



## **HÄVITTÄJÄN TUTKAN KOAKSIAALISEN MIKSERIN ELINKAARITARKASTELU**

Lifecycle analysis on coaxial mixer module for a fighter radar

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2024

Jere Väisänen

Tarkastaja: Dos. Harri Eskelinen

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energiapuolijärjestelmien tiedekunta

Konetekniikka

Jere Väisänen

### **Hävittäjän tutkan koaksiaalisen mikserin elinkaaritarkastelu**

Konetekniikan kandidaatintyö

2024

38 sivua, 10 kuvaa, 2 taulukkoa ja 3 liitettä

Tarkastaja: Dos. Harri Eskelinen

Avainsanat: hävittäjä, taajuussekoitin, R5-menetelmä, elinkaaritarkastelu, kestävä kehitys

Tässä opinnäytetyössä tehdään elinkaaritarkastelu hävittäjän tutkan koaksiaaliselle mikserille. Koaksiaalinen mikseri on radiotaajuuksia käyttävä hävittäjän tutkan komponentti, joka on valmistettu useista alumiiniosista ja yleisesti saatavilla olevista standardiosista. Työn keskeinen tavoite on muodostaa kuva siitä, kuinka hyvin tuote toteuttaa kestävä kehityksen näkökulmat ja tuottaa parannusehdotuksia tuotteen ympäristöystävällisyyden lisäämiseksi.

Elinkaaritarkastelun keskeisinä työkaluina käytetään R5-menetelmää sekä tietokoneavusteista elinkaaritarkastelua. R5-menetelmä perustuu viiden re-alkuisen sanan *rethink*, *replace*, *reduce*, *reuse* ja *recover* kautta tehtävään tarkasteluun. R5-menetelmän avulla tehtyjä havaintoja tuetaan tietokoneavusteisella elinkaaritarkastelulla, jonka tekemiseen käytetään Solidworks -ohjelmistoa.

Opinnäytetyössä tehdyn elinkaaritarkastelun perusteella voidaan todeta, että tarkastellulla tuotteella on hyvät edellytykset toteuttaa kestävä kehityksen näkökulmia elinkaariajattelun näkökulmista. Työn tuloksena esitetään kaksi parannusehdotusta, jotka ovat käytetyn alumiiniseoksen vaihtaminen ja materiaalivahvuuden vähentäminen. Parannusehdotukset toteuttamalla tuotteen hiilijalanjälki voi vähentyä HX-hankkeen 64 hävittäjän kohdalla jopa 13 700 ajatun kilometrin verran.

## ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Jere Väisänen

### **Lifecycle analysis on coaxial mixer module for a fighter radar**

Bachelor's thesis

2024

38 pages, 10 figures, 2 tables and 3 appendices

Examiners: Dos. Harri Eskelinen

Keywords: fighter, mixer, R5-method, life cycle assessment, sustainable development

In this thesis, lifecycle analysis on coaxial mixer module for a fighter radar is made. Coaxial mixer module is a radio frequency component, which is manufactured from several aluminium blocks and standard parts. A key objective in this thesis is form a view how sustainable development perspectives could be applied to the product and how product friendliness to the environment can be improved.

R5-methodology and computer aided sustainability evaluation are used as tools during the life cycle analysis in this thesis. R5-methodology is based on evaluation, which is done thinking through following five words starting with *re*: *rethink*, *replace*, *reduce*, *reuse*, and *recover*. Results produced using R5-methodology are backed by computer aided sustainability evaluation which is done using Solidworks -software.

Based on life cycle analysis carried out, it can be stated that the product has good prerequisites to apply with sustainable development perspectives. As result of this thesis two proposals for improvement is produced, which are changing the used aluminium alloy and reducing material thicknesses. If proposals are implemented, it is estimated that CO<sub>2</sub>-emissions can be lowered equal to 13 700 driven kilometres in case of Finland's 64 fighter HX program.

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Kreikkalaiset

$\delta$  tunkeutumissyvyys m

### Dimensiottomat luvut

$\mu_r$  suhteellinen permeabiliteetti

$\sigma_r$  suhteellinen johtavuus

### Lyhenteet

FMCW taajuusmoduloitu jatkuva aalto (Frequency Modulated Continuous Wave)

IF välitaajuus (Intermediate Frequency)

LNA pienikohinainen vahvistin (Low Noise Amplifier)

LO paikallisoskillaattori (Local Oscillator)

MW mikroaalto (Microwave)

RF radiotaajuus (Radio Frequency)

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b>	7
1.1	Tarkasteltava komponentti	7
1.1.1	Ideaalinen taajuussekoitin	8
1.1.2	Taajuussekoitin tutkan komponenttina	8
1.2	Tutkimusongelma ja tavoitteet	10
1.3	Tutkimusmenetelmät	10
1.3.1	Rajaukset	11
1.4	Tieteellinen anti	11
<b>2</b>	<b>ELINKAARIVAIKUTUSTEN TUTKIMINEN</b>	12
2.1	Elinkaaritutkimuksen periaatteellinen rakenne	12
2.2	R-menetelmä	13
2.2.1	R5-menetelmä	14
2.3	Tietokoneavusteinen elinkaaritarkastelu	17
2.3.1	Tietokoneavusteisen tarkastelun tuottama raportti	18
2.4	Kirjallisuuden käyttö osana elinkaaritarkastelua	18
2.5	Luotettavuustarkastelu	19
<b>3</b>	<b>ELINKAARIANALYYSIN TOTEUTUS JA TULOKSET</b>	20
3.1	Tarkastelu R5-menetelmällä	20
3.1.1	Seosaineiden vähentäminen	22
3.1.2	Materiaalivahvuuden vähentäminen	23
3.1.3	Lisäävä valmistus vaihtoehtoisena valmistustapana	24
3.2	Tarkastelu tietokoneavusteisesti	26
3.2.1	Tuotteen 3D-mallinnus	26
3.2.2	Sustainability-moduulin käyttö	27
3.2.3	Tietokoneavusteisen elinkaaritarkastelun tulokset	29
<b>4</b>	<b>TULOSTEN POHDINTA</b>	30
4.1	Tutkimuksen objektiivisuus	30
4.2	Tutkimuksen reliabiliteetti ja validiteetti	30
4.3	Virhetarkastelu	31

4.4	Keskeiset johtopäätökset .....	31
4.4.1	Tutkimuskysymyksiin vastaaminen.....	32
4.5	Tulosten uutuusarvo, hyödynnettävyys ja yleistettävyys.....	33
4.6	Jatkotutkimusaiheet .....	33
<b>5</b>	<b>YHTEENVETO</b> .....	<b>34</b>
	<b>LÄHTEET</b> .....	<b>35</b>

#### Liitteet

Liite 1. Esimerkki tietokoneavusteisen elinkaaritarkastelun keskeisistä tuloksista

Liite 2. Tietokoneavusteisen elinkaaritarkastelun tulokset alkuperäiselle osalle

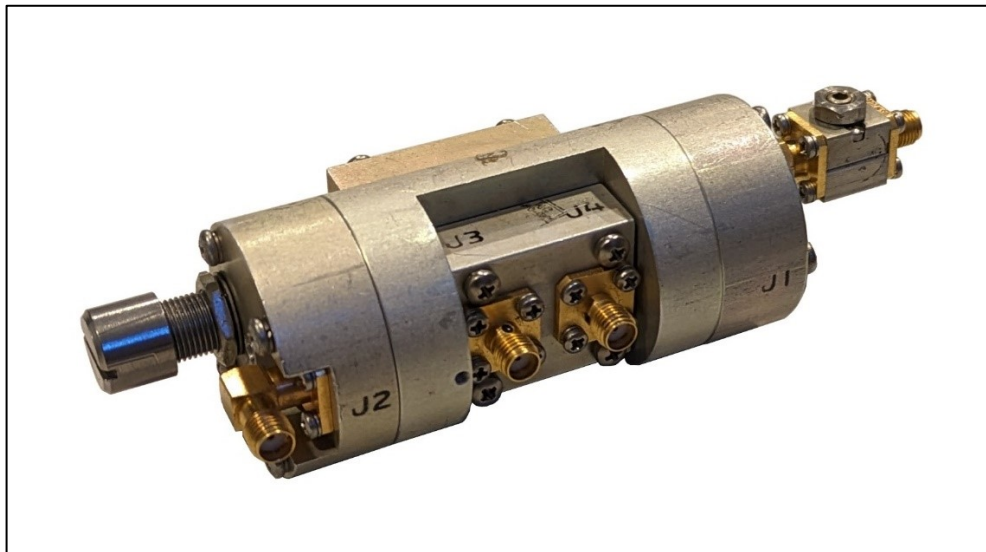
Liite 3. Tietokoneavusteisen elinkaaritarkastelun tulokset muutetulle osalle

# 1 JOHDANTO

Tässä kandidaatintyössä tehdään elinkaaritarkastelu annetulle mikroaaltokomponentille konetekniikan näkökulmasta. Elinkaaritarkastelussa tutkitaan tuotteen elinkaaren eri vaiheita kuten *valmistus* ja *käytöstä poisto*, ottaen huomioon kiertotalouden näkökulmat. Työn keskeisinä tuloksina esitetään tuotteesta arvio tarkasteltuna kestävän kehityksen näkökulmista sekä ehdotukset koneteknisistä muutoksista, joilla voitaisiin parantaa tuotteen ympäristöystävällisyyttä.

## 1.1 Tarkasteltava komponentti

Työssä tarkasteltava mikroaaltokomponentti on kuvassa 1 oleva hävittäjän tutkan koaksiaalinen mikseri.



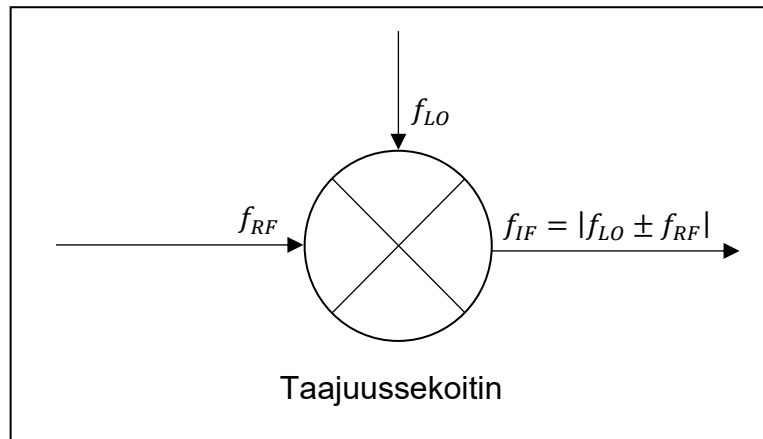
**Kuva 1.** Työssä tarkasteltava radiotaajuuskomponentti.

Koaksiaalinen mikseri on metallinen neljästä koneistetusta osasta ja useista standardiosista koostuva radiotekniikan komponentti. Mikseriä käytetään hävittäjässä tutkan signaalitiellä taajuussekoittimena ja se kytketään signaalitielle SMA-liittimillä.

Seuraavissa kappaleissa on kuvattu ideaalinen taajuussekoitin ja sen toiminta osana tutkaa. Taajuussekoittimen toimintaperiaate osana tutkaa on hyvä tiedostaa, koska se asettaa tiettyjä reunaehtoja komponentin koneteknisille ominaisuuksille.

### 1.1.1 Ideaalinen taajuussekoitin

Taajuussekoitin on merkittävä komponentti osana nykyaikaista radiotekniikkaa. Sitä käytetään tuottamaan summa tai erotus syötetyistä signaaleista, esimerkiksi kun radiosignaali halutaan siirtää alkuperäiseltä taajuudelta toiselle taajuusalueelle (Bera 2019, 555). Ideaalinen taajuussekoitin voidaan kuvata lohkokaaviossa kuvan 2 mukaisesti.



**Kuva 2.** *Ideaalinen taajuussekoitin kuvattuna lohkokaaviodiagrammilla. (Bera 2019, 556)*

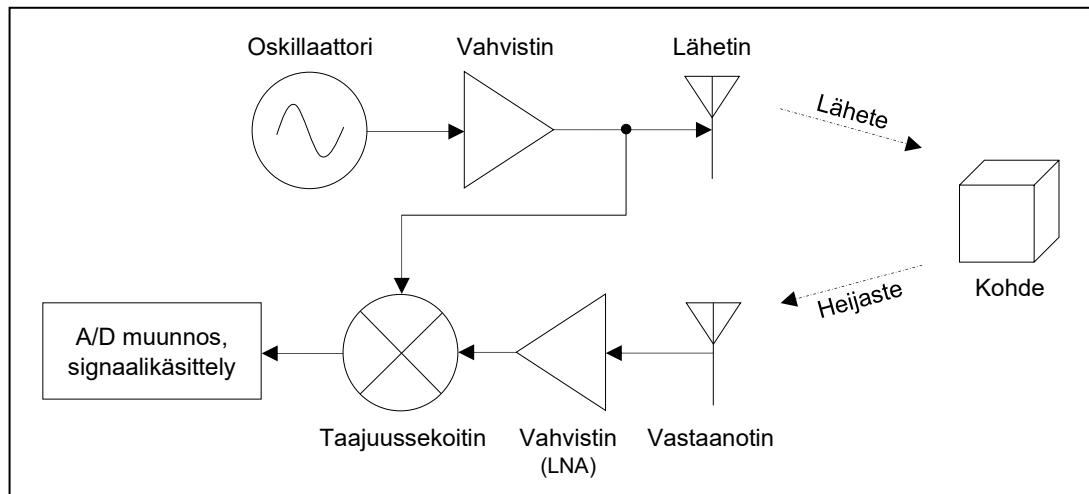
Taajuussekoittimeen voidaan esimerkiksi tuoda paikallisoskillaattorilla tuotettu signaali  $f_{LO}$  (engl. local oscillator) sekä siihen sekoitettava radiosignaali  $f_{RF}$  (engl. radio frequency). Taajuussekoitin tuottaa signaaleista  $f_{LO}$  ja  $f_{RF}$  ulostuloksi väliataajuuden  $f_{IF}$  (engl. intermediate frequency), joka on yhtä suuri kuin tuotujen signaalien summa tai erotus. (Bera 2019, 555)

### 1.1.2 Taajuussekoitin tutkan komponenttina

Tutka on laite, jolla voidaan mitata etäällä olevasta kohteesta erilaisia parametreja, kuten etäisyys, nopeus ja suunta. Tutkan toimintaperiaate perustuu siihen, että materiaali heijastaa osan siihen kohdistuneesta sähkömagneettisesta aallosta takaisin. (De Maio et al. 2016, 1-4) Nykyaikaisissa hävittäjissä käytetyt tutkatekniikat ovat ei-julkisia, joten seuraavaksi kuvataan erään yleisesti käytetyn tutkan toimintaperiaate.

Eräs tutkatyyppi on FMCW (engl. frequency modulated continuous wave), jossa kohteita tutkataan jatkuvalla taajuusmoduloidulla aallolla (Park et al. 2020, 2). FMCW-tutkan toimintaperiaate voidaan kuvata lohkokaaviodiagrammin avulla kuvan 3 mukaisesti.





**Kuva 3.** FMCW-tutkan toimintaperiaate lohkokaaviodiagrammilla kuvattuna. Mukailten (Infineon Technologies 2023; Martínez Vázquez 2021; Park et al. 2020, 3).

Tutkan toimintaperiaate voidaan lohkokaaviota mukailten yksinkertaistaa seuraavasti:

1. Oskillaattorilla tuotettu radiotaajuus signaali vahvistetaan ja lähetetään antennilla tutkattavaan suuntaan.
2. Lähetetty radiosignaali osuu tutkattavaan kohteeseen ja siitä osa heijastuu takaisin vastaanottavaan antenniin.
3. Tutkattavasta kohteesta heijastuvaa signaalia voidaan pitää heikkona. Siksi vastaanotettu heijaste tulee vahvistaa erityisellä pienikohinaisella vahvistimella (LNA, engl. low noise amplifier).
4. Taajuussekoittimella tuotetaan välitaajuus läheteestä  $f_{LO}$  ja vastaanotetusta heijasteesta  $f_{RF}$ .
5. Välitaajuus muunnetaan digitaaliseksi ja prosessoidaan tutkakuvan muodostamiseksi.

Tässä työssä mikserin sähkömagneettisella tiiveydellä ajatellaan olevan suuri merkitys. Mikäli kohina ja/tai häiriöt pääsevät vaikuttamaan heijastesignaaliin, voi tällä olla suuri vaikutus muodostettavaan tutkakuvaan. Tämä tulee ottaa huomioon tuotteessa tehtyjen valintojen ympäristöystävällisyyttä tarkasteltaessa, kuten myös mahdollisia koneteknisiä muutosehdotuksia laadittaessa.

## 1.2 Tutkimusongelma ja tavoitteet

Tässä työssä tullaan tarkastelemaan koaksiaalisen mikserin elinkaarta ja kuinka hyvin kiertotalouden periaatteet ovat sovellettavissa tälle tuotteelle. Tarkastelussa painotetaan erityisesti koneteknisten tekijöiden, kuten raaka-aineiden, valmistusprosessien ja tuotteessa käytettyjen geometrioiden arviointia.

Opinnäytetyön keskeisenä tavoitteena on esittää arvio tuotteesta kestävä kehityksen näkökulmista tarkasteltuna. Lisäksi tavoitteena on tuottaa esitys mahdollisista tavoista, joilla tuotteen ympäristöystävällisyyttä voidaan parantaa. Kun tutkimus tehdään konetekniikan näkökulmasta, voidaan elinkaaritarkastelun keskeisistä kohdista johtaa seuraavat tutkimuskysymykset:

1. Miten tuotteen materiaalia ja sen seosaineita voidaan optimoida elinkaariajattelun näkökulmasta?
2. Miten tuotteen rakennetta ja valmistusteknisiä geometrioita voidaan optimoida elinkaariajattelun näkökulmasta?
3. Millä muilla menetelmillä tuote mahdollisesti voidaan valmistaa ja onko niillä valmistaminen elinkaariajattelun näkökulmasta järkevää?

## 1.3 Tutkimusmenetelmät

Työssä tarkastellaan koaksiaalisen mikserin elinkaarta ja mahdollisuuksia kiertotalouden näkökulmien toteutumiselle käyttäen R-menetelmää. R-menetelmässä pohditaan kiertotalouden näkökulmia järjestelmällisesti erilaisten *re* -alkuisten sanojen kautta, kuten *reduce* ja *reuse* (Kirchherr et al. 2017, 223). Sanan *reduce* eli *vähentää* kohdalla voidaan pohtia Kirchherr et al. (2017) perusteella esimerkiksi sitä, että voisiko tuotteen valmistaa tehokkaammin vähentämällä esimerkiksi luonnonvarojen kulutusta.

R-menetelmällä tehdyn tarkastelun tuloksia tuetaan tässä työssä tietokoneavusteisella elinkaaritarkastelulla. Tietokoneavusteinen elinkaaritarkastelu tehdään käyttäen Solidworks -ohjelmiston sustainability-moduulia.

### 1.3.1 Rajaukset

Elinkaaritarkastelun ulkopuolelle rajataan käytön aikaiset elinkaari- ja ympäristövaikutukset. Käytön aikaiset ympäristövaikutukset tämän tuotteen kohdalla liittyvät pääasiassa hävittäjän lentotoimintaan, johon liittyvät seikat ovat ei-julkisia. Tämän vuoksi tuotteen elinkaarta tarkasteltaessa keskitytään materiaalin ja seosaineiden valmistukseen, tuotteen suunnitteluun ja valmistukseen sekä tuotteen käytöstä poistoon liittyviin tekijöihin.

### 1.4 Tieteellinen anti

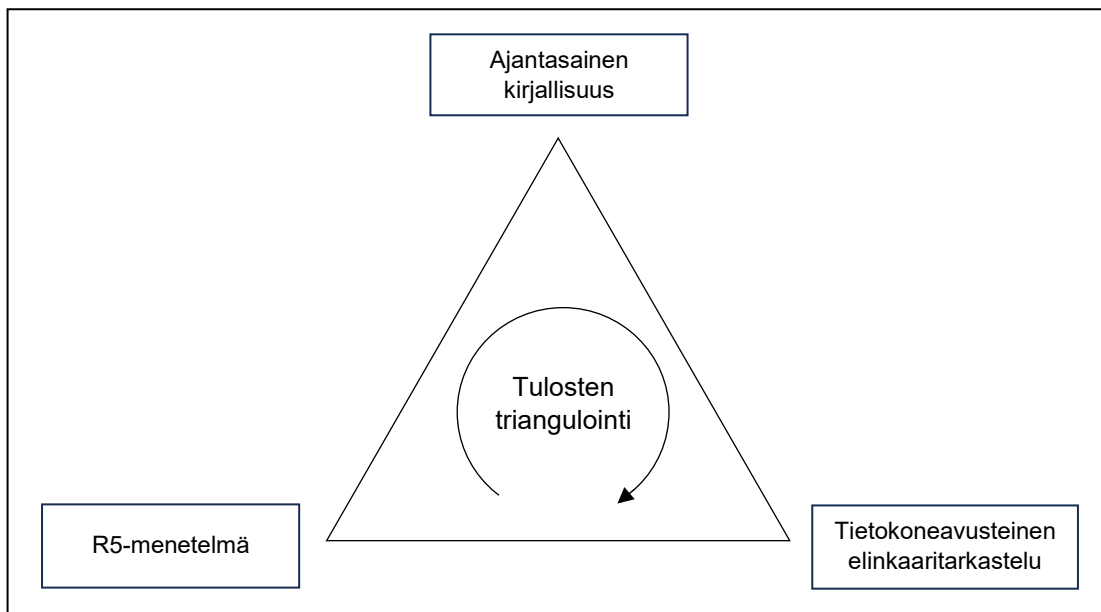
Tämä opinnäytetyö on osa laajempaa tutkimushanketta, joka toteutetaan LUT-yliopistossa vuoden 2024 aikana. Tutkimushanke liittyy yli 40 mikroaalto- ja radiotaajuuskomponentin DFMA ja kestävä kehityksen tutkimuksiin. Tämän opinnäytetyön tuloksia tullaan käyttämään myöhemmin laajemman yleiskuvan rakentamiseen liittyen mikroaalto ja radiotaajuus komponenttien DFMA ja kestävä kehityksen näkökulmiin.

Maanpuolustuskorkeakoulussa on viime vuosina julkaistu sotatieteiden opinnäytteitä, jotka liittyvät jonkin tuotteen elinkaaren tai -jakson tutkimiseen (Kilponen 2023; Sievälä 2020; Väisänen 2017). Puolustustutkimuksen vuosikirjassa 2023 julkaistiin artikkeli, joka käsittelee lisäävää valmistusta ja sitä, kuinka lisäävällä valmistuksella voitaisiin jatkaa vanhempien tuotteiden elinkaarta (Kärkäs ja Nokipii 2023, 57-59). Vastaavasti 2021 Puolustustutkimuksen vuosikirjassa julkaistiin artikkeli liittyen kokeelliseen menetelmään, jolla voidaan tarkastella materiaaleja ja rakenteita. Artikkelissa todettiin kyseisellä tarkastelumenetelmällä toteutettujen tutkimuksien tuloksia olevan jo hyödynnetty elinkaaren hallinnassa. (Jokinen et al. 2021, 50-52) Tässä opinnäytetyössä käsiteltävät aiheet liittyen elinkaariajatteluun voidaan siis mieltää ajankohtaisiksi myös sotatieteissä ja puolustustutkimuksessa.

Opinnäytetyö tuottaa saataville uutta tietoa liittyen hävittäjän tutkan koaksiaaliseen mikserin elinkaareen sekä nostaa esille mahdollisia kehityskohtia tuotteen elinkaaresta ja kestävä kehityksen näkökulmista. Tutkimuksen tuloksena tuotettavat kehitysehdotukset voivat hyödyttää tulevaisuudessa vastaavien tuotteiden suunnittelu- ja kehitysprosesseja. Lisäksi työssä käsiteltävät aiheet liittyvät vahvasti viime vuosina julkaistuihin tutkimuksiin ja tutkimuksen tuloksia tullaan käyttämään laajemmassa tutkimushankkeessa mikroaalto- ja radiotaajuuskomponenttien elinkaariin liittyen.

## 2 ELINKAARIVAIKUTUSTEN TUTKIMINEN

Annetun tuotteen elinkaarivaikutusten tutkimista lähestytään tässä työssä trianguloimalla kolmen eri menetelmän tuottamia tuloksia. Triangulointi on yksi monimenetelmällisen tutkimuksen keino. Trianguloinnilla varmistetaan, että yksittäiseen menetelmään liittyvät seikat eivät ohjaa tutkimuksen tuloksia (Gibson 2017, 14). Elinkaarivaikutusten tutkimisessa tavoitteeseen päästään trianguloimalla kolmea tutkimusmenetelmää kuvan 4 mukaisesti:



**Kuva 4.** Tutkimuksessa käytettävä triangulaatio.

### 2.1 Elinkaaritutkimuksen periaatteellinen rakenne

Tutkimuksen keskeisenä menetelmänä käytetään R-menetelmää. R-menetelmää käytetään tuotteiden arviointiin kiertotalouden näkökulmista (Skärin et al. 2022, 3) ja sen perusteella tässä työssä arvioidaan kestävä kehityksen näkökulmien täyttymistä tutkittavan tuotteen osalta. Tällä tavoin pystytään myös tunnistamaan mahdollisia ongelmakohtia tuotteen ympäristöystävällisyyden suhteen ja esittämään näiden pohjalta parannusehdotuksia tuotteen ympäristöystävällisyyden kehittämiseksi.

R-menetelmällä tehdyn tarkastelun tuloksia tuetaan tässä työssä tietokoneavusteisen elinkaaritarkastelun keinoin. Tarkastelun tulokset ja mahdolliset parannusehdotukset todennetaan 3D-mallintamalla alkuperäinen tuote sekä tekemällä alkuperäisestä 3D-mallista toinen versio, johon on toteutettu R-menetelmän kautta esille nousseet parannusehdotukset.

Tekemällä tietokoneavusteinen elinkaaritarkastelu käyttäen alkuperäistä ja muutettua 3D-mallia sekä niiden tuloksia vertailemalla voidaan mahdollisesti vahvistaa R-menetelmän tuottamia tuloksia.

Tutkimuksen viimeisenä, mutta varsin keskeisenä menetelmänä on ajantasaisen kirjallisuuden käyttö. Ajantasaisella kirjallisuudella pyritään tässä työssä varmistamaan, että työssä tehdään oikeita oletuksia elinkaaritarkastelun suhteen niin R-menetelmässä kuin tietokoneavusteisessa elinkaaritarkastelussa. Ajantasaisten kirjallisten lähteiden käyttö tarkastelussa johtaa myös parempaan tulosten oikeellisuuteen.

## 2.2 R-menetelmä

Kiertotalousajattelu juontaa juurensa 1960-luvulle, kun tuotteiden valmistuksessa haluttiin löytää tapa huomioida käytettävät materiaali- ja energiaressit. Vuonna 1969 The Coca-Cola Companylle tehtiin tutkimus liittyen yrityksen tuotteen elinkaareen. Tavoitteena oli määrittää vähiten luonnonvaroja kuluttava ja pienimmän ympäristövaikutuksen aiheuttava tapa valmistaa virvoitusjuomapulloja. (Curran 2006, 4)

Elinkaarianalyysjä tehtiin vuosina 1970–1990 aktiivisemmin monin eri tavoin. Analyysien tekoon ei kuitenkaan ollut mitään vakiintunutta tapaa, ja samasta tuotteesta tehtyjen analyysien tulokset vaihtelivat merkittävästi. (Guinée et al. 2011, 91) R-menetelmän ensimmäiset kehitysaskleet tapahtuivatkin vastaavasti 1980–1990 luvuilla (Skärin et al. 2022, 3).

R-menetelmässä elinkaaren analysointia tehdään erilaisten *re* -alkuisten sanojen kautta, kuten *reduce* ja *reuse* (Kirchherr et al. 2017, 223). Kiertotalousajatteluun ja elinkaarianalyysiin liittyvissä julkaisuissa R-menetelmässä käytettävien *re* -alkuisten sanojen määrä on vaihteleva. 1990-luvulla R-menetelmä kehittyi kolmen sanan menetelmäksi *reduce*, *reuse*, *recycle* ja myöhemmin siihen lisättiin myös *recover*, *redesign* ja *remanufacturing* (Skärin et al. 2022, 3).

Kirjallisuuteen tehdyn katsauksen perusteella R-menetelmään liittyen usein viitataan Potting et al. (2017) julkaisuun (Kirchherr et al. 2017, 224; Skärin et al. 2022, 3) ja julkaisulla onkin työn kirjoitushetkellä 1343 viittausta (Google Scholar 2024). Potting et al. (2017, 5) mukaan R-menetelmä koostuu kymmenestä *re* -alkuisesta sanasta. Seuraavassa kuvassa on kuvattu nämä kymmenen sanaa ja niiden merkitys kiertotalouden näkökulmasta tarkasteltuna.

Tuotteen älykkäämpää käyttöä ja valmistusta	<u>Refuse</u> (0. R) "kieltäytyä"	Tee tuotteesta redundantti hylkäämällä siitä ominaisuus tai tarjoamalla se huomattavasti erilaisella ratkaisulla.
	<u>Rethink</u> (1. R) "ajatella uudelleen"	Tee tuotteen käytöstä intensiivisempää esim. tuotteiden yhteiskäytöllä tai tarjoamalla monikäyttöisiä tuotteita.
	<u>Reduce</u> (2. R) "vähentää"	Lisää materiaalin käytön hyötysuhdetta valmistuksessa tai kuluta vähemmän luonnonvaroja sekä materiaalia.
Tuotteen ja sen komponenttien elinkaaren jatkaaminen	<u>Reuse</u> (3. R) "käyttää uudelleen"	Toimivan, mutta käytöstä poistetun tuotteen uudelleenkäyttö jonkun muun toimesta.
	<u>Repair</u> (4. R) "korjata"	Viallisen tuotteen korjaaminen ja huoltaminen niin, että sitä voidaan käyttää alkuperäiseen käyttötarkoitukseen.
	<u>Refurbish</u> (5. R) "kunnostaa"	Kunnostaa vanha tuote ja ehostaa se takaisin ajan tasalle.
	<u>Remanufacture</u> (6. R) "valmistaa uudelleen"	Käyttää käytöstä poistetun tuotteen osia uuden tuotteen valmistamiseen, jolla on sama käyttötarkoitus.
	<u>Repurpose</u> (7. R) "käyttää uuteen tarkoitukseen"	Käyttää käytöstä poistettua tuotetta tai sen osia uudessa tuotteessa, jolla on eri käyttötarkoitus.
Materiaalien hyödyllistä käyttämistä	<u>Recycle</u> (8. R) "kierrättää"	Kierrättää materiaalia vastaavan tai alemman materiaali-laadun saavuttamiseksi.
	<u>Recover</u> (9. R) "ottaa talteen"	Tuotteen tuhkaksi polttaminen energian talteen ottamiseksi.

**Kuva 5.** R10-menetelmän sanat kuvauksineen. Käännetty (Potting et al. 2017, 5) mukaan.

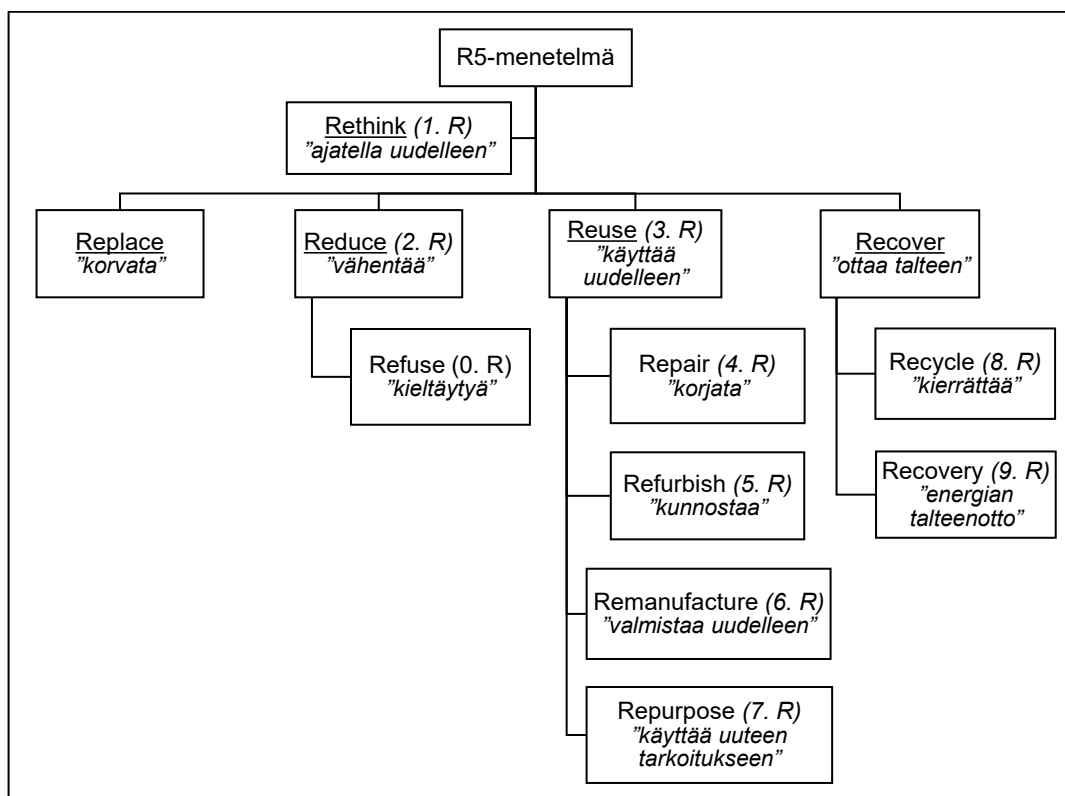
Huomattavaa on, että kymmeneen sanaan perustuvassa menetelmässä sanojen laskenta aloitetaan nolasta. Asian voi ajatella niin, että kieltäytyminen tapahtuu jo ennen kuin tuotteen elinkaari varsinaisesti alkaa.

### 2.2.1 R5-menetelmä

Potting et al. esittämässä R10-menetelmässä ei kuitenkaan kiinnitetä erityistä huomiota haitallisten ja/tai ei-uusiutuvien materiaalien käyttöön. Joissain lähteissä, kuten UNEP ja TuDelft [2006] on esitetty myös sanan *replace* käyttöä (Loomba ja Nakashima 2012, 698). Sana *replace* on suomeksi *korvata* ja sillä tarkoitetaan UNEP ja TuDelft [2006] mukaan "haitallisten yhdisteiden korvaamista enemmän ympäristöystävällisillä vaihtoehdoilla" (Loomba ja Nakashima 2012, 698). Sana on hyvä ottaa tarkasteluun mukaan, sillä

tässä työssä tehtävässä tarkastelussa painotetaan suunnittelussa tehtyjä valintoja ja sitä kautta valmistuksen aikaisia ympäristövaikutuksia. Välttämällä ei-uusiutuvien ja haitallisten yhdisteiden käyttöä jo suunnitteluvaiheessa edesautetaan kiertotalouden näkökulmien toteutumista paremmin.

Tässä työssä tehtävässä elinkaarianalyysissä käytetään R-menetelmää, jossa myös sana *korvata* on mukana. Kuvan 6 mukaisesti kategorisoimalla *re* -alkuisia sanoja uudelleen päästään viiden sanan R5-menetelmään.

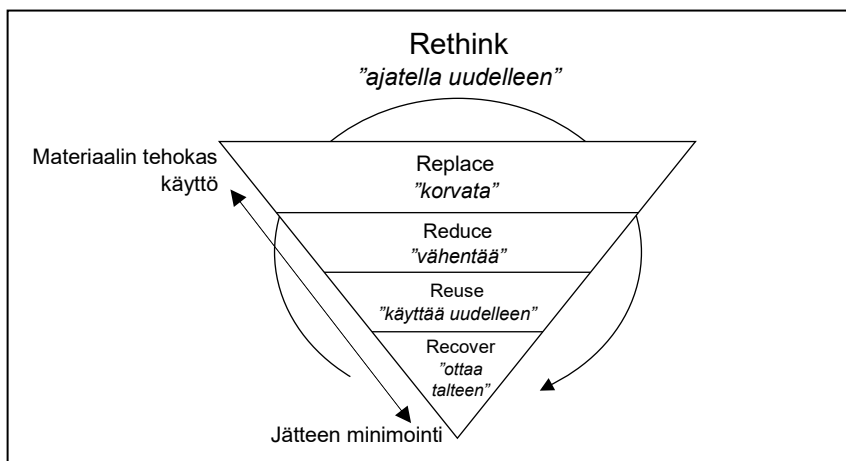


**Kuva 6.** Kaavio R5-menetelmän kohdista.

Kategorisoinnissa sanoja ryhmitellään niin, että sanoista tunnustetaan niin kutsuttuja pääsanoja ja niiden alle siirretään ikään kuin samaa tarkoittavia sanoja. Esimerkiksi sanan *reuse* alle siirretään sanat *repair*, *refurbish*, *remanufacture* ja *repurpose*, jotka tavallaan kaikki ovat tuotteen uudelleenkäytön muotoja. Toisaalta *recycle* ja *recovery* eivät kumpikaan ole kovin hyviä kuvaamaan toisiaan, joten ne ryhmitellään sanan *recover* alle.

Uudelleenajattelu eli *rethink* on piirretty kaikkien muiden sanojen yläpuolelle, sillä se on oikeastaan mahdollista elinkaaren kaikissa vaiheissa. Tuotteen valmistamisessa käytettävää materiaalia voi ajatella uudelleen sanojen *replace* ja *reduce* kautta, sekä toisaalta myös tuotteen uudelleenkäyttöä eri tavoin voi uudelleenajattella sanan *reuse* kautta.

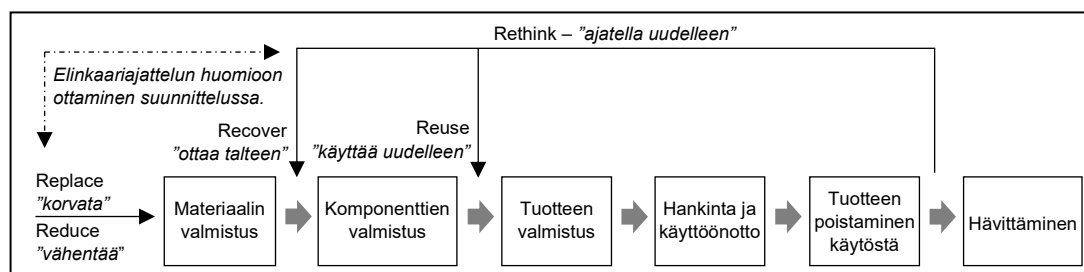
Kirjan ”*Plastics to Energy*” jätehuollossa tehtävää elinkaariarviointia käsittelevässä kappaleessa on Shonfieldin [2008] esittämä pyramidi, jolla kuvataan jätehuollon hierarkiaa (Roy ja Dutta 2019, 378). Kyseistä pyramidia voidaan soveltaa myös R5-menetelmän kuvaamiseen kuvan 7 mukaisesti.



**Kuva 7.** R5-menetelmä pyramidimallina. Kehitetty (Roy ja Dutta 2019, 378 [Shonfield 2008]) mukaan.

Pyramidimallissa on kuvattu kuinka elinkaaren ensimmäisissä vaiheissa tehtävä *korvaaminen*, *vähentäminen* ja *uudelleenkäyttö* lisäävät materiaalin tehokasta käyttöä. Vastaavasti elinkaaren loppupuolella *talteen ottamisella* pyritään minimoimaan jätettä hyödyntämällä materiaali joko kierrättämällä tai muulla tavoin energiaksi muuttamalla. R5-menetelmässä taustalla pyörivä *uudelleenjättelu* on mahdollista elinkaaren kaikissa vaiheissa aiemmin kuvatulla tavalla.

R5-menetelmää voi havainnollistaa myös tuotteen elinkaaren kautta. Kuvassa 8 on esitetty yleistetysti tuotteen elinkaaren vaiheet alkaen raaka-aineiden valmistuksesta ja kuinka yllä esitetty R5-menetelmä siihen soveltuu.



**Kuva 8.** R5-menetelmä sovellettuna tuotteen aikajanalle. Kehitetty (National Confederation of Industry 2020, 17) mukaan.

Kun menetelmän sovitusta tuotteen elinkaaren aikajanalle tarkastellaan, niin voidaan todeta seuraavat kaksi asiaa. Tuotteen suunnittelun aikana tapahtuvalla *replacen* (”*korvata*”)



ja *reducen* ("vähentää") huomioon ottamisella on myönteinen vaikutus koko tuotteen elinkaareen. Lisäksi kuvien 7 ja 8 perusteella voidaan todeta, että R5-menetelmän soveltaminen elinkaaren kaikissa vaiheissa johtaa lopulta jätteen vähenemiseen.

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan hävittäjän tutkan koaksiaalisen mikserin elinkaarta käyttäen yllä kuvatun R5-menetelmän sanoja *rethink* ("ajatella uudelleen"), *replace* ("korvata"), *reuse* ("käyttää uudelleen") ja *ottaa talteen* ("recover").

### 2.3 Tietokoneavusteinen elinkaaritarkastelu

Tässä opinnäytetyössä tietokoneavusteinen elinkaaritarkastelu tehdään Solidworks -ohjelmistoa käyttäen. Solidworks on Dassault Systemesin vuonna 1995 julkaisema tietokoneavusteisen suunnittelun ohjelmisto (Dassault Systemes 2015), ja elinkaaritarkastelu on mahdollista tehdä siihen kuuluvalla sustainability-moduulilla. Popan ja Popan mukaan tuotesuunnittelussa tehtävään kestäväan kehityksen näkökulmien huomiointiin sustainability-moduuli soveltuu hyvin (Popa ja Popa 2017, 6). Elinkaaritarkastelun suorittamista Solidworksin sustainability-moduulilla on kuvattu menneinä vuosina useissa eri julkaisuissa, kuten edellä mainitussa Popan ja Popan tekstissä. Seuraavaksi kuvataan elinkaaritarkastelun tekeminen käyttäen uusinta, vuoden 2024 Solidworks -ohjelmistoversiota käyttäen.

Ennen elinkaaritarkastelun suorittamista tarkasteltava komponentti tulee 3D-mallintaa käyttäen Solidworks -ohjelmiston tietokoneavusteisen suunnittelun toimintoja. 3D-mallinnusta varten tarkasteltava tuote puretaan osiin ja tehdään tarvittavat mittaukset 3D-malleja varten. Standardiosien osalta pyritään käyttämään ensisijaisesti verkosta yleisesti saatavilla olevia 3D-malleja.

Elinkaaritarkastelun toisessa vaiheessa tuotteen 3D-malli avataan Solidworks -ohjelmiston elinkaaritarkasteluun tarkoitettussa sustainability-moduulissa. Ennen elinkaaritarkastelun suorittamista Solidworks vaatii määrittämään tuotteen komponenteille seuraavat ominaisuudet:

1. Komponentin materiaali ja mahdollinen seos, esimerkiksi alumiini 7075-T6 (SN).
2. Valmistusmaa, valmistusprosessi ja mahdollinen maalattu pinnoite.
3. Komponentin suunniteltu kestoikä.
4. Käyttömaa ja rahtitapa käyttömaahan.

5. Käytöstä poiston jälkeinen prosessointi; %-jako kuinka paljon komponentista saadaan kierrätettyä, poltettua energiaksi ja paljonko komponentista menee jätteeksi.

Lopuksi tulee valita tarkastelutapa kahdesta annetusta vaihtoehdosta. Oletusarvoinen tarkastelutapa on CML (Centre for Milieukunde, Leiden), joka Dassault Systemesin käyttöohjeen mukaan on kehitetty Leidenin yliopistossa Alankomaissa ja perustuu Euroopan alueellisiin olosuhteisiin. Toinen mahdollinen tarkastelutapa on TRACI, joka on Yhdysvaltain ympäristönsuojeluviraston kehittämä ja perustuu Pohjois-Amerikan alueellisiin olosuhteisiin. (Dassault Systemes 2024)

### 2.3.1 Tietokoneavusteisen tarkastelun tuottama raportti

Lähtöarvojen syöttämisen jälkeen ohjelmistossa voi siirtyä katselemaan elinkaaritarkastelun tuloksia ja tallentaa tarkastelusta tuotetun raportin Microsoft Word -tiedostoon. Raportissa on kuvattu tutkitun tuotteen ominaisuuksia sekä lähtötiedot, jotka on annettu tarkastelun aiemmissa vaiheissa. Raportissa on nähtävissä kaksi keskeistä kaaviota liittyen elinkaaritarkastelun tuloksiin.

Ensimmäinen kaavio esittää ympäristövaikutuksia (hiilijalanjälki, energian kokonaiskulutus, ilman happamoituminen ja veden rehevöityminen) jaettuna elinkaaren eri vaiheisiin: materiaalin valmistus, tuotteen valmistus, käyttö, rahti ja käytöstä poisto. Toisessa ohjelmiston tuottamassa kaaviossa on esitetty tuotteen ympäristövaikutuksia komponenteittain. Edellä kuvatut kaaviot ovat esitetty liitteessä 1.

Huomattavaa on, että Solidworks -ohjelmisto ei ilmoita yksiköitä komponenttikohtaisessa kaaviossa. Lukujen summa ei myöskään vastaa elinkaaren vaiheisiin liittyvää kaaviota, mutta toisaalta kyseisessä kaaviossa on huomioitu myös kokoonpanoon liittyvät ympäristövaikutukset.

Tässä opinnäytetyössä Solidworks -ohjelmiston tuottamia tuloksia käytetään R5-menetelmän tuloksien tukena. Ohjelmiston esittämät tulokset ovat riittävän tarkkoja, kun vertaillaan esitettyjen muutosten vaikutusta tuotteen ympäristöystävällisyyteen.

## 2.4 Kirjallisuuden käyttö osana elinkaaritarkastelua

Tässä työssä tarkasteltava tuote on hävittäjän tutkassa käytetty radiotaajuuskomponentti ja sillä voi siksi olla hyvin tiukkoja vaatimuksia suorituskyvyn suhteen. Jokinen et al. aloittaa

Puolustustutkimuksen vuosikirjassa 2021 artikkelinsa seuraavasti ”*Rakenteilla ja materiaaleilla on merkittävä rooli erilaisten sotilaallisten alusten ja laitteiden toiminnan kannalta.*” (Jokinen et al. 2021, 50). On siis todella tärkeää varmistua siitä, että elinkaaritarkastelun tuloksena ei esitetä muutoksia, joilla on heikentävä vaikutus tuotteen suorituskykyyn. Siksi tässä työssä tullaan käyttämään paljon vahvoja ja ajantasaisia lähteitä elinkaaritarkastelun tukena.

Tässä opinnäytetyössä käytetään ensisijaisena tiedonhaun työkaluna LUT-yliopiston tiedekirjaston tarjoamaa LUT Primo -hakupalvelua. LUT Primon kautta voi hakea erilaisia materiaaleja, kuten artikkeleita ja kirjoja (LUT-yliopisto). Työtä varten haettavissa lähteissä käytetään lähtökohtaisesti hakuehtona sitä, että julkaisu on vertaisarvioitu ja se on alle 10 vuotta vanha. Näillä hakuehdoilla pyritään ensisijaisesti varmistamaan käytettävän lähteen luotettavuus ja ajantasaisuus. Mikäli tarpeellista tietoa ei löydetä alle 10 vuotta vanhoista vertaisarvioituista julkaisuista, niin hakuehtoa laajennetaan tarvittaessa.

Toissijaisena tiedonhaun työkaluna käytetään Google ja Google Scholar -hakupalveluita. Näillä hakupalveluilla pyritään löytämään kirjallisia lähteitä, joita LUT Primon kautta ei välttämättä olisi löytynyt. Myös näillä hakupalveluilla tehtävää tiedonhakua koskee sama ehto materiaalin iän suhteen eli sen olisi hyvä olla alle 10 vuotta vanha.

## 2.5 Luotettavuustarkastelu

Elinkaaritarkastelu toteutetaan käyttäen kolmea toisistaan riippumatonta ja toisiaan tukevaa menetelmää. R5-menetelmässä tulee varmistua esimerkiksi siitä, että tarkastelussa esitettävälle huomiolle on asialliset perustelut. Vastaavasti tietokoneavusteisessa elinkaaritarkastelussa tulee varmistua ohjelmiston ja sen tietokantojen ajantasaisuudesta. Lisäksi käytettyjen kirjallisten lähteiden ajantasaisuutta tulee tarkastella, koska niissä esitetyn tiedon vaikutus muiden menetelmien tuloksiin voi olla merkittävä.

Luotettavuustarkastelussa tulee kiinnittää huomiota myös kappaleen alussa esitettyyn triangulointiin. Mikäli tutkimuksessa kaikki kolme käytettyä, toisistaan riippumatonta, menetelmää osoittavat samankaltaista tulosta, voidaan olla varmempia siitä, että elinkaaritarkastelun tulokset ovat luotettavia.

### 3 ELINKAARIANALYYSIN TOTEUTUS JA TULOKSET

Tässä kappaleessa tullaan suorittamaan elinkaaritarkastelu hävittäjän tutkan koaksiaaliselle mikserille käyttäen edellisessä kappaleessa kuvattuja menetelmiä. Elinkaaritarkastelu toteutetaan tässä työssä kaksivaiheisena. Tuotteen elinkaarta tarkastellaan R5-menetelmällä, jonka jälkeen esitettävät muutokset ympäristöystävällisyyden parantamiseksi varmennetaan tietokoneavusteisella elinkaaritarkastelulla.

#### 3.1 Tarkastelu R5-menetelmällä

Tässä opinnäytetyössä käytetään R5-menetelmää, joka on johdettu muista vastaavista R-menetelmistä. Menetelmä koostuu viidestä *re* -alkuisesta sanasta *rethink* ("ajatella uudelleen"), *replace* ("korvata"), *reuse* ("käyttää uudelleen") ja *ottaa talteen* ("recover").

Elinkaaritarkastelu R5-menetelmällä toteutetaan tässä työssä tarkastelemalla tuotteen elinkaarta yksi *re* -alkuinen sana kerrallaan. Tarkasteltavien sanojen järjestys määräytyy sen mukaan, kuinka ne soveltuisivat tuotteen kronologiselle elinkaarelle.

**Rethink** eli *ajatella uudelleen* tarkoittaa uudelleenajattelua, jossa tarkastellaan tuotteen elinkaaren kaikkia vaiheita jätteen ja täten myös ympäristövaikutusten minimoimiseksi. Alla on kuvattu uudelleenajattelun keinoin, kuinka kiertotalouden näkökulmat voisivat toteutua tarkasteltavan tuotteen kohdalla.

**Replace** eli *korvata* tarkoittaa UNEP ja TuDelft [2006] mukaan "*haitallisten yhdisteiden korvaamista enemmän ympäristöystävällisillä vaihtoehdoilla*" (Loomba ja Nakashima 2012, 698). Tuotetta tarkastellessa huomio kiinnittyy erityisesti SMA-liittimien keskijohtimessa käytettyyn materiaaliin. SMA-liittimien keskijohtimessa käytetään liittimiä valmistavan yrityksen mukaan berylliumkupari-seosta (Radiall 2002, 1). Seoksessa käytettyä berylliumia voi pitää Shah et al. (2016, 549) mukaan raskasmetallisena ympäristösaasteena. Olisi hyvä, jos SMA-liittimissä käytetty berylliumkupari voitaisiin korvata jollain muulla metalliseoksella. Esimerkiksi Rouxel et al. (2023, 1) mukaan ilmailu- ja öljyteollisuuden sovelluksissa kuparinikkelitina-seoksia on jo käytetty korvaamaan kupariberyllium-seoksia. Berylliumkuparin korvaamista muilla seoksilla SMA-liittimissä olisi kuitenkin hyvä tutkia enemmän ja siksi muutosta ei esitetä pelkästään tässä tuotteessa toteutettavaksi. Tuotteessa ei tehdyn tarkastelun perusteella vaikuta olevan muita haitallisia yhdisteitä.

**Reduce** eli *vähentää* on toinen *re* -alkuinen sana, jolla on vaikutus tuotteen koko elinkaaren suunnitteluvaiheessa tehtyjen valintojen nojalla. Vähentämisellä tarkoitetaan tässä asiayhteydessä sellaisten vähennysten tekemistä, joka vähentää materiaalin ja/tai luonnonvarojen kulutusta. Tätä näkökulmaa voi soveltaa esimerkiksi tuotteen koneistettujen osien materiaalivahvuuksien vähentämisessä sekä tuotteessa käytetyn alumiiniseoksen uudelleenajattelussa. Lisäksi lisäävän valmistuksen soveltumista tuotteen valmistustavaksi tulee tarkastella, sillä tällä voidaan välttää lastuavassa työstössä syntyvä materiaalihukka. Seuraavissa kappaleissa on tarkasteltu edellä esitettyjä muutosehdotuksia ja niiden vaikutuksia tarkemmin.

**Reuse** eli *käyttää uudelleen* tarkoittaa tuotteen tai sen osien uudelleenkäyttämistä osien hävittämisen sijaan. Tarkasteltavan tuotteen kohdalla uudelleenkäyttöä voi toteuttaa monella eri tavalla. Käytössä rikkoutuneen tuotteen komponentteja voi käyttää toisen vastaavan tuotteen korjaamiseksi ja kunnostamiseksi. Tuotteen valmistamiseen on käytetty lisäksi runsaasti erilaisia standardiosia, joita voi käyttää uudelleen myös täysin erilaisten tuotteiden valmistamisessa. Lisäksi tuotteen kytkentä radioteknisen laitteen signaalitielle on toteutettu käyttäen standardoitua SMA-liitintä, joka mahdollistaa ehjän mutta käytöstä poistetun tuotteen käytön täysin muussa radiotekniikkaa käyttävässä sovelluksessa. Tuotteella voidaan todeta siis olevan edellytyksiä uudelleenkäytön toteutumiselle sen elinkaaren eri vaiheissa.

**Recover** eli *ottaa talteen* koostuu kierrättämisen ja energian talteenoton näkökulmista. Tarkasteltavan tuotteen kohdalla valtaosa, ellei kaikki käytetyistä materiaaleista on kierrätettävissä. Mikäli R5-menetelmän näkökulmat ovat toteutuneet elinkaaren aiemmissa vaiheissa, jäljellä voi tässä kohti olla enää ainoastaan tuotetta varten koneistetut alumiiniosat. Alumiini on materiaali, joka on Güley et al. (2010, 1) mukaan kierrätettävissä. Kierrätysalumiinin valmistamiseen tarvitaan energiaa vain 5-10% siitä määrästä, joka tarvitaan bauksiittimalmista valmistaessa. (Güley et al. 2010, 1) Tässä työssä todetaan, että materiaaliin liittyvällä talteen ottamisen näkökulmalla on edellytys toteutua tuotteen elinkaaren viimeisissä vaiheissa.

Näistä näkökulmista tarkasteltuna voidaan todeta, että tuotteella on hyvät edellytykset kiertotalousajattelun toteutumiselle sen elinkaaren kaikissa vaiheissa. Seuraavaksi tarkastellaan tarkemmin R5-menetelmällä esiin nousseita kohtia tuotteen ympäristöystävällisyyden parantamiseksi.

### 3.1.1 Seosaineiden vähentäminen

Seosaineiden vähentäminen tuotteen ympäristöystävällisyyden parantamiseksi nousi esiin R5-menetelmän *reduce* eli luonnonvarojen käytön vähentämisen näkökulmasta. Tuotteessa käytetty alumiiniseos ei ole yleisesti saatavilla oleva tieto, joten käytetyn seoksen suhteen tulee tehdä oletus. Kirjallisuuteen tehdyn katsauksen perusteella alumiiniseos 7075 on yksi yleinen ilmailuun liittyvissä rakenteissa käytetty materiaali (Rajan et al. 2016, 386; Yashpal et al. 2015, 34). Tämän nojalla tässä työssä oletetaan, että tarkasteltava tuote voi todennäköisesti olla valmistettu 7075-alumiiniseoksesta.

Alumiiniin ja alumiiniseoksiin liittyvän standardin mukaan EN AW-7075 -alumiiniseoksessa käytetään 5,1 % - 6,1 % sinkkiä, 2,1 % – 2,9 % magnesiumia sekä 1,2 % - 2,0 % kuparia. Muita seosaineita kuten rautaa, piitä, mangaania, kromia ja titaania käytetään kutakin alle prosenttiyksikön verran. (SFS-EN 573-3:2019 + A2:2024, 16) Eri materiaalien valmistaminen kuluttaa energiaa eri tavoin ja tuottaa täten erilaisen hiilijalanjäljen. Taulukossa 1 on kuvattu EN AW-7075 -alumiiniseoksessa käytettyjen seosaineiden valmistamiseen tarvittavia energiamääriä.

**Taulukko 1.** *Materiaalien valmistamiseen käytettävä energiankulutus. (Torrubia et al. 2023, 4)*

Materiaali	Energiankulutus [MJ/kg]
Sinkki	19
Kupari	23
Rauta	24
Mangaani	34
Magnesium	199
Kromi	265
Titaani	321
Pii	1 396

Taulukkoa 1 tarkastellessa tulee huomioida, että lähteenä käytetyn tutkimuksen mukaan joihinkin lukuihin voi liittyä epävarmuutta vähäisen kirjallisuuden vuoksi. Taulukosta kuitenkin nähdään suuntaa antavasti, että EN AW-7075 -alumiiniseoksessa käytetyistä seosaineista erityisesti magnesiumin ja piin energiajalanjälki on huomattavan suuri. On siis perusteltua tutkia muita mahdollisia alumiiniseoksia tämän tilalle.

Yashpal et al. julkaisussa on käsitelty paljon erilaisia lentokoneissa käytettyjä alumiiniseoksia. Artikkelin mukaan 6000-sarjan alumiiniseokset tunnetaan hyvästä korroosionkestosta. (Yashpal et al. 2015, 37) Korroosionkesto ajatellaan tässä työssä eduksi, koska korroosiolla voi olla vaikutus myös tuotteen radioteknisiin ominaisuuksiin.

Kermanidisin mukaan 6061-alumiiniseoksen lujuus on alempi, mutta tarjoaa ylivoimaisen työstettävyyden verrattuna muihin alumiiniseoksiin (Kermanidis 2020, 32). Standardin mukaan EN-AW-6061-alumiiniseoksessa käytetään vain 1,2 % - 1,8 % magnesiumia sekä rautaa, piitä, kuparia, sinkkiä, kromia, mangaania ja titaania kutakin alle yksi prosenttiyksikkö (SFS-EN 573-3:2019 + A2:2024, 16). Taulukkoa 1 peilaten on selvää, että 6061-alumiinilla on vähemmän seostettuna alumiinilaatuna pienempi energijalanjälki kuin 7075-alumiinilla. Edellä mainittujen seikkojen tässä työssä esitetään tuotteessa oletettavasti käytetyn EN-AW-7075-alumiiniseoksen korvaamista esimerkiksi EN-AW-6061-alumiiniseoksella. Taulukon 1 perusteella tällä muutoksella pitäisi olla ympäristöystävällisyyttä lisäävä vaikutus.

### 3.1.2 Materiaalivahvuuden vähentäminen

Kuten seosaineiden vähentäminen, myös materiaalivahvuuden vähentäminen tuotteen ympäristöystävällisyyttä parantavana tekijänä nousi esiin R5-menetelmän kohdan *reduce* avulla. Tuotetta tarkastellessa voi huomata, että sitä varten koneistettuihin alumiiniosiin on suunniteltu suuria materiaalivahvuuksia. Seuraavaksi tarkastellaan voiko tuotteen materiaalivahvuutta vähentää ilman, että sillä olisi vaikutusta tuotteen radioteknisiin ominaisuuksiin.

Kappaleessa käytetyllä materiaalilla on vaikutus siihen, kuinka hyvin radiosignaali tunkeutuu materiaalivahvuuden yli (Conecici et al. 2017, 3). Tunkeutumissyvyyteen vaikuttaa materiaalin suhteellinen permeabiliteetti  $\mu_r$  ja suhteellinen johtavuus  $\sigma_r$  (Conecici et al. 2017, 3). Materiaaliominaisuuksien lisäksi radiosignaalin kulmanopeus  $\omega$  vaikuttaa sen tunkeutumissyvyyteen (Paschaloudis et al. 2021, 8).

Radiosignaalin tunkeutumissyvyys voidaan laskea Paschaloudis et al. (2021, 8) mukaan seuraavasti:

$$\delta_s = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_r \cdot \sigma_r}}, \quad (1)$$

jossa kulmataajuus  $\omega = 2\pi \cdot f$ .

Tarkasteltavan tuotteen käyttämä taajuuskaista on ei-julkinen tieto, joten tarkastelun suorittamiseksi tulee tehdä oletus tuotteen käyttämästä taajuuskaistasta. Hävittäjien tutkissa yleisimmin käytetään X-taajuuskaistaa (Chung et al. 2016, 203), joka vastaa 8 – 12 gigahertsiä (Xia et al. 2022, 3). Koska tunkeutumissyvyys kasvaa taajuuden pienentyessä, tarkastellaan materiaalien tunkeutumissyvyyksiä X-taajuuskaistan alimmalla taajuudella 8 gigahertsiä.

Alla on esitetty artikkelin Conecici et al. (2017, 3) mukainen taulukko materiaaliominaisuuksista, johon on laskettu tunkeutumissyvytydet 8 GHz taajuiselle radiosignaalille.

**Taulukko 2.** *Materiaalien RF-tunkeutumissyvyyksiä 8 GHz taajuudella. Johdettu (Conecici et al. 2017, 3) taulukon mukaan.*

<b>Materiaali</b>	$\sigma_r$	$\mu_r$	$\sigma_r \cdot \mu_r$	$\delta_s, f=8 \text{ GHz}$ [mm]
Messinki	0,26	1	0,26	0,0124
Alumiini	0,61	1	0,61	0,0081
Kulta	0,7	1	0,7	0,0075
Kupari	1	1	1	0,0063
Ruostumaton teräs	0,02	500	10	0,0020
$\mu$ -metalli	0,03	20000	600	0,0003

Tähän työhön liittyen voidaan huomata, että messingillä, joka on kuparin ja sinkin sekoitus, on huomattavasti suurempi tunkeutumissyvyys kuin pelkällä kuparilla. Puhtaassa messingissä on 85 % kuparia ja 15 % sinkkiä, mutta messinkiin voidaan seostaa jopa 42 % sinkkiä suuremman vahvuuden saavuttamiseksi (Jha et al. 2015, 2318). Tämän perusteella tässä työssä ajatellaan, että materiaalin seostuksella voi olla suuri vaikutus radiosignaalin tunkeutumissyvyyteen. Tarkasteltavissa alumiiniseoksissa lisäaineiden osuus on kuitenkin merkittävästi alhaisempi, joten myös niiden vaikutus tunkeutumissyvyyteen on pieni.

Taulukosta 1 nähdään, että materiaalista riippumatta 8 gigahertsin taajuudella tunkeutumissyvyys materiaaliin jää alle  $0,02 \text{ mm}$ . Näin ollen tuotteessa käytetyn materiaalin ominaisuudet eivät aseta radioteknistä estettä materiaalivahvuuden vähentämiselle. Tässä työssä esitetään noin 2,38 millimetrin (3/32 tuuman) vähennystä tuotetta varten koneistettujen alumiiniosien materiaalivahvuuksiin. Materiaalivahvuuden vähennys esitetään tehtäväksi pyöreiden osien ulkohalkaisijaan sekä tuotteen pohjassa olevan lohkon paksuuteen. Tällöin tuotteen kohdalla toteutuu R5-menetelmän mukainen *reduce* eli vähentämisen periaate tuotteen materiaalinkäytön suhteen ja tuotteen aiheuttamat ympäristövaikutukset pienenevät.

### 3.1.3 Lisävä valmistus vaihtoehtoisena valmistustapana

Viimeisenä tuotteen ympäristöystävällisyyttä lisäävänä tekijänä esiin nousi lisäävän valmistuksen käyttö. Ympäristöystävällisyyden kannalta lisäävän valmistuksen keskeisenä etuna voidaan pitää Kärkkään ja Nokipiin (2023, 58) artikkelissa mainittua vähempää raaka-aineiden käyttöä. Lisäävää valmistusta käyttäessä ei synny samankaltaista materiaalihukkaa kuin esimerkiksi lastuavilla työstömenetelmillä.



Matalan materiaalihukan lisäksi lisäävän valmistuksen käyttö helpottaa logistiikkaa. Puolustustutkimuksen vuosikirjassa 2023 nostetaan esiin seikka, että osien valmistus lisäävällä valmistuksella ei ole sidottu tiettyyn sijaintiin. Tämä helpottaa toimitusketjuja siten, että parhaimmassa tapauksessa käyttäjä voi suoraan valmistaa tarvittavan osan ilman että sitä tarvitsee kuljettaa pitkien toimitusketjujen läpi. Lisäksi vanhojen koneiden elinkaarta voidaan jatkaa lisäävän valmistuksen avulla niissäkin tilanteissa, kun varaosia ei ole enää saatavilla. (Kärkäs ja Nokipii 2023, 58-59)

Radiotaajuusosien valmistamisesta lisäävällä valmistuksella on julkaistu useita tutkimuksia viime vuosina. Arslan ja Soylemez (2024) artikkelissa esitellään X-taajuuskaistalla toimivan radiotaajuuskomponentin lisäävää valmistusta. Artikkelin mukaan pinnanlaatuvaatimusta osalle ei pidetä korkeana, koska X-taajuuskaistaa voidaan pitää matalataajuuksisena. (Arslan ja Soylemez 2024, 258) Tutkimuksessa valmistettiin lisäävällä valmistuksella kuusi X-taajuuskaistalla toimivaa radiotaajuusosaa, joista mitattu keskimääräinen pinnankarheus oli 11,8  $\mu\text{m}$  hirttauksen (engl. hirtisation) ja hopeapinnoituksen jälkeen (Arslan ja Soylemez 2024, 262). Tutkimuksen mukaan lisäävällä valmistuksella ja jälkikäsitelyillä tehty ”uudelleensuunniteltu” osa vertautuu hyvin perinteisillä menetelmillä valmistettuun osaan (Arslan ja Soylemez 2024, 265).

Myös Almeshehe et al. (2022) on julkaissut artikkelin radiotaajuusosan valmistamisesta lisäävän valmistuksen keinoin. Artikkelissa tutkittiin 28 gigahertsin taajuudella toimivan aaltoputkikytkimen valmistamista. (Almeshehe et al. 2022, 101130) Almeshehe et al. tutkimuksessa tulostettua komponenttia ei jälkikäsitelty ollenkaan (Almeshehe et al. 2022, 101136) ja aiemmin esitetyssä Arslan ja Soylemez (2024) tutkimuksessa vastaavasti käsiteltiin (Arslan ja Soylemez 2024, 262). Almeshehe et al. tutkimuksen mukaan tulostetun komponentin keskimääräinen pinnankarheus oli 40,18  $\mu\text{m}$ . Tutkimuksen mukaan kyseisen radiotaajuusosan suorituskykyä voidaan pitää hyvänä pinnanlaadusta johtuvista häviöistä huolimatta. (Almeshehe et al. 2022, 101135-101136)

Vuonna 2023 Montanari et al. julkaisi katsauksen alumiiniseosten lisäävään valmistukseen ilmailukäytössä. Aikakausjulkaisussa tunnistetaan lisäävälle valmistukselle useita etuja, kuten mahdollisuus geometrioiden optimoinnille ja täten rakenteiden keventämiselle. Julkaisun mukaan tällä on ympäristövaikutuksia vähentävä vaikutus. (Montanari et al. 2023, 1-3) Montanari et al. tunnistaa etujen lisäksi myös haasteita alumiiniseosten lisäävässä valmistuksessa. Lisäävällä valmistuksella tehdyissä alumiiniosissa voi esiintyä kuumahalkeilua ja huokoisuutta (Montanari et al. 2023, 6, 9). Huokoisuus ja kuumahalkeilu voi tuottaa ongelmia radioteknisen suorituskyvyn ja sähkömagneettisen tiiveyden suhteen tässä työssä tarkasteltavan tuotteen osalta.

Tarkasteltaessa lisäävää valmistusta tuotteen vaihtoehtoisena valmistustapana nähdään useita etuja. Julkaisuissa Arslan ja Soylemez (2024) sekä Almeshehe et al. (2022) tehtyjen kokeiden perusteella voidaan todeta, että tässä työssä tarkasteltavalla tuotteella voisi olla edellytyksiä toimia lisäävästi valmistettuna. Montanari et al. (2023) julkaisussa esitetyt haasteet lisäävän valmistuksen suhteen tuovat kuitenkin epävarmuustekijöitä, joiden vuoksi tuotetta ei vielä tässä työssä esitetä valmistettavaksi lisäävällä valmistuksella. Edellytyksiä tuotteen toimivuudelle lisäävästi valmistettuna tulisi tutkia tarkemmin.

### 3.2 Tarkastelu tietokoneavusteisesti

Tässä opinnäytetyössä R5-menetelmällä tuotetut elinkaaritarkastelun tulokset ja ehdotukset tuotteen ympäristöystävällisyyden lisäämiseksi varmennetaan tietokoneavusteisella elinkaaritarkastelulla. Tietokoneavusteinen elinkaaritarkastelu mittauksineen toteutettiin talven ja kevään 2024 aikana.

#### 3.2.1 Tuotteen 3D-mallinnus

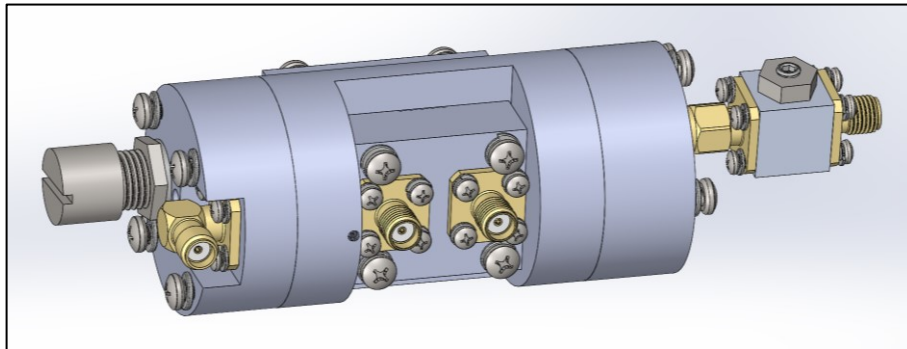
Tuotteen rungon 3D-mallinnus toteutettiin pääasiassa kaksivaiheisena prosessina käyttäen Solidworks -ohjelmistoa. Tuotteen koneistetuista ei-standardi-osista laadittiin alustavat 3D-mallit käyttäen ohjelmiston tietokoneavusteisen suunnittelun toimintoja. Alustavien 3D-mallien valmistuttua tuotetta mitattiin useana päivänä LUT-yliopiston tiloissa. Tehdyt mittaukset tallennettiin pääasiassa suoraan tuotteesta aiemmin tehtyihin 3D-malleihin, jolloin 3D-mallit valmistuivat hyvin pitkälti yhtä aikaa mittausten edetessä.

Mittauksissa keskeisenä työkaluna käytettiin yliopiston tarjoamaa analogista työntömittaa, jonka resoluutio on 0,05 mm. Tarkasteltavassa tuotteessa on kuitenkin geometrioita, joiden mittaaminen esimerkiksi sijainnin tai koon takia ei ole mahdollista analogisella työntömitalla. Näissä tapauksissa mitattavan geometrian koko arvioitiin esimerkiksi silmämääräisesti työntömitan avulla, peilaamalla tuotteessa olevaa geometriaa standardeihin (esimerkiksi kierteet SFS-ISO 262 mukaan) ja tietokoneavusteisen suunnittelun keinoin. Lisäksi joidenkin yksityiskohtien ja geometrioiden toteutusta 3D-malliin rajattiin tai yksinkertaistettiin käytettävissä olevan ajan rajallisuuden vuoksi. Esimerkiksi joitain tuotteessa olevia sähkötekniisiä yksityiskohtia, kuten vastusta ja kondensaattoria sekä niiden juotoksia ei ole toteutettu 3D-malliin. Tietokoneavusteisen elinkaaritarkastelun keskeisenä tuloksena haetaan vahvistusta esitetyille parannusehdotuksille ympäristöystävällisyyden lisäämiseksi. Mittauksien tarkkuutta ja resoluutiota ei pidetä tässä työssä merkittävänä tekijänä, koska pienien

yksityiskohtien vaikutusta elinkaaritarkastelun kokonaistuloksiin voidaan pitää tämän työn osalta pienenä.

Tuotteessa on käytetty koneistettujen ei-standardi-osien lisäksi erittäin paljon yleisesti saatavilla olevia standardiosia, kuten ruuvit, aluslevyt ja SMA-liittimet. Standardiosien 3D-mallit ovat noudettu McMaster-Carr -yhtiön verkkosivuilta sekä SMA-liittimien 3D-mallit Radiall -yhtiön verkkosivuilta. Kaikista tuotteessa käytetyistä standardiosista ei ollut yleisesti saatavilla olevia 3D-malleja, jolloin vastaavan osan 3D-mallia on muutettu tarkasteltavan tuotteen osan mukaiseksi.

3D-mallista laadittiin myös muutettu versio, jossa on huomioitu R5-menetelmällä esiin nousevat parannusehdotukset. Edellä kuvatun mallinnusprosessin tuloksena syntyi kuvan 9 mukainen 3D-malli tarkasteltavasta tuotteesta.



**Kuva 9.** Tuotteen perusteella laadittu 3D-malli.

Tuotteen 3D-mallissa on käytetty 25 yksilöllistä (ns. uniikkia) komponenttia ja tuotteen kokoonpano koostuu kokonaisuudessaan 144 komponentista. Komponenttien suuri kokonaisuus suhteessa yksilöllisten komponenttien määrään johtuu siitä, että tuotteessa on käytetty paljon samoja ruuveja ja aluslevyjä. Lisäksi tuotteen 3D-malliin on toteutettu pääasiassa kaikki sisäiset komponentit, jotka eivät näy tuotteesta ulospäin.

### 3.2.2 Sustainability-moduulin käyttö

Tuotteen 3D-malli on mallinnuksen jälkeen valmis avattavaksi Solidworksin sustainability-moduulissa. Tuotteen jokaiselle komponentille tulee määrittää useita parametrejä esimerkiksi materiaalin ja valmistustavan suhteen ennen kuin ohjelma tuottaa tuloksen elinkaaritarkastelulle.

Tuotteen koneistettujen ei-standardi-osien materiaaliksi oletetaan tässä työssä R5-menetelmässä käytetyn alumiiniseoksen variantti Al 7075-T6. Lisäksi näiden osien

valmistustavaksi valitaan koneistus, jota voidaan pitää tässä työssä tarkkana kuvauksena osien valmistustavalle.

Standardi ISO 898-1 määrittelee ruuveille useita mahdollisia materiaaliparametrejä. Useiden lujuusluokkien ruuvit voivat olla standardin mukaan esimerkiksi seosterästä (SFS-EN ISO 898:1:2013, 20). Ruuvien valmistamisessa yleisesti käytettävä kylmämuokkaus (Nord-Lock Group 2018) ei ole valittavissa sustainability-moduulissa valmistusmenetelmäksi. Tämän vuoksi tässä työssä tehtävässä tarkastelussa tehdään yksinkertaistus ruuvien, kierrenippeleiden, muttereiden ja aluslevyjen materiaalin ja valmistustavan suhteen. Tietokoneavusteisessa elinkaaritarkastelussa käytetään edellä mainittujen komponenttien materiaalina seosterästä ja valmistustapana koneistusta, joka tässä työssä kuvaa riittävän tarkasti näiden komponenttien ympäristövaikutuksia.

SMA-liittimet ovat liittimiä valmistavan yrityksen jakelemassa 3D-mallissa kuvattu yhdestä materiaalista valmistettuna komponenttina. Valmistajan tuoteselosteessa SMA-liittimien rungon materiaaliksi ilmoitetaan ruostumaton teräs (Radiall 2002, 1), joten tietokoneavusteisessa elinkaaritarkastelussa SMA-liittimien materiaaliksi oletetaan valettu ruostumaton teräs ja valmistustavaksi valitaan koneistus.

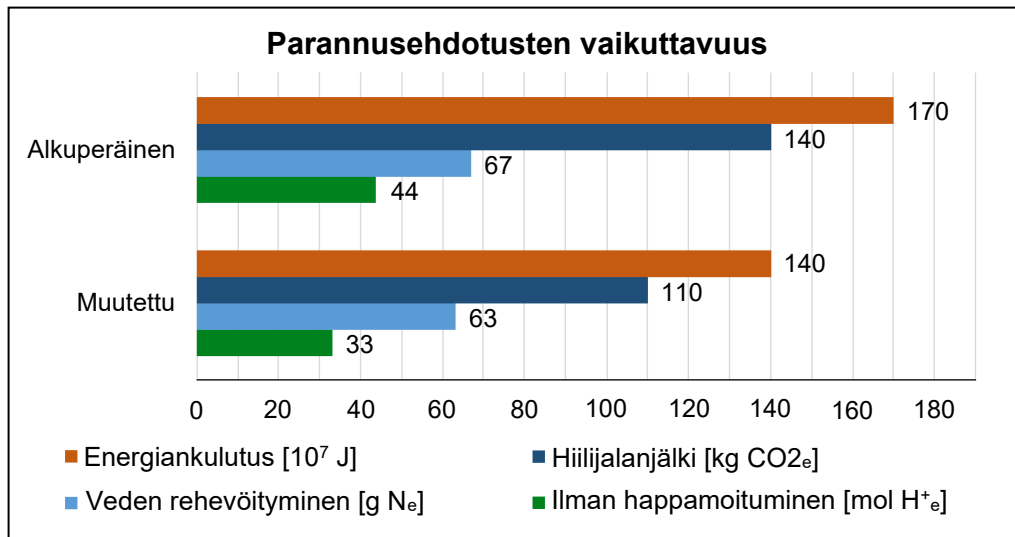
Tuotteen sisällä kulkeva johdin, johon SMA-liittimistä johdetaan signaali voi olla valmistettu samasta materiaalista kuin SMA-liittimien keskijohdin. SMA-liittimien keskijohdimesta on käytetty berylliumkupari-seosta (Radiall 2002, 1), joka ei ole tuettu materiaali Solidworksin sustainability-moduulissa. Tämän vuoksi johdinten materiaaliksi valitaan tässä työssä generinen kupari ja valmistustavaksi ”*lanka*”, koska vaihtoehtoinen ”*ohutlevy*” ei kuvaa keskijohdinta sen paremmin. Lisäksi tuotteen sisällä käytettyjen PTFE-holkkien materiaaliksi valitaan PTFE ja valmistustavaksi oletetaan ruiskupuristus.

Tuotteelle tulee valita alue, jossa se on valmistettu sekä jossa sitä käytetään. Tässä työssä oletetaan, että tuote valmistetaan Pohjois-Amerikassa ja se kuljetetaan lentämällä käytettäväksi Euroopan alueella. Tämän vuoksi ohjelmiston käyttämäksi tarkastelutavaksi valitaan TRACI, joka kuvaa parhaiten Pohjois-Amerikan tuotannollisia olosuhteita.

Vuodesta 1992 alkaen Boeing F/A-18 C/D Hornet on ollut käytössä Ilmavoimien päähävittäjänä (Ilmailumuseo) ja Hornetin elinkaari on suunniteltu päättyvän poistoon vuosina 2025 – 2030 (Puolustusvoimat 2020, 7). Tuotteen eliniäksi asetettiin 35 vuotta, joka on peilattu Suomen käytössä olevien F/A-18 C/D Hornet -hävittäjien eliniästä.

### 3.2.3 Tietokoneavusteisen elinkaaritarkastelun tulokset

Tietokoneavusteinen elinkaaritarkastelu suoritettiin alkuperäistä tuotetta kuvaavalle sekä parannusehdotukset huomioivalle 3D-mallille. Kuvassa 10 on esitetty koonnos alkuperäisen ja muutetun osan ympäristövaikutuksista koko elinkaaren ajalta.



**Kuva 10.** Koonnos Solidworks -ohjelmiston tuottamista elinkaaritarkastelun tuloksista.

Kuvasta 10 nähdään, että parannusehdotukset ympäristöystävällisyyden lisäämiseksi vähentävät tuotteen ympäristövaikutuksia kaikilla neljällä mitattavalla osa-alueella: energiankulutus, hiilijalanjälki, veden rehevöityminen ja ilman happamoituminen. Solidworksin tuottamat tulokset ovat liitteissä 2 ja 3.

HX-hankkeessa Suomelle hankitaan 64 hävittäjää (Puolustusministeriö 2021, 12), jonka mukaan laskettuna työssä esitetyt muutokset voivat tuottaa säästöjä CO<sub>2</sub>-päästöissä jopa 1920 kg. Traficomien mukaan keskimääräinen vuonna 2023 liikennekäytössä ollut auto tuotti CO<sub>2</sub>-päästöjä 139,9 g/km (Traficom 2024). Tämän perusteella esitetty säästö HX-hankkeen kohdalla vastaisi noin 13 700 ajettua kilometriä.

## 4 TULOSTEN POHDINTA

Tässä opinnäytetyössä elinkaaritarkastelu tehtiin käyttäen useita menetelmiä, jotka tuottivat toisiaan tukevia tuloksia. Elinkaaritarkastelussa menetelmiä soveltaessa tuli tehdä oletuksia tuotteeseen liittyen, joiden perusteella tarkastelu ja parannusehdotukset saatiin tehtyä. Tähän liittyen tulee pohtia erityisesti sitä, että mikä vaikutus käytetyillä menetelmillä ja tehdyillä oletuksilla on työn tulokseen.

### 4.1 Tutkimuksen objektiivisuus

Työn objektiivisuutta arvioidessa keskeiseksi kohdaksi muodostuu R5-menetelmä. Tarkastelun tekijän aiempi kokemus esimerkiksi töiden, tutkimuksen tai harrastuneisuuden kautta voi vaikuttaa niihin yksityiskohtiin, joihin tekijä kiinnittää työssään erityistä huomiota.

Tässä työssä johdettu R5-menetelmä kuitenkin pitää sisällään kaikki R10-menetelmän kohdat, joka pakottaa elinkaaritarkastelua tekevää henkilöä pohtimaan tuotetta erittäin usean näkökulman kautta. Lisäksi tässä työssä R5-menetelmän kautta esille nousseet kehityskohdat ovat perusteltu kirjallisia lähteitä käyttäen. Tämän vuoksi työn objektiivisuutta voidaan pitää hyvällä tasolla.

### 4.2 Tutkimuksen reliabiliteetti ja validiteetti

Elinkaaritarkastelu tehtiin tässä työssä monimenetelmällisen tutkimuksen keinoin. Tuotteen elinkaaren tutkiminen aloitettiin tarkastelemalla tuotetta R5-menetelmän mukaisista näkökulmista, jonka jälkeen tulokset varmennettiin tietokoneavusteisesti Solidworksin sustainability-moduulilla. Tarkastelun kaikkia vaiheita tuettiin laajalla ajantasaisten kirjallisten lähteiden käytöllä. Tässä työssä käytettiin paljon erilaisia tutkimusartikkeleja ja kirjoja, joista suurin osa on julkaistu alle 10 vuotta sitten.

Tehdyn tarkastelun reliabiliteettia ja validiteettia arvioidessa tulee kiinnittää huomiota työssä käytettyjen menetelmien tuloksiin. R5-menetelmällä tuotettiin kaksi esitettävää kehitysehdotusta, joiden toteutus voi parantaa tuotteen ympäristöystävällisyyttä. R5-menetelmän kehitysehdotuksia tarkastellessa kirjallisuus osoitti, että kehitysehdotusten toteutus todella voisi parantaa tuotteen ympäristöystävällisyyttä. Lopulta myös Solidworks -ohjelmistolla

tehty elinkaaritarkastelu osoitti, että esitetyt muutokset todella parantavat tuotteen ympäristöystävällisyyttä kaikilla ohjelmiston käyttämällä mittareilla. Edellä esitettyjen seikkojen nojalla tässä työssä tehdyn elinkaaritarkastelun reliabiliteetti ja validiteetti on korkealla tasolla.

#### 4.3 Virhetarkastelu

Elinkaaritarkastelun kohteena olevan tuotteen, hävittäjän tutkan koaksiaalisen mikserin, tuotetiedot eivät ole julkisesti saatavilla. Tämä on huomioon otettava seikka, kun tehdään virhetarkastelua tehdylle elinkaaritarkastelulle. Työssä on jouduttu tekemään oletus esimerkiksi materiaalin suhteen, joka on tehty kirjallisiin lähteisiin perustuen. Materiaalioletus voi tuottaa virhettä, kun arvioidaan materiaalivalintojen vaikutusta tuotteen ympäristöystävällisyyteen. Materiaalin suhteen tehty oletus ei kuitenkaan kumoa tuotteen suunnittelussa tehtävän materiaalivalinnan merkitystä.

Työssä yhtenä menetelmänä on käytetty yleisesti saatavilla ohjelmistoa elinkaaritarkastelun tekemiseen. Tuotteessa käytetyt SMA-liittimet ovat niitä valmistavan yrityksen 3D-malleissa mallinnettu yhdestä materiaalista tehdyksi. Tämä tuottaa virhettä elinkaaritarkastelun tulosten suuruusluokkaan, mutta ei kuitenkaan vaikuta kehitysehdotusten vaikuttavuuteen ohjelmistolla tarkasteltuna, sillä työssä ei esitetty muutoksia liittimiin. Ohjelmiston käyttö elinkaaritarkastelun tekemisessä vähentää virheen mahdollisuutta, koska ohjelmiston tekemä laskeinta ei ole työn tekijästä riippuvainen.

#### 4.4 Keskeiset johtopäätökset

Työn perusteella voidaan todeta, että hävittäjän tutkan koaksiaalisella mikserillä on hyvät edellytykset toteuttaa kestävä kehityksen mukaisia periaatteita. Tuotetta varten koneistetuissa osissa on käytetty hyvin yksinkertaisia geometrioita, jonka vuoksi tuotteen valmistus- ja ympäristöystävällisyyttä voidaan pitää hyvänä. Tuotteessa on käytetty hyvin paljon standardiosia, jotka mahdollistavat tuotteen kiertotalousajattelun mukaisen käytön; tuotteen rikkoutuessa se on helposti hyödynnettävissä varaosiksi toisen vastaavan tuotteen korjaamiseen tai kokonaan uuden tuotteen valmistamiseen.

Myös tuotteen ympäristöystävällisyyttä voidaan pitää edellä mainittujen seikkojen nojalla hyvänä. Tuotteen suunnitteluvaiheessa tehtyjä valintoja tarkastelemalla kuitenkin voidaan osoittaa muutamia kehityskohteita, jotka huomioimalla voi parantaa tuotteen ympäristöystävällisyyttä entisestään. Pienellä materiaalivahvuuden vähennyksellä sekä

alumiiniseoksen vaihdolla voidaan saada aikaan huomattavan suuret säästöt ympäristövaikutuksien suhteen. Tämä huomio on yleistettävissä kaikkien tuotesuunnitteluun riippumatta käyttökohteesta.

#### 4.4.1 Tutkimuskysymyksiin vastaaminen

Tässä opinnäytetyössä asetettiin kolme tutkimuskysymystä, joihin tehtävällä elinkaaritarkastelulla pyritään vastaamaan. Tutkimuskysymykset ja niiden vastaukset työssä tehdyn elinkaaritarkastelun perusteella ovat seuraavat:

1. Miten tuotteen materiaalia ja sen seosaineita voidaan optimoida elinkaariajattelun näkökulmasta?  
Vastaus: Tuotteen materiaalin ja seosaineiden optimoinnissa tulee kiinnittää huomiota R5-menetelmän sanaan *reduce* ("vähentää"). Elinkaaren aikaisia ympäristövaikutuksia saadaan pienennettyä huomattavasti vaihtamalla käytetty alumiiniseos vähemmän seostettuun alumiinilaatuun.
2. Miten tuotteen rakennetta ja valmistusteknisiä geometrioita voidaan optimoida elinkaariajattelun näkökulmasta?  
Vastaus: Kuten materiaalin optimoinnissa, myös rakenteen optimoinnissa keskiössä on R5-menetelmän mukainen vähentämisen näkökulma. Tuotteen materiaali vahvuutta pienentämällä saadaan vähennettyä tuotteessa käytetyn materiaalin määrää ja täten myös valmistuksen aiheuttamia ympäristövaikutuksia.
3. Millä muilla menetelmillä tuote mahdollisesti voidaan valmistaa ja onko niillä valmistaminen elinkaariajattelun näkökulmasta järkevää?  
Vastaus: Työssä lähteinä käytetyt tutkimukset osoittavat, että tuote voi olla valmistettavissa lisäävällä valmistuksella. Lisäävän valmistuksen käyttö vähentäisi valmistuksen aikaista materiaalihukkaa ja pienentäisi tarvittavaa logistiikkaketjua. Osan lisäävään valmistukseen liittyy kuitenkin myös epävarmuustekijöitä, joiden vuoksi lisäävää valmistusta ei esitetä tässä työssä tuotteen vaihtoehtoiseksi valmistustavaksi.



#### 4.5 Tulosten uutuusarvo, hyödynnettävyys ja yleistettävyys

Tarkasteltavan tuotteen, hävittäjän tutkan koaksiaalisen mikserin, elinkaaresta ei ole saatavilla mitään tietoa julkisesti. Tässä opinnäytetyössä tehtävä elinkaaritarkastelu tuottaa yleisesti saataville uutta tietoa tarkasteltavaan osaan ja tarkasteltavan osan elinkaareen liittyen.

Elinkaaritarkastelun yhtenä menetelmänä käytettiin tässä työssä R5-menetelmää, joka perustuu systemaattiseen tuotteen tarkasteluun eri näkökulmien kautta. Työssä käytettävä R5-menetelmä *rethink* ("ajatella uudelleen"), *replace* ("korvata"), *reduce* ("vähentää"), *reuse* ("käyttää uudelleen") ja *recover* ("ottaa talteen") on johdettu muista yleisesti saatavilla olevista menetelmistä. Aiheeseen tehdyn katsauksen perusteella tällaista R5-menetelmän johtamista ei ole osoitettavissa aiemmin julkaistusta lähteestä. Työssä käytettävä R5-menetelmä on kuvattu niin, että sitä voidaan käyttää myös hyvin erilaisten tuotteiden elinkaaritarkasteluissa.

Tässä opinnäytetyössä tehtyä elinkaaritarkastelua ja sen tuloksia tullaan käyttämään laajemmassa tutkimushankkeessa vuoden 2024 aikana. LUT-yliopistossa toteutettavassa hankkeessa 40 mikroaalto- ja radiotaajuuskomponentin DFMA ja kestävään kehityksen tutkimuksia käytetään laajemman yleiskuvan rakentamiseen näihin aihepiireihin liittyen. Tässä opinnäytetyössä esitetyt menetelmät ja tulokset ovat siis hyödynnettävissä ja yleistettävissä moniin eri käyttötarkoituksiin.

#### 4.6 Jatkotutkimusaiheet

Tuotteen elinkaaritarkastelu tehtiin hyvin pitkälti vain tuotetta varten erikseen valmistetuille osille, kuten rungolle tai siihen kiinnitettävälle alumiinilohkoille. Parannusehdotuksia ei esitetty tuotteessa käytetyille standardiosille, koska muutettujen standardiosien valmistusta vain tätä tuotetta varten ei nähty tässä työssä järkeväksi.

Tuotteessa käytettyjä SMA-liittimiä olisi hyvä tarkastella erillisessä tutkimuksessa kestävä kehityksen näkökulmista. Liittimissä käytetyn berylliumkupari-seoksen korvaamista muilla, vähemmän haitallisilla aineilla tulisi tutkia tarkemmin. SMA-liittimiä käytetään laajasti erilaisissa sovelluskohteissa, joten pienelläkin muutoksella voi olla suuri merkitys liittimien kokonaisympäristövaikutuksiin.

## 5 YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä tehtiin elinkaaritarkastelu hävittäjän tutkan koaksiaaliselle mikserille. Koaksiaalinen mikseri on radiotaajuuskomponentti, jota käytetään hävittäjän tutkan signaalitiellä taajuussekoittimena. Opinnäytetyössä tarkasteltu tuote rakentuu pääasiassa viidestä koneistetusta alumiiniosasta ja useista yleisesti saatavilla olevista standardiosista.

Elinkaaritarkastelu tehtiin käyttäen monta toisiaan tukevaa menetelmää. Keskeisinä menetelminä tässä työssä olivat systemaattisen elinkaaritarkastelun R5-menetelmä sekä tietokoneavusteinen elinkaaritarkastelu. Tietokoneavusteisesti tehdyssä elinkaaritarkastelussa käytettiin yleisesti saatavilla olevaa Solidworks -ohjelmistoa ja sen sustainability-moduulia. Työssä tehtyjä oletuksia ja havaintoja tuettiin useilla ajantasaisilla kirjallisilla lähteillä, kuten tutkimusartikkeleilla ja kirjoilla.

R5-menetelmällä tehtyjen havaintojen perusteella voidaan todeta, että tarkasteltavalla tuotteella on hyvät edellytykset toteuttaa kestävä kehitysperiaatteita ja sen mukaista kiertotalousajattelua. Tuotteen ympäristöystävällisyyden lisäämiseksi työn tuloksena esitetään materiaalin vaihtoa vähemmän seosaineita sisältävään alumiiniseokseen ja koneistettujen alumiiniosien materiaalivahvuuden vähentämistä. Tietokoneavusteisen elinkaaritarkastelun perusteella näillä toimenpiteillä voitaisiin saavuttaa jopa 13 700 ajettua kilometriä vastaava säästö tuotteen hiilijalanjäljessä HX-hankkeen 64 hävittäjän tapauksessa.

Hyvin pienillä ja yksinkertaisilla vaikuttavilla muutoksilla voi olla iso vaikutus kokonaiskuvaan ympäristövaikutusten suhteen. Tässä työssä käytetyn R5-menetelmän kohdat *rethink* ja *reuse* ovat tuotteiden elinkaaritarkastelun lisäksi sovellettavissa myös arkielämässä tehtäviin valintoihin. Tässä opinnäytetyössä viimeiseksi muodostuva kysymys jätetään pohdittavaksi lukijalle: ”*Voisinko minäkin tukea kiertotalousajattelun toteutumista, esimerkiksi ostamalla uuden sijasta käytetyn tuotteen?*”.

## LÄHTEET

- Almeshehe, M., Murad, N., Rahim, M., Ayop, O., Samsuri, N., Aziz, M. A., & Osman, M. (2022) Surface roughness impact on the performance of the 3D metal printed waveguide coupler at millimeterwave band. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 35, 101129.
- Arslan, A., & Soylemez, E. (2024) Investigation of the Surface Roughness Effect on the Performance of an X-band RF Filter Manufactured by Laser Powder Bed Fusion. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*.
- Bera, S. C. (2019) *Microwave Active Devices and Circuits for Communication* (1st ed. 2019.). Springer Singapore.
- Chung, S. M., Chou, Y., & Chuang, Y. (2016) Radar cross section analysis of stealth fighter design: Key factors and limitations of simulation. *International journal of electrical engineering*, 23(6), 201-214.
- Conecici, L. M., Munteanu, C., & Purcar, I. M. (2017) Study of the shielding performances of different materials regarding Electromagnetic Field Interference. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 200, No. 1, 012045). IOP Publishing.
- Curran, M. A. (2006) *Life-cycle assessment: principles and practice*. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.
- Dassault Systemes (2015) 20 Years of SOLIDWORKS. Verkkosivu. Viitattu 6.3.2024. Saatavilla: [https://files.solidworks.com/images/SW20\\_timeline1.pdf](https://files.solidworks.com/images/SW20_timeline1.pdf)
- Dassault Systemes (2024) Impact Assessment Methodologies. Verkkosivu. Viitattu 10.3.2024. Saatavilla: [https://help.solidworks.com/2024/english/SolidWorks/sldworks/c\\_impact\\_assessment\\_methodologies.htm](https://help.solidworks.com/2024/english/SolidWorks/sldworks/c_impact_assessment_methodologies.htm)
- De Maio, A., Greco M. S. & Orlando D. (2016) *Introduction to Radar Detection*. Teoksessa: De Maio, A., & Greco, M. S. (2016) *Modern Radar Detection Theory* (1st ed., Vol. 2). The Institution of Engineering and Technology.
- Gibson, C. B. (2017) Elaboration, generalization, triangulation, and interpretation: On enhancing the value of mixed method research. *Organizational Research Methods*, 20(2), 193-223.
- Google Scholar. (2020) Julkaisun Potting et al. (2017) viittausten lukumäärä. Verkkosivu. Viitattu 11.4.2024. Saatavilla: <https://scholar.google.fi/scholar?cites=2053910337475299034&hl=fi>
- Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., ... & Rydberg, T. (2011) *Life cycle assessment: past, present, and future*.
- Güley, V., Ben Khalifa, N., & Tekkaya, A. E. (2010) Direct recycling of 1050 aluminum alloy scrap material mixed with 6060 aluminum alloy chips by hot extrusion. *International Journal of Material Forming*, 3, 853-856.

Ilmailumuseo. F/A-18C Hornet. Verkkosivu. Viitattu 2.4.2024. Saatavilla:

[https://ilmailumuseo.fi/perf\\_2/](https://ilmailumuseo.fi/perf_2/)

Infineon Technologies AG (2023) Radar basics: FAQs – KBA237673. Verkkosivu. Viitattu 21.2.2024. Saatavilla: <https://community.infineon.com/t5/Knowledge-Base-Articles/Radar-basics-FAQs-KBA237673/ta-p/443721>

Jha, K., Balakumar, D., & Paluchamy, R. (2015) Experimental analysis of microstructure and mechanical properties of copper and brass based alloys. *International Journal of Automotive & Mechanical Engineering*, 11.

Jokinen, J., Orell O., & Kanerva M. (2021) Materiaalien ja rakenteiden kokeellinen tarkastelu DIC-menetelmällä. Teoksessa: Koivisto J. & Nousiainen M. (toim.) Puolustustutkimuksen vuosikirja 2021. Riihimäki: Puolustusvoimat.

Kermanidis A. T. (2020) Aircraft Aluminum Alloys: Applications and Future Trends. Teoksessa: Pantelakis S. & Konstantinos T. (2020) Revolutionizing Aircraft Materials and Processes. Springer International Publishing.

Kilponen, J. (2023). Elinkaaren hallinnan tukeminen mallintamisella: tarkastelussa 155 mm ampumatarvikeperhe. Maanpuolustuskorkeakoulu.

Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017) Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, conservation and recycling*, 127, 221-232.

Kärkäs, E. & Nokipii V. (2023) Lisäävä valmistus sotilaslogistiikan tueksi. Teoksessa: Koivisto J. & Suominen J. (toim.) Puolustustutkimuksen vuosikirja 2023. Riihimäki: Puolustusvoimat.

Loomba, A. P., & Nakashima, K. (2012) Sustainable Ecodesign Mapping of End-of-Life Strategies for Improved Products/Processes Management. Teoksessa: Design for Innovative Value Towards a Sustainable Society: Proceedings of EcoDesign 2011: 7th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (697-700). Springer Netherlands.

LUT-yliopisto. LUT Primo. Verkkosivu. Viitattu 3.4.2024. Saatavilla: <https://elut.lut.fi/fi/it-ohjeet-ja-opiskelun-tyokalut/opiskelun-jarjestelmat/lut-primo>

Martínez Vázquez M. (2021) Basics of FMCW Radar. Verkkosivu. Viitattu 21.2.2024. Saatavilla: <https://www.renesas.com/us/en/blogs/basics-fmcw-radar>

Montanari, R., Palombi, A., Richetta, M., & Varone, A. (2023) Additive Manufacturing of Aluminum Alloys for Aeronautic Applications: Advantages and Problems. *Metals.*, 13(4).

National Confederation of Industry. (2020) Circular Economy : Strategic Path for Brazilian Industry. Brasília: CNI.

Nord-Lock Group. (2018) Ruuvien valmistus. Verkkosivu. Viitattu 3.4.2024. Saatavilla: <https://www.nord-lock.com/fi-fi/oivalluksia/tuntemus/2018/ruuvien-valmistus/>

Park, S., Kim, Y., Lee, K., Smith, A. H., Dietz, J. E., & Matson, E. T. (2020) Accessible real-time surveillance radar system for object detection. *Sensors*, 20(8), 2215.

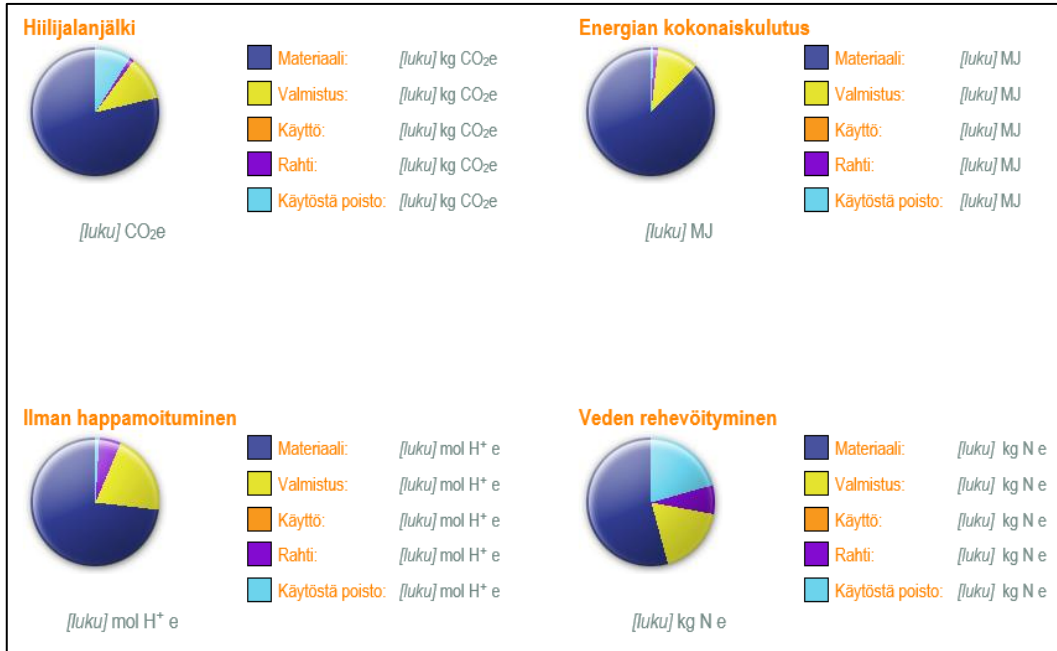
Paschaloudis KD, Zekios CL, Trichopoulos GC, Farmakis F ja Kyriacou GA (2021) An Eigenmode Study of Nanoantennas from Terahertz to Optical Frequencies. *Electronics (Basel)* 10(22): 2782.

- Popa, L. I., & Popa, V. N. (2017) Products eco-sustainability analysis using CAD SolidWorks software. In MATEC Web of Conferences (Vol. 112, S. 06002). EDP Sciences.
- Potting, J., Hekkert, M. P., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017) Circular economy: measuring innovation in the product chain. Planbureau voor de Leefomgeving, (2544).
- Puolustusministeriö. (2021) F-35A -hävittäjäjärjestelmän hankinta. Muistio. Saatavilla: [https://www.defmin.fi/files/5295/Liite\\_2\\_-\\_Hankintapaatoksen\\_julkinen\\_perustelumuistio.pdf](https://www.defmin.fi/files/5295/Liite_2_-_Hankintapaatoksen_julkinen_perustelumuistio.pdf)
- Puolustusvoimat. (2020) F/A-18 Hornetin elinkaaren jatkaminen. ILMAVE muistio CQ5454. Saatavilla: [https://www.defmin.fi/files/4924/Hornetin\\_elinkaari\\_20200624.pdf](https://www.defmin.fi/files/4924/Hornetin_elinkaari_20200624.pdf)
- Radiall (2002) SMA / Adjustable square flange jack receptacle with cylindrical contact. Tietolomake. Saatavilla: <https://radiall-files.s3.amazonaws.com/tds/coaxialconnectors/R125415271%20C.pdf>
- Rajan, R., Kah, P., Mvola, B., & Martikainen, J. (2016) Trends in aluminium alloy development and their joining methods. Rev. Adv. Mater. Sci, 44(4), 383-397.
- Rouxel, B., Mischler, S., Logé, R., & Munoz, A. I. (2023) Wear behaviour of novel copper alloy as an alternative to copper-beryllium. Wear, 524, 204817.
- Roy, P., & Dutta, A. (2019) Life cycle assessment (LCA) in municipal waste management decision making. Kirjassa: Al-Salem S.M. Plastics to Energy. William Andrew Publishing. S. 377-402
- SFS-EN 573-3:2019 + A2:2024. 2024. Alumiini ja alumiiniseokset. Muokattujen tuotteiden kemiallinen koostumus ja tuotemuodot. Osa 3: kemiallinen koostumus ja tuotemuodot. Helsinki: SFS Suomen Standardit ry.
- SFS-EN ISO 898:1:2013. 2013. Kiinnittimien lujuusominaisuudet. Seostamattomat ja Seosteräkset. Osa 1: ruuvien ja vaarnaruuvien lujuusluokat. Vakiokierre ja taajakierre. Helsinki: Suomen standardoimisliitto.
- Shah, A. N., Tanveer, M., Hussain, S., & Yang, G. (2016) Beryllium in the environment: Whether fatal for plant growth?. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 15, 549-561.
- Sievälä, A. (2020). Valvontalentokoneen elinjaksonhallinta. Maanpuolustuskorkeakoulu.
- Skärin, F., Rösiö, C., & Andersen, A. L. (2022) An explorative study of circularity practices in swedish manufacturing companies. Sustainability, 14(12), 7246
- Torrubia, J., Valero, A., & Valero, A. (2023) Energy and carbon footprint of metals through physical allocation. Implications for energy transition. Resources, Conservation and Recycling, 199, 107281.
- Traficom. (2024) Liikennekäytössä olevat henkilöautot - käyttövoimat, päästöt ja keski-ikä. Verkkosivu. Viitattu 3.4.2024. Saatavilla: <https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/liikennekaytossa-olevat-henkiloautot-kayttovoimat-paastot-ja-keski-ika>
- Väisänen, L. (2017) Panssaroitujen ajoneuvojen elinkaarikustannusten minimointi. Maanpuolustuskorkeakoulu.

Xia, X., Du, Z., Zhang, J., Song, D., & Weng, G. J. (2022) The influence of ambient temperature and X-band frequency on EMI shielding performance of graphene/silica nanocomposites. *Mechanics of Materials*, 173, 104419.

Yashpal, Jawalkar, C.S. & Kant, S. (2015) A Review on use of Aluminium Alloys in Aircraft Components. *i-Manager's Journal on Material Science*, vol. 3, no. 3, 33-38.

**Liite 1. Esimerkki tietokoneavusteisen elinkaaritarkastelun keskeisistä tuloksista**

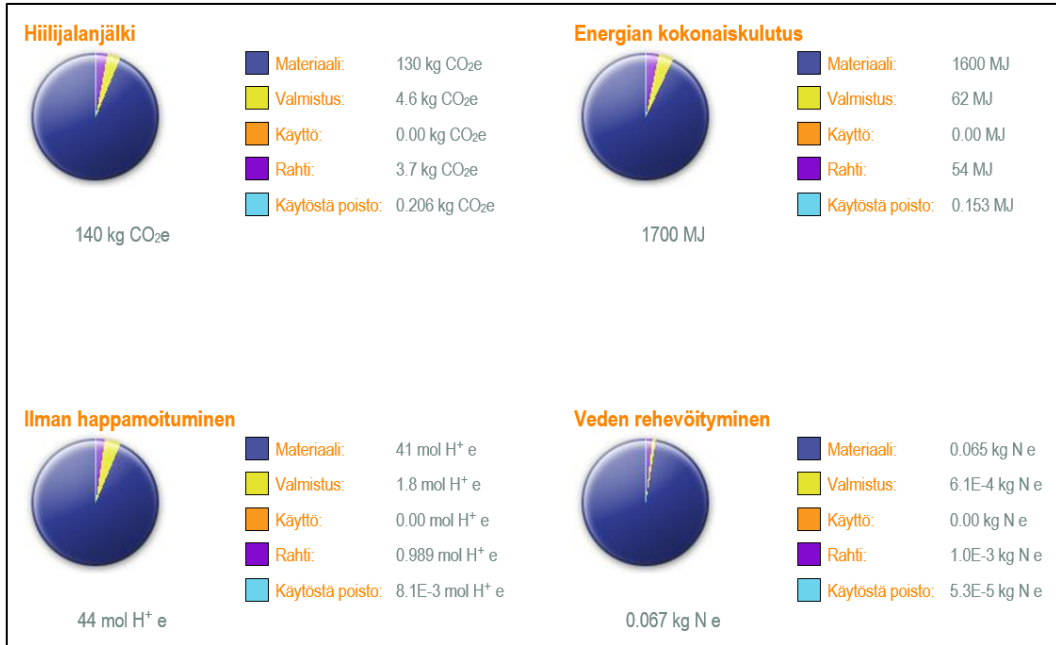


**Kuva 1. Esimerkki Solidworks -ohjelmiston tuottamasta ympäristövaikutus kaaviosta elinkaaren vaiheittain. [käännetty suomeksi]**

Komponentti	Hiili	Vesi	Ilma	Energia
Komponentti 1	[luku] ██████████	[luku] ██████████	[luku] ██████████	[luku] ██████████
Komponentti 2	[luku] █	[luku] █████	[luku] █	[luku] █

**Kuva 2. Esimerkki Solidworks -ohjelmiston tuottamasta ympäristövaikutus kaaviosta komponenteittain. [käännetty suomeksi]**

**Liite 2.** Tietokoneavusteisen elinkaaritarkastelun tulokset alkuperäiselle osalle



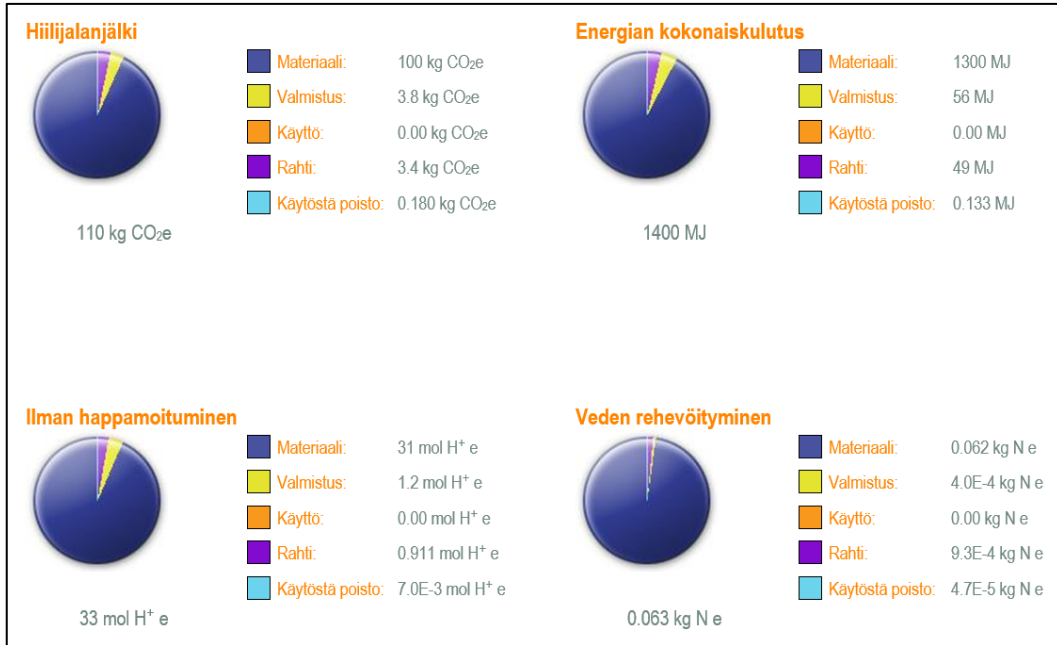
**Kuva 1.** Solidworks -ohjelmiston tuottama kaavio ympäristövaikutuksista elinkaaren vaiheittain. [käännetty suomeksi]

Komponentti	Hiili	Vesi	Ilma	Energia
Runko	1.3	1.3E-4	0.436	16
Oikea lohko	0.707	6.8E-5	0.237	8.6
Vasen lohko	0.607	5.8E-5	0.203	7.4
Pohja lohko	0.465	4.5E-5	0.156	5.6

**Kuva 2.** Solidworks -ohjelmiston tuottama kaavio ympäristövaikutuksista komponenteittain. Kaaviossa esitetty ainoastaan parannusehdotusten mukaiset osat. [käännetty suomeksi]



**Liite 3. Tietokoneavusteisen elinkaaritarkastelun tulokset muokatulle osalle**



**Kuva 1. Solidworks -ohjelmiston tuottama kaavio ympäristövaikutuksista elinkaaren vaiheittain. [käännetty suomeksi]**

Komponentti	Hiili	Vesi	Ilma	Energia
Runko	0.998	8.9E-5	0.315	12
Oikea lohko	0.562	5.0E-5	0.177	6.9
Vasen lohko	0.477	4.3E-5	0.151	5.8
Pohja lohko	0.336	3.0E-5	0.106	4.1

**Kuva 2. Solidworks -ohjelmiston tuottama kaavio ympäristövaikutuksista komponenteittain. Kaaviossa esitetty ainoastaan parannusehdotusten mukaiset osat. [käännetty suomeksi]**