Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Jere Saviniemi

Toimitusketjun haasteet elektroniikkateollisuudessa

PESTEL-analyysi

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö
Kandidaatintutkielma
Tuotantotalouden ohjelma

Vaasa 2025

VAASAN YLIOPISTO
Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö
Tekijä: Jere Saviniemi
Tutkielman nimi: Toimitusketjun haasteet elektroniikkateollisuudessa: PESTEL-analyysi
Tutkinto: Kauppatieteiden kandidaatti
Oppiaine: Tuotantotalouden ohjelma
Työn ohjaaja: Tauno Kekäle
Valmistumisvuosi: 2025 **Sivumäärä:** 36

TIIVISTELMÄ:

Jatkuvasti kehittyvä elektroniikkateollisuus koostuu moniulotteisista globaaleista toimitusketjuista, tämä altistaa toimitusketjut monille häiriöille ja muuttujille. Tässä tutkielmassa tarkastellaan PESTEL-analyysin avulla mitä haasteita toimitusketjussa esiintyy elektroniikkateollisuudessa tällä hetkellä. PESTEL- analyysi auttaa saamaan kokonaisvaltaisen kuvan eri näkökulmista katsottuna. Analyysi koostuu viidestä eri tekijästä: poliittiset, taloudelliset, yhteiskunnalliset, teknologiset, ekologiset ja lainsäädännölliset tekijät.

Jotta voimme tutkia paremmin elektroniikkateollisuuden toimitusketjuja, meidän on syvennyttävä ensin toimitusketjuihin yleisellä tasolla. Tutkielmassa selviää, että toimitusketju on määritelty verkostona, joka koostu monista eri solmuista ja linkeistä. Toimitusketjua tarvitaan, jotta saadaan tietty palvelu tai tuote valmiiksi materiaaleista ja raaka-aineista lähtien aina kuluttajalle saakka.

Teollisuuden digitalisaation myötä ihmiset ja asiat sekä fyysinen ja virtuaalinen maailma ovat yhdistyneet entisestään toimitusketjuissa. Tämä tarkoittaa uusien teknologioiden käyttöönottoa, joita ovat mm. massadata, kehittynyt analytiikka, lohkoketjuteknologia, 3D tulostus. Tutkimuksessa selviää, että uudet teknologiat ovat mullistaneet toimitusketjujen hallinnan ja niiden koetaan vaikuttavan parhaan mahdollisen kilpailuedun saavuttamiseen.

Tutkimuksessa tehdyssä PESTEL-analyysissä selviää, että haasteita toimitusketjuissa on monia ja ne ovat globaaleja: Työntekijöiden oikeudet maissa, joissa elektronisia komponentteja valmistetaan eivät ole nykypäivän standardien tasolla. Uusien teknologioiden käyttöönotto on kallis investointi yrityksille. Covid-19 pandemia paljasti globaalien toimitusketjujen haavoittuvaisuuden resurssipulan myötä. Kilpailu alalla on kovaa mikä tarkoittaa jatkuvaa tuotekehittämistä, asiakkaiden muuttuviin tarpeisiin mukautumista ja innovaatioita. Komponentteja valmistavissa tehtaissa työntekijät altistuvat haitallisille kemikaaleille, jotka voivat pitkäaikaisella altistumisella vaikuttaa vakavasti terveyteen. Elektroniikan sisäiset tekniset haasteet lämmönhallinnan ja pienikokoisempien laitteiden valmistamisen osalta. Globaalin verkottumisen mukana tulevat haasteet. Vastuulliset kierrätysmenetelmät sekä tuottajavastuu.

Tutkimuksessa todetaan, että elektroniikkateollisuudessa toimivilta yrityksiltä vaaditaan paljon innovaatioita, vastuun ottamista, teknologista edistymistä, kestävyyteen panostamista, ja yhteistyötä eri tahojen kanssa, jotta näiltä haasteilta voidaan välttyä tulevaisuudessa.

AVAINSANAT: (Toimitusketju, elektroniikkateollisuus, tuotantoketjut, toimitusketjun hallinta, haasteet).

Sisällys

1 Johdanto 4

1.1 Tutkimuksen tausta 4

1.2 Tutkielman tavoite 4

1.3 Tutkimusmenetelmät ja aiheen rajaus 5

2 Toimitusketju 7

2.1 Perinteinen toimitusketju 7

2.2 Toimitusketjun hallinta 8

2.3 Toimitusketjun hallinnan kehitys ja tulevaisuus 9

2.4 Kestävä toimitusketju 13

3 Toimitusketjun haasteet elektroniikkateollisuudessa 16

3.1 Poliittiset tekijät 16

3.2 Taloudelliset tekijät 18

3.3 Yhteiskunnalliset tekijät 21

3.4 Teknologiset tekijät 23

3.5 Ekologiset tekijät 25

3.6 Lainsäädännölliset tekijät 27

4 Päätelmät 30

5 Lähteet 33

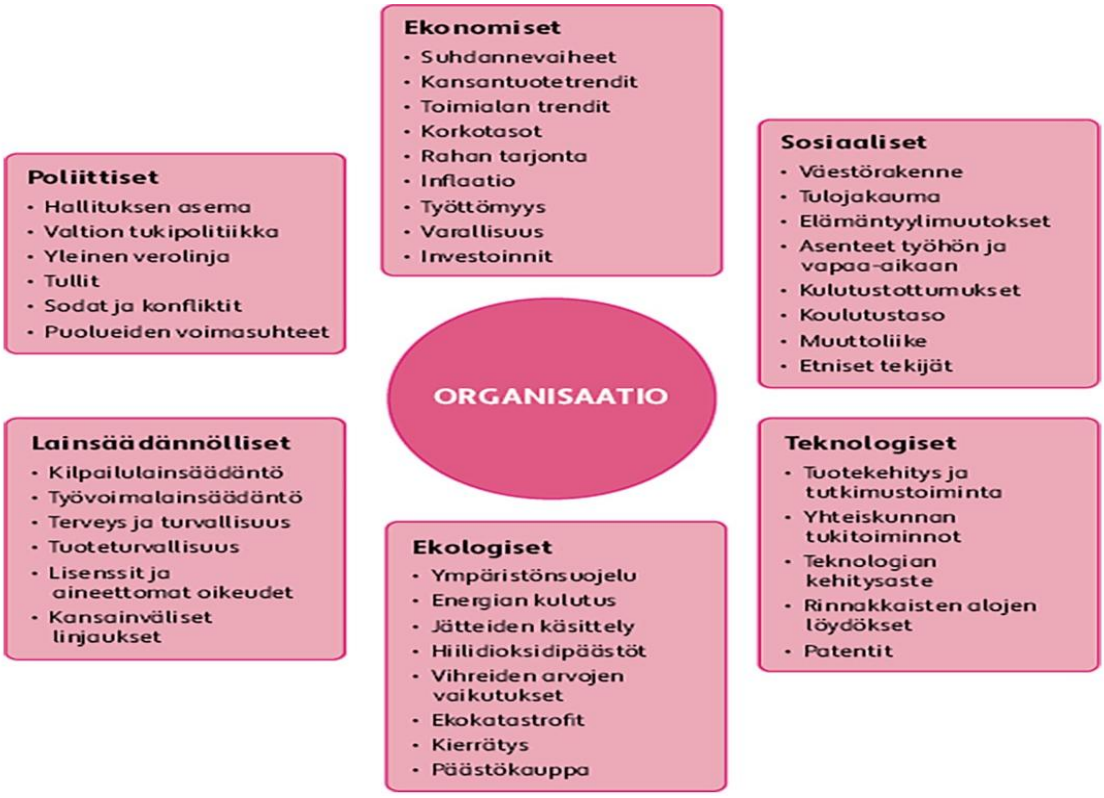
1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Nykypäivänä elektroniikkateollisuus loistaa innovaatioilla ja on yksi maailman nopeimmin kehittyvistä toimialoista (Menon, et al. 2018). Toimiala vaatii enemmän jatkuvaa uusien innovatiivisten prosessien käyttöönottoa muihin toimialoihin verrattuna, mikä tekee toimialasta helpommin mukautuvan erilaisiin muuttuviin vaatimuksiin esimerkiksi ympäristöön liittyen (Park, et al. 2022). Nopean globaalin kehityksen ansioista voidaan todeta, että kyseisen toimialan toimitusketjut ovat usein globaaleja ja monimutkaisia, mikä altistaa toimitusketjut erilaisille muuttujille ja häiriöille. Monen vähäriskisen ongelman kasaantuessa toimitusketjussa voi pahimmillaan seurata lumipallo efekti, joka johtaa suurempiin ongelmiin (Yanginlar, et al. 2023). Yanginlar ja muut painottavat, että toimitusketjun hallinnan merkitys on viime vuoisina korostunut tuomalla ääriesimerkkinä esiin viime vuosina jyllänneen pandemian. Tämän perusteella voi lisätä, että tämänhetkiset geopoliittiset jännitteet sekä aiemmin mainittu teknologian nopea kehitys korostavat hallinnan merkitystä entisestään.

1.2 Tutkielman tavoite

Tämä kandidaatintutkielma pyrkii selvittämään, mitkä PESTEL-tekijät ovat tällä hetkellä kriittisimpiä elektroniikkateollisuuden toimitusketjuille ja miten yritykset voivat sopeutua muuttuviin olosuhteisiin. Tarkastelu tarjoaa ajankohtaista tietoa kaikille, jotka pyrkivät ymmärtämään toimitusketjujen muuttujia ja varautumaan tulevaisuuden haasteisiin. Toimitusketjun haasteiden ymmärtäminen vaatii kokonaisvaltaista analyysiä, jossa otetaan huomioon useita eri näkökulmia. PESTEL-analyysi tarjoaa rakenteellisen tavan tarkastella toimitusketjun haasteita kuudesta eri ulottuvuudesta: poliittisista, taloudellisista, sosiaalisista, teknologisista, ympäristöllisistä ja lainsäädännöllisistä tekijöistä. Tämän analyysin avulla voidaan hahmottaa, mitkä tekijät vaikuttavat eniten toimitusketjun toimivuuteen ja miten niihin voidaan mahdollisesti varautua.



Kuva 1. Esimerkkikuva tutkielmassa työkaluna käytetystä PESTEL-analyysistä (Vuorinen)

Tutkielmassa syvennytään ensin toimitusketjuihin. Perinteisestä toimitusketjusta toimitusketjun hallintaan ja sen kehitykseen vuosien varrella. Tämän jälkeen syvennytään kestävään toimitusketjuun, jonka jälkeen yhdistetään toimitusketju kokonaisuus elektroniikkateollisuuteen. Sen jälkeen siirrytään käsittelemään toimitusketjun haasteita elektroniikkateollisuudessa PESTEL-analyysin avulla. Analyysin jälkeen seuraa sen pohjalta tehdyt päätelmät.

1.3 Tutkimusmenetelmät ja aiheen rajaus

Tutkielman aiheen rajaus keskittyy erityisesti globaalin toimitusketjun näkökulmaan. Elektroniikkateollisuus on luonteeltaan ala, jossa tuotantoverkostot ovat kansainvälisiä ja toimialalle on ominaista monimutkainen ja monivaiheinen toimitusketju. Työssä tarkastellaan, miten yritykset voivat sopeutua näihin muuttuviin PESTEL-tekijöihin ja kehittää toimitusketjujen joustavuutta sekä kriisienkestävyyttä. Aihe on rajattu elektroniikkateollisuuden toimitusketjuihin, eikä tutkielman aihe laajene muihin teollisuudenaloihin.

Aiheen tutkiminen vaatii laajan aineisto määrän tarkastelua. Tässä tutkielmassa käytetään lähteinä tieteellisiä artikkeleita ja raportteja, jotka ovat alan asiantuntijoiden tekemiä. Elektroniikka teollisuus on nopeasti kehittyvä ala, joten tutkielmassa käytetyt aineistot ovat valittu pääsäännöllisesti viimeisen kymmenen vuoden ajalta. Mahdollisimman monen tieteellisen lähteen käyttäminen varmistaa, että tutkielmassa on huomioitu mahdollisimman paljon erilaisia näkökulmia ja tutkimustuloksia aiheeseen liittyen. Toimitusketjujen haasteiden ymmärtäminen vaatii toimitusketjujen toiminnan ymmärtämistä yleisellä tasolla, joten on tärkeää tutkia ensin erilaisia perspektiivejä tuovia artikkeleita niistä. Tämän jälkeen on sujuvampaa siirtyä tutkimaan toimitusketjun haasteita syventyen elektroniikkateollisuuden näkökulmaan aiheesta.

Tässä kandidaatintutkielmassa tutkimusmenetelmänä on systemaattinen kirjallisuuskatsaus, jossa analysoidaan ajankohtaisia tieteellisiä artikkeleita, tutkimusraportteja ja alan julkaisuja liittyen elektroniikkateollisuuden toimitusketjuihin ja PESTEL-tekijöihin. Kirjallisuuskatsauksen avulla pyritään tunnistamaan ne ulkoiset tekijät, jotka tällä hetkellä vaikuttavat merkittävimmin alan toimitusketjujen toimintaan ja luovat mahdollisia haasteita niissä.

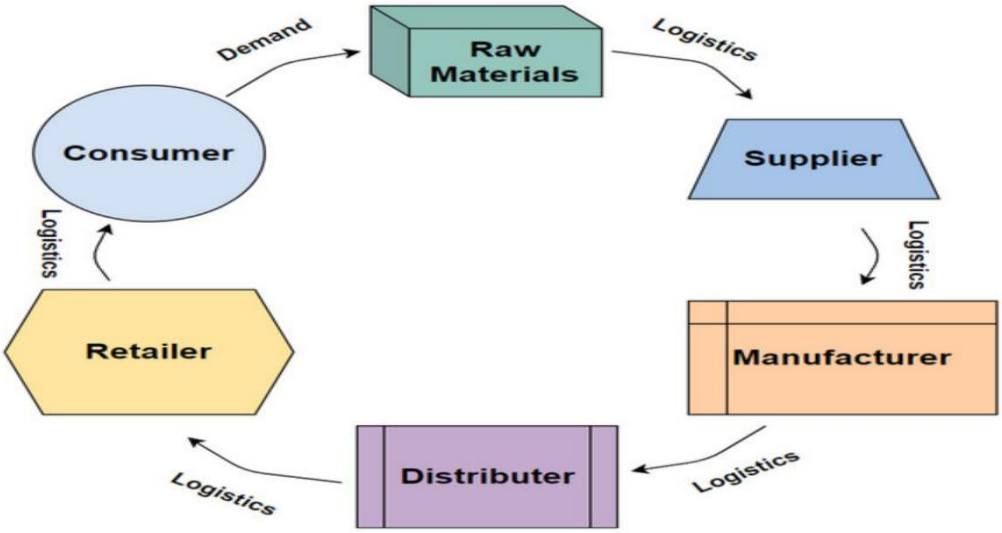
2 Toimitusketju

Tässä luvussa syvennytään toimitusketjuun (engl. supply chain) ja siihen, kuinka se on muovaantunut siihen muotoon missä se nykypäivänä on. Tehokkaasti ja hyvin toimivan yrityksen toimitusketju on yhdenmukainen sen liiketoimintastrategian kanssa. Jokainen yritys sopii yhteen tai useampaan toimitusketjuun ja yritykset tarvitsevat toimitusketjuja, koska ne tarjoavat yrityksille avaimet selviytymiseen ja menestykseen (Hugos, 2018). Kääntöpuolena toimitusketjun laadun laiminlyönti voi lisätä häiriöitä ja niiden kielteisiä vaikutuksia yrityksen toimintaan sekä taloudelliseen tulokseen (Mahour, 2019).

2.1 Perinteinen toimitusketju

Yksiseitteisesti toimitusketjun määritteleminen on vaikeaa. Määritelmä toimitusketjulle on se, että se on verkosto, joka koostuu monista eri solmuista ja linkeistä. Tätä verkostoa tarvitaan, jotta saadaan tietyn palvelun tai tuotteen aikaansaanti materiaaleista ja raaka-aineista lähtien aina asiakkaalle toimitukseen saakka (Carter et al, 2015). Yksinkertaistettuna määritelmänä Hugos puolestaan kuvailee toimitusketjun koostuvan kolmesta perusryhmästä: Yritys, toimittaja ja asiakas.

Lambertin ja Cooperin mukaan on tärkeää ymmärtää, miten toimitusketjun verkostorakenne on määritetty yrityksessä. Heidän ehdotuksensa mukaan verkosto jaetaan kolmeen osaan: toimitusketjun jäsenet, verkoston eri rakeenteelliset ulottuvuudet ja eri prosessien väliset linkit toimitusketjussa. Lambert ja Cooper jatkavat, että toimitusketjun verkostorakenteeseen kuuluvien jäsenten määrittelemisessä on tärkeää pystyä tunnistamaan kaikki siihen kuuluvat jäsenet, vaikka tämä voi tehdä verkostosta monimutkaisen. Tässä vaiheessa esille nousee kyky tunnistaa yrityksen ja toimitusketjun kannalta kriittiset jäsenet, jotka ansaitsevat erityisesti johdon huomion ja resurssit.



Kuva 2. Yleinen esimerkkikuva toimitusketjusta ja sen vaiheista.

Yläpuolella olevassa kuvassa esitetään toimitusketjun eri vaiheet kiertävänä virtauksena. Ketju alkaa raaka-aineista (engl. raw materials) kulkien toimittajan (engl. supplier), valmistajan (engl. manufacturer), jakelijan (eng. distrubuter), jälleenmyyjän (engl. retailer) kautta aina kuluttajalle (engl. consumer) asti. Logistiikka (engl. logistics) on aiheiden välissä nuolella merkattuna, mikä on myös olennainen osa toimitusketjua. Logistiikka on aina edustanut toimitusketjulähtöistä ajattelua "alkulähteestä aina kuluttajalle saakka" (Lambert & Cooper, 2000, s. 67).

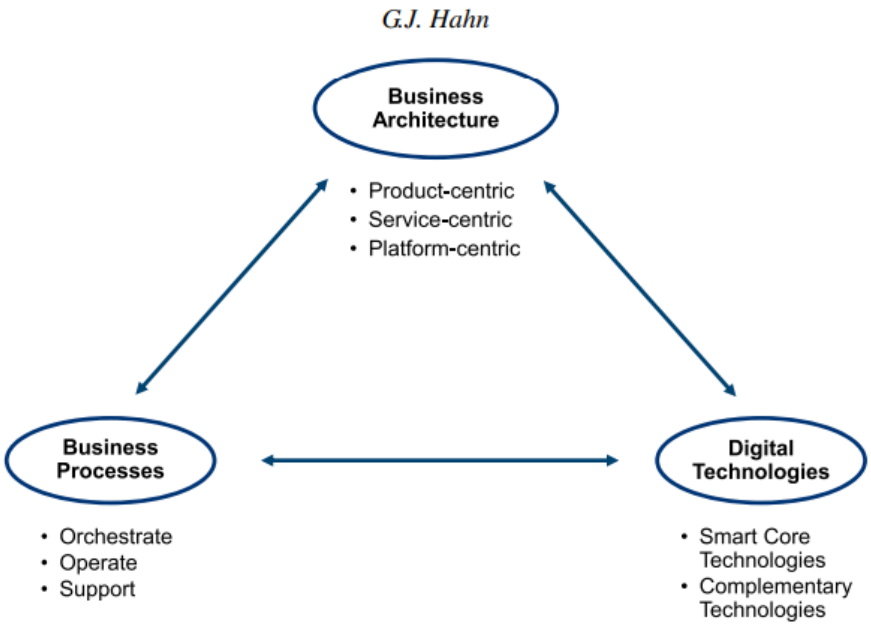
2.2 Toimitusketjun hallinta

Toimitusketjun määritelmän syntymisen myötä on luonnollisesti syntynyt termi Toimitusketjun hallinta (engl. supply chain management). Toimitusketjun hallinnassa tunnistetaan toimitusketjun keskeiset prosessit ja konstruktiot, jonka jälkeen pyritään optimoimaan toimitusketju toimimaan mahdollisimman hyvin (Carter, et al. 2015). Toimitusketjun tehokas optimointi on kriittistä organisaatioiden menestyksen kannalta ja viimeisten vuosikymmenten aikana tehdyt tutkimukset osoittavat, että toimitusketjun hallinnalla on merkittävä rooli yrityksen strategiassa (Madhavaram, 2023).

Integroidun toimitusketjun toiminta edellyttää jatkuvaa tiedonkulkua. Tämä auttaa luomaan parhaat tuotevirrat. Asiakas pysyy prosessin keskipisteessä. Hyvän asiakaslähtöisen järjestelmän saavuttaminen vaatii tarkkaa ja oikea-aikaista tietojen käsittelyä. Nopea reagointi puolestaan edellyttää säännöllisiä muutoksia vastauksena asiakkaiden kysynnän vaihteluihin. Tällöin kysyntään liittyvän epävarmuuden hallinta sekä joustava valmistus nousevat keskeiseen rooliin toimitusketjun hallinnassa (Lampert & Cooper, 2000, s.72).

2.3 Toimitusketjun hallinnan kehitys ja tulevaisuus

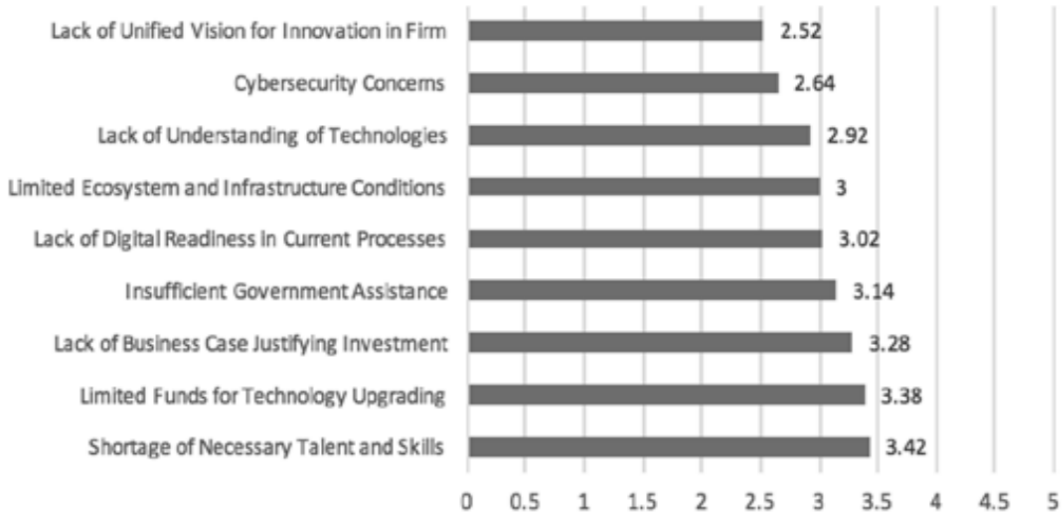
Neljännen teollisen vallankumouksen myötä (engl. industry 4.0), jota voi sanoa myös teollisuuden digitalisaatioksi fyysinen ja virtuaalinen maailma sekä ihmiset ja asiat hitsautuvat enemmän yhteen. Toimitusketjun hallinnan osalta tämä tarkoittaa, että keskeiseen rooliin nousee massadata (engl. big data) ja kehittynyt analytiikka (Hahn & Gerd, 2020). Hahn ja Gerd (2020) ennustavat, että tulevaisuudessa uudet teknologiat ja innovaatiot kuten 3D-tulostus, robotit ja autonomiset ajoneuvot tulevat täydentämään neljännen teollisen vallankumouksen toimitusketjujärjestelmiä. Kehityksen myötä syntyy uusia malleja ja käsitteitä. Toimitusketjun innovaatio (engl. supply chain innovation) on malli, joka kattaa kolme toisiinsa vaikuttavaa sisältöelementtiä: liiketoimintaprosessit (engl. business process), digitaalinen teknologia (engl. digital technology) ja liiketoiminta-arkkitehtuuri (engl. business architecture). Tämä malli vastaa teknologialähtöisen innovaation liiketoimintakeskeisempää näkökulmaa osana digitaalista transformaatioita (Hahn & Gerd, 2020) kts. alla oleva kuva.



Kuva 3. Hahnin konsepti toimitusketjun innovaatio mallista.

Yeap et al. vuonna 2024 tekemässä tutkimuksessa syvennytään siihen, kuinka neljännen teollisen vallankumouksen mukana tulleet teknologiat ovat tuoneet päätekijöitä ja haasteita elektroniikkateollisuuteen Malesiassa. Elektroniikkateollisuus nähdään eturintamassa huipputeknologian osalta niin tuotteiden kun prosessien kehittämisessä. Kyseisiä teknologioita kehitetään yritysten oman sisäisten kehitys- ja tutkimustoiminnan kautta sekä ulkoisista lähteistä, kuten toimittajilta ja yhteistyökumppaneilta (Yeap et al, 2024).

Tutkimuksessa keskeisiksi haasteiksi mm. nousee: nykyisten tuotantoinfrastruktuurin soveltuvuus, datan vaihtelu, kyberturvallisuusuhat, teknologisen ymmärryksen puute, epäsuotuisa infrastruktuuri ja ekosysteemi, muutokset työtehtävien rakenteissa, teknologian kysynnän ja tarjonnan välinen tasapaino, teknologisen kyvykkyyden puute, hallituksen tuen puuttuminen ja strategian puuttuminen (Yeap et al, 2024).



Taulukko 2. Pylväsdiagrammi keskeisistä haasteista neljännen teollisen vallankumouksen takia elektroniikkateollisuudessa ja niiden suuruus (Yeap et al, 2024, s. 42).

Pylväsdiagrammista näkee, että merkittävimmät haasteet ovat tarvittavien kykyjen ja taitojen puute, rajalliset varat teknologian päivittämiseen sekä liiketoimintaperusteen puuttuminen investointien oikeuttamiseksi. Monet yritykset ovat nostaneet esiin tarpeen parantaa sisäistä osaamistaan. Tämä auttaisi uuden teknologian hyödyntämisessä tehokkaasti. Vastavalmistuneiden taso ei usein vastaa yrityksien muuttuvia tarpeita (Yeap et al, 2024).

Yritykset korostavat, että varoja prosessiteknologian kehittämiselle on saatavilla rajoitetusti. Tämä johtuu emoyhtiöiden haluttomuudesta tehdä suuria investointeja merkittäviin muutoksiin tuotantojärjestelmissä (Yeap et al, 2024

Toimitusketjujen kehittyessä niissä käytetty lohkoketjuteknologia (engl. blockchain technology) kehittyy vauhdilla niiden mukana. Lohkoketjun pääkirja (engl. distributed ledger) tallentaa turvallisesti tietoja ja tapahtumia lohkoketjujen tai tietokoneiden välillä. Tuotteen ollessa käsittelyssä toimitusketjun toimijalla, päivitetään pääkirjaan tarvittavat tiedot. Tämä tekee prosessista täysin läpinäkyvän sekä helposti jäljitettävän. Jokainen ketjussa oleva solmu ylläpitää omaa kopiotaan pääkirjasta. Tämä poistaa tarpeen keskitetyille viranomaisille tai välikäsille (Jadon et al, 2024).

Lohkoketjuteknologian hyvien ominaisuuksien mukana tulee myös haasteita. Sen integroiminen toimitusketjuihin tuo mukanaan monia eri tekijöitä. Käytössä olevat lohkoketjuverkostot vaativat valtavasti energiaa. Kyseisen teknologian käyttöönotto missä tahansa toimitusketjun järjestelmässä kasvattaa energiakulutusta paljon (Jadon et al, 2024).

Teknologian, jota lohkoketjuissa käytetään ollessa vielä uutta ja tuntematonta syntyy mahdollisuus, että niiden käyttöönotto aiheuttaa epäröintiä. Toimitusketjun hallinnan siirtäminen lohkoketjupohjaiseksi on valtava prosessi. Kyseisessä prosessia toimitusketjuun integroidaan paljon erilaisia laitteita. Kuten lohkoketjuteknologian viiveen kanssa, mitä enemmän sidosryhmiä on toimitusketjussa sitä, enemmän mahdollisia haasteita on. Käyttöönotto ratkaisun on tärkeä olla helppo ottaa käyttöön ja ymmärtää (Jadon et al, 2024).

Toinen siirtymää hidastava tekijä on erilaiset tietosuojavaatimukset. Järjestelmiin on tärkeää sisällyttää erilaisia tunnistusmenetelmiä, jotka auttavat tarvittaessa puuttumaan mahdollisiin väärinkäytös tapauksiin ja määrittelemään kuka on vastuussa. Käytännön haasteita aiheuttaa se, että jotkut lähestymistavat tarjoavat anonymiteetin. Viranomaisten rooli ja vaikutus verkon rakenteeseen on myös olennaista määritellä. Järjestelmissä olevien osallistujien henkilöllisyyden varmentaminen korostuu näkökulmana tässä aiheessa. Keskitetty viranomainen, jolla on sopiva määrä tietoja järjestelmien käyttäjistä voi edistää ja tasapainottaa yksityisyyden suojaa ja jäljitettävyyttä (Jadon et al, 2024).

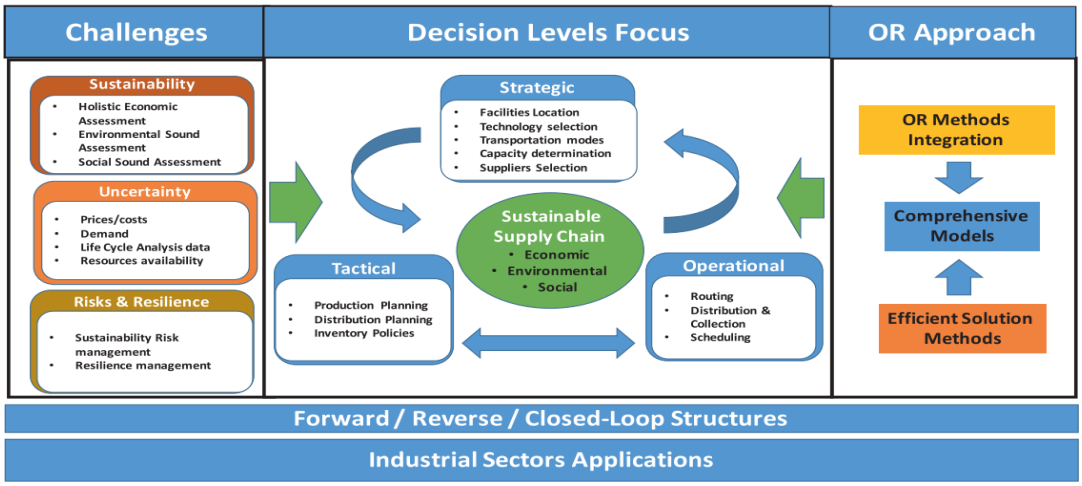
Digitaalinen vallankumous ja koneoppiminen ovat mullistaneet toimitusketjujen riskienhallinnan kehitystä sekä parantaneet kysynnän ja tarjonnan arvioimista nyt ja tulevaisuudessa. Ne ovat myös edistäneet verkottumista toimitusketjun eri kanavien välillä ja tukeneet vakaan toimitusketjun rakentamista. Kehittyneiden teknologioiden käyttöönoton koetaan vaikuttavan positiivisesti ja hyödyllisesti sen luodessa mahdollisuuksia voiton

optimointiin ja parhaan mahdollisen kilpailuedun saavuttamiseen (Moumeni, et al, 2023).

2.4 Kestävä toimitusketju

Kestävä toimitusketju (engl. sustainable supply chain) on nykypäivänä keskeinen osa yritysten tavoitteita kohti kestävää kehitystä. Yrityksen imago ei enää perustu vain sen omaan toimintaan, vaan myös vahvaan yhteistyöhön toimitusketjun eri sidosryhmien kanssa kestävyyden edistämiseksi (Barbosa-Póvoa et al, 2018). Tätä kiinnostusta kestävään kehityksen lisäsi vuonna 2014 YK:n ympäristöohjelman perustama hallitusten välinen ilmastopaneeli, joka teki ehdotuksen, että kasvihuonekaasupäästöjä on vähennettävä 40–70 % vuoteen 2050 mennessä verrattuna vuoden 2010 tasoon. Lisäksi päästöjen on laskettava lähes nollaan vuosisadan loppuun mennessä (Sueyoshi & Wang, 2014). Ehdotuksessa perusteltiin, että ratkaisu ongelmaan edellyttää nykyisten energiantuotantojärjestelmien muuttamista tehokkaammiksi ja vähäpäästöisemmiksi.

Mikäli ongelmaan ei puututtaisi, seuraukset voisivat olla vakavia, kuten helleaallot, kuivuus, tulvat, ruokakriisit ja muut inhimillisiä, sosiaalisia ja taloudellisia järjestelmiä vahingoittavat ilmiöt (Sueyoshi & Wang, 2014). Kestävä toimitusketju on verkosto, joka yhdistää toimittajat, asiakkaat ja palautusprosessit. Se huomioi kestävyyden kolmella eri tasolla: ympäristölliset, sosiaaliset ja taloudelliset vaikutukset (Barbosa-Póvoa, et al. 2018).



Kuva 4. Kestävän toimitusketjun hallintaa tukevia työkaluja päätöksen teossa (Barbosa-Póvoa et al. 2018).

Yläpuolella olevassa kuvassa esitellään, mitä on tärkeä ottaa huomioon kestävässä toimitusketjun hallinnassa. Kuvassa on kolme pääosaa: haasteet (engl. challenges), päätöksenteon tasot (engl. decision level focus) ja operatiivinen lähestyminen (engl. OR approach). Haasteissa on nostettu esille kestävyys (engl. sustainability), joka sisältää sosiaalisen-, taloudellisen- ja ympäristöllisen arvioinnin. Seuraavana haasteissa on epävarmuus (engl. uncertainty). Tässä korostuu muutokset kysynnässä, hinnoissa, resurssien saatavuudessa sekä elinkaarianalyysista saatu data. Viimeisenä haasteissa on riskit ja resilienssi (engl. risks & resilence) missä yksinkertaistettuna pyritään hallitsemaan kahta edellä mainittua.

Päätöksenteon tasoissa kuvassa korostuu strateginen (engl. strategic) puoli. Tässä otetaan huomioon laitosten sijainti, käytettävien teknologioiden valinta, kuljetusmuodot, kapasiteetin määritys ja toimittajien valinta. Seuraavana on taktinen puoli (engl. tactical), johon sisältyy varastopolitiikka sekä tuotannon- ja jakelun suunnitteleminen. Päätöksenteon tasojen kolmannessa osassa on operatiivinen puoli (engl. operational), jossa painottuu reititys, aikataulutus, jakelu ja keräily. Päätöksenteon tasojen keskiössä on kestävä toimitusketju, jossa mainitaan taloudelliset-, ympäristölliset- ja sosiaaliset näkökulmat.

Kuvan viimeisessä pääkohdassa eli operatiivisessa osiossa tulee esiin operatiivisten menetelmien integrointi, erilaiset kattavat mallit ja tehokkaat ratkaisumenetelmät.

3 Toimitusketjun haasteet elektroniikkateollisuudessa

Tässä luvussa syvennytään haasteisiin, joita moniulotteisen rakenteensa vuoksi toimitusketju kohtaa. Tarkoituksena on tarkastella haasteita elektroniikkateollisuuden näkökulmasta. Tässä tarkastelussa käytetään apuna PESTEL-analyysiä. PESTEL-analyysi auttaa saamaan kokonaisvaltaisen kuvan eri näkökulmista tutkiessa haasteita toimitusketjuissa. PESTEL-analyysi koostuu viidestä eri tekijästä: Poliittisista (engl. politics), taloudellisista (engl. economics), yhteiskunnallisista (engl. society), teknologisista (engl. technology), ympäristöllisistä (engl. environment) ja lainsäädännöllisistä (engl. legal) tekijöistä (Vuorinen, 2023)

3.1 Poliittiset tekijät

Martin-Ortega toteaa vuonna 2018 julkaistussa artikkelissa, että elektroniikkateollisuudessa julkisilla ostajilla on suuri vaikutusvalta brändien ja jälleenmyyjien toimintaan globaaleissa toimitusketjuissa. Siitä huolimatta, että valtioilla on tapana käyttää omaa harkintavaltaansa edistääkseen omia sosiaalisia kysymyksiään julkisilla hankinnoilla, tätä keinoa ei yleensä hyödynnetä sellaisten henkilöiden työolosuhteiden parantamiseksi, jotka eivät kuulu valtion lainkäyttövallan piiriin, mutta työskentelevät valmistamassa hankittuja tuotteita.

Martin-Ortega jatkaa, että kyseisten julkisten hankintojen käyttö ihmisoikeuksien kehittämiseksi ja suojelemiseksi on alikehittynyttä niin teoriassa kuin käytännössäkin. Myös Locken ja Samuelin vuonna 2018 julkaisemassa artikkelissa todetaan, että globaalin toimitusketjun huonot työolosuhteet johtuvat riittämättömästä valtion sääntelystä tai heikosti suunnitelluista yksityisistä valvonta järjestelmistä. Nämä järjestelmät ovat riittämättömiä, koska ne keskittyvät yksinomaan tuotantopaikkaan eli tässä tapauksessa tehtaisiin, jotka valmistavat tuotteita globaaleille ostajille ja näiden tarpeisiin. He jatkavat, että työpaikkaan keskittyminen saattaa vaikuttaa järkevältä, koska useimmissa tapauksissa työnormien rikkomukset tapahtuvat juuri työpaikoilla, todellisuudessa monet työ-

paikoilla havaitut ongelmat ovat seurausta toimitusketjun aikaisessa vaiheessa syntyvästä globaalien ostajien ja heidän johtavien tavarantoimittajiensa suunnittelemista ja toteuttamista käytännöistä ja politiikoista (Locke & Samuel, 2018).

Aloitteet ihmisoikeuksien parantamiseksi maailmanlaajuisessa tavaratuotannossa ovat keskittyneet pääasiassa kahteen osa-alueeseen: Niiden yrityksien vastuisiin, jotka valmistavat ja osallistuvat kulutustuotteiden kaupallistamiseen sekä valtioiden velvollisuuksiin säädellä työolojaan lainkäyttövaltansa alaisuudessa. Molemmat aloitteet ovat tuottaneet rajallisia tuloksia kahden viime vuosikymmenen aikana. Toimitusketjujen työolot eivät ole parantuneet merkittävästi, vaikka yritysten itsesääntelyyn on luotettukin eikä lupaukset useiden sidosryhmien aloitteista ole vastannut niille asetettuja odotuksia (Martin-Ortega, 2018).

Markkina arvoltaan suurimman julkisen yhtiön elektroniikka jätin Applen liittyessä Fair Labor Asscociationiin vuonna 2012, alkoi käännekohta globaalien brändien pyrkimyksistä etääntyä toimitusketjuissa esiintyviin ympäristö- ja työongelmiin (Distelhorst et al, 2015). Globaalit brändit ja niiden päätoimittajat ovat kehittäneet tuotannonsuunnittelu- ja valmistusjärjestelmiä, joiden tarkoitus on minimoida riskit tilanteissa, joissa kuluttajien kysyntään ei vastata ajoissa. Siitä huolimatta, että nämä tekniikat ovat tuotteiden kannalta tehokkaita, koska ne mm. mahdollistavat laajemman tuotevalikoiman ja nopeammat tuotteiden lanseeraukset, ne synnyttävät myös erilaisia työvoimaan liittyviä ongelmia tehtaille ja niiden työntekijöille (Locke & Samuel, 2018). Tilausten vaihtelua hallintaan tayloristisella työjärjestelyllä, jossa tuotteet kootaan käsin. Tämä mahdollistaa tarvittaessa nopean tuotannon ylös- tai alasajon. Kyseinen järjestely vaatii erittäin joustavaa työvoimaa, mikä tarkoittaa usein siirtotyöläisiä. Siirtotyöläiset tekevät pitkiä työpäiviä matalalla palkalla, joka johtaa työnormien rikkomuksiin erityisesti liiallisiin työtunteihin, jotka voivat olla jopa 72–84 tuntia viikossa (Locke & Samuel, 2018).

Elektroniikkateollisuus keskittyy vahvasti loppukuluttajiinsa. Markkinoiden kysyntä ja kuluttajien kuva yrityksestä ovat globaaleille brändeille kriittisiä. Tunnettujen globaalien

brändien pääkonttorit sijaitsevat pääsääntöisesti kehittyneissä maissa. Nämä elektroniikkateollisuutta harjoittavat yritykset ovat arvokkaita yrityksiä, jotka kuuluvat maailman suurimpiin liikevaihtoa tuottaviin yrityksiin (Martin-Ortega, 2018). Yksittäinen valmistettava tuote voi sisältää komponentteja, joiden valmistukseen osallistuu useita yrityksiä eri maissa. Brändit eivät yleensä itse osallistu valmistukseen juuri ollenkaan. Ne aloittavat tuotannon, toteuttavat tuotesuunnittelua sekä brändäystä. Tämän lisäksi brändit keskittyvät kehittämään muita keskeisiä elementtejä, kuten ohjelmistoja. Elektroniikkatuotteiden monimutkaisia komponentteja voidaan valmistaa maissa, joissa sijaitsee teknologiakeskittymiä, mutta suurin osa valmistuksesta tapahtuu kuitenkin edullisissa kehittyvissä maissa, joissa kustannukset ovat alhaiset ja työvoimaa on paljon (Martin-Ortega, 2018).

3.2 Taloudelliset tekijät

5G teknologian vaikutus taloudellisesti tuotantoteollisuuteen on kasvanut valtavasti. Arvioidaan, että vuoteen 2023 maailmanlaajuisen tuotantoteollisuuden bruttokansantuotteen odotetaan kasvavan jopa 740 miljardia dollaria. 5G teknologia tarjoaa matalaa viivettä, suuria tiedonsiirtonopeuksia ja mahdollisuuden käyttää yhä useampia laitteita samanaikaisesti. 5G:ltä odotetaan, että se pystyy vastaamaan verkottuneiden tuotantojärjestelmien vaatimuksiin ja sillä on potentiaalia vauhdittaa digitaalista muutosta entisestään (Kiesel & Schmitt, 2020).

Ennakoiduista mahdollisista 5G teknologian tulevaisuudessa tuomista eduista huolimatta, 5G teknologian liittämisen tuotantoprosessin tuomat hyödyt ovat haastavia mitata. 40 % yrityksistä nostaa esiin, että 5G teknologian tuomien hyötyjen heikko mitattavuus heidän omissa prosesseissaan on keskeinen huolenaihe. Jotta päätöksentekijöille voidaan tarjota perustelut investointipäätökselle, on kriittistä pystyä mittaamaan tuotantoprosessien kehittämispotentiaali ja niiden tuoma rahallinen hyöty (Kiesel & Schmitt, 2020).

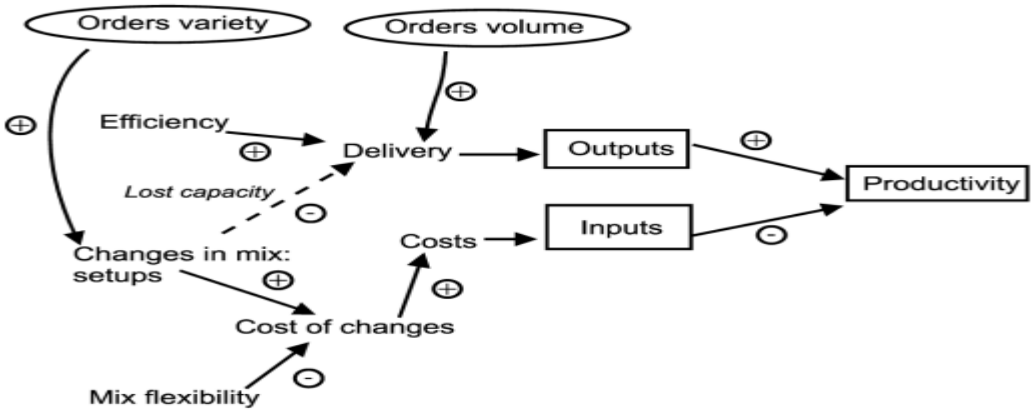
Kiesel ja Schmitt jatkavat, että Saksassa 505 tuotantoyritykselle tehdyssä kyselyssä 84 % yrityksistä uskovat, että 5G teknologia tuo merkittäviä hyötyjä tuottavuudelle ja 70 % prosenttia pitää 5G:tä keskeisenä teknologiana tulevaisuudessa. Kyselyn tuloksista huolimatta 55 % vastanneista kuitenkinkin toteaa, että 5G teknologian käyttöönotto ei ole heille ajankohtainen aihe tällä hetkellä. Perusteluna tälle esiin nousee tietämys 5G teknologian tuomista hyödyistä. Vastauksista korostuu myös se, että yritykset eivät ole varannut budjetistaan varoja potentiaalisiin 5G investointeihin (Kiesel & Schmitt, 2020).

Koko maailmaa koskettaneen Covid-19 pandemian alkaminen avasi koko maailman silmät toimitusketjun tärkeydestä. Nopeasti pandemian alkamisen jälkeen mikrosirupulasta tuli nopeasti näkyvin esimerkki, miten nopeasti pullonkaulat (engl. bottlenecks) voivat vaikuttaa liiketoimintaan (Sants, 2023). Covid-19 kriisi kaatoi sekä toimitusketjut, että kuluttajien käyttäytymisen ja siitä huolimatta, että se kosketti ensimmäisenä autoteollisuutta sen, vaikutukset iskivät lopulta myös elektroniikkatuotteita myyviin vähittäistavarakauppoihin (Manes, 2021).

Vuosia myöhemmin tämän tapahtumasarjan vaikutukset heijastuvat edelleen, mikä saa sijoittajat miettimään huolellisesti, miten lähestyä huipputeknologian tarjoamia mahdollisuuksia. Viimeisten kolmen vuosikymmenen aikana globalisoitunut tuotantomalli on synnyttänyt joukon puolijohdejättejä eri puolilla maailmaa. Tämä järjestelmä, yhdistettynä puolijohteiden kysynnän jatkuvaan kasvuun, on ollut tuottoisa sijoittajille: viimeaikaisista haasteista huolimatta kaikkien näiden yritysten markkina-arvot ovat vähintään kaksinkertaistuneet viimeisten viiden vuoden aikana. Covid-19 pandemia kuitenkin osoitti, että järjestelmä on synnyttänyt toimitusketjun, jossa pullonkaulat ovat yleisiä ja osaaminen keskittynyt tietyille maille tai organisaatioille (Sants, 2023). Sants jatkaa, että poliittisten jännitteiden kasvaessa idän ja lännen välillä hallitukset ympäri maailmaa pyrkivät ottamaan isomman osuuden puolijohde markkinasta, jonka ennustetaan kasvavan entisestään tulevina vuosina.

Elektroniikkateollisuudessa kilpailu on kovaa ja ala kehittyy jatkuvasti. Myöhästymiset tuotekehityksessä voivat pahimmillaan myöhästyttää markkinoille pääsyä, mikä heijastuu välittömästi potentiaalisiin myyntituottoihin ja kilpailuetuihin (Loch, et al, 1996). Jatkuvasti muuttuvat markkinat vaativat erilaisia tuotteita ja pienimpiä toimitusmääriä tiukemmilla toimitusajoilla. Kilpailu markkinoilla on aikaperusteista uusien tuotteiden saaminen markkinoille oikeaan aikaan ja kilpailukykyinen toimiva läpimenoaika (engl. lead time) korostuu entisestään yrityksen menestymisen kannalta (Helo, 2004).

Asiakkaat vaativat laajempaa tuotevalikoimaa ja edullisesti suunniteltuja ratkaisuja. Tuotteet valmistetaan asiakastilausten mukaan ja valintoja on tehtävä paljon ennen kuin tuote on määritelty täysin. Teknologian nopea kehitys pakottaa käyttäjät omaksumaan uusia ratkaisuja jatkuvasti. Tämä heijastuu tuotteiden elinkaarien lyhentymisenä vuosikymmenistä kuukausiin. Elektroniikkateollisuus kohtaa epävarmuutta näiden uusien ja parempien tuotekehitysteknologioiden takia. Yritysten johtajien on oltava reaktiokykyisiä ja ylläpidettävä tuottavuutta tilanteessa, jossa tuotteet muuttuvat useita kertoja vuodessa. Tämänlaisessa dynaamisessa ympäristössä on haasteellista ylläpitää sopiva suorituskyky, joten tehokkuus (engl. efficiency) ja joustavuus (engl. flexibility) korostuvat tuottavuudessa (Helo, 2004).



Kuva 5. Joustavuus ja tehokkuus korostuvat erillisinä tekijöinä tuottavuudessa (Helo, 2004 s. 576).

3.3 Yhteiskunnalliset tekijät

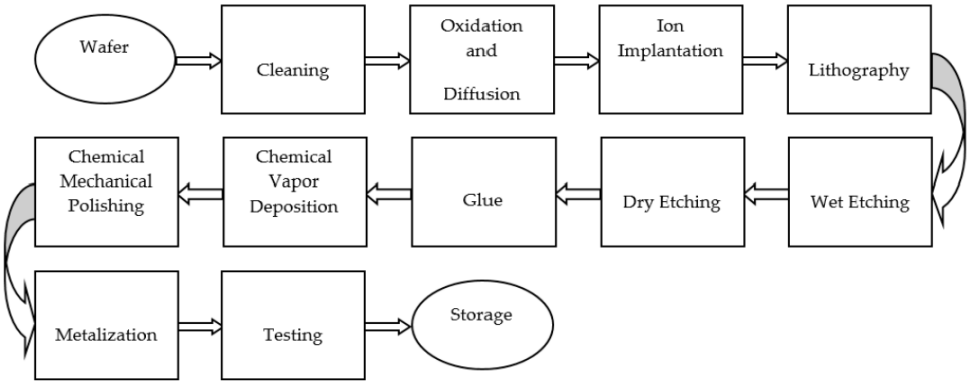
Tietokoneiden, tablettien ja kosketusnäytöllisten puhelimien näytöissä käytettävässä indium metallissa on todettu olevan terveydelle haitallisia vaikutuksia, kun kyseinen metalli ja sen yhdisteet pääsevät varastoitumaan kehokoihin hengittäessä. Pitkäaikainen altistuminen indiumille on yhdistetty terveyshaittoihin, kun vuonna 2001 indiumin kanssa työskennellyt japanilainen työntekijä kuoli keuhkosairauteen. Tämän tapauksen jälkeen indiumin terveyshaittoihin on kiinnitetty laajempaa huomioita (Yi et al, 2021).

Elektroniikan yleistyessä ja tietokoneiden, tablettien sekä kosketusnäyttöpuhelimien löytäessä yhä useammalle kuluttajalle. Yksi suurimmista indiumin kuluttajamaista Etelä-Korea on kehityksellään mahdollisesti lisännyt indiumaltistumisia työntekijöillä. Siitä huolimatta altistumisen arvioinnista, työympäristön hallinnasta eikä työntekijöiden seerumitasoista ei ole saatavilla tietoa, koska tämä jää laillisen hallinnon katvealueelle (Yi et al, 2021).

Työterveydelliset riskit ovat nousseet tutkimuksen aiheeksi myös elektroniikkateollisuuden toisessa suuressa maassa Kiinassa tietoisuus työterveysriskien hallinnasta elektroniikkateollisuudessa on heikolla tasolla. Monia työterveyden hallintaa koskevia säädöksiä ei ole toteutettu tehokkaasti. EPA:n (Environmental Protection Agency) tekemän tutkimuksen mukaan työterveysriskit ovat korkeimmillaan työntekijöillä, jotka työskentelevät juuri elektronisten sirujen valmistuksen parissa. Tämä johtuu myös altistumisesta erilaisille myrkyllisille kemikaaleille (Cai et al, 2018).

Elektronisten sirujen valmistuksessa on monia vaiheita ja eri vaiheissa käsitellään monia useita erilaisia vaarallisia kemikaaleja (Kts kuva 6 ja taulukko 1.). Siruja valmistavassa yrityksessä paikan päällä tehdyssä kenttätutkimuksessa kohteena olivat pääasiassa kemialliset vaaratekijät, joihin kuuluivat ammoniakki (engl. ammonia), kloori (engl. chlorine), otsoni (engl. ozone), fluoridi (engl. fluoride), rikkihappo (engl. sulfuric acid), vetykloridi

(engl. hydrogen chloride), etyleeniglykoli (engl. ethylene glucol), fosfiini (engl. phosiphine), booritrifluoridi (engl. boron trifluoride), isopropanoli (engl. isopropanol) ja MACH (engl. MACH) (Cai et al, 2018).



Kuva 6. Elektronisen sirun valmistusprosessit (Cai, 2018, s.3).

Main Process	Possible Chemical Hazards
Cleaning	Hydrogen peroxide, sulfuric acid, phosphoric acid, nitric acid, hydrofluoric acid, hydrochloric acid, isopropyl alcohol, acetone. and ammonia
Oxidation and Diffusion	Diborane and phosphine
Ion Implantation	Phosphine, arsine, and boron trifluoride
Lithography	TMAH, cyclopentanone, isopropanol, ethylene glycol, and butyl acetate
Wet Etching	Sulfuric acid, hydrofluoric acid, nitric acid, phosphoric acid, ammonia, and hydrogen peroxide
Dry Etching	Sulphur hexafluoride, hydrogen chloride, and chlorine
Chemical Vapor Deposition	Hydrogen chloride, fluoride, silane, phosphine, arsine, diborane, chlorine trifluoride, ammonia, chlorine, and nitrogen oxides
Chemical Mechanical Polishing	Ammonia, hydrofluoric acid, hydrogen peroxide, and potassium hydroxide
Metalization	Copper, ammonia, hydrofluoric acid, sulfuric acid, nitric acid, fluoride, and hydrogen peroxide
Public Auxiliary Facilities	Hydrochloric acid, sulfuric acid, sodium hydroxide, ammonia, fluoride, hydrogen fluoride, chlorine, isopropyl alcohol, acetone, ozone, carbon monoxide, carbon dioxide, methane and MACHs

Taulukko 1. Elektronisen sirun valmistusprosessissa esiintyvät mahdolliset terveysriskit kemiallisten vaarojen muodossa (Cai, 2018, s.4).

Paikan päällä tehdystä tutkimuksesta selvisi työperäisten vaaraluokituksen perusteella, että altistuminen näille kemikaaleille luokiteltiin suhteellisen pieneksi. Mitatut kemikaalien pitoisuudet olivat alle altistumisrajojen. Testitulosten täyttäessä työperäisen altistumisen raja-arvot Kiinassa olivat tutkimuksen arviointitulokset suhteellisen vaarattomia. Samaan aikaan EPA:n tekemät hengitysteiden riskiarviointimallin tulokset puolestaan osoittivat suhteellisen suuria riskejä. Tutkimuksessa todetaan lopuksi, että arvioinnissa

tulisi ottaa huomioon akuutit ja krooniset vaikutukset sekä karsinogeeniset ja ei-karsinogeeniset vaikutukset (Cai et al, 2018).

3.4 Teknologiset tekijät

Elektronisten laitteiden suorituskyvyn kasvamisen ja kotelointiteknologian kehittymisen mukana tulleiden hyötyjen lisäksi on tullut myös haasteita. Sirujen integrointi ja mikronystyröiden koon pieneminen aiheuttavat elektroniikassa suurta virrantiheyttä ja liiallista lämmöntuottoa. Tämä aiheuttaa ongelmia luotettavuudessa termomigraatiossa (engl. thermomigration) ja elektromigraatiossa (engl. electromigration), mikä puolestaan lyhytentää juoteliitosten elinikää. Sähkövastus kasvaa juoteliitoksissa onteloiden etenemisen myötä, tämä aiheuttaa liiallista lämpöä. Liiallinen lämpö voi johtaa juoteseoksen sulamiseen jopa huoneenlämmössä (Zhang, et al, 2020).

Zhang et al jatkavat, että juotejärjestelmiä on monia ja eri alkuaineet käyttäytyvät eri tasoilla siksi hallitsevan migraatioalkuaineen ja eri alkuaineiden diffuusion suunnat ovat tärkeitä selvittää testausolosuhteissa. Siitä huolimatta, että termomigraatiota ja elektromigraatiota ja niiden vaikutusta lyijyttömiin juotteisiin on tutkittu paljon, on niiden yhdistetyn vaikutuksen tutkiminen edelleen vähäistä. Juoteliitoksiin kohdistuu todellisessa käytössä monia eri kuormituksia kuten lämpöstressiä, magneettikenttiä, mekaanista kuormitusta ja muita ulkoisia tekijöitä. Käyttöympäristöjen monimutkaistuessa lyijyttömiä juotteita käytetään äärimmäisissä olosuhteissa, joita ovat muun muassa säteilyolosuhteet, äärimmäisen matalat lämpötilat ja voimakkaat lämpötilavaihtelut. Juoteliitosten vikamekanismeja voitaisiin ymmärtää paremmin ja niiden luotettavuutta parantaa panostamalla niiden tutkimiseen kiireellisesti. Tämä auttaisi myös kehittämään menetelmiä, joilla voidaan ennustaa niiden elinaikaa paremmin (Zhang, et al, 2020).

Piirilevyjen miniatyrisointia (engl. miniaturization) hankaloittaa myös niiden käyttötarkoitusvaatimusten kasvaminen. Piirilevyjä käytetään esim. 5G viestinnässä, avaruus- ja

ilmailuteknologiassa sekä nykypäivänä yleistyneissä tekoälyissä. Niiden tarjoamaa kapasiteettia ja kokoa ei voida tällä hetkellä optimoida yhtä aikaa. Tämä estää suuritehoisten rakenteiden toteuttamista ja elektroniikan miniatyrisointia (Zhang, et. al, 2025)

Miniatyrisointi edellyttää piiriä, jossa resoluutio on korkea eli viivanleveys on pieni, jotta tarvittava pinta-ala voidaan pienentää. Kääntöpuolena pieni viivanleveys tarkoittaa piirin resistanssin kasvua. Resistanssin kasvu tarkoittaa piirilevyn virrankantokyvyn huomattavaa rajoittumista. Tämän haasteen ratkaisemiseksi yhteen keskeiseen rooliin nousee CCB-levyt ja niiden kehittäminen. Tämä johtuu siitä, että CCB-levyissä yhdistyy korkea resoluutio sekä kuvasuhde. Nämä piirilevyt voivat olla tulevaisuudessa avain suuritehoisten rakenteiden ja miniatyrisoinnin osalta (Zhang, et al, 2025).

5G verkkojen kehityksen myötä maailmassa on tapahtunut suuri muutos päivittäisessä elämässä. Ihmiset käyttävät verkkoa moneen muuhunkin asiaan, kun viestien lähettämiseen. Verkkoa hyödynnetään vuorovaikutukseen käytännössä kaiken kanssa. Lukuisat elektroniset esineet, kuten ajoneuvot, tabletit, sensorit ja muut laitteet liittyvät verkkoon. Tätä ilmiötä kutsutaan esineiden internetiksi (engl. internet of things). 5G ja esineiden internet mahdollistavat älykästä rannikko- ja liikennevalvontaa, älykkään maatalouden, autonomisen autolla ajamisen, älykkään terveyden huollon ja nopean katastrofien hallinnan (Fang, et al, 2021).

Uusia 5G-infrasktruktuureja otetaan parhaillaan käyttöön ja ne tuovat merkittäviä suorituskyvyn parannuksia. Tästä huolimatta esille nousee haasteita esineiden internetin kasvavien vaatimusten täyttämiseksi. Haasteena on, että verkossa olevat elektroniset laitteet ovat laajasti hajautettuja. Tässä korostuvat alueet, jotka ovat syrjäisillä paikoilla, kuten saaret, vuoristot ja yleisesti harvaan asutut alueet. Perinteisen matkapuhelinverkon tukiaseman asentaminen on vaikea prosessi, joten satelliitit voivat tarjota maailmanlaajuisen verkon, joka yhdistää satelliittiviestinnän ja maapohjaisen viestinnän.

Alhaisen viiveen saumattomat tarpeet, jotka vaativat suuren kapasiteetin tarvitsevat ketterän, älykkään ja turvallisen hybridi satelliitti verkon (engl. hybrid satelite-terrestrial network), jossa satelliittiviestintä ja maapohjainen viestintä yhdistyvät. Tämän saavuttamiseksi tutkimuksen tulisi keskittyä tulevaisuudessa johdettuihin teorioihin, jotka ovat perustavanlaatuisia sekä teknologioihin jokaiselle perusluonteiselle kooperatiiviselle mallille (Fang, et al, 2021).

Hybridi satelliitti verkon edistämisessä voidaan hyödyntää muita teknologioita, kuten koneoppisteknologioita, jossa syvävahvistusoppimista voidaan käyttää ratkaisemaan verkoissa esiintyviä vaikeasti mallinnettavia ongelmia. Kääntöpuolena esille nousee teknologioiden välinen ero, jonka takia ongelmaksi nousee teknologian sopeuttaminen verkon olosuhteisiin (Fang, et al, 2021).

3.5 Ekologiset tekijät

Elektroniikan saavuttaessa käyttöikänsä lopun ja kun niitä ei enää käytetä. Muuttuu käytetty elektroniikka elektroniikkajätteeksi (engl. e-waste). Elektroniikkajäte sisältää materiaaleja, jotka väärin hävitettynä vapauttavat vaarallisia kaasuja ja kemikaaleja. Pahimmillaan vapautuneet materiaalit voivat olla myrkyllisiä kaasuja ilmassa, vuotaa nestemäisenä kaatopaikoilta pohjaveteen tai imeytyä kasveihin ja maaperään. Tämä vaikuttaa pitkälle katsoessa niin ympäristöön kuin ihmisiinkin tulevaisuudessa. Tämän seurauksena materiaalien kierrätys ja talteenotto on korostunut entisestään. Hallitukset, tutkijat ja teollisuus ovat kääntäneet katseensa ongelmaa kohti ja keskittyvät enemmän tehokkaaseen kiertotalouteen ja e-jätehuoltoon (Gaur, et al, 2024).

Kiertotaloudessa ja tehokkaassa e-jätehuollossa on kuitenkin vielä haasteita. E-jätteen siirtyminen rajojen yli erityisesti kehittyneistä maista kehittyviin. Tämänlaisessa tilanteessa e-jätteen lajittelu eroaa valtavasti maiden välillä. Tuottajille erikseen laissa määrätyn vastuun puutteellisuus tuotteiden elinkaaren päättymisen jälkeen ei motivoi tuot-

tajia puuttumaan tuotteidensa hävittämiseen ekologisella tavalla. Haasteena ylös nousee myös teknologian puute kuljettaa, lajitella ja varastoida e-jätettä sekä se, että kierrätyslaitoksien perustaminen vaatii suuren määrän pääomaa (Gaur, et al, 2024).

Kysyntä on viime vuosina kasvanut vihreän elektroniikan materiaaleista ympäristön saastumisen vähentämiseksi, jota yleisesti aiheutuu elektroniikkajätteistä. Vihreässä elektroniikassa käytettäviä materiaaleja ovat luonnonvaroista peräisin olevat biomassamateriaalit. Näitä ovat muun muassa lignoselluloosa (engl. lignocellulose) ja kitiini (engl. chitin), jotka ovat ihanteellisia käytettäväksi osana vihreää elektroniikkaa, koska ne ovat uusiutuvia, runsaasti esiintyviä, helposti muokattavissa, biohajoavia ja lämpöstabiileja (Su, et al, 2022).

Uudistuvien biomassamateriaalien käyttöä kuitenkin rajoittaa niiden koostumus ja monimutkainen rakenne sekä toiminnallisten ominaisuuksien esimerkiksi sähkönjohtavuuden puute. Tämän takia viimeisen vuosikymmenen aikana on kehitetty biomassamateriaaleja muokatuilla ominaisuuksilla ja vihreän elektroniikan puolesta suurta edistystä on saavutettu (Su, et al, 2022).

Huomattavasta edistyksestä huolimatta vihreässä elektroniikassa on edelleen pullonkauloja (engl. bottlenecks), jotka estävät sen laajemman soveltuvuuden. Aiemmin mainittu biomassamateriaalien monimutkaisuus ja monimuotoisuus rakenteessa aiheuttaa epävarmuutta tuotteiden laadunhallinnassa. Tarvittavien menetelmien on oltava ympäristöystävällisiä, joiden avulla saadaan mahdollistettua biomassasta tehtyjen komponenttien tehokas ja tarkka rakenne sekä molekyylikoko (Su, et al, 2022).

Toinen pullonkaula on se, että biomassamateriaaleja on testattu ja kehitetty enimmäkseen vain laboratorioympäristöissä. Käytännön soveltuvuudet ovat vielä alkuvaiheessa.

Teollisen tuotannon mahdollistamiseksi on panostettava laajemmin vaikutusmenetelmiin. Biomassamateriaaleille tarvitaan myös uusia kustannustehokkaita vihreitä liuottimia, jotka ovat kierrätettävissä ja toimivat huoneenlämmössä (Su, et al, 2022).

Kolmas pullonkaula liittyy biomassapohjaisten laitteiden suorituskykyyn. Suorituskyvyltään biomassapohjaiset laitteet ovat heikompia kuin ”normaalit” kaupalliset elektroniikkalaitteet. Pystyäkseen kilpailemaan kehitystä on saavutettava molekyylirakenteiden ja laiterakenteiden suunnittelussa, jotta voidaan saavuttaa teollisen käytön vaatimukset (Su, et al, 2022).

Neljäntenä pullonkaulana ylös nousee rakenteen ja ominaisuuksien välinen suhde. Toivottu lopputulos on biomassamateriaalien suunnittelu, joka mahdollistaisi niiden suorituskyvyn säätelyn. Tämän edellytys on laaja systemaattinen tutkimus niiden ominaisuuksien ja rakenteen välisestä suhteesta. Tämän lisäksi tällä hetkellä keskitytään enimmäkseen vihreän elektroniikan biohajoavuuteen, mutta kierrätettävyys jätetään huomioimatta. Tulevaisuudessa korostuu toiminnallisten materiaalien erottaminen ja kierrättäminen (Su, et al, 2022).

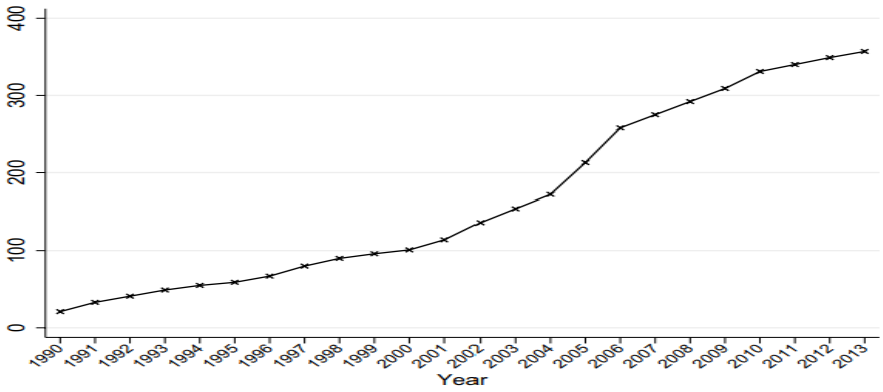
3.6 Lainsäädännölliset tekijät

Asianmukaisen ympäristön hallinnan ja uudelleenkäytettävien resurssien talteenoton korostuessa nykypäivänä. On saapunut ketjureaktio, jonka seurauksena laissa säädetty laajennettu tuottajavastuu (engl. extended producer responcibility). Laajennettu tuottajavastuu on ympäristöpoliittinen keino, jossa tuottajan vastuu ulottuu koko tuotteen elinkaaren ajan ja sen jälkeen aina sen hävittämiseen asti. Kyseinen sääntely on ollut käytössä 1900-luvulta alkaen ja siinä asetetaan tuottajille kolmenlaiset vastuut: taloudellinen, fyysinen ja tiedollinen. Sääntelyn suosion kasvaminen juontaa juurensa viime vuosina yleistyneenä tavoitteena kansainvälisten kiertotalousjärjestelmien vahvistamiseksi. Tavoitteena on vähentää toimitusriskiä ja vähentää luonnonvarojen käytön aiheuttamaa

painetta. Akkuteollisuudessa ja akkujen maailmanlaajuisessa kysynnässä tämä näkyy kaivostoiminnan paineen lisääntymisenä, mikä aiheuttaa vaikutuksia paikalliseen väestöön ja ekosysteemeihin (Compagnoni, et al, 2025).

Elektroniikkateollisuuden kannalta kriittisessä akkuteollisuudessa laajennetussa tuottajavastuussa tuleva fyysinen vastuu velvoittaa tuottajia keräämään jäteparistot ja on vastuussa siitä, että ne viedään käsiteltäviksi oikeaan paikkaan. Taloudellinen vastuu puolestaan tarkoittaa sitä, että tuottajat kattavat jätehuollosta tulevat kustannukset. Tiedollisessa vastuussa tuottajien on tarjottava tuotteiden ympäristöominaisuuksista ja hävittämismenetelmistä tietoa. Tämän lisäksi tiedollinen vastuu velvoittaa tuottajat raportoimaan viranomaisille kierrätetyn jätteen määrästä ja sen käsittelystä (Compagnoni, et al, 2025).

Laajennettu tuottajavastuu on yleistynyt paljon maailmanlaajuisesti 2000-luvun alusta lähtien. Tätä kuvastaa sen saama poliittinen tuki ja merkityksen korostaminen. Tuottajavastuullisia sääntelyitä on sovellettu moniin eri tuotteisiin. Pääsääntöisesti sääntelyt ovat koskeneet sähkö- ja elektroniikkajätettä, mutta niitä on otettu käyttöön myös pakkauksissa, renkaissa ja paristoissa (Compagnoni, et al, 2025).



Kuva 8. Maailmanlaajuiset laajennetun tuottajavastuun sääntelyt vuosittain kaikkien tuotteiden osalta (Compagnoni, et al, 2025).

Compagnoni et al tutkimuksessa todetaan, että laajennettuun tuottajavastuuseen liittyvien sääntelyiden seurauksena Euroopassa keräysasteiden nousua on havaittu useiden tuotteiden osalta.

4 Päätelmät

Elektroniikkateollisuuden ja siihen liittyvien moni ulotteisten globaalien toimitusketjujen jatkuva kehitys vaatii loputonta prosessien innovatiivista tarkastelua ja kehittämistä. Näissä toimitusketjuissa olevat monet muuttujat voivat pahimmillaan kasata monia vähä riskisiä ongelmia, jotka kasautuessaan voivat johtaa koko tuotannon pysähtymiseen.

Tästä syystä toimitusketjun hallinta (engl. supply chain management) korostuu entistä enemmän aloilla kuten elektroniikkateollisuus, joissa toimitusketjut ovat moni ulotteisia, globaaleja ja toimitusketjuihin integroidaan jatkuvasti uusia teknologioita. On tärkeää pystyä tunnistamaan haasteet, joita toimitusketjun eri prosesseissa esiintyy. Elektroniikkateollisuuden toimitusketjujen haasteiden tunnistaminen suoritettiin tässä tutkimuksessa kirjallisuuskatsauksella ja PESTEL-analyysillä.

Tehdyn tutkimuksen perusteella on mahdollista päätellä, että poliittisten tekijöiden osalta moni ulotteinen toimitusketju aiheuttaa ongelmia työntekijöiden oikeuksien osalta. Suurien brändien pääkonttoreiden sijaitessa kehittyneissä maissa ja brändien ulkoistaessa monista komponenteista koostuvien elektroniikka tuotteiden komponenttien tuotannon moneen eri maahan. Brändit eivät ota vastuuta vähemmän kehittyneissä edullisissa maissa työskentelevistä työntekijöistä. Tuotannon nopeaa ylös- tai alasajoa varten työvoima on pidettävä joustavana. Näissä tapauksissa tutkimuksen perusteella työntekijöiden työtunnit voivat usein venyä sietämättömiksi ja laittomiksi. Tähän globaalin ongelmaan puuttuminen on haastavaa, koska siinä on osallisena monta muuttujaa ja sen ratkaiseminen vaatii monien eri tekijöiden kuten yritysten ja viranomaisten yhteistyötä.

Taloudellisesta näkökulmasta tutkimus osoittaa, että 5G teknologian potentiaalista kiihdyttää tuotantoteollisuuden digitaalista muutosta ja lisätä tuottavuutta huolimatta. Yritykset kokevat, että sen hyötyjen mittaaminen on vaikeaa ja ne suhtautuvat investointeihin varovasti. Covid-19 pandemia näytti maailmalle, miten haavoittuvainen globaali toi-

mitusketju voi pahimmillaan olla. Kriittisten resurssien puute johtaa nopeasti pullonkaulojen syntyyn tuotannossa ja se korosti yritysten tarvetta vahvistaa toimitusvarmuutta ja parantaa tuotantoa. Elektroniikkateollisuuden kilpailullinen ympäristö nostaa esille tuotekehityksen nopeuden ja markkinoille pääsyn aikatauluttamisen tärkeyden. Teknologinen kehitys ja jatkuva kysynnän vaihtelu pakottaa yritykset jatkuvaan uudistumiseen, mikä tarkoittaa yrityksille kalliita investointeja ja tuotteiden elinkaarien lyhenemistä.

Yhteiskunnallisten haasteiden osalta esille nousee elektroniikkateollisuuden kasvun, ja tuotteiden laajan kulutuksen mukana esiin nousevat työterveys- ja ympäristöriskit. Komponenttien valmistamisessa vapautuu suuri määrä haitallisia kemikaaleja. Tutkimuksessa todetaan, että työntekijöille pitkäaikainen altistus voi olla merkittävän haitallista. Kroonisten terveysvaikutusten minimointi vaatii jatkuvaa arviointia, uusia turvallisuussäädöksiä ja varotoimien kehittämistä, jotta haittavaikutukset saadaan minimoitua. Elektroniikkateollisuuden kestävyyden kannalta organisaatioiden, yritysten ja viranomaisten on tärkeää tehdä avointa yhteistyötä ongelman ratkaisemiseksi.

Teknologisten tekijöiden kohdalla tutkimuksessa korostuu laitteiden sisäiset tekniset ratkaisut ja globaalin verkottumisen tuomat mahdollisuudet sekä haasteet. Lämmönhallinnan haasteet voivat pahimmillaan vähentää tuotteiden luetettavuutta, käyttöaikaa ja jopa vaurioittaa niitä. Yhä pienikokoisempien laitteiden valmistamisen osalta esille nousee virrankulutukseen ja kestävyyteen liittyvät haasteet. 5G teknologian myötä yhä useampi laite liitetään verkkoon, mikä luo paineita verkkojen laajenemisen ja kapasiteetin osalta. Kehitys nojaa kykyyn ratkaista nämä ongelmat teknologisen kehityksen avulla, joka tukee mahdollisimman paljon kestävää ja luotettavaa infrastruktuuria.

Kulutuksen lisääntyessä elektroniikkajätteen määrä kasvaa jatkuvasti. Jätteen hallinta muodostaa ajankohtaisen haasteen ympäristön ja ihmisten terveyden kannalta. E-jätteen mukana olevat vaaralliset aineet ja kemikaalit ja niiden hallitseminen edellyttää te-

hokkaiden kierrätysmenetelmien kehittämistä ja kiertotaloudellisia ratkaisuja, jotta materiaalit saadaan käytettyä uudelleen mahdollisimman vastuullisesti ja turvallisesti. Haasteeksi tässä noussee maiden väliset erot jätehuollossa ja lainsäädännöissä sekä korkeat kustannukset, joita mm. kierrätyslaitosten perustaminen vaatii. Elektroniikkajätteen käsittelyssä tuottajien vastuun lisääminen, yhteisten kansainvälisten toimintamallien kehittäminen ja biomateriaalien käyttäminen auttavat ongelman ratkaisemisessa. Biomateriaalien haasteeksi kuitenkin nousee niiden toiminnallisten ominaisuuksien puute, tästä huolimatta niiden jatkokehitys on tulevaisuudessa avainasemassa ympäristökuormituksen vähentämisessä ja kestävän kehityksen edistämisessä.

Tutkimuksen PESTEL-analyysin viimeisenä osana lainsäädännöllisissä haasteissa korostetaan tuottajavastuullisia kysymyksiä. Elektroniikkateollisuudessa tuottajavastuun merkitys on suuri, koska tuotteissa käytetään aiemmin mainittuja haitallisia materiaaleja ja yhdisteitä. Siitä huolimatta, että vastuullisuutta on lisätty, on elektroniikkateollisuudella tehtävää, että yritykset kiinnittävät vielä enemmän huomiota tuotteidensa koko elinkaareen ja sen vaikutuksiin. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että tuottajavastuu ei ole pelkästään jätehuollollinen käytäntö vaan työkalu, joka ohjaa yrityksiä edistämään resurssitehokkuutta, vähentämään ympäristökulutusta ja parantamaan globaalia kestävää kehitystä.

Tutkimuksesta voi päätellä, että tulevaisuudessa elektroniikkateollisuudessa toimivilta yrityksiltä vaaditaan paljon. Teknologista edistymistä, kestävän toimitusketjun harjoittamista, ympäristövastuuta, asiakaslähtöistä joustavuutta ja vastuullisuutta työntekijöiden oikeuksista. Poliittinen ohjaus, yhteistyö ja innovaatiot ovat avainasemassa teknologian hyötyjen valjastamisessa ilman, että ympäristön tai ihmisten hyvinvointi kärsii samanaikaisesti.

5 Lähteet

Barbosa-Póvoa, A. P., da Silva, C., & Carvalho, A. (2018). Opportunities and challenges in sustainable supply chain: An operations research perspective. *European Journal of Operational Research, 268*(2), 399–431. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.10.036

Cai, Y., Li, F., Zhang, J., & Wu, Z. (2018). Occupational health risk assessment in the electronics industry in China based on the occupational classification method and EPA model. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 15*(10), 2061. https://doi.org/10.3390/ijerph15102061

Carter, C. R., Rogers, D. S., & Choi, T. Y. (2015). Toward the theory of the supply chain. *The Journal of Supply Chain Management, 51*(2), 89–97.

Compagnoni, M., Grazzi, M., Pieri, F., & Tomasi, C. (2025). Extended producer responsibility and trade flows in waste: The case of batteries. *Environmental & Resource Economics, 88*(1), 43–76. https://doi.org/10.1007/s10640-024-00907-5

Distelhorst, G., Locke, R. M., Pal, T., & Samel, H. (2015). Production goes global, compliance stays local: Private regulation in the global electronics industry. *Regulation & Governance, 9*(3), 224–242. https://doi.org/10.1111/rego.12096

Fang, X., Feng, W., Wei, T., Chen, Y., Ge, N., & Wang, C. (2021). 5G Embraces Satellites for 6G Ubiquitous IoT: Basic Models for Integrated Satellite Terrestrial Networks. IEEE internet of things journal, 8(18), 14399-14417. https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3068596

Gaur, T. S., Yadav, V., Mittal, S., & Sharma, M. K. (2024). A systematic review on sustainable e-waste management: Challenges, circular economy practices, and a conceptual framework. *Management of Environmental Quality, 35*(4), 858–884. https://doi.org/10.1108/MEQ-05-2023-0139

Hahn, G. J. (2020). Industry 4.0: A supply chain innovation perspective. *International Journal of Production Research, 58*(5), 1425–1441. https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1641642

Helo, P. (2004). Managing agility and productivity in the electronics industry. *Industrial Management & Data Systems, 104*(7), 567–577. https://doi.org/10.1108/02635570410550232

Hugos, M. H. (2018). *Essentials of supply chain management* (4th ed.). Wiley.

Jadon, S., Rao, A., Jagadish, N., Nadakatti, S., R., T., & Honnavalli, P. B. (2024). Blockchain in the electronics industry for supply chain management: A survey. *IEEE Access, 12,* 7089–7120. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3351370

Kiesel, R., & Schmitt, R. H. (2020). Requirements for economic analysis of 5G technology implementation in smart factories from end-user perspective. *IEEE PIMRC.* https://doi.org/10.1109/PIMRC48278.2020.9217281

Lambert, D. M., & Cooper, M. C. (2000). Issues in supply chain management. *Industrial Marketing Management, 29*(1), 65–83.

Loch, C., Stein, L., & Terwiesch, C. (1996). Measuring development performance in the electronics industry. *Journal of Product Innovation Management, 13*(1), 3–20. https://doi.org/10.1016/0737-6782(95)00089-5

Locke, R. M., & Samel, H. (2018). Beyond the workplace: “Upstream” business practices and labor standards in the global electronics industry. *Studies in Comparative International Development, 53*(1), 1–24. https://doi.org/10.1007/s12116-017-9258-6

Madhavaram, S., Manis, K. T., Rashidi-Sabet, S., & Taylor, D. F. (2023). Capability bundling for effective supply chain management: An integrative framework and research agenda. *Journal of Business Logistics, 44*(2), 170–197. https://doi.org/10.1111/jbl.12329

Manes, N. (2021, April 26). Movellus sees opportunity amid microchip shortage; Ann Arbor company adds technology to existing microchips, increasing efficiency. *Crain's Detroit Business, 37*(16), 7.

Martin-Ortega, O. (2018). Public procurement as a tool for the protection and promotion of human rights: A study of collaboration, due diligence and leverage in the electronics industry. *Business and Human Rights Journal, 3*(1), 75–95. https://doi.org/10.1017/bhj.2017.35

Mellat Parast, M. (2019). A learning perspective of supply chain quality management: Empirical evidence from US supply chains. *Supply Chain Management, 25*(1), 17–34.

Menon, R. R., & Ravi, V. (2022). An analysis of barriers affecting implementation of sustainable supply chain management in electronics industry: A Grey-DEMATEL approach. *Journal of Modelling in Management, 17*(4), 1319–1350. https://doi.org/10.1108/JM2-02-2021-0042

MindOnMap. (n.d.). *Supply chain diagram.* https://www.mindonmap.com/fi/blog/supply-chain-diagram/

Moumeni, L., & Saber, M. (2023). Supply chain: Optimize the production cost using machine learning. *International Journal of Professional Business Review, 8*(12), 1–15. https://doi.org/10.26668/businessreview/2023.v8i11.3756

Park, S. R., Kim, S. T., & Lee, H.-H. (2022). Green supply chain management efforts of first-tier suppliers on economic and business performances in the electronics industry. *Sustainability, 14*(3), 1836. https://doi.org/10.3390/su14031836

Sants, A. (2023, February 24). Chip wars. *Investors Chronicle,* 24.

Sueyoshi, T., & Wang, D. (2014). Sustainability development for supply chain management in U.S. petroleum industry by DEA environmental assessment. *Energy Economics, 46,* 360–374. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2014.09.022

Su, Z., Yang, Y., Huang, Q., Chen, R., Ge, W., Fang, Z., ... Wang, X. (2022). Designed biomass materials for "green" electronics: A review of materials, fabrications, devices, and perspectives. *Progress in Materials Science, 125,* 100917. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100917

Vuorinen, T., & Huikkola, T. (2023). *Strategiakirja: 25 työkalua.* Alma Talent.

Yanginlar, G., Civelek, M. E., & Gülçür, E. (2023). The effect of supply chain risk management on logistics performance and innovation performance. *International Journal of Professional Business Review, 8*(11), 1–22. https://doi.org/10.26668/businessreview/2023.v8il1.3164

Yeap, K., Rasiah, R., & Furuoka, F. (2024). Drivers of and challenges facing adoption of industrial revolution 4.0 technologies: A study of the electrical and electronics industry in Malaysia. *Malaysian Journal of Economic Studies, 61*(1), 35–49. https://doi.org/10.22452/MJES.vol61no.13

Yi, G., Jeong, J., Bae, Y., Shin, J., Ma, H., Lee, N., ... Park, D. (2021). Workers' exposure to indium compounds at the electronics industry in Republic of Korea. *Safety and Health at Work, 12*(2), 238–243.

Zhang, G., Yu, Z., Song, D., Fu, Z., Zhu, X., Li, H., ... Lan, H. (2025). Directly printed standing ceramic circuit boards for rapid prototyping of miniaturization and high-power of electronics. *Nature Communications, 16*(1), 5258. https://doi.org/10.1038/s41467-025-60408-x

Zhang, P., Xue, S., & Wang, J. (2020). New challenges of miniaturization of electronic devices: Electromigration and thermomigration in lead-free solder joints. *Materials & Design, 192,* 108726. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108726