



**TURUN
YLIOPISTO**
Kauppakorkeakoulu

Kohti hiilineutraalia toimitusketjua – keinoja teollisen tuotannon päästöjen vähentämiseen

Toimitusketjujen johtaminen, Markkinoinnin ja arvoketjujen johtamisen laitos
Kandidaatin tutkielma

Laatija:

Toivo Tuominen

Ohjaaja:

TkT Riikka Kaipia

12.12.2025

Turku

Opiskelijan lausunto tekoölyn käytöstä tähän tutkielmaan liittyen:

En ole käyttänyt tekoölyä hyödyntäviä työkaluja tätä tutkielmaa kirjoittaessani.

Olen käyttänyt tekoölyä hyödyntäviä työkaluja tätä tutkielmaa kirjoittaessani. Tämä käyttö on dokumentoitu tutkielman liitteessä. Vakuutan, että tekoölyä käytettiin yliopiston ohjeistuksen mukaisella tavalla.

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

Kandidaatintutkielma

Oppiaine: Toimitusketjujen johtaminen

Tekijä: Toivo Tuominen

Otsikko: Kohti hiilineutraalia toimitusketjua – keinoja teollisen tuotannon päästöjen vähentämiseen

Ohjaaja: TKT Riikka Kaipia

Sivumäärä: 34 sivua (+ liitteet 1 sivu)

Päivämäärä: 12.12.2025

Tiivistelmä

Ilmastonmuutoksen hillitseminen ja ympäristön kestävyuden turvaaminen edellyttävät merkittäviä päästövähennyksiä, joiden saavuttamisessa yrityksillä on keskeinen rooli. Teollinen tuotanto muodostaa noin kolmanneksen globaaleista päästöistä, mikä nostaa sen ratkaisevaan asemaan yritysten päästövähennystoimissa. Tämä kandidaatintutkielma tarkastelee hiilineutraalisuuden merkitystä yritystoiminnassa ja keinoja vähentää teollisen tuotannon hiilijalanjälkeä.

Tutkielma toteutettiin kirjallisuuskatsauksena, jonka tavoitteena oli vastata kahteen tutkimuskysymykseen: 1) miksi yritysten kannattaa panostaa hiilineutraalisuuteen ja 2) miten teollisen tuotannon yritys voi vähentää hiilijalanjälkeään. Aineisto koostui tieteellisistä artikkeleista, kansainvälisistä raporteista ja sääntelydokumenteista, jotka käsittelevät muun muassa ilmastopolitiikkaa, yritysvastuuta ja teknologisia ratkaisuja.

Tulosten mukaan päästövähennyskeinot tukevat ilmastotavoitteiden saavuttamista, vähentävät sääntelyriskejä ja voivat parantaa taloudellista suorituskykyä. Keskeisiä strategioita ovat energiatehokkuus, materiaalitehokkuus, kiertotalous, siirtyminen puhtaaseen energiaan sekä päästöjen talteenotto. Energiatehokkuus erottuu kustannustehokkaana ja nopeasti toteutettavana ratkaisuna, sillä monet toimet voidaan tehdä olemassa olevaan laitekantaan. Käytännön esimerkkeinä päästövähennyskeinoista tarkasteltiin muun muassa paineilmajärjestelmien tehostamista, taajuusmuuttajien käyttöönottoa ja teollisuusunien optimointia.

Tutkielma tarjoaa teollisen tuotannon yrityksille tietopohjan hiilineutraalisuuden strategisesta merkityksestä ja konkreettisista keinoista päästöjen vähentämiseksi.

Avainsanat: hiilineutraalisuus, teollinen tuotanto, päästövähennyskeinot, energiatehokkuus, päästökompensatio, ilmastostrategiat, yritysvastuu

SISÄLLYS

1	Johdanto	7
2	Hiilineutraalisuus ja liiketoiminta	9
	2.1 Kansainvälinen regulaatio ja tavoitteet	9
	2.2 Kansallinen regulaatio ja tavoitteet	11
	2.3 Hiilineutraalisuus kilpailuetuna	12
3	Teollisen tuotannon hiilijalanjälki ja päästövähennyskeinot	14
	3.1 Teollisen tuotannon hiilijalanjäljen nykytila	14
	3.2 Materiaalitehokkuus ja kysynnän hallinta	15
	3.3 Kiertotalous osana teollisuuden dekarbonisaatiota	17
	3.4 Päästöjen talteenotto ja hyödyntäminen	18
	3.5 Siirtymä puhtaaseen energiaan	19
	3.6 Energiatehokkaat ratkaisut	20
4	Päästövähennyskeinot – case-esimerkkinä paineilma	23
	4.1 Paineilmajärjestelmät ja energiatehokkuuden mittaaminen	23
	4.2 Tehostamistoimenpiteet ja tulokset	24
5	Päästökompensaatio	26
	5.1 Päästökompensaatio ja sen toteutustavat	26
	5.2 Haasteet ja raportointirajoitukset	27
6	Pohdinta ja johtopäätökset	28
	Lähteet	32
	Liitteet	35
	Liite 1 Selvitys tekoälyn käytöstä	35

KUVIOT

Kuvio 1. Suorien päästöjen jakauma sektoreittain. Luvut perustuvat IPCC:n tilastointiin (IPCC 2023) 14

TAULUKOT

Taulukko 1. Paineilmaa käsittelevässä case-esimerkissä esitettyjen tehostavien toimintojen kootut tulokset (McNelly & Choi 2024) 25

1 Johdanto

Vuonna 2015 solmittu Pariisin sopimus asetti kansainväliseksi tavoitteeksi rajoittaa ilmaston lämpeneminen 1,5 asteeseen. Tämän tavoitteen taustalla on tarve suojella maapalloamme esimerkiksi sääntäjä-ilmäilmiöiltä, merenpinnan nousulta ja näistä aiheutuvilta seurauksilta. (UNFCCC 2015.) Tavoite luo painetta globaaleille päästövähennyksille, koska arvioiden mukaan 1,5 asteen ilmastotavoitteen saavuttamisen todennäköisyys on toteutuneen päästökehityksen (1850–2019) perusteella vain noin 50 % (Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC) 2023). Ilmastonmuutos on siis otettava vakavasti, eikä onnistuminen sen hillitsemisessä ole itsestäänselvyys. Arviolta noin 70 % maailman päästöistä aiheutuu yritystoiminnasta (Steiner ym. 2024). Tämä asettaa yritykset keskeiseen vastuuseen, kun pohditaan ratkaisuja ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi.

Hiilineutraalisuus on noussut tärkeäksi toimintamalliksi globaalien ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi. Sille löytyy tieteellisestä kirjallisuudesta useita määritelmiä, joista valittiin tähän tutkielmaan yleistettävien: Hiilineutraalisuudella tarkoitetaan hiilidioksidikaasua (CO₂) tuottavan ihmisen toiminnan maapallon ilmakehälle aiheuttaman vahingon kumoamista. Käytännössä kumoamisella tarkoitetaan toimintaa, joka joko vähentää CO₂-päästöjä vastaavalla määrällä tai estää vastaavan määrän syntyvän korvaamalla CO₂-päästöjä tuottavan toiminnan päästöttömällä tai vähähiilisellä vaihtoehdolla. (Murray & Dey 2009.) Tutkielmassa käytetään edellä mainituista hiilidioksidikaasuista jatkossa yleistettyä termiä ”päästöt” tai ”CO₂-päästöt”. On hyvä kuitenkin tiedostaa, että muutkin kasvihuonekaasut aiheuttavat päästöjä, mutta tässä tutkielmassa hiilidioksidipäästöt ovat keskiössä.

Tutkielman tavoitteena on tarkastella hiilineutraalisuutta yritystoiminnan näkökulmasta ja erityisesti teollisen tuotannon osalta. Työssä pyritään havainnollistamaan, miten ilmastotavoitteet vaikuttavat yrityksiin sekä millaisia strategisia ja operatiivisia ratkaisuja hiilineutraalisuuden edistäminen edellyttää. Lisäksi tutkielman tavoitteena on esittää konkreettisia päästövähennyskeinoja, joita teollisen tuotannon yritykset voivat hyödyntää omassa toiminnassaan. Päästövähennyskeinot päädyttiin rajaamaan teolliseen tuotantoon, sillä tämä ala muodostaa arviolta noin 30 % maailman päästöistä (IPCC 2023). Työ pyrkii vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Miksi yritysten kannattaa panostaa hiilineutraalisuuteen?
2. Miten teollisen tuotannon yritys voi vähentää hiilijalanjälkeään?

Tutkielma toteutetaan kirjallisuuskatsauksena, jossa kootaan ja jäsennetään aiheesta olemassa olevaa tutkimustietoa. Kirjallisuus valittiin tutkielman aiheeseen sopivuuden, luotettavuuden ja

ajantasaisuuden perusteella, painottaen vertaisarvioituja ja kansainvälisiä lähteitä. IPCC:n (2023) raportti on tutkielmassa keskeisessä roolissa, sillä se tarjoaa kattavimman kokonaiskuvan ilmastonmuutoksen hillinnästä, teollisuuden hiilijalanjäljestä ja keskeisistä päästövähennysstrategioista. Ensimmäisessä pääluvussa käsitellään hiilineutraalisuuden merkitystä yritystoiminnassa. Toisessa pääluvussa keskitytään teollisen tuotannon hiilijalanjälkeen ja päästövähennyskeinoihin, esitellen strategioita ja tehokkaita esimerkkiratkaisuja. Näin tutkielma tarjoaa teollisen tuotannon yrityksille pohjan strategiselle suunnittelulle ja konkreettisten päästövähennyskeinojen tunnistamiselle kirjallisuuden kriittisen tarkastelun ja johtopäätösten perusteella.

2 Hiilineutraalisuus ja liiketoiminta

2.1 Kansainvälinen regulaatio ja tavoitteet

Hiilineutraalisuutta koskevien määritelmien kirjo johtuu siitä, että päästöjen mittaamiseen ja kompensatioiden hyväksymiseen ei ole yhtenäisiä käytäntöjä. Tätä päästölaskennan haastetta on pyritty selkeyttämään jakamalla päästöt kolmeen ryhmään niiden syntyvän perusteella. Tämä Scope-jaottelu on kansainvälisesti vakiintunut. Scope 1 -päästöt ovat suoria päästöjä, jotka aiheutuvat yritysten omistamista tai hallitsemista lähteistä (esimerkiksi ajoneuvot). Scope 2 -päästöt koostuvat ostetun sähkön tuotannosta aiheutuvista päästöistä, jotka kulutetaan yrityksen omistamissa tai hallinnoimissa laitteissa tai toiminnoissa. Jäljelle jäävät Scope 3 -päästöt ovat epäsuoria päästöjä, jotka ovat seurausta yrityksen toimista, mutta eivät suoraan aiheudu yrityksen omistamista tai hallitsemista lähteistä (esimerkiksi myydyn tuotteen käytöstä aiheutuvat päästöt). (GHG Protocol 2004.) Koska Pariisin sopimuksen tavoitteet ovat haastavat ja onnistuminen epävarmaa, monet valtiot sekä EU:n (Euroopan Unioni) kaltaiset toimijat ovat asettaneet tiukkoja päästötavoitteita ja niihin liittyvää lainsäädäntöä. Näiden säännösten on määrä motivoida yrityksiä konkreettisiin ilmastotoimiin ja niitä avataan tarkemmin seuraavaksi.

Vuonna 2019 EU julkaisi European Green Deal ohjelman, jossa se asetti tavoitteekseen olla hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä. Vuonna 2021 tavoitteesta tehtiin laillisesti sitova, kun EU:n parlamentti ja neuvosto hyväksyivät EU:n ensimmäisen ilmastolain vuonna 2021. Laki muun muassa nosti vuoden 2030 tavoitteen vähentää päästöjä 40 prosentilla 55 prosenttiin. Lisäksi komissio ehdotti keväällä 2024 välitavoitetta, jonka mukaan 90 prosentin päästövähennykset tulisi saavuttaa vuoteen 2040 mennessä. EU peilaa tavoitteissaan vuoden 1990 päästötasoihin. (Euroopan komissio 2024.)

Ilmastolaki velvoittaa tietyn luokituksen yrityksiä raportoimaan CSRD:n (Corporate Sustainability Reporting Directive) alla ja sen myötä julkaistun standardin ESRS:n (European Sustainability Reporting Standards) mukaan (EY 2025). Lakimuutoksen myötä raportointivelvoitteet tiukentuivat huomattavasti ja vaaditut aikataulut olivat kunnianhimoiset, kuten ilmastotavoitteille on ominaista. EU asetti 17.4.2025 voimaan kahdella vuodella CSRD:n aikatauluja viivästyttävän ”stop the clock” direktiivin, jonka myötä raportointivelvoitteen asteittainen käyttöönotto on seuraavanlainen: Toisen vaiheen yritykset (suuret EU yritykset) alkaen 2028 perustuen 2027 tilikauteen, kolmannen vaiheen yritykset (pienet ja keskisuuret (SME)) alkaen 2029 perustuen 2028 tilikauteen. Vaiheen 1

yrittäjille, eli suurille konserneille ja listatuille yrityksille, vuoden 2024 tilikauden raportointivaatimukseen ei tullut muutosta. Vastaavasti vaiheen 4 yrityksille, jotka toimivat EU:n ulkopuolella mutta joilla on toimintaa EU:ssa, ei tullut muutosta vuoden 2028 tilikauden raportointivaatimukseen. (EY 2025.)

ESRS ohjaa yrityksiä raportoimaan 12 standardin mukaan, joista ilmastonmuutokseen keskittyvä E1 standardi on tutkielman kannalta relevantin. EFRAG (European Financial Reporting Advisory Group) julkaisi heinäkuussa 2025 luonnoksen muokatusta ESRS standardista, joka on tarkoitus julkaista kommentoinnin jälkeen lokakuussa 2025 (EY 2025). Luonnoksen E1 standardissa tulisi sellaisenaan julkaistuna olemaan 11 ilmastonmuutokseen liittyvää raportointivaatimusta:

- E1-1: selvitys siirtymäsuunnitelmasta ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi keskeisine piirteineen, jotka ovat linjassa 1,5 asteen ilmastotavoitteen kanssa.
- E1-2: selvitys siitä, miten yritys arvioi ilmastoon liittyvien vaikutusten, riskien ja mahdollisuuksien olennaisuuden.
- E1-3: selvitys yrityksen strategian ja liiketoimintamallin sopeutumiskyvystä tunnistettuihin ilmastoon liittyviin riskeihin.
- E1-4: selvitys yrityksen ilmastonmuutospolitiikasta.
- E1-5: selvitys keskeisistä ilmastonmuutostoimista ja niille budjetoiduista resursseista.
- E1-6: selvitys yrityksen asettamista päästövähennystavoitteista Scope 1,2 ja 3 -päästöjen osalta yhdessä tai eroteltuna.
- E1-7: selvitys yrityksen energiankulutuksesta ja sen rakenteesta.
- E1-8: selvitys yrityksen Scope 1,2 ja 3-päästöistä hiilidioksidiekvivalenttitonneina.
- E1-9: selvitys yrityksen päästöjen pysyvästä poistamisesta sekä markkinoilta ostettujen hiilikrediittien laajuudesta ja laadusta.
- E1-10: selvitys yrityksen sisäisestä hiilen hinnoittelujärjestelmästä.
- E1-11: selvitys ilmatoriskien (fyysiset riskit ja siirtymäriskit) ja mahdollisuuksien tulevista vaikutuksista yrityksen talouteen. (EFRAG 2025.)

Raportoinnin avulla kasvatetaan yritysten sekä EU:n tietoisuutta nykyisestä päästötilanteesta ja kannustetaan ilmastotoimiin. Toinen esimerkki keinoista, joilla EU motivoi yrityksiä päästövähennyksiin ja samalla ohjaa talouttaan kohti hiilineutraalisuutta on sen kehittämä päästökauppajärjestelmä EU Emissions Trading System (EU ETS). Järjestelmä on hiilimarkkina, jonka toiminta perustuu kahteen päämekanismiin, joista ensimmäisen mukaan järjestelmään listatuilla yrityksillä on vuosittainen velvollisuus ostaa päästöoikeuksia omia aiheuttamiaan päästöjä vastaava määrä. Toisena mekanismina, päästöoikeuksille on asetettu vuosittainen enimmäismäärä, jota lasketaan joka vuosi. Tällä hetkellä ETS kattaa noin 40 % EU:n kokonaispäästöistä mukaan lukien sähkön- ja lämmöntuotannon, energiaintensiivisen teollisuuden (esimerkiksi terästeollisuus ja paperin tuotanto), kaupallisen lentoliikenteen Euroopan sisäisten lentojen osalta sekä osittain meriliikenteen, joista kaksi viimeisintä sisällytettiin järjestelmään laajennusten myötä. (Euroopan unionin neuvosto 2025.) Järjestelmään voidaan odottaa tulevan laajennuksia jatkossakin EU:n tavoitellessa hiilineutraalisuutta.

On hyvä huomioida, että tutkielmassa rajattiin tarkempaan tarkasteluun sille relevantimmat säädökset ja ohjeet, mutta niiden lisäksi on olemassa monia muitakin lakisäätteisiä velvoitteita sekä ohjeita, suosituksia ja standardeja liittyen yritysten ilmastoraportointiin, joita ei kuvata tässä tutkielmassa. Näitä lakisäätteisiä säädöksiä ovat muun muassa SFDR (EU:n kestävyystietojen julkistamisasetus) ja CTB (EU:n ilmastovertailuarvo). Vastaavia vapaaehtoisuuteen perustuvia yleisiä ohjeita ja standardeja ovat esimerkiksi ISO-standardit, GRI-standardit ja IFRS-standardit. (Kaupa 2025.)

2.2 Kansallinen regulaatio ja tavoitteet

YK:n jäsenvaltiona myös Suomi on edellä mainitun Pariisin sopimuksen osapuoli ja mukana 1,5-asteen ilmastotavoitteessa. Lisäksi EU:n jäsenvaltiona Suomi on velvoitettu noudattamaan EU:n ilmastolakia sekä siihen sisältyviä ilmastotavoitteita, joita käsiteltiin luvussa 2.1. Suomi kuitenkin ylitti velvoitteensa sisällyttää EU:n ilmastolain tavoitteet omaan kansalliseen lainsäädäntöönsä ja asetti sitäkin kunnianhimoisemmat tavoitteet. Suomi on kansallisessa ilmastolaissaan asettanut tavoitteeksi olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä ja ilmastoposiitivinen siitä eteenpäin. EU:n asettama vähimmäistavoite on olla hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä. Suomen kansalliseen ilmastolakiin kirjaamat päästövähennystavoitteet ovat puolestaan seuraavanlaiset: 60 % vähennys vuoteen 2030 mennessä ja 80 % vähennys vuoteen 2040 mennessä verrattuna vuoden 1990 tasoon. Käsitelyämme EU:n tavoitteiden, CSRD ja ESRS raportointivelvoitteiden sekä ETS päästökauppajärjestelmän laajuutta voidaan todeta, että paine panostaa päästövähennyskeinoihin koskettaa valtioiden, kuten Suomen, lisäksi myös suuria määriä yksityisiä yrityksiä. Vaikutus voi olla suora tai epäsuora. Päästökauppajärjestelmä ETS kattaa hieman alle puolet Suomen päästöistä. (Työ- ja

elinkeinoministeriö 2022.) Seuraavassa alaluvussa käsitellään sitä, miten yritykset voivat hyötyä päästövähennyksistä ja miksi yritysten kannattaa motivoitua toimiin muutenkin kuin lainsäädännön tai päästökaupan ohjaamana.

2.3 Hiilineutraalisuus kilpailuetuna

Kansainvälinen ja kansallinen lainsäädäntö ohjaa siis yrityksiä raportoimaan sekä panostamaan päästövähennyksiin. Esimerkiksi jatkuvasti laajeneva ETS vaikuttaa tiettyihin yrityksiin suoraan ja niiden arvoketjuihin liittyviin yrityksiin epäsuoraan luoden taloudellisia kannustimia. Pakottavan sääntelyn ja poliittisen paineen lisäksi on olemassa monia muita ajureita, jotka kannustavat yrityksiä kohti hiilineutraalisuutta. Näistä yksi on taloudellinen vaikutus. Päästövähennysten kaltaiset vihreät päätökset liiketoiminnassa yhdistetään helposti lisäkuluiksi ja niiden taloudelliseen kannattavuuteen suhtaudutaan varauksella. Huoli on ymmärrettävää, sillä taloudellinen tuotto on jatkuvan liiketoiminnan edellytys. Ibishovan ja kumppaneiden (2024) tutkimuksessa tarkasteltiin juuri tätä päästövähennysten ja yritysten taloudellisen menestyksen välistä suhdetta. Tutkimuksen data on laaja ja se perustuu 14 866 havaintoon (talousvuosi) 2768 yritykseltä kattaen 36 maata ja 35 alaa vuosien 2002 ja 2022 väliltä. Tutkimus käyttää taloudellisen suorituskyvyn mittareina omaisuuden tuottoa (ROA) ja oman pääoman tuottoa (ROE). Sen ensisijainen tulos on, että päästövähennykset parantavat yritysten taloudellista suorituskykyä. Tutkimus on tärkeä, sillä päästövähennyksiin sijoitettavat resurssit on huomattavasti helpompi tunnistaa, kuin niistä seuraavat moninaiset hyödyt, joita avataan seuraavaksi tässä alaluvussa.

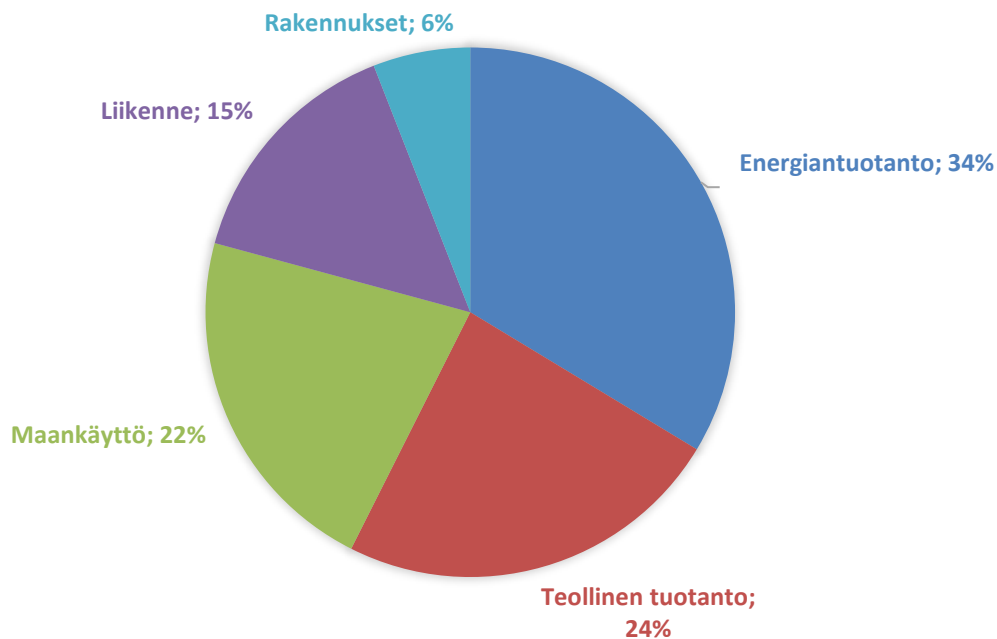
Ibishovan ja kumppaneiden (2024) tutkimus osoitti päästövähennyksiä harjoittavien yritysten ROA:n kasvavan 1,24 prosenttiyksikköä verrattuna yrityksiin, jotka eivät vähennä päästöjä. Positiivisen suhteen todettiin olevan suurempi yrityksillä, joilla oli korkeampi hiili-intensiteetti. (Ibishova ym. 2024.) Toisaalta muu kirjallisuus osoittaa, että korkean hiili-intensiteetin yrityksiä rangaistaan markkinoilla (hiili-intensiteetin negatiivinen suhde yrityksen markkina-arvoon). Vastaavien yritysten kohdalla sijoittajat hinnoittelevat sisään kasvavan määrän tulevia ympäristövastuita. Näitä vastuita ovat esimerkiksi sääntelyn kiristyminen, rahoituksen saantivaikeudet (pankeilta ja instituutio-naalisilta sijoittajilta) sekä mainevahingot. (Perdichizzi ym. 2024.) Korkea hiili-intensiteetti siis heikentää yrityksen raportoidun tuloksen relevanttiutta sijoittajien arvonmäärityksessä, koska sen nähdään viestivän kasvavasta ympäristöriskistä. Tuloksia tarkasteltaessa tulee kuitenkin huomioida, että Perdichizzi ym. (2024) tulokset on johdettu pääsääntöisesti Scope 1 -päästöjen pohjalta, sillä niillä nähtiin olevan suurin vaikutus sijoittajien käyttäytymiseen. Ibishovan ja kumppaneiden (2024) tutkimus myös eritteli päästövähennyksistä aiheutuvia tekijöitä, joista taloudellinen etu syntyy.

Nämä käytännöt voidaan nähdä motiiveina tai ajureina, jotka kannustavat yrityksiä panostamaan hiilineutraalisuuteen. Tutkimuksessa mainittiin ennakoivien päästövähennysten parantavan sidosryhmien luottamusta sekä arvostusta markkinoilla. Tämä voi johtaa kysynnän ja myynnin kasvuun sekä pääoman saatavuuden helpottumiseen. Ympäristövastuulliset yritykset näyttävät sijoittajien sekä pankkien silmissä luotettavimmilta, joka on kilpailuetu, jota kilpailijoiden on vaikea jäljitellä. Päästövähennysten mainittiin myös vähentävän dynaamisen ympäristösäätelyn luomia riskejä. Lisäksi tutkimuksessa painotettiin vähähiilisten teknologioiden ja innovatiivisten prosessien käyttöön-ottoa, jotka lisäävät toiminnan tehokkuutta ja voivat tätä kautta johtaa kustannusten vähenemiseen. (Ibishova ym. 2024.) Vastaavia vähähiilisiä teknologioita, strategioita ja innovatiivisia prosesseja käsitellään laajemmin seuraavassa luvussa 3 rajaten näkökulman teolliseen tuotantoon.

3 Teollisen tuotannon hiilijalanjälki ja päästövähennyskeinot

3.1 Teollisen tuotannon hiilijalanjäljen nykytila

Teollinen tuotanto kokonaisuutena pitää sisällään valmistuksen, rakentamisen, jätehuollon sekä malmien ja mineraalien louhimisen. Suorat ja epäsuorat päästöt mukaanluettuna teollinen tuotanto oli vuoden 2019 tilastojen mukaan globaalilla mittakaavalla suurin päästölähde muodostaen arviolta 34 % maailman kokonaispäästöistä. (IPCC 2023.) Tämä tilasto perustelee osaltaan tutkielman rajausta teolliseen tuotantoon. Tarkasteltaessa suoria päästöjä yksinään (sähkön ja lämmön käyttö poisluettuna) jakauma näyttää seuraavalta: noin 34 % suorista päästöistä aiheutuu energiantuotannosta, noin 24 % teollisesta tuotannosta, noin 22 % maankäytöstä, noin 15 % liikenteestä ja noin 6 % rakennuksista (Kuvio 1).



Kuvio 1. Suorien päästöjen jakauma sektoreittain. Luvut perustuvat IPCC:n tilastointiin (IPCC 2023)

Tuotannon päästöjen kehitys on pysynyt viime vuosikymmeninä kasvussa. Vuosien 2000–2010 aikana tuotannon päästöjen vuotuinen kasvu oli keskiarvolta (AAGR) 3.61 % ja vuosien 2011–2019 aikana kasvu hidastui, mutta oli edelleen positiivinen: keskiarvolta 1.32 % vuodessa. (IPCC 2023.)

Päästöjen kehitystä teollisuudessa voidaan pitää suhteellisen maltillisena, kun otetaan huomioon samanaikainen teollisuuden arvonlisäys, väestönkasvu ja BKT:n kasvu. Teollisuuden

arvonlisäyksellä tarkoitetaan tässä kontekstissa ilmiötä, jossa teollisuuden päästöt ovat kasvaneet, mutta lisääntyneen energiatehokkuuden avulla tuotetaan enemmän arvoa päästöyksikköä kohden. Käytännössä siis tuotetaan enemmän arvoa (arvonlisäys esimerkiksi 2 %) vähemmällä päästöillä (päästöjen kasvu esimerkiksi 1 %), jolloin hiili-intensiteetti pienenee. Päästöjen kehityksen suunta on siis oikea tehostumisen osalta, mutta 1,5 asteen ilmastotavoitteesta ollaan kaukana. Jotta kehitys olisi linjassa netto-nollatavoitteen kanssa, päästöjen on laskettava keskimäärin 2 % vuodessa ajanjaksolla 2020–2030 ja 8,9 % ajanjaksolla 2030–2050. (IPCC 2023.)

Teollisuuden hiilestä irtautuminen edellyttää perustavanlaatuisia systeemisiä muutoksia marginaalisten parannusten sijaan. Seuraavissa alaluvuissa esitellään keinoja, jotka nähdään tulevaisuuden kannalta tärkeimpinä tapoina saavuttaa päästövähennystavoitteita. Tässä tarkastelussa on hyödynnetty muun muassa IPCC:n (2023) raportissa kuvattuja keinoja. Käsiteltäväksi valittiin seuraavat strategiat: materiaalien kysyntä ja tehokkuus, kiertotalous, päästöjen talteenotto ja hyödyntäminen, siirtymä puhtaaseen energiaan sekä energiatehokkuus. Useimmissa teollisuuden dekarbonisaatiota (hiilestä irtautuminen) koskevissa tapauksissa edellytetään kaikkien edellä mainittujen strategioiden käyttöönottoa.

3.2 Materiaalitehokkuus ja kysynnän hallinta

Teollisuudelle tärkeiden energiavaltaisten materiaalien (kuten muovit, alumiini ja sementti) kysyntä on kasvanut viimeisen neljännesvuosisadan aikana merkittävästi, jopa 2,5–3,5 kertaiseksi. Kasvu on seurannut väestönkasvua sekä BKT:n kehitystä ja useimpien materiaalien kohdalla reilusti ylittänyt ne. Tämän kysynnän hallintaan pyritään kahdella toisiinsa linkittyvällä strategialla. Materiaalien kysynnän hallinta keskittyy materiaalien käytön vähentämiseen esimerkiksi resurssien jakamisen tai tuotteiden käyttöiän pidentämisen avulla. Materiaalitehokkuus puolestaan tehostaa materiaalien käyttöä tuotteen koko elinkaaren aikana pyrkien vähentämään neitseellisten materiaalien tarvetta. Materiaalitehokkuusstrategiat kattavat koko arvoketjun, joka voidaan jakaa neljään pääosaan:

1. Suunnittelu: Tavoitteena on vähentää materiaalihukkaa suunnittelemalla tuote niin, että se kestää pidempään ja on helpommin korjattavissa, purettavissa ja kierrätettävissä. Käytännön tasolla tämä voi tarkoittaa esimerkiksi tuotteen modulaarisuuden lisäämistä, jotta osia voidaan vaihtaa elinkaaren pidentämiseksi.
2. Valmistus: Tavoitteena on vähentää jätettä ja ylijäämää valmistusprosesseissa sekä hyödyntää syntyviä jäännösmateriaaleja (käytännössä voidaan esimerkiksi ottaa talteen leikkuujätettä ja kierrättää sitä prosessin sisällä.).

3. Käyttö: Korostetaan käyttöiän pidentämistä, korjaamista, uudelleenkäyttöä ja intensiivisempää käyttöä.
4. Elinkaaren loppuvaihe: Tavoitteena on materiaalien kierrätys, erottelu ja talteenotto. (IPCC 2023.)

Fordin ja Despeissen (2016) tutkimuksen mukaan lisäävä valmistus (Additive Manufacturing, AM), joka tunnetaan laajalti 3D-tulostuksena, on noussut merkittäväksi teknologiseksi ratkaisuksi materiaalihokkuuden edistäjänä. Se tehostaa etenkin valmistusta (2), mutta myös edellä mainitun listauksen muita kohtia suunnittelu (1), käyttö (3) ja elinkaaren loppuvaihe (4). AM teknologia perustuu siihen, että materiaalia liitetään esineiden valmistamiseksi kerros kerrokselta, toisin kuin perinteisissä (materiaalia poistavissa) valmistusmenetelmissä. AM-teknologioiden materiaalihokkuus kiteytyy tähän eroon, mutta sen tarjoamat hyödyt yrityksille ovat moninaiset. AM luo tuotesuunnitteluun vapautta mahdollistaen monimutkaisten ja kevennettyjen komponenttien luomisen. Yritykset voivat konsolidoida useita erillisiä osia yhdeksi integroiduksi komponentiksi eliminoiden kokoonpanosta aiheutuvat kustannukset ja laatuongelmat. Lisäksi kevyemmät komponentit alentavat energiakustannuksia tuotteen käyttövaiheessa. AM myös yksinkertaistaa logistiikkaa mahdollistamalla tilausten mukaan tapahtuvan valmistuksen sekä paikallisen tuotannon, jolloin saavutetaan varastointiin, kuljetuksiin ja hävikkiin liittyviä kustannusvähennyksiä. Käytännön esimerkki AM:n tarjoamista hyödyistä nähdään GE:n (General Electric) LEAP-suihkumoottoreiden polttoainesuuttimissa. Perinteisesti valmistettu polttoainesuutin koostui 20 erillisestä, hitsatusta ja juotetusta komponentista, mutta AM-menetelmällä se onnistuttiin valmistamaan yhtenä kappaleena. Uudelleen suunnitellun suuttimen paino laski 25 % ja samalla sen kestävyys parani viisinkertaiseksi. AM-teknologiat ovat erityisen tehokkaita aloilla, joissa alkuperäinen materiaalin suhde lopulliseen komponenttiin on suuri. Esimerkiksi ilmailuteollisuudessa perinteisissä prosesseissa tämä suhde voi olla 4:1 tai jopa 20:1. (Ford & Despeisse 2016.) AM-teknologioita on siis useita eri käyttötarkoituksiin, joista esimerkiksi FDM-menetelmällä materiaalihukka on tyypillisesti vain 1–2 % (Faludi ym. 2015).

Materiaalihokkuuden ohella tulee kuitenkin tiedostaa, että AM-teknologiat kuluttavat usein enemmän energiaa tuotettua yksikköä kohden verrattuna perinteisiin menetelmiin (Ford & Despeisse 2016). Elinkaariarvioinnit ovat osoittaneet, että 3D-tulostimilla sähkönkulutuksella on usein suurin ympäristövaikutus (Faludi ym. 2015). Korkea energiankulutus voi osittain kumota materiaalin säästöjen hyödyt. AM ei siis automaattisesti ole vähäpäästöisempi vaihtoehto, vaan elinkaaren ympäristövaikutusten arvioinnissa on otettava huomioon energian tarve järjestelmätasolla eikä vain itse

prosessin tasolla. Kokonaisvaltaisen ympäristöhyödyn voi varmistaa maksimoimalla käyttöasteen. (Ford & Despeisse 2016.)

3.3 Kiertotalous osana teollisuuden dekarbonisaatiota

Teollisuuden näkökulmasta kiertotalous keskittyy materiaali- ja energiavirtojen suljettuun kiertoon. Kiertotaloudella pyritään siirtymään pois päin lineaarisesta tuotantomallista, jota seuraamalla materiaalit päätyvät louhimisen, tuotannon ja käytön jälkeen hylättäviksi. Tavoitteena on tuotantomalli, jossa hylkäämisen sijaan tuotteiden ja materiaalien arvo pidetään mahdollisimman pitkään kiertossa. Tätä tavoitellaan vähentämällä, uudelleenkäyttämällä, kunnostamalla, korjaamalla, muokkaamalla käyttötarkoitusta, valmistamalla uudelleen, kierrättämällä ja ottamalla talteen. Kiertotalous voi johtaa merkittäviin päästövähennyksiin. Esimerkiksi alumiinin tuotannossa kierrätettyjen materiaalien käyttöön siirtyminen vaatii vain noin 5 % siitä energiasta, jota tarvittaisiin primäärituotantoon, jonka energiatehokkuus on jo lähellä parasta, tällä hetkellä käytettävissä olevaa tekniikkaa. On kuitenkin hyvä huomioida, että jotkin kierrätystoiminnot, kuten muovien kemiallinen kierrätys, voivat olla energia- ja päästöintensiivisiä. IPCC:n (2023) raportti erittelee kolme eri tasoa, joilla kiertotalouden toimenpiteitä voidaan yrityksissä toteuttaa:

1. Mikrotaso: Tällä tasolla kiertotaloutta toteutetaan yksittäisen yrityksen sisällä integroimalla puhtaampia prosesseja tuotantoon. Tyypillisiä työkaluja ovat ekosuunnittelu, ympäristömerkinnät ja vihreät hankinnat. Lähestymistapa on usein monikansallisten yritysten suosima, sillä päästövähennysten lisäksi se johtaa kilpailukykyisempään ja markkinavetoisempaan tuotevalikoimaan. Esimerkiksi johtavat kemian alan yritykset sisällyttävät kiertotalouden toimintaansa suunnitteleamalla helpommin kierrätettäviä muoveja ja autonvalmistajat pyrkivät lisäämään uusiin ajoneuvoihinsa täysin kierrätettävien komponenttien määrää. Ongelmallisuutta lisää kuitenkin se, ettei kaikilla markkina-alueilla ole vielä riittävää kierrätyskapasiteettia.
2. Mesotaso: Mesotason ratkaisut, kuten teollinen symbioosi (vähintään kolmen yrityksen yhteistyö), ovat erityisen tärkeitä pienille ja keskisuurille yrityksille (pk-yrityksille), sillä ne saavat tukea usein puutteelliseen kehittyneiden teknologioiden vaatimaan tietoon ja rahoitukseen. Teollisen symbioosin päätavoite on neitseellisten materiaalien sekä loppujätteen väheneminen. Esimerkiksi Etelä-Korean kansallinen ekoteollisuuspuistoprojekti on vähentänyt yli 4,7 miljoonaa hiilidioksidiekvivalenttia teollisen symbioosin avulla. Lisäksi vuokralaisyriksien hyödyntäessä toistensa jäännösvirtoja raaka-aineena, saavutetaan säästöjä kuljetus- ja jätteenkäsittelykustannuksissa.

3. Makrotaso: Makrotaso hyödyntää sekä mikro- että mesotason työkaluja laajemman poliittisen strategian puitteissa. Siinä teollinen symbioosi laajennetaan urbaaniksi symbioosiksi. Toisin sanoen, teollinen tuotanto hyödyntää kaupungin jätteitä tuotannossaan raaka-aineena tai energianlähteenä. Esimerkiksi Japanissa sijaitsevan Kawasakin kaupungin urbaanin symbioosin toimet säästävät yli 114 000 tonnia päästöjä vuosittain.

Kiertotalouden globaalilla käyttöönotolla on suuri potentiaali ilmastohyötyjen näkökulmasta. Arvioiden mukaan kiertotaloudella voidaan saavuttaa noin 27 % vähennys metallien louhinnassa ja noin 7–8 % vähennys fossiilisten polttoaineiden, metsätaloustuotteiden sekä muiden kuin metalli mineraalien louhinnassa ja käytössä. Kiertotalouteen siirtymiseen liittyy myös haasteita. Esimerkiksi Saksassa korkea 64 % kierrätysaste johti vain 18 % resurssien käytön vähenemiseen, mikä osoittaa, että pelkkä kierrätys ei yksinään riitä, vaan jätteen arvo on kyettävä säilyttämään kierrossa mittareiden, tavoitteiden ja kannustimien avulla. (IPCC 2023.)

3.4 Päästöjen talteenotto ja hyödyntäminen

IPCC:n raportin mukaan hiilen talteenotto ja varastointi (CCS) sekä hiilen talteenotto ja hyödyntäminen (CCU) ovat teknologioita, joiden avulla on mahdollista saavuttaa merkittäviä päästövähennyksiä, ja ne ovat välttämätön reitti nollapäästöihin etenkin sementin, teräksen ja kemikaalien kaltaisilla aloilla, joilla prosessipäästöt ovat muilla keinoilla vaikeasti vältettävissä. Samaan aikaan CCU tarjoaa taloudellisia houkuttimia ja markkinamahdollisuuksia, sillä se muuttaa talteen kerätyt päästöt arvokkaaksi raaka-aineeksi kemikaaleille, kuten metanolille, etanolille, muoveille ja synteettisille polttoaineille. Jotta yritys saavuttaisi negatiiviset- tai nettonollapäästöt, CCS on yhdistettävä kestävästi tuotettujen biopolttoaineiden tai raaka-aineiden käyttöön. Vaikka CCS ja CCU ovat keskeisiä teknologioita osana päästövähennysstrategiaa, niiden käyttöönotto on rajallista ja edellyttää yrityksiltä merkittäviä alkuinvestointeja sekä pitkäaikaista resurssitukea. Esimerkiksi talteenoton ja kompression arvioidut kustannukset vaihtelevat sementin ja teräksen kaltaisilla aloilla prosessista ja CO₂ pitoisuudesta riippuen 20–100 USD per hiilidioksidiekvivalenttitonni. Keskitetyistä lähteistä talteenotto voi olla edullisempaa, noin 10–40 USD per hiilidioksidiekvivalenttitonni. Kyseisten teknologioiden menestys on voimakkaasti riippuvainen riittävän infrastruktuurin, kuten CO₂:n keräys- ja kuljetusverkoston kehittämisestä. (IPCC 2023.)

Artikkeli (Podder ym. 2023) hahmottelee CCS ja CCU teknologioiden kaupallistettavuuden sekä edistyksellisyyden tasoa. Erityisesti polton jälkeinen ja polton esivaiheen talteenottomenetelmät ovat toimiviksi todettuja menetelmiä. Esimerkiksi yhdysvaltalainen Dakota Gasification Company hyödyntää polton esivaiheen talteenottoa Rectisol-prosessilla, jolla se on pystynyt varastoimaan ja

lähettämään noin kolme miljoonaa tonnia CO₂:ta Kanadaan uudelleenkäyttöä varten. Talteenotto-tekniikat, kuten kemiallinen silmukkakaasutus, ioninesteet ja biologinen CO₂-sitominen nähdään potentiaalisina teknologioina, mutta niiden kaupallistettavuus vaatii vielä merkittävää tutkimus- ja kehitystyötä. Niihin vielä toistaiseksi liittyviä haasteita ovat esimerkiksi korkeat kustannukset, voimakas energiankulutus ja syövyttävyyys. Vaikka näissä teknologioissa piilee suuri potentiaali, nettonollapäästöjen saavuttaminen vuoteen 2050 mennessä edellyttää yhä laajaa tutkimus- ja kehitystyötä CCU/CCS-menetelmien tehostamiseksi ja kaupallistamiseksi. (Podder ym. 2023.)

3.5 Siirtymä puhtaaseen energiaan

Ilmaston lämpenemistä estävän 1,5 asteen tavoitteen ytimessä on energiankäytön muutos, jossa korkean hiilidioksidipitoisuuden omaavista energiankantajista, kuten kivihiiilestä (noin 0,09 tCO₂/ GJ), jalostetuista öljytuotteista (noin 0,07 tCO₂/ GJ) ja maakaasuista (noin 0,05 tCO₂/ GJ) siirrytään kohti pienemmän tai nollan hiilidioksidipitoisuuden lähteitä, kuten sähköä, biopolttoaineita, vetyä ja ydinvoimaa. (IPCC 2023.)

Vuonna 2024 uusiutuvan energian tuotannon kasvu oli historian suurinta. Kapasiteettia onnistuttiin lisäämään 700 GW ja kasvusta 80 % oli aurinkosähköä. Puhtaan energian käyttöönotto on jo osoittanut merkkejä positiivisista tuloksista. Vuosina 2019–2024 käyttöönotetut viisi puhdasta teknologiaa (aurinkosähkö, tuulivoima, ydinvoima, sähköautot ja lämpöpumput) estivät vuosittain noin 2,6 gigatonnia (GT) päästöjä, mikä vastaa 7 % globaalista energiantuotannosta aiheutuvista päästöistä. Ilman näitä teknologioita globaalien päästöjen kasvu olisi ollut kolme kertaa suurempaa. Vaikka uusiutuvan energian tuotanto kasvaa ennätysmäisesti, on erittäin tärkeää huomioida, että se kattaa edelleen vain pienen osan globaalista energiakysynnästä, ollen vuonna 2024 noin 15 % (97 EJ:tä 648 EJ:stä). Uusiutuvan energian käyttöönoton laajeneminen ei ole kyennyt kääntämään päästöjä laskuun. Vuonna 2024 kokonaispäästöt jatkoivat kasvuaan 0,8 % ja globaali energiakysyntä kasvoi kiihtyvällä tahdilla 2,2 %. (IEA 2025.) Tarvitaan energiatehokkaita ratkaisuja, joilla hallitaan energian kysyntää ja hillitään kulutusta.

Schulz ym. 2021 esittelevät tutkimuksessaan uusiutuvan, paikan päällä tapahtuvan energiantuotannon integroimisen teollisuusyrityksen omiin tuotantojärjestelmiin keinona, joka voi huolellisesti arvioituna kasvattaa yrityksen omavaraisuutta ja kilpailukykyä, vähentää päästöjä ja taloudellisia kuluja sekä samalla vakauttaa edellä mainittua uusiutuvan energian kysynnän ja tarjonnan eroa. Lisäksi ratkaisu tuo yritykselle autonomisuuden epävakaina markkinahinnoista sekä energiankulutukseen liittyvistä, kiristyvistä poliittisista päätöksistä. Schulz ja kumppanit (2021) käyttivät havainnollistavana esimerkkinä malliyritystä (metallinjalostusala, sähkönkulutus noin 20 000 MWh/a), jonka

tiedot perustuivat todellisten saksalaisten tuotantolaitosten dataan. Tutkimuksessa järjestelmän optimointi toteutettiin simulaatioon perustuvalla mallinnuksella, historiallisilla säätiedoilla sekä sekakokonaisluohjelmoinnilla ja lineaarisella ohjelmoinnilla. Malliyrityksen optimoitu hybridijärjestelmä koostui aurinko- ja tuulienergiasta sekä CHP-yksiköstä (kysyntäohjattu teknologia, joka säätelee tehontuottoa ja turvaa peruskuorman). Optimoidulla omalla energiantuotannolla malliyritys saavutti lähes 20 % energiakustannusten alennuksen sekä 93,7 % omavaraisuuden energiankulutuksessa. Tutkimus kuitenkin painottaa huolellista käyttöönoton harkintaa, joka huomioi yrityskohtaiset tavoitteet ja kulutusanalyysin, teknologioiden valinnan ja mitoituksen sekä lopulta integroinnin sähkötekniseen mikroverkkoon ennen toimintastrategioiden soveltamista. Ratkaisu soveltuu erityisesti valmistusyrityksille, jotka ovat kooltaan riittävän suuria (esimerkiksi noin 20 000 MWh/a) hyötyäkseen omasta energiantuotannosta, mutta joiden tuotantotarve on riittävän pieni (maksimiteho alle 10 MW), jotta se voidaan toteuttaa hajautetuilla teknologioilla omalla tontilla. Etenkin aurinkosähköä pidettiin vahvana ratkaisuna sähkön itsetuotantoon. Tämä johtui suhteellisen alhaisista kustannuksista ja siitä, että sen tuotantohuippu ajoittuu usein samaan aikaan yrityksen kulutushuipun kanssa. Omavaraisuuden maksimoimiseksi tuulivoima ja CHP ovat välttämättömiä tekniikoita aurinkosähkön rinnalle. Tuulivoima tarjoaa parhaan tehon usein talvella, kun aurinkosähkö on heikkoa. CHP on kriittisen tärkeä, sillä se tasapainottaa uusiutuvien lähteiden vaihtelevaa tuotantoa. Muut teknologiat, kuten vesivoima, nähtiin heikompina uusina rakennuskohteina korkeiden alkuinvestointien takia. (Schulz ym. 2021.) Seuraavassa alaluvussa käsitellään lisää energiatehokkaita ratkaisuja, joilla voidaan vähentää tuotannon energiantarvetta ja sitä kautta päästöjä.

3.6 Energiatehokkaat ratkaisut

Kuten todettua energiatehokkaat ratkaisut ovat keskeinen osa hiilineutraalisuustavoitteita, sillä uusiutuvaan energiaan siirtyminen ei yksinään riitä. Tässä kontekstissa taajuusmuuttajat (Variable Frequency Drives, VFD) ovat osoittautuneet merkittäväksi teknologiseksi ratkaisuksi. VFD on komponentti, joka liittää sähkönsyötön mekaanisiin ja hydraulisiin prosesseihin. Sen avulla moottorin nopeutta voidaan säätää vastaamaan tarkasti kuormituksen hetkellistä kysyntää. (Lavrič ym. 2024.) Ratkaisu on erityisen olennainen teollisuudessa, sillä moottoriohjatut järjestelmät, kuten pumput, kompressorit, puhaltimet ja tuulettimet, vastaavat yli 40 % valmistavan teollisuuden globaalista sähkönkulutuksesta (Ahmed ym. 2025). VFD teknologialla on mahdollista saavuttaa jopa 15–25 % säästöt sähkönkulutuksessa (Lavrič ym. 2024) ja samalla se lisää laitteiston käyttöikä (Ahmed ym. 2025). VFD-järjestelmän käyttöönotto soveltuu parhaiten prosesseihin, jotka vaativat nesteiden, kuten veden, virtausnopeuden ja paineen säätelyä toiminnan aikana (esimerkiksi lämmitys-, ilmanvaihto- ja ilmastointijärjestelmät, vesihuolto, jäteveden käsittely ja kaukolämpö) (Lavrič ym. 2024).

Energiasäästöjen maksimoimiseksi VFD:n käyttöä voidaan tehostaa yhdistämällä siihen pehmokäynnistimet, jotka vähentävät sähkövirtaa ja mekaanista rasitusta moottorin käynnistyksen aikana. Pelkällä taajuusmuuttajalla voidaan saavuttaa jopa 36 % energiasäästöt ja yhdistettynä pehmokäynnistimen vaikutukseen kokonaissäästöt voivat nousta jopa noin 43 %. (Ahmed ym. 2025.) Yksinään pehmokäynnistin tuottaa noin 8 % energiasäästön verrattuna vakiokäyttöön, ja tämä säästö on lähes riippumaton moottorin tehokertoimesta, joka kuvaa moottorin sähkönkäytön laatua (Ahmed ym. 2025). VFD:n ja pehmokäynnistimien tuottaman potentiaalisen hyödyn systemaattiseen optimointiin voidaan käyttää koneoppimista. Koneoppiminen tarkoittaa tietokonejärjestelmän kykyä oppia ja tehdä ennusteita tai päätöksiä datan perusteella ilman erillistä ohjelmointia jokaista tehtävää varten. (Ahmed ym. 2025.) Se mahdollistaa energiankulutuksen nopean ja luotettavan ennustamisen, jolloin vältetään monimutkaiset ja kalliit mekaaniset mittaukset. Lisäksi koneoppiminen auttaa yrityksiä tekemään optimaalisia päätöksiä esimerkiksi moottorin mitoituksesta, kuormituksen allokoinnista ja ohjausstrategioista. Tällainen ennustamiskyky varmistaa tehokkaan VFD-järjestelmän säästöpotentiaalain saavuttamisen sekä ylläpitämisen. (Ahmed ym. 2025.)

Toisena esimerkkinä yksittäisistä energiatehokkaista ratkaisuista käsitellään keinoja, joilla voidaan tehostaa teollisuusuunien energiankulutusta. Uunit luokitellaan teollisuudessa eniten energiaa kuluttaviin laiteryhmiin. Teollisuusuuni on tyypillisesti suljettu kammio, jota käytetään tuotteiden sulatukseen, kuivatukseen, kypsytykseen tai kovetukseen lämmittämällä. Uuneja käytetään monilla eri teollisuudenaloilla kuten esimerkiksi metalliteollisuudessa, konepajateollisuudessa (pinnoitteiden ja maalien kovetusunitit), metsäteollisuudessa ja elintarviketeollisuudessa. Uunien energiatehokkuutta voidaan parantaa sekä rakenteellisilla ratkaisuilla että toiminnallisilla toimenpiteillä. (Motiva 2015.) Seuraavaksi käsitellään muutamaa esimerkkiä Motiva (2015) esitetyistä ratkaisuista.

1. Lämmön talteenotto ja hyödyntäminen: Talteen otettu lämpö tulisi hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti prosessissa. Palamisilman esilämmitys on tyypillinen ja suuremmissa uuneissa ensisijainen tapa uudelleen käyttää lämpöä. Esimerkiksi öljykäyttöisessä uunissa (keskiteho 2 MW, poistokaasut 1000 °C) palamisilman esilämmitys 400 °C:een voi pienentää polttoaineen kulutusta noin 24 % vuositasolla (maakaasulla säästöt noin 19 %). Lisäksi lämpöhäviöitä voidaan ehkäistä uunin yläpuolelle rakennettavalla huuvalalla. Poistokaasua voidaan hyödyntää myös esimerkiksi raaka-aineiden esilämmityksessä sekä kiinteistön tai prosessiveden lämmityksessä.
2. Lämmityksen hyötysuhteen parantaminen: Polttoaineen käyttöä voidaan tehostaa hyödyntämällä happipolttoa (korvaamalla ilma hapella). Liiallinen palamisilma heikentää

energiatehokkuutta, sillä palamistapahtumaan osallistumattoman typen lämmittämiseen kuuluu ylimääräistä energiaa, joka poistuu savukaasun mukana. Tällä muutoksella voidaan parantaa energiatehokkuutta jopa kymmeniä prosentteja.

3. Lämpöhäviöiden pienentäminen: Uunin eristyksen parantaminen voi tuoda säästöjä, mutta seinämien kautta tapahtuvat häviöt ovat yleensä alle 10 % kokonaiskulutuksesta. Tehokkain keino onkin eristää uunin sisäosat kevyillä eristeillä, mikä vähentää lämmön sitoutumista rakenteisiin. Lisäksi luukkujen, aukkojen ja kuljetinaukkojen suojaamiseen kannattaa kiinnittää huomioita.
4. Toiminnallinen optimointi: Apujärjestelmät on kytkettävä mahdollisimman suurelta osin itse prosessin toimintaan, jotta tarpeeton energiankulutus vältetään. Esimerkiksi paineilman käyttö (käytetään uuneissa joskus mittainstrumenttien jäähdytykseen) on kallista, sillä vain noin 5–10 % tuotantoon käytetystä sähköstä muuttuu hyötykäyttöön. Prosessiajan ja uunin täyttöasteen optimointiin tulee myös kiinnittää huomiota. (Motiva 2015.)

4 Päästövähennyskeinot – case-esimerkinä paineilma

Tässä luvussa paneudutaan case-esimerkin avulla tarkemmin yhteen päästövähennyskeinoon. Case-esimerkki käsittelee paineilmajärjestelmiä ja niiden energiatehokkuuden optimointia. Esimerkin tarkoitus on vahvistaa tutkielman käytännönläheistä konkretiaa ja lisätä työelämälähtöistä yhteyttä tuotantoyrityksiin. Tavoitteena on, että tässä case-esimerkissä käsiteltävä tieto olisi mahdollisimman yleistettävää siten, että erilaiset yritykset pystyisivät hyödyntämään tietoa oman tuotantonsa kehittämisessä.

4.1 Paineilmajärjestelmät ja energiatehokkuuden mittaaminen

Tiedetään, että tuotantoyrityksistä noin 70 % käyttää paineilmajärjestelmiä (McNelly & Choi 2024). Paineilmaa käytetään teollisuudessa esimerkiksi työkalujen ja koneiden käyttövoimana sekä robotiikassa. Yleisyytensä ja laajan sovellettavuutensa vuoksi paineilma ja siihen liittyvät kompressorit valittiin tutkielman case-esimerkiksi. Case-esimerkki perustuu kahteen tutkimukseen, joista ensimmäisessä vertaillaan paineilman tehokkuuden arvioimiseen soveltuvia mittareita (Nevills ym. 2025) ja toisessa selvitetään, miten paineilman käyttöä voidaan käytännössä tehostaa (McNelly & Choi 2024).

Päästövähennysten suunnittelu on aina hyvä aloittaa mittaamisesta, sillä ilman mittareita ei ole tietoa, jolla arvioisimme päästövähennyskeinojen tarpeellisuutta taikka onnistuneisuutta. Sama pätee paineilman energiatehokkuuden optimointiin, johon tähtäävät yritysten parannushankkeet vaativat tarkan arvion energia- ja kustannussäästöpotentiaalista. Tarvitaan mittarit, jotka kertovat esimerkiksi, kuinka paljon syntyy hukkaa ja paljonko paineilmapvirtaa on onnistuttu toimien myötä tehostamaan. Nevills ym. (2025) vertailivat tutkimuksessaan erilaisia paineilmapvirran mittaamenetelmiä muun muassa mittausvirheet huomioiden. Siinä todettiin paineilmajärjestelmien olevan usein hyvin tehottomia. Nyrkkisääntönä voidaan todeta, että tyypillinen kompressori hyödyntää vain noin yhden seitsemäsosan käyttämästään sähköenergiasta paineilman tuottamiseen – loput karkaavat hukkalämpönä. Tämän lisäksi jäljelle jäävän paineilmapvirran hyötyä vähentää se, että 10–30 % siitä menetetään jakelun ja käytön yhteydessä vuotoina. Tutkimuksessa vertailtiin paineilmaputken ilmavirtaa mittaavia, ulkoisia ja sisäisiä mittareita, joista sisäisillä oli pienempi virheprosentti. Tarkimmaksi menetelmäksi osoittautui lämpömassavirtamittari, jonka virheprosentti on ± 5 %. Lämpömassavirtamittari on myös käytetyin menetelmä teollisuudessa. Yksi tutkimuksesta huomioitava havainto oli ultraäänivuotoilmaisimen yllättävän suuri virheprosentti (jopa ± 89 %). Sitä kuitenkin pidettiin tehokkaana keinona paikantaa vuotojen sijainti, muttei suositella virran suuruuden arviointiin. Oikein

valitut mittauskeinot antavat siis pohjan paineilmajärjestelmien energiatehokkuustoimille, joilla voidaan saavuttaa jopa 20–50 % energiankulutussäästöt.

4.2 Tehostamistoimenpiteet ja tulokset

Seuraavaksi esitellään McNellyn ja Choin (2024) tutkimukseen perustuvia keinoja siitä, miten paineilman käyttöä voidaan käytännössä tehostaa. Tutkimus perustuu 13 vuoden ajalta kerättyyn 206 tehdasvierailun auditointidataan, jonka analyysin pohjalta esitetään kuusi yleisintä ja taloudellisesti vaikuttavinta paineilmajärjestelmän parannustoimenpidettä säästö- ja päästövähennyslukuineen. Esitetyt luvut ovat streamline-versioita laskelmista, jotka kuvaavat tyypillisiä ja useimmiten suositteluja energiansäästötoimenpiteitä. Ne perustuvat auditointidataan, eivätkä ole tuotantoteollisuuden tilastollisia keskiarvoja.

Ensimmäinen toimenpide sijoittaa kompressorien ilmanottoaukot niin, että ne saavat viileää ulkoilmaa. Viileämpi ulkoilma on helpompi puristaa verrattuna lämpimään sisäilmaan, sillä ilma laajenee korkeammissa lämpötiloissa. Tämä pätee varsinkin, jos sisäilmaa lämmittää jokin muu tuotannon koneisto, kuten esimerkiksi maalaamon kuivausuunit. Esimerkkitehtaassa oli käytössä kaksi 150 hevosvoiman kompressoria. Esimerkkitehtaan fraktionaalinen säästöosuus toimenpiteen myötä oli 3,7 %, vuotuinen kustannussäästö 2801 \$ ja vuotuinen päästövähennys 36 CO₂ tonnia. Toinen toimenpide liittyy ohjausjärjestelmien päivitykseen ja on olennainen yrityksille, joilla on tuotannossaan useampi kompressori. Kompressorit saavuttavat korkeimman hyötysuhteen täysin kuormitettuina. Usein kompressorit on kuitenkin asetettu samankaltaisiin aktivointipaineisiin, jolloin ne työskentelevät toisiaan vastaan (täyttä kuormitusta ei saavuteta). Esimerkkitehtaassa aktivointipaineita vaiheistettiin, jotta varakompressorit eivät kuormitu turhaan: K1: (kompressori) 100–110 psig (paineen yksikkö, joka ilmaisee paineen suhteessa ympäröivään ilmanpaineeseen) K2: 95–105 psig, K3: 90–100 psig, K4: 85–95 psig. Lisäksi ohjausta suositeltiin päivittämään tuotantotason mukaan: esimerkiksi iltaisin ja viikonloppuisin, tuotannon ollessa normaalia alhaisempaa, K3 ja K4 suljetaan pois päältä. Vaiheistus ja käyntiaikojen optimointi tuotti suurimmat yksittäiset säästöt: 15 652 \$ ja 138 CO₂ tonnia vuodessa. Kolmas toimenpide vaihtaa vanhat, tehottomat kompressorit, jotka käyttävät kuormitus/ kuormittamattomuusohjausta, uusiin taajuusmuuttajalla (VFD) varustettuihin kompressoreihin. Vanhojen kompressorien nollakuormitusteho on jopa 50 % maksimitehosta, kun taas VFD ohjaus maksimoi energiasäästöt ohjaten moottorin tehon vastaamaan kysyntää. Esimerkkitehtaan säästöt päivityksen myötä: 4969 \$ ja 52 CO₂ tonnia vuodessa. Neljäs toimenpide koski paineen alentamista todellista tarvetta vastaavaksi. Esimerkkitehtaassa oli 150 hv vaki-onopeuksinen ja 75 hv VFD-kompressori, joiden paine oli asetettu 115 psig:n tasolle, vaikka

tehtaan korkein tarvittava paine oli 90 psig. Paineen alennus 100 psig tasolle (jättäen 10 psig varan hukalle) saavutti 7,5 fraktionaalisen säästön sekä 6841 \$ ja 91 CO2 tonnin vuosisäästöt. Viides toiminto koskee vuotojen eliminointia. Kuten aikaisemmin todettiin, 10–30 % paineilmaasta menetetään vuotoina. Esimerkkitehdas toimi kolmen kompressorin järjestelmällä (yhteensä 650 hv) ja sen tavoitteena oli korjata 50 % vuodoista kuukausittaisen huolto-ohjelman avulla hyödyntäen ultraäänivuotoilmaisinta, jonka hankintahinnan kerrottiin olevan 300–1000 \$. Toiminnon vuosisäästöt olivat 9940 \$ ja 165 CO2 tonnia. Viimeinen toiminto koski paineilman käytön vähentämistä. Esimerkkitehtaassa oli käytössä 40 puhalluspistoolia, jotka käyttivät ilmaa tehottomasti (keskimäärin 190 scfm). Ne korvattiin ilmasäästösuuttimilla (esimerkiksi Venturi-suutin), jotka voivat vahvistaa ilmavirtaa jopa 25 kertaiseksi samalla kulutuksella. Venturi-suuttimiin vaihdolla saavutettiin 82 scfm kulutusvähennystä. Toiminnon vuosisäästöt olivat 7962 \$ ja 91 CO2 tonnia. (McNelly & Choi 2024.)

Taulukko 1. Paineilmaa käsittelevässä case-esimerkissä esitettyjen tehostavien toimintojen kootut tulokset (McNelly & Choi 2024)

Toiminto	Energiasäästöt (kWh)	Sähkötalon säästöt (kW)	Päästövähennys (CO2 tonnia/vuosi)	Kokonaissäästöt (\$/vuosi)
Ilmanoton siirto viileämpään	41 246	6,9	36	2 801
Ohjausjärjestelmän päivitys	195 672	21,5	138	15 652
Paineen alentaminen	103 148	11,8	91	6 841
VFD-kompressorien käyttöönotto	73 080	104,4	52	4 969
Vuotojen eliminointi	186 904	256	165	9 940
Paineilman käytön vähentäminen	102 637	16,4	91	7 962
Yhteensä	702 687	417	573	48 165

Taulukossa 1. on koottu yhteen case-esimerkissä kuvattujen tyypillisten paineilman energiatehokkuutta lisäävien toimien kvantifioidut luvut. On hyvä ottaa huomioon, että jokainen toiminto suoritettiin erillisissä tehtaissa ja yhteenlasketut summat edustavat kokonaispotentiaalia. Jos kaikki toiminnot suoritettaisiin yhdessä tehtaassa, todellinen kokonaisvaikutus voi olla erilainen päällekkäisten ja yhdistettyjen vaikutusten myötä.

5 Päästökompensaatio

5.1 Päästökompensaatio ja sen toteutustavat

Mikäli yritys ei halua tai pysty pienentämään hiilijalanjälkeään päästövähennyskeinoin, on sen mahdollista turvautua päästökompensaatioihin. Tämän luvun tarkoituksena on määritellä päästökompensaatio ilmiönä, tarkastella sen luonnetta sekä kuvata sen merkitystä ja roolia yritysten hiilineutraalisuustavoitteissa. Kirjallisuudessa puhutaan hiilineutraalisuuden yhteydessä paljon siitä, miten yritysten tulee vähentää omia päästöjään. Päästövähennyskeinoja ei tule kuitenkaan sekoittaa päästökompensatioon. Päästökompensatioilla tarkoitetaan ilmiötä, jossa päästöjä aiheuttanut yritys maksaa ulkopuoliselle taholle, joka kompensoi päästöjä eliminoimalla tai estämällä samankaltaisen määrän vahinkoa, kuin mitä yrityksen päästöt aiheuttavat (Murray & Dey 2009).

Päästökompensaatio perustuu hiilikredittihin, jotka ovat usein yksityisillä markkinoilla kaupattavia sertifikaatteja (Kaupa 2025). Yritys ei siis pienennä omia päästöjään vaan maksaa siitä, että päästöjä pienennetään tai estetään jossakin muualla. Ulkopuolinen taho toteuttaa päästökompensaatiot tyypillisesti seuraavin keinoin:

- puiden istuttaminen tai metsien suojelu
- sähköntuotanto vähäpäästöisillä menetelmillä
- energiatehokkuuden parantaminen
- jätteiden käsittely ja kierrätys siten, että estetään päästöjen pääsy ilmakehään

Päästökompensatiota ei tule kuitenkaan sekoittaa hiilikauppaan, jota käsiteltiin EU ETS:n valossa luvussa 2.2. Hiilikaupan piiriin kuuluvat yritykset on säädetty laissa, kun taas päästökompensaatiot perustuvat vapaaehtoisuuteen. Nämä vapaaehtoiset kompensatiotoimet järjestetään usein voittoa tavoittelemattoman organisaation tai kaupallisen hiilikompensaation jälleenmyyjän kautta, joka hankkii kompensaatiot (usein voittoa tavoittelemattomilta organisaatioilta) ja järjestää kaupan. (Murray & Dey 2009.) Vaikka kompensaatio voi tasapainottaa yritysten aiheuttamia päästöjä, sen käyttö edellyttää huolellista arviointia läpinäkyvyyden ja vaikuttavuuden varmistamiseksi.

5.2 Haasteet ja raportointirajoitukset

Seuraavaksi tarkastellaan kompensatioon liittyviä keskeisiä haasteita ja raportointirajoituksia, jotka vaikuttavat sen käyttökelpoisuuteen yritysten ilmastostrategioissa. Päästökompensaatiot ovat kohdanneet tutkimuksissa kritiikkiä tehottomuuteen liittyen, sillä arvioidaan, että osa kompensointiprojekteista olisivat tapahtuneet joka tapauksessa. YK:n menetelmäpaneelin suorittaman tarkastuksen mukaan lähes 50 % tarkastetuista projekteista olisi tapahtunut ilman kompensatorahoitusta. (Murray & Dey 2009.) Vaikka tarkastuksesta on yli 15 vuotta aikaa, se kuvastaa silti hiilikrediitteihin liittyvää läpinäkyvyyden puutetta.

Päästökompensaation haastavuutta lisää se, ettei sitä voida enää pääsääntöisesti sisällyttää yrityksiltä vaadittuihin ilmastoraportteihin, vaan ne tulee raportoida erillään. Yritysraportointia koskeva ilmastosääntely, kuten luvussa 2.2 käsitelty EU:n CSRD ja ESRS standardi, eivät esimerkiksi salli hiilikrediittien laskemista yritysten raportoitaviin bruttopäästöihin (nykyinen ESRS E1, vaatimus E1-6) eivätkä bruttopäästövähennystavoitteisiin (nykyinen ESRS E1, vaatimus E1-4). Yritysten on kuitenkin mahdollista bruttotavoitteen ohella ilmoittaa nettonollatavoitteensa, johon hiilikrediitit voidaan huomioida esimerkiksi jäännöspäästöjen kompensoimiseksi. Tähän vaaditaan selvitys sitä, missä määrin ja miten tavoitteen saavuttaminen tukeutuu hiilikrediitteihin. Myös EU:n ulkopuoliset standardit ja ohjeistukset, kuten GHG-protokolla, OECD:n ohjeet sekä IFRS- ja GRI-standardit neuvovat raportoimaan päästökompensaatioista erikseen.

Päästökompensatioon ja hiilikrediitteihin kohdistuvat rajoitukset ovat osittain seurausta siitä, että tutkimukset ovat osoittaneet hiilikrediittien olevan todellisia päästövähennyksiä tehottomampia. Karsimalla päästökompensaation sisällyttämistä raportointiin lisätään myös läpinäkyvyyttä ja vähennetään mahdollisuutta viherpesulle. Yritysten tulee siis olla varovaisia sen suhteen, miten he raportoivat ja tuovat julki päästökompensaation ja hiilikrediittien käytön. Esimerkiksi Arlaa, KLM:ää ja Katjesia vastaan on hiljattain annettu tuomioita kuluttajia harhaanjohtavista, päästökompensatioon tukeutuvista, hiilineutraalisuusväitteistä. Kyseiset väitteet on kielletty sopimattomien kaupallisten menettelyjen direktiivissä (UCPd). (Kaupa 2025.) Selvyiden vuoksi on hyvä huomioida, että Kaupa (2025) käyttää tekstissään nykyistä ESRS standardia, kun taas tämän tutkimuksen luvussa 2.2 avattiin vasta pian julkaistavaksi tarkoitettua versiota ESRS standardista, jolloin vaatimusten numerointi eroaa toisistaan hieman.

6 Pohdinta ja johtopäätökset

Tämä kandidaatintutkielma toteutettiin kirjallisuuskatsauksena, jonka tavoitteena oli selvittää, miksi yritysten kannattaa panostaa hiilineutraalisuuteen ja millä keinoilla teollisuuden yritykset voivat vähentää hiilijalanjälkeään. Työn taustalla on globaali tarve saavuttaa Pariisin sopimuksen mukainen 1,5 asteen ilmastotavoite. Yritystoiminta aiheuttaa arviolta 70 % maailman päästöistä ja teollinen tuotanto muodostaa noin 34 % näistä kokonaispäästöistä, mikä perustelee tutkielman rajauksen teolliseen tuotantoon (IPCC 2023).

Yksi tutkielman keskeisistä havainnoista on, että ilmaston, luonnon ja elämän edellytysten turvaamisen lisäksi yritysten kannattaa panostaa hiilineutraalisuuteen erityisesti kahdesta tutkielmassa korostuvasta syystä: riskienhallinta ja sääntely sekä taloudellinen kilpailuetu. Kiristynyt sääntely, kuten ilmastolaki, CSRD-kestävyysraportointivelvoitteet ja ETS-päästökauppa, luovat suoria ja epäsuoria velvoitteita (Euroopan komissio 2024; EFRAG 2025; EY 2025; Euroopan unionin neuvosto 2025; Kaupa 2025), joiden ennakoiva hallinta vähentää regulaatoriskejä, sanktioita ja tulevaisuuden epävarmuutta sekä vahvistaa yrityksen mainetta. Taloudellisesta näkökulmasta kirjallisuus osoittaa päästövähennysten parantavan kannattavuutta, esimerkiksi omaisuuden tuoton ja oman pääoman tuoton kasvun kautta (Ibishova ym. 2024), mutta kustannus-hyötysuhde ei ole yksiselitteinen. Päästövähennyskeinojen hyödyt korostuvat erityisesti korkean hiili-intensiteetin yritystoimijoilla, sillä sijoittajat hinnoittelevat sisään ympäristövastuut, kuten kiristyvän sääntelyn, rahoituksen vaikeutumisen ja mainehaitat (Perdichizzi ym. 2024). Toisaalta Bedi ja Singh (2024) raportoivat Intian kontekstissa negatiivisen yhteyden hiilipäästöjen ilmoittamisen ja taloudellisen tuloksen välillä, mikä selittyy vapaaehtoisuudella, sääntelyn puutteella ja lyhyellä tarkastelujaksolla. Tämä korostaa tarvetta tapauskohtaisille analyyseille, ilmastolainsäädännölle ja pitkän aikavälin tarkastelulle.

Lisäksi tutkielma osoittaa, että teollisuuden hiilijalanjäljen pienentämiseen on tunnistettavissa useita strategisia lähestymistapoja, joista keskeisiä ovat materiaalitehokkuus, kiertotalous, päästöjen talteenotto ja hyödyntäminen, siirtyminen puhtaaseen energiaan sekä energiatehokkuus (ks. luvut 3.1–3.6). Näistä energiatehokkuus erottuu kirjallisuudessa yhtenä kustannustehokkaimmista ja nopeimmista tavoista vähentää päästöjä, sillä monet toimet voidaan toteuttaa olemassa olevaan laitekantaan ilman suuria investointeja, mikä tekee siitä käytännöllisen ensiaskeleen kohti vähähiilisempää toimintaa (IPCC 2023; Lavrič ym. 2024; Ahmed ym. 2025). Tutkielmassa esitelty case-esimerkki (ks. luku 4) paineilman optimoinnista tukee tätä havaintoa ja korostaa mittauksen merkitystä onnistuneessa toteutuksessa (McNelly & Choi 2024; Nevills ym. 2025). Case-esimerkki osoitti, että paineilman energiatehokkuustoimet voivat vähentää energiankulutusta jopa 20–50 %. Tutkielman

pohjalta voidaan todeta, että paineilman energiatehokkuustoimet ovat laajasti sovellettavissa muihin tuotantoympäristöihin, kunhan niiden toteutus perustuu huolelliseen suunnitteluun. Myös teollisuus- uunien energiatehokkuutta voidaan parantaa esimerkiksi lämmön talteenotolla ja hyödyntämisellä, lämmityksen hyötysuhdetta parantamalla, lämpöhäviöiden pienentämisellä sekä toiminnallisella optimoinnilla (Motiva 2015).

Siirtymä puhtaaseen energiaan voidaan toteuttaa omavaraisella energiantuotannolla, uusiutuvan energian ostolla markkinoilta tai näiden yhdistelmällä päästöjen minimoimiseksi. Materiaalitehokkuuden parantaminen, esimerkiksi lisäävän valmistuksen avulla, edellyttää käyttöasteen optimointia korkean energiankulutuksen vuoksi (Faludi ym. 2015; Ford & Despeisse 2016). Päästöjen talteenotto ja hyödyntäminen soveltuu nykytilassa lähinnä sementin ja teräksen kaltaisille aloille, mutta teknologioiden kehitystä kannattaa seurata niiden potentiaalin vuoksi (IPCC 2023; Podder ym. 2023).

Hiilineutraalisuustoimien yhteydessä on tärkeää huomioida niiden vaikutus yrityksen maineeseen. Viimeaikaiset tapaukset, joissa yrityksiä on syytetty harhaanjohtavista hiilineutraalisuusväitteistä (esimerkiksi Arla, KLM ja Katjes), osoittavat maineriskin, joka liittyy erityisesti päästökompensaatioihin. Kompensaatioita ei voi enää pääsääntöisesti sisällyttää raportoinnissa bruttopäästöihin, ja niiden käyttöä rajoittavat tiukentuvat raportointivaatimukset, mikä heijastaa kehitystä kohti läpinäkyvämpiä ilmastotoimia. Vaikka kompensatioiden merkitys raportoinnissa on heikentynyt ja niiden vaikutus ei välttämättä ole aina yhtä tehokas kuin miltä vaikuttaa, niillä on silti ilmastolle positiivinen vaikutus, eikä niiden hyödyntämistä tulisi poissulkea. Yritysten kannattaa kuitenkin ensisijaisesti keskittää resurssinsa omiin päästövähennyksiin ennen kompensatiota. (Murray & Dey 2009; Kaupa 2025.) Toisaalta yritysten läpinäkyvä ja luotettavasti raportoitu ympäristövastuullisuus ja hiilineutraalisuustavoitteisiin sitoutuminen tulevat olemaan tulevaisuudessa yhä merkittävämpiä vetovoimatekijöitä niin työntekijöille, yhteistyökumppaneille kuin rahoittajillekin, minkä voidaan olettaa lisäävän yritysten motivaatiota näihin toimiin (Finnwatch 2021).

Tutkielman onnistuneisuutta arvioitaessa voidaan todeta, että se vastaa hyvin ensimmäiseen tutkimuskysymykseen siitä, miksi yritysten kannattaa panostaa hiilineutraalisuuteen. Keskeiset motiivit, kuten sääntelyyn liittyvä riskienhallinta ja taloudellinen kilpailuetu, nousevat esiin kirjallisuuden perusteella selkeästi. Toiseen tutkimuskysymykseen – miten teollisuuden yritykset voivat vähentää hiilijalanjälkeään – tutkielma tarjoaa useita strategisia lähestymistapoja ja käytännön esimerkkejä, mutta konkreettisten päästövähennyskeinojen määrä jää rajalliseksi. Tämä johtuu osittain siitä, että tieteellisissä lähteissä konkreettisia ratkaisuja käsitellään suppeasti. Tutkielma onnistui kuitenkin

esittelemään laadukkaita ja yleistettävissä olevia päästövähennyskeinoja, kuten energiatehokkuus-toimet ja paineilman optimointi, jotka voivat toimia lähtökohtana yritysten omille kehityshankkeille. Tutkielma vaati useita rajauksia, jotta kokonaisuus pysyi selkeänä eikä teoreettinen viitekehys laajentunut liikaa. Esimerkiksi lainsäädäntöön ja raportointistandardeihin sekä jokaiseen päästövähennysstrategiaan liittyvää sisältöä olisi voinut käsitellä syvällisemmin, mutta laajuus olisi ylittänyt työn puitteet. Rajaukset olivat perusteltuja työn tavoitteiden saavuttamiseksi ja ne auttoivat säilyttämään fokuksen teollisuuden päästövähennyskeinoissa. Kokonaisuutena tutkielma täyttää asetetut tavoitteet ja tarjoaa arvokasta tietoa yrityksille päästövähennysten toteuttamiseksi sekä strategisella että käytännön tasolla.

Aihepiirin monimuotoisuus jättää kuitenkin tilaa monenlaiselle jatkotutkimukselle. Jatkossa olisi tärkeä selvittää, millaisia esteitä yritykset kohtaavat hiilineutraalisuustavoitteiden käytännön toteutuksessa ja mitä oppeja voidaan saada yrityksiltä, jotka ovat jo saavuttaneet ilmastoposiitiivisuuden, ja miten näitä käytäntöjä voidaan soveltaa laajemmin eri toimialoilla. Samalla tarvitaan uusia ratkaisuja jäännöspäästöjen hallintaan kompensatioiden merkityksen heiketessä. Vaikka hiilen talteenottoon liittyvät varastointi- ja hyödyntämisteknologiat ovat lupaavia, niiden kustannukset, skaalattavuus ja teknologinen kypsyys rajoittavat laajempaa käyttöönottoa. Monet menetelmät ovat vielä kehitysvaiheessa, mikä korostaa tarvetta tutkimukselle ja innovaatioille. Erityisesti hiilen talteenoton ja hyödyntämisen sovellusten, kuten synteettisten polttoaineiden, hiilen mineralisoinnin ja biopohjaisten tuotteiden, ilmastovaikutuksia ja kustannusrakenteita on arvioitava kriittisesti. On tutkittava, miten ne voidaan integroida yritysten strategioihin niin, että ne tukevat kilpailukykyä eivätkä jää vain kokeellisiksi teknologioiksi. Lisäksi tieteellisissä julkaisuissa on niukasti konkreettisia esimerkkejä toimivista päästövähennyskeinoista yrityksille. Strategisella tasolla tietoa on runsaasti, mutta käytännön toteutuksista huomattavasti vähemmän. Jatkotutkimus voisi keskittyä näiden ratkaisujen systemaattiseen kartoitukseen kooten yhteen todistetusti toimivia keinoja eri teollisuudenaloilta. Tämä loisi arvokasta tietoa siitä, mitkä toimet ovat laajemmin skaalattavissa.

Tutkielman havaintojen perusteella voidaan lopuksi yhteenvetona todeta, että hiilineutraalisuuteen tähtäävät toimet ovat yrityksille ennen kaikkea strateginen ratkaisu, joka yhdistää ilmastovastuun ja kilpailukykyyn. Sääntelyn kiristyminen ja markkinoiden odotukset tekevät päästövähennyksistä välttämättömiä, mutta samalla ne voivat luoda taloudellisia hyötyjä, kuten kustannussäästöjä ja parempaa pääoman saatavuutta. Energiatehokkuus tarjoaa usein yrityksille helposti toteutettavan ja käytännöllisen lähtökohdan, mutta kestävä muutoksen edellytyksenä on kokonaisvaltainen lähestymistapa, jossa energiatehokkuutta täydennetään esimerkiksi puhtaalla energialla, materiaalitehokkuudella, kiertotaloudella ja innovatiivisilla teknologioilla. Ratkaisujen onnistunut käyttöönotto vaatii

tapauskohtaista suunnittelua, henkilöstön riittävää osaamista ja systemaattisia mittauksia tulosten arvioimiseksi.

Lähteet

- Ahmed, H. – Cárdenas-Lailhacar, C. – & Sherif, S. A. (2025) Energy optimization of motor-driven systems using variable frequency control, soft starters, and machine learning forecasting. *Energies*, Vol. 18 (19), 5135.
- Bedi, A. – Singh, B. (2024) Exploring the impact of carbon emission disclosure on firm financial performance: moderating role of firm size. *Management Research Review*, Vol. 47 (11), 1705–1721.
- GHG Protocol (2004) *Corporate Standard*. <<https://ghgprotocol.org/corporate-standard>>, haettu 29.9.2025.
- EFRAG (2025) *Amended ESRS E1 Exposure Draft*. <https://www.efrag.org/sites/default/files/media/document/2025-07/Amended_ESRS_Exposure_Draft_July_2025_ESRS_E1_0.pdf>, haettu 30.9.2025.
- Euroopan unionin neuvosto (2025) *55-valmiuspaketti: EU:n päästökauppajärjestelmän uudistus*. <<https://www.consilium.europa.eu/fi/infographics/fit-for-55-eu-emissions-trading-system/>>, haettu 30.9.2025.
- Euroopan komissio (2024) *The European green deal*. <<https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/879954/3%20European%20Green%20Deal.pdf>>, haettu 1.10.2025.
- EY (2025) *Navigating the EU omnibus simplification package: CSRD*. <https://www.ey.com/en_lu/insights/climate-change-sustainability-services/eu-omnibus-impact-on-csrd>, haettu 30.9.2025.
- Faludi, J. – Bayley, C. – Bhogal, S. – Iribarne, M. (2015) Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 21 (1), 14–33.
- Finnwatch (2021) *Yritysten vastuu ilmastosta ja oikeudenmukaisesta siirtymästä*. <https://www.finnwatch.org/images/reports_pdf/Yritysten_vastuu_ilmastosta_ja_oikeudenmukaisesta_siirtymasta_1.pdf>, haettu 8.12.2025.
- Ford, S. – Despeisse, M. (2016) Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 137, 1573–1587.
- Työ- ja elinkeinoministeriö (2022) *Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiastrategia*. <<https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/164321>>, haettu 1.10.2025.

- Ibishova, B. – Misund, B. – Tvesterås, R. (2024) Driving green: financial benefits of carbon emission reduction in companies. *International Review of Financial Analysis*, Vol. 96, 103757.
- IEA (2025) *Global energy review 2025*. IEA, Pariisi. <<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>>, haettu 6.10.2025.
- Panel On Climate Change (IPCC) (2023) *Climate change 2022 - mitigation of climate change: working group III contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. 1. p. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kaupa, C. (2025) The problem of carbon credits and offsetting in corporate climate disclosure. *European Business Law Review*, Vol. 36 (4).
- Lavrič, H. – Drobnič, K. – Fišer, R. (2024) Model-based assessment of energy efficiency in industrial pump systems: a case study approach. *Applied Sciences*, Vol. 14 (22), 10430.
- McNelly, M. – Choi, J.-K. (2024) Pathway to decarbonization through industrial energy efficiency: micro and macro perspectives from compressed air usage. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Vol. 11 (5), 1575–1591.
- Motiva (2015) *Teollisuusunien energiatehokkuus*. Motiva <https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/kaikki_julkaisut/teollisuusunien_energiatehokkuus.9236.shtml>, haettu 20.11.2025.
- Murray, J. – Dey, C. (2009) The carbon neutral free for all. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 3 (2), 237–248.
- Nevills, M. – Jones, S. – Languri, E. (2025) Comparison of compressed air flow measurement techniques for industrial energy efficiency enhancement. *Advances in Environmental and Engineering Research*, Vol. 6 (2), 1–16.
- Perdichizzi, S. – Buchetti, B. – Cicchiello, A. F. – Dal Maso, L. (2024) Carbon emission and firms' value: evidence from Europe. *Energy Economics*, Vol. 131, 107324.
- Podder, J. – Patra, B. R. – Pattnaik, F. – Nanda, S. – Dalai, A. K. (2023) A review of carbon capture and valorization technologies. *Energies*, Vol. 16 (6), 2589.

Schulz, J. – Leinmüller, D. – Misik, A. – Zaeh, M. F. (2021) Renewable on-site power generation for manufacturing companies—technologies, modeling, and dimensioning. *Sustainability*, Vol. 13 (7), 3898.

Steiner, B. – Münch, C. – Beckmann, M. – von der Gracht, H. (2024) Developing net-zero carbon supply chains in the European manufacturing industry – a multilevel perspective. *Supply Chain Management: An International Journal*, Vol. 29 (7), 164–181.

UNFCCC (2015) *Paris agreement*. Pariisi. <https://treaties.un.org/pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=_en>, haettu

Liitteet

Liite 1 Selvitys tekoälyn käytöstä

Tutkielmassa hyödynsin tekoälyä perinteistä tiedonhakua täydentävänä työkaluna etsiessäni aiheeseen liittyviä artikkeleita ja tiivistääkseni joitakin laajoja lähteitä, jotta pystyin arvioimaan niiden käyttökelpoisuutta. Lopullisen päätöksen lähteiden soveltuvuudesta tein itse luettuani ne. Lisäksi käytin tekoälyä yksittäisten virkkeiden uudelleenmuotoiluun selkeyden parantamiseksi, useimmiten silloin kun käsitteet olivat teknisiä ja suomenkielinen ilmaisu ei ollut luontevaa. Tavoitteena oli varmistaa, että teksti on ymmärrettävää ja asiayhteys säilyy muuttumattomana. Tekoälyä ei ole käytetty sisällön tuottamiseen. Otan kirjoittajana täyden vastuun tutkielman sisällöstä.