



**ENERGIATEHOKKUUS KONETEKNISISSÄ SOVELLUKSISSA**

**ENERGY EFFICIENCY IN MECHANICAL ENGINEERING APPLICATIONS**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2022

Arttu Hoteinen

Tarkastaja: TkT Antti Ahola

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Konetekniikka

Arttu Hoteinen

### **Energiatehokkuus koneteknisissä sovelluksissa**

Konetekniikan kandidaatintyö

2022

42 sivua, 1 kuva, 1 taulukko ja 1 liite

Tarkastaja: TkT Antti Ahola

Avainsanat: energiatehokkuus, konetekniikka, elinkaari, materiaalitehokkuus

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli tutkia, minkälaiset tekijät vaikuttavat energiatehokkuuteen koneteknisissä sovelluskohteissa. Energiatehokkuudelle määritettiin neljä indikaattoria konetekniikan näkökulmasta, ja niitä hyödynnettiin arvioitaessa lopputuotteen elinkaarta. Työssä jaoteltiin myös koneteknisiä sovelluksia tarkoituksenmukaisesti, ja pyrittiin tunnistamaan niille ominaisia tapoja hyödyntää energiaa. Lisäksi selvitettiin, kuinka energiatehokkuutta voitaisiin konkreettisesti mitata.

Työ toteutettiin kirjallisuustutkimuksena, ja siinä hyödynnettiin tieteellisen kirjallisuuden lisäksi kaupallisten toimijoiden aineistoja. Tutkimuksen reliabiliteettia ja validiteettia arvioitiin pääasiassa lähdeaineistojen kautta, esimerkiksi viittausten määrän sekä vaikuttavuuden perusteella. Lisäksi suuren lähdemateriaalin määrän nähtiin edistävän tutkimuksen objektiivisuutta.

Tutkimuksen tuloksena saavutettiin kattava läpileikkaus energiatehokkuuden mahdollisuuksista konetekniikan näkökulmasta, ja elinkaaren kokonaisenergiatehokkuudelle esitettiin konkreettinen laskentamalli. Lisäksi arvioitiin energiatehokkuuden periaatteiden soveltamista reaaliaikaiseksi mittausjärjestelmäksi. Lopuksi tulosten perusteella annettiin toimenpidesuosituksia koneteknisiä sovelluskohteita valmistaville yrityksille.

## ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Arttu Hoteinen

### **Energy efficiency in mechanical engineering applications**

Bachelor's thesis

2022

42 pages, 1 figure, 1 table and 1 appendice

Examiner: D.Sc. (Tech.) Antti Ahola

Keywords: Energy efficiency, mechanical engineering, life cycle, material efficiency

The aim of this bachelor's thesis was to study what kind of factors affect energy efficiency in mechanical engineering applications. Four indicators were assigned for energy efficiency, and they were utilized when estimating the life cycle of a product. In the thesis, mechanical engineering applications were classified appropriately, and it was sought to identify their characteristic ways of using energy. Additionally, it was investigated how energy efficiency could concretely be measured.

The thesis was conducted as a literature study, and commercial material was used in addition to scientific literature. The reliability and validity of the study were evaluated mainly through the source materials, for example based on the number of references and influence. In addition, the large amount of source material was seen to contribute to the objectivity of the study.

As a result of the study, a comprehensive walkthrough of the possibilities of energy efficiency from the perspective of mechanical engineering was achieved, and a concrete calculation model was presented for the total energy efficiency of a life cycle. In addition, the application of energy efficiency principles as a real-time measurement system was evaluated. Finally, based on the results, recommendations for action were given to companies manufacturing mechanical engineering applications.

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Roomalaiset

$E$	energia	[J]
$EI$	energiaintensiteetti	
$F$	voima	[N]
$h$	korkeus	[m]
$L$	tekninen käyttöikä	
$m$	massa	[kg]
$n$	lukumäärä	
$s$	matka	[m]
$W$	työ	[J]

### Kreikkalaiset

$\eta$	energiatehokkuus	[%]
--------	------------------	-----

### Vakiot

$g$	putoamiskiihtyvyys	9,81 m/s <sup>2</sup>
-----	--------------------	-----------------------

### Alaindeksit

in	syöte
out	tuotos

Lyhenteet

DfR          Design for Reuse

IoT          Internet of Things

LCA          Life Cycle Assessment

RFID        Radio Frequency IDentification

SLS          Serviceability Limit State

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	8
1.1	Tavoitteet.....	8
1.2	Rajaukset.....	9
1.3	Tieteellinen anti.....	9
2	Käsitteet.....	10
2.1	Energia ja tehokkuus.....	10
2.2	Energiatehokkuuden indikaattorit.....	12
2.3	Passiivinen ja aktiivinen energiatehokkuus.....	13
3	Elinkaaren energiatehokkuus.....	14
3.1	Materiaalien valmistus.....	14
3.2	Lopputuotteen valmistus.....	16
3.3	Käyttö.....	17
3.4	Huolto.....	20
3.5	Uusiokäyttö ja kierrätettävyys.....	22
4	Tyypilliset sovelluskohteet.....	24
4.1	Ajoneuvot ja kuljetusvälineet.....	24
4.2	Työkoneet.....	26
4.3	Teollisuuslaitteet.....	28
5	Mittaaminen.....	32
5.1	Anturit ja mittalaitteet.....	32
5.2	Mittausjärjestelmät ja simulointi.....	33
6	Tulokset.....	34
6.1	Tuotettu uusi tieto.....	34
6.2	Konkreettiset sovellukset.....	35
7	Tulosten analysointi.....	36
7.1	Pohdinta.....	36

7.2	Reliabiliteetti ja validiteetti .....	37
7.3	Tulosten uutuusarvo .....	38
7.4	Jatkotutkimusaiheet.....	38
8	Yhteenveto.....	39
	Lähteet .....	40

## Liitteet

### Liite 1. Lähteiden systemaattinen vertailu

# 1 Johdanto

Ympäristöystävällisyys ja vastuullisuus ovat yhä kasvavissa määrin keskeisiä aiheita julkisessa keskustelussa, erityisesti ilmastonmuutoksen aiheuttamista uhkakuvista johtuen. Tämä suuntaus on perustellusti johtanut lisääntyneeseen mielenkiintoon energijärjestelmää kohtaan, ja myös taloudelliset vaikuttimet puoltavat energiankulutuksen hillitsemistä. (Fawkes 2013, 1.) Olennaiseksi osaksi keskustelua onkin noussut energiatehokkuuden kehittäminen. Vaikka energiatehokkuuden voisi olettaa olevan verraten korkea kehittyneissä maissa, on esimerkiksi Euroopan unionin energiatehokkuustavoite vuodelle 2030 vain 32,5 % (European commission 2022). Tarve energiatehokkaammille ratkaisuille on siis suuri.

Laajasta huomiostaan huolimatta, energiatehokkuutta ei usein nähdä merkittävänä osana konetekniikkaa, ja aikaisempaa tutkimusta aiheesta on vähänläisesti. On kuitenkin helposti todennettavissa, että myös koneteknisten sovelluskohteiden energiatehokkuus tulisi ottaa huomioon niiden koko elinkaaren ajalta. Esimerkiksi Suomen vuoden 2020 energian loppukäytöstä 62 % johtui pitkälti koneteknisiä sovelluskohteita hyödyntävistä sektoreista, liikenteestä sekä teollisuudesta (Motiva 2021). Näiden sektorien teknisellä kehityksellä voidaankin nähdä olevan merkittävä osa energiatehokkuuden kannalta. Toisaalta energiatehokkuuden arvioimiselle on vaikea määrittää yksittäistä oikeaa tapaa, ja siksi tarvitaan indikaattoreita nimenomaan koneteknisten sovelluksien näkökulmasta.

## 1.1 Tavoitteet

Tämän kirjallisuustutkimuksen tarkoituksena on luoda läpileikkaava katsaus energiatehokkuudesta koneteknisissä sovelluksissa. Tutkimuksessa perehdytään rajoituksen puitteissa aiheita käsittelevään kirjallisuuteen ja tieteellisiin artikkeleihin, mutta myös verkkoaineistoihin. Aineistojen vuoropuhelun avulla pyritään saamaan aikaan tavoitteita vastaavia tuloksia. Lopuksi pohditaan, kuinka tutkimuksen tuloksia olisi mahdollista hyödyntää käytännössä.

Tutkimuksen päätavoitteena on selvittää, mitkä tekijät vaikuttavat koneteknisten sovelluskohteiden energiatehokkuuteen. Energiatehokkuutta pyritään tutkimaan erilaisten sovelluskohteiden osalta, koko elinkaari huomioon ottaen. Alatavoitteena selvitetään, minkälaisilla



indikaattoreilla ja suureilla energiatehokkuutta voidaan arvioida, sekä kuinka sitä voidaan käytännössä mitata. Näiden tavoitteiden perusteella on muodostettu kaksi tutkimuskysymystä, joista ensimmäinen on pääkysymys ja toinen alakysymys:

1. Mitkä tekijät vaikuttavat energiatehokkuuteen koneteknisissä sovelluskohteissa?
2. Miten energiatehokkuutta voidaan mitata ja arvioida?

## 1.2 Rajaukset

Sekä energiatehokkuus että konetekniikka ovat aiheina laaja-alaisia, minkä takia tutkimuksen rajaaminen on välttämätöntä. Tästä johtuen koneteknisillä sovelluskohteilla käsitetään tässä tutkimuksessa passiiviset, pääosin metalliset rakenteet, joiden suunnittelussa voidaan lujuusteknistä tarkastelua pitää merkittävänä kriteerinä, sekä toisaalta aktiiviset laitteet, jotka käyttävät muussa muodossa olevaa energiaa mekaanisen energian tuottamiseksi. Passiivista ja aktiivista energiatehokkuutta käsitellään lisää myöhemmin. Tutkimuksessa tarkastellaan energiatehokkuutta lähinnä teknisistä lähtökohdista, taloudellisten sekä yhteiskunnallisten vaikutuksien sijaan. Myös talo- ja rakennustekniset näkökulmat rajataan tarkastelun ulkopuolelle.

## 1.3 Tieteellinen anti

Tutkimuksella tavoitellaan erityisesti olemassa olevan tiedon jäsentämistä sellaiseksi, että sen perusteella voidaan tehdä päätelmiä tärkeimmistä koneteknisten sovellusten energiatehokkuuteen vaikuttavista tekijöistä. Tutkimuksen voidaankin siten olettaa tuottavan laaja-alaista näkemystä määritetystä tarkastelukulmasta, ja se voi osaltaan olla ohjaamassa tiedeyhteisön huomiota kohti tätä konetekniikan ulottuvuutta.

## 2 Käsitteet

Energiatehokkuudesta keskusteltaessa on tärkeää selventää tiettyjä peruskäsitteitä aihepiiriin liittyen. Arkipäiväisessä keskustelussa useat käsitteet sekoittuvat keskenään helposti, ja tämän luvun tarkoituksena onkin luoda lukijalle työn tulkitsemiseen tarvittava yleiskäsitys aiheesta.

### 2.1 Energia ja tehokkuus

Eräs tapa kuvata energiaa, on ajatella sitä potentiaalina työn tekemiseksi (Kanoğlu, Çengel & Dincer 2012, 10). Yksinkertaisuudestaan huolimatta tämä kuvaus kiteyttää käsitteen hyvin, joskaan ei järin syvällisesti. Erityisesti erilaiset energian esiintymismuodot jäävätkin usein huomiotta, ja energiaa käytetään synonyyminä sekä sähkölle että polttoaineille (Fawkes 2013). Energiatehokkuuden käsittelemiseksi esiintymismuotojen tunnistaminen on kuitenkin tärkeää: energia voi olla sähköenergian lisäksi mekaanista tai sisäenergiaa (Kaya, Çanka Kılıç & Öztürk 2021, 3). Sisäenergia voidaan puolestaan jakaa ydin-, lämpö- ja kemialliseen energiaan. Energiaa on kuitenkin mahdollista mitata samoissa ysiköissä muodostaan riippumatta, jonka takia tämän tutkimuksen yhteydessä energiatehokkuutta voidaan käsitellä yksinkertaisemmin, puhuen vain ”energiasta”. (Kanoğlu et al. 2012, 10.)

Tehokkuutta voidaan puolestaan kuvata ”enemmän aikaansaamisena vähemmällä” (Pérez-Lombard, Ortiz & Velázquez 2012, 240), jonka perusteella on mahdollista johtaa määritelmä itse energiatehokkuudelle. Pattersonin (1996, 377) mukaan energiatehokkuudella viitataan yleisesti ottaen energiankäytön pienentämiseen saman tuotteen tai tuotoksen tuottamiseksi. Toisin sanoen energiatehokkuus on matemaattinen suhde systeemin syötteen ja tuotoksen välillä. Alla on esitetty laskentamalli energiatehokkuudelle yleisesti.

$$\eta = \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}} = \frac{\text{Prosessista saatu hyödyllinen energia}}{\text{Prosessissa käytetty energia}} \quad (1)$$

Yhtälö 1, missä  $\eta$  on energiatehokkuus,  $E_{\text{out}}$  energiatuotos ja  $E_{\text{in}}$  energiasyöte (Patterson 1996, 377).

Koska kaikkien systeemien tuotosta ei kuitenkaan ole mahdollista tai järkevää mitata energiana itsessään, voidaan energiasyötettä verrata johonkin muuhun tuotokseen. Tätä voidaan havainnollistaa energiaintensiteettinä. Energiaintensiteetti kuvaa, päinvastoin tehokkuuteen nähden, energiasyötteen suhdetta tuotokseen. Energiaintensiteetin tapauksessa tuotos voi tarkoittaa energian sijaan muutakin, esimerkiksi tuotetta, palvelua tai prosessia. (Pérez-Lombard et al. 2012, 242.)

$$EI = \frac{E_{\text{in}}}{E_{\text{out}}} = \frac{\text{Prosessissa käytetty energia}}{\text{Prosessista saatu tuotos}} \quad (2)$$

Yhtälö 2, jossa  $EI$  on energiaintensiteetti (Pérez-Lombard et al. 2012).

Vaikka energia ei termodynamiikan ensimmäisen lain mukaan häviä, voi energiatehokkuus yksittäisellä systeemillä olla jopa alle kymmenen prosenttia. Tämä johtuu siitä, että energia muuttuu muotoaan sellaiseksi, että se ei ole hyödynnettävissä. Tyypillisesti tämä tarkoittaa muodonmuutosta lämmöksi. (Fawkes 2013, 4.) Tätä energian säilymistä voidaan kuvata yksinkertaistaen seuraavasti:

$$E_{\text{out}} = E_{\text{in}} - W \quad (3)$$

Yhtälö 3, jossa  $W$  kuvaa prosessin energiahäviöitä (Carroll 2020, 3; Gavin & Ray 2020, 76).

Energiatehokkuudesta keskusteltaessa on myös tärkeää tunnistaa tekijät ja termit, jotka eivät suoranaisesti ole synonyymejä energiatehokkuudelle. Esimerkiksi energiansäästöä käytetään usein kuvaamaan energiatehokkuutta. Kuitenkin, kuten yhtälöistä 1 ja 2 on havaittavissa, energiatehokkuus on suhteellinen suure syötteen ja tuotoksen välillä. Tästä johtuen energiatehokkuuden parantamista ei voi perustella ainoastaan tekemättä jätetyllä työllä, vaan arvioiminen vaatii myös tuotoksen huomioon ottamista. (Pérez-Lombard et al. 2012, 240–241.)

Nämä kuvaukset ja luonnehdinnat havainnollistavat hyvin sitä, että energiatehokkuudelle ei ole varsinaisesti olemassa yksittäistä oikeaa määritelmää tai tarkastelutapaa. Käytännössä soveltuva menetelmä energiatehokkuuden arvioimiseksi määräytyykin pitkälti tarkasteltavan kohteen ominaisuuksien sekä määrätyn tarkastelunäkökulman perusteella.

## 2.2 Energiatehokkuuden indikaattorit

Kuten edellisessä luvussa havaittiin, energiatehokkuutta on vaikea määrittää yleispätevästi ja erilaisia sovelluskohteita varten onkin johdettava omia indikaattoreitaan. Olennaista on myös ottaa huomioon, että koneteknisen sovelluskohteen eri elinkaaren vaiheet vaikuttavat energiankulutukseen erilaisilla tavoilla, ja siten esimerkiksi materiaalivalmistuksessa hyödynnettävät indikaattorit eivät välttämättä ole mielekkäitä käytönaikaisen energiatehokkuuden arvioimiseen.

Energiatehokkuuden määritelmien perusteella yksinkertaisimmaksi indikaattoriksi muodostuukin itse energiankäyttö ja sen suhde tuotokseen. Aiemmin esiteltyjen periaatteiden perusteella voidaan tarvittaessa johtaa indikaattoreita sopivaa käyttötarkoitusta varten. Energiankulutusta teollisuudessa voidaan verrata esimerkiksi sillä tuotettuun tiettyyn määrään tuotetta, kuten energiaa/terästonni, kun taas liikkumiseen ja kuljettamiseen liittyvät sovellukset voisivat hyödyntää energiankulutusta jotakin tiettyä matkaa kohti. (Patterson 1996, 379–381.) Tavallinen käytötapa tälle onkin ajoneuvon polttoaineenkulutuksen arvioiminen, sillä käytetyn polttoaineen vapauttama kemiallinen energia voidaan rinnastaa energiankulutukseen, polttoaineen energiatihyden kautta (Kanoğlu et al. 2012). Polttoaineenkulutusta voidaan toki arvioida myös käsiteltäessä muun tyyppisiä sovelluskohteita, ja näitä tarkastellaankin lisää myöhemmissä luvuissa (Patterson 1996, 379–381).

Toinen mahdollinen indikaattori energiatehokkuudelle on materiaalin tai raaka-aineen kulutus. Vaikka myös polttoaineenkulutus voidaan mieltää kuuluvaksi tähän kategoriaan, on materiaalin kulutuksella ulottuvuuksia erityisesti valmistusteknisissä ja tuotannollisissa sovelluksissa. Materiaalitehokkuutta voidaan kuvata hyödynnetyn materiaalin suhteena kokonaismateriaalikulutukseen, tai vaihtoehtoisesti materiaali-intensiteetin kautta materiaalin tarpeena tuotosta kohden. Materiaalitehokkuus liittyy energiatehokkuuteen erityisesti siksi, että raaka-aineiden ja valmistusmateriaalien tuottaminen sitoo energiaa, ja hyödyntämätön materiaali saa lähtökohtaisesti aikaan vain turhaa energiankäyttöä. (Hartini et al. 2020, 946–948.)

Kolmantena indikaattorina voidaan pitää lopputuotteen käyttöikä. Lopputuotteen äkillinen korjaustarve, tai jopa käyttöiän päättymisen, voi johtaa tuotteen ympäristövaikutuksien kasvamiseen ja ylimääräiseen energiankulutukseen. Energiankulutus voi tapahtua joko suoraan korjaamisen takia, tai epäsuorasti, mikäli lopputuotteen valmistukseen sitoutuneelle

energiankäytölle ei saadakaan vastineeksi suunniteltua tuotosta, eli tässä tapauksessa käyttöikä. Keskeistä käyttöiän kannalta onkin tuotteen huollettavuus. Huoltamalla tuotteen ominaisuudet pyritään pitämään määrätyn tason yläpuolella, ja siten pidentämään tuotteen elinkaarta. (Bijen 2003, 179–183.)

Neljäntenä ja viimeisenä indikaattorina tutkimuksessa tarkastellaan kasvihuonekaasupäästöjä. Erityisesti hiilidioksidipäästöjä voidaan suhteuttaa niillä aikaansaatuun tuotokseen, eli arvioida ns. hiili-intensiteettiä. Hiilidioksidipäästöjen merkitys julkisessa keskustelussa on viime vuosina kasvanut merkittävästi, ja yhteys energiatehokkuuteen on ilmeinen. Hiili-intensiteettiä käytettäessä on kuitenkin muistettava, että se ottaa huomioon ainoastaan päästöjen suhteen tuotokseen, eikä siten kerro suoranaisesti energiankäytöstä itsessään. (Li et al. 2022, 6–7.)

### 2.3 Passiivinen ja aktiivinen energiatehokkuus

Eräs tapa luokitella systeemejä energiatehokkuuden kannalta on niiden jakaminen muuntolaitteisiin ja passiivisiin systeemeihin. Muuntolaitteiden toiminta perustuu siihen, että ne muuttavat energiaa eri muotoon alkuperäiseen nähden, kuten moottori polttoaineen kemiallista energiaa mekaaniseksi energiaksi. Passiivisilla systeemeillä ei puolestaan ole varsinaista energiatuotosta, vaan niitä on arvioitava pääasiassa energaintensiteetin kautta. (Fawkes 2013, 4.)

Tässä tutkimuksessa kyseisen jaottelun perusteella on johdettu määritelmät passiivisille ja aktiivisille sovelluskohteille. Passiivisilla sovelluskohteilla viitataan lopputuotteisiin ja rakenteisiin, jotka on suunniteltu pääasiassa tukirakenteiksi tai kantamaan kuormia, ja joilla ei esiinny varsinaista käytönaikaista energiankulutusta tai -tuottoa. Passiiviset sovelluskohteet ovat yleensä staattisesti tai syklisesti kuormitettuja rakenteita, kuten sillat, säiliöt, putkistot ja rakennukset. Toiminnallisuuden puutteestaan johtuen passiiviset sovelluskohteet sopivat huonosti käytönaikaisen energiatehokkuuden vertailemiseen, ja tästä syystä tässä työssä tarkastellaan jatkossa pääasiassa aktiiviseksi luokiteltavia sovelluskohteita, jotka ovat yleisesti ottaen liikkuvia ja toimintaansa energiaa kuluttavia laitteita.

### 3 Elinkaaren energiatehokkuus

Tässä luvussa tarkastellaan esimerkkitapausten avulla koneteknisen lopputuotteen energiatehokkuuden muodostumista sen elinkaaren eri vaiheissa. Keskeisenä esimerkkinä tutkitaan henkilöauton elinkaarta, sillä sen luonne aktiivisena sovelluskohteena mahdollistaa laajan arvioinnin käytönaikaiselle energiatehokkuudelle, ja toisaalta määritettyjä indikaattoreita on helppo soveltaa sen tarkasteluun. Elinkaari on jaettu materiaalivalmistukseen, lopputuotevalmistukseen, käyttöön sekä uusiokäyttöön ja kierrätykseen. Lisäksi tarkastellaan huollon merkitystä elinkaaren kannalta. Vaikka myös elinkaaren vaiheiden välinen kuljetus ja logistiikka on tärkeä näkökulma, on se pääosin rajattu tutkimuksen ulkopuolelle.

Tyypillinen tapa arvioida minkä tahansa lopputuotteen ympäristövaikutuksia on elinkaariarviointi (LCA, eng. ”Life Cycle Assessment”). ISO 14040 -standardi määrittelee elinkaariarvioinnin ”mahdollisten ympäristövaikutusten arvioimisena tuotteen koko elinkaaren ajalta”. Elinkaari käsittää tuotteen vaiheet aina raaka-aineiden hankinnasta tuotteen hävittämiseen saakka. Vaikka ympäristövaikutukset kokonaisuudessaan ovat merkittävä ja tärkeä näkökulma, ovat ne kuitenkin tämän tutkimuksen tarkastelun ulkopuolella. Tästä johtuen LCA:n periaatteita pyritään soveltamaan siten, että eri elinkaaren vaiheissa tutkitaan pääasiassa vain aikaisemmin määritettyjä energiatehokkuuden indikaattoreita. (Klöpffer & Grahl 2014, 1–3.)

#### 3.1 Materiaalien valmistus

Materiaalivalmistukselle voidaan käsittää erilaisia alku- ja loppupisteitä koneteknisen sovelluskohteen elinkaaren varrelta. Kuitenkin tässä tutkimuksessa kyseinen vaihe määritetty alkamaan valmistusmateriaalin, esimerkiksi teräksen, valmistuksesta rautamalmista, ja päätymään puolivalmisteseen, kuten teräslevyyn. Tässä alaluvussa käytetään ensisijaisena esimerkkimateriaalina terästä, sillä se on eräs käytetyimmistä metalleista, ja mukautuu monenlaisiin sovelluksiin (Metallinjalostajat ry 2014, 2–3). Henkilöautossa terästä käytetään muun muassa rungon valmistamiseen (BMW Group 2022).

Terästä voidaan valmistaa raaka-aineesta riippuen pääasiassa kahdella eri tekniikalla. Rautamalmia varten käytetään masuunipohjaista tuotantoa, kun taas valokaariuunituotantoa voidaan hyödyntää kierrätysteräksen kanssa. (Metallinjalostajat ry 2014, 9–19.) Erityisesti masuunipohjainen teräksen valmistusprosessi tuottaa runsaasti hiilidioksidipäästöjä: SSAB ilmoittaa Suomen ja Ruotsin tehtaidensa vuoden 2020 suoriksi hiilidioksidipäästöiksi 8844 tuhatta tonnia, joista noin 90 % aiheutuu rautamalmipohjaisesta tuotannosta (SSAB 2022). Jotta rautamalmi saadaan jalostettavaan muotoon, on se ensin rikastettava, mikä tarkoittaa sivukiven erottamista metallimineraalista. Tärkeimmissä rautamalmimineraaleissa, magnetiitissa ja hematitissa, on puhtaana esiintyessään rautaa noin 70 %, eli rikastuksessa syntyy merkittävä sivuainevirta tarpeettomasta sivukivestä. Masuunissa tuotettu raakarauta jalostetaan lopuksi teräkseksi konvertterin avulla. (Metallinjalostajat ry 2014, 9–19.)

Kuten huomataan, on teräksen tuotanto verraten energiantensiivistä, ja energiatehokkuutta arvioitaessa nousevat esiin erityisesti valmistusprosessin tuottamat päästöt sekä materiaali-tehokkuus. Tavallinen menetelmä teräksen, tai vastaavasti jonkin muun materiaalin, valmistuksenaikaisen energiatehokkuuden arvioimiseen onkin hiili-intensiteetti. Teräksen tapauksessa tätä indikaattoria voitaisiin hyödyntää esimerkiksi vertaamalla hiilidioksidipäästöjä tuotettua terästonnia kohden, ja arviointia voitaisiin laajentaa tarkastelemalla päästöjä myös teräkseen vaadittavien malmien louhintavaiheessa. Toisaalta energiatehokkuutta voitaisiin arvioida materiaali-intensiteetin kautta, vertaamalla vaadittua rikastettavaa malmimäärää tuotettuun terästonniin. Tämä malli ottaa huomioon erityisesti tuotantoketjun alkupään. Materiaali-intensiteetin perusteella voitaisiin myös johtaa malli materiaalitehokkuudelle, jota voitaisiin arvioida mm. rikastetun metallimineraalin suhteena malmiin. Nämä energiatehokkuuden arviointimallit ovat myös helposti sovellettavissa muille materiaaleille. (Metallinjalostajat ry 2014, 12–14.)

Mahdollisuudet erityisesti hiili-intensiteetin hyödyntämiselle ovat kuitenkin rajalliset joidenkin materiaalien ja valmistusmenetelmien yhteydessä, sillä kaikkien materiaalien valmistaminen ei välttämättä tuota päästöjä samassa suhteessa kuin energiaa käytetään. Lisäksi innovaatiot valmistusprosesseihin liittyen luovat mahdollisuuksia pienemmille hiilidioksidipäästöille. Esimerkiksi ruotsalainen HYBRIT-teräksentuotantomenetelmä hyödyntää uusiutuvalla energialla tuotettua vetyä rautamalmin pelkistämiseen, ja mahdollistaa teoriassa päästöttömän teräksentuotannon. Tästä johtuen myös itse energiantensiteetti voidaan nähdä käyttökelpoisena indikaattorina materiaalivalmistuksessa. (HYBRIT 2022.)

### 3.2 Lopputuotteen valmistus

Tässä tutkimuksessa määritelty lopputuotteen valmistus koostuu pääasiassa komponenttien konepajavalmistuksesta sekä niiden kokoonpanosta. Tämä elinkaaren vaihe on merkittävässä osassa paitsi teknisesti tarkasteltuna, myös taloudellisilta sekä yhteiskunnallisilta vaikutuksiltaan. Valmistus kuluttaa energiaa ja materiaaleja, joko uusiutuvia tai uusiutumattomia, ja tuottaa sivuainevirtoja, joiden hallitseminen on tärkeää ympäristövaikutusten minimoimiseksi. Lopputuotteen valmistukseen liittyy siis monia näkökulmia vastuullisuuden kannalta tarkasteltuna, ja näihin on mahdollista perehtyä muun muassa energiatehokkuuden kautta. (Duflou et al. 2012, 587–588.)

Valmistavan organisaation tai järjestelmän näkökulmasta, valmistusprosessia voidaan jakotella pienempiin tai suurempiin osiin tarkastelun helpottamiseksi. Pienimpänä valmistuksen yksikkönä voidaan pitää valmistuslaitetta tai yksikköprosessia, jonka tarkoituksena on suorittaa tiettyä valmistukseen liittyvää toimenpidettä. Henkilöauton tapauksessa yksikköprosessi voisi kuvata mm. moottorilohkon sylinterin koneistusta jyrsimellä tai yksittäistä kiinnitysvaihetta. Peräkkäiset yksikköprosessit puolestaan muodostavat yhdessä usean koneen systeemin tai linjaston, jonka tavoitteena voi olla esimerkiksi valmistaa aiemmin mainittu moottori kokonaisuudessaan. Toisaalta linjasto voi olla tarkoitettu myös kokoonpanoa varten. Näistä linjastoista voidaan käsittää koostuvan laitos, esimerkiksi autotehdas. (Duflou et al. 2012, 588–589.)

Vaikka lopputuotteen valmistusta yleisesti ottaen ajatellaankin laitos- tai sitä alemmina tasoina, on tärkeää tiedostaa myös näiden yläpuolella sijaitsevat tasot. Useiden laitoksien systeemit muodostavat läheisyytensä vuoksi mahdollisuuksia energia- ja materiaalivirtojen uudelleenhyödyntämiselle, ja yritystason ratkaisut sekä toimitusketjut luovat tukitoimintoja laitossysteemeille. Toisaalta, koska yritystason ratkaisut liittyvät laajalti taloudellisiin tekijöihin sekä tuotannonohjaukseen, ja alemmille tasoille soveltuvat indikaattorit voidaan nähdä käyttökelpoisena pitkälti koko lopputuotteen valmistusprosessin ajan, pyritään tämän tutkimuksen tarkastelussa havainnoimaan lähinnä laitostasoa ja sen alatasoja. (Duflou et al. 2012, 588–589.)

Käytännössä henkilöauton tapauksessa lopputuote valmistetaan peräkkäisillä linjastoilla, joilla kootaan ensin auton kori. Kori koostuu tyypillisesti teräs- ja alumiiniohutlevyistä, jotka on muokattu ja liitetty vaadittavaan muotoon. Valmistusmateriaalin muokkauksessa nousee



esiin erityisesti materiaalia poistavien valmistusmenetelmien merkitys. Mikäli materiaalia joudutaan poistamaan, syntyy tuotannossa materiaalihävikkiä. Materiaalitehokkuus onkin hyvin skaalautuva indikaattori valmistukselle, sillä sitä voidaan tarkastella aina yksikköprosessista laitostasolle asti, tai tarvittaessa jopa yritystasolla. (BMW Group 2022.)

Materiaalitehokkuutta lopputuotteen valmistuksessa voidaan kuvata materiaalivalmistuksen tavoin lopputuotteessa hyödynnetyn materiaalin suhteena kokonaisuudessaan käytetyn materiaalin määrään. Myös yhden tuotoksen materiaali-intensiteetin arvioiminen on mahdollista, mutta on otettava huomioon, että materiaalin vähentämisellä voi olla myös kielteisiä vaikutuksia tuotteen rakenteelliseen kestävyys. Tästä johtuen alhaista materiaali-intensiteettiä ei voida pitää itseisarvona, vaan lopputuote tulee ensisijaisesti suunnitella siten, että se täyttää sille asetetut vaatimukset. Toisaalta korkea materiaali-intensiteetti kasvattaa rakenteen massaa, jolla voi olla sovelluskohteesta riippuen vaikutusta energiankulutukseen. Tätä ilmiötä tarkastellaan lisää myöhemmin. Materiaalitehokkuuden merkitys korostuu erityisesti harvinaisia tai jalostukseltaan energiaintensiivisiä materiaaleja sisältäviä komponentteja valmistettaessa.

Kun auton runko ja muut komponentit ovat valmistettu, on pintakäsittelyn ja kokoonpanon vuoro. Kokoonpanossa, kuten itse valmistuksessakin, käytetään työntekijöiden lisäksi usein robotiikkaa, joka kykenee suorittamaan toistuvia operaatioita tarkasti ja nopeasti. Robotiikka yhdistetäänkin valmistuksessa yleensä erityisesti tehokkuuteen itsessään. Myös energiain- tensiteettiä voidaan tarkastella niin yksikköprosessin kuin laitoksen tasolla, esimerkiksi arvioimalla työvaiheeseen vaadittua sähköenergiaa, tai vertaamalla tuotantolaitoksen energi- ankulutusta tuotantomääriin. (BMW Group 2022.)

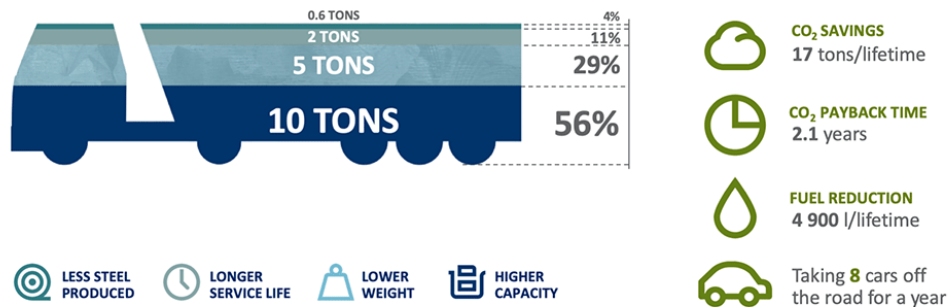
### 3.3 Käyttö

Minkä tahansa lopputuotteen energiatehokkuutta arvioitaessa, on käytönaikainen tehokkuus usein tavallisin tapa lähestyä aihetta. Erityisesti liikkumisvälineiden energiatehokkuutta käsitellään usein huomaamatta arkipäiväisessä elämässä. Toisaalta käytönaikainen energiatehokkuus on mahdollisesti elinkaaren vaiheista laajin, sekä sille määrätty indikaattorit eniten riippuvaisia siitä, minkälaista sovelluskohdetta käsitellään. Tästä johtuen sovelluskohtaisien

indikaattoreiden määrittäminen on jätetty neljänteen päälukuun, ja tässä alaluvussa käsitellään lähinnä yleispäteviä tekijöitä käytönaikaisen energiatehokkuuden suhteen.

Aktiiviset konetekniset sovelluskohteet käyttävät siis energiaa, usein sähköenergiaa tai polttoainetta, saavuttaakseen tuotoksena mekaanista energiaa. Käytännössä tämä tarkoittaa tarvetta joko sähkö- tai polttomoottorille. Moottoreiden toimintaa arvioidaan tyypillisesti kierrosnopeuden kautta, esimerkiksi yksikössä kierroksia minuutissa. Erityisesti polttomoottorin tapauksessa moottorin energiatehokkuus on laajalti riippuvainen kierrosnopeudesta. Keskeistä energiatehokkuuden kannalta onkin tunnistaa erot moottorityyppien välillä, sekä erityisesti sähkömoottorin edut polttomoottoriin verrattuna. Sähköenergian muuttaminen mekaaniseksi onnistuu tyypillisesti erittäin hyvällä, jopa yli 85 %:n tehokkuudella. Samoin sähköenergian varastoiminen akkuihin on mahdollista toteuttaa verraten energiatehokkaasti. Tähän suhteutettuna polttomoottorin jopa alle 25 %:n hyötysuhdetta voidaan pitää melko vaatimattomana. Moottorivalinnan lisäksi myös lopputuotteen vaihteisto tulisi suunnitella niin, että moottori kykenee operoimaan parhaalla tehokkuusalueellaan. Teoriassa moottorisysteemin kokonaistehokkuus määräytyykin moottorin sekä vaihteiston funktiona. (Carroll 2020, 15–215.)

Käytännössä koneteknisen sovelluskohteen käytönaikaiseen energiatehokkuuteen vaikuttaa kuitenkin moni muukin tekijä. Tuotettua liikettä vastustavat tyypillisesti vierintä- ja ilmanvastuksista muodostuvat kitkavoimat, jotka absorboivat osan energiatuotoksesta, muuttaen sen hukkalämmöksi (Carroll 2020, 15). Toisaalta myös itse liikutettava kuorma voi vaikuttaa energiankulutukseen merkittävästi, nostaa tuotoksen energiaintensiteettiä. Kuorma voi koostua paitsi kuljetettavasta tai liikutettavasta kuormasta, myös sovelluskohteen rakenteellisesta kuormasta. SSAB:n esittämässä asiakastapauksessa (Kuva 1) kippilavallisen kuorma-auton kippiosan sekä rungon teräsmateriaalit korvattiin yrityksen omilla, kevyemmällä teräslaaduilla, vähentäen kuorma-auton painosta 18 %. Alentuneen rakenteellisen kuorman ansiosta, auton kapasiteettia kyettiin kasvattamaan, ja terästä vaadittiin vähemmän, pienentäen materiaali-intensiteettiä. (SSAB 2019.)



Kuva 1. Materiaalin vaikutus käytönaikaiseen energiatehokkuuteen (SSAB 2019).

Kuten SSAB:n (2019) asiakastapauksesta havaitaan, oli yhtenä etuna materiaalin muutoksesta pidentynyt käyttöikä. Käyttöikää ja sen laatua tarkastellaan tarkemmin seuraavassa, huoltoa käsittelevässä alaluvussa, mutta on olennaista määrittää ensin käytönaikaisia tekijöitä ja ilmiöitä, jotka voivat vaikuttaa sovelluskohteen kestoan, ja siten huollon tarpeeseen. Erityisesti metallisten, koneteknisissä sovelluksissa usein teräksisten, rakenteiden näkökulmasta merkittävänä käyttöikään vaikuttavina tekijöinä voidaan pitää mm. väsymistä, kulumista sekä korroosiota.

Rakenteen väsyminen johtuu syklisen kuormituksen aiheuttamasta kumulatiivisesta vaikutuksesta. Väsymisvaurio voi aiheuttaa tarpeen rakenteen korjaamiselle, tai pahimmillaan jopa rakenteen pettämisen kokonaan (Saber et al. 2016, 53–54). Samaan tapaan kulumisen voi vaurioittaa rakennetta, lyhentäen sen käyttöikää tai lisäten huollon tarvetta. Kulumista voidaan jaotella monella tapaa, mutta merkittävimminä kulumismenetelminä voidaan pitää abrasiivista ja adhesiivista kulumista. Abrasiivinen kulumisen on kulumista, jossa kuluvan osan pinnasta leikkaantuu materiaalia ulkoisen kuluttavan partikkelin johdosta. Käytännössä tämä voi tarkoittaa esimerkiksi kiven hankaamista pintaa vasten. Toisaalta kulumisen voi olla adhesiivista, jolloin kahden pinnan mikroskooppisten epätasaisuuksien yhteen hankaus aiheuttaa kulumista. Sekä väsymistä että kulumista voidaan kuitenkin pyrkiä ehkäisemään. Erityisesti väsymisen merkityksen arviointi on tärkeää lopputuotetta suunniteltaessa, ja kulumista voidaan välttää oikeanlaisella huollolla sekä materiaalivalinnoilla. (Neale & Gee 2001, 3–8.)

Yhteistä väsymiselle ja kulumiselle on se, että ne esiintyvät tyypillisesti vasta myöhemmässä vaiheessa tuotteen käyttöikä. Samaan tapaan korrosio on materiaalin huononemista ajan kuluessa aiheuttava ilmiö. Korrosio johtuu yleisesti ottaen metallin reagoimisesta

korrosoivan ympäristön kanssa, joko suoraan tai materiaalin pinnalla olevan veden välityksellä. Joidenkin metallien, kuten alumiinin, tapauksessa korrosio voi olla ilmiönä jopa hyödyllinen, muodostaen materiaalin pinnalle tiiviin suojaavan oksidikerroksen. Useilla metalleilla vastaavaa tiivistä kerrosta ei kuitenkaan muodostu, ja esimerkiksi seostamattoman teräksen pintaan muodostuva kerros ei suojaa sitä myöhemmältä korroosiolta. Korroosiota voi esiintyä materiaalissa tasaisesti, mutta myös paikallisesti mm. väsymisen ja kulumisen yhteydessä. Korroosion merkitys onkin tärkeä tunnistaa jo materiaalivalintoja tehdessä: Ruostumattomia sekä säänkestäviä teräksiä hyödyntämällä voidaan ehkäistä korroosion kielteisiä vaikutuksia lopputuotteen käyttöikänsä, mutta on otettava huomioon, että hyödynnettävyys riippuu jossain määrin käyttöympäristön olosuhteista. Toisaalta materiaaleja voidaan myös pintakäsitellä, esimerkiksi maaleilla sekä metallipinnoitteilla. (Bijen 2003, 3–40.)

Kuten aikaisemmin todettiin, käytönaikaisen energiatehokkuuden arvioiminen on mahdollisesti haastavinta suorittaa yleispätevästi, ja käytännössä soveltuvien indikaattorien valikoiminen on tehtävä käsiteltävän sovelluskohteen ominaisuuksien perusteella. Sovelluskohteiden toimintaperiaatteet ovat kuitenkin jossain määrin rinnastettavissa aktiivisen ja passiivisen jaottelun mukaan, ja käyttövoiman, liikevastuksien sekä keskeisenä indikaattorina käyttöiän huomioon ottamisen voidaan nähdä korostuvan koneteknisten sovelluskohteiden käytönaikaisessa energiatehokkuudessa.

### 3.4 Huolto

Lopputuote suunnitellaan yleensä kestävänsä tietyn ajanjakson, eli käyttöiän ajan. On tärkeää, että tuote säilyttää ominaisuutensa mm. turvallisuuden osalta jollain tasolla koko käyttöikänsä. Tämän tutkimuksen näkökulmasta tarkasteltuna erityisesti tekninen käyttöikä vaikuttaa energiatehokkuuden elinkaareen. Teknisellä käyttöiällä tarkoitetaan ajanjaksoa, jonka ajan tuotteen ”kaikkien välttämättömien ominaisuuksien tulee täyttää tai ylittää hyväksyttävät vähimmäisarvot”. Koska lopputuote voi kuitenkin vikaantua, esimerkiksi edellisessä alaluvussa lueteltujen mekanismien kautta, teknisen käyttöiän määritelmän ehtona on säännöllinen huolto, jonka merkitykseen perehdytään tässä alaluvussa. (Bijen 2003, 179–182.)

Ongelmat tuotteen kestävyys suhteen voivat aiheutua tuotteen suunnittelusta, asennuksesta tai käytöstä. Suunnitteluvaiheessa mahdollisia kompastuskiviä ovat mm. suunnittelijan

puutteellinen osaaminen sekä tuotteen suunniteltua pidempi käyttöikä. Toisaalta vääränlainen asennus ja käyttö voi johtaa siihen, että tuotteen tekninen käyttöikä ei vastaa suunniteltua käyttöikää. Näistä syistä tuotteen suunnitteleminen kestävyyslähteisesti on tärkeää. Kestävyyslähäinen suunnittelu pitää sisällään huolto-ohjelman tuotteelle, jonka avulla tuotteen tekninen käyttöikä saadaan maksimoitua. Henkilöauton säännölliset huoltovälit ovat hyvä esimerkki huolto-ohjelmasta. Näitä periaatteita soveltamalla tuotteen suoritustaso on mahdollista pitää pysyvästi vaaditun tason yläpuolella. (Bijen 2003, 181–184.)

Tuotteen käytettävyydellä kuvataan sen kykenevyyttä täyttää vaadittuja toiminnallisuksia, ja toisaalta käytettävyyden rajatasolla (SLS, eng. ”Serviceability Limit State”) tasoa, jonka alapuolella tuotteen toimintaa on rajoitettava. Tyypillisesti huolto-ohjelman tavoitteena onkin pitää tuotteen käytettävyys SLS:n yläpuolella, jolloin puhutaan ennaltaehkäisevästä huollosta. Ennaltaehkäisevä huolto voi olla määrättyä, kuten henkilöauton säännölliset huollot, jolloin tarkoituksena on suorittaa huolto ennen vikaantumista, tai reaktiivista, jolloin huolto suoritetaan vian havaitsemisen jälkeen, mutta siten että tuotteen suoritustaso pysyy vielä SLS:n yläpuolella. Toisaalta voidaan suorittaa korjaavaa huoltoa, jonka tarkoituksena on palauttaa tuotteen suorituskyky hyväksyttävälle tasolle. (Bijen 2003, 182–184; Mobley 2004, 4–10.)

Energiatehokkuuden näkökulmasta nousee huollon suhteen esiin erityisesti kaksi indikaattoria: materiaalin sekä energian kulutus. Ensimmäisen kannalta olennaisena tekijänä voidaan pitää onnistunutta suunnitteluvaihetta sekä oikeanlaista huolto-ohjelmaa. Kun huollettavuus on otettu huomioon heti tuotetta suunniteltaessa, voidaan tuotteen kuluessa yksittäisiä komponentteja vaihtaa helposti. Tämä vähentää tarvetta suurempien osakokonaisuuksien uusimiselle ja siten ylimääräiselle valmistusmateriaalin käytölle. Toisaalta itse huollon tarvetta voidaan pyrkiä vähentämään tunnistamalla ympäristövaikutuksia suunnitteluvaiheessa. (Bijen 2003, 182–187.)

Huollon merkitys voidaan yhdistää myös itse energiankulutukseen. Vika, joka aiheuttaa tuotteen suorituskyvyn putoamisen alle SLS:n, henkilöauton tapauksessa esimerkiksi sylinterinkannen tiivisteiden vuoto, johtaa siihen, että tuote ei kykene siltä vaadittuun tasoon ennaltaan pysyneestä energiankulutuksesta huolimatta. Energiatehokkuuden ylläpitämiseksi tulee korostaa ennaltaehkäisevän huollon merkitystä, niin määrätyn kuin reaktiivisen huollonkin osalta. (Bijen 2003, 183.)

On myös otettava huomioon, että huollon merkitys vaihtelee tuotteen elinkaaren aikana, ja vian todennäköisyys on tavallisesti suurin käytön alku- ja loppupäässä. Tästä johtuen huoltamista ja huolto-ohjelmaa on suunniteltava tuotteen elinkaareen sopeutuen. Käytännössä huoltamista joudutaan tarkastelemaan teknisten näkökulmien lisäksi taloudellisilla indikaattoreilla, ja yleensä täysin huoltovapaan tuotteen suunnitteleminen ei ole taloudellisesti järkevää. Kestävyyttä lähtöinen suunnittelu vaatiikin erilaisten indikaattoreiden punnitsemista ja arviointia. (Bijen 2003, 214–217; Mobley 2004, 3–4.)

### 3.5 Uusiokäyttö ja kierrätettävyys

Myös tuotteen elinkaaren loppupää tarjoaa mahdollisuuksia energiatehokkuuden tarkastelulle. Uuden tuotteen materiaalivalmistuksen energiantensiteettiä voidaan saada laskeutettua, mikäli vanha tuote tai tuotteet voidaan hyödyntää uudelleen käyttöikänsä päätteeksi, joko kokonaan tai osin. Perinteinen tapa ajatella tuotteen elinkaarta onkin ollut yhdensuuntainen elinkaari, mutta kiertotalouden periaatteita hyödyntämällä tuote voi liikkua elinkaarellaan myös toiseen suuntaan. (Borrion, Black & Mwabonje 2021, 27–34.)

Kuten aikaisemmin mainittiin, henkilöautoissakin käytettävä teräs voidaan valmistaa joko rautamalmista tai kierrätysteräksestä (Metallinjalostajat ry 2014). Ennen kierrätystä on kuitenkin mahdollista pyrkiä uusiokäyttämään teräskomponentteja. Uusiokäytön suunnittelulla (DfR, eng. ”Design for Reuse”) tarkoitetaan pyrkimystä suunnitella uusi tuote hyödyntäen uudelleenkäytettyjä komponentteja. DfR:n toteuttamisessa keskeistä on tietämys materiaaleista, ja käytännössä rajoittavaksi tekijäksi sen hyödyntämisen suhteen voi usein muodostua lopputuotteen hinta. (Kim & Kim 2020, 3–4.)

Mikäli tuotetta ei ole mahdollista hyödyntää uusiokäyttönä, voidaan tuote tai osa siitä kierrättää. Kierrätettävät materiaalit voidaan jakaa karkeasti kahteen ryhmään, avoimen ja suljetun silmukan materiaaleihin. Esimerkiksi teräs voidaan lukea suljetun silmukan materiaaliksi, eli sitä voidaan kierrättää teoriassa loputtomiin ilman muutoksia sen ominaisuuksissa. (Rossi 2014, 183–187.)

Olellaista kierrätyksessä energiatehokkuuden kannalta on erityisesti se, että kierrätettävän materiaalin jalostaminen uudelleen valmistusmateriaaliksi on tyypillisesti vähemmän energiantensiivistä kuin materiaalivalmistus raaka-aineesta lähtien. Energiatehokkuuden

indikaattoreiden kautta tarkasteltuna voitaisiinkin arvioida esimerkiksi energiankäytön tai, sovelluskohteesta riippuen, päästöjen muutosta, kun verrataan materiaalivalmistusta raaka-aineesta ja kierrätysmateriaalista. Kierrätettävyyttä tulisi arvioida myös jo tuotteen suunnitteluvaiheessa.

## 4 Tyypilliset sovelluskohteet

Kuten tutkimuksen aikana on useaan kertaan todettu, konetekniikka on laaja aihealue, mistä johtuen sen sisältöä on pyrittävä rajaamaan tarkastelun kannalta tarkoituksenmukaisesti. Tässä luvussa esitetäänkin joitain tyypillisiä, aktiivisia koneteknisiä sovelluskohteita, jotka on jaettu ajoneuvoihin ja kuljetusvälineisiin, työkoneisiin sekä teollisuuden laitteistoihin. Vaikka edellä mainittujen sovelluskohteiden välillä voidaan nähdä monia samankaltaisuuksia, on niistä löydettävissä ratkaisevia eroja, erityisesti tavoissa hyödyntää energiaa. Luvun tarkoituksena onkin osoittaa sovelluskohtaisesti, mitä energiatehokkuuden indikaattoreita sovelluskohteiden tapauksessa tulisi ottaa huomioon, kuinka elinkaaren vaiheita tulisi painottaa sekä minkälaisilla laskentamalleilla energiatehokkuutta voidaan arvioida käytännössä.

### 4.1 Ajoneuvot ja kuljetusvälineet

Liikkumiseen ja kuljettamiseen liittyvät ratkaisut ovat kiinteä osa monen arkipäiväistä elämää. Erilaisten kuljetusvälineiden avulla liikutellaan paitsi ihmisiä, myös tavaraa. Liikkuminen voi tapahtua maalla, merellä tai ilmassa, ja ympäristön olosuhteet tuovatkin tyypillisesti omat haasteensa energiatehokkuuden kehittämiseksi. Liikkumisen ja kuljettamisen on arvioitu tuottavan jopa 27 % maailman hiilidioksidipäästöistä, ja ratkaisuksi on esitetty mm. liikenteen sähköistämistä. (Sulaiman 2020, 1.)

Pyörällisiin ajoneuvoihin, kuten henkilö- ja kuorma-autoihin, busseihin sekä juniin vaikuttaa tyypillisesti liikevastuksia vierintä- sekä ilmanvastuksen osalta. Tätä on havainnollistettu alla olevassa yhtälössä (Carroll 2020, 3–4).

$$W = F * s \tag{4}$$

Yhtälö 4, jossa  $W$  on liikevastuksien tekemä työ,  $F$  liikettä vastustava voima ja  $s$  liikevastuksien vaikutusmatka (Carroll 2020, 3–4).



Vierintävastuksen aiheuttama voima on verrannollinen ajoneuvon painoon, ja se johtuu renkaiden ja niiden alustan välisestä vuorovaikutuksesta. Tämän perusteella voidaan todeta, että vierintävastuksen merkitys korostuu raskaampien ajoneuvojen, kuten rekkojen tapauksessa, ja vierintävastuksen vaikutusta voidaankin ehkäistä pitämällä renkaiden ilmanpaine tarpeeksi korkealla. Ilmanvastus puolestaan on yleisesti kevyempiin ajoneuvoihin suuremmin vaikuttava liikevastus, ja sen vaikutus on verrannollinen ajoneuvon nopeuden neliöön. Junien tapauksessa ilmanvastusta voidaan pitää jopa merkityksettömänä, ja liikevastukset koostuvat lähinnä vierintävastuksista. Keskeistä ilmanvastuksen pienentämiseksi onkin kappaleen muoto: Täysin pallomaiset tai tasaiset muodot kasvattavat ilmanvastusta, ja optimaalisena muotona voidaan pitää pisaramaista sivuprofiilia. Erityisesti henkilöautojen muotoilussa korostuu usein kaareva etu- sekä takaosa, mutta ideaalitulanteeseen on käytännössä mahdoton päästä käytännön tekijöiden, kuten ajettavuuden ja ulkonäön takia. (Carroll 2020, 1–50.)

Liikevastuksien kokonaisvaikutusta voidaan arvioida johtamalla yhtälöiden 1, 3 ja 4 perusteella yhtälö pyörällisen ajoneuvon kokonaisenergiatehokkuudelle, käyttäen apuna Carrollin (2020, 50) mallia ajoneuvon teholle:

$$\eta = \frac{E_{\text{in}} - \frac{(F_{\text{vierintä}} + F_{\text{ilma}}) * s}{\eta_{\text{moottori}}}}{E_{\text{in}}} \quad (5)$$

Yhtälö 5, jossa  $F_{\text{vierintä}}$  ja  $F_{\text{ilma}}$  ovat vierintä- ja ilmanvastuksen aiheuttamat liikevastukset, ja  $\eta_{\text{moottori}}$  ajoneuvon moottorin ja tehonsiirron energiatehokkuus.

Koska pyörälliset ajoneuvot ovat kuitenkin yleensä tarkoitettu täyttämään eritapaisia tarpeita, ei vertailu raajan energiatehokkuuden suhteen ole välttämättä johdonmukaista. Erityisesti yksityisajoneuvojen käyttö johtaa suurissa kaupungeissa usein ruuhkien syntyyn, liikkuvuuden huononemiseen ja päästöjen kasvuun, teoreettisesta energiatehokkuudesta huolimatta (Sulaiman 2020, 3). Tästä johtuen energiankäyttöä, tai tässä tapauksessa usein polttoaineenkulutusta, voikin olla kannattavaa verrata esimerkiksi matkustajakilometreihin tai kuljetettuun kuormaan. Tätä kuvaava yhtälö ottaa paremmin huomioon mm. julkisen liikenteen merkityksen kuljetusvälineen käytön energiantensiteetin kannalta. (Patterson 1996, 381.)

$$EI_{\text{kuljetus}} = \frac{E_{\text{in}}}{\frac{S}{n}} \quad (6)$$

Yhtälö 6, jossa  $n$  on kuljetettujen matkustajien tai tavarayksiköiden määrä (Patterson 1996, 381).

Niin ikään laiva- ja lentoliikenne omaavat haasteensa liikevastuksien suhteen. Laivojen tapauksessa erityisesti rungon ympärillä liikkuva vesi aiheuttaa kitkaa, ja myös ilmanvastus pinnan yläpuolista osaa vasten heikentää energiatehokkuutta. Samoin kuin vierintävastuksen tapauksessa, veden liikevastus kasvaa laivan painon myötä. Laivojen ja veneiden liikkuminen perustuu yleensä joko sähkö- tai polttoainetoimisiin potkureihin, joiden aikaansaama virtaus antaa laivalle sen liikkeen. Potkureita voidaan hyödyntää samaan tapaan lentokoneissa, tai vaihtoehtoisesti käyttää suihkumoottoreita. Lentokoneen liikevastukset johtuvat ainoastaan ilmanvastuksesta, mutta toisaalta lentokone tarvitsee merkittävän määrän energiaa voittaakseen painonsa ja pysyäkseen ilmassa. Koska laiva- ja lentoliikenteen tarkoituksiperät ovat usein samantapaisia, muun muassa tavara- ja henkilöliikenteen osalta, on näiden energiatehokkuutta mielekästä vertailla esimerkiksi yhtälön 6 avulla. (Carroll 2020, 59–80.)

Toisaalta tyypillinen tapa ajoneuvojen ja kuljetusmuotojen vertailuun on kasvihuonekaasupäästöt. Fossiilisten polttoaineiden käyttö aiheuttaa ilmastoa lämmittävää hiilidioksidia, ja ratkaisuksi esitetäänkin usein sähköajoneuvoja. Liikenteen sähköistäminen ei kuitenkaan ole itsessään riittävä toimenpide, sillä suurin osa sähköntuotannosta tapahtuu fossiilisilla polttoaineilla. Tämän lisäksi itse ajoneuvon tuotannon aiheuttamat päästöt ovat välttämättömiä ottaa huomioon vertailtaessa sähkö- ja polttomoottoria. (Carroll 2020, 117–118.)

## 4.2 Työkoneet

Työkoneet voidaan määritellä liikuteltaviksi laitteiksi, joilla on jonkin tietyn työtehtävän suorittamiseen tähtäävä toiminto. Tämän perusteella voidaankin todeta, että työkoneelle on ominaista sen energiankulutus liikkumisen ohella myös toimintojen käyttämiseksi. Tavallisia työkoneita ovat mm. pyöräkuormaajat, kaivinkoneet, trukit, nostolaitteet sekä erilaiset ajoneuvoyhdistelmät. (Geimer 2020, 2.) Kuten esimerkeistä huomataan, voidaan

työkoneiden toimintojen keskeisenä piirteenä pitää liike-energian lisäksi potentiaalienergian hyödyntämistä (Minav et al. 2014, 2–3).

$$E_{\text{pot}} = m * g * h \quad (7)$$

Potentiaalienergia voidaan selvittää yhtälöstä 7, jossa  $m$  on kappaleen massa,  $g$  putomiskiihtyvyyden ja  $h$  kappaleen korkeus (Minav et al. 2014, 2).

Samaan tapaan kuin ajoneuvojen tapauksessa, työkoneet tarvitsevat toimiakseen voimanlähteen, yleensä poltto- tai sähkömoottorin, sekä voimansiirron. Tyypillisesti työkoneen liikkuminen toteutetaan pyörien tai telaketjujen avulla. Keskeisenä erona voimansiirto on kuitenkin toteutettava sekä työkoneen vedolle että toiminnoille. Erityisesti toimintojen voimansiirrossa hydraulikka on tyypillinen toteutustapa. (Geimer 2020, 2–103.) Hydraulikkajärjestelmä luo yhden lisäkerroksen työkoneen kokonaisenergiatehokkuuden kannalta, sillä järjestelmän toteuttamiseksi tarvittavan pumpun energiatehokkuus voi yleisimmissä tapauksissa olla alimmillaan noin 80 % tasolla, mutta toisaalta tehokkaimmillaan jopa 98 % (Minav et al. 2014, 2–3). Energiahäviöt aiheutuvat hydraulikan tapauksessa tyypillisesti virtaushäviöistä. (Geimer 2020, 103)

Toisaalta työkoneita ajoneuvoihin verrattaessa on tunnistettava niiden erilaiset käyttötarkoitukset sekä olosuhteet. On tyypillistä, että työkoneita ajetaan pienellä nopeudella, ja dieselmoottori tarjoaa hyvän väännön suhteessa tähän. Suunnittelussa on kuitenkin otettava huomioon väännön tasainen muutos moottorin kierroslukemien vaihdellessa, jotta toimintojen käyttäminen ja työkoneen tarkka operoiminen olisi mahdollista. Fossiilisten polttoaineiden sijaan myös sähkön hyödyntäminen tehonlähteenä on mahdollista, mutta tuo mukanaan haasteensa. Sähköenergian varastoimiseen käytetyt akut ovat tavallisesti painavia, ja tästä johtuvan matalan energiatihedysten takia sähkön käyttäminen on usein käytännössä vaikeaa. Ylimääräistä painoa voidaan kuitenkin pyrkiä jopa hyödyntämään, esimerkiksi pyöräkuormaajan tai trukin vastapainona, mikä jättää mahdollisuuden sähköenergian soveltamiseksi työkoneissa. (Geimer 2020, 61–67.)

Eräs tapa arvioida työkoneen energiatehokkuutta on aikaisemmin mainitun potentiaalienergian kautta. Esimerkiksi nosturien ja nostolaitteiden toiminnot perustuvat yleensä yksinomaan nostotyöhön ja siten potentiaalienergian muutokseen. (Minav et al. 2014, 2–3.)

$$\eta_{\text{nosto}} = \frac{E_{\text{pot}}}{E_{\text{in}}} \quad (8)$$

Yhtälössä 8 on kuvattu laskentamalli nostotyön energiatehokkuudelle (Minav et al. 2014, 2–3).

Kuten yhtälöstä 8 nähdään, voidaan yksittäisen noston energiatehokkuus määrittää suoraviivaisimmillaan potentiaalienergian ja käytetyn energian suhteena (Minav et al. 2014, 2). Kuitenkin tarkasteltaessa tämän lisäksi energian säilymistä ja yhtälöä 3, voidaan potentiaalienergian merkitys yhdistää itse energiasyötteeseen: Jos nostotyön energiahäviöt oletetaan merkityksettömiksi, on energiasyötteen oltava yhtä suuri lopullisen potentiaalienergian kanssa (Gavin & Ray 2020, 76). Toisaalta yhtälön 7 perusteella tämä tarkoittaa, että jos nostettavan taakan nostokorkeutta tai massaa kasvatetaan, vaaditaan vastaavasti suurempi energiasyöte (Minav et al. 2014, 2). Näin voidaankin perustella, että erityisen tärkeää nostotoiminnon energiankäytön kannalta on nostettavan taakan lisäksi nostorakenteen massa. Lisäksi huomionarvoista on myös potentiaalienergian luonne energian varastointitapana. Esimerkiksi hydraulijärjestelmä kykenee taakkaa laskettaessa hyödyntämään osan potentiaalienergiasta jarrutusjärjestelmän välityksellä. (Minav et al. 2014, 2.)

### 4.3 Teollisuuslaitteet

Teollisuuden laitteita ja laitteistoja on mahdollista jaotella monella tapaa, niin koon, käyttövoiman, operointitavan kuin tyypinkin mukaan (Kashyap 2022). Kuitenkin tämän tutkimuksen tarkastelussa teollisuuslaitteet mielletään pääasiassa valmistus- ja tuotantolaitteiksi, joista keskeisiksi nousevatkin erityisesti metalliteollisuuden työstölaitteet, mutta toisaalta myös mm. paperiteollisuus sekä jo luvussa 3 mainitut kokoonpanolaitteistot hyödyntävät koneteknisiä sovelluksia. Energiatehokkuuden yhteydessä on erityisesti tärkeää tunnistaa, miten ja missä muodossa nämä laitteet energiaa käyttävät. (Thiede 2012, 9–17.)

Teollisuuslaitteet, kuten muutkin aiemmin käsitellyt sovelluskohteet, tarvitsevat toimintaansa energiaa usein mekaanisena energiana. Tämän lisäksi kuitenkin myös lämpö on tärkeä energiamuoto. Mekaanista energiaa tuotetaan pääasiassa sähköllä, kun taas lämmön suhteen kaasu, öljy ja hiili ovat tyypillisesti käytetyimpiä. Mekaanista energiaa ja siten sähköä

tarvitaan esimerkiksi itse teollisuuslaitteiden käyttämiseen, mutta toisaalta myös esimerkiksi paineilman tuotantoon. Lämpöä taas vaaditaan tuotantolaitoksen lämmityksen lisäksi joissain prosesseissa, kuten puhdistuksessa ja kuivaamisessa. (Thiede 2012, 16–28.) Energiankäytön lisäksi on otettava huomioon erityisesti materiaalitehokkuuden merkitys valmistus- ja tuotantolaitteissa, kuten jo elinkaaren yhteydessä todettiin. Teollisuuslaite sekä erityisesti sen toteuttama valmistusprosessi vaikuttavat siihen, kuinka suuri osa materiaalisyytösteestä kyetään hyödyntämään. Esimerkiksi valamismenetelmien materiaalitehokkuus on tyypillisesti parempi verrattuna koneistusprosesseihin. (Blesl & Kessler 2021, 10–11.)

$$\eta_m = \frac{m_{\text{out}}}{m_{\text{in}}} \quad (9)$$

Yhtälössä 9 on esitetty malli materiaalitehokkuudelle, missä  $m_{\text{out}}$  on tuotoksen ja  $m_{\text{in}}$  syötteen massa (Blesl & Kessler 2021, 10–11.).

Tuotantolaitteiden tapauksessa on myös otettava huomioon, että niiden energiankulutus vaihtelee suuresti eri käyttötilojen välillä. Laitteen toimintasykli voidaan tästä syystä jakaa viiteen tilaan, jotka on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Teollisuuslaitteen käyttötilat ja energiankulutuksen luonteenpiirteet (Blesl & Kessler 2021, 13–16; Thiede 2012, 21–22).

Tila	Selite	Energiankäyttö
Off-tila	Laite on pois päältä	Laite ei kuluta energiaa
Käynnistys	Laite suorittaa mahdollisia esivalmisteluja käynnistyksen yhteydessä, kuten lämmityksen	Aiheuttaa hetkellisiä piikkejä laitteen energiankulutuksessa
Valmiustila	Laite on käyttövalmiudessa, mutta ei ole vielä aloittanut tuotantoprosessia	Tasainen, mahdollisesti pitkäkestoinen energiankulutusjakso
Asemointi	Laite kohdistaa tarvittaessa osiaan tai valmisteleo toimintojaan varsinaista prosessointia varten	Kohonnut tai piikkimäinen energiankulutus
Prosessointi	Laite suorittaa varsinaisen prosessinsa	Laite kuluttaa energiaa varsinaisen prosessin suorittamista varten, energiankulutuksen suuruus riippuu prosessista

Taulukossa 1 esitetyistä vaiheista erityisesti valmiustila voidaan nähdä joissain määrin tarpeettomana. Valmiustilassa laite kuluttaa energiaa tuottamatta mitään, eikä valmiustilaa varsinaisesti tarvita muita tiloja varten. Kotitalouksien energiankulutuksen yhteydessä erilaisten laitteiden turhaa valmiustilassa pitämistä suositellaan karsimaan, mutta teollisuuslaitteiden yhteydessä tämä näkökulma otetaan huomioon harvemmin. Erityisesti suunniteltuja taukojaksoja ajoittaessa olisi tärkeää pyrkiä minimoimaan valmiustilan tarve, sekä toisaalta maksimoimaan varsinainen prosessoinnin määrä. On myös syytä arvioida, onko laite järkevämpää siirtää off-tilaan pidempien taukojaksojen, kuten huoltoseisakkien ja työntekijöiden vapaiden ajaksi siitäkkin huolimatta, että uudelleenkäynnistys luo hetkellisesti kasvaneen energiankulutuksen. Valmistus- ja tuotantolaitteille voidaan johtaa yhtälön 2 perusteella energiantensiteetti, joka ottaa huomioon laitteen kaikkien käyttötilojen energiankulutuksen suhteessa tuotokseen. (Blesl & Kessler 2021, 13–16.)

$$EI = \frac{E_{in}}{m_{out}} \quad (10)$$

Yhtälö 10 valmistus- ja tuotantolaitteiden energiantensiteetille. Massan sijaan energiankulutusta on mahdollista verrata myös muuhun tuotettuun yksikköön, kuten kokoonpanolaitteen kokoamien tuotteiden kappalemäärään. (Blesl & Kessler 2021, 11; Pérez-Lombard et al. 2012, 242.)

Voidaankin havaita, että teollisuuslaitteen kokonaisenergiatehokkuus määräytyy energiansekä materiaalinkäytön yhteisvaikutuksesta. Yhtälössä 10 määritetty teollisuuslaitteen energiantensiteetti ottaa kuitenkin huomioon ainoastaan energiankulutuksen, jonka takia kokonaisvaltaisemman energiatehokkuuden arvoimiseksi on johdettava yhtälöiden 9 ja 10 perusteella tarkempi laskentamalli.

$$EI = \frac{E_{in}}{\eta_m * m_{in}} \quad (11)$$

Yhtälö 11 kuvaa laajennettua teollisuuslaitteen energiantensiteettiä, jossa  $\eta_m$  on laitteen käytönaikainen materiaalitehokkuus. On kuitenkin syytä ottaa huomioon, että kaikki tuotantolaitteet eivät hyödy materiaalitehokkuuden tarkastelusta yhtäläisesti. Esimerkiksi sintrauksen n. 95 % materiaalitehokkuus vaikuttaa lopulliseen energiantensiteettiin merkittävästi vähemmän kuin koneistusprosessien 40–50 %. Lisäksi mm. kokoonpanolaitteiden

tapauksessa materiaalihävikki voi olla jopa lähes merkityksetöntä energiaintensiteetin kannalta. (Blesl & Kessler 2021, 10–11)

## 5 Mittaaminen

Aikaisemmissa luvuissa on määritetty mitä energiatehokkuus on, sekä miten sitä voidaan teoriassa arvioida erilaisissa sovelluskohteissa ja elinkaaren vaiheissa. Näiden teoreettisten periaatteiden hyödyntäminen käytännön tasolla vaatii kuitenkin lukuarvoja indikaattoreille. Tämän takia tarvitaan energiatehokkuuden mittaamista.

Mittaamista voidaan jaotella mm. suoraan ja epäsuoraan mittaamiseen. Suora mittaus vertaa tulosta ennalta määritettyyn asteikkoon tai kalibrointiin, ja tulos on siten suoraan luettavissa mittalaitteesta. Yksinkertaisimmillaan tämä voi tarkoittaa pituuden mittaamista viivoittimella, mutta käsiteltävän aihepiirin tapauksessa myös esimerkiksi voiman mittaamista. Epäsuora mittaus puolestaan hyödyntää suoria mittaustuloksia, ja tuottaa näiden perusteella laskennallisia, uusia mittaustuloksia. (Kaya et al. 2021, 87–91.)

### 5.1 Anturit ja mittalaitteet

Tavallinen tapa energian mittaamiseen on sähköenergian tai -tehon mittaaminen. Sähköenergiamittari, tai lyhyemmin sähkömittari, mittaa sähköenergiaa kilowattitunneissa. Koneteknisten sovelluskohteiden tapauksessa sähköenergian mittaaminen onkin olennaista erityisesti sähkönkulutuksen arvioinnissa. Toinen tavallinen tapa mitata energiankulutusta on epäsuorasti polttoaineenkulutuksen kautta, hyödyntämällä virtaus- tai tilavuusmittauksia. Virtausmittarin mittaama virtausnopeus kuvaa, kuinka suuri määrä nestettä tai kaasua mittauskohdan ohi kulkee aikayksikössä. Virtausta voidaan kuvata tilavuus- tai massavirtana, ja mittalaitteita on olemassa lukuisia erilaisia. Virtausmittausta voitaisiin soveltaa esimerkiksi hetkellisen polttoaineenkulutuksen seurannassa ajoneuvossa, kun taas pidemmän aikavälin mittaukseen voi olla syytä hyödyntää polttoainesäiliön tilavuusmittausta, joko epäsuorasti virtauksien perusteella laskettuna tai pinnanmittauksella. (Kaya et al. 2021, 92–160.)

Koska myös tuotoksen arvioiminen on olennaista energiatehokkuuden kannalta, voidaan mitata myös esimerkiksi moottorin kierrosnopeutta, tai tämän perusteella epäsuorasti ajoneuvon nopeutta. Toisaalta myös voiman mittaaminen on tavallinen mittausprosessi, ja eräs tapa tämän hyödyntämiseen on esimerkiksi massan mittaaminen epäsuorasti voiman sekä



putoamiskiihtyvyyden perusteella. Kuten jo aikaisemmissa luvuissa on havaittu, massan huomioon ottamista voidaan pitää olennaisena tekijänä monella tapaa energiatehokkuuden kannalta, esimerkiksi materiaalitehokkuuden yhteydessä. (Kaya et al. 2021, 132–175.)

## 5.2 Mittausjärjestelmät ja simulointi

Mittalaitteita ja antureita voidaan tarvittaessa kytkeä konkreettiseksi mittausjärjestelmäksi. Tällaisten järjestelmien tapauksessa on kuitenkin otettava huomioon joitakin ominaispiirteitä, jotka voivat vaikuttaa mittaustulokseen. Mittaustulokseen sisältyy tyypillisesti virhe, eikä virhettä käytännössä ole mahdollista saada kokonaan poistettua. Sen sijaan virheen suuruus tulee pitää hyväksyttävällä tasolla, jotta järjestelmän ulkoinen tarkkuus olisi mahdollisimman hyvä. Toisaalta myös järjestelmän sisäinen tarkkuus vaikuttaa mittaustuloksen oikeellisuuteen. Perättäisten mittaustuloksien suuri hajonta aiheuttaa tarpeen lopullisen tuloksen arvioimiseen. Tarkkuus tulisikin ottaa huomioon mittausjärjestelmää suunniteltaessa, jotta mittauspölkkeämien tunnistaminen olisi mahdollista, esimerkiksi sähköenergian kulutusta seuraavan järjestelmän kulutuspiikkien tapauksessa. (Kaya et al. 2021, 89–91; Yin et al. 2022, 4.)

Perinteisemmän mittausteknologian lisäksi modernit innovaatiot luovat mahdollisuuksia energiatehokkuuden arvioimiseksi. Tuotantolaitteet ja -laitokset voivat hyödyntää esimerkiksi IoT-pohjaisia (Internet of Things) ratkaisuja, kuten älykkäitä mittalaitteita, jotka kykenevät mittaamaan samanaikaisesti useita parametreja, tai RFID-tunnisteita (Radio Frequency IDentification) tavaravirtojen seuraamiseen. Tämänkaltaisen järjestelmän keskinäinen viestintä kyetään toteuttamaan tarvittaessa myös langattomasti. (Wang et al. 2018, 364–365.) Myös energiatehokkuuden ennustaminen sekä simuloiminen on mahdollista, niin käytön kuin elinkaaren osalta kokonaisuudessaan, mutta tämä edellyttää tyypillisesti tarkempaa informaatiota arvioitavan sovelluskohteen parametreista (Bajpai, Fernandes & Tiwari 2018, 301; Sun et al. 2020, 2–5).

## 6 Tulokset

Tutkimuksen tuloksena on kertynyt laaja-alaista informaatiota energiatehokkuudesta kone-tekniisten sovelluskohteiden näkökulmasta, niin elinkaaren, sovelluskohteiden kuin energiatehokkuuden konkreettisen arvioinninkin osalta. Tämän lisäksi lähdeaineistojen perusteella on muodostettu myös laskentamalleja energiatehokkuuden arvioimiseksi. Tässä luvussa käsitelläänkin tiivistetysti kirjallisuustutkimuksen keskeinen sisältö, sekä näistä johdettavat peruseriaatteet energiatehokkuuden elinkaariarvioinnille.

### 6.1 Tuotettu uusi tieto

Tutkimuksen tavoitteena oli jäsentää jo olemassa olevaa tietoa läpileikkaavaksi katsaukseksi energiatehokkuudesta konetekniikan näkökulmasta. Konetekniisten sovelluskohteiden energiatehokkuuden indikaattoreiksi määritettiin energiankulutus, materiaalin kulutus, käyttöikä sekä päästöt. Elinkaarta tarkasteltaessa havaittiin, että energiatehokkuuden lisäksi energiaintensiteetillä voidaan hyvin vertailla sovelluskohteiden energiankulutusta, ja toisaalta teknisen käyttöiän sekä sen ylläpitämisen huoltamalla todettiin olevan merkittävä tekijä elinkaaren kokonaisenergiatehokkuuden kannalta. Myös kierrätettävyyys ja uusiokäyttö voitiin nähdä olennaisena energiankäytön minimoimiseksi. Elinkaaren lisäksi tavallisimmille sovelluskohteille johdettiin periaatteita energiatehokkuuden arvioimiseksi, ja sivuttiin myös sitä, kuinka energiatehokkuutta voidaan käytännön sovelluksissa mitata.

Tutkimuksessa esiteltyjen periaatteiden sekä laskentamallien perusteella on mahdollista johdattaa yleistason esitys konetekniisen sovelluskohteen elinkaaren energiaintensiteetille. Keskeistä on myös ottaa huomioon sovelluskohteen tekninen käyttöikä, sillä erityisesti valmistuksen energiankulutusta voidaan näin vertailla paremmin sovelluskohteiden välillä.

$$EI_{\text{elinkaari}} = \frac{EI_{\text{mv}} + EI_{\text{lv}} + EI_{\text{käyttö}}}{L} \quad (12)$$

Yhtälö 12 kuvaa elinkaaren energiaintensiteettiä, jossa  $EI_{\text{mv}}$  on sovelluskohteen materiaali-valmistuksen,  $EI_{\text{lv}}$  lopputuotevalmistuksen ja  $EI_{\text{käyttö}}$  käytönaikainen energiaintensiteetti,

sekä  $L$  tekninen käyttöikä. Huollon voidaan olettaa vaikuttavan sekä käytönaikaiseen energiantensiteettiin, että käyttöikään, ja toisaalta uusiokäytetyillä sekä kierrätetyillä materiaaleilla voidaan pyrkiä pienentämään valmistuksen energiankulutusta. Mallia voitaisiin myös soveltaa vastaamaan tarkemmin jotakin tiettyä sovelluskohdetta, esimerkiksi aikaisemmin määritettyjen yhtälöiden avulla (Yhtälöt 6, 8 ja 11). (Sun et al. 2020, 2–3.)

## 6.2 Konkreettiset sovellukset

Energiatehokkuuden peruseriaatteiden laajuuden ansiosta tutkimuksen keskeinen sisältö on suurelta osin sovellettavissa, niin koneteknisissä kuin muissakin teknisissä sovelluksissa. Kuitenkin tässä tutkimuksessa käsiteltyjen koneteknisten sovelluskohteiden kannalta keskeiseksi konkreettiseksi sovellukseksi nousee tutkimuksessa määritettyjen indikaattorien yhdistäminen mittauslaitteisiin ja -järjestelmiin. Näitä periaatteita mukailemalla saadaan perusta mahdolliselle energiatehokkuuden seurantajärjestelmälle.

Sähkön sekä erilaisten polttoaineiden havaittiin toimivan keskeisenä käyttövoimana aktiivisille sovelluskohteille. Toisaalta havaittiin myös, että polttoaineen tai sähkön kulutus on mahdollista rinnastaa energiasyötteeseen yleisesti, joka luo käyttötarkoituksen sähkö- sekä virtausmittareille. Prosessin tuotoksen mittaaminen puolestaan riippuu pitkälti arvioitavasta sovelluskohteesta, ja tämän mukaan on valittava tarkoituksenmukainen mitattava suure, esimerkiksi moottorin kierrosnopeus tai tuotetun tuotemäärän massa. Mittauksien aikaväliä tihentämällä on mahdollista luoda käytännössä reaaliaikainen järjestelmä energiatehokkuuden seurantaan, ja periaatteita olisi mahdollista laajentaa käytön lisäksi myös muille elinkaaren osa-alueille.

## 7 Tulosten analysointi

Tutkimuksen yleistasoisuudesta johtuen saadut tulokset vaativat tarkempaa analysointia hyödyntämiseen. Erityisesti periaatteiden konkreettinen soveltaminen voi olla haastavaa yksin tämän tutkimuksen perusteella, minkä takia tässä luvussa esitetään pohdintaa tutkimuksen hyödyntämisestä koneteknisiä sovelluksia valmistavissa yrityksissä, sekä toisaalta ehdotuksia jatkotutkimukselle. Lisäksi tuloksia arvioidaan uutuusarvon, reliabiliteetin sekä validiteetin osalta.

### 7.1 Pohdinta

Kuten tutkimuksessa on todettu, energiatehokkuus on monisyinen aihealue, ja sen kehittäminen vaatii sovelluskohteiden käyttäjältä sekä valmistajalta monien erilaisten näkökulmien huomioon ottamista. Tämän tutkimuksen tuloksien periaatteita noudattamalla on kuitenkin mahdollista pureutua energiatehokkuuden kehitystyöhön johdonmukaisesti ja systemaattisesti. Tässä alaluvussa pohditaankin, kuinka mahdollinen koneteknisiä sovelluskohteita valmistava yritys voisi tutkimuksen tuloksia hyödyntää.

Tyypillinen tapa ajatella sovelluskohteen tuotekehitystä on sen käytönaikaisten ominaisuuksien kautta. Suunnittelijan tulisi pyrkiä ottamaan huomioon mahdollisimman laajasti erilaisen liikevastuun vaikutus, energiankulutus sekä käyttöikänsä laskevasti vaikuttavat tekijät. Tuotekehityksen vaikutukset ulottuvat kuitenkin myös muihin elinkaaren vaiheisiin, ja esimerkiksi materiaalivalintoja, huollettavuutta sekä kierrätettävyyttä on syytä arvioida osana suunnitteluprosessia. Toisaalta myös tuotannonkehityksellä on tärkeä rooli energiatehokkuuden kannalta. Valmistavan yrityksen tulisi optimoida tuotantoprosessinsa niin, että energian ja materiaalin kulutus olisi mahdollisimman vähäistä yksittäistä tuotetta kohden, sekä pyrkiä käyttämään kierrätysmateriaaleja soveltuvilta osin. Tuotantoprosessista riippuen energiankulutusta voi olla perusteltua mitata myös päästöjen kautta.

Energiatehokkuuden huomioon ottamisella tämän tutkimuksen mukaisesti voidaan olettaa olevan myös käytännön hyötyjä. Vaikka yritykset pyrkivät kasvavissa määrin ympäristöystävällisyyteen ja vastuullisuuteen, ovat taloudelliset intressit yhä keskeisessä osassa

päätöksentekoa. Tuotannon energiatehokkuudella voidaankin katsoa olevan suora yhteys energiankulutukseen, ja siten tuotantokustannuksiin. Samoin voidaan olettaa materiaalitehokkuuden osalta. Välittömien kustannusten karsimisen lisäksi energiatehokkaiden soveluskohteiden tuottaminen voi tuoda mukanaan myös muita etuja. Kuluttajien tietoisuus ympäristöön ja vastuullisuuteen liittyen on kasvanut viime aikoina merkittävästi, ja lopputuotteen kestävyydellä sekä pienellä energiankulutuksella voidaan olettaa olevan painoarvoa muutenkin kuin käyttökustannuksien osalta.

## 7.2 Reliabiliteetti ja validiteetti

Tutkimuksen reliabiliteettia arvioitaessa on kiinnitettävä huomiota erityisesti lähdeaineistojen julkaisualustojen luotettavuuteen sekä monipuolisuuteen. Kirjallisuustutkimuksessa on hyödynnetty 35:tä lähdetä, joiden joukossa on niin kirjallisuutta, tieteellisiä artikkeleita kuin yritysten julkaisujakin. Tieteellisten artikkeleiden osalta suurin osa on merkitty vertaisarvioiduksi, jonka voidaan nähdä puoltavan artikkeleiden paikkansapitävyyttä. Lisäksi tutkimuksen peruseriaatteiden johtamiseen käytetyillä artikkeleilla on Scopus-tietokannan mukaan viittauksia joistakin kymmenistä aina useisiin satoihin asti. Jotkin artikkelit ovat kuitenkin huomattavasti vähemmän viitattuja, ja kahdelle artikkelille ei Scopus-tietokannasta löytynyt lainkaan viittauksia. Näidenkin artikkeleiden julkaisualustat ovat kuitenkin verraten luotettavia. Arvioitaessa vaikuttavuutta SJR-indikaattorilla, suurin osa aineistojen julkaisualustoista saavutti yli yhden pisteen, ja vain yhden julkaisun pisteet alittivat arvon 0,5. Tutkimuksen yleistasoisuudesta sekä runsaasta lähdeaineiston määrästä johtuen heikkojen lähteiden vaikutuksen voidaankin katsoa olevan pienehkö, ja monipuolinen lähteiden käyttö puoltaa tutkimuksen objektiivisuutta.

Tutkimuksen validiteettia voidaan puolestaan arvioida vertailemalla lähteiden sisältöjä keskenään. Liitteessä 1 on taulukoitu tutkimuksessa käytetyt lähteet, sekä niiden sisällön soveltuvuus tutkimukseen. Soveltuvuus-kriteerit on määritetty tutkimuksen aihealueiden mukaan. Taulukon perusteella voidaan todeta, että lähteitä on käytetty tutkimuksessa hyvin niiden soveltuvuuden perusteella, ja tutkimuksen osa-alueita varten on kyetty muodostamaan kattava tietopohja. Toisaalta on kuitenkin otettava huomioon, että esimerkiksi huoltoon, käyttöikään ja kierrätettävyyteen liittyviä lähteitä on määrällisesti vähemmän, ja jatkotutkimuksen keskittäminen näihin teemoihin voisi olla perusteltua.

### 7.3 Tulosten uutuusarvo

Kuten tuloksia tarkasteltaessa todettiin, tutkimuksen pääasiallinen tavoite oli luoda yleiskuvaa energiatehokkuuden ulottuvuuksista konetekniikan yhteydessä. Jo tämän perusteella voidaan arvioida, että yksittäiset havainnot eivät ole tiedeyhteisölle suoranaisesti uusia, ja suurin hyöty niistä on ennestään aiheeseen perehtymättömälle sekä tutkimuksen tekijälle. Aineistoja yhdistelemällä ja analysoimalla on kuitenkin kyetty tuottamaan johdonmukaisesti etenevä ja läpileikkaava tutkimus, joka voi mahdollisesti esittää uusia näkökulmia energiatehokkuudesta myös tietopohjaltaan edistyneemmälle lukijalle. Tätä puoltaa lisäksi se, että yleistasoista tutkimusta aihepiiristä on ennestään vähän, ja aikaisempi tutkimus on keskittynyt pääasiassa yksityiskohtaisempiin tarkastelunäkökulmiin.

### 7.4 Jatkotutkimusaiheet

Tutkimus on osaltaan havainnollistanut hyvin käsiteltyjen aihealueiden laajuutta, niin energiatehokkuuden kuin koneteknisten sovelluskohteidenkin osalta. Aiheisiin on kyetty tutustumaan vain hyvin yleistasoisesti, mikä avaa runsaasti mahdollisuuksia jatkotutkimukselle. Itsestään selviä aiheita voisivatkin olla muun muassa elinkaaren vaiheiden sekä yksittäisten sovelluskohteiden energiatehokkuuden tarkempi tutkiminen. Tutkimusta voitaisiin jatkaa määrittämällä tarkempia laskentamalleja energiatehokkuudelle, tai selvittämällä nykytilaa tilastojen avulla.

Toisaalta tutkimus ei ota juurikaan kantaa energiatehokkuuteen teknisten ulottuvuuksien ulkopuolelta. Erityisesti taloudelliset ja yhteiskunnalliset tekijät liittyvät kuitenkin vahvasti energiatehokkuuteen, ja voisi olla perusteltua tutkia, minkälaisia rahallisia säästöjä tai myönteisiä ympäristövaikutuksia energiatehokkuuden kehittämällä voitaisiin saada aikaan. Lisäksi voitaisiin myös selvittää, aiheuttaako parantunut energiatehokkuus oikeasti energiankäytön laskua, vai johtavatko matalammat kustannukset lopulta aikaisempaa suurempaan energiankulutukseen.

## 8 Yhteenveto

Tässä kirjallisuustutkimuksessa perehdyttiin energiatehokkuuteen koneteknisten sovellusten näkökulmasta, ja keskeiseksi nousivat erityisesti aktiiviset sovelluskohteet. Aihepiiriin liittyvät käsitteet avattiin, ja energiatehokkuuden arvioimiseksi määritettiin neljä indikaattoria: energiankulutus, materiaalin kulutus, käyttöikä sekä päästöt. Näitä indikaattoreita sovellettiin sovelluskohteen elinkaaren vaiheisiin. Tämän jälkeen käsiteltiin yleistasoisesti tavallisia koneteknisiä sovelluskohteita, ja määritettiin indikaattoreiden perusteella laskentamalleja näiden arvioimiseksi. Lopuksi tutkittiin, millaisilla laitteilla energiatehokkuutta on mahdollista mitata käytännössä.

Tutkimuksen tuloksena saavutettiin kattava läpileikkaus aiheesta, josta yleistason tutkimusta on verraten vähän löydettävissä. Lisäksi tuloksena saatiin laskentamalli sovelluskohteen elinkaaren kokonaisenergiatehokkuuden arvioimiseksi. Keskeisenä konkreettisenä sovelluksena nähtiin mahdollisuus indikaattoreiden ja mittalaitteiden yhdistämiseen, reaaliaikaisen energiatehokkuuden seurantajärjestelmän aikaansaamiseksi. Tuloksien perusteella esitettiin toimenpidesuosituksia koneteknisiä sovelluskohteita valmistaville yrityksille, sekä pohdittiin, minkälaisia hyötyjä energiatehokkuuden huomioon ottaminen voisi tuoda mukanaan. Lopuksi tarkasteltiin mahdollisia jatkotutkimusaiheita, joita todettiin olevan runsaasti, myös teknisten tarkastelukulmien ulkopuolella.

## Lähteet

- Bajpai, A., Fernandes, K. J. & Tiwari, M. K. 2018. Modeling, analysis, and improvement of integrated productivity and energy consumption in a serial manufacturing system. *Journal of Cleaner Production* 199: 296-304.
- Bijen, J. 2003. *Durability of Engineering Structures Design, Repair and Maintenance*. Burlington: Elsevier Science.
- Blesl, M. & Kessler, A. 2021. *Energy Efficiency in Industry*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg.
- BMW Group Vehicle Production. [Verkkoaineisto]. Viitattu [21.3.2022]. Saatavissa: <https://www.bmwgroup-werke.com/en/produktion/vehicle-production.html>.
- Borrion, A., Black, M. J. & Mwabonje, O. 2021. *Life Cycle Assessment: A Metric for the Circular Economy*. Cambridge: Royal Society of Chemistry.
- Carroll, D. 2020. *Energy Efficiency of Vehicles*. Warrendale: SAE International.
- Duflou, J. R., Sutherland, J. W., Dornfeld, D., Herrmann, C., Jeswiet, J., Kara, S., Hauschild, M. & Kellens, K. 2012. Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. *CIRP Annals* 61(2): 587-609.
- European comission Energy Efficiency Targets. [Verkkoaineisto]. Viitattu [13.4.2022]. Saatavissa: [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-targets\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-targets_en).
- Fawkes, S. 2013. *Energy Efficiency: The Definitive Guide to the Cheapest, Cleanest, Fastest Source of Energy*. Farnham: Routledge.
- Gavin, T. & Ray, S. 2020. *Chemical Engineering Design*. Kidlington: Elsevier.
- Geimer, M. 2020. *Mobile Working Machines*. Warrendale: SAE.
- Hartini, S., Ciptomulyono, U., Anityasari, M. & Sriyanto 2020. Manufacturing sustainability assessment using a lean manufacturing tool. *International Journal of Lean Six Sigma* 11(5): 957-985.
- HYBRIT Research Project 1. [Verkkoaineisto]. Viitattu [14.4.2022]. Saatavissa: <https://www.hybritdevelopment.se/en/research-project-1/>.
- Kanoğlu, M., Çengel, Y. A. & Dinçer, İ 2012. *Efficiency Evaluation of Energy Systems*. New York, NY: Springer New York.
- Kashyap, S. Wide Classification of Industrial Manufacturing Equipment? Or Industrial Machinery?. [Verkkoaineisto]. Viitattu [29.3.2022]. Saatavissa: <https://analyseameter.com/2020/01/industrial-machines.html>.



- Kaya, D., Çanka Kılıç, F. & Öztürk, H. H. 2021. Energy Management and Energy Efficiency in Industry : Practical Examples. Cham: Springer International Publishing AG.
- Kim, S. & Kim, S. 2020. Framework for Designing Sustainable Structures through Steel Beam Reuse. *Sustainability (Basel, Switzerland)* 12(22): 9494.
- Klöpffer, W. & Grahl, B. 2014. Life Cycle Assessment : A Guide to Best Practice. Weinheim an der Bergstrasse, Germany: Wiley-VCH.
- Li, S., Wang, W., Diao, H. & Wang, L. 2022. Measuring the Efficiency of Energy and Carbon Emissions: A Review of Definitions, Models, and Input-Output Variables. *Energies (Basel)* 15(962): 962.
- Metallinjalostajat ry 2014. Teräskirja. Bookwell Oy.
- Minav, T. A., Schimmel, T., Murashko, K., Murashko, R., Pyrhönen, J. J. & Pietola, M. 2014. Towards a better energy efficiency through a systems approach in an industrial forklift.
- Mobley, R. K. 2004. Maintenance Fundamentals. Amsterdam: Elsevier/Butterworth Heine-  
mann.
- Motiva 2021. Energian Loppukäyttö. [Verkkoaineisto]. Viitattu [13.4.2022]. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto\\_suomessa/energian\\_loppukaytto](https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto_suomessa/energian_loppukaytto).
- Neale, M. J. & Gee, M. G. 2001. Guide to Wear Problems and Testing for Industry. Norwich, N.Y: William Andrew Pub.
- Patterson, M. G. 1996. What is energy efficiency?: Concepts, indicators and methodological issues. *Energy Policy* 24(5): 377-390.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J. & Velázquez, D. 2012. Revisiting energy efficiency fundamentals. *Energy Efficiency* 6(2): 239-254.
- Rossi, B. 2014. Discussion on the use of stainless steel in constructions in view of sustainability. *Thin-Walled Structures* 83: 182-189.
- Saberi, M. R., Rahai, A. R., Sanayei, M. & Vogel, R. M. 2016. Steel Bridge Service Life Prediction Using Bootstrap Method. *International Journal of Civil Engineering* 15(1): 51-61.
- SSAB 2019. From Good to Great. [Verkkoaineisto]. Viitattu [18.3.2022]. Saatavissa: <https://www.ssab.com/products/brands/strenx/customer-cases/ecougraded-tipper-trailer-chassis>.
- SSAB Käytä Parempaa Terästä: SSAB:N Asiakkaat Hyötyvät Hiilidioksiditehokkaasta Tuotannosta. [Verkkoaineisto]. Viitattu [21.3.2022]. Saatavissa: <https://www.ssab.fi/ssab-konserni/kestava-kehitys/kestavat-toiminnot/hiilidioksiditehokkuus-ssabla>.
- Sulaiman, S. A. 2020. Energy Efficiency in Mobility Systems. Singapore: Springer Singapore.

Sun, C., Wang, H., Liu, C. & Zhao, Y. 2020. Real Time Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI): Simulation Research from the Perspective of Life Cycle Assessment. *Journal of Physics.Conference Series; J.Phys.: Conf.Ser* 1626(1).

Thiede, S. 2012. Energy Efficiency in Manufacturing Systems. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Wang, W., Yang, H., Zhang, Y. & Xu, J. 2018. IoT-enabled real-time energy efficiency optimisation method for energy-intensive manufacturing enterprises. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 31(4-5): 362-379.

Yin, S., Yang, H., Xu, K., Zhu, C., Zhang, S. & Liu, G. 2022. Dynamic real-time abnormal energy consumption detection and energy efficiency optimization analysis considering uncertainty. *Applied Energy* 307.

