksella on kehitetty hydrometallurginen prosessi, jolla poltetuista ja murskatuista piirilevyistä saadaan talteen kultaa, kuparia, hopeaa, palladiumia ja muita harvinaisia maametalleja. Metallien liuottaminen happoja hyödyntäen ei ole uutta, mutta vuonna 2020 laitokselle valmistui koelaitteisto, jonka avulla teollisuusprosessia voidaan mallintaa laboratorio-olosuhteita realistisemmin. Prosessissa hyödynnetään elektrolyysiä, saostusta, ioninvaihtoa, neste-nesteuuttoa ja metallien sieppausteknologiaa. Laitteistolla pystytään käsittelemään 1000 kg elektroniikkaromua päivässä ja kultaa voidaan tuottaa 0,5 kg päivässä. Hankkeen johtajan mukaan vastaavaa laitteistoa ei muualta Suomesta löydy. [42] [43]

Materiaalien osalta piikarbidi eli SiC (*engl.* silicon carbide) on ollut viime vuosien aikana suosittu tutkimuksen ja kehityksen kohde erityisesti puolijohdeteollisuudessa. Piikarbidi

kestää hyvin suuria lämpötiloja ja suuria jännitteitä, joten sen käyttö tehoelektronikan sovelluksissa on kasvanut merkittävästi. Pienempien tehohäviöidensä ansiosta piikarbidilla halutaan vähentää hiilipäästöjä erityisesti korkean jännitteen sovelluksissa. Muuntajissa ja inverttereissä SiC-laitteilla voidaan vähentää tehohäviöitä jopa 50 %, järjestelmien kokoa 300 % ja kokonaishintaa 20 %. [44] Piikarbidilla soveltuu vaativiin, korkean energiatehokkuuden sovelluksiin, kuten sähköautoihin. SiC-tekniikan odotetaan pidentävän sähköautojen käyttöikänsä parantamalla inverttereiden hyötysuhteita johtaen samalla pienempiin ja kevyempiin akkuihin. [44]

Yksittäisten materiaali- ja laiteinnovaatioiden lisäksi on tutkittava perinteisten suunnittelutyökalujen ja -menetelmien integroimista kestävästä suunnittelun periaatteisiin. Elinkaarinarviointi eli LCA (*engl.* Life Cycle Assessment) on työkalu, jolla voidaan arvioida tuotteen ympäristövaikutuksia koko sen elinkaaren ajalta. Menetelmää on kuitenkin hankala hyödyntää uuden tuotteen suunnittelussa, sillä prosessien ympäristövaikutuksista ei välttämättä vielä ole tietoa. [29] Kestävä kehitys integroiminen elektroniikkalaitteiden tuotesuunnitteluun kaipaa vielä lisää tutkimusta ja dataa sekä työkaluja sen hyödyntämiseksi tuotesuunnittelussa ja tuotannossa. [45]

## 6. YHTEENVETO

Tutkielman keskeisenä ongelmana oli elektroniikkalaiteromun aiheuttama ympäristötaakka ja sen eliminointi. Teknologian nopean kehityksen vuoksi elektroniikkalaitteet vanhentuvat nopeasti ja jäävät käyttämättömiksi, synnyttäen valtavan määrän biohajomatonta, ympäristöä kuormittavaa jätettä. Arviolta 50 miljoonaa tonnia elektroniikkaromua tuotetaan vuosittain, ja määrä tulee vain kasvamaan, ellei asiaan puututa. Elektroniikka sisältää lisäksi haitallisia aineita, kuten lyijyä ja kadmiumia, jotka ovat haitallisia niin luonnon kuin ihmisen terveydelle. Romusta vain 20 % kierrätetään asianmukaisesti. Loput päätyvät kaatopaikoille tai ympäristölaeiltaan löyhempiin, kehittyviin maihin, joissa sitä työkseen käsittelevät ihmiset altistuvat terveyshaitoille puutteellisten suojaruustusten ja epäasianmukaisten kierrätysmenetelmien vuoksi. EU:ssa elektroniikkaa on säädelty useiden direktiivien voimin, mutta tilanne muualla maailmassa on huonompi.

Työssä haluttiin selvittää, kuinka elektroniikkaromun sisältämä potentiaali voitaisiin hyödyntää, sillä ympäristökuormituksen lisäksi elektroniikkaromu tarjoaa myös mahdollisuuksia: käytöstä poistuneet laitteet sisältävät arvokkaita materiaaleja, kuten kultaa, hopeaa ja kuparia. Työssä selvitettiin, että esimerkiksi hydrometallurgisilla prosesseilla metalleja on mahdollista saada talteen paljon perinteistä louhimista tehokkaammin. Lisäksi kirjallisuudesta kävi ilmi, että elektroniikkakomponentit itsessään ovat usein pitkäikäisiä ja täten hyvin hyödynnettävissä sellaisenaan uudelleentuotannossa. Laitteiden asianmukainen kierrätys voisi synnyttää miljoonien matalapalkkaisten työpaikkojen lisäksi tarvetta myös uusille asiantuntijoille ja suunnittelijoille.

Työssä tutkittiin elektroniikkaromun ja sen ympäristövaikutusten eliminointia tuotesuunnittelun näkökulmasta ja käytiin läpi erilaisia suuntauksia. Design for disassembly eli DfD keskittyy laitteen purkamisen helppouteen. Niin sanotulla selektiivisellä purulla saavutetaan useita hyötyjä: toimivat, käyttökelpoiset osakokoonpanot ja komponentit saadaan talteen uudelleenkäyttöä varten ja lopputuote voidaan kierrättää perinteisempiä menetelmiä käyttäen. Design for assembly eli DfA keskittää tuotteen kokoamiseen ja sen avulla voidaan optimoida tuotantoa hyödyntämällä kokoamisessa painovoimaa, itseksensä paikalleen hakeutuvia ja paikallaan pysyviä osia. Suunnittelemalla tuotteet modulaarisiksi voidaan parantaa luotettavuutta, sillä moduuleja voidaan käyttää uudelleen joko sellaisenaan, skaalaamalla tai muokkaamalla. Näin yksittäiset moduulit tule-

vat testatuksi useampaan kertaan eri konfiguraatioilla, jolloin virheet vähenevät, ja toisaalta uudelleenkäyttö tehostuu.

Kestävä tuotesuunnittelu ja vihreä elektroniikka pyrkii vähentämään ympäristötaakkaa minimoimalla energian tuotannon ja kulutuksen, vähentämällä materiaalien käyttöä ja eliminoimalla tuotteista haitalliset aineet. Tehtävä on yksinkertaisesta ilmaisusta huolimatta vaikea ja monialainen. Työssä havaittiin, että keskeinen tavoite on elektroniikkalaitteiden uudelleenkäyttö joko sellaisenaan, osakokoonpanoina tai komponentteina tai materiaalin kierrätyksenä. Suuri osa elektroniikkalaitteiden ympäristövaikutuksista määräytyy suunnitteluvaiheessa, joten siihen on syytä panostaa.

Työn keskeisin havainto on, että kestävä tuotesuunnittelun ja lupaavien, ympäristöystävällisempien materiaalien kanssa elektroniikkaromun ympäristötaakka on mahdollista eliminoida. On kuitenkin selvää, että ala tarvitsee kehittyvän teknologian lisäksi myös kiertotaloutta tukevia liiketoimintamalleja sekä yhtenäisempää, maailmanlaajuista lainsäädäntöä, jotta elektroniikkaromusta ja sen viennistä päästään eroon.

## LÄHTEET

- [1] M. Molina, F. Rowland, Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone, *Nature* 249, 1974, s. 810–812. Saatavissa: <https://doi.org/10.1038/249810a0>
- [2] The Ozone Hole, British Antarctic Survey, päivitetty 01.04.2017, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 15.03.2022): <https://www.bas.ac.uk/data/our-data/publication/the-ozone-layer/>
- [3] S. Vuori, M. Kivinen, ja S. Aatos, Johdanto kestävän kehityksen kansainväliseen historiaan ja merkkipaaluihin, Geologian tutkimuskeskus, 2022. Saatavissa (viitattu 15.03.2022): <https://docplayer.fi/3090301-Johdanto-kestavan-kehityksen-kansainvaliseen-historiaan-ja-merkkipaaluihin-saku-vuori-mari-tuusjarvi-ja-soile-aatos.html>
- [4] IPCC first assessment report overview, IPCC ja WMO, Climate change: the 1990 and 1992 IPCC assessments, IPCC, Geneve, 1992. Saatavissa (viitattu 15.03.2022): <https://www.ipcc.ch/report/climate-change-the-ipcc-1990-and-1992-assessments/>
- [5] N. Evanson, 25 Years Later: A Brief Analysis of GPU Processing Efficiency, TechSpot. Saatavissa (viitattu 10.04.2022): <https://www.techspot.com/article/2008-gpu-efficiency-historical-analysis/>
- [6] J. X. Wang, Green Electronics Manufacturing, CRC Press, 2012. Saatavissa: <https://learning.oreilly.com/library/view/green-electronics-manufacturing/9781439826690/>
- [7] Q. Song, Z. Wang, J. Li, ja W. Yuan, "Life cycle assessment of desktop PCs in Macau", *Int. J. Life Cycle Assess.*, vsk. 18, nro 3, ss. 553–566, maaliskuu 2013, doi: <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0515-7>.
- [8] Mitä kiertotalous on ja miksi sillä on merkitystä, Euroopan parlamentti, 2015, päivitetty 25.04.2022. Saatavissa (viitattu 07.05.2022): <https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/economy/20151201STO05603/mita-kiertotalous-on-ja-miksi-silla-on-merkitysta>
- [9] A New Circular Vision for Electronics, PACE ja WEF, 2019. Saatavissa (viitattu 06.04.2022): [https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_A\\_New\\_Circular\\_Vision\\_for\\_Electronics.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_A_New_Circular_Vision_for_Electronics.pdf)
- [10] Mitä on SER?, SER-kierrätys, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 23.05.2022): <https://serkierratys.fi/fi/kuluttajille/mitae-on-ser>
- [11] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2012/19/EU sähkö- ja elektroniikkalaiteromusta, 2012. Saatavissa (viitattu 06.04.2022): <http://data.europa.eu/eli/dir/2012/19/oj/fin>
- [12] RoHS - Vaaralliset aineet sähkö- ja elektroniikkalaitteissa, Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes), verkkosivu. Saatavilla (viitattu 06.04.2022): <https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/sahkolaitteet/sahkolaitteiden-vaatimuksia/vaaralliset-aineet-sahko-ja-elektroniikkalaitteissa-rohs>
- [13] A. Singh, Out of Sight, Out of Mind: How the United States Discards E-Waste, Berkeley Political Review, päivitetty 05.12.2019, verkkosivu. Saatavilla (viitattu 06.04.2022): <https://bpr.berkeley.edu/2019/12/05/out-of-sight-out-of-mind-how-the-united-states-discards-e-waste/>

- [14] K. A. Schumacher, L. Agbemabiese, E-waste legislation in the US: An analysis of the disparate design and resulting influence on collection rates across States, *Journal of Environmental Planning and Management*, vol. 64, 2021. Saatavilla: <https://doi.org/10.1080/09640568.2020.1802237>
- [15] R. Turaga, Public Policy for E-waste Management in India, E-waste Roadmap 2023 for India, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.04.2022): <https://greene.gov.in/wp-content/uploads/2020/12/2020120916.pdf>
- [16] G. Gaidajis, K. Angelakoglou, D. Aktsoylou, E-waste: Environmental Problems and Current Management, *Journal of Engineering Science and Technology*, vsk. 3, nro 1, 2010, s. 193–199. Saatavissa: <http://www.jestr.org/downloads/volume3/fulltext342010.pdf>
- [17] Raskasmetallit, Ilmatieteen laitos, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.04.2022): <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/raskasmetallit>
- [18] Riskinarviointi suomalaisten lasten altistumisesta elintarvikkeiden ja talousveden raskasmetalleille, *Eviran tutkimuksia 2/2015*, Evira, 2015. Saatavissa (viitattu 06.04.2022): <https://www.ruokavirasto.fi/globalassets/tietoa-meista/julkaisut/julkaisusarjat/tutkimukset/riskiraportit/riskinarviointi-suomalaisten-lasten-altistumisesta-elintarvikkeiden-ja-talousveden-raskasmetalleille.pdf>
- [19] M. Balali-Mood, K. Naseri, Z. Tahergorabi, M. R. Khazdair, M. Sadeghi, Toxic Mechanisms of Five Heavy Metals: Mercury, Lead, Chromium, Cadmium, and Arsenic, *Frontiers in Pharmacology*, vol. 12, 2021. Saatavissa (viitattu 10.04.2022): <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.643972>
- [20] Palonestoaineet, Terveyden ja hyvinvoinnin laitos, päivitetty 04.05.2022, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.04.2022): <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/ymparistomyrkyt/palonestoaineet>
- [21] Pysyvät orgaaniset yhdisteet, Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu, päivitetty 19.12.2019, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 07.05.2022): <https://www.ymparisto.fi/pop>
- [22] Dioksiinit ja PCB-yhdisteet, Terveyden ja hyvinvoinnin laitos, päivitetty 11.05.2022, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 07.05.2022): <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/ymparistomyrkyt/dioksiinit-ja-pcb-yhdisteet>
- [23] Ftalaatit, Terveyden ja hyvinvoinnin laitos, päivitetty 04.05.2022, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 06.04.2022): <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/ymparistomyrkyt/ftalaatit>
- [24] H. K. Hellsten, Kansainvälinen supersopimus suojelee ilmakehää, *Natura*, vol. 1, 2021. Saatavissa (viitattu 10.04.2022): <https://www.naturalehti.fi/2021/03/05/kansainvalinen-supersopimus-suojelee-ilmakehaa/>
- [25] X. Xu, X. Zeng, H.M Boezen, E-waste environmental contamination and harm to public health in China, *Frontiers of Medicine*, vol. 9, 2015, s. 220–228. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s11684-015-0391-1>
- [26] A. Walters, D. Santillo, Evidence of environmental and health impacts of electronics recycling in China: an update, *Greenpeace International*, 2008. Saatavissa (viitattu 06.04.2022): <https://www.greenpeace.to/publications/impacts-of-e-recycling-china-update.pdf>
- [27] J. Sommer, The world's largest electronic-waste dump looks like a post-apocalyptic nightmare, *Business Insider*, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 03.05.2022): <https://www.businessinsider.com/photos-of-chinas-electronic-waste-dump-town-guiyu-2015-7>



- [28] M. T. Islam ja N. Huda, Reverse logistics and closed-loop supply chain of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)/E-waste: A comprehensive literature review, Resources, Conservation and Recycling, vol. 137, 2018, s. 48–75. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.026>
- [29] K. Ramani, D. Ramanujan, W. Z. Bernstein, F. Zhao, J. Sutherland, C. Handwerker, J. Choi, H. Kim, D. Thurston, Integrated Sustainable Life Cycle Design: A Review, Journal of Mechanical Design, vol. 132, 2010. Saatavissa: <https://doi.org/10.1115/1.4002308>
- [30] A. Desai, Sustainable product design and development, First edition, Boca Raton, CRC Press, 2021.
- [31] Lee H Goldberg, Green Electronics/Green Bottom Line: Environmentally Responsible Engineering, Boston: Newnes, 2000
- [32] Importance of Wave Height Control in Wave Soldering, OMRON Global, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 05.05.2022): <https://www.omron.com/global/en/technology/omrontechnics/vol51/019.html>
- [33] A. Doholi, A. Umbarkar, V. Subramanian, S. Doholi, Two experimental studies on creative concept combinations in modular design of electronic embedded systems. Design Studies, vol. 35, 2010, s. 80-109. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142694X13000768>
- [34] Hinnasto, Fonum, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 07.05.2022): <https://www.fonum.fi/hinnasto>
- [35] O. Karilahti, Yleisin syy viedä älypuhelin huoltoon on käyttäjän kömpelyys – kokeile näitä vinkkejä jo kotona, MTV-Uutiset, 2016. Saatavissa (viitattu 07.05.2022): <https://www.mtvuutiset.fi/artikkeli/yleisin-syy-vieda-alypuhelin-huoltoon-on-kayttajan-kompelyys-kokeile-naita-vinkkeja-jo-kotona/6234506>
- [36] J. Li, X. Zeng, A. Stevels, Ecodesign in Consumer Electronics: Past, Present, and Future, Critical Reviews in Environmental Science and Technology, vol. 45, 2015, s. 840–860. Saatavissa: <https://doi.org/10.1080/10643389.2014.900245>
- [37] K. Laine, Elektroniikkalaitteen tuotesuunnittelu -opintojakson luentovideo, 2021. Saatavissa (viitattu 10.05.2022): <https://tuni.cloud.panopto.eu/Panopto/Pages/Viewer.aspx?id=454cc001-ded2-4cda-8fd6-ad3a00b83257>
- [38] A. Gocha, Apple's new robot, Daisy, recycles high-quality materials from up to 200 devices per hour, The American Ceramic Society, 2018. Saatavissa (viitattu 16.05.2022): <https://ceramics.org/ceramic-tech-today/apples-new-robot-daisy-recycles-high-quality-materials-from-up-to-200-devices-per-hour>
- [39] Sara Dietschy, Apple Made a Robot - Meet Daisy, 2022, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 16.05.2022): <https://www.youtube.com/watch?v=MC81peMLEfo>
- [40] Next generation urban mining - Automated disassembly, separation and recovery of valuable materials from electronic equipment, European Commission, päivitetty 24.09.2020, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 16.05.2022): <https://cordis.europa.eu/project/id/680449>
- [41] R. Noll, C. Fricke-Begemann, S. Connemann, C. Meinhardt, V. Sturm, LIBS analyses for industrial applications – an overview of developments from 2014 to 2018, Journal of Analytical Atomic Spectrometry, vol. 33, 2018, s. 945–956. Saatavissa: <https://doi.org/10.1039/C8JA00076J>
- [42] Kemian laitos vahvistaa laitteistohankinnalla teollisuuden kriittisten metallien talteenoton tutkimusta, Jyväskylän yliopisto, päivitetty 02.04.2019, verkkosivu. Saatavissa (viitattu

16.05.2022): <https://www.jyu.fi/fi/ajankohtaista/arkisto/2019/04/kemian-laitos-vahvistaa-laitteistohankinnalla-teollisuuden-kriittisten-metallien-talteenoton-tutkimusta>

- [43] Metallien talteenotto ja analytiikka, Jyväskylän yliopisto, päivitetty 16.04.2021, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 16.05.2022): <https://www.jyu.fi/science/fi/kemia/tutkimus/kemian-kiertotalous/metallien-talteenotto-ja-analytiikka>
- [44] Silicon Carbide (SiC): The Future of Power?, Arrow, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 16.05.2022): <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/silicon-carbide-the-future-of-power>
- [45] K. Manjunatheshwara, S. Vinodh, Sustainable electronics product design and manufacturing: State of art review, International Journal of Sustainable Engineering, vol. 14, 2021, s. 541–551. Saatavissa: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19397038.2021.1900448>