

Pauliina Piirainen

MAGNEETTIKUVAUSLAITTEEN ELIN- KAAREN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

Kandidaatintyö
Lääketieteen ja terveysteknologian tiedekunta
Tarkastaja: Minna Veiranto
Huhtikuu 2024

TIIVISTELMÄ

Pauliina Piirainen: Magneettikuvaslaitteen elinkaaren ympäristövaikutukset
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Bioteknologia ja biolääketieteen tekniikka
Huhtikuu 2024

Terveydenhuollolla on tärkeä merkitys yhteiskunnassa, mutta se aiheuttaa paljon kasvihuonekaasupäästöjä. Kasvihuonekaasupäästöt edistävät ilmastonmuutosta, joka puolestaan on terveyttä vaarantava tekijä. Yli puolet päästöistä aiheutuu energiankulutuksen vuoksi. Radiologia on yksi energiakuluttavimmista osastoista terveydenhuollossa, ja magneettikuvaus on yksi radiologian suurimmista energiasyöpiä.

Tämä kandidaatintyö on kirjallisuuskatsaus, jonka tarkoituksena on selvittää magneettikuvaslaitteen elinkaari ja sen ympäristövaikutukset. Työn tarkoituksena on lopulta löytää elinkaaren eniten kuluttava vaihe. Työssä käydään läpi magneettikuvaslaitteen toimintaperiaatetta sekä elinkaaren eri vaiheita ensin lyhyesti kokonaisuutena. Tämän jälkeen elinkaaren vaiheisiin, valmistukseen, kuljetukseen, käyttöön sekä loppusijoitukseen, ja niiden aiheuttamiin ympäristövaikutuksiin syvennytään tarkemmin.

Magneettikuvaslaitteen valmistukseen kuuluvat materiaalien valmistus ja hankinta, laitteen kokoaminen sekä materiaalien ja valmiin laitteen kuljetukset. Magneettikuvaslaitteeseen tarvitaan useita materiaaleja, joiden hankinta tuottaa ilmansaasteita ja jätteitä, jotka vaikuttavat ympärillä oleviin ekosysteemeihin. Magneettikuvaslaitteen valmistukseen tarvitaan myös energiaa, joka aiheuttaa hiilidioksidipäästöjä. Kuljetuksessa käytetyt fossiiliset polttoaineet aiheuttavat kasvihuonekaasupäästöjä, muita ilmansaasteita sekä muun muassa melusaastetta, joka häiritsee eliöiden normaalia toimintaa.

Käyttövaihe jakautuu puolestaan puhdistukseen, huoltoon ja sähkönkulutukseen. Magneettikuvaslaite tulee puhdistaa jokaisen potilaan jälkeen. Laitteen huollolla puolestaan on mahdollista pidentää sen elinikää ja näin vähentää valmistuksesta aiheutuvia ympäristövaikutuksia. Käytön sähkönkulutus on korkea, koska laitetta ei ikinä suljeta. Magneettikuvaslaitteen käytön energiankulutus onkin nelinkertainen verrattuna valmistuksen kulutukseen. Korkean sähkönkulutuksen vuoksi myös siitä aiheutuvat hiilidioksidipäästöt ovat huomattavat. Sähkönkulutuksen suuruuteen on mahdollista kuitenkin vaikuttaa eri keinoilla, kuten käyttöasteen suurentamisella.

Käytöstä poiston jälkeen magneettikuvaslaitteelle tulee löytää sopiva loppusijoituspaikka. Yksi vaihtoehto on muun muassa lahjoittaminen niille, jotka eivät pysty itse ostamaan uutta laitetta. Parempi vaihtoehto on kuitenkin kierrättää laite, jotta osat ja materiaalit saadaan uudelleen käytettyä. Näin saadaan myös seuraavan laitteen valmistuksen ympäristövaikutuksia pienennettyä. Kierrätettyjen materiaalien käytön ansiosta ei tarvita uusia materiaaleja, joiden hankinnalla on suurempi ympäristökuorma kuin kierrätetyillä.

Magneettikuvaslaitteen elinkaarin tutkimisen tuloksena lopulta löytyi elinkaaren eniten kuluttavat vaiheet, jotka ovat valmistuksen materiaalien hankinta sekä käytön sähkönkulutus. Käytön sähkönkulutus on suurin verrattuna muihin elinkaaren vaiheisiin. Tämän vuoksi myös käytön hiilidioksidipäästöt ovat korkeimmat. Materiaalien hankinta puolestaan aiheuttaa muita päästöjä ja ympäristövaikutuksia, jotka ovat suuremmat kuin muiden elinkaaren vaiheiden.

Avainsanat: magneettikuvaslaite, ympäristövaikutus, hiilidioksidipäästöt, elinkaari

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. MAGNEETTIKUVAUSLAITE.....	3
2.1 Magneettikuvauslaitteen elinkaari.....	4
3. MAGNEETTIKUVAUSLAITTEEN VALMISTUS.....	7
3.1 Käytettyjen materiaalien ympäristövaikutukset.....	7
3.2 Energian ja kuljetuksen vaikutukset päästöihin	10
4. MAGNEETTIKUVAUSLAITTEEN KÄYTTÖ	13
4.1 Magneettikuvauslaitteen sähkönkulutus.....	13
4.2 Sähkönkulutuksen hiilidioksidipäästöt.....	16
5. MAGNEETTIKUVAUSLAITTEEN LOPPUSIJOITUKSEN EKOLOGISUUS	19
6. YHTEENVETO.....	21
LÄHTEET	23

LYHENTEET JA MERKINNÄT

LF MRI	engl. low-field magnetic resonance imaging, matalan kentän magneettikuvaus
MRI	engl. magnetic resonance imaging, magneettikuvaus
NMR	engl. nuclear magnetic resonance, ydinmagneettinen resonanssi
PET	polyeteenitereftalaatti
RF	engl. radiofrequency, radiotaajuus
SNR	engl. signal-to-noise ratio, signaali-kohinasuhde
CO ₂ e/kg	hiilidioksidiekvivalentti per kilogramma
kWh	kilowattitunti
MJ	megajoule
T	tesla

1. JOHDANTO

Terveydenhuollon tarkoituksena on edistää ja turvata terveyttä. Siitä huolimatta se on merkittävä vaikuttaja ilmastonmuutokseen, joka puolestaan on yksi 2000-luvun suurimmista terveyttä uhkaavista tekijöistä. Fossiilisten polttoaineiden palaminen aiheuttaa ilmansaasteita, jotka ilmastonmuutoksen lisäksi vaikuttavat sairaalahoitoa tarvitseviin kroonisiin sairauksiin. Tämä puolestaan aiheuttaa terveydenhuollon päästöjen kasvamista, joka edistää ilmastonmuutosta entisestään. Kun terveydenhuollon päästöjä verrataan maiden kokonaispäästöihin, terveydenhuolto sijoittuu viidenneksi suurimmaksi päästölähteeksi. [1]

Terveydenhuollon osuus maailman kasvihuonekaasupäästöistä on 4,4 %, joka tarkoittaa 1,6 Gt hiilidioksidipäästöjä. Nämä päästömäärät vertautuvat elintarviketeollisuuden päästöihin, ja vain alat liittyen energiaan, kuljetukseen ja rakentamiseen ohittavat terveydenhuollon päästöt. Suomessa terveydenhuollon hiilijalanjälki on 3,9 Mt ja sen osuus on 5,3 % kokonaispäästöistä. Käytännössä tämä tarkoittaa, että terveydenhuollosta aiheutuu noin 720 kg hiilidioksidipäästöjä yhtä suomalaista kohden. [2] 720 kg hiilidioksidipäästöjä vertautuu melkein 3000 km bensiinikäyttöisellä kulkuneuvolla ajettuun matkaan [3].

Terveydenhuollon kasvihuonekaasupäästöt aiheutuvat energiankulutuksesta, kuljetuksesta sekä tuotteiden valmistuksesta, käytöstä ja hävittämisestä. Maailmanlaajuisesti terveydenhuollon päästöt vertautuvat 514 hiilivoimalan päästöihin. Terveydenhuollon päästöt voidaan jakaa kolmeen osaan. Suurimman osan vie tuotteiden valmistus, kuljetus, käyttö ja hävittäminen sekä palvelut, jotka yhdessä ovat 71 % kokonaispäästöistä. Päästöt suoraan terveydenhuollon laitoksilta ovat 17 % ja sähkön epäsuorat päästöt, kuten lämmitys, ovat 12 % kokonaispäästöistä. [1]

Näiden kolmen osa-alueen päästöistä yli puolet johtuu energiankulutuksesta [1]. Terveydenhuollon yksi suurimmista energiankuluttajista on radiologia ja kuvantaminen, joiden kasvihuonekaasupäästöt ovat noin prosentin maailmanlaajuisista kokonaispäästöistä. Radiologian sisällä magneettikuvaukseen (MRI) on huomattava päästölähde, sillä MRI-laite kuluttaa paljon energiaa. [4] Uhkaavan ilmastonmuutoksen ja sen terveyshaittojen vuoksi terveydenhuollon ekologista kestävyyttä pitäisi huomioida paremmin. Radiologian ja erityisesti magneettikuvauksen energiankulutukseen pitää kiinnittää huomiota, jotta päästöt pysyisivät kohtuullisina.

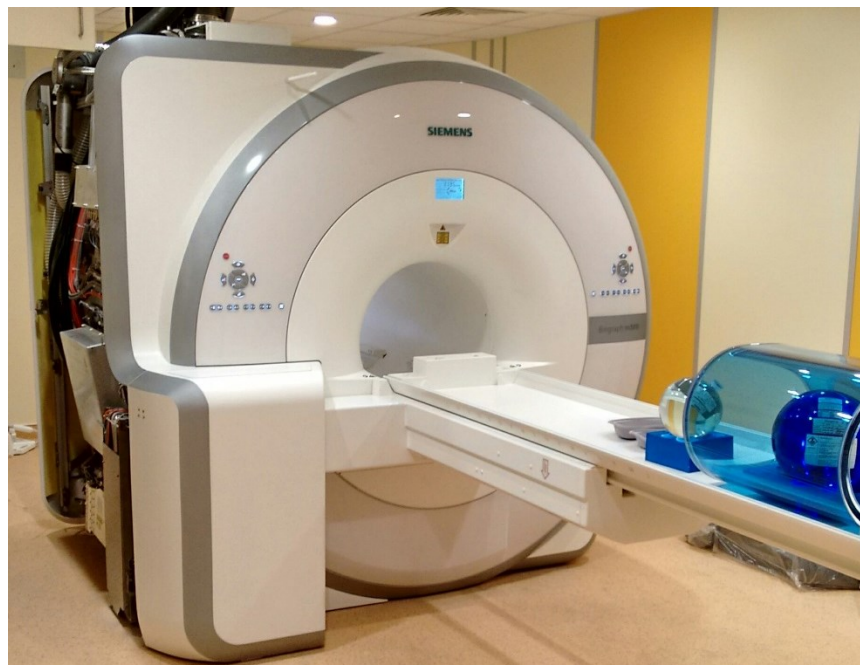
Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on tutkia MRI-laitteen elinkaarta ja sen ympäristövaikutuksia. Tarkoituksena on selvittää elinkaaren eniten kuluttavat vaiheet. Työn alussa käydään lyhyesti läpi MRI-laitteen toiminta ja elinkaari, minkä jälkeen luvussa 3 syvennytään tarkemmin valmistuksen aiheuttamiin ympäristövaikutuksiin. Seuraavaksi käsitellään MRI-laitteen sähkönkulutusta ja sen aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä luvussa 4. Viimeisessä luvussa tarkastellaan, mitä MRI-laitteelle tapahtuu käytöstä poistamisen jälkeen ja sen ekologisuutta.

2. MAGNEETTIKUVAUSLAITE

Magneettikuvauslaite (MRI-laite) on radiologinen kuvantamislaitte, jolla voidaan magneettikentän ja matalataajuuksisten signaalien avulla tutkia kehoa. MRI-laitteen avulla saadaan anatomisia, metabolisia, fysiologisia sekä kemiallisia tietoja kehosta. Magneettikuvan muodostamista varten potilas laitetaan magneettikenttään, jolloin magnetointivektorin tasapaino muutetaan radiotaajuuspulssin avulla. Vektorin palatessa tasapainoon kerätään signaalit, jotka muokataan kuviksi tietokoneella. [5]

MRI perustuu ydinmagneettiseen resonanssiin (NMR), jossa ulkoinen magneettikenttä ja ytimet, joilla on nollasta eroavat magneettiset momentit, vuorovaikuttavat keskenään. NMR-signaali muodostuu useista eri ytimien lähettämistä signaaleista, joilla on magneettikentän takia eri vaihe ja taajuus keskenään. Fourier-muunnoksen avulla signaalit saadaan eroteltua toisistaan kuvan muodostamista varten. [6]

Pehmytkudosten välinen terävä kontrasti sekä korkea spatiaalinen resoluutio ovat nostaneet MRI:n tärkeäksi kuvantamismenetelmäksi. MRI-laite ei myöskään tarvitse ionisoivaa säteilyä kuvantamiseen, mikä tekee siitä hieman turvallisemman kuin muista kuvantamismenetelmistä. [6] Kuvassa 1 on MRI-laite.



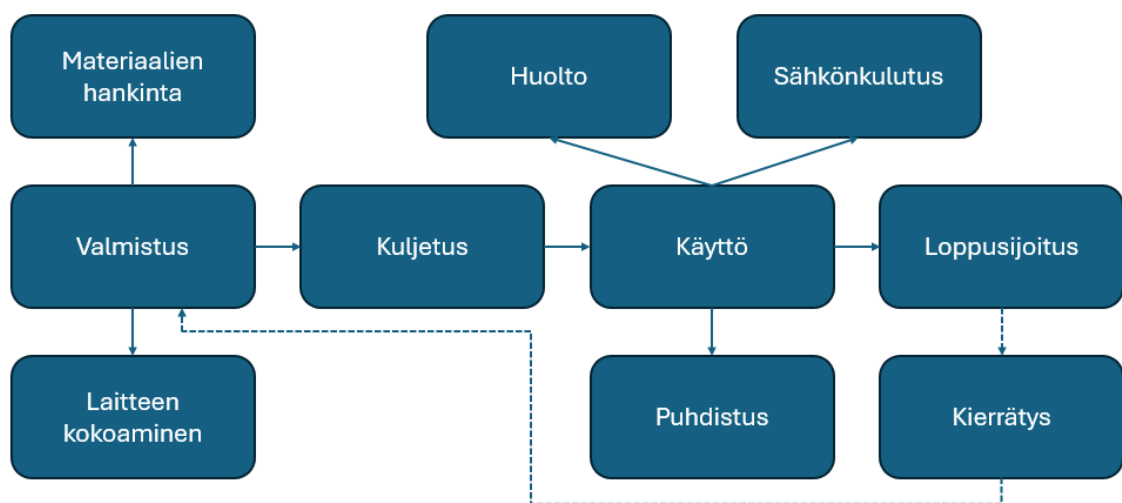
Kuva 1. *Magneettikuvauslaite* [7]

Magneettikuvauksen aikana potilas asetetaan tasolle, joka liikkuu laitteen sisään. MRI-laitteen sisällä potilas on vahvassa magneettikentässä. Kuvauksen aikana potilaan pitää pysyä paikoillaan, jotta kuvasta saadaan mahdollisimman selkeä. Mahdollisilla suomensisäisesti annettavilla kontrastiaineilla saadaan ytimet asettumaan uudelleen magneettikenttään, mikä auttaa tekemään kuvasta kirkkaamman. [8] Kuvantamista varten valitaan sekvenssejä, joilla on erilaiset kontrastit ja resoluutiot. Useiden sekvenssien avulla saadaan useita erilaisia kuvia, jolloin diagnosointi on tarkempaa. [9]

MRI-teknologian kehittyessä 1980-luvun alussa laitteita oli vain 12 koko maailmassa, mutta MRI on kasvanut nykypäivään mennessä. Nykyään MRI-laitteita myydään vuosittain noin 5000 ja käytössä olevia laitteita arvellaan olevan maailmanlaajuisesti jopa 50 000. Tavallisesti 12–15 MRI-laitetta miljoonaa asukasta kohden riittää väestön lääketieteellistä kysyntää varten. Kuitenkin rikkailla mailla, joiden markkinoilla on enemmän kysyntää kuin tarjontaa, on riski tarpeettomaan magneettikuvaukseen samalla, kun kaikilla mailla ei ole tarpeeksi MRI-laitteita. [10]

2.1 Magneettikuvauslaitteen elinkaari

MRI-laitteen elinkaareen kuuluvat valmistus, käyttö ja loppusijoitus sekä kuljetukset eri elinkaaren vaiheissa. Valmistukseen kuuluvat materiaalien hankinta ja valmistus sekä laitteen kokoaminen. Käyttöön puolestaan kuuluvat sähkönkulutus, laitteen huolto ja puhdistus. [11] Valmistukseen ja kuljetukseen kuluu noin 20 % koko MRI-laitteen elinkaaren aikaisesta energiankulutuksesta. Tämä tarkoittaa, että lähes 80 % energiankulutuksesta tapahtuu käytön aikana. [12] Kuvassa 2 on esitetty MRI-laitteen elinkaaren vaiheet.



Kuva 2. Magneettikuvauslaitteen elinkaaren vaiheet, perustuu lähteeseen [11]

Valmistusprosessi materiaalien hankinnasta aina kuljetukseen asti kuluttaa 2,73 miljonna MJ (megajoulea) uusiutumattomia polttoaineita [12]. Tämä energiamäärä tuottaa yli 325 000 kg hiilidioksidipäästöjä [3]. Vaikka valmistukseen kuluu vain viidesosa koko elinkaaren energiankäytöstä, valmistusprosessin aikana syntyy kasvihuonekaasupäästöjä sekä jätteitä. MRI-laitteen valmistuksessa tarvitaan useita eri materiaaleja, kuten metalleja [13], joiden valmistus muun muassa kuluttaa paljon energiaa ja luonnonvaroja sekä edistää ilmastonmuutosta ja happamoitumista [14].

MRI-laitteen valmistusvaiheessa tapahtuu materiaalien ja valmiin laitteen kuljetusta paikasta toiseen. Kuljetus aiheuttaa kasvihuonekaasupäästöjä, jotka lämmittävät ilmakehää. Myös muita ilmansaasteita vapautuu kuljetuksen takia, ja ne voivat laskeutua maaperään ja vesistöihin saastuttaen niitä. [15], [16] MRI-laitteen valmistusprosessia ja kuljetusta sekä niiden ympäristövaikutuksia tarkastellaan tarkemmin luvussa 3.

Käytön aikaisiin ympäristövaikutuksiin vaikuttavat sähkönkulutus, laitteen huolto ja korjaus sekä puhdistus ja desinfiointi. Kiertotalouteen siirtyminen on ympäristön kannalta kestävämpi vaihtoehto kuin lineaarinen talousmalli. Kun osa MRI-laitteesta menee epäkuntoon, on parempi vaihtaa tämä osa kuin ostaa kokonaan uusi laite. Koska uuden laitteen rakentaminen tuottaa merkittävästi päästöjä, on suotavaa huoltaa laitetta samalla pidentäen sen elinikää. [4]

MRI-laite suositellaan puhdistettavaksi jokaisen potilaan välillä, jotta laitteeseen ei jää biovaarallisia tartuntatekijöitä ja laite pysyy turvallisena. Puhdistukseen tarvitaan useita kertakäyttöisiä liinoja, saippuaa sekä vettä. Desinfiointiin tarvitaan myös liinoja sekä desinfiointiainena käytetään joko isopropanolia, etanolia tai etanolia, johon on lisätty klooriheksidiiniä. [17] Laitteen puhdistus kuluttaa luonnonvaroja, mutta se on erittäin tarpeellinen osa käyttöä.

Huomattava osa käytön aikaisesta sähköstä kuluu kuvantamisen ulkopuolella, koska MRI-laitteet tarvitsevat jatkuvaa sähköä jäähtytykseen [4]. MRI-laitteiden sähkönkulutukseen vaikuttavat monet eri asiat, joista ehkä merkittävimpiä ovat käyttöaste ja -aika vuorokaudessa. Nämä määräävät, kuinka paljon sähköä kuluu niin sanotusti turhaan joutokäyntiin. [18] Lisää MRI-laitteen sähkönkulutukseen vaikuttaviin asioihin ja sen aiheuttamiin hiilidioksidipäästöihin syvennyttään luvussa 4.

MRI-laitteen kestävään käyttöön liittyy myös helium. Heliumia käytetään jäähdyttämään MRI-laitteen magneetti suprajohtavaksi. Se on avaruuden toiseksi yleisin alkuaine, mutta maapallolla se on harvinainen. Pääasiassa heliumia muodostuu raskaiden alkuaineiden radioaktiivisessa hajoamisessa miljoonien vuosien aikana, mikä tekee siitä rajallisen luonnonvaran. [4] Maapallon heliumin on arvioitu riittävän enää parikymmentä

vuotta [11]. Kestävämpiä ratkaisuja MRI-laitteen heliumjäähdytykseen on harkittava, koska heliumvarastot ehtyvät sekä heliumhäviötä voi tapahtua elinkaaren kaikkien vaiheiden aikana [4].

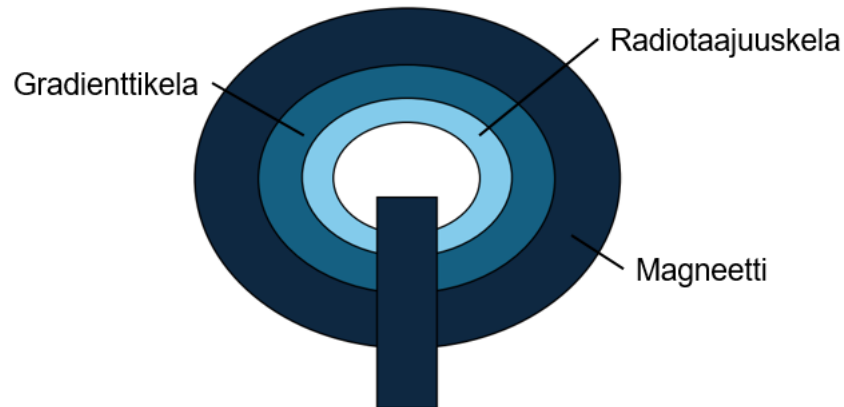
Kun MRI-laite on elinkaarensa lopussa, se pitää loppusijoittaa oikein. Hyvällä materiaalien kierrätyksellä ja uudelleenkäytöllä energiankulutusta voidaan vähentää sekä kasvihuonekaasupäästöt pysyvät pienempinä [11]. Euroopan unionin alueella on voimassa direktiivi, jonka mukaan MRI-laitteet täytyy muun muassa käsitellä asianmukaisesti sekä kierrätettävä oikein [19]. Enemmän MRI-laitteen loppusijoitukseen keskitytään luvussa 5.

3. MAGNEETTIKUVAUSLAITTEEN VALMISTUS

MRI-laitteen ympäristökuormaan on mahdollista vaikuttaa laitteen valmistuksella esimerkiksi tuottamalla laitteita, joilla on pienempi energiankulutus. Tällä hetkellä kuitenkin hankintahintaa priorisoidaan laitteen ekologisuuden yli. [11]

3.1 Käytettyjen materiaalien ympäristövaikutukset

MRI-laitteen neljä tärkeintä osaa ovat magneetti, gradientti- ja radiotaajuuskela (RF-kela) sekä tietokonejärjestelmät [5]. Kuvassa 3 on esitetty MRI-laitteen magneetti ja kelat sekä miten ne sijoittuvat toisiinsa nähden.



Kuva 3. *Magneettikuvauslaitteen magneetti, radiotaajuus- ja gradienttikela, muokattu lähteestä [5]*

MRI-laitteen magneetin valmistus alkaa valmistamalla magneetin ympärille alumiininen putki, joka laitetaan erilliseen testiputkeen heliumkaasun kanssa. Tämä varmistaa, että kaikki saumat ovat tiukat eikä tapahdu vuotoja. Testauksen jälkeen magneetin ympärille laitetaan toinen alumiinikerros, joka ympäröidään tiukasti alumiini-mylar-kalvolla. Viimeisenä magneetti asetetaan muovipäällysteisen teräskuoren sisälle, joka maalataan valkoiseksi. Valmiiseen magneettiin lisätään nestemäistä heliumia, joka tekee magneetista suprajohtavan. [13]

Gradienttikela muodostuu lasikuituepoksiputkesta, jonka ympärille kierretään niobium-titaani-kuparilankaa [5], [13]. Putken pinnalle lisätään epoksia ja kuparilaattoja, jotka peitetään teflonkankaalla. Kankaan päälle valutetaan epoksihartsia, minkä jälkeen kelan ympärille laitetaan putki, joka ympäröidään vielä lasikuitukuorella. [13]

Myös RF-kelan perustana toimii lasikuituputki. Putkeen kiinnitetään muovilevyjä, joihin asetetaan tarttuvia kupariliuskoja. Levyihin liimataan epoksilla kondensaattoreita ja ruuvataan korkeajännitteisiä induktorilevyjä. Kelaan liitetään myös muovinen ura, johon vedetään päävirtakaapeli. Lopuksi kupariliuskat vahvistetaan komposiittilevyillä ja kaapelit epoksilla. Tämän jälkeen RF-kela on valmiina testaukseen, jossa saippuaveden avulla etsitään vuotoja. Sitten osat ovat valmiita ja ne voidaan koota laittamalla RF-kela gradienttikelan sisälle ja tämä puolestaan magneetin sisälle. [13] Taulukkoon 1 on koottu MRI-laitteeseen tarvittavat materiaalit ja mihin niitä käytetään laitteen kokoamisvaiheessa.

Taulukko 1. *Magneettikuvauslaitteen materiaalit ja niiden käyttötarkoitukset, perustuu lähteisiin [5], [13]*

Materiaali	Tarkoitus
Alumiini	Magneetissa useita kerroksia
Teräs	Kuori magneetin ympärillä
Niobium	Lanka gradienttikelan ympärillä
Titaani	
Kupari	Lanka gradienttikelassa ja liuskat RF-kelassa
Helium	Magneetin jäädytys
Mylar	Magneetti ympäröidään kalvolla
Epoksi	Gradienttikelan perusta ja liima kelojen osissa
Lasikuitu	Kelojen perustat

MRI-laitteessa käytetään useita metalleja, joiden valmistus aiheuttaa erilaisia ympäristövaikutuksia. Louhinnan ja valmistuksen aikana syntyy kiinteitä, nestemäisiä sekä kaasumaisia jätteitä. Metallien eristys malmista puolestaan kuluttaa runsaasti sähköä, polttoaineita ja luonnonvaroja. Kevyillä metalleilla, kuten alumiinilla ja titaanilla, on suurimmat ympäristövaikutukset liittyen ilmastonmuutokseen, energiankäyttöön sekä happamoitumiseen. Tämä johtuu käytettyjen energianlähteiden aiheuttamien kasvihuonekaasujen ja happamien kaasujen vuoksi. Esimerkiksi kuparin valmistus tuottaa kuitenkin eniten kiinteää jätettä, sillä sen louhinnassa syntyy enemmän kaivosjätettä. [14]

Alumiinin myrkyllisyyteen vaikuttaa vahvasti pH-arvo, sillä happamissa olosuhteissa alumiini on liukoista. Neutraaleissa olosuhteissa alumiini on kuitenkin suhteellisen haittonta. Alumiinin pääsy ympäristöön rajoittaa muun muassa kasvilajien kasvua ja vesieläiden selviytymistä sekä lisääntymistä. Alumiini aiheuttaa myös metsäkuolemia ja välillisiä vaikutuksia lintuihin ja nisäkkäisiin. [20] Koko alumiinin tuotantoprosessi vaatii 211 MJ energiaa yhtä alumiinikiloa kohden. Hiilidioksidipäästöjä vapautuu valmistuksen aikana 22,4 kg CO₂e/kg (hiilidioksidiekvivalentti per kilogramma). [14]

Rauta- ja terästeollisuuden energiankulutus on yksi maailman suurimmista eri teollisuudenalojen välillä. Energiankulutuksen lisäksi terästeollisuus tuottaa paljon kasvihuonekaasuja, jotka edistävät ilmastonmuutosta. [21] Teräksen valmistukseen kuluu 23 MJ/kg energiaa ja hiilidioksidipäästöjä muodostuu 2,3 kg CO₂e/kg [14]. Toisaalta rautamalmeissa on hyvä pitoisuus, mikä pitää teräksen piilovirrat matalampina kuin muiden metallien. Teräs on kierrätettävä materiaali, jota voidaan käyttää uudelleen. Kierrätetyn teräksen tuotannolla on pienemmät ympäristövaikutukset kuin malmista tuotetulla teräksellä. [22]

Niobiumin eristys malmista vaatii paljon sähköä, vettä sekä uusiutumattomia energiaa. Niobiumin valmistus voi tuottaa jopa 40 tonnia kiinteää jätettä yhtä kiloa ferroniobiumia kohden. Ferroniobiumissa on 66 % niobiumia, 30 % rautaa sekä pieniä määriä muita metalleja. Suurin osa valmistuksen jätteestä sijoitetaan veden virtausta rajoittaviin pahtoihin, jolloin niitä ei voida käyttää uudelleen. Myös ilmansaasteita, kuten lyijyä ja rikki-dioksidia, muodostuu valmistuksessa. [23]

Kupari on tärkeä alkuaine elämälle tärkeissä prosesseissa. Liian suuret pitoisuudet ympäristössä kuitenkin aiheuttavat ongelmia kasveille ja eläimille. Kuparin valmistuksen aiheuttamien päästöjen lisäksi myös kuparin louhinnalla sekä valmistusmenetelmillä on negatiivisia vaikutuksia maaperään, ilmakehään sekä vesistöihin. [24] Kuparin valmistus kuluttaa valmistustavasta riippuen 33–64 MJ/kg energiaa ja sen hiilidioksidipäästöt ovat 3,3–6,2 kg CO₂e/kg. Kiinteää jätettä syntyy 64–125 kg valmistuksen aikana. [14]

MRI-laitteen saumojen testaukseen ja magneetin jäähdytykseen käytetään heliumia, joka on jalokaasu. Jalokaasut ovat inerttejä eli ne eivät reagoi toisten yhdisteiden kanssa, mikä tekee heliumista ympäristölle vaarattoman. Toisaalta helium on erittäin harvinainen alkuaine maapallolla ja sitä saadaan pääosin maakaasun louhinnan sivutuotteena, joka puolestaan aiheuttaa ilmansaasteita. [25]

Mylarkalvoa, joka on biakksiaalisesti orientoitu polyeteenitereftalaatti, käytetään magneetin ympäröimiseen. Mylar on tehty samoista raaka-aineista kuin polyeteenitereftalaatti (PET), mutta ne ovat valmistettu eri metodeilla. [26] PET valmistetaan fossiilista raaka-aineista, mikä kuluttaa maapallon valmiiksi hupenevia varastoja. Sen valmistukseen tarvitaan myös paljon energiaa, joka tuottaa merkittävän määrän hiilidioksidipäästöjä. [27]

Epoksia käytetään useaan kertaan sekä gradienttikelassa että RF-kelassa. Epoksin valmistus on monivaiheinen prosessi, joka vaatii paljon energiaa. Energiana käytetään fossiilisia energianlähteitä, jotka aiheuttavat hiilidioksidipäästöjä. Glyseriinipohjaisen epoksin valmistus tuottaa noin 4,6 kg CO₂e/kg ja propeenipohjaisen noin

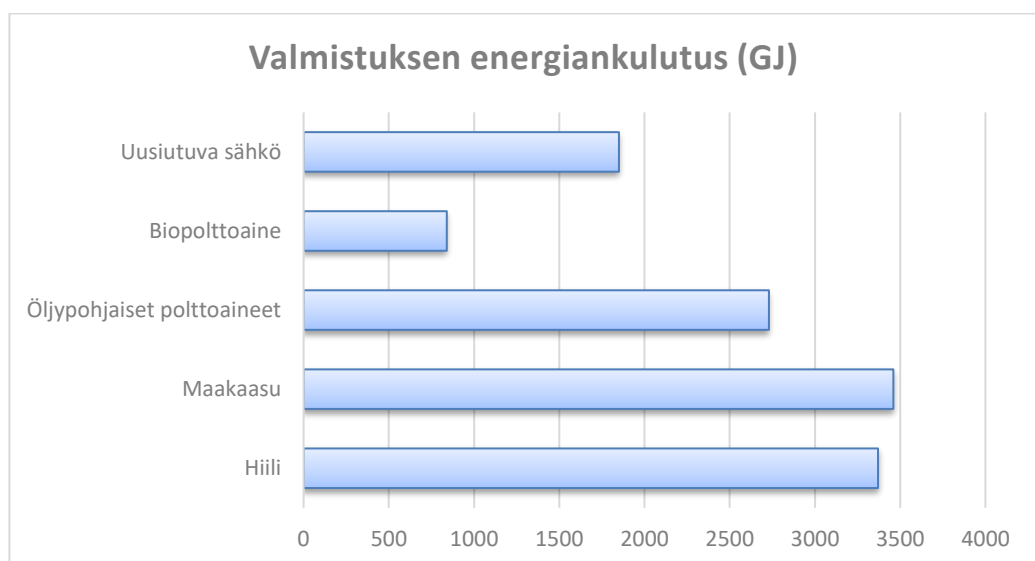
8,7 kg CO₂e/kg hiilidioksidipäästöjä. Epoksin valmistusprosessissa syntyy sivuvirtana myös muun muassa jäteveettä. [28]

MRI-laitteen keloihin tarvitaan useita lasikuituputkia, joiden ympäristövaikutukset ovat huomattavat. Lasikuidun valmistuksessa käytetään pääasiassa uusiutumattomia energianlähteitä, mikä tuottaa merkittävästi päästöjä [29]. Sen valmistuksessa syntyy eri aineita ja yhdisteitä, jotka vaikuttavat negatiivisesti ilmanlaatuun, maaperään sekä vesistöihin. Lasikuidun valmistuksessa syntyy esimerkiksi 73,1 kg hiilidioksidipäästöjä, 2,4 g rautapäästöjä maaperään sekä kloridia 702 g vesistöihin. [30]

3.2 Energian ja kuljetuksen vaikutukset päästöihin

Valmistuksen päästöihin vaikuttaa merkittävästi käytetty energia. Marisa Martin ym. (2018) ovat vertailleet tutkimuksessaan kolmen eri kuvantamislaitteen valmistuksen ja käytön ympäristövaikutuksia Michiganin yliopistossa. Tutkimuksessa on laskettu valmistuksen kuluttama energiamäärä eri energianlähteille. MRI-laitteen valmistuksen energiankulutus on kahteen muuhun kuvantamistapaan, ultraääneen ja tietokonetomografiaan, verrattuna korkeampi. MRI-laitteen valmistukseen kuluu yhteensä 12 248 GJ energiaa. Ultraäänilaitteen valmistukseen kuluu vain 951 GJ ja tietokonetomografialaitteen valmistukseen 10 328 GJ energiaa. [12]

MRI-laitteen valmistuksen energiankulutuksesta hiilen osuus on noin 3370 GJ, maakaasun 3460 GJ, öljypohjaisten polttoaineiden 2730 GJ, biopolttoaineen 840 GJ ja uusiutuvan sähkön 1850 GJ. [12] Kuvassa 4 nähdään valmistukseen kuluva energia eri energianlähteiden osalta.



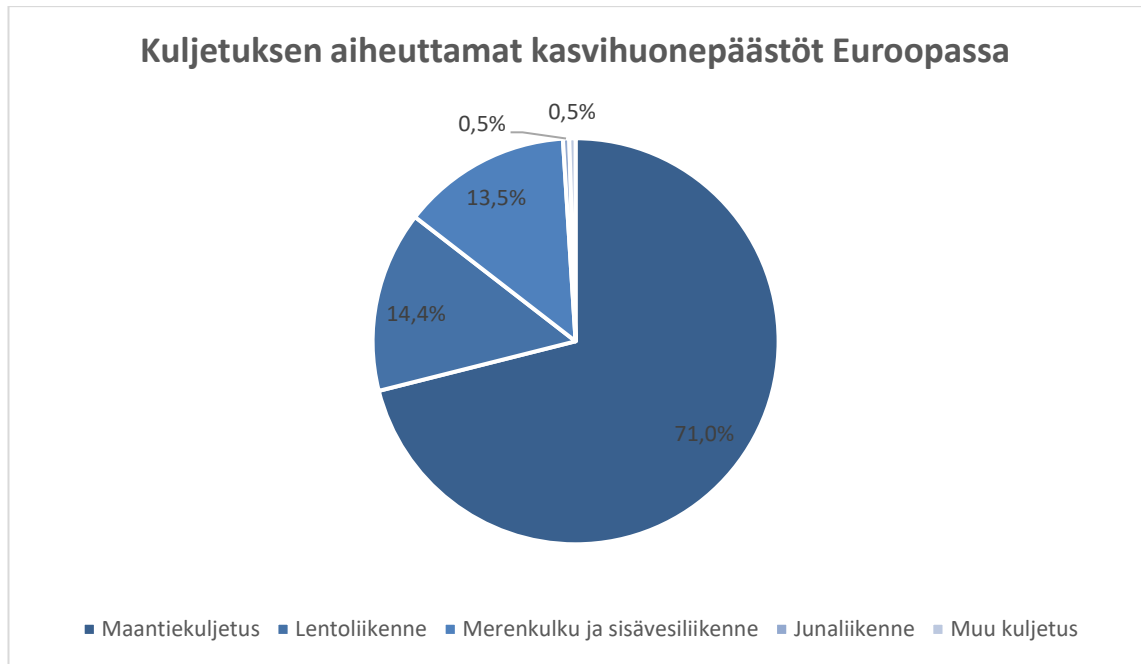
Kuva 4. Eri energianlähteiden osuudet magneettikuvauslaitteen valmistuksen energiankulutuksesta, perustuu lähteeseen [12]

Valmistus aiheuttaa ilmaan ja veteen päästöjä, jotka aiheuttavat muun muassa ilmaston lämpenemistä, happamoitumista, rehevöitymistä ja otsonikatoa sekä ihmisille syöpää ja muita terveyshaittoja. Merkittävimmät valmistuksen tuottamista päästöistä ovat hiilidioksidikaasu, otsoni ja tolueeni. Hiilidioksidia muodostuu 6,1 kg, otsonia 0,5 kg sekä tolueenia 9,8 kg yhtä magneettikuvausta kohden. Vaikka otsonin määrä on pienempi kuin hiilidioksidin ja tolueenin, otsonia vapautuu huomattavasti enemmän kuin muita päästöjä, joiden määrät ovat grammoissa mitattavia. MRI-laitteen valmistuksen aiheuttamat kokonaishiilidioksidipäästöt ovat 792 100 kg. [12]

Jotta valmistuksessa käytetyn energian ympäristövaikutuksia voitaisiin lieventää, pitäisi päästöjä saada vähennettyä. Nyt suurin osa päästöistä aiheutuu todennäköisesti fossiilisten polttoaineiden käytöstä, mikä myös kuluttaa paljon energiaa. Valmistuksessa käytetään tällä hetkellä vähemmän uusiutuvia energianlähteitä kuin uusiutumattomia [12]. MRI-laitteen valmistuksen kuluttama energiamäärän ympäristövaikutukset mahdollisesti saadaan matalammaksi, kun valitaan uusiutuva energianlähde fossiilisen energian sijaan.

Energiankäytön lisäksi myös kuljetus aiheuttaa päästöjä, sillä MRI-laitteiden valmistukseen käytettävät materiaalit pitää kuljettaa valmistuspaikalle sekä valmiit laitteet täytyy kuljettaa sairaaloihin. MRI-laitteen ja sen materiaalien kuljetus voi tapahtua niin lentokoneella, laivalla kuin maakulkuneuvoilla. Liikenneinfrastruktuuri vahingoittaa kuitenkin ekosysteemejä, koska infrastruktuuri muun muassa sirpaloittaa elinympäristöjä ja päällystää maata läpäisemättömillä pinnoilla [31].

Euroopassa kaikista kuljetuksen kasvihuonepäästöistä maantiekuljetuksen osuus on 71 %, joka on moninkertainen muihin kuljetustapoihin nähden. Lentoliikenne sekä merenkulku ja sisävesiliikenne tuottavat melko saman verran päästöjä, sillä niiden osuudet ovat 14,4 % ja 13,5 %. Pieni osuus on myös junaliikenteellä ja kaikella muulla kuljetuksella, jotka molemmat vievät vain 0,5 % kaikista kuljetuksen päästöistä. [15] Kuvassa 5 on vertailtu Euroopan alueella eri kuljetusmuotojen aiheuttamien kasvihuonepäästöjen osuuksia toisiinsa.



Kuva 5. Eri kuljetusmuotojen aiheuttamat kasvihuonepäästöjen osuudet Euroopassa, perustuu lähteeseen [15]

Kasvihuonekaasupäästöjen lisäksi kuljetuksessa käytettävät polttoaineet tuottavat muitakin ilmansaasteita, kuten typpi- ja rikkioksideja, hiilimonoksidia sekä pienhiukkasia. Typen ja rikin oksidit aiheuttavat happamoitumista sekä typpioksidit vaikuttavat rehevöitymiseen, mitkä puolestaan vahingoittavat ekosysteemejä. Fossiilisten polttoainoiden epätäydellisessä palamisessa syntyy mustaa hiiltä, joka, samoin kuin kasvihuonekaasupäästöt, lämmittää ilmakehää. [15], [16]

Ilmansaasteet voivat myös kulkeutua meriin ja vesistöihin, joissa ne aiheuttavat erilaisia ongelmia. Ilmansaasteiden kulkeutumisen lisäksi meriliikenteestä aiheutuu suoria päästöjä veteen, kuten öljyä, jätevesiä ja kiinteää jätettä. Päästöt vesiin saastuttavat ja vaikeuttavat vesiekosysteemien toimintaa. Merikuljetuksesta aiheutuu myös päästöihin liittymättömiä ympäristövaikutuksia, kuten äänisaaste ja ankkuroiminen, jotka tuhoavat ja häiritsevät vesieläiden normaalia toimintaa. [15]

4. MAGNEETTIKUVAUSLAITTEEN KÄYTTÖ

Käytön aikaisiin ympäristövaikutuksiin vaikuttavat muun muassa puhdistukseen käytettävät kemikaalit, vesi ja liinat sekä huoltoa varten valmistettavat uudet osat. Käytön aikana kuluu myös paljon sähköä, joka aiheuttaa hiilidioksidipäästöjä. [11] Tässä luvussa keskitytään MRI-laitteen sähkönkulutukseen aiheuttaviin asioihin sekä sähkönkulutuksen hiilidioksidipäästöihin.

4.1 Magneettikuvauslaitteen sähkönkulutus

Suurta osaa maailman MRI-laitteista ei ikinä suljeta, sillä ne tarvitsevat sähköä jäähdysjärjestelmiinsä. MRI-laitteen käytöllä on eri vaiheita, jotka kaikki käyttävät sähköä. Kuvantamisen aikana kuluu eniten sähköä, mutta MRI-laite kuluttaa sähköä myös sekä saman potilaan sekvenssien että eri potilaiden kuvantamisten välisenä aikana. MRI-laitteen järjestelmä voidaan myös sulkea, jolloin laite ei ole valmis välittömään käyttöön, mutta kuluttaa kuitenkin sähköä. [4] Jopa kolmasosa MRI-laitteen sähkönkulutuksesta tapahtuu ei-aktiivisena aikana [32].

Kuvantamisen aikana kuluvaan sähköön vaikuttaa sekä yhden sekvenssin että koko toimenpiteen kesto. Lyhennetyt kuvantamisajat vähentävät sähkönkulutusta samalla tuottaen lähes yhtä tarkkoja kuvia kuin pidemmät toimenpiteet [33], [34]. Lyhyemmät toimenpiteet ovat myös helpompia potilaiden näkökulmasta, koska silloin ei tarvitse olla niin kauan liikkumatta. Tämä voi parantaa kuvanlaatua, mikä vähentää tarvetta uusintaskannauksille. [4], [34] Lyhyemmät kuvantamisajat voivat myös lyhentää potilaiden odottamisaikoja, mikä saattaa vähentää potilaiden aikojen peruutuksia [4]. Tämä pitää MRI-laitteen käytön tehokkaana, sillä potilaiden välille ei muodostu pitkiä aikoja, mikä kuluttaisi turhaan sähköä.

Pitkien kuvantamisaikojen lisäksi vähintään viidesosa kuvantamisesta on todettu olevan tarpeetonta [35]. Tarpeeton kuvantaminen ei tuo lisätietoa potilaan vaivasta, mutta aiheuttaa turhaa sähkönkulutusta ja siten myös päästöjä [4]. Turhaa kuvantamista saadaan karsittua muun muassa kohdentamalla kuvantaminen paremmin sekä vähentämällä tarpeettomia kuvantamiskäyntejä [11].

MRI-laitteissa käytetään tavallisesti 1,5 T (teslan) tai 3 T magneettikenttää [5]. Matalan kentän magneettikuvaus (LF MRI) luokitellaan tyypillisesti käyttävän 0,25–1 T magneettikenttää, ja se on noussut korkeamman magneettikentän laitteiden rinnalle

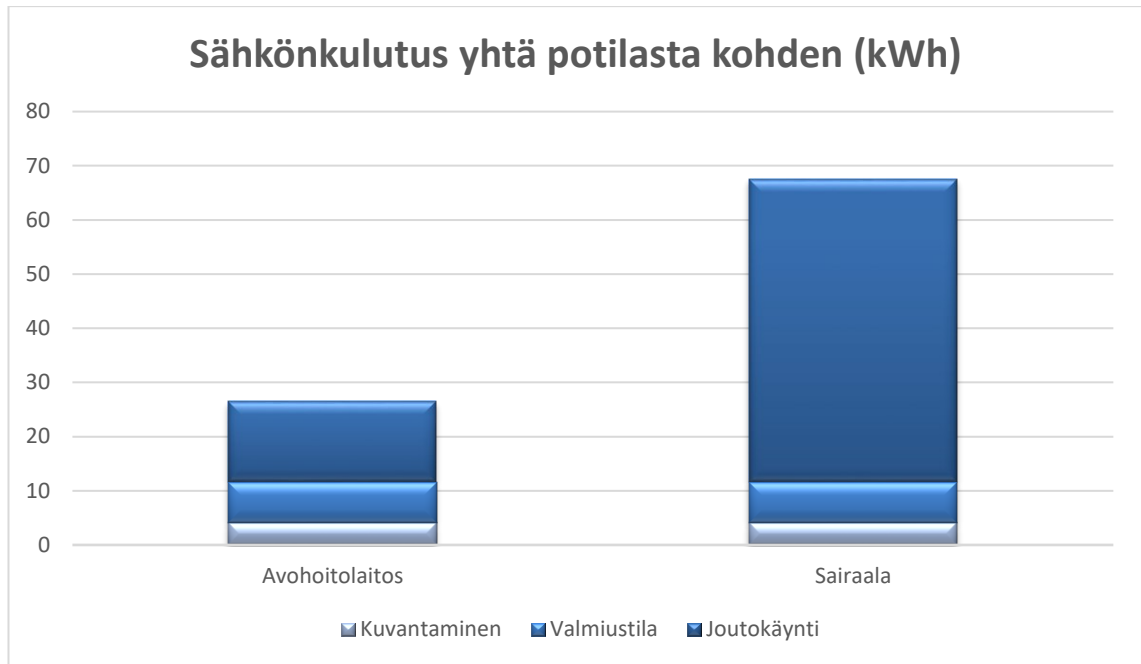
[36]. Mitä heikompi magneettikenttä, sitä vähemmän laite tarvitsee sähköä sekä valmistuksen että käytön aikana. Toisaalta korkeamman magneettikentän laitteilla on parempi signaali-kohinasuhde (SNR). [4] Korkeamman SNR:n ansiosta magneetikuvissa on parempi resoluutio sekä kuvantamisaika on lyhyempi [5]. Vaikka LF MRI-laitteen SNR on huonompi, se käyttää vähemmän sähköä kuin 1,5 T ja 3 T laitteet. Nykyään on kuitenkin uusia teknologioita, kuten syväoppimiseen perustuva rekonstruktio ja matalan kentän ominaisuuksien hyödyntäminen, joita voidaan käyttää kehittämään LF MRI-laitteiden kuvalaatuja. [4]

Amin Esmaeili ym. (2018) ovat tutkineet MRI:n energian- ja materiaalienkulutusta. MRI:lle laadittiin elinkaariarviointi ja tietoa kerättiin havaintojen, aikatutkimusten, reaaliaikaisen virrankulutuksen, kuvantamisosaston aikataulutietojen sekä teknisten käsikirjojen ja kirjallisuuden avulla. Tietoa kerättiin neljän päivän ajan tammikuussa vuonna 2012 avohoitolaitoksen radiologian osastolla Wichitassa Kansasin osavaltiossa. Tutkimuksessa arvioitiin sähkönkulutus myös sairaalan MRI-laitteille. [18]

Tutkimuksessa todettiin, että MRI-laite on vuorokaudesta kahdeksan tuntia käytössä 50 % käyttöasteella sairaalassa ja 12 tuntia käytössä 72,5 % käyttöasteella avohoitolaitoksessa. Sairaalassa olevaa laitetta ei suljeta yöksi ja viikonlopuiksi hätäkuvantamista varten, mutta avohoitolaitoksen laite suljetaan osittain. Molemmista tapauksista aktiiviseen kuvantamiseen kuluu 4,10 kWh (kilowattituntia) yhtä potilasta kohden. Laitteen valmiustilan aikana eli sinä aikana, kun potilas on huoneessa diagnosoinnin ajan, kuluu 7,48 kWh energiaa molemmissa tapauksissa. [18]

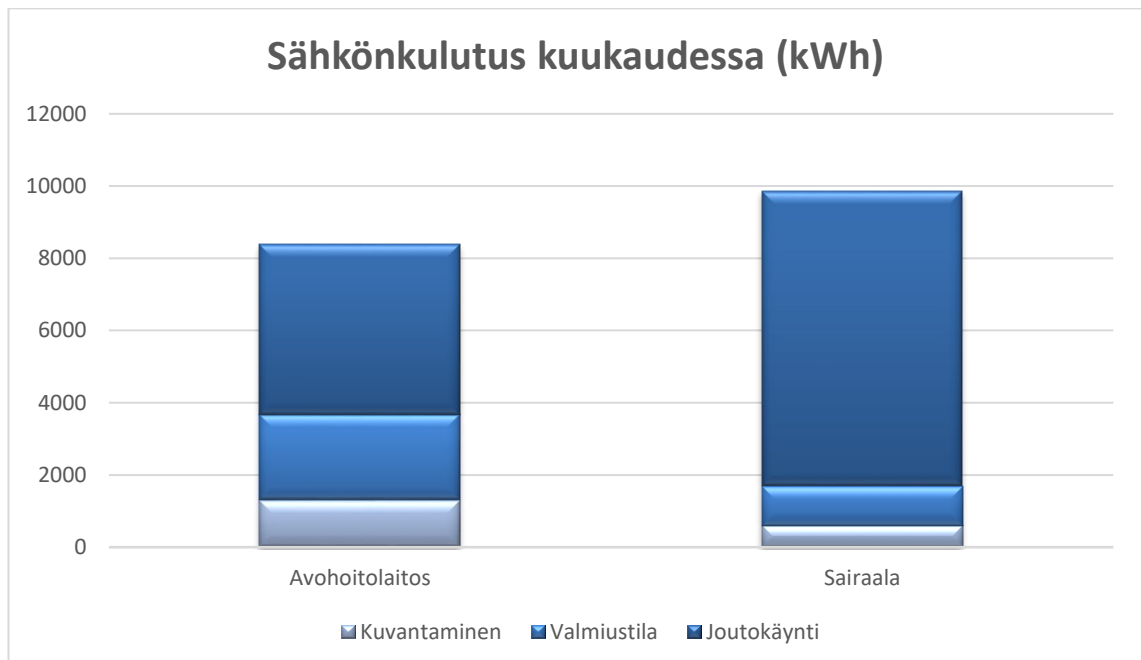
Eri käyttöasteiden ja -aikojen vuoksi muodostuu kuitenkin eroja, kun tarkastellaan kuukauden aikaista energiankäyttöä. Avohoitolaitoksessa aktiiviseen kuvantamiseen kuluu 1300 kWh ja valmiustilan aikana kuluu 2371 kWh. Nämä ovat yli kaksi kertaa suuremmat kuin sairaalan laitteen kuluttama energia. Sairaalassa kuvantamiseen kuluu 599 kWh ja valmiustilaan 1092 kWh. [18]

Kuvantamiseen ja valmiustilan ylläpitämiseen kuluu molemmissa tapauksissa saman verran energiaa yhtä potilasta kohden, koska molemmissa tapauksissa käytetään samanlaista MRI-laitetta. Huomattava ero nousee esille joutokäynnin kuluttamassa energiassa eli energiassa, joka kuluu, kun potilas ei ole huoneessa. Koska avohoitolaitoksen MRI-laite suljetaan osittain yöksi ja viikonlopuksi, on sen kuluttama joutokäyntienergia paljon pienempi verrattuna sairaalan laitteen kuluttamaan energiaan. Avohoitolaitoksessa joutokäyntienergia on 14,86 kWh potilasta kohden, kun taas sairaalassa se on 56,02 kWh, joka on lähes neljä kertaa suurempi. [18] Kuvassa 6 on koottu sähkönkulutus yhtä potilasta kohden avohoitolaitoksessa sekä sairaalassa.



Kuva 6. Magneettikuvauslaitteen sähkönkulutus yhtä potilasta kohden vertailtuna avohoitolaitoksessa ja sairaalassa, perustuu lähteeseen [18]

Kuukaudessa avohoitolaitoksen joutokäyntienergia on 4711 kWh, mutta sairaalan joutokäyntienergia on vain enää noin kaksi kertaa suurempi ollen 8165 kWh. [18] Kuvassa 7 nähdään sähkönkulutus kuukaudessa avohoitolaitoksessa ja sairaalassa.



Kuva 7. Magneettikuvauslaitteen sähkönkulutus kuukaudessa vertailtuna avohoitolaitoksen ja sairaalan välillä, perustuu lähteeseen [18]

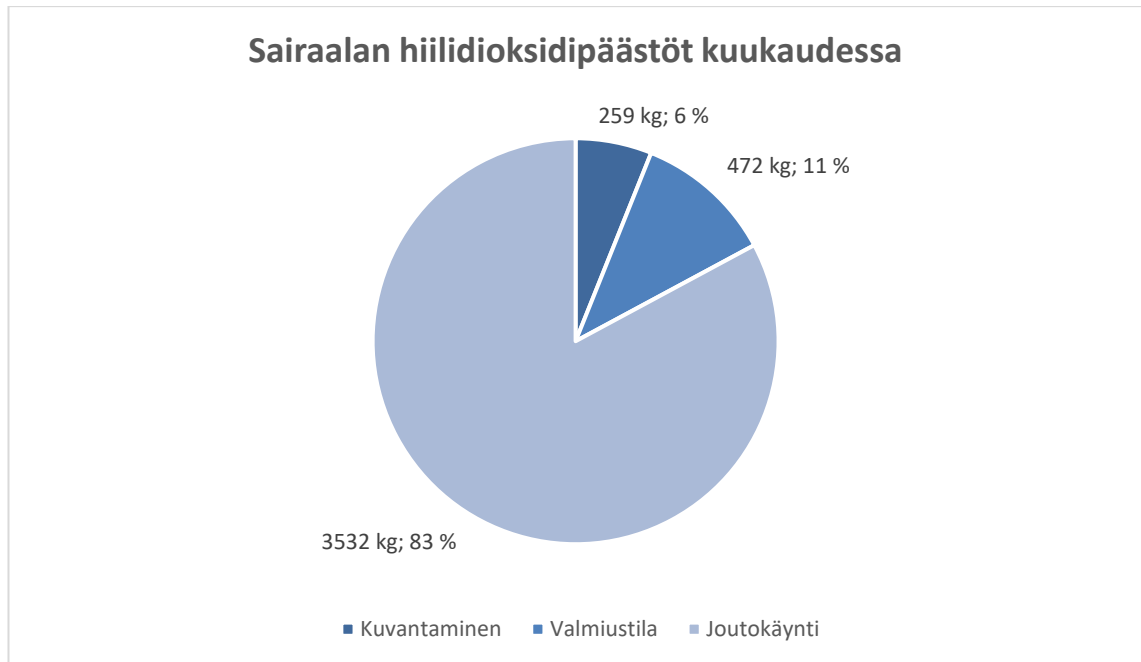
Avohoitolaitoksessa käytön kuluttama energia yhtä potilasta kohden on 26,44 kWh ja vastaavasti sairaalassa 67,7 kWh. Energia potilasta kohden eroaa pelkästään joutokäyntienergiassa, mikä on sairaalan laitteella merkittävästi korkeampi. Tähän vaikuttaa se, että sairaalan MRI-laitetta ei suljeta, jolloin se kuluttaa enemmän energiaa. Avohoitolaitoksen laite suljetaan osittain, jolloin energiaa kuluu vain magneettikentän ja jäädytyksen ylläpitämiseen. Kuukaudessa MRI-laitteen käyttöön kuluva energia on avohoitolaitoksessa 6258 kWh ja sairaalassa 9856 kWh. Sairaalan laitteen kuluttama energia on kuukaudessa laskettunakin korkeampi, mutta ero ei ole yhtä suuri kuin yhtä potilasta kohden. Kuukaudessa kuluva energia tasaantuu avohoitolaitoksen korkeammalla käyttöasteella ja pidemmällä käyttöajalla vuorokaudessa. [18]

4.2 Sähkönkulutuksen hiilidioksidipäästöt

Sähkönkulutuksen hiilidioksidipäästöihin vaikuttaa, onko käytetty sähkö fossiilista vai uusiutuvaa. Suurin osa maailman energiasta saadaan fossiilisista polttoaineista, vaikka ne tuottavat huomattavasti hiilidioksidipäästöjä. Hiilidioksidipäästöt puolestaan aiheuttavat muun muassa ilmastonmuutosta ja muuttuneita ekosysteemejä. On huomattu, että uusiutuva energia on kustannustehokkain tapa vähentää energiankulutuksesta aiheutuvia kasvihuonepäästöjä. [37]

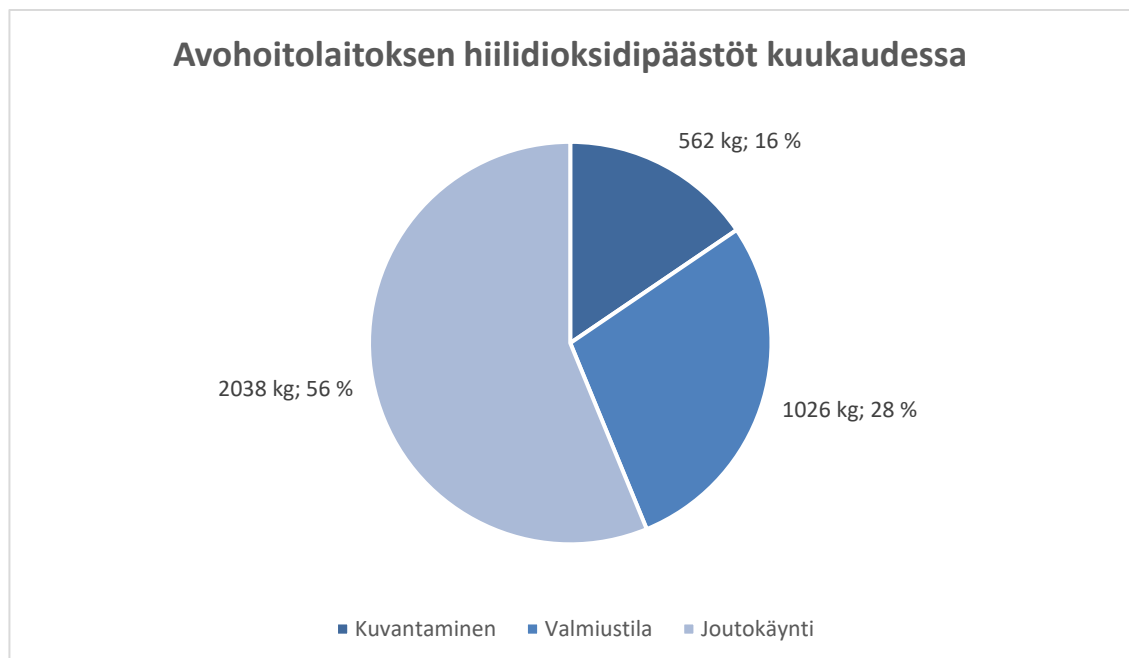
Yhden potilaan kuvantaminen tuottaa 1,8 kg hiilidioksidipäästöjä, kun taas koko kuvantamisprosessin aikaiset hiilidioksidipäästöt ovat 3,2 kg. Ottaen huomioon myös joutokäyntiajan yhtä potilasta kohden käytetty energia avohoitolaitoksessa vastaa 11,4 kg hiilidioksidipäästöjä. Koko kuukauden yhteenlasketut energiankulutuksen hiilidioksidipäästöt avohoitolaitoksessa on 2707 kg. Sairaalassa yhtä potilasta kohden käytetty energia tuottaa 29,3 kg hiilidioksidipäästöjä ja kuukaudessa puolestaan yhteensä 4264 kg. [3]

Sairaalan MRI-laitteen kuvantamisen ja valmiustilan hiilidioksidipäästöt ovat kuukaudessa pienemmät kuin avohoitolaitoksen. Sairaalan joutokäynnin aiheuttamat päästöt ovat puolestaan merkittävästi suuremmat. Nämä selittyvät avohoitolaitoksen suuremmalla käyttöasteella ja -ajalla. Kuvassa 8 nähdään sairaalan kuukauden hiilidioksidipäästöt käytön eri vaiheissa ja niiden osuudet toisiinsa nähden. Joutokäynnin hiilidioksidipäästöt ovat yli neljä viidesosaa koko päästöistä. Kuvantamisen ja valmiustilan aiheuttamat päästöt ovat joutokäyntiin verrattuna pienet.



Kuva 8. Sairaalan magneettikuvauslaitteen kuukausittaiset hiilidioksidipäästöt käytön eri vaiheiden aikana, perustuu lähteeseen [3]

Kuvassa 9 on vastaavasti esitetty avohoitolaitoksen käytön vaiheiden hiilidioksidipäästöt kuukaudessa ja niiden osuudet verrattuna toisiinsa. Valmiustilan hiilidioksidipäästöt ovat noin kaksi kertaa suuremmat kuin kuvantamisen tuottamat päästöt. Joutokäynnin hiilidioksidipäästöt ovat puolestaan yli puolet kokonaispäästöistä.



Kuva 9. Avohoitolaitoksen magneettikuvauslaitteen kuukausittaiset hiilidioksidipäästöt käytön eri vaiheiden aikana, perustuu lähteeseen [3]

Pelkän kuvantamisen aikaiset hiilidioksidipäästöt pysyvät kohtuullisina, mutta kun huomioon otetaan joutokäyntienergia, päästöt nousevat huomattavasti. Avohoitolaitoksen suuremman käyttöasteen ja -ajan myötä energiankulutus sekä sen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt pysyvät matalampina kuin sairaalassa. Silti kuukauden energiankäytön päästöt ovat merkittävät ja vastaavat yli 11 000 km ajettua matkaa bensiinikäyttöisellä ajoneuvolla. Sairaalan päästöt vastaavat puolestaan lähes 18 000 km ajettua matkaa. [3]

Nämä luvut ovat kuitenkin laskettu vain yhdelle MRI-laitteelle kuukaudessa. Vuoden aikaiset päästöt ovat kaksitoista kertaa suuremmat ja yhdessä laitoksessa voi olla käytössä useita MRI-laitteita. Jos oletetaan MRI-laitteen käytön kestävän kymmenen vuotta, yhden laitteen käytön sähkönkulutuksen hiilidioksidipäästöt olisivat lähes 325 000 kg avohoitolaitoksessa ja yli 500 000 kg sairaalassa.

MRI-laitteen sähkönkulutus ja sen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt kasvavat merkittäviksi koko käytön ajalle. Päästöjen pienentämistä varten tärkeää ovat tarpeeksi suuret päivittäinen käyttöaika ja -aste sekä MRI-laitteen sulkeminen, kun sitä ei käytetä. Näin saadaan MRI-laitteen energiankulutus mahdollisimman tehokkaaksi. On tärkeää myös vaihtaa fossiilisia energianlähteitä uusiutuviin, jotta fossiilisten polttoaineiden riippuvuutta ja käyttöä saadaan rajoitettua. Uusiutuvaa sähköä käyttämällä käytön aikaisia ympäristövaikutuksia saataisiin vähennettyä.

5. MAGNEETTIKUVAUSLAITTEEN LOPPUSIJOU- TUKSEN EKOLOGISUUS

Kun MRI-laite poistetaan käytöstä, sille pitää löytää sopiva loppusijoituspaikka. Jos MRI-laitteella on kunnollinen loppusijoitus ja uudelleenkäyttö, kokonaisenergian kulu- tusta saadaan vähennettyä 2 % [11]. Energiankulutuksen väheneminen tarkoittaa myös pienempiä kasvihuonekaasupäästöjä. Lisäksi MRI-laitteessa on useita materiaaleja, jotka voidaan kierrättää, kuten metallit ja muovi.

Yksi mahdollisuus on lahjoittaa toimivia MRI-laitteita esimerkiksi kehitysmaille tai sai- raaloille, joilla ei ole varaa ostaa kokonaan uutta laitetta [4]. Tämä myös vähentää val- mistuksesta aiheutuvia ympäristövaikutuksia, kun käyttökelpoisia MRI-laitteita käyte- tään mahdollisimman pitkään. Toisaalta tämä ei ole loppusijoituspaikka ja näin loppusi- joitus siirtyy eteenpäin sellaisille, joilla ei välttämättä ole yhtä hyviä valmiuksia ekologi- sille vaihtoehdoille loppusijoitukselle.

MRI-laitteen lahjoittaminen kehitysmaille saattaa aiheuttaa jopa lisää ympäristövaiku- tuksia, koska lahjoituskohteelta voi puuttua tarvittavat ammattitaitoiset huoltohenkilöstö ja laitteen käyttäjät [4]. Tämä saattaa johtua siitä, että ilman osaavaa henkilökuntaa MRI-laitteita voidaan käyttää liian kuluttavasti, jolloin sähkönkulutus ja hiilidioksidipääs- töt kasvavat. Jos laitetta ei huolleta säännöllisesti, sen käytöstä todennäköisesti joudu- taan luopumaan ennenaikaisesti. Asianmukaisen huollon kanssa MRI-laitteen elinikä kasvaa, jolloin uusia laitteita ei tarvitse valmistaa yhtä usein [4].

Jos MRI-laite lahjoitetaan kehitysmaalle, jolla ei ole mahdollisuuksia hävittää laitetta ekologisesti, vastuun pitäisi siirtyä lahjoittajalle. Lahjoittajavaltiolla on luultavasti parem- mat edellytykset laitteen kierrätykselle. Toisaalta myös tuottaja voisi suoraan käsitellä ja kierrättää lahjoitetun MRI-laitteen. Näin saataisiin MRI-laite käytettyä mahdollisim- man pitkään ja sen jälkeen vielä kierrätettyä hyvin.

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin sähkö- ja elektroniikkaromusta tarkoituk- sena on ehkäistä tai vähentää jätettä ja jätehuollon tuottamia haittavaikutuksia ympäris- tön ja terveyden suojelemiseksi. Myös laiteromun materiaalien tehokas käyttö on yksi kohteista. MRI-laite on suuri lääkinnällinen laite ja kuuluu sähkö- ja elektroniikkaromua koskevan direktiivin sovelluskohteisiin. Muiden kuin kotitalouksien laiteromun keräyk- sen, käsittelyn, hyödyntämisen ja loppukäsittelyn tulee tuottajien rahoittaa. Jos laite korvataan uudella, tuottajat vastaavat näistä aiheutuvista kustannuksista. [19]

Direktiivin eräs osa on tuotesuunnittelu, jolla pyritään elinkaaren alusta asti pitämään sähkölaite ekologisempaan. Tuottajien ja kierrättäjien yhteistyötä kannustetaan, jotta sähkö- ja elektroniikkaromun uudelleenkäyttöä ei estetä ilman ympäristönsuojelun tai turvallisuuden kannalta olevaa merkittävää hyötyä. Suunnittelun ja valmistuksen kannustetaan olevan sellaista, että laiteromun ja sen materiaalien hyödyntäminen ja kierrätys on mahdollisimman helppoa. [19]

Lisäksi kerätty sähkö- ja elektroniikkaromu tulee käsitellä asianmukaisesti ennen uudelleenkäyttöä. Romua ei saa loppu käsitellä ilman asianmukaista käsittelyä. Tuottajien on käytettävä parasta olemassa olevaa tekniikkaa laiteromun hyödyntämiseen ja yritysten on varastoitava romu teknisten vaatimusten mukaisesti. Sähkö- ja elektroniikkalaiteromu tulee erotella toisistaan sekä kerätä ja kuljettaa siten, että on ideaalinen mahdollisuus uudelleenkäytölle ja kierrätykselle. [19]

MRI-laitteesta on hyödynnettävä 85 % ja kierrätettävä 80 % [19]. Tämän takia Euroopan unionin alueella MRI-laitteen kierrätys on hyvällä tasolla. Hyvän tuotesuunnittelun ja loppukäsittelyn ansiosta MRI-laitteella on optimaaliset kierrätys- ja uudelleenkäyttömahdollisuudet. Oikeanlaisen materiaalien kierrätyksen avulla saadaan vähennettyä myös valmistuksen ympäristökuormaa, sillä kierrätetyt materiaalit ovat kestävämpi vaihtoehto kuin uudet materiaalit.

Kierrätys saattaakin olla paras vaihtoehto MRI-laitteelle käytöstä poistamisen jälkeen. Laitteen hylkääminen esimerkiksi kaatopaikalle voi aiheuttaa enemmän ympäristövaiikutuksia. Kun MRI-laite seisoo muun jätteen seassa, laitteesta saattaa irrota ympäristömyrkkijä. Esimerkiksi laitteessa käytettyjä metalleja voi liueta ympäristöön, jotka pääsevät maaperään ja sitä kautta vesistöihin. Kierrättämättä jättäminen myös tuhlaa käytökelpoisia materiaaleja. Tällöin pitää hankkia uusia materiaaleja, mikä taas kuormittaa enemmän ympäristöä.

Kestävän tuotesuunnittelun avulla MRI-laite oletettavasti rakennetaan siten, että se voidaan purkaa osiin materiaalien kierrätystä ja uudelleenkäyttöä varten. Kierrätettyjen osien avulla on mahdollista koota uusia MRI-laitteita, joiden valmistuksen ympäristökuormitus on pienempi kuin kokonaan uusista materiaaleista valmistettu laite. Näin lineaarisen talousmallin mukainen MRI-laitteiden tuotanto saadaan kiertotalouden puolelle, mikä on ympäristölle kestävämpi vaihtoehto [4].

6. YHTEENVETO

MRI-laite on tärkeä kuvantamismenetelmä erityisesti pehmytkudosten tutkimiseen. Se on kuitenkin merkittävästi ympäristöä kuluttava laite, sillä elinkaaren jokaisessa vaiheessa aiheutuu erilaisia ympäristövaikutuksia. MRI-laitteen elinkaareen kuuluvat valmistus, käyttö ja loppusijoitus sekä kuljetukset. MRI onkin yksi terveydenhuollon eniten energiaa kuluttavista osastoista. Noin 50 000 MRI-laitteen käyttö maailmanlaajuisesti useiden vuosien ajan aiheuttaa huomattavat päästöt.

Käyttö on ylivoimaisesti energiakuluttavin vaihe MRI-laitteen elinkaareessa. Käytön energiankulutus on jopa nelinkertainen valmistukseen verrattuna, koska MRI-laite tarvitsee ympärivuorokautista sähköä magneetin jäähdytykseen. Sähkönkulutukseen vaikuttaa useat asiat, kuten muun muassa laitteen tarpeeton käyttö, magneetikentän suuruus sekä käyttöaste. Optimoimalla MRI-laitteen käytön mahdollisimman tehokkaaksi, saadaan sähkönkulutusta vähennettyä.

Koska käytön sähkönkulutus on elinkaaren suurin, myös käytön hiilidioksidipäästöt ovat korkeimmat. Kahdeksantuntisella käytöllä 50 % käyttöasteella MRI-laitteen sähkönkulutuksen hiilidioksidipäästöt ovat yli puoli miljoonaa kilogrammaa vuodessa. Myös MRI-laitteen valmistus kuluttaa energiaa ja tuottaa päästöjä. Valmistuksen päästöt aiheutuvat pitkälti fossiilisten energianlähteiden vuoksi ja uusiutuviin energioihin siirtyminen voisi vähentää ympäristökuormitusta.

Energiankulutuksen lisäksi myös materiaalien tuotanto aiheuttaa ympäristövaikutuksia valmistusvaiheessa. Materiaalien hankinta tuottaa jätettä, joka vaikuttaa negatiivisesti ekosysteemeihin. Lisäksi materiaalien valmistus vapauttaa muun muassa ilmansaasteita, jotka edistävät ilmastonmuutosta. Myös kuljetuksessa käytettävät polttoaineet tuottavat ilmansaasteita, jotka aiheuttavat ilmastonmuutoksen lisäksi muun muassa happamoitumista ja rehevöitymistä.

Käytöstä poistamisen jälkeen MRI-laitteen ympäristökuormituksen vähentämiseksi paras vaihtoehto on kierrättää laite. Kierrätetyt osat ja materiaalit voidaan taas käyttää uusien MRI-laitteiden valmistukseen, mikä vähentää valmistuksen ympäristövaikutuksia. Asianmukaisen käsittelyn ja kierrätyksen kanssa MRI-laitteen elinkaaren vaiheista loppusijoitus on vähiten kuluttava vaihe.

MRI-laitteen elinkaaren vaiheita on vaikea verrata keskenään, mutta elinkaaren tutkimisen jälkeen voidaan arvioida eniten kuluttavat vaiheet. Käytön aikana tapahtuu suurin sähkönkulutus verrattuna muihin elinkaaren vaiheisiin. Korkeimman sähkönkulutuksen

takia myös hiilidioksidipäästöt ovat suurimmat käytön aikana. Toinen paljon kuluttava vaihe on valmistus ja etenkin materiaalien hankinta. MRI-laitteeseen tarvitaan useita eri materiaaleja, joiden hankinta ja valmistus aiheuttaa enemmän ympäristövaikutuksia kuin muut elinkaaren vaiheet.

LÄHTEET

- [1] J. Karliner, S. Slotterback, R. Boyd, B. Ashby ja K. Steel, ”Health Care's Climate Footprint: How the Health Sector Contributes to the Global Climate Crisis and Opportunities for Action”. Viitattu: 16. tammikuuta 2024. [Verkossa], 2019. Saatavissa: https://noharm-global.org/sites/default/files/documents-files/5961/HealthCaresClimateFootprint_092319.pdf
- [2] P.-P. Pichler, I. S. Jaccard, U. Weisz, ja H. Weisz, ”International comparison of health care carbon footprints”, *Environ. Res. Lett.*, vsk. 14, nro 6, s. 064004, touko 2019, doi: 10.1088/1748-9326/ab19e1.
- [3] O. US EPA, ”Greenhouse Gas Equivalencies Calculator”. Viitattu: 11. maaliskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>
- [4] Y. V. Chaban *ym.*, ”Environmental Sustainability and MRI: Challenges, Opportunities, and a Call for Action”, *J. Magn. Reson. Imaging*, vsk. 59, nro 4, ss. 1149–1167, 2024, doi: 10.1002/jmri.28994.
- [5] S. D. Serai, M.-L. Ho, M. Artunduaga, S. S. Chan, ja G. B. Chavhan, ”Components of a magnetic resonance imaging system and their relationship to safety and image quality”, *Pediatr. Radiol.*, vsk. 51, nro 5, ss. 716–723, touko 2021, doi: 10.1007/s00247-020-04894-9.
- [6] V. Kuperman, ”Magnetic Resonance Imaging: Physical Principles and Applications”, *Elsevier*, 2000.
- [7] T. Vendiš. Viitattu: 22. maaliskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/00/Petmr.jpg>
- [8] ”Magnetic Resonance Imaging (MRI)”, National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering. Viitattu: 16. huhtikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.nibib.nih.gov/science-education/science-topics/magnetic-resonance-imaging-mri>
- [9] E. Moser, A. Stadlbauer, C. Windischberger, H. H. Quick, ja M. E. Ladd, ”Magnetic resonance imaging methodology”, *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging*, vsk. 36, nro 1, ss. 30–41, maaliskuu 2009, doi: 10.1007/s00259-008-0938-3.
- [10] P. A. Rinck, ”MR Imaging: Facts and Figures” *Magnetic Resonance in Medicine*. Viitattu: 25. maaliskuuta 2024. [Verkossa], 2024. Saatavissa: <https://www.magnetic-resonance.org/ch/21-01.html>
- [11] E. Svedström, ”Radiologisen kuvantamisen ympäristöjalanjälki”. Viitattu: 15. tammikuuta 2024. [Verkossa], 2021. Saatavissa: https://www.sely.fi/wp-content/uploads/2021/12/EL421_167.pdf
- [12] M. Martin, A. Mohnke, G. M. Lewis, N. R. Dunnick, G. Keoleian, ja K. E. Maturen, ”Environmental Impacts of Abdominal Imaging: A Pilot Investigation”, *J. Am. Coll. Radiol.*, vsk. 15, nro 10, ss. 1385–1393, loka 2018, doi: 10.1016/j.jacr.2018.07.015.
- [13] Science Channel, ”How MRI Scanners are Made | How It's Made | Science Channel”. Viitattu: 24. tammikuuta 2024. [Verkossa Video], 2023. Saatavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=PLBi594ttzk>
- [14] T. E. Norgate, S. Jahanshahi, ja W. J. Rankin, ”Assessing the environmental impact of metal production processes”, *J. Clean. Prod.*, vsk. 15, nro 8, ss. 838–848, tammi 2007, doi: 10.1016/j.jclepro.2006.06.018.
- [15] ”European Maritime Transport Environmental Report 2021 — European Environment Agency”. Viitattu: 16. helmikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.eea.europa.eu/publications/maritime-transport/>
- [16] J. S. Gaffney ja N. A. Marley, ”The impacts of combustion emissions on air quality and climate – From coal to biofuels and beyond”, *Atmos. Environ.*, vsk. 43, nro 1, ss. 23–36, tammi 2009, doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.09.016.

- [17] "MRI Equipment General Cleaning and Disinfection Quick Reference Guide", *GE Healthcare*, Viitattu: 5. maaliskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.assoziazionefaster.org/wp-content/uploads/2019/11/MR-Systems-Cleaning-GE-Philips.pdf>
- [18] A. Esmaeili, C. McGuire, M. Overcash, K. Ali, S. Soltani, ja J. Twomey, "Environmental impact reduction as a new dimension for quality measurement of healthcare services: The case of magnetic resonance imaging", *Int. J. Health Care Qual. Assur.*, vsk. 31, nro 8, ss. 910–922, tammi 2018, doi: 10.1108/IJHCQA-10-2016-0153.
- [19] "Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2012/19/EU sähkö- ja elektroniikkalaiteromusta", *Euroopan unionin virallinen lehti*, vsk. 197. 2012. Viitattu: 18. maaliskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <http://data.europa.eu/eli/dir/2012/19/oj/fin>
- [20] D. W. Sparling ja T. P. Lowe, "Environmental Hazards of Aluminum to Plants, Invertebrates, Fish, and Wildlife", teoksessa *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, vsk. 145, G. W. Ware ja F. A. Gunther, Toim., teoksessa *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 145., New York, NY: Springer New York, 1996, ss. 1–127. doi: 10.1007/978-1-4612-2354-2_1.
- [21] G. M. Olmez, F. B. Dilek, T. Karanfil, ja U. Yetis, "The environmental impacts of iron and steel industry: a life cycle assessment study", *J. Clean. Prod.*, vsk. 130, ss. 195–201, syys 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.09.139.
- [22] J. Seppälä, S. Koskela, M. Melanen, ja M. Palperi, "The Finnish metals industry and the environment", *Resour. Conserv. Recycl.*, vsk. 35, nro 1, ss. 61–76, huhti 2002, doi: 10.1016/S0921-3449(01)00122-7.
- [23] A. R. Alves ja A. dos R. Coutinho, "Life cycle assessment of niobium: A mining and production case study in Brazil", *Miner. Eng.*, vsk. 132, ss. 275–283, maaliskuu 2019, doi: 10.1016/j.mineng.2018.11.041.
- [24] M. Rehman *ym.*, "Copper environmental toxicology, recent advances, and future outlook: a review", *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vsk. 26, nro 18, ss. 18003–18016, kesä 2019, doi: 10.1007/s11356-019-05073-6.
- [25] E. Grynja ja P. J. Griffin, "Helium in Natural Gas - Occurrence and Production", *J. Nat. Gas Eng.*, vsk. 1, nro 2, ss. 163–215, joulukuu 2016, doi: 10.7569/JNGE.2016.692506.
- [26] M. T. DeMeuse, "5 - Other polymers used for biaxial films", teoksessa *Biaxial Stretching of Film*, M. T. DeMeuse, Toim., Woodhead Publishing, 2011, ss. 47–58. doi: 10.1533/9780857092953.1.47.
- [27] M. Tamoor, N. A. Samak, M. Yang, ja J. Xing, "The Cradle-to-Cradle Life Cycle Assessment of Polyethylene terephthalate: Environmental Perspective", *Molecules*, vsk. 27, nro 5, Art. nro 5, tammi 2022, doi: 10.3390/molecules27051599.
- [28] V. Koči ja T. Loubal, "LCA of liquid epoxy resin produced based on propylene and on glycerine", *Acta Environmentalica Universitatis Comenianae*, vsk. 20, Suppl. 1, 2012: 62-67 ISSN 1335-0285
- [29] S. V. Joshi, L. T. Drzal, A. K. Mohanty, ja S. Arora, "Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?", *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vsk. 35, nro 3, ss. 371–376, maaliskuu 2004, doi: 10.1016/j.compositesa.2003.09.016.
- [30] T. Corbière-Nicollier, B. Gfeller Laban, L. Lundquist, Y. Leterrier, J.-A. E. Månson, ja O. Jolliet, "Life cycle assessment of biofibres replacing glass fibres as reinforcement in plastics", *Resour. Conserv. Recycl.*, vsk. 33, nro 4, ss. 267–287, marraskuu 2001, doi: 10.1016/S0921-3449(01)00089-1.
- [31] H. Demirel, E. Sertel, S. Kaya, ja D. Zafer Seker, "Exploring impacts of road transportation on environment: a spatial approach", *Desalination*, vsk. 226, nro 1, ss. 279–288, kesä 2008, doi: 10.1016/j.desal.2007.02.111.
- [32] T. Heye *ym.*, "The Energy Consumption of Radiology: Energy- and Cost-saving Opportunities for CT and MRI Operation", *Radiology*, vsk. 295, nro 3, ss. 593–605, kesä 2020, doi: 10.1148/radiol.2020192084.
- [33] V. L. Mango *ym.*, "Abbreviated protocol for breast MRI: Are multiple sequences needed for cancer detection?", *Eur. J. Radiol.*, vsk. 84, nro 1, ss. 65–70, tammi 2015, doi: 10.1016/j.ejrad.2014.10.004.

- [34]M. P. Wilson *ym.*, ”Diagnostic Accuracy of Limited MRI Protocols for Detecting Radiographically Occult Hip Fractures: A Systematic Review and Meta-Analysis”, *Am. J. Roentgenol.*, vsk. 215, nro 3, ss. 559–567, syys 2020, doi: 10.2214/AJR.19.22676.
- [35]W. R. Hendee *ym.*, ”Addressing overutilization in medical imaging”, *Radiology*, vsk. 257, nro 1, ss. 240–245, loka 2010, doi: 10.1148/radiol.10100063.
- [36]J. P. Marques, F. F. J. Simonis, ja A. G. Webb, ”Low-field MRI: An MR physics perspective”, *J. Magn. Reson. Imaging*, vsk. 49, nro 6, ss. 1528–1542, kesä 2019, doi: 10.1002/jmri.26637.
- [37]F. Belaïd ja M. H. Zrelli, ”Renewable and non-renewable electricity consumption, environmental degradation and economic development: Evidence from Mediterranean countries”, *Energy Policy*, vsk. 133, s. 110929, loka 2019, doi: 10.1016/j.enpol.2019.110929.