

Miika Lammintausta

KESTÄVÄ KEHITYS ELEKTRONIIKKALAITTEEN TUOTESUUNNITTELUSSA

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Katja Laine
Elokuu 2022

TIIVISTELMÄ

Miika Lammintausta: Kestävä kehitys elektroniikkalaitteen tuotesuunnittelussa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma
Elokuu 2022

Tämän työn tarkoituksena on selvittää, mitä ympäristöhaittoja elektroniikkalaitteet aiheuttavat ja mitä ratkaisuja elektroniikkalaitteen tuotesuunnitteluvaiheessa voidaan tehdä, jotta elektroniikkalaitteesta aiheutuisi vähemmän haittaa ympäristölle sen elinkaaren aikana. Ympäristöystävällisempien ratkaisujen selvittämisessä keskitytään piirilevyihin ja integroituihin piireihin liittyviin ratkaisuihin.

Työssä on käytetty aineistona Tampereen yliopiston kirjaston sähköisiä materiaaleja. Työssä on myös käytetty kestävästä kehitystä koskevia Euroopan unionin direktiivejä ja niihin liittyviä verkkosivuja sekä esimerkkeinä käytettyjen tuotteiden ja palvelujen verkkosivuja.

Työssä on tutustuttu ensin siihen, mitä kestävä kehitys on ja miten kestävä kehitys voi parantaa yhteiskuntaa. Tämän jälkeen työssä on selvitetty elektroniikkalaitteiden elinkaarianalyysien (engl. Life Cycle Assessment, LCA) avulla, mitä haittoja ympäristölle aiheutuu laitteen elinkaaren eri vaiheissa. Työssä selvitettiin minkälaisilla ratkaisuilla laitteen aiheuttamia haittoja voidaan vähentää, ja miten ratkaisut vaikuttavat laitteen laatuun. Piirilevyihin liittyvissä ratkaisuissa tarkasteltiin tutkimuksia, joissa on selvitetty miten piirilevystä aiheutuviin ympäristöhaittoihin voidaan vaikuttaa substraatin materiaalin ja johtavan materiaalin valinnalla. Integroituihin piireihin liittyvissä ratkaisuissa tarkasteltiin tutkimuksia, joissa on selvitetty integroidun piirin valmistusprosessin ja koteloinnin vaikutusta ympäristöhaittoihin. Lopuksi pohdittiin tulevaisuuden näkymiä ympäristöystävälliselle elektroniikkalaitteiden tuotesuunnittelulle.

Työssä tarkastellaan paperin ja polyetyleenitereftalaatin (PET) käyttöä piirilevyn substraattina. Tutkimukset osoittivat, että paperi soveltuu käyttökohteisiin, joissa elektroniikkalaitteen täytyy olla edullinen, mutta lyhytikäinen. PET:n käyttö osoittautui sopivaksi taipuviin elektroniikkalaitteisiin. Tutkimukset osoittivat myös, että piirilevyn johtavan kuvioinnin valmistaminen additiivisella menetelmällä käyttämällä hopeananopartikkelimateriaalia tuottaa vähemmän saasteita ja kuluttaa vähemmän johtavaa materiaalia kuin perinteinen kuparin etsaus. Integroituihin piireihin liittyvät tutkimukset osoittivat, että ympäristöystävällisin integroitu piiri saadaan käyttämällä uusinta ja energiatehokkainta valmistusprosessia sekä koteloidamalla siru mahdollisimman pieneen koteloon.

Avainsanat: Kestävä kehitys, LCA, tuotesuunnittelu, piirilevy, integroitu piiri

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	1
2 KESTÄVÄN KEHITYKSEN MERKITYS	2
2.1 Kestävyyden kategoriat.....	2
2.2 Kestävän kehityksen hyödyt.....	3
3 ELEKTRONIIKKALAITTEEN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET	4
3.1 Raaka-aineet.....	4
3.2 Tuotantovaihe	5
3.3 Kuljetus	5
3.4 Käyttö	7
3.5 Käytöstä poistaminen.....	7
4 RATKAISUJA YMPÄRISTÖVAIKUTUKSIIN	8
4.1 Piirilevyt	9
4.2 Integroidut piirit	11
5 RATKAISUJEN VAIKUTUS LAATUUN	14
6 TULEVAISUUDEN RATKAISUT	16
7 YHTEENVETO.....	18
LÄHTEET	20

LYHENTEET JA MERKINNÄT

GHG	Greenhouse gas
GWP	Global Warming Potential
LCA	Life Cycle Analysis
LFBGA	Low-profile Fine-pitch Ball Grid Array
ODP	Ozone Depletion Potential
OLED	Organic Light-Emitting Diode
PET	Polyetyleenitereftalaatti
RoHS	Restriction of Hazardous Substances
TQFP	Thin Quad Flat Package
WCSP	Wafer-level Chip-Scale Package
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment

1 JOHDANTO

Elektroniikkalaitteiden merkitys jokapäiväisessä elämässä kasvaa vuosi vuodelta koko ajan suuremmaksi. Myös yksilöiden omistamien elektroniikkalaitteiden määrä kasvaa. Elektroniikkalaitteet ovat välttämätön osa nykypäivän yhteiskuntaa, mutta laitteiden jatkuvaan tuotantoon ja käyttöön liittyy myös varjopuolia. Suurta osaa elektroniikkalaitteista ei ole tuotettu kestäväällä tavalla, ja tuotanto on silloin usein haitallista ympäristölle ja työntekijöille, jotka osallistuvat tuotteen valmistamiseen. Kestämätön elektroniikan tuotanto on haitaksi yhteiskunnalle ja luonnolle sekä lyhyellä että pitkällä aikavälillä. Elektroniikkalaitteista aiheutuvat haitat yhteiskunnalle ja ympäristölle kasvavat, kun käytettyjen laitteiden määrä lisääntyy. Jos elektroniikkalaitteiden määrä jatkaa kasvuaan ja niiden valmistus pysyy kestäättömänä, elektroniikkateollisuus tulee olemaan merkittävänä tekijänä ilmastonmuutoksen nopeuttamisessa, luonnonvarojen kuluttamisessa ja yhteiskunnan kehityksen hidastamisessa.

Tämän työn tarkoituksena on selvittää, miten kestävä kehitys toteutuu elektroniikkalaitteen tuotannossa ja erityisesti tarkastella elektroniikkalaitteesta aiheutuvia ympäristövaikutuksia sekä sitä, kuinka ympäristövaikutuksia voidaan vähentää tuotesuunnittelun näkökulmasta. Työssä keskitytään erityisesti siihen, kuinka piirilevyjen ja integroitujen piirien haitallisia ympäristövaikutuksia voidaan vähentää.

Tämän työn luvussa kaksi käydään läpi, mitä kestävä kehitys on, miksi sitä tarvitaan ja miten siitä voidaan hyötyä. Luvussa kolme perehdytään elektroniikkalaitteen elinkaaren aikana aiheutuviin ympäristövaikutuksiin ja siihen, mistä ympäristövaikutukset johtuvat. Luvussa neljä selvitetään, mitä ratkaisuja voidaan tehdä elektroniikkalaitteen tuotesuunnitteluvaiheessa haitallisten ympäristövaikutusten vähentämiseksi. Luvussa viisi selvitetään miten ympäristöystävällisempien ratkaisujen käyttöönotto vaikuttaa elektroniikkalaitteen laatuun. Luvussa kuusi pohditaan, millaisia ratkaisuja voidaan odottaa tulevaisuudessa.

2 KESTÄVÄN KEHITYKSEN MERKITYS

Kestävällä kehityksellä pyritään tyydyttämään ihmiskunnan tarpeet ilman, että se tapahtuu tulevaisuuden sukupolvien kustannuksella. Suurin osa kaupallisesta toiminnasta paitsi kuluttaa luonnonvaroja myös on usein luonnolle haitallista. [1, s.1] Kaupallinen toiminta käyttää myös usein hyväkseen työvoimaa maissa, joissa työntekijöiden oikeudet ovat puutteelliset, jolloin työolosuhteet voivat olla vaarallisia tai työstä maksettu korvaus pitää työntekijät köyhyydessä.

Kaupallinen toiminta on välttämätöntä yhteiskunnan tarpeiden tyydyttämiseksi, mutta vaikka tällä toiminnalla tyydytettäisiin nykyisen yhteiskunnan tarpeet, toiminta ei ole kestävä, jos se tarpeiden tyydyttämisen lisäksi aiheuttaa esimerkiksi köyhyyttä, nopeuttaa ilmastonmuutosta tai turmelee luontoa myrkyllisillä kemikaaleilla. Kestävän kehityksen tarkoituksena on poistaa näitä ihmiskunnan tulevaisuudelle haitallisia vaikutuksia niin, että yhteiskunnan tarpeet voidaan silti tyydyttää.

2.1 Kestävyyden kategoriat

Yrityksen toiminnan kestävyys jaetaan yleensä kolmeen eri kategoriaan. Nämä kategoriat ovat taloudellinen kestävyys, ekologinen kestävyys ja sosiaalinen kestävyys. Jotta yrityksen toimintaa voidaan kutsua aidosti kestäväksi, sen täytyy olla kestävä kaikissa näissä kategorioissa. Jos yrityksen toiminta ei ole kestävä kaikissa kategorioissa, tarvitaan kestävä kehitys. Kestävä kehitys on siis kehitystä, jolla yrityksen toiminnan kestävyys voidaan saavuttaa.

Taloudellinen kestävyys on yksinkertaisimmillaan sitä, että toiminta on taloudellisesti kannattavaa. Taloudellinen kestävyys on kuitenkin muutakin, kuin sitä, että menot ovat pienempiä kuin tulot. Taloudellisesti kestävä yrityksen pitäisi esimerkiksi olla varautunut markkinoiden muutoksiin tulevaisuudessa. Taloudellisesti kestävä yrityksen täytyy olla tietoinen tuotteidensa koko elinkaaren menoista, eikä pelkästään sen valmistukseen kuluista menoista. Tuote, joka on mahdollisimman halpa valmistaa ei välttämättä ole taloudellisesti kestävin vaihtoehto. [1, s.2]

Ekologinen kestävyys koskee luonnonvarojen hyväksi käyttämistä. Ekologiseen kestävyteen vaikuttavat esimerkiksi materiaalien ja energian kulutus tuotteen valmistuksessa ja käytössä ja saasteiden tuottaminen. Ekologisesti kestävät yritykset tuottavat tuotteita, joiden materiaalit ovat helposti kierrätettäviä, valmistuksessa käytetään kierrätysmateri-

aaleja, valmistukseen tarvittava energiamäärä on mahdollisimman alhainen ja valmistuksessa käytetään mahdollisimman vähän luonnolle myrkyllisiä aineita. [1, s.4–5] Ekologisella kestävyydellä pyritään säästämään luonnonvaroja, ylläpitämään biologista monimuotoisuutta ja välttämään yleisesti myrkyllisten aineiden joutumista luontoon.

Sosiaalinen kestävyys on yksinkertaisimmillaan sitä, että yrityksen toiminta ei aiheuta haitallisia vaikutuksia ihmisiin. Sosiaalisesti kestävä yritys tukee yhteiskunnallista kehitystä. [2] Yksi osa sosiaalista kestävyyttä on esimerkiksi yrityksen sitoutuminen ihmisoikeuksien kunnioittamiseen. Yrityksen sosiaalista kestävyyttä voidaan arvioida esimerkiksi SA8000-standardilla. Tämän standardin mukaan sosiaalisesti kestävä yritys ei esimerkiksi saa käyttää lapsityövoimaa, työaikojen täytyy olla paikallisten lakien mukaisia, mutta alle 48 tuntia viikossa, ylitoita saa olla korkeintaan 12 tuntia viikossa ja palkan täytyy olla riittävä työntekijän perustarpeiden täyttämiseksi. [3] Sosiaalisesti kestävä yritys kunnioittaa työntekijöidensä ja asiakkaidensa ihmisoikeuksia.

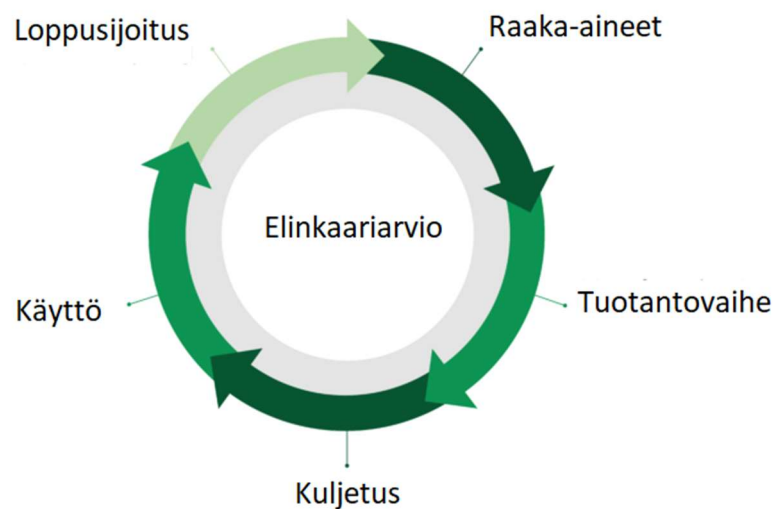
2.2 Kestävän kehityksen hyödyt

Kestävä kehitys on tärkeää, jotta ihmisille voidaan turvata nyt ja tulevaisuudessa mahdollisimman korkea elämänlaatu. Kestävä kehitys tukee yhteiskunnallista kehitystä ja on erityisen tärkeää matalan tulotason maissa, joissa lainsäädäntö ei usein velvoita yrityksiä kestävään toimintaan.

Kestävä kehitys voi yrityksen näkökulmasta näyttää lyhyellä aikavälillä vain lisäävän menoja, kun ensimmäiseksi prioriteetiksi asetetaan jotakin muuta, kuin yrityksen taloudellinen kasvu. Kestävä kehitys on kuitenkin pitkällä aikavälillä sekä ihmisten että yritysten hyödyksi. Taloudellisesti kestävä yritys on valmis markkinoilla tapahtuviin muutoksiin, eikä se niin helposti ajaudu taloudellisiin vaikeuksiin. Ekologisesti kestävä yritys ei ole riippuvainen uusiutumattomista materiaaleista. Sosiaalisesti kestävä yritys tukee yhteiskunnallista kehitystä, joka johtaa osaavampaan työvoimaan ja kasvattaa asiakkaiden määrää, joilla on varaa ostaa yrityksen tuotteita.

3 ELEKTRONIKKALAITTEEN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

Elektroniikkalaitteesta aiheutuu sen elinkaaren aikana monia haitallisia ympäristövaikutuksia. Elektroniikkalaitteen elinkaari alkaa raaka-aineiden louhimisesta laitteen lopulliseen hävittämiseen tai kierrätykseen. Tässä luvussa tutkitaan puhelinten ja tietokoneiden elinkaariarvioita eli LCA (Life Cycle Assessment), joista voidaan selvittää laitteesta aiheutuvia haittoja sen eri elinkaaren vaiheissa. Kuvassa 1 on elektroniikkalaitteen elinkaaren eri vaiheet, joita tarkastellaan elinkaariarvioissa.



Kuva 1. Elektroniikkalaitteen elinkaaren vaiheet, muokattu lähteestä [4].

3.1 Raaka-aineet

Raaka-aineiden louhimisessa ja prosessoinnissa käytetään energiaa, kulutetaan luonnonvaroja ja tuotetaan saasteita. Raaka-aineiden louhiminen on yleisesti uhka luonnon monimuotoisuudelle, joka johtuu esimerkiksi louhimisen aikana luontoon vapautuvista hapoista. Suurimmat haitat aiheutuvat louhimisen lähiympäristössä, mutta esimerkiksi jokien kautta saasteet voivat kulkea pitkiäkin matkoja. [5] Elektroniikkalaitteiden valmistamiseen tarvitaan monenlaisia materiaaleja ja näin myös raaka-aineiden louhimista. Esimerkiksi kobolttia, joka on tärkeä osa litiumioniakkuja, kului vuonna 2010 puhelimiin 6100 tonnia ja tietokoneisiin 11700 tonnia. Puhelimiin ja tietokoneisiin käytettiin vuonna 2010 noin 20 % louhitusta koboltista. [6, s.46] Maapallon kobolttivarastot vähenevät, kun

kobolttia sisältävää elektroniikkaromua ei käsitellä asianmukaisesti. Monia raaka-aineiden käyttöön ja hankintaan liittyviä haittoja voidaan vähentää asianmukaisella elektroniikkaromun kierrätyksellä.

3.2 Tuotantovaihe

Tuotantovaihe on elektroniikkalaitteen elinkaaren aikana yleensä ympäristön kannalta haitallisin tai toiseksi haitallisin vaihe. Uuden elektroniikkalaitteen tuotantovaiheen aikana tapahtuu usein yli puolet elinkaaren hiilidioksidiekvivalenttipäästöistä. Tuotantovaiheella on myös elinkaaren vaiheista korkein ilmastonlämpenemispotentiaali GWP (Global Warming Potential), otsonikatopotentiaali ODP (Ozone Depletion Potential) ja vaiheella on myös korkein potentiaali vapauttaa myrkyllisiä aineita luontoon. Puhelimien elinkaariarvioissa tuotantovaiheen hiilidioksidiekvivalenttipäästöt ovat noin 50-80 % koko elinkaaren päästöistä. [7][8] Tietokoneen tuotantovaiheen hiilidioksidiekvivalenttipäästöt ovat noin 25 % koko elinkaaren päästöistä [9]. Tuotantovaiheen osuus elinkaaren päästöistä riippuu merkittävästi siitä, miten elektroniikkalaitetta käytetään, kuinka pitkä sen käyttöikä on ja kuinka energiatehokas se on. Puhelimet ovat energiatehokkaita, joten niissä suurempi osa päästöistä tapahtuu tuotantovaiheen aikana. Tietokoneissa ja erityisesti palvelinkäytössä olevissa tietokoneissa tämä osuus on selvästi pienempi. Palvelinkäytössä olevien tietokoneiden tuotantovaihe tuottaa vain noin 5–8 % elinkaaren päästöistä, joka johtuu siitä, että palvelimet ovat käynnissä lähes koko käyttöikänsä [9].

Tuotannossa käytetään useita eri kemikaaleja esimerkiksi piirilevyjen ja integroitujen piirien valmistamiseen. Olennainen osa elektroniikkalaitteen valmistamista on etsaus, jossa käytetään kemikaaleja. Etsauksella luodaan piirilevyyn, puolijohteeseen tai integroituun piiriin haluttu kuvio. Piirilevyn valmistamiseen käytetään yleensä märkäetsausta, jossa kuvio syövytetään levyllä nesteen avulla, joka on hapan tai emäksinen. Sen sijaan puolijohteiden ja integroitujen piirien valmistamiseen käytetään yleensä kuivaetsausta, jossa kuviointi saadaan käyttämällä ioneista koostuvaa plasmaa. [10]

3.3 Kuljetus

Ennen kuin loppukäyttäjä saa laitteen käyttöönsä, täytyy se ensin kuljettaa käyttäjälle. Kuljetuksesta aiheutuvat ympäristöhaitat riippuvat huomattavasti siitä, kuinka pitkä matka tuotetta täytyy kuljettaa. Elektroniikkalaitteen tyyppillä ei ole vaikutusta kuljetuksen aiheuttamiin päästöihin, joten laitteen tyyppistä riippuvat käyttö- ja tuotantovaiheen päästöt vaikuttavat paljon kuljetuksen osuuteen elinkaaren päästöistä. Elektroniikkalaitteiden kohdalla kuljetuksesta aiheutuvien hiilidioksidiekvivalenttipäästöjen osuus voi olla pie-

nimmillään alle prosentin luokkaa ja korkeimmillaan noin 10 % [8][9]. Kuljetettavan matkan pituuden lisäksi kuljetustavalla voi olla suuri vaikutus kuljetuksen aiheuttamiin ympäristöhaittoihin. Taulukossa 1 on arvoja siitä, kuinka paljon energiaa kulutetaan ja hiilidioksidipäästöjä syntyy tonnikilometriä kohden. Lentokuljetus on eri kuljetustavoista selvästi haitallisin ja sen energian kulutus, ja hiilidioksidipäästöt ovat lähes kymmenkertaiset muihin kuljetustapoihin verrattuna. Ympäristöystävällisimpiä kuljetustapoja ovat juna ja rahtilaiva. [11, s.36] Junilla ja rahtilaivoilla on kuitenkin omat rajoituksensa, jotka rajoittavat niiden kulkureittejä. Kuorma-autot tuottavat enemmän päästöjä kuin junat ja rahtilaivat tonnikilometriä kohden, mutta ne ovat välttämätön osa elektroniikkalaitteiden kuljetusta, koska niitä tarvitaan kuljettamaan laitteita paikkoihin, joihin muilla kuljetustavoilla ei päästä. Ekologisen kestävyuden kannalta kuorma-autojen osuus kuljetuksessa olisi hyvä pitää mahdollisimman pienenä.

Taulukko 1. Eri kuljetustapojen kuluttama energia ja tuotetut hiilidioksidipäästöt [11, s.36].

Kuljetustapa		Energian kulutus (kj/tkm)	Hiilidioksidipäästöt (g/tkm)
Lentokone		9 876	656
Kuorma-auto		996–1 086	66–72
Juna	Diesel	530	35
	Sähkö	456	18
Rahtilaiva	Vastavirta	727	49
	Myötävirta	438	29

Kuljetuksen aikana laitteen täytyy olla pakattuna pakkaukseen, joka estää laitteen vaurioitumisen kuljetuksen aikana. Ympäristöystävällinen pakkaus on mahdollisimman pieni, jotta laitteita voidaan kuljettaa mahdollisimman paljon kerralla, ja siinä käytetään helposti kierrätettäviä materiaaleja kuten pahvia ja paperia. Ympäristöystävällisen pakkauksen täytyy kuitenkin priorisoida laitteen tarvitsemää suojaa kuljetuksen aikana. Ympäristöystävällisestä pakkauksesta ei ole hyötyä, jos se ei estä laitteen muuttumista elektroniikkaromuksi kuljetuksen aikana.

3.4 Käyttö

Käyttö on elektroniikkalaitteen elinkaarella yleensä haitallisin tai toiseksi haitallisin vaihe ympäristölle. Käyttö ei itsessään tuota luonnolle myrkyllisiä aineita tai hiilidioksidipäästöjä, mutta laitteissa käytetyn energian tuotanto tuottaa. Käytöstä aiheutuvat haitat tulevat siis suoraan niissä käytetyn energian tuotannon haitoista. [9] Käytön haitallisuus riippuu laitteen käytön määrästä ja sen energiatehokkuudesta. Kannettavat laitteet kuten kannettavat tietokoneet ja puhelimet ovat energiatehokkaita. Kannettavien tietokoneiden käytöstä aiheutuvat hiilidioksidipäästöt ovat yleensä korkeintaan puolet elinkaaren päästöistä [12]. Puhelimen käytöstä aiheutuvat hiilidioksidiekvivalenttipäästöt ovat yleensä noin 10-25 % [8]. Vähemmän energiatehokkailta laitteilla, kuten pöytätietokoneilla käytön päästöt ovat noin 75 % ja palvelinten tapauksessa 94–95 % [8][9]. Käytöstä aiheutuvia haittoja voidaan vähentää kahdella tavalla: suunnittelemalla energiatehokkaampia laitteita ja siirtymällä ympäristöystävällisemmän energian käyttöön.

3.5 Käytöstä poistaminen

Elektroniikkalaitteen elinkaaren päättyessä siitä tulee elektroniikkaromua. Elektroniikkaromua syntyy vuosittain valtava määrä. Vuonna 2019 romua syntyi 53,6 miljoonaa tonnia. Elektroniikkaromun määrä kasvaa joka vuosi, ja vuoteen 2030 mennessä sen odotetaan kasvavan 74,7 miljoonaan tonniin vuodessa. [13] Elektroniikkaromu on muuhun jätteeseen verrattuna ongelmallista, koska elektroniikkalaitteissa ja niiden tuotannossa käytetään paljon ympäristön kannalta vaarallisia aineita ja kemikaaleja.

Yksi elektroniikkaromun merkittävistä ongelmista on se, että sitä ei kierrätetä asianmukaisesti. Vain 17,4 % vuonna 2019 syntyneestä elektroniikkaromusta on virallisesti dokumentoitu asianmukaisesti kerätyksi ja kierrätetyksi. Suurin osa elektroniikkaromusta kuljetetaan käsiteltäväksi matalan tulotason ja keskitulotason maihin, joissa elektroniikkaromun käsittelyä koskevat määräykset eivät yleensä ole yhtä ankaria, kuin korkean tulotason maissa. Elektroniikkaromun käsittelyä koskevat löyhemmät määräykset johtavat siihen, että romun käsittelystä aiheutuu merkittäviä haittoja ympäristölle ja romun kanssa työskentelevien terveydelle. [13]

4 RATKAISUJA YMPÄRISTÖVAIKUTUKSIIN

Elektroniikkalaitteen suunnitteluprosessilla on merkittävä vaikutus laitteesta aiheutuviin ympäristöhaittoihin. Suunnittelussa voidaan vaikuttaa esimerkiksi laitteen energiatehokkuuteen, korjattavuuteen, kierrätettävyyteen ja elinikään. Tässä luvussa selvitetään ratkaisuja, joilla voidaan vähentää elektroniikkalaitteesta aiheutuvia ympäristöhaittoja laitteen suunnitteluvaiheessa. Ratkaisut keskittyvät piirilevyihin ja integroitujen piirien ratkaisuihin, koska piirilevyillä ja integroiduilla piireillä on paljon potentiaalia olla ympäristöstävällisempiä kierrätettävyyden ja energian kulutuksen kannalta.

Ympäristöystävälliset ratkaisut eivät usein ole houkuttelevia ratkaisuja yrityksille lyhyellä aikavälillä, koska ratkaisut ovat usein kalliimpia tai niillä on esimerkiksi haitallinen vaikutus tuotteen laatuun. Näistä syistä johtuen on asetettu voimaan lainsäädäntöjä, joilla yritysten toiminnasta saadaan ekologisesti kestävämpää. Euroopan unioni on yksi edelläkävijä lainsäädännössä, jolla on tarkoitus saada yritykset toimimaan ekologisesti kestävämmiin. Kolme ekologisen kestävyuden kannalta merkittäviä EU:n direktiiviä ovat Restriction of Hazardous Substances (RoHS), Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) ja Ecodesign.

RoHS-direktiivin tarkoituksena on estää ihmisille ja luonnolle myrkyllisistä aineista aiheutuvat haitat. Direktiivin avulla elektroniikkaromusta pitäisi tulla turvallisemmin käsiteltävää. Nämä tavoitteet direktiivi saavuttaa rajoittamalla vaarallisten aineiden käyttöä elektroniikkalaitteissa ja asettamalla vaarallisille aineille enimmäispitoisuudet laitteessa. Direktiivi rajoittaa esimerkiksi raskasmetallien, palonestoaineiden ja pehmitteiden enimmäispitoisuuksia. Enimmäispitoisuudet vaihtelevat elektroniikkalaitteen käyttökohteen mukaan, koska joissakin käyttökohteissa vaaralliset aineet ovat välttämättömiä. Direktiiviä sovelletaan lähes kaikkiin elektroniikkalaitteisiin. Direktiivin ulkopuolelle jäävät kuitenkin esimerkiksi avaruuteen lähetettävät laitteet, tutkimustarkoituksiin suunnitellut laitteet ja aktiiviset implantoitavat lääkinnälliset laitteet. [14][15]

WEEE-direktiivin tavoitteena on parantaa elektroniikkalaitteiden tuotannon kestävyttä ja tehdä tuotannon resurssien käytöstä tehokkaampaa. Direktiivin avulla elektroniikkaromun keräyksen, käsittelyn ja kierrätyksen pitäisi parantua. Direktiivin on myös tarkoitus estää laitton elektroniikkaromun kuljettaminen EU:n ulkopuolelle käsiteltäväksi. Direktiivin tärkeimpänä tehtävänä on vähentää elektroniikkaromun syntymistä. Direktiivin mukaan EU:n jäsenvaltioissa loppukäyttäjien täytyy pystyä palauttamaan elektroniikkaromua

maksutta, jolloin romu todennäköisemmin tulee asianmukaisesti käsitellyksi. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että yli 400 m²:n elektroniikkalaitteiden vähittäismyyntiliikkeillä on velvoite ottaa vastaan loppukäyttäjän elektroniikkaromua. Keräyksen ja kuljetuksen täytyy toimia niin, että romu saadaan kierrätettyä mahdollisimman hyvin. Direktiivin mukaan elektroniikkaromun vähimmäiskeräysaste on 65 %. [16][17]

Ecodesign-direktiivin tavoitteena on vähentää energian kulutusta. Direktiivin avulla energiaan liittyvien tuotteiden energiatehokkuuden pitäisi parantua ja lisätä tuotteiden ekologista suunnittelua. Direktiivin tavoitteena on tehdä tuotteista ekologisempia ilman, että tuotteen toiminnallisuus muuttuu tai tuotteen kustannukset kasvavat. Direktiivin on myös tarkoitus poistaa markkinoilta tuotteita, jotka eivät täytä vaatimuksia. Esimerkiksi hehku-lamppujen poisto markkinoilta EU:ssa johtui käytännössä Ecodesign-direktiivistä. Direktiivi koskee sähköä kuluttavien tuotteiden lisäksi esimerkiksi ikkunoita ja lämpöeristeitä. Direktiivin ulkopuolelle jäävät kuitenkin liikennevälineet. Direktiivi asettaa vaatimuksia tuotteen energiatehokkuudelle, jotka vaihtelevat tuotteen käyttökohteen mukaan. Ecodesign-direktiivi eroaa RoHS- ja WEEE-direktiiveistä, koska se vaikuttaa huomattavalla tavalla elektroniikkalaitteen tuotesuunnitteluvaiheeseen. [18] [19]

4.1 Piirilevyt

Piirilevyt muodostavat noin 3–5 % elektroniikkaromusta, ja niillä on suurin arvo [6, s.33]. Piirilevyissä käytetään paljon metalleja ja metallien kierrättäminen on helppoa. Nykyään käytetyissä piirilevyissä käytettyjen metallien määrä vaihtelee yleensä 20:n ja 50 prosentin välillä [20]. Piirilevyissä käytetään metalleja, kuten kuparia, rautaa ja alumiinia. Piirilevyistä löytyy usein myös arvokkaampia metalleja kuten kultaa ja hopeaa mutta pienempinä määrinä. Piirilevyt koostuvat metallien lisäksi erilaisista muoveista ja keraamisista aineista. Muoveja ja keraamisia aineita on huomattavasti vaikeampi kierrättää. Piirilevyjen ympäristövaikutuksia voidaan vähentää tekemällä niistä vielä paremmin kierrätettäviä. Parempi kierrätettävyys voidaan saavuttaa esimerkiksi vaihtamalla substraatti materiaaliin, joka on helpompi kierrättää, kuten paperi tai PET-muovi.

Piirilevyn haitallisiin ympäristövaikutuksiin voidaan vaikuttaa johtavan materiaalin ja substraatin valinnalla. Kupari on yleisin piirilevyissä käytetty johtava materiaali. Kun piirilevy valmistetaan, on sen koko pinta peitetty kuparilla. Haluttu kuviointi saadaan piirilevyille syövyttämällä kupari pois kohdista, joihin sitä ei haluta. Piirilevyssä on siis selvästi enemmän kuparia, kuin lopullinen piirilevy vaatii. Tällainen subtraktiivinen menetelmä kuluttaa paljon energiaa, kemikaaleja ja johtavaa materiaalia [21]. Additiivinen menetelmä, jossa johtavaa materiaalia lisätään vain halutun kuvion mukaisesti, on siis ympäristön kannalta yleensä parempi vaihtoehto. Additiivista menetelmää käytetään usein

prototyyppien valmistamiseen, koska johtavan materiaalin painaminen piirilevyille esimerkiksi mustesuihkutulostimella, on nopeaa ja muutosten tekeminen haluttuun kuvioon on helppoa.

Vuonna 2021 tehdyssä tutkimuksessa johtava materiaali vaihdettiin etsatusta kuparista materiaaliin, joka koostuu 50-prosenttisesti hartsista ja 50-prosenttisesti hopeananopartikkeleista. Hopeananopartikkelimateriaali AgNP painetaan piirilevyille silkkipainatuksella, jolloin materiaalia kuluu vain tarvittava määrä. Tutkimuksessa hopeananopartikkelimateriaalin käyttäminen laski hiilidioksidiekvivalenttipäästöjä 49 % ja käytettyä energiaa 48 %. Hopeananopartikkelimateriaalin käyttäminen vähensi myös muita ympäristövaikutuksia yli 50 %. [21] Hopealla on myös pienempi resistiivisyys kuin kuparilla. Hopeajohdinten resistiivisyys on $4 \mu\Omega/\text{cm}$ ja kuparijohdinten $18 \mu\Omega/\text{cm}$ [22].

Piirilevyjen substraateissa käytetään materiaaleina yleensä muoveja ja keraamisia aineita, jotka ovat vaikeasti kierrätettäviä. Substraatti on usein massaltaan yli puolet piirilevyn massasta, joten se on merkittävä osa piirilevyistä muodostuvaa jätettä. Vaihtamalla substraatin materiaali ympäristöystävällisempään vaihtoehtoon voidaan merkittävästi vähentää piirilevystä aiheutuvia ympäristöhaittoja.

Yksi materiaali, jota voidaan käyttää substraattina, on paperi. Paperi on uusiutuva ja biohajoava materiaali, joten se on erittäin ympäristöystävällinen. Paperi on myös halpaa, taipuisaa ja sen fyysisiä ominaisuuksia on helppo muokata tarpeen mukaan. [23, s. 2] Paperista voidaan myös valmistaa piirilevyjä, joilla on ominaisuuksia, joita tyyppillisillä substraateilla kuten FR4:llä ei ole. Paperia voidaan käyttää substraattina sovelluksissa, jossa piirilevyn täytyy kestää taivutusta. Yksi sovellus voisi olla esimerkiksi RFID-tunniste, jota käytettäisiin pakettien seurantaan. Paperille painetuilla tunneilla on mahdollisesti käyttöä myös muissa käyttökohteissa, joissa yleensä käytetään perinteisiä viiva-koodeja. [24] Vaihtamalla yleisesti substraattina käytetty FR4 paperiin, substraatista aiheutuvat hiilidioksidiekvivalenttipäästöt laskevat yli 98 % ja valmistus kuluttaa 74 % vähemmän energiaa [20].

Toinen käyttökelpoinen materiaali on polyetyleenitereftalaatti tai lyhennettynä PET-muovi. PET, kuten monet muut muovit, ei ole biohajoavaa ja on haitallista, jos se joutuu luontoon. PET on ongelmallinen erityisesti meriympäristön kannalta. Muovia päätyy mereen vuosittain miljoonia tonneja, joka saastuttaa meriympäristöä [25]. PET:n haittapuolia voidaan kuitenkin merkittävästi vähentää, jos se kierrätetään oikein. PET on helposti kierrätettävää tyyppisiin substraatteihin verrattuna, joten se saadaan helpommin uusiokäyttöön. Meriympäristön saastuttaminen on yksi PET:n käyttämisen suurimmista ris-

keistä, mutta sen potentiaalinen myrkyllisyys ympäristölle on silti esimerkiksi FR4:ää pienempi. Käyttämällä substraattina FR4:n sijaan PET-muovia substraattista aiheutuu 88 % vähemmän hiilidioksidiekvivalenttipäästöjä ja energiaa kuluu 65 % vähemmän. [20]

Piirilevyn ympäristövaikutukset riippuvat myös käytettyjen materiaalien hankintatavasta. Raaka-aineisiin käytettyä energiaa voidaan vähentää käyttämällä ensiomateriaalien sijaan kierrätettyjä materiaaleja. Materiaalien prosessointi elektroniikkaromusta tuotannossa käytettäväksi materiaaliksi säästää energiaa merkittävästi verrattuna käyttämättömän raaka-aineen prosessointiin. Taulukossa 2 on esitetty, kuinka paljon energiaa säästetään käyttämällä kierrätettyjä materiaaleja. [20]

Taulukko 2. Kierrätettyjen materiaalien käytössä säästetty energia [20].

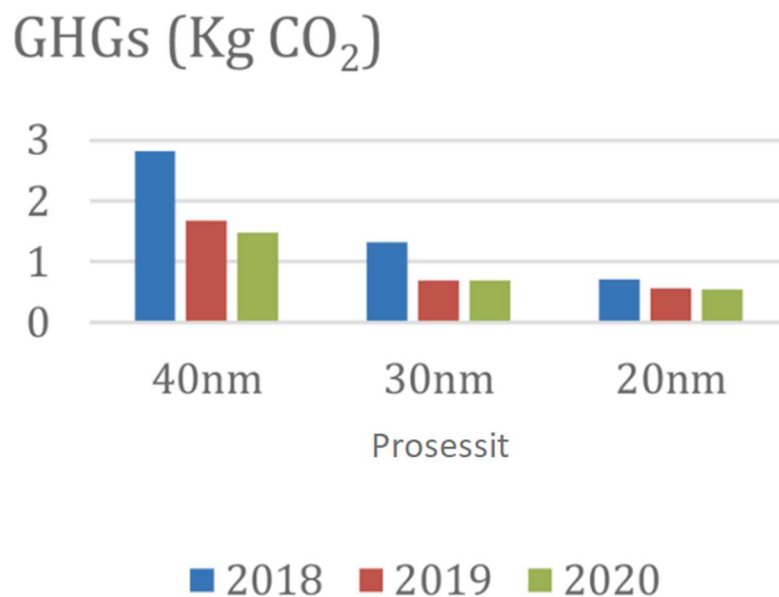
Materiaali	Säästetty energia (%)
Alumiini	95
Kupari	85
Rauta ja teräs	74
Lyijy	65
Sinkki	60
Paperi	64
Muovit	>80

Kierrätettyjen materiaalien käyttämisellä saavutetaan myös muita etuja. Käyttämällä kierrätettyä rautaa ja terästä kulutetaan 90 % vähemmän ensiomateriaalia, vähennetään ilmansaasteita 86 % ja veden saastumista 76 %. Kierrätettyjen materiaalien käyttäminen vähentää myös olemassa olevan elektroniikkaromun määrää ja vähentää romun määrää elektroniikkalaitteen elinkaaren lopussa.

4.2 Integroidut piirit

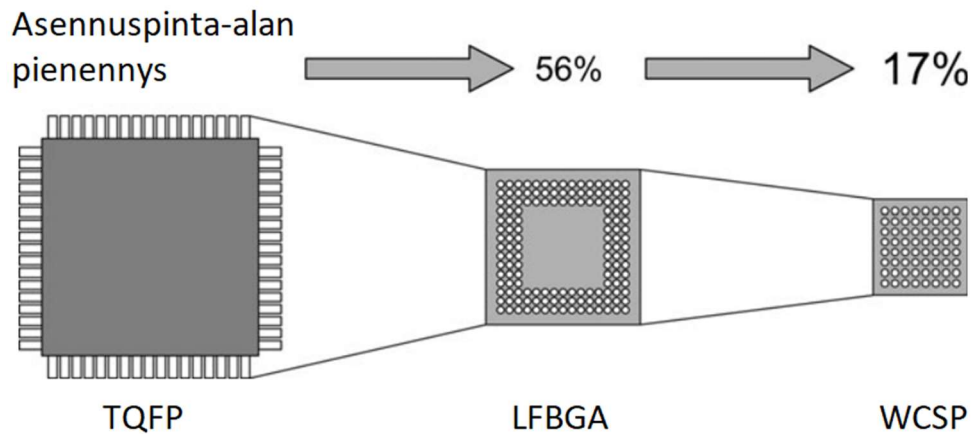
Integroiduilla piireillä on paljon potentiaalia ympäristöystävällisemmän elektroniikkalaitteen kannalta. Integroidut piirit ovat merkittävä tekijä laitteen energiankulutuksessa. Energiankulutuksen lisäksi voidaan tarkastella integroidun piirin kotelointia. Ekologisesti kestävä integroidun piirin olisi myös hyvä olla mahdollisimman pitkäikäinen, jotta siihen käytetyistä resursseista saadaan mahdollisimman paljon hyötyä ennen sen joutumista kierrätettäväksi tai elektroniikkaromuksi.

Käyttö on yksi ympäristölle haitallisimmista vaiheista elektroniikkalaitteen elinkaaren aikana. Haitat johtuvat laitteen käyttämän energian tuotannosta, joten käytön haittojen vähentämiseksi on tärkeää pitää laitteen ja näin myös sen sisältämien integroitujen piirien energiankulutus mahdollisimman alhaisena. Laitteen energiatehokkuus on ympäristöystävällisyyden lisäksi eduksi myös kuluttajalle, koska kuluttaja joutuu maksamaan kulutusta energiasta. Integroidut piirit koostuvat puolijohdemateriaalista, johon on integroitu suuri määrä transistoreita. Transistorien määrä vaihtelee piirin käyttökohteen mukaan. LM741 operaatiovahvistin sisältää esimerkiksi 20 transistoria kun taas Applen M1 Max mikroprosessori sisältää 57 miljardia transistoria [26][27]. Merkittävä tekijä integroidun piirin energiatehokkuudessa on sen valmistamiseen käytetty prosessi. Tämä selviää tutkimuksessa, jossa tehtiin elinkaarianalyysit kolmen vuoden ajalta muistipiireille, jotka valmistettiin kolmella eri prosessilla: 40 nm, 30 nm ja 20 nm. 20 nm:n prosessi on näistä uusin ja sillä saadaan energiatehokkain piiri. Energiatehokkuus perustuu siihen, että 20 nm:n prosessilla voidaan valmistaa puolijohdemateriaalille pienempiä komponentteja, joiden vaatima energia laskee, kun koko pienenee. Elinkaarianalyysissä ensimmäisen vuoden aikana, joka sisältää raaka-aineiden hankinnan ja sirun valmistuksen, 20 nm:n prosessilla valmistettu muistipiiri tuotti 75 % vähemmän hiilidioksidipäästöjä kuin 40 nm:n prosessilla valmistettu muistipiiri. 30 nm:n prosessilla valmistettu muistipiiri tuotti yli 50 % vähemmän hiilidioksidipäästöjä kuin 40 nm:n prosessilla valmistettu muistipiiri. Kuvassa 2 on tutkimuksen tuloksia eri prosesseilla valmistettujen muistipiirien tuottamista kasvihuonekaasuista (GHG) kolmen vuoden ajalta. Kuvasta nähdään, että valmistusprosessilla on suuri vaikutus hiilidioksidipäästöihin niin valmistus- kuin käyttövaiheessa. [28]



Kuva 2. Eri prosesseilla valmistettujen sirujen tuottamat hiilidioksidipäästöt, muokattu lähteestä [28].

Varsinaisen puolijohdepiirin materiaali on yleensä pii, ja sille ei näy olevan ekologisesti kestävämpiä vaihtoehtoja lähitulevaisuudessa. Integroidun piirin koteloinnissa ja sen liittämisessä piirilevyyn voidaan tehdä merkittävimmät ratkaisut integroidussa piirissä käytetyissä materiaaleissa. Kotelon tyypin valinnalla voidaan vaikuttaa integroidun piirin lopulliseen kokoon, joten se vaikuttaa myös suoraan koteloon käytettävien materiaalien määrään ja siihen, kuinka paljon integroidulle piirille täytyy varata tilaa piirilevyllä. Kotelon valinta vaikuttaa näin myös lopullisen piirilevyn kokoon ja siihen kulumien materiaalien määrään. Kuvasta 3 nähdään, kuinka kotelon tyypin valinta voi vaikuttaa pinta-alaan, jonka puolijohdepiiri tarvitsee piirilevyllä. Kuvan kotelotyytit ovat Thin Quad Flat Package (TQFP), Low-profile Fine-pitch Ball Grid Array (LFBGA) ja Wafer-level Chip-Scale Package (WCSP). [29]



Kuva 3. Kotelointityypin vaikutus puolijohdesirun pinta-alaan, muokattu lähteestä [29].

Elektroniikkalaitteessa olevien integroitujen piirien ympäristöhaittoja voidaan vähentää myös vähentämällä yksittäisten puolijohdepiirien lukumäärää. Puolijohdepiirien määrää voidaan laskea toiminnallisuutta menettämättä integroimalla useita puolijohdepiirejä yhdeksi suuremmaksi integroiduksi piiriksi. Kun kaksi integroitua piiriä, joissa on molemmissa 32 liitäntäpistettä, yhdistetään yhdeksi 64 liitäntäpisteen integroiduksi piiriksi, piiristä aiheutuvat hiilidioksidiekvivalenttipäästöt laskevat 40 % [29].

5 RATKAISUJEN VAIKUTUS LAATUUN

Elektroniikkalaitteen suunnitteluvaiheessa voidaan tehdä paljon ratkaisuja, joilla laitteesta saadaan ympäristöystävällisempi. Yritykset ottavat ympäristöystävällisempiä ratkaisuja kuitenkin käyttöön hitaasti ja varoen. Syyt tähän hitaaseen käyttöönottoon löytyvät todennäköisesti ratkaisujen vaikutuksista tuotteen valmistushintaan ja laatuun. Yritykset eivät ota tuotesuunnittelussa käyttöön ratkaisuja, jotka vähentävät tuotteen kannattavuutta tai laatua merkittävästi. Luvussa neljä esitetyistä ratkaisuista selvitetään, kuinka ratkaisut vaikuttavat elektroniikkalaitteen laatuun. Ratkaisujen ekologisuus ja kannattavuus on kuitenkin loppujen lopuksi hyvin epävarmaa, koska niihin vaikuttavat esimerkiksi sijainti, jossa laitteet valmistetaan, valmistettävien laitteiden määrä ja saatavilla oleva teknologia. Tässä luvussa keskitytään piirilevyjen ratkaisuihin, koska integroituihin piireihin liittyvää tietoa on niukasti, eikä esitetyillä ratkaisuilla pitäisi olla merkittävää vaikutusta elektroniikkalaitteen laatuun tai kestävyYTEEN.

Hopeananopartikkelimateriaalilla voidaan saavuttaa hyvät sähköiset ominaisuudet ja mekaaninen kestävyys, jos se käsitellään oikein kuvion painamisen jälkeen. Oikeanlainen käsittelytapa vaihtelee hopeananopartikkelimateriaalin koostumuksen mukaan. Hopeananopartikkelimateriaali on myös mekaanisesti tarpeeksi kestävä, jotta sitä voidaan käyttää sovelluksissa, joissa piirilevy on taipuva. Hopeananopartikkelimateriaali on siis laadukas johtava materiaali, eikä sen pitäisi olla rajoittava tekijä suurimmassa osassa sovelluksista. [30] [31]

Paperi on substraattina huomionarvoinen erityisesti hinnan näkökulmasta, koska se on yksi edullisimmista substraateista. Paperin hinta on alle 0,1 USD neliometriä kohden [24]. Muut substraattina käytettävät materiaalit ovat selvästi kalliimpia. PET:n hinta on esimerkiksi noin 2 USD neliometriä kohden. Paperin yksi merkittävimmistä ongelmista substraattikäytössä on sen hygroskooppisuus. Paperi imee kosteutta hyvin helposti ja sen kosteuspitävyys on huono. Paperin mitat voivat siis muuttua kosteassa ympäristössä, mikä saattaa katkaista paperiin painettuja metallijohtimia. Paperin hygroskooppisuuden aiheuttamia haasteita voidaan välttää esimerkiksi käyttämällä hydrofobista pinnoitetta substraatin päällä. [23, s.166] Koska paperin käytöstä aiheutuu piirilevyn laatuun ja kestävyYTEEN liittyviä haittoja, siitä tuskin tulee korvaajaa tyypillisille jäykille piirilevyille, mutta sitä voidaan käyttää lyhytikäisissä laitteissa, joissa tällä hetkellä käytetään substraattina muovia.

PET on yleisesti käytetty substraatti taipuviin piireihin liittyvissä tutkimuksissa, koska PET on hyvin taipuvaa ja sopii hyvin substraatiksi sovelluksiin, joissa taipuvuutta vaaditaan. PET-substraatin taipuvuus ja mekaaninen kestävyys riippuvat kuitenkin substraatin paksuudesta. PET:n sulamispiste on yleensä yli 250 °C ja kestää ainakin 85 °C:n lämpötilaa useita kymmeniä tunteja. PET:n luotettavuudesta ja mekaanisesta kestävydestä substraattikäytössä ei ole vielä tehty tutkimuksia, mutta sen yleisyys taipuvissa piireissä johtunee sen sopivuudesta näihin sovelluksiin. [32] [33] [34] PET-substraatin käytöstä jäykissä piirilevyissä ei ole vielä tutkimuksia, mutta jäykkiin piirilevyihin kohdistuu yleensä vähemmän mekaanista rasitusta kuin taipuviin piireihin. PET-substraatin laadusta ja järkevistä käyttökohteista on vaikea tehdä johtopäätöksiä ennen kuin sen käyttöä tutkitaan enemmän.

6 TULEVAISUUDEN RATKAISUT

Elektroniikkalaitteen tuotesuunnittelussa on jo mahdollista tehdä monia ympäristöystävällisempiä ratkaisuja. Kestävällä kehityksellä tulee olemaan suuri merkitys tulevaisuuden tuotesuunnittelussa ja monet uudet teknologiat auttavat tekemään tulevaisuuden elektroniikkalaitteista ekologisesti kestävämpiä. Tässä luvussa käydään läpi, minkälaisia ratkaisuja tulevaisuudelta voi odottaa ja miten kestävä kehitys voi muuttaa elektroniikka-teollisuutta.

Elektroniikkalaitteet, jotka hyödyntävät niiden läheisyydessä olevia energialähteitä, kuten valoa, lämpöä ja kineettistä energiaa, voivat tulevaisuudessa vähentää monien laitteiden riippuvuutta akuista ja sähköverkosta saadusta energiasta. Suurta osaa elektroniikkalaitteista täytyy ladata säännöllisesti tai pitää liitettynä sähköverkkoon. Monet matalan tehon elektroniikkalaitteet voisivat kuitenkin kerätä tarvitsemansa energian ympäröivistä energialähteistä. Aurinkokennolla varustetut laskimet ovat hyvä esimerkki tällaisesta sovelluksesta. Aurinkokenno poistaa tarpeen ladata laskinta, joka tekee laskimen käytöstä mukavampaa ja se myös varmistaa, että laskimen käyttämä energia on uusiutuvaa. Ympäristöstä energian keräämiseen tarvittava teknologia ei ole uutta, mutta sen käyttö on melko alhaista. Energian kerääminen ympäristöstä vähentää myös akkujen tarvetta, jos energian saanti on jatkuvaa. Monissa sovelluksissa akku voidaan poistaa kokonaan tai sen kapasiteettia pienentää merkittävästi. Ympäristöstä kerättävää energiaa ei ole aina välttämättä saatavilla, joka pakottaa ottamaan huomioon energian niukkuuden laitteen suunnitteluvaiheessa. Tämä johtaa siihen, että laitteesta tulee energiatehokkaampi, joka käyttää energiaa vain, kun se on tarpeellista. [35, s.151–154] Valosähkökennojen lisäksi tulevaisuuden teknologioilla voidaan kerätä energiaa ympäristöstä tavoilla, jotka eivät ole aikaisemmin olleet mahdollisia. Esimerkiksi tribosähköisellä nanogeneraattorilla, joka tuottaa jännitteen, kun se painuu kasaan tai kun se palautuu alkuperäiseen muotoonsa. Tällä voidaan tuottaa energiaa esimerkiksi sijoittamalla generaattori kengänpohjaan. Tällaisella generaattorilla voitaisiin tuottaa energiaa puettaville elektroniikkalaitteille, jotta niiden ei tarvitse olla riippuvaisia akuista. [36]

Orgaanisista materiaaleista rakennetuilla elektroniikkalaitteilla saadaan toivottavasti vähennettyä elektroniikkaromun aiheuttamia ongelmia tulevaisuudessa. Orgaanisista materiaaleista on todennäköisesti mahdollista valmistaa esimerkiksi valosähkökennoja ja transistoreita, joiden toiminnallisuus on samalla tasolla epäorgaanisten komponenttien kanssa. Yksi orgaaninen elektroniikkakomponentti, joka on jo laajasti käytössä on orgaaninen valodiodi OLED (organic light-emitting diode). OLED on laajasti käytetty teknologia

älykellojen näytöistä televisioihin ja OLED-näytöt tarjoavat usein vähintään yhtä hyvät toiminnalliset ominaisuudet, kuin muut näyttöteknologiat. OLED todistaa, että orgaaniset elektroniikkakomponentit eivät ole pelkästään ympäristöä varten, vaan ne voivat myös mahdollistaa toiminnallisesti parempia laitteita. Orgaanisilla transistoreilla ja valosähkökennoilla on siis mahdollisuus korvata epäorgaaniset vastineet ja näin vähentää elektroniikkaromun ongelmallisuutta. [37] [38]

Pilvipalveluilla voidaan vähentää käyttäjien omistamien elektroniikkalaitteiden määrää ja niissä olevaa laskentatehoa. Palvelut voivat olla esimerkiksi organisaatioiden sisäisiä kuten virtuaaliset työpöydät, jotka toimivat kuten normaalit tietokoneet, mutta käyttäjän laitteen sijaan laskentateho löytyy palvelimelta, johon laitteella on yhteys. Käyttäjän laite tarvitsee tällöin huomattavasti vähemmän laskentatehoa. Palvelin saadaan myös tehokkaampaan laskentatehon käyttöön, kuin yksittäisen käyttäjän tietokone, koska se on saatavilla useammalle käyttäjälle. Virtuaaliset työpöydät tarjoavat myös mahdollisuuden käyttää niitä useilla eri laitteilla missä vain, jos internet yhteys on tarpeeksi luotettava. Videopelien pelaamiseen tarkoitettu Nvidian pilvipalvelu Geforce Now [39] on hyvä esimerkki kaupallisesta palvelusta, joka tarjoaa palvelimien suorituskykyä asiakkaille. Palvelimelta löytyvän suorituskyvyn ansiosta asiakkaan ei tarvitse itse ostaa kalliita korkean suorituskyvyn komponentteja. Koska kaikki asiakkaat eivät käytä palvelua samaan aikaan, palvelimilla ei tarvitse olla suorituskykyä jokaisen asiakkaan tarpeiden täyttämiseksi samanhetkisesti, joka vähentää tarvittavaa komponenttien määrää. Vaikka palveluja on jo nykyään käytössä, monen käyttäjän tilanteessa ne eivät usein ole hyvä korvaava ratkaisu esimerkiksi normaalille tietokoneelle, koska ne vaativat vakaan ja nopean yhteyden palvelimeen. Jos käyttäjän laitteen ja palvelimen välillä on liikaa viivettä, voi palvelu olla täysin käyttökelvoton. Tietoliikenneverkoista täytyy tehdä parempia ja palvelimia täytyy sijoittaa mahdollisimman lähelle käyttäjiä, jotta käyttäjät voivat korvata laitteitaan tällaisella palvelulla.

7 YHTEENVETO

Elektroniikkalaitteiden kasvava määrä johtaa elektroniikkaromun määrän kasvamiseen ja suurempaan energiankulutukseen, ja nämä johtavat suurempaan haittaan ympäristölle. Elektroniikkalaitteesta aiheutuvilla ympäristöhaitoilla on monta tekijää, joka tekee ympäristöystävällisen laitteen suunnittelemisesta monimutkaisen prosessin. Kaikki ympäristöystävälliset ratkaisut, joita on tutkittu eivät ole sopivia jokaiseen käyttökohteeseen. Ympäristöystävällinen tuotesuunnittelu on tuotekohtainen asia, johon ei ole yhtä oikeaa vastausta.

Piirilevyn johtava kuviointi valmistetaan yleensä subtraktiivisella menetelmällä, jossa piirilevyyn, joka on kokonaan peitetty kuparilla syövytetään haluttu kuviointi. Menetelmässä johtavaa materiaalia kuluu enemmän kuin tarpeellista. Johtavan materiaalin kulutusta voidaan vähentää käyttämällä additiivista menetelmää, jossa piirilevyyn lisätään vain tarvittu määrä johtavaa materiaalia. Piirilevyn substraatin vaihtaminen paperiin tai PET-muoviin vähentää selvästi substraattista aiheutuvia ympäristöhaittoja, mutta niiden ominaisuudet asettavat rajoituksia niiden käyttökohteille. Tyypillisen substraatin kuten FR4:n korvaajaksi ne eivät välttämättä sovellu. Paperin mekaaninen kestävyys ja hygroskooppisuus tekevät paperista sopivan vain lyhytikäisiin sovelluksiin. PET-muovi on selvästi kestävämpi materiaali ja sitä on käytetty monissa taipuvien elektroniikkalaitteiden tutkimuksissa substraattina. PET-muovilla on potentiaalia substraattina, mutta sen käyttöä jäykissä piirilevyissä ei ole juurikaan tutkittu. Tarkastellut ratkaisut osoittavat, että piirilevyn materiaalien valinnalla voidaan huomattavasti vähentää ympäristöhaittoja, mutta valintoja tehdessä täytyy huomioida elektroniikkalaitteen käyttökohde.

Energiatehokkain integroitu piiri saadaan käyttämällä valmistusprosessia, jolla saadaan valmistettua integroitu piiri, jonka komponentit ovat mahdollisimman pieniä. Pienillä komponenteilla saadaan vähiten energiaa kuluttava ja pinta-alaltaan mahdollisimman pieni integroitu piiri. Integroidun piirin materiaaleista johtuvia ympäristöhaittoja voidaan vähentää käyttämällä WCSP-kotelointia, johon kuluu vähiten materiaalia ja se vie vähiten tilaa piirilevyllä, koska kotelo ei ole merkittävästi sirua suurempi. Yhdistämällä useita integroituja piirejä yhdeksi piiriksi voidaan vähentää piireistä aiheutuvia päästöjä. Kaksi integroitua piiriä tuottaa selvästi enemmän hiilidioksidiekvivalenttipäästöjä kuin niistä muodostettu yksi integroitu piiri.

Elektroniikkalaitteen tuotesuunnittelussa on jo monia mahdollisuuksia tehdä laitteesta ympäristöystävällisempi. Tulevaisuuden teknologioilla kuten orgaanisilla komponenteilla

voidaan kuitenkin tehdä elektroniikkalaitteista vielä ekologisesti kestävämpiä. Kestävää elektroniikkalaitteen tuotesuunnittelua koskevat tutkimukset ovat erittäin tarpeellisia, koska kestävä kehitys on tärkeää yhteiskunnan kehitykselle ja ihmisten hyvinvoinnille. Aiheesta on tehty monia tutkimuksia, mutta elektroniikkalaitteissa ja elektroniikkateollisuudessa on vielä paljon ongelmia erityisesti ekologisen kestävyys ja sosiaalisen kestävyys kanssa.

LÄHTEET

- [1] Desai A, Mital A. Sustainable product design and development. First edition. Boca Raton, FL: CRC Press, 2021, 285p.
- [2] Social Sustainability. United Nations Global Compact. Saatavilla (viitattu 14.4.2022): <https://www.unglobalcompact.org/what-is-gc/our-work/social>
- [3] SA8000, Social Accountability International, 2014, Saatavilla (viitattu 14.4.2022): <https://sa-intl.org/wp-content/uploads/2020/02/SA8000Standard2014.pdf>
- [4] Life Cycle Assessment Explained, STiCH, Saatavilla (Viitattu 7.8.2022): <https://stich.culturalheritage.org/life-cycle-assessment-explained/>
- [5] Sonter LJ, Ali SH, Watson JEM. Mining and biodiversity: Key issues and research needs in conservation science. Proceedings of the Royal Society B, Biological sciences, 2018. Saatavilla (viitattu 26.5.2022): <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.1926>.
- [6] Kaya M. Electronic Waste and Printed Circuit Board Recycling Technologies. 1st ed. 2019. Cham: Springer International Publishing; 2019, 351 p. Saatavilla (Viitattu 6.4.2022) <https://link-springer-com.libproxy.tuni.fi/book/10.1007/978-3-030-26593-9>
- [7] Zink T, Maker F, Geyer R, Amirtharajah R, Akella V. Comparative life cycle assessment of smartphone reuse: repurposing vs. refurbishment. The international journal of life cycle assessment. 2014. Saatavilla (viitattu 14.4.2022): <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0720-7>
- [8] Suckling J, Lee J. Redefining scope: the true environmental impact of smartphones? The international journal of life cycle assessment, 2015. Saatavilla (viitattu 14.4.2022): <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0909-4>.
- [9] Song Q, Wang Z, Li J, Yuan W. Life cycle assessment of desktop PCs in Macau. The international journal of life cycle assessment, Springer-Verlag, 2012. Saatavilla (viitattu 15.4.2022): <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0515-7>.
- [10] Chemicals Used in the Electronics Industry. Paris: OECD Publishing; 2014, 224 p. Saatavilla (Viitattu 31.3.2022): https://www-oecd-ilibrary-org.libproxy.tuni.fi/environment/chemicals-used-in-the-electronics-industry_9789264221062-en
- [11] Macharis C. Sustainable logistics. Bingley, England: Emerald; 2014, 338 p. (viitattu 1.6.2022)

- [12] Deng L, Babbitt CW, Williams ED. Economic-balance hybrid LCA extended with uncertainty analysis: case study of a laptop computer. Journal of cleaner production. 2011. Saatavilla (viitattu 15.4.2022): <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.03.004>.
- [13] Forti, Vanessa, et al. (2020). The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential. Päivitetty 2.7.2020. Saatavilla (Viitattu 16.2.2021): https://collections.unu.edu/eserv/UNU:7737/GEM_2020_def_july1.pdf
- [14] Restriction of Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment (RoHS), European Commission. Saatavilla (viitattu 12.5.2022): https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/rohs-directive_en
- [15] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi tiettyjen vaarallisten aineiden käytön rajoittamisesta sähkö- ja elektroniikkalaitteissa. Saatavilla (viitattu 12.5.2022): <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:02011L0065-20200301&from=EN>
- [16] Waste from Electrical and Electronic Equipment (WEEE), European Commission. Saatavilla (viitattu 12.5.2022): https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/waste-electrical-and-electronic-equipment-weee_en
- [17] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi sähkö- ja elektroniikkalaiteromusta. Saatavilla (viitattu 12.5.2022): <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:02012L0019-20180704&from=EN>
- [18] Sustainable product policy & ecodesign, European Commission. Saatavilla (viitattu 27.5.2022): https://ec.europa.eu/growth/industry/sustainability/sustainable-product-policy-ecodesign_en
- [19] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi energiaan liittyvien tuotteiden ekologiselle suunnittelulle asetettävien vaatimusten puitteista. Saatavilla (viitattu 27.5.2022): <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0125&from=EN>
- [20] Ning C, Lin CSK, Hui DCW, McKay G. Waste Printed Circuit Board (PCB) Recycling Techniques. Topics in current chemistry. 2017. Saatavilla (viitattu 23.2.2022): <https://doi.org.libproxy.tuni.fi/10.1007/s41061-017-0118-7>
- [21] Nassajfar MN, Deviatkin I, Leminen V, Horttanainen M. Alternative materials for printed circuit board production: An environmental perspective. Sustainability (Basel, Switzerland). 2021. Saatavilla (Viitattu 23.2.2021): https://mdpi-res.com/sustainability/sustainability-13-12126/article_deploy/sustainability-13-12126.pdf

- [22] Wiklund J, Karakoç A, Palko T, Yigitler H, Ruttik K, Jäntti R, et al. A review on printed electronics: Fabrication methods, inks, substrates, applications and environmental impacts. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2021. Saatavilla (viitattu 1.6.2022): <https://doi.org/10.3390/jmmp5030089>.
- [23] Irimia-Vladu M, Irimia-Vladu M. *Green materials for electronics*. 1st edition. Irimia-Vladu M (Mihai), editor. Weinheim, Germany: Wiley-VCH; 2018, 313 p.
- [24] Tobjork D, Osterbacka R. *Paper Electronics*. *Advanced materials* (Weinheim). 2011. Saatavilla (viitattu 12.5.2022): <https://doi.org/10.1002/adma.201004692>.
- [25] Pudack C, Stepanski M, Fässler P. PET Recycling – Contributions of Crystallization to Sustainability. *Chemie ingenieur technik*. 2020. Saatavilla (Viitattu 11.4.2022): <https://onlinelibrary-wiley-com.libproxy.tuni.fi/doi/full/10.1002/cite.201900085>
- [26] LM741 Datalehti, Texas Instruments, 2015. Saatavilla (viitattu 25.5.2022): <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm741.pdf>
- [27] Introducing M1 Pro and M1 Max: the most powerful chips Apple has ever built, Apple, October 2021. Saatavilla (viitattu 25.5.2022): <https://www.apple.com/newsroom/2021/10/introducing-m1-pro-and-m1-max-the-most-powerful-chips-apple-has-ever-built/>
- [28] Kuo T-C, Kuo C-Y, Chen L-W. Assessing environmental impacts of nanoscale semiconductor manufacturing from the life cycle assessment perspective. *Resources, conservation and recycling*. 2022. Saatavilla (viitattu 24.5.2022): <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106289>.
- [29] Andrae ASG, Andersen O. Life cycle assessment of integrated circuit packaging technologies. *The international journal of life cycle assessment*. 2011. Saatavilla (viitattu 24.5.2022): <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0260-3>.
- [30] Liu Z, Ji H, Wang S, Zhao W, Huang Y, Feng H, et al. Enhanced Electrical and Mechanical Properties of a Printed Bimodal Silver Nanoparticle Ink for Flexible Electronics. *Physica status solidi A, Applications and materials science*. 2018. Saatavilla (Viitattu 9.6.2022): <https://doi.org/10.1002/pssa.201800007>.
- [31] Jang S, Rahman M. Effect of sintering atmospheres on printed silver nanoparticle patterns for flexible electronics application. *Applied physics A, Materials science & processing*. 2021. Saatavilla (Viitattu 9.6.2022): <https://doi.org/10.1007/s00339-021-04923-w>.

- [32] Faraj MG, Ibrahim K, Ali MKM. PET as a plastic substrate for the flexible optoelectronic applications. OPTOELECTRONICS AND ADVANCED MATERIALS-RAPID COMMUNICATIONS. 2011.
- [33] Lee CS, Yoo JE, Shin K, Park CO, Bae J. Carbon nanotube-silver nanowire composite networks on flexible substrates: High reliability and application for supercapacitor electrodes: Carbon nanotube-silver nanowire composite networks on flexible substrates. Physica status solidi A, Applications and materials science. 2014. Saatavilla (Viitattu 18.7.2022): <https://doi.org/10.1002/pssa.201431538>.
- [34] Yun TG, Hwang B. Effect of mechanical properties of substrates on flexibility of ag nanowire electrodes under a large number of bending cycles. Coatings (Basel). 2021. Saatavilla (Viitattu 19.7.2022):<https://doi.org/10.3390/coatings11091074>
- [35] Dastbaz M, Pattinson C, Akhgar B. Green information technology : a sustainable approach. 1st edition. Dastbaz M (Mohammad), Pattinson C, Akhgar B, editors. Amsterdam, [Netherlands: Morgan Kaufmann; 2015, 321 p. (viitattu 8.6.2022).
- [36] Yang Y, Chen L, He J, Hou X, Qiao X, Xiong J, et al. Flexible and Extendable Honeycomb-Shaped Triboelectric Nanogenerator for Effective Human Motion Energy Harvesting and Biomechanical Sensing. Advanced materials technologies. 2022. Saatavilla (Viitattu 9.6.2022): <https://doi.org/10.1002/admt.202100702>.
- [37] Irimia-Vladu M. "Green" electronics: biodegradable and biocompatible materials and devices for sustainable future. Chemical Society reviews. 2013. Saatavilla (viitattu 8.6.2022): <https://doi.org/10.1039/c3cs60235d>.
- [38] Torricelli F, Alessandri I, Macchia E, Vassalini I, Maddaloni M, Torsi L. Green Materials and Technologies for Sustainable Organic Transistors. Advanced materials technologies. 2022. Saatavilla (viitattu 8.6.2022): <https://doi.org/10.1002/admt.202100445>.
- [39] Nvidia GeForce Now, NVIDIA Corporation. Saatavilla (viitattu 16.7.2022): <https://www.nvidia.com/en-us/geforce-now/>