



**RAKENNUS- JA PURKUJÄTTEIDEN SISÄLTÄMIEN HAITALLISTEN JAKEI-  
DEN ESIKÄSITTELY- JA LAJITTELUMENETELMÄT**

**PRE-TREATMENT AND SORTING METHODS OF HARMFUL WASTE CON-  
TAINED IN CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2023

Teemu Karhu

Tarkastaja: Professori Timo Kärki

Ohjaaja: TkT Ville Lahtela

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Konetekniikka

Teemu Karhu

### **RAKENNUS- JA PURKUJÄTTEIDEN SISÄLTÄMIEN HAITALLISTEN JAKEIDEN ESIKÄSITTELY- JA LAJITTELUMENETELMÄT**

Konetekniikan kandidaatintyö

2023

32 sivua, 2 kuvaa ja 2 taulukkoa

Tarkastaja: Prof. Timo Kärki

Ohjaaja: TkT Ville Lahtela

Avainsanat: Rakennus- ja purkujäte, lajittelumenetelmät, haitalliset aineet,

Jatkuvasti kasvava rakennus- ja purkujätteen määrä lisää jätteenlajittelun kuormitusta. Nykyisten jätteenkierrätystavoitteiden saavuttamiseksi on tärkeää, että lajitteluun löytyy sopivat menetelmät. Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää, minkälaisia lajittelumenetelmiä rakennus- ja purkujätteen käsittelyyn on ja miten siihen sisältyvät haitalliset aineet voidaan tunnistaa.

Työssä käydään ensin läpi erilaisia lajittelumenetelmiä sekalaisen rakennus- ja purkujätteen käsittelyä varten. Sen jälkeen selvitetään, minkälaisia menetelmiä rakennus- ja purkujätteen syntyvien haitallisten aineiden tunnistamiseen on ja miten niitä käytetään tällä hetkellä haitallisen jätteen tunnistamiseksi. Johtopäätöksissä vertaillaan menetelmiä keskenään ja arvioidaan niiden hyödyllisyyttä ja tärkeyttä jätteenkäsittelylaitoksissa. Tuloksena työstä saatiin yhteen koottu tieto yleisimmistä jätteen lajittelu- ja tunnistusmenetelmistä.

## ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Teemu Karhu

## **PRE-TREATMENT AND SORTING METHODS OF HARMFUL WASTE CONTAINED IN CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE**

Bachelor's thesis

2023

32 pages, 2 figures, and 2 tables

Examiner: Prof. Timo Kärki

Supervisor: TkT Ville Lahtela

Keywords: Construction and demolition waste, sorting, harmful materials

Continuous growth of the amount of construction and demolition waste increases the strain of waste sorting. In order to achieve the current waste recycling goals, it is important that there are suitable methods for waste sorting. The goal of this bachelor's thesis is to find out what type methods exist for treatment of construction and demolition waste and how to detect the harmful materials in it.

In this thesis we will first go through the different types of methods for treating miscellaneous construction and demolition waste. Then we will find out what type of methods exist and how are those used to detect the harmful waste produced by construction and demolition. In conclusions we compare the methods and evaluate their use and importance in waste treatment plants. As a result of this thesis, we got a summary of the most common waste treatment and detection methods.

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Lyhenteet

CDW	Rakennus- ja purkujäte (construction and demolition waste)
FIR	Kauko-infrapuna (far-infrared)
LIBS	Laseravustettu hajoitusspektroskopia (laser induced breakdown spectroscopy)
MIR	Keski-infrapuna (mid-infrared)
Nd:YAG	Neodyymiseostettu yttrium-alumiini-granaatti (neodymium-doped yttrium aluminum garnet)
NIR	Lähi-infrapuna (near-infrared)
PAH	Polysykliset aromaattiset hiilivedyt (polycyclic aromatic hydrocarbon)
PCB	Polykloorattu bifenyylä (polychlorinated biphenyl)
Vis-NIR	Näkyvä lähi-infrapuna (visible near-infrared)
VNIR	Näkyvä lähi-infrapuna (visible near-infrared)
XFR	Röntgenfluoresenssi (X-ray fluorescence)
XRT	Röntgentransmissio (X-ray transmission)

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	8
2	Tutkimusmenetelmät .....	10
2.1	Kirjallisuuslähteiden käyttö .....	10
2.2	Käytössä olevien laitojen tutkiminen .....	10
3	Rakennus- ja purkujätteiden lajittelu- ja esikäsittely.....	11
3.1	Murskaus .....	12
3.2	Seulat.....	12
3.2.1	Rumpuseula .....	12
3.2.2	Täryseula.....	14
3.2.3	Kiekkoseula .....	15
3.3	Magneettierotin .....	15
3.4	Pyörrevirtaerotin .....	15
3.5	Ilmaerotin .....	16
3.6	Robotisoitu lajittelu.....	17
4	Haitalliset aineet ja niiden tunnistaminen.....	18
4.1	Haitalliset aineet.....	18
4.1.1	Asbesti .....	18
4.1.2	POP-yhdisteet .....	19
4.1.3	PCB-yhdisteet .....	19
4.1.4	PAH- yhdisteet.....	20
4.1.5	Raskasmetallit .....	20
4.2	Haitallisten aineiden tunnistusmenetelmät.....	21
4.2.1	NIR-menetelmä.....	21
4.2.2	XRF.....	22
4.2.3	LIBS.....	23
5	Pohdintaa/Johtopäätökset .....	25

6	Yhteenveto.....	27
	Lähteet .....	28

## Kuvaluettelo

Kuva 1 Materiaalin kulku rumpuseulassa. (Chen, Y.-S. et al. 2010)

Kuva 2. Pyörrevirtaerottimen toiminta. (Smith, Y. R. et al. 2019).

## Taulukkuuettelo

Taulukko 1. Tutkittavat esimerkkilinjatot.

Taulukko 2. Haitallisten aineiden tunnistusmenetelmillä tunnistettavat aineet.

# 1 Johdanto

Rakennus- ja purkujätteen määrä kasvaa vuosittain ja sen kasvun ennustetaan jatkuvan vielä vuosikymmenien ajan (Zhang, C. et al. 2021). Tällä hetkellä rakennus- ja purkujätteen osa kaikesta jätteestä maailmanlaajuisesti on jo yli kolmas osa, joten sillä olennainen rooli jätteen kierrättämisen osalta. Suomessa rakennus ja purkujätettä syntyy arviolta vuodessa 1,6 miljoonaa tonnia (Tolpo, A. 2020). Vuonna 2008 EU otti tavoitteekseen kierrättää 70 % rakennus- ja purkujätteestään vuoteen 2020 mennessä (Euroopan parlamentti 2008). Kuitenkin vuonna 2020 Suomessa rakennus- ja purkujätteestä kierrätettiin vain noin 50 %, joten on selvää, että tavoite on edelleen ajankohtainen ja sen saavuttamiseksi tulisi tehdä lisää työtä (Ympäristöministeriö 2021). Tärkeässä roolissa kierrätettävyyden maksimoimisessa on materiaalien esikäsittely ja lajittelu. Mitä suurempi osa materiaalista saadaan lajiteltua ja siirrettyä uusiokäyttöön, sitä vähemmän jätettä päätyy muihin vähempiarvoisiin kohteisiin, kuten polttoon tai loppusijoitukseen kaatopaikalle.

Tässä kandidaatintyössä selvitetään erilaisia kirjallisia lähteitä käyttäen, että minkälaisia eri esikäsittely ja lajittelumenetelmiä rakennus- ja purkujätteen käsittelyyn on ja miten niitä sovelletaan rakennus- ja purkujätteen sisältämien haitallisten aineiden tunnistamiseen ja lajitteluun. Tutkimus on aiheellinen kasvavien jätemäärien takia, joten jätteen käsittelymenetelmien tutkiminen on tärkeää tulevaisuuden kannalta. Lisäksi rakennus- ja purkujätteen lajittelua hankaloittaa monien tällä hetkellä purkukunnossa olevien rakennuksien ikä. Monet rakennuksista ovat peräisin ajoilta, jolloin rakentamiseen käytettiin paljon erilaisia haitallisia materiaaleja ja kemikaaleja, kuten asbesti ja erilaiset PCB-yhdisteet (Polyklooratut bifenyylit), joiden käyttö nykyään kielletty. Ongelmana näiden materiaalien käytöstä lajittelun näkökulmasta on se, että niiden tunnistaminen ja erottaminen ei perinteisillä erottelu ja lajittelu menetelmin onnistu.

Tutkimus tehdään, koska tutkimuksen tekohetkellä ei ollut yksielitteistä julkaisua, jossa käsiteltäisiin yleisimmät lajittelu- ja esikäsittelymenetelmät sekä haitallisten materiaalien tunnistus- ja lajittelumenetelmät. Tutkimus perustuu jo olemassa oleviin ja julkaistuihin kirjallisuuslähteisiin, sekä alan yritysten esimerkkilinjastojen laitekannan tutkimiseen. Tutkimus rajautuu vain menetelmiin ja linjastoihin, jotka pystyvät käsittelemään ja vastaanottamaan sekalaista rakennus- ja purkujätettä.



Tutkimuksen tavoitteena on tuoda esille tietoa käytössä olevista menetelmistä rakennus- ja purkujätteen lajitteluun sekä haitallisten aineiden tunnistamiseen. Tutkimuksessa etsitään vastauksia seuraaviin tutkimus kysymyksiin:

Mitä menetelmiä rakennus ja purkujätteen lajitteluun ja esikäsittelyyn on?

Miten rakennus- ja purkujätteen esikäsittely vaikuttaa lajitteluun?

Mistä johtuu, että haitallisten aineiden tunnistaminen on hankalaa?

## **2 Tutkimusmenetelmät**

Kyseessä on kirjallisuustyö, joten tutkimus perustuu vahvasti olemassa olevien kirjallisuuslähteiden käyttöön ja yhdistämiseen. Nämä lähteet arvioidaan niiden ominaisuuksien perusteella. Lisäksi lähteenä käytetään olemassa olevia esimerkkilinjastoja alan yrityksiltä.

### **2.1 Kirjallisuuslähteiden käyttö**

Kirjallisuuslähteinä pyritään ensisijaisesti käyttämään erilaisia tieteellisiä lähteitä kuten artikkeleita, konferenssijulkaisuja sekä kirjoja. Kuitenkaan ei suoraan poissuljeta kokonaan heikompien lähteiden kuten esimerkiksi uutisten käyttöä. Jokaiselle etsitylle tiedolle pyritään löytämään vähintään kaksi eri lähdettä, joista käytettäväksi valitaan viitatumpi ja uudempi. Mikäli eri lähteiden välillä syntyy ristiriitoja, pyritään tieto varmistamaan vielä useammista lähteistä, ja jos se ei onnistu, valitaan uudempi lähde.

Koska työ sisältää paikoittain historiaa rakennusmateriaalien ja niitä sisältävien haitallisten aineiden käytöstä, niin voidaan lähteinä käyttää myös vanhoja lähteitä, jotka sijoittuvat ajalle, jolloin ne olivat ajankohtaisia.

### **2.2 Käytössä olevien laitosten tutkiminen**

Kirjallisuuden ja erilaisten tieteellisten julkaisujen lisäksi tutkimuksen lähteinä käytetään jätteen käsittelyyn erikoistuneita yrityksiä tai niiden suunnitteleimia ja käytössä olevia linjastoja. Kriteerinä näiden laitosten valitsemiselle on, että niiden täytyy pystyä käsittelemään nykyaikaista rakennus- ja purkujätettä. Lisäksi esimerkkilinjastoja pyritään löytämään maailman laajuisesti, jotta saadaan laajempi näkökulma tutkimukseen. Sopivien laitosten löytyttyä, selvitetään ja taulukoidaan niiden laitteistot, jotta niitä voidaan vertailla keskenään.

### 3 Rakennus- ja purkujätteen lajittelu- ja esikäsittely

Rakennus- ja purkujätteen lajittelu alkaa heti työmaalta, jossa jäte syntyy. Mitä enemmän ja tarkemmin jätettä lajitellaan työmaalla, sitä vähemmän se kuormittaa jätteen lajittelulaitoksia ja pitää niiden toiminnan tehokkaana. Jätteen päädyttyä lajittelulaitokselle sen käsittelyyn on olemassa useita erilaisia menetelmiä. Nämä menetelmät jakaantuvat pääpiirteittäin mekaanisiin ja optisiin menetelmiin. Mekaanisilla lajittelumenetelmillä tarkoitetaan sellaisia lajittelu menetelmiä, jotka perustuvat materiaalin erotteluun jonkin tietyn, tai useamman mekaanisen omaisuuden perusteella. Monet näistä menetelmistä saattaa vaatia toimiakseen erilaisia esikäsittelyitä, kuten materiaalikon pienennys. Optisilla menetelmillä tarkoitetaan erilaisin optisin sensorein ja menetelmin tapahtuvaa lajittelua. Taulukossa 1 on esitetty valitut esimerkkilinjastot ja niiden käyttämät perinteiset lajittelu menetelmät. Lisäksi tarkastelun alla oli ZenRobotics-yrityksen robotisoitu rakennus- ja purkujätteen käsittelyyn suunniteltu lajittelulinjasto.

Valitut esimerkkilinjastot:

Salpakierto Oy:n LATE-linjasto on Päijät-Hämeessä sijaitseva kotimainen jätteenkäsittelylaitos, jonka vuosikapasiteetti on 65 000 tonnia. Sen käyttää jätteen lajitteluun mekaanisia sekä optisia menetelmiä (Salpakiero Oy 2023)

ZB Group on eurooppalainen jätteenkäsittelylaitosten valmistaja, joka valmistaa valmiita laitospaketteja rakennus- ja purkujätteen käsittelyä varten. Laitokset käyttävät vain mekaanisia lajittelumenetelmiä. (ZB Group 2023.)

CDE Group, Norway Velde Pukk 300TPH on Norjassa sijaitseva rakennus- ja purkujätteen käsittelylaitos, jonka käsittelykapasiteetti on 300 tonnia tunnissa. Laitos käyttää vain mekaanisia lajittelumenetelmiä. (CDE Group 2023)

BMH Technology Oy valmistaa Jätteen käsittely laitteita ja tarjoaa myös valmiita laitospaketteja. Yritys tarjoaa useita erilaisia mekaanisia lajittelukoneita (BMH Technology Oy 2023).

Terex corporationin valmistama ZenRobotics Recycler lajittelulinjasto on erilaisiin sensoreihin ja konenäköön perustuva robotisoitu lajittelulinjasto (Terex Corporation 2023).

Taulukko 1. Tutkittavat esimerkkilinjastot.

	Rumpuseula	Taso/värinäseula	Magneettierotin	Murskaus
ZB group	1	1	1	1
Salpakierto Oy LATE-linjasto	1	1	1	1
CDE Group Oy, Norway CDW facility	0	1	1	1
BMH Technology Tyrannosaurus plant	0	1	1	1
<b>YHTEENSÄ:</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>2</b>
	NIR	upotus-kellutus	Hiekanerotin	Pyörrevirtaerotin
ZB group	0	0	0	0
Salpakierto Oy LATE-linjasto	1	0	0	0
CDE Group Oy, Norway CDW facility	0	1	1	0
BMH Technology Tyrannosaurus plant	0	0	0	1
<b>YHTEENSÄ:</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>

### 3.1 Murskaus

Rakennus- ja purkutyömailta saatavan jätteen koko vaihtelee suuresti riippuen purkukohteesta ja purkumenetelmästä. Vaihteleva koko on ongelmallista paikoittain, sillä monet nykyaikaisista mekaanisiin menetelmiin perustuvista rakennus ja purkujätteen lajittelu- ja käsitteilylaitoksista vaativat käsiteltävän jätteen koon pienentämistä jossakin lajittelun vaiheessa. Jätteen materiaalikoon pienentämiseen on olemassa useita erilaisia menetelmiä, mutta yleisimpiä menetelmiä ovat erilaiset silppurit ja murskaimet.

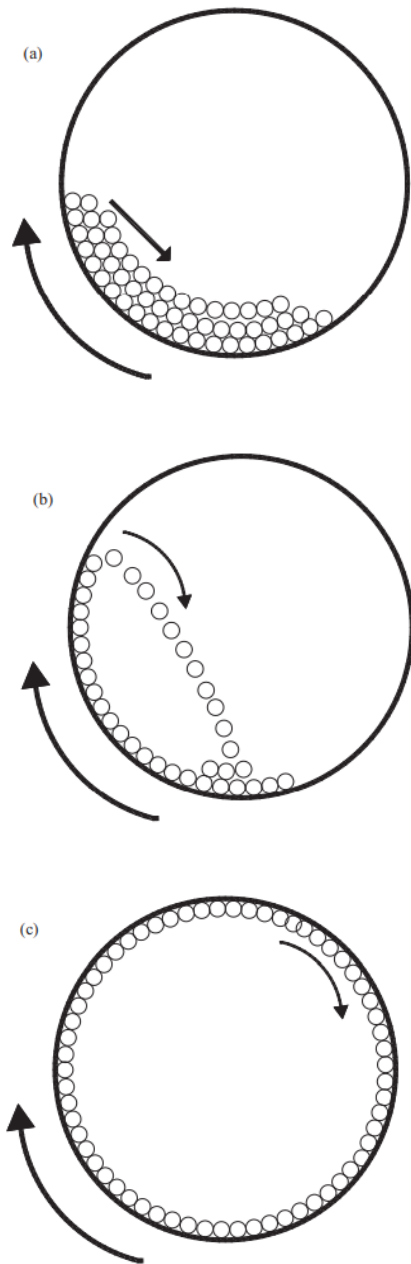
### 3.2 Seulat

Tarkastellun kohteina olevista jätteenkäsittelylinjastoista jokainen käyttää vähintään yhden tyyppistä seulaa murskatun jätteen seulomiseen, mutta moni tutkituista linjastoista kuitenkin sisälsi useamman seulan. Seulominen perustuu seulottavan materiaalin erotteluun sen partikkelikoon perusteella. Yleisimmät seulatyyppit olivat rumpuseula, kiekkoseula ja erilaiset värinäseulat.

#### 3.2.1 Rumpuseula

Rumpuseulassa seulottava materiaali kulkee pitkän pyörivän rummun läpi, joka seuloo materiaalia sen partikkelikoon mukaan. Rummun seinämä on verkkomainen ja toimii sihtinä,

päästäen läpi vain pienemmät halutun kokoiset partikkelit. (Chen, Y.-S. et al. 2010) Rumpuseulan seulontatehokkuuteen vaikuttaa vahvasti rummun pyörimisnopeus. Rummun pyöriessä hitaasti, sen sisällä oleva materiaali kasaantuu rummun pyörimissuunnan mukaisesti rummun seinämää vasten ja se valuu hitaasti takaisin rummun alaseinämälle (Kuva 2A). Kun pyörimisnopeutta kasvatetaan, seinämälle kertynyt materiaali alkaa romahtelemaan ja vyörymään valumisen sijasta (Kuva 1a). Kun pyörimisnopeus saavuttaa pisteen, jossa materiaali irtoaa rummun pinnasta ja lentää takaisin pohjalle, on rummun seulonta tehokkaimmillaan (Kuva 1b). (Santomaso, A. C. et al. 2003). Pyöriessään liian kovaa, materiaali ei irtoa rummun pinnasta ja seulominen ei onnistu (kuva 1c) Muita rumpuseulan tehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat rummun pituus, rummun halkaisija, pituussuunnan kallistus, täyttöaste ja verkon tiheys (Lau, S. T. et al. 2005). Kuvassa 1 on esitetty materiaalin kulku rumpuseulassa



Kuva 1. Materiaalin kulku rumpuseulassa. (Chen, Y.-S. et al. 2010)

### 3.2.2 Täryseula

Tutkituissa jätteenkäsittely linjastoissa täryseulat olivat yleisin seulomismenetelmä. Täryseuloista käytetään myös usein nimeä tasoseula. On olemassa useita erilaisia täryseuloja, mutta niiden perustoimintaperiaate on sama. Täryseulan toiminta perustuu

tärisevään sihtiin, joka on yleensä tasainen reikälevy kallistettuna alaspäin materiaalin kulkusuuntaan kohti. Sihtilevyä tärisytetään moottorin avulla, jolloin materiaali kulkee seulassa eteenpäin ja pienemmät partikkelit tippuvat seulan läpi isompien jatkaessa eteenpäin. Yhdessä täryseulassa voi olla useampi sihti eri reikäkoolta, jolloin seulonta on tehokkaampaa. (Nguyen, V. X. et al. 2019).

### **3.2.3 Kiekkoseula**

Kiekkoseulassa materiaali kulkee useiden pyörivien rullien päältä. Rullat voivat olla eri muotoisia, mutta useimmiten ne ovat pyöreitä ja niihin on kiinnitetty erimuotoisia kiekkoja, jotka edesauttavat materiaalin kulkua ja sekoittumista. Rullien välissä on rako, joka määrää seulottavan partikkelin koon. Hienompi materiaali pääsee tippumaan rakoon, kun karkeampi materiaali jatkaa kulkua eteenpäin. Rakojen koot kasvavat yleensä mitä pidemmälle seulaa mennään, jolloin eri kokoiset partikkelit saadaan eroteltua tehokkaasti samalla seulalla. (Yang, X.-D. et al. 2020.)

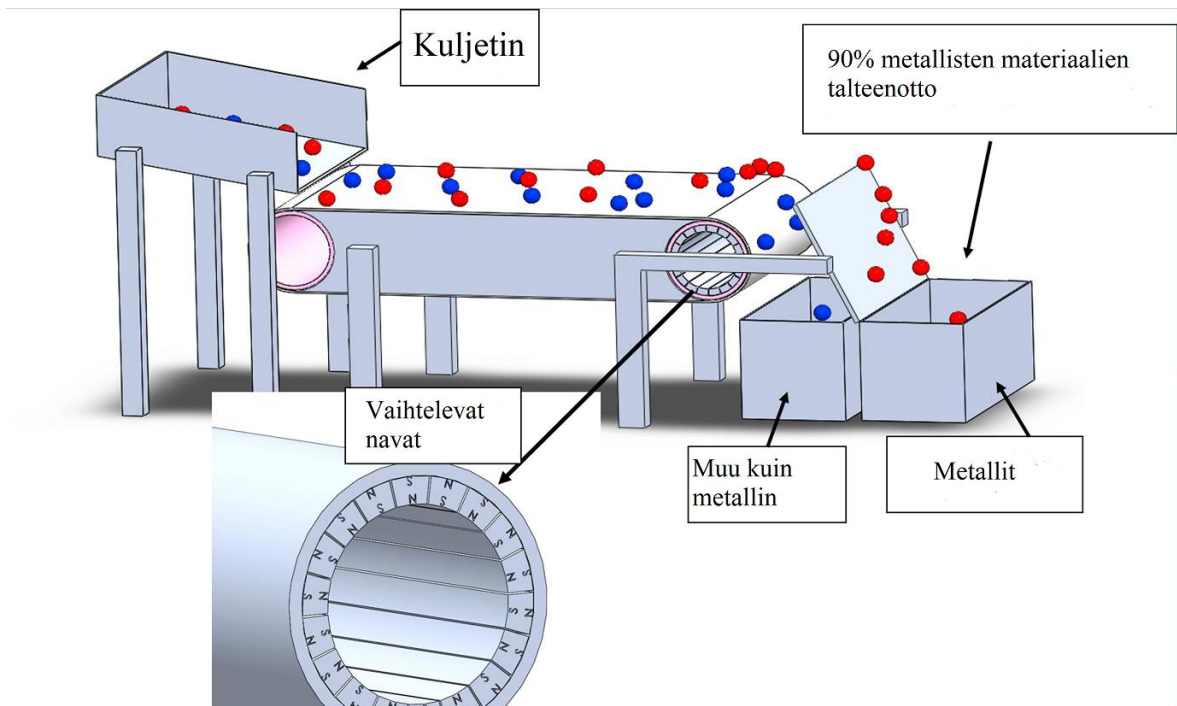
## **3.3 Magneettierotin**

Kaikissa tarkastelun kohteen olleissa jätteenkäsittely laitoksissa yhdistävänä tekijänä oli magneettierotin. Se löytyi jostain kohtaa lajitteluprosessia jokaiselta linjastolta. Magneettierottimella erotetaan magneettiset metallit jätteen seasta. Magneettierottimet voivat toimia joko kestromagneeteilla tai sähkömagneeteilla ja sitä voi käyttää kuivan tai märän materiaalin käsittelyyn tarpeiden mukaan. Kuivan materiaalin magneettierottimet ovat kuitenkin kaikista yleisimpiä. Magneetti erotin voi kuljetushihnoihin sisäänrakennettu, tai se voi olla kokonaan irrallinen laite. (Xie, S, et al. 2022).

## **3.4 Pyörrevirtaerotin**

Pyörrevirtaerottimen tehtävänä on erottaa käsiteltävästä jätteestä metallit, jotka eivät ole magneettisia. Pyörrevirtaerottimen toiminta perustuu nimensä mukaisesti pyörrevirtojen hyödyntämiseen. Pyörrevirtoja syntyy, kun sähköä johtava metallikappale kulkee vaihtelevan magneettikentän läpi ja siihen indusoituu sähköinen virta, jota kutsutaan pyörrevirraksi.

Pyörrevirta taas luo vastakkaissuuntaisen magneettikentän sen luoneeseen magneettikenttään nähden. Tällöin magneetin liikkuessa, syntyy sähköä johtavaan metallikappaleeseen magneettinen voima, joka työntää kappaletta kauemmas magneettikentästä. (Dholu, N. et al. 2017.) Yleisimmät pyörrevirtaerottimet toimivat siten, että nopeasti kulkevan liukuhihnan päällä sisällä on pyörivä magneettirumpu, joka aiheuttaa pyörrevirtoja hihnalla kulkeviin metalli kappaleisiin, jolloin niihin syntynyt magneettinen voima antaa niille lisää vauhtia. Tällöin erottelu tapahtuu liukuhihnan päässä, kun ei-metalliset kappaleet tippuvat liukuhihnan päästä lähemmäs kuin kauemmas lentävät metalli kappaleet. Kuvassa 2 on kuvattu pyörrevirtaerottimen toiminta ja materiaalin kulku.



Kuva 2. Pyörrevirtaerottimen toiminta. (Mukaiillen: Smith, Y. R. et al. 2019).

### 3.5 Ilmaerotin

Ilmaerottimia on usean erityyppisiä, mutta niiden perustoimintaperiaate on sama. Niillä pyritään erottelemaan lajiteltavasta materiaalista kevyimmät partikkelit. Ilmaerottelun avulla voidaan esimerkiksi erottaa kevyet eristemuovit ja paperin palaset muun rakennus ja purkujätteen seasta.



Tällä hetkellä on yleistymässä erityisesti kohdistetut ilmaerottimet. Kun erilaisia sensoreita käyttämällä tunnistetaan eroteltava partikkeli materiaalin seasta, voidaan siihen tarkasti kohdistaa paineilmaa, jolloin erottuu muusta materiaalista. Tämä prosessi voidaan suorittaa esimerkiksi materiaalin ollessa liukuhihnalla tai putoamassa tasolta toiselle.

### **3.6 Robotisoitu lajittelu**

Perinteisten lajittelumenetelmien ohella on myös hiljattain alkanut esiintymään erilaisia robotisoituja lajittelukeskuksia. Esimerkkinä siitä tässä tutkimuksessa on ZenRoboticsin robotilajitin. Verrattuna perinteisiin jätteenkäsittelylinjastoihin, joissa materiaali kulkee usean eri laitteen läpi, robotisoidussa linjastossa kaikki materiaali kulkee yhden liukuhinnan läpi, josta robotit poimivat jätteen ja lajittelevat ne oikein. Jätteen tunnistus tapahtuu käyttämällä erilaisia sensoreita, kuten 3D sensoreita ja värikameroita. Kaikkien sensorien keräämä data käsitellään automaattisesti koneoppimisen avulla, joka pyrkii tunnistamaan materiaalin ja kappaleet niiden muun muassa niiden koon, muodon ja värin perusteella. Tämän jälkeen kappaleiden kulkua liukuhihnalla voidaan seurata ja tieto niiden lajittelusta välitetään robotipöimijöille, jotka poimivat valitun kappaleen hihnalta ja lajittelevat sen oikeaan kohteeseen. (Tuomas J. et al. 2014)

ZenRoboticsin kädenjälki näkyy myös Suomessa. Se oli alkuperiään suomalainen yritys, mutta nykyään se on Terex Corporation omistuksessa. ZenRoboticsin kanssa yhteistyötä tekee kotimainen kiertotalouden yritys Remeo Oy. Vuonna 2021 Vantaalle valmistunut rakennus- ja purkujätteen käsittelylaitos käyttää lajittelumenetelmänään ZenRoboticsin robotisoitua lajittelu linjastoa. Valmistuessaan laitos oli maailman suuri robotisoituun lajitteluun perustuva jätteenkäsittelylaitos (Terex Corporation 2023).

## 4 Haitalliset aineet ja niiden tunnistaminen

Haitallisia aineita on käytetty rakennusmateriaaleina ja niiden lisäaineina erilaisissa käyttötarkoituksissa jo 1800-luvulta lähtien. Haitallisilla aineilla tarkoitetaan erilaisia alkuaineita ja yhdisteitä, jotka niille altistuttua ovat haitaksi ihmisille tai luonnolle. (VTT Technical Research Centre of Finland 2019). Kun nykyään haitallisiksi luokiteltuja aineita otettiin aikanaan käyttöön, ei niiden ympäristö- ja terveysvaikutuksista vielä tiedetty tai välitetty, joten niiden käyttöä ei juurikaan rajoitettu. Tämä on johtanut siihen, että monet vanhoista rakennuksista sisältävät paljon erilaisia haitallisia aineita ja niiden yhdistelmiä, joita on hankala tunnistaa, mikä hankaloittaa niiden purkamista. Nykypäivänä on olemassa luotettavat haitta-ainekartoitusmenetelmät, mutta ne vaativat usein laboratoriotestit. Tässä tutkimuksessa tutkitaan erilaisia materiaalinanalyysimenetelmiä ja niiden käyttöä eri haitta-aineiden tunnistamiseen sekalaisen rakennus- ja purkujätteen seasta.

### 4.1 Haitalliset aineet

Yleisimmät rakennus- ja purkujätteen sisältämät haitalliset aineet ovat asbesti, PCB-yhdisteet (polyklooratut bifenyylit), PAH-yhdisteet (polysykliset aromaattiset hiilivedyt) ja raskasmetallit. Niitä esiintyy rakennusmateriaaleissa useissa eri käyttökohteissa niiden ominaisuuksien mukaan.

#### 4.1.1 Asbesti

Asbestilla tarkoitetaan yleisesti orgaanisia silikaattimineraaleja, joilla on kuitumainen rakenne. Asbestia käytettiin laajasti erilaisissa rakennusmateriaaleissa, kuten eristeissä, tasoitteissa ja laasteissa. Asbestin käytön suosio perustui sen halpaan hintaan ja hyviin ominaisuuksiin. Sen korkean lämmönsietokyvyn ansiosta se on erinomainen palonestoaine. Lisäksi sen kuitumainen rakenne teki siitä helposti muokattavaa ja käytettävää. Asbestin käyttö Suomessa kohdistuu aikavälille 1922–1993 (Työterveyslaitos 2023). Asbestimateriaalien käyttöä alettiin rajoittamaan 1970-luvulla ja niiden käyttö kiellettiin lopullisesti vuonna 1994. Vuonna 2016 voimaan astuneen lainsäädännön nojalla kaikkiin ennen vuotta 1994

rakennettuja rakennuksia purkaessa on ennen purkamista suoritettava asbestikartoitus (Työturvallisuuslaki 2015).

Asbesti on yleisesti yksi tunnetuimmista haitallisista materiaaleista. Se on ihmisille hengenvaarallista joutuessaan hengitysteihin. Asbestin tiedetään aiheuttavan useita eri keuhkosairauksia ja pahimmassa tapauksessa erilaisia syöpiä keuhkoihin, kurkunpäähän sekä naisilla munasarjoihin. (Työterveyslaitos 2023).

#### **4.1.2 POP-yhdisteet**

Pysyvät orgaaniset yhdisteet eli POP-yhdisteet ovat ryhmä erilaisia kemiallisia yhdisteitä, jotka on todettu erityisen haitallisiksi aineiksi ympäristöä ja ihmisiä kohtaan. POP-yhdisteitä määrittelee ja säätelee maailman laajuinen Tukholman yleissopimus. Tukholman yleissopimus solmittiin vuonna 2001 ja sen sisältämää listaa eri POP-yhdisteistä on päivitetty vuosien saatossa. (Tukholman yleissopimus 2001)

Kun POP-yhdisteiden haitallisuus ei ollut vielä niin tunnettua eikä niiden käyttö säännelty, on niitä vuosien saatossa käytetty myös rakennusmateriaalien lisäkemikaaleina. Yleisimpänä näistä aineista rakennusmateriaalina on käytetty polykloorattuja bifenyylimuokkeleita (PCB)

#### **4.1.3 PCB-yhdisteet**

Polyklooratut bifenyylimuokkeleet (PCB-yhdisteet) ovat vaarallisiksi luokiteltuja klooria sisältäviä yhdisteitä, jotka kuuluvat POP-yhdisteisiin. PCB-yhdisteet ovat ominaisuuksiltaan hankalasti syttyviä, kemiallisesti stabiileja ja hyvin sähköä eristäviä kemikaaleja. Niiden hyvistä ominaisuuksista johtuen, niitä käytettiin 1900-luvun puolivälissä ympäri maailmaa useissa eri teollisuuden käyttökohteissa, kuten esimerkiksi maalien pehmitteinä ja eri sähkölaitteiden eristeinä. (Faroon, O. & Ruiz, P. 2016). PCB-yhdisteiden käyttöä ja valmistusta alettiin kuitenkin nopeasti rajoittamaan ja käyttöä kieltämään ympäri maailmaa, kun niiden terveys vaikutuksista opittiin. Suomessa niiden valmistus, tuonti ja myynti kiellettiin vuonna 1990. Nykyään tunnettuja PCB-yhdisteistä aiheutuvia terveyshaittoja ovat klooriakne ja

mahdollisuus nostaa syöpäriskiä suuren altistumisen tapahtuessa (Terveiden ja hyvinvoinnin laitos 2023).

#### **4.1.4 PAH-yhdisteet**

Polysykliset aromaattiset hiilivedyt (PAH-yhdisteet) ovat orgaanisia haitta-aineita, joita esiintyy luonnostaan erilaisissa hiili- ja öljypohjaisissa aineissa. Niitä on käytetty rakennusmateriaaleina 1800-luvulta lähtien. Yleisimpänä PAH-yhdisteiden käyttökohteena rakennusmateriaaleissa on ollut piki, jota on käytetty esimerkiksi vesieristeenä rakennuksissa sekä asfaltin sidosaineena. PAH-yhdisteiden käyttö on rajoitettu vuosien saatossa useaan otteeseen ja niille on löydetty parempia korvaavia aineita. Kuitenkaan ihan kaikkialla niiden käyttö ei ole vielä pystytty lopettamaan, koska korvaavia aineita ei ole löydetty. Esimerkkinä tästä on vielä nykypäivinäkin käytettävät puiset rautatiepölkkyt, jotka kyllästetään kauttaaltaan kreosootilla. (Työsuojeluhallinto 2019). Rakennus- ja purkujätteen yhteydessä syntyvä PAH-yhdisteitä sisältävän jätteen loppusijoitus on yleensä kaatopaikalle tai polttoon riippuen saastuneesta materiaalista. Vuonna 2013 annettu asetus määrittää raja-arvot kaatopaikalle vietävien altistuneiden jätteiden PAH-pitoisuuksille. (Valtioneuvosto 2013)

PAH-yhdisteet ovat haitaksi ympäristölle sekä ihmisille. Ympäristölle PAH-yhdisteet ovat haitallisia niiden imeytyessä ja kulkeutuessa maasta vesistöihin ja sitä kautta edelleen kasvillisuuteen sekä vesieliöihin. Tällöin myös ihminen voi altistua PAH-yhdisteille niellessään saastuneita eliöitä. PAH-yhdisteet ovat haitallisia ihmiselle myös paljaalla kosketuksella, mutta vakavimman haitan ne aiheuttavat, kun niille altistuu hengittämällä. Yleisin tapa rakennus- ja purkujätteen käsittelyssä altistua PAH-yhdisteille on purkujätteestä syntyvä pöly. PAH-yhdisteiden on todettu aiheuttavan syöpää ja 1993 vuodesta lähtien ne kuuluvat Työministeriön päätöksen mukaan syöpäsairautta aiheuttaviksi aineiksi (Työministeriö 1993).

#### **4.1.5 Raskasmetallit**

Raskasmetalleilla tarkoitetaan metalleja, joiden tiheys on suurempi kuin  $5 \text{ g/cm}^3$ . Nykyään kuitenkin yleisesti puhuttaessa raskasmetalleista, viitataan niillä raskasmetalleihin, jotka ovat ympäristölle tai ihmisille haitallisia. Ihmisen altistuminen vaarallisille määrille

raskasmetalleja johtaa erilaisiin myrkytyksen oireisiin ja jopa kuolemaan. (Briffa, J. Sinagra, E. Blundell, R. 2020)

Raskasmetalleja on käytetty monissa eri käyttö tarkoituksissa rakennusmateriaaleina ja niiden lisäaineina, kuten putkistoissa, tiivistemateriaaleissa ja maalien lisäaineena, josta ne päätyvät rakennusten purettaessa jätteeksi (Malik, J. A. & Marathe, S. 2021). Lisäksi paljon raskasmetallipitoista purkujätettä tuottaa myös erilaiset teollisuuden purkutyöt. Teollisuudessa käytetään erilaisia raskasmetalleja esimerkiksi tuotantoprosesseissa valmistuskemikaaleissa. (Gao, X. et al. 2015)

## **4.2 Haitallisten aineiden tunnistusmenetelmät**

Haitallisten aineiden tunnistamiseen on olemassa useita erityyppisiä menetelmiä. Osa menetelmistä ovat aikaa vieviä ja vaativat kosketusta materiaaliin, mikä on hankalaa jätteen lajittelulinjastoissa. Tämän takia pyritään löytämään ja käyttämään menetelmiä, jotka eivät vaadi kosketusta materiaaliin ja voivat tunnistaa materiaalit etäältä. Tällaisia menetelmiä ovat erilaiset spektroskooppiset menetelmät. Rakennus ja purkujätteen sisältämien haitallisten aineiden analysointimenetelmistä perustuvat pääsääntöisesti spektroskopiaan. Spektroskopiolla tarkoitetaan yleisesti menetelmiä, joilla tutkitaan sähkömagneettista säteilyä ja sen ominaisuuksia.

### **4.2.1 NIR-menetelmä**

Near-infrared (NIR), suomeksi lähi-infrapunaspektroskopia on lähi-infrapunasäteilyyn perustuva materiaalin analysointimenetelmä. Lähi-infrapunalla tarkoitetaan elektromagneettista infrapunasäteilyä, jonka aallonpituus on väliltä 800–2500 nm. Aallonpituuden kasvaessa yli 2500 nm, puhutaan keski-infrapuna-alueesta (MIR) ja yli 8000 nm puhutaan kaukoinfrapuna-alueesta (FIR). NIR on materiaalin analysointimenetelmä, jossa mitattavaan materiaaliin kohdistetaan lähi-infrapunasäteilyä ja mitataan takaisin heijastuva säteilyn määrä eri aallonpituuksilla. Takaisin heijastuneesta säteilystä nähdään, miten materiaali imee säteilyä ja sen perusteella voidaan päätellä materiaalin molekyylinen koostumus (Williams, P. et al. 2019). Erityisesti orgaaniset materiaalit, jotka sisältävät funktionaalisia molekyyliiryhmiä, kuten hydroksyyliiryhmä -OH tai amidiryhmä -NH<sub>2</sub> ovat helposti

tunnistettavissa NIR menetelmillä. Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi puu ja öljypohjaiset materiaalit (Xiao, W. et al. 2020).

NIR menetelmän käyttöä jätteen lajittelussa on tutkittu erilaisten jätevirtojen lajittelussa ja tällä hetkellä sen kaupalliset sovellukset ovat pääsääntöisesti muovien ja tekstiilien lajittelussa. Menetelmän käyttöä on kuitenkin tutkittu myös rakennus- ja purkujätteen lajittelussa yhdessä röntgenfluoresenssin (XRF) ja laseravusteisen hajotusspektroskopian (LIBS) yhteydessä. Tuoreessa tutkimuksessa testattiin onnistuneesti rakennus- ja purkujätteeseen kuuluvien sekalaisten betoni-, tiili- ja laastijätteen lajittelua (Klewe et al. 2022).

NIR- menetelmää on myös sovellettu saastuneiden maanperänäytteiden tutkimiseen ja sen avulla on onnistuttu tunnistamaan PAH-yhdisteitä esimerkiksi öljyllä saastuneesta maaperästä. (Douglas, R. K. et al. 2019)

Kun lähi-infrapuna-alueeseen yhdistetään näkyvä valoalue, saadaan aikaan näkyvä lähi-infrapunamenetelmä (Vis-NIR, joskus myös VNIR). Menetelmän käyttöä ei erityisemmin ole sovellettu rakennus ja purkujätteen lajitteluun, mutta sitä on testattu onnistuneesti PCB-yhdisteiden tunnistamiseen saastuneesta maaperästä (Leone, N. et al. 2022).

#### **4.2.2 XRF-menetelmä**

Röntgenfluoresenssi (XRF) on spektroskooppinen materiaalin analysointimenetelmä. Menetelmä perustuu sähkömagneettiseen röntgen säteilyn käyttöön eikä vahingoita tutkittavaa materiaalia. XRF menetelmässä tutkittavaan materiaaliin kohdistetaan röntgensäteilyä, joka tuotetaan yleensä röntgenputkilla (Reinhold Klockenkämper & Bohlen, A. von 2015). Syntyvän röntgensäteilyn energian on oltava riittävän suuri poistamaan elektronin materiaalin sisältämien atomien sisimmältä atomiorbitaalilta muuttaen atomin ioniseen muotoon. Tällöin on mahdollista, että ulompien orbitaalien elektroni korvaa sisemmän orbitaalin elektronin tuottaen samalla fluoresoivaa röntgensäteilyä. Tätä röntgensäteilyä taas voidaan mitata, jolloin sen intensiteetin ja energian perusteella voidaan määrittää mistä atomeista analysoitu materiaali koostuu. (Marguí, E. et al. 2013) Perinteisen Röntgenfluoresenssin käyttöä kuitenkin rajoittaa atomien massa. Mitä matalampi atomiluku atomilla on, sitä heikompi on sen fluoresoiva röntgen tuotto. Yleisesti rajana on pidetty atomilukua 14. Röntgenfluoresenssin

tarkkuutta on kuitenkin onnistuttu parantamaan jalostamalla perinteistä menetelmää ja nykyään matalampien atomilukujen omaavia materiaaleja voidaan tunnistaa tarkemmin (Dhara, S. et al. 2015)

XFR laitteita on olemassa eri mittakaavoissa: laboratorio olosuhteisiin sopeutuvat isommat ja tarkemmat laitteet, kannettavat kenttäkäyttöön sopivat laitteet sekä erilaiset teollisuuskäyttöön suunnitellut laitteet. XRF-menetelmän avulla on tehty erilaisia automatisoitu erottimia ja lajittimia eri teollisuuden aloille.

Jätteen käsittelyssä XRF menetelmän sovelluksia on tutkittu kyllästetyn puujätteen sekä metallijätteen lajittelussa. XRF menetelmällä on onnistuttu tunnistamaan raskasmetallipitoisen kyllästetty ja pinnoitettu puujäte ja sitä on onnistuttu kierrättämään noin 90 % tehokkuudella (Hasan, A. R. et al. 2011). Metallijätteen lajittelussa XRF-menetelmää käyttää jo useampi kaupallinen valmistaja. Hyvänä esimerkkinä tästä on Steinert GmbH:n erottelu laitteistot. Steinertin metallinerotuslaitteisto käyttää onnistuneesti XRF-menetelmää tunnistukseen metallit liukuhihnalta ja erottamiseen kohdistettua ilmaerotinta erottaakseen halutut metallit materiaalivirrasta (Steinert GmbH 2023).

Röntgen säteilyn pohjalta on myös kehitetty XRT-menetelmä, joka perustuu materiaalin tiheyden mittaamiseen. Materiaalin tulee olla puhdasta, joten se ei sovellu haitallisten aineiden tunnistamiseen jätteen lajitteluun.

### **4.2.3 LIBS-menetelmä**

Laseravusteinen hajotusspektroskopia (LIBS) perustuu materiaalin analysointiin siihen kohdistetun laserin avulla. Laser voidaan tuottaa useilla erilaisilla menetelmillä, mutta yleisin lasertyyppi on neodyymiseostettu yttrium-alumiini-granaatti laser (Nd:YAG). Laser kohdistetaan halutun materiaalin pintaan ja siihen ammutaan yksittäinen laserpulssi. Laserpulssin ansiosta materiaalin pinnalle syntyy hetkellisesti pieni määrä plasmaa, joka höyrystää osan materiaalista. Syntyvän plasman säteilemää valoa tutkimalla voidaan sen intensiteetin ja aallonpituuden perusteella määrittää mistä materiaalista on kyse. Toisin kuin NIR- ja XRF-menetelmät, jotka ovat tutkittavaa materiaalia vahingoittamattomia menetelmiä, LIBS-menetelmässä materiaali vahingoittuu osittain tutkittavasta kohdasta. LIBS-menetelmää voidaan

käyttää kaikkien eri aineenolomuotojen analysoitiin. (Cremers, D. A. & Radziemski, L. J. 2013).

LIBS-menetelmän käyttöä jätteen lajittelussa on tutkittu laajasti ja sen käytöstä on tehty myös käytännönkokeita eri jätelajien lajittelussa. Onnistuneita tutkimuksia on tehty raskasmetalleja sisältävien kyllästettyjen puujätteiden, muovijätteiden sekä metallijätteiden lajittelussa ja menetelmällä on todettu olevan potentiaalia isompien automaattisten lajittelulinjasovelluksiin (Gundupalli, S. P. et al. 2017)

Tämänhetkiset kaupalliset sovellukset LIBS-menetelmän käytöstä jätelajittelussa ovat pääsääntöisesti metallien lajitteluun kohdistuvia. Erityisesti alumiinijätteen lajittelussa LIBS on todettu toimivaksi menetelmäksi.



## 5 Johtopäätökset

Rakennus ja purkujätteen käsittelyyn löytyi useita erilaisia menetelmiä ja lähes kaikki näistä toimivat paremmin, kun materiaalien partikkeli kokoa pienennetään erilaisten murskainten tai silppurien avulla. Vaikka kaikki tutkitut linjastot ovatkin suunniteltu käsittelemään rakennus ja purkujätettä, on niissä silti yllättävän paljon eroavaisuuksia. Kaikissa tutkituissa linjastoissa oli käytössä vähintään yhden tyyppinen seula ja magneettierotin, mutta muuten niissä käytettävät lajittelu menetelmät vaihtelevat laajasti eri laitoksissa. Muita erottelumenetelmiä ovat esimerkiksi ilmaerotin ja pyörrevirtaerotin. Eroavaisuuksien syynä saattaa olla paikallisten rakennus ja purkujätteiden koostumus sekä niiden esilajittelun taso. Mitä paremmin esimerkiksi metallit on lajiteltu ennen jätteen käsittelylinjastolle vientiä, sitä vähemmän on tarvetta pyörrevirtaerottimelle. Toisaalta taas linjastot, jotka käsittelevät muutakin kuin rakennus- ja purkujätettä, saattavat sisältää menetelmiä ja laitteita, jotka sopivat paremmin muunkinlaisen jätteen käsittelyyn. Esimerkkinä tästä ilmaerotin muovijätteen erotteluun yhdyskuntajätteestä.

Haitallisia aineiden käyttö näkyy nykypäivän rakennus- ja purkujätteen seassa laajalti. Yleisimpiä näistä aineista ovat PCB-, PAH-, ja POP-yhdisteet, sekä raskasmetallit ja asbesti. Näiden tunnistaminen on hankalaa, sillä niitä ei pystytä erottelemaan ja tunnistamaan niiden perinteisten fyysisten ominaisuuksien avulla. Yleisimmät tunnistus menetelmät haitallisten aineiden tunnistamiseen ovat NIR-, XRF- ja LIBS-menetelmät. Taulukossa 2 on ilmaistu, mitä menetelmiä minkäkin haitallisen aineen tunnistamiseen voidaan käyttää.

Taulukko 2. Haitallisten aineiden tunnistusmenetelmillä tunnistettavat aineet.

	Asbesti	PCB	PAH	Raskasmetallit
NIR	X		X	X
XRF				X
LIBS	X			X

Tutkielmassa selvitettyjen haitallisten aineiden tunnistusmenetelmien käyttö nykyaikaisissa jätteenkäsittelylaitoksissa on vähäistä, vaikka osa menetelmistä onkin todettu toimiviksi. Enemmistö jätteenkäsittelylaitoksista tyytyy käyttämään vielä perinteisiä lajittelumenetelmiä, joilla ei pystytä suoraan erottelemaan haitallisia materiaaleja. Vaikuttavia tekijöitä tähän voi olla, että esimerkiksi NIR-, XRF- ja LIBS-menetelmien sovellukset eivät ole vielä riittävän hyviä massakäyttöön sekä niiden tehokkuus ei riitä välttämättä taloudelliseen käyttöön. Lisäksi myös hyvät nykyaikaiset haitta-ainekartoitusmenetelmät sekä hyvä jätteen esilajittelu ennen käsittelylaitoksille viemistä laskee reilusti sekalaisen jätteen tuomaa kuormitusta jätteenkäsittelylaitoksille. Tämän takia ei välttämättä ole koettu tarpeelliseksi ottaa käyttöön spektroskooppisia menetelmiä jätteen lajittelua varten.

Selvitetyissä haitallisten aineiden tunnistusmenetelmien sovelluksissa on huomattavissa selkeää painottumisen raskasmetallien tunnistamiseen kiinteän jätteen lajittelussa, vaikka potentiaali voisi olla myös muiden haitallisten jätelajien käsittelyssä. Pohjana tälle saattaa olla menetelmien aikaisemmat käyttökohteet muissa metallien tunnistukseen liittyvissä sovelluksissa. Esimerkiksi maanäytteiden tutkiminen mineraalien ja metallien etsinnässä on käytetty XRF menetelmää, jonka pohjalta on ollut mahdollisesta lähteä jalostamaan menetelmien käyttöä jätteen lajittelussa.

Erilaisten materiaalinanalysointimenetelmien soveltamisessa rakennus- ja purkujätteen käsittelyssä on paljon potentiaalia tulevaisuuden kannalta. Nykyisten sovellusten lisäksi on olemassa menetelmiä, joiden tutkiminen kannattaa uusien innovaatioiden syntymiseksi. Mahdollisilla uusilla menetelmillä pystyttäisiin ehkä tunnistamaan haitallisia aineita paremmin, mutta niiden käyttö vaatii vielä lisää tutkimuksia ja testausta.

Löydetyillä haitallisten aineiden tunnistusmenetelmillä on myös paljon potentiaalia yhdistettynä robotisoituun lajitteluun. Yhdessä kameroiden ja eri sensoreiden konenäön kanssa haitallisten aineiden tunnistusmenetelmillä voitaisiin jatkojalostaa jo olemassa olevia robotisoituja jätteenkäsittelylinjastoja. Lisäksi robotisoituun linjastoon olisi myös mahdollista yhdistää perinteisiä erotusmenetelmiä ja niiden kehityksiä, kuten kohdistettu paineilmaerottelu.

Potentiaalia ja kehitysvaraa rakennus- ja purkujätteen kierrätyksen tulevaisuutta ajatellen on reilusti. Mitä nopeammin rakennus- ja purkujätteen määrä maailmanlaajuisesti kasvaa, sitä oleellisempaa on lajittelu ja tunnistusmenetelmien kehittäminen.

## 6 Yhteenveto

Tässä kandidaatintutkielmassa selvitettiin, minkälaisia lajittelumenetelmiä rakennus- ja purkujätteen käsittelyyn on ja minkälaisia menetelmiä niiden sisältämien haitallisten aineiden tunnistamiseen on. Rakennus- ja purkujätteen esilajittelu jo työmaalla ennen käsittelyä on tärkeää, koska se laskee jätteen käsittelylaitosten kuormitusta ja helpottaa kierrätystä. Jätteenkäsittelylaitoksilla jäte murskataan, jolloin sen käsitteleminen erilaisin mekaanisin menetelmin on helpompaa. Yleisimmät lajittelu menetelmät ovat erilaiset seulat sekä magneettierotin. Niiden lisäksi käytetään esimerkiksi pyörrevirtaerottimia ja erityyppisiä ilmaerottimia.

Rakennus- ja purkujätteen sisältämät yleisimmät haitalliset aineet ovat asbesti, PCB-yhdisteet, PAH-yhdisteet ja raskasmetallit. Niiden tunnistamiseen löytyy useampia eri keinoja. Näiden aineiden tunnistaminen on hankalaa, koska niitä ei pystytä tunnistamaan perinteisin mekaanisin menetelmin, vaan joudutaan käyttämään erilaisia materiaalinanalysointi menetelmiä. Yleisimpiä ja käytetyimpiä näistä ovat lähi-infrapunaspektroskopia, Röntgenfluoresenssi ja Laser hajotusspektroskopia. Menetelmiä käytetään vaihtelevasti eri rakennus- ja purkujätteen käsittely laitoksissa. Näitä menetelmiä käyttäessä haitallisten aineiden tunnistamiseen voidaan sekalaisesta rakennus- ja purkujätteestä tehdä puhtaampaa, jolloin enemmän jättemateriaalia voidaan sijoittaa uusiokäyttöön.

Työssä käsitellyt menetelmät auttavat kasvattamaan rakennus- ja purkujätteen uusiokäytön määrää, mikä edesauttaa jätteen kierrätyksen ympäristötavoitteiden saavuttamista.

## Lähteet

Baskar, C. (2022) Handbook of solid waste management: sustainability through circular economy. Chinnappan Baskar (ed.). Singapore: Springer.

BMH Technology Oy (2023) [Viitattu 20.4.2023] Saatvailla: <https://www.bmh.fi/category/equipment/separation-equipment/>

Briffa, J. Sinagra, E. Blundell, R. (2020) Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on human. Heliyon CellPress 2020 Volume 6 Issue 9

CDE Group (2023) [Viitattu 20.4.2023] Saatavilla: <https://www.cdegroupp.com/about/case-studies/velde-pukk-stavanger-norway>

Chen, Y.-S. Hsiao, S. Lee, H. Chyou, Y. Hsu, C. (2010) Size separation of particulates in a trommel screen system. Chemical Engineering and Processing. 49 (11), 1214–1221.

Cremers, D. A. & Radziemski, L. J. (2013) Handbook of laser-induced breakdown spectroscopy. 2nd ed. Chichester, West Sussex, U.K: John Wiley & Sons, Ltd.

Dhara, S. Misra, N.L. Aggarwal, S. K. Ingerle, D. Wobrauschek, P. Sterli, C. (2015) Determinations of low atomic number elements in real uranium oxide samples using vacuum chamber total reflection X-ray fluorescence. X-ray Spectrometry. 44 (6), 475–475.

Dholu, N. Nagel, J. R. Cohrs, D. Rajamani, R. K. (2017) Eddy Current Separation of Non-ferrous Metals Using a Variable-Frequency Electromagnet. Kona. 34:241–247.

Douglas, R. K. Nawar, S. Alamar, M. C. Coulon, F. Mouazen, A. M. (2019) Rapid detection of alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons in oil-contaminated soil with visible near-infrared spectroscopy. European Journal of Soil Science. 70 (1), 140–150.

Euroopan parlamentti 2008. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2008/98/EC [viitattu 5.4.2023]. Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32008L0098>

Faroon, O. & Ruiz, P. (2016) Polychlorinated biphenyls: New evidence from the last decade. Toxicology and Industrial Health. 32 (11), 1825–1847.

- Gao, X. gu, Y. Xie, T. Zhen, G. Huang, S. Zhao, Y. (2015) Characterization and environmental risk assessment of heavy metals in construction and demolition wastes from five sources (chemical, metallurgical and light industries, and residential and recycled aggregates). *Environmental Science and Pollution Research International*. 22 (12), 9332–9344.
- Gundupalli, S. P.Hait, S. Thakur, A. (2017) A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling. *Waste Management (Elmsford)*. 6056–74.
- Hasan, A. R. Solo-Gabriele, H. Townsend, T (2011) Online sorting of recovered wood waste by automated XRF-technology: Part II. Sorting efficiencies. *Waste Management (Elmsford)*. 31 (4), 695–704.
- Klewe, Tim & Völker, Tobias & Götz, Jenny & Landmann, Mirko & Wilsch, Gerd & Kruchwitz, Sabine. (2022). Sorting of construction and demolition waste by combining LIBS with NIR spectroscopy. *NDT-CE 2022*
- Lau, S. T.Cheung, W. H. Kwong, C. P., Choy, K.K.H. Leung, C.C. Porter, J.F. Hui, C.W. McKay, G. (2005) Removal of batteries from solid waste using trommel separation. *Waste Management (Elmsford)*. 25 (10), 1004–1012.
- Leone, N. Ancona, V. Galeone, C. Massarelli, C. Uriccho, V.F. Leone, A.P. (2022) Vis-NIR Reflectance Spectroscopy and PLSR to Predict PCB Content in Severely Contaminated Soils: A Perspective Approach. *Applied sciences*. 12 (16), 8283.
- Lukka, T. Tossavainen, T. Kujala, J. Raiko, T. (2014) ZenRobotics Recycler – Robotic Sorting using Machine Learning. *Sensor Based Sorting 2014*
- Malik, J. A. & Marathe, S. (2021) ‘Heavy Metal Contamination from Construction Materials’, in *Ecological and Health Effects of Building Materials*. Switzerland: Springer International Publishing AG. pp. 113–131.
- Marguí, E.Grieken, R. Van, R. (2013) X-ray fluorescence spectrometry and related techniques: an introduction. New York, New York: Momentum Press.
- Nguyen, V. X.Nguyen, K.L. Dinh, G.N. (2019) Study of the dynamics and analysis of the effect of the position of the vibration motor to the oscillation of vibrating screen. *Journal of physics. Conference Series*. 1384 (1), 12035

Reinhold Klockenkämper & Bohlen, A. von (2015) Total-reflection x-ray fluorescence analysis and related methods. 2nd ed. Hoboken, New Jersey: Wiley.

Salpakierto Oy (2023) LATE-lajittelulaitos. [Viitattu 20.4.2023] Saatavilla: [https://salpakierto.fi/wp-content/uploads/2018/04/Esite-LATE-lajittelulaitos-LOPULLINEN\\_pieni.pdf](https://salpakierto.fi/wp-content/uploads/2018/04/Esite-LATE-lajittelulaitos-LOPULLINEN_pieni.pdf)

Santomaso, A. C. Ding, Y.L. Lickiss, J.R. York, D.W. (2003) Investigation of the Granular Behaviour in a Rotating Drum Operated over a Wide Range of Rotational Speed. Chemical Engineering Research & Design. 81 (8), 936–945.

Smith, Y. R. Nagel, J.R. Rajamani, R.K. (2019) Eddy current separation for recovery of non-ferrous metallic particles: A comprehensive review. Minerals Engineering. 133 (C), 149–159.

Steinert GmbH (2023) [Viitattu 3.5.2023] Saatavilla: <https://steinertglobal.com/magnets-sensor-sorting-units/sensor-sorting/x-ray-sorting-systems/>

Terex Corporation (2023) [Viitattu 20.4.2023] Saatavilla: <https://www.bmh.fi/category/equipment/separation-equipment/>

Terveysten ja hyvinvoinnin laitos (2023) Dioksiini ja PCB-yhdisteet. THL.FI 2023 saatavilla: <https://thl.fi/fi/web/ymparistoverveys/ymparistomyrkyt/dioksiinit-ja-pcb-yhdisteet>

Tolpo, A. (2020) Suomi pulassa rakennusjätteen kanssa – neljän vuoden päästä alkaa aika kierrätyksen mallimaan, mutta omakin tavoite on liian kaukana. YLE, 9.5.2020 Saatavilla: <https://yle.fi/a/3-11341859#:~:text=Koko%20Euroopan%20tasolla%20noin%20kolmannes,1%2C6%20miljoonaa%20tonnia%20vuodessa>

Tukholma yleissopimus (2001) Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. <http://www.pops.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/2232/Default.aspx>

Työministeriö (1993) Työministeriön päätös syöpäsairauden vaaraa-aiheuttavista tekijöistä. 838/1993 [Viitattu 3.5.2023] Saatavilla: <https://finlex.fi/fi/laki/alkup/1993/19930838>

Työsuojeluhallinto (2019) PAH-yhdisteitä sisältävät rakennusmateriaalit huomioitava purkukohteissa. [Viitattu 3.5.2023] Saatavilla: <https://www.tyosuojelu.fi/-/pah-yhdisteita-sisaltavat-rakennusmateriaalit-huomioitava-purkukohteissa>

Työterveyslaitos (2023) Asbesti. [Viitattu 5.4.2023]. Saatavilla: <https://www.ttl.fi/teemat/tyoturvallisuus/altistuminen-tyoympariston-haittatekijoille/kemiallisten-tekijoiden-hallinta-tyopaikalla/kemikaalit-ja-tyo-altistumistietosivusto/asbesti>

Työturvallisuuslaki (2015). Valtioneuvoston asetus asbestityön turvallisuudesta. 798/2015 [Viitattu 5.4.2023] Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/smur/2015/20150798>

Valtioneuvosto (2013) Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista. 331/2013

VTT Technical Research Centre of Finland (2019) Hazardous substances in construction product and materials

Williams, P. Manley, M. Antoniszyn, J. (2019) Near infrared technology: getting the best out of light. Sun Press.

Xiao, W. Yang, J. Fang, H. Zhuang, J. Ku, Y. Zhang, X. (2020) Development of an automatic sorting robot for construction and demolition waste. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 22 (9), 1829–1841.

Xie, S. HU, Z. Lu, D. Zhao, Y. (2022) Dry Permanent Magnetic Separator: Present Status and Future Prospects. *Minerals* 2022, 12, 1251. <https://doi.org/10.3390/min12101251>

Yang, X.-D. Zhao, L. Li, H. Liu, C. Hu, E. Li, Y. Hou, Q. (2020) DEM study of particles flow on an industrial-scale roller screen. *Advanced powder technology: the international journal of the Society of Powder Technology, Japan*. 31 (11), 4445–4456.

Ympäristöministeriö, 2021. Uusi jäteasetus velvoittaa nykyistä tehokkaampaan erillikeräykseen ja kierrätykseen. <https://ym.fi/-/uusi-jateasetus-velvoittaa-nykyista-tehokkaampaan-erilliskeraykseen-ja-kierratykseen>

ZB Group. (2023) Construction and demolition waste (CDW) Treatment [Viitattu 20.4.2023] Saatavilla: <https://www.zbgroup.es/en/construction-and-demolition-waste-treatment>

Zhang C., H, M., Sprecher B., Yang X., Zhong X., Li C., Tukker A. 2021. Recycling potential in building energy renovation: A prospective study of the Dutch residential building stock up to 2050. *Journal of Cleaner Production* 301(10): 126835