Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Veikko Rauta

Konenäkö ja optiset menetelmät materiaalien tunnistamisessa kierrätyksessä

Konenäön ja optisten menetelmien hyödyntäminen materiaalien tunnistamisessa kierrätyksen näkökulmasta

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen
akateeminen yksikkö
Automaatio ja tietotekniikka
Tekniikan kandidaatti

Vaasa 2025

VAASAN YLIOPISTO
Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö
Tekijä: Veikko Rauta
Tutkielman nimi: Konenäkö ja optiset menetelmät materiaalien tunnistamisessa kierrätyksessä: Konenäön ja optisten menetelmien hyödyntäminen materiaalien tunnistamisessa kierrätyksen näkökulmasta
Tutkinto: Tekniikan kandidaatti
Oppiaine: Automaatio ja tietotekniikka
Työn ohjaaja: Janne Koljonen
Valmistumisvuosi: 2025 **Sivumäärä:** **27**

TIIVISTELMÄ:
Kierrätyksen tärkeys on noussut viimevuosien aikana suureen arvoon koko maailmassa. Vihreät arvot sekä taloudellisen hyödyn tavoitteleminen ohjaavat yritykset tekemään lajittelusta mahdollisimman tehokasta ja nopeaa. Automaation rooli on kasvanut ja tulee varmasti kasvamaan tulevaisuudessa suuremmaksi, koska se mahdollistaa nopean ja tehokkaan lajittelun kierrätyskeskuksissa.

Automaattisissa kierrätysjärjestelmissä on mahdollista hyödyntää useaa menetelmää materiaalien tunnistamiseen. Tässä tutkielmassa tutkimme konenäköön ja eri optisiin menetelmiin perustuvia materiaalien tunnistamiskeinoja, ja niiden sovelluksia kierrätykseen ja materiaalien lajitteluun.

Tutkielmassa käsitellään kuutta optista menetelmää materiaalien tunnistamiseksi. Nämä menetelmät ovat infrapunaspektroskopia, lähi-infrapunaspektroskopia, laser, fluoresoivat merkit, optinen värisävy ja optinen harmaasävy.

Optisia menetelmiä hyödyntäen on mahdollista suorittaa tehokasta lajittelua, kuhan otetaan huomioon eri menetelmien vahvuudet ja heikkoudet.
Tutkimuksessa selviää, että yhdistämällä tiettyjä teknologioita pystytään rakentamaan optisin menetelmin toimiva kierrätysjärjestelmä.

AVAINSANAT: Konenäkö, Kierrätys, optiset menetelmät, kuvantaminen

Sisällys

1 Johdanto 5

1.1 Tutkimuksen tavoite ja menetelmä 5

1.2 Tutkielman rakenne 6

2 Tarve kierrätysjärjestelmien automatisoinnille 7

2.1 Kierrätyksen tärkeys jätteidenkäsittelyssä 7

2.2 Yleiskuva automaattisesta lajitteluprosessista 8

3 Konenäkö 10

3.1 Mitä konenäkö on? 10

3.2 Kuvantamismenetelmät 11

4 Materiaalien tunnistus konenäöllä 16

4.1 Eri materiaalien lajittelu 16

4.2 Eri tekniikoiden analyysi 16

4.3 Tekniikoiden vertailu 21

5 Yhteenveto 24

Lähteet 25

Kuvat

Kuva 1. RGB-Tasot 11

Kuva 2. Malli optisesta lajittelujärjestelmästä 18

Kuva 3: Optinen harmaasävy 20

Kuva 4: Optinen värisävy 21

Kuviot

Kuvio 1. Malli kierrätysjärjestelmän luomiseen 23

Taulukot

Taulukko 1. Eri teknologioita muovin tunnistamiseen (Elo, 2013, s.39). 9

Taulukko 2. Yhteenveto kunkin hyperspektrimenetelmän vahvuuksista ja heikkouksista (Yoon, 2022, s.5). 14

Taulukko 3. Tutkimukseen valitut teknologiat. 17

Taulukko 4. Tutkimuksen tulokset. 21

1 Johdanto

Kierrätyksestä ja ympäristöongelmista on noussut tärkeä aihe yhteiskunnassa 2000-luvun aikana, johtuen kasvaneesta tietoisuudesta sekä ympäristöön liittyvien säädösten laajentuessa (Damanhuri, 2012, s.99). Kestävän kehityksen periaatteet ovat nousseet olennaisiksi osiksi talous- sekä ympäristöpolitiikkaa, sekä kehittyneissä ja vielä kehittyvissä maissa (Cuc & Vidovic, 2014, s.1). Nykyajan suuria ongelmia on jatkuvasti kasvavat määrät maailmanlaajuista tuotantoa ja kulutusta, ja tähän liittyvien tuotantoketjujen kuluttamat materiaalien raaka-aineet, vesi ja energia (Cuc & Vidovic, 2014, s.1). Kierrätyksen tärkeyttä on siis vaikea korostaa liikaa. Esimerkiksi 50-luvusta lähtien vain 9 prosenttia muovijätteestä on kierrätetty riittävällä tavalla ja lähes puolet tästä jätteestä on päätynyt kaatopaikoille tai kaadettu luontoon (d'Ambrières, 2019, s.13).

Kierrätysala on olemassa tehdäkseen rahaa, ja tämä taloudellinen voitto saadaan veloittamalla maksu kerätystä jätteestä sekä myymällä lajiteltu ja käsitelty raaka-aine eteenpäin (Elo, 2013, s.10). On siis helppo päätellä, että mitä enemmän jätettä pystytään lajittelemaan tehokkaasti, niin tuottaa se parempaa taloudellista tulosta.
Tehokkaasti lajittelemalla alueellista kiinteää jätettä, on mahdollista saada talteen arvokkaita raaka-aineita kuten metallia, paperia, muovia sekä lasia (Gundupalli ym., 2017, s.57). Näiden eri raaka-aineiden lajitteluun voidaan ottaa käyttöön erilaisia automaattisia lajittelujärjestelmiä tehostamaan lajittelukeskusten toimintaa, tavoitteena parantaa asiakkaalle toimitetun tuotteen määrää ja laatua sekä työn tehokkuutta ja henkilöstön työympäristöä (Elo, 2013, s.6).

1.1 Tutkimuksen tavoite ja menetelmä

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, miten konenäköä ja optisia menetelmiä voidaan hyödyntää kierrätyksessä ja materiaalien tunnistamisessa esimerkiksi lajittelun tehostamiseen tai muuhun kierrätystä tehostavaan toimintaan.

Tutkimus toteutetaan kirjallisuuskatsauksena, jossa tutkimusaineistona käytetään julkaisuja vuodesta 2012 eteenpäin. Tutkimuksessa on haettu artikkeleita Google Scholar-hakukoneen avulla käyttäen avainsanoja ”Recycling”, ”Machine vision”, ”Sorting” jne.

Kirjallisuuden perusteella pyritään määrittämään konenäön ja optisten menetelmien eri sovelluksia kierrätykseen.

1.2 Tutkielman rakenne

Tutkielman toisessa luvussa käsitellään kierrätysjärjestelmän automatisointia, kierrätystä yleisesti, sekä luodaan yleinen kuva automaattisesta kierrätysjärjestelmästä.

Kolmannessa luvussa käsittelemme konenäköä sekä konenäön erilaisia kuvantamismenetelmiä, joilla koneet tunnistavat ympäristöään.

Neljännessä luvussa käsittelemme materiaalien tunnistamista konenäön avulla, ja mitä erilaisia keinoja siihen on. Tämän jälkeen pohdimme mitkä optiset menetelmät soveltuvat kierrätykseen, ja mitkä menetelmät tukevat toisiaan tässä tarkoituksessa.

Viidennessä luvussa keräämme edeltävän kappaleen perusteella tehdyt tulokset ja muodostamme yhteenvedon tutkielman tuloksena. Tämän lisäksi pohdimme mahdollisia jatkotutkimusmahdollisuuksia.

2 Tarve kierrätysjärjestelmien automatisoinnille

Maiden urbanisaatio ja teollistuminen johtaa vahvaan jätteen määrän nousuun. Maat, joissa on perinteisesti korkeampi bruttokansantuote tuottaa suuria määriä kiinteää jätettä, joka sisältää usein paljon hyödyllistä kierrätettäviä materiaaleja (Gundupalli ym., 2017, s.57). Automatisoituja kierrätysjärjestelmiä otetaan käyttöön nostaakseen kierrätyskeskuksien tuottavuutta ja parantaakseen työntekijöiden työolosuhteita (Elo, 2013, s.6).

Automatisoitu lajittelu auttaa ratkaisemaan ongelmia hitaan läpimenoajan kanssa, joka on yleinen pullonkaula kierrätyskeskuksissa (Lubongo & Alexandridis, 2022, s.5). Kierrätyskeskuksien suurimpia rajoitteita Yhdysvalloissa tehdyn tutkimuksen mukaan olivat manuaalisen lajittelun läpimenorajoitukset, muovipussit ja -kalvot, jotka takertuvat laitteiden ympärille, ja muovien määrän ja tyyppien kasvava määrä tekee siitä tehottoman (mustat muovit). Muovin tyyppiä on vaikea tunnistaa, jos kyseessä ei ole pullo, purkki, kannu tai kansi (Lubongo & Alexandridis, 2022, s.6).

2.1 Kierrätyksen tärkeys jätteidenkäsittelyssä

Kierrätyksessä kategorisoidaan jäte useimmin materiaalin perusteella. Nämä on useimmiten metalli, lasi, muovi, paperi, kartonki ja biojäte (Tomaselli, 2020, s.3). Tomaselli jatkaa, että kierrättäminen tapahtuu useasti erilailla riippuen mikä maa on kyseessä. Esimerkiksi Japanissa lajitellaan todella kattavasti erotellen aikaisemmin mainitut materiaalit, kun taas esimerkiksi Yhdysvalloissa lajittelu on hieman suppeampaa. Tämä tarkoittaa kierrätystapojen olevan epäjohdonmukaisia riippuen maasta tai alueesta.

Suuri osa kierrätyksestä suoritetaan paikallisesti, joko tuottajamaassa tai sen rajanaapurissa, mutta viimeisten vuosikymmenten aikana on jätteenviennistä muodostunut suuri teollisuudenala (d’Ambrières, 2019, s.16). Vuonna 2017 Euroopasta vietiin 2 miljardia tonnia muovijätettä Kiinaan. Tästä huolimatta tämä teollisuudenala on

murroksessa, koska maiden hallitukset ovat alkaneet kieltää tätä jätteiden maahantuontia (d'Ambrières, 2019, s.16). Suuri osa muovin kierrätyksestä päätyy kaatopaikoille, tai vapautetaan ympäristöön tavalla tai toisella (d'Ambrières, 2019, s.17). Tämä muovi ja muu jäte vaatii satoja vuosia hajotakseen, ja on suuri uhka esimerkiksi merien ekosysteemeille. Kierrättämällä vähennämme hiilidioksidipäästöjä, ja mahdollistamme materiaalin uudelleenkäytön (d'Ambrières, 2019, s.17).

Tästä huolimatta monimutkaisempi kierrätys on logistisesti ja taloudellisesti monimutkaisempi ratkaisu toteuttaa (d'Ambrières, 2019, s.18). Tämä on hyvä syy ottaa automaattisia kierrätysjärjestelmiä käyttöön, mikäli se on mahdollista.

2.2 Yleiskuva automaattisesta lajitteluprosessista

Automatisoidut jätteidenlajittelutekniikat voidaan kategorisoida kahteen päätyyppiin: Suora lajittelu ja Epäsuora lajittelu (Gundupalli ym., 2017, s.58). Suorat lajittelutekniikat hyödyntävät eri materiaalien ominaisuuksia, kuten magneettisia ominaisuuksia, sähkönjohtavuutta tai materiaalien tiheyttä. Esimerkiksi lajiteltavan jätteen kulkiessa linjalla, rautametallit voidaan erotella magneettisen rummun avulla. Magneettirumpu koostuu pysyvästä magneettisesta osasta, joka on sijoitettu pyörivän rummun toiselle puoliskolle, voimakas magneettivuo vetää puoleensa ferromagneettista materiaalia ja pitää sen pyörivässä kuoressa. Pyörivä kuori kuljettaa rautapitoiset jakeet rummun reunaan ja kerää ne omiin astioihinsa (Gundupalli ym., 2017, s.60).

Epäsuorat lajittelutekniikat hyödyntävät sensoreita havaitsemaan kierrätettäviä materiaaleja, jotta esimerkiksi robotit voivat lajitella havaitut kierrätysmateriaalit (Gundupalli ym., 2017, s.58). Esimerkiksi muovia voidaan lajitella epäsuorasti hyödyntämällä spektroskopiaa, jolloin muovista heijastuva aallonpituus mitataan ja lajitellaan myöhemmin prosessorin määrittämällä tavalla (Gundupalli ym., 2017, s.68).

Taulukossa 1 esitellään 9 esimerkkiä teknologioista, joita voidaan käyttää lajitteluun kierrätyksessä, tässä tapauksessa muovin kierrätyksessä, ja lyhyt kuvaus siitä miten ne toimivat.

Taulukko 1. Eri teknologioita muovin tunnistamiseen (Elo, 2013, s.39).

Menetelmä	**Menetelmän kuvaus**
Infrapuna spektroskopia	Materiaalin tunnistus käyttäen infrapunavaloa
Lähi-infrapuna spektroskopia (NIR)	Sama teknologia kuin infrapunavalossa, mutta hyödyntäen vain lähi-infrapuna-spektriä
Elektrostaattinen tunnistaminen	Materiaalin tunnistus mittaamalla sen kyky menettää sähköinen varaus ajan myötä.
Kelluvuus	Materiaalin tunnistus sen tiheyden perusteella
Fluoresoivat merkit	Muovi on merkitty aineilla, jotka sisältävät tietoa muovin tyypistä
Laser	Laser lämmittää materiaalin, ja sen lämmönjohtavuutta mitataan mahdollistaen materiaalin tunnistuksen.
Näkö/optinen harmaasävy	Tämä teknologia vertaa kohdetta taustaan ja vertaa väriä kirkkaampien ja tummempien kohteiden havaitsemiseksi. Suodattimia ja erilaista valoa voidaan käyttää tietynväristen kohteiden tunnistamiseen, päätarkoituksena on tunnistaa kirkkaampia ja tummempia kohteita.
Näkö/optinen värisävy	Teknologia, joka pystyy tunnistamaan erivärisiä esineitä
Ultraääni	Korkeataajuinen ääniaalto kulkee kappaleen läpi, materiaalin kyky absorboida ääniaaltoja heikentää ääniaaltoja. Vertaamalla ääntä ennen ja jälkeen kappaleen läpi kulkemisen, on mahdollista tunnistaa kyseinen kappale.

Maailmalla on kriittinen tarve löytää innovatiivisia ja tarkkoja menetelmiä eritellä esimerkiksi muoveja mahdollistaakseen tehokkaan kierrätyksen (Choi ym., 2023, s.2).

3 Konenäkö

Ihmisten viidestä aistista – näkö, kuulo, haju, maku sekä kosketus – näkö on aisti, johon ihmiset luottavat eniten, ja joka tuottaa meille eniten dataa maailmasta. Tästä huolimatta suuri osa näkemästämme tiedosta on merkityksetöntä, ja aivomme käsittelevät vain merkityksellisemmät osat datasta (Davies, 2004, s.1). Ihmisen kehittyessä on ollut tärkeää oppia käsittelemään mikä on tärkeää tietoa ja mikä ei, koska se voi rajoittaa reaktionopeutta tärkeissä tilanteissa, joissa mahdollisesti puhutaan selviytymisestä (Davies, 2004, s.1).

Konenäköä alettiin kehittämään esimerkiksi lukemista tai kuvien tulkintaa varten. Konenäön kehityksen edistyessä, mitä monimutkaisemmaksi testipaketit kehittyivät, sitä haastavammaksi ongelmat muodostuivat (Davies, 2004, s.2). Konenäön mielenkiintoisia soveltamiskohteita on monenlaisia, jotkut hyvin samankaltaisia kuin mihin itse käytämme omaa näköämme. Näitä soveltamismenetelmiä on esimerkiksi valvonta, automaattiset tarkastukset, robottikokoonpano, ajoneuvojen ohjaus, liikenteenseuranta, biometrinen mittaaminen sekä etäyhteyksin havaitut kuvat. Hyvä esimerkki on sormenjälkien tunnistus, joka on pitkään käytössä ollut konenäön sovellus (Davies, 2004, s.11).

3.1 Mitä konenäkö on?

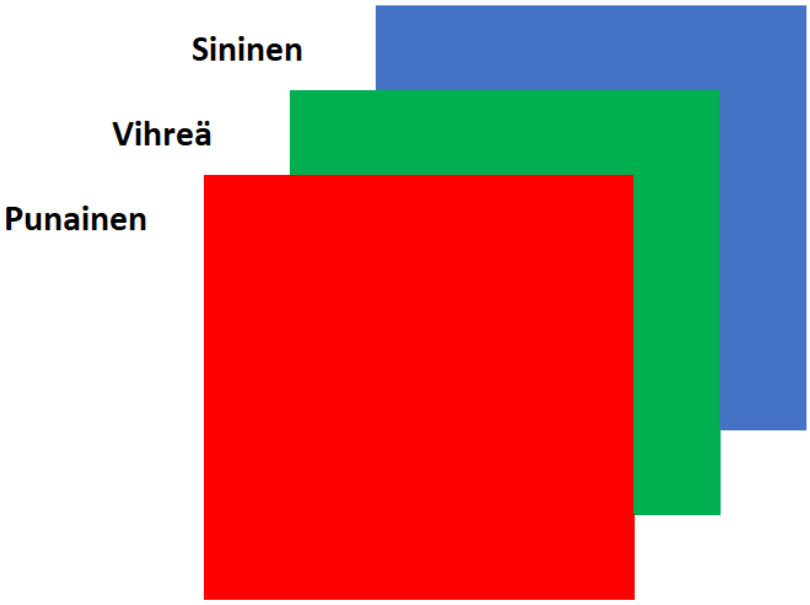
Automated Imaging Association (AIA) määrittelee konenäön kattavan kaikki teolliset ja ei-teolliset sovellukset, joissa yhdistelmä laitteistoa ja ohjelmistoa tuovat operatiivista ohjausta laitteille ja niiden toiminnoille, hyödyntäen kuvien kaappausta ja prosessointia (Charan ym., 2022, s.1). Konenäkö on yleiskielellä kuvailtuna optisen tarkastelun, laadunvalvonnan, lajittelun, osien kokoonpanon tarkastamiseen ja tuotannon prosessien tarkasteluun käytettävä työkalu. Se on lähestymistapa laadunvalvontaan, prosessien hallintaan ja robottien ohjaamiseen (Charan ym., 2022, s.1).

Tyypillinen konenäköjärjestelmä koostuu seuraavista osista: digitaalinen tai analoginen kamera optisin linssein, kameran käyttöliittymä, prosessori, input/output laite tai viestintälinkit järjestelmän kanssa kommunikointiin, linssi, järjestelmään lisätty valonlähde, ohjelmisto toiminnallisuuksia varten, sensori esineiden havainnoimiseen ja säätimet poistamaan tai hylkäämään virheet (Labudzki ym., 2014, s. 903–904).

3.2 Kuvantamismenetelmät

Konenäössä käytetään erilaisia kuvantamismenetelmiä, kuten RGB-kuvantaminen, NIR-spektroskopia sekä hyperspektri-kuvantaminen.

RGB-kuvantaminen tulee sanoista Red-Green-Blue. Tämä tarkoittaa, että syötetty kuva koostuu kolmesta tasosta, jotka ovat punainen, vihreä sekä sininen, ja kuvantaminen perustuu valon reflektoitumisesta näissä valon spektrikaistoissa (Kior ym., 2024, s.2). Kuvassa 1 nähdään havainnollistus RGB-tasoista. Multispektri- ja hyperspektrikuvantamisessa tasojen määrä nousee verrattuna RGB-kuvantamiseen, koska spektri pitenee (Miko, kuva 1).



Kuva 1. RGB-Tasot

Infrapunaspektroskopiaa voidaan kuvailla tavaksi mitata aineen fyysisiä ominaisuuksia, ja tämän datan suhteuttamista aineen kemialliseen koostumukseen (Alpert ym., 2012, s.1). Menetelmässä käytetään työkaluina infrapunaspektrofotometrejä, ja ominaisuudet, joita mitataan ovat kyvyt absorboida, johtaa, ja heijastaa säteilyä (Alpert ym., 2012, s.1). Viimeisimpien vuosikymmenien aikana tästä tekniikasta on muodostunut tärkeä ja hyödyllinen kvalitatiivisessa ja kvantitatiivisessa tutkimuksessa, ja sen käyttökohteet ovat levinneet esimerkiksi paksuuden, heijastavuuden ja taittovoiman mittaamiseen (Alpert ym., 2012, s.1).

Infrapuna-spektri on todella laaja, energiasta puhuttaessa spektrin päätyjen energiamäärät ovat yli tuhatkertaiset, ja tämän takia infrapuna-alue on jaettu kolmeen, NIR-alue ($800 - 2500$ nm), IR-alue ($2500 - 25{,}000$ nm) ja far-IR-alue ($25\ \mu\text{m} - 1$ mm) (Ozaki ym., 2020, s.4).
Infrapunaspektroskopiaa voidaan kuvailla siten, että instrumenteilla mitataan materian fyysisiä ominaisuuksia, ja tästä saadun datan vertaamista kemiallisiin ominaisuuksiin (Alpert ym., 2012, s.1). Instrumentit, joita tässä käytetään ovat nimeltään infrapuna spektrofotometrejä, ja ne mittaavat materiaalin kykyä absorboida, läpäistä ja heijastaa infrapunasäteilyä eri aallonpituuksilla (Alpert ym., 2012, s.1).

Infrapunaspektroskopia perustuu sekä elektronisiin- että tärinällisiin transitioihin. NIR-spektroskopian ominaisiin piirteisiin kuuluu sen spektrin kaistojen olevan heikkoja tai erittäin heikkoja. NIR-alue on siitä syystä arvokas, kun katsotaan sen sovellusten näkökulmasta, että vain NIR-alue tarjoaa korkeasti läpäisevän ikkunan säteilylle (Ozaki ym., 2020, s.12). Esimerkiksi Tsuchikawa ja Kobori tutkivat vuonna 2015 NIR-spektroskopian sovelluksia puun ominaisuuksien tunnistamiseen. NIR-spektroskopiaa käytettiin esimerkiksi kemiallisen koostumuksen, kosteuden, tiheyden ja mekaanisten ominaisuuksien arvioimiseen (Tsuchikawa & Kobori, 2015). Artikkelissa he tutkivat myös NIR-teknologian soveltuvuutta sellun ja paperin tunnistamiseen ja monitorointiin (Tsuchikawa & Kobori, 2015, s.217), mikä on jälleen yksi osoitus tämän teknologian laajoista käyttötarkoituksista.

Spektrisesti erotellut kuvantamismenetelmät jaetaan multispektrisiin ja hyperspektrisiin kuvantamisteknologioihin mitattujen spektrikanavien lukumäärän perusteella. Multispektrinen kuvantaminen tallentaa vain muutamia spektrisiä piirteitä (alle 30 kanavaa). Toisaalta hyperspektrinen kuvantaminen (HSI) kerää spektritietoa yli 30 kanavan kautta, mikä mahdollistaa monimutkaisten spektrisesti eroteltujen valon ja kudoksen vuorovaikutusten tallentamisen (Yoon, 2022, s.1).
HSI mittaa kaksiulotteista rakenteellista ja yksidimensionaalista spektritietoa muodostaen kolmiulotteisen aineiston, jota kutsutaan hyperkuutioksi. Hyperkuution avulla voidaan erottaa tai luokitella näytteen tyyppejä tavalla, johon perinteiset väriin perustuvat kuvantamismenetelmät eivät kykene (Yoon, 2022, s.1).

Hyperspektrikuvantaminen perustuu valon heijastumiseen kohteesta, ja edelleen heijastuneen valon sisältämään tietoon kohteen rakenteellisista ja kemiallisista ominaisuuksista. Valon kohdatessa esimerkiksi kudosta, tapahtuu monimutkaisia kanssakäymisiä kuten absorboituminen, hajaantuminen tai välittyminen (Yoon, 2022, s.2). Hyperspektrikuvantamistekniikan perusperiaate on mitata kuvaa aallonpituuden funktiona spektroskooppisilla tekniikoilla. Siksi HSI-menetelmät vaativat optisia komponentteja, jotka mahdollistavat spektritiedon havaitsemisen laajakaistaisista valosignaaleista (Yoon, 2022, s.2). Hyperspektrikuvantamisessa on kolme perusmetodia: tilaskannaus (spatial scanning), spektriskannaus (spectral scanning) ja snapshot, Näiden metodien perusominaisuuksia on esitelty taulukossa 2.

Taulukko 2. Yhteenveto kunkin hyperspektrimenetelmän vahvuuksista ja heikkouksista (Yoon, 2022, s.5).

Menetelmä	**Tilaskannaus**	**Spektriskannaus**	**Snapshot**
Keskeinen elementti	Spektrometri/spektrografi	Viritettävä spektrisuodatin	Spektrisuodatinmatrisi
Kuvakenno	sCMOS, CCD-kamera	-	-
nopeus	Riippuu avaruudellisen skannauksen määrästä	Riippuu spektriskannauksen määrästä	Videonopeus (reaaliaikainen)
Spektrinen erotuskyky	Korkea (kanavia > 100)	Keskitaso (kanavia > 30)	Matala (kanavia < 30)
Tilallinen erotuskyky	Riippuu tilallisen skannauksen etäisyydestä	Korkea	Matala
Kuvan rekonstruktio-prosessi	Välttämätön	Välttämätön	-
Sovellus	Mikroskopia, endoskopia, mesoskopio	-	-

Hyperspektrikuvantamisen sovelluksia on tutkittu kliinisin tutkimuksin esimerkiksi tautien diagnostiikassa ja kirurgisten apuvälineiden kehityksessä ((Yoon, 2022, s.6). Tautien diagnostiikassa HSI:hin perustuvat siihen, että tautien eteneminen muuttavat kudosten optisia ominaisuuksia. Esimerkiksi pahanlaatuiset solut vaativat valtavia määriä ravinteita ja happea johtuen kyseisten solujen nopeasta jakautumisvauhdista ((Yoon, 2022, s.6). Hyperspektrikuvantamiseen perustuvat apuvälineet sallisivat leikkauksen aikana tapahtuvan analyysin kudoksesta. HSI-apuvälineet voisivat analysoida kudoksen muutamassa minuutissa, verrattuna useaan tuntiin, mikäli käytetään perinteistä histologiaa. Tämä mahdollistaisi, että esimerkiksi leikkauksen

aikana olisi mahdollista tarkistaa onko operoinnin aikana jäänyt jäännöksiä kasvainkudoksesta (Yoon, 2022, s.7).

4 Materiaalien tunnistus konenäöllä

Konenäkö on yksi mahdollisista eri materiaalien tunnistamiseen käytettävistä tavoista. Järjestelmissä, jotka käyttävät sensoreinaan kameroita, konenäkö mahdollistaa esineiden tunnistamisen autonomisesti. Konenäköä hyödyntääksemme tarvitsee meidän hyödyntää muutamaa kuvien prosessointimenetelmää, kuten harmaasävy ja kynnysarvojen säätö (Tomaselli, 2020, s.4).

4.1 Eri materiaalien lajittelu

Konenäköä hyödyntävä lajittelu on epäsuoraa lajittelua, koska se ei perustu suoraan mihinkään lajiteltavan aineen ominaisuuteen esimerkiksi magneettisuuteen. Epäsuorassa lajittelussa sensoreita käytetään kierrätettävän materiaalin havaitsemiseen jätteen seasta käyttämällä erilaisia menetelmiä (Gundupalli ym., 2017, s.62).
Konenäköä hyödyntävissä lajittelumenetelmissä ominaisuuksien tunnistamista käytetään tunnistamaan piirteitä kuvissa, joita myöhemmin tullaan käyttämään lajittelun aikana tunnistamaan samankaltaisia piirteitä myöhemmin (Tomaselli, e2020, s.4). Piirteiden tunnistamisen jälkeen seuraavana vuorossa on luokittelu. Tämä tarkoittaa materiaalien ja esineiden luokittelua, jotta myöhemmin tapahtuva lajittelu onnistuu. Luokittelussa verrataan eri esineiden piirteitä, jotta nämä esineet saadaan luokiteltua lajittelua varten (Tomaselli, 2020, s.5).

4.2 Eri tekniikoiden analyysi

Konenäköä hyödyntävät teknologiat löytyvät taulukosta 3, jotka ovat Infrapuna spektroskopia, Lähi-infrapuna spektroskopia (NIR), Fluoresoivat merkit, Laser, Näkö/optinen harmaasävy, Näkö/optinen värisävy. Taulukko on tiivistetty versio taulukosta 1.

Taulukko 3. Tutkimukseen valitut teknologiat.

Teknologia	**Teknologian toiminnan periaate**
Infrapuna spektroskopia	Materiaalin tunnistus käyttäen infrapunavaloa
Lähi-infrapuna spektroskopia (NIR)	Sama teknologia kuin infrapunavalossa, mutta hyödyntäen vain lähi-infrapuna-spektriä
Fluoresoivat merkit	Muovi on merkitty aineilla, jotka sisältävät tietoa muovin tyypistä
Laser	Laser lämmittää materiaalin, ja sen lämmönjohtavuutta mitataan mahdollistaen materiaalin tunnistuksen.
Näkö/optinen harmaasävy	Tämä teknologia vertaa kohdetta taustaan ja vertaa väriä kirkkaampien ja tummempien kohteiden havaitsemiseksi. Suodattimia ja erilaista valoa voidaan käyttää tietynväristen kohteiden tunnistamiseen, päätarkoituksena on tunnistaa kirkkaampia ja tummempia kohteita.
Näkö/optinen värisävy	Teknologia, joka pystyy tunnistamaan erivärisiä esineitä

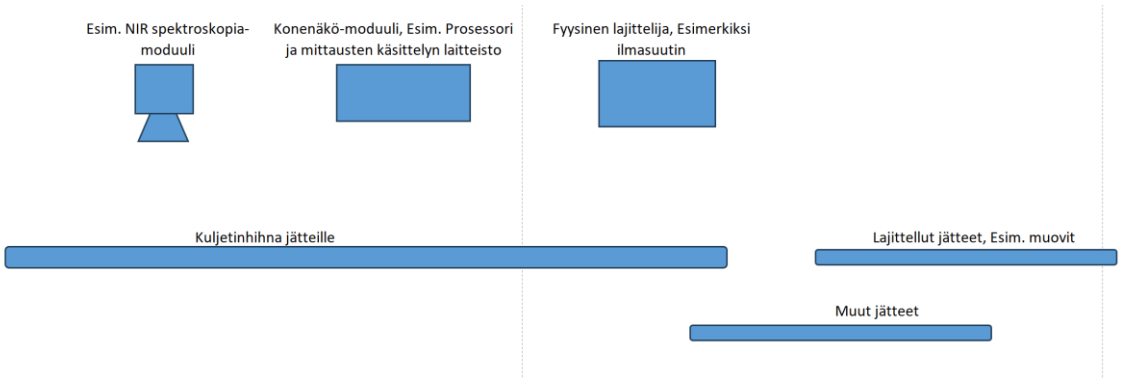
Jokaisessa käsiteltävässä teknologiassa on omat hyvät puolensa, ja omat parhaat sovelluskohteensa.

Infrapuna- ja Lähi-infrapunaspetroskopiaan perustuva lajittelu käyttää sensoreita tutkiakseen vaihteluita valon absorptiossa, välityksessä ja hajautuksessa infrapuna-aallonpituuksilla, joita eri materiaalit tuottavat (Lubongo & Alexandridis, 2022, s.5). Erona teknologioilla on se alue infrapunaspektristä mitä käytetään, mutta käytännön sovelluksissa teknologioilla on paljon yhtäläisyyksiä.

Teknologiaa käytetään paljon muovin lajittelussa, jossa lajitteluun voi vaikuttaa muovin väri, pinnan tekstuuri ja muoto. Nämä ominaisuudet vaikuttavat analyysillä saadun spektrin intensiteettiin. NIR-teknologia soveltuu hyvin lajitteluun, paitsi jos kyseessä on musta muovi, tai muu musta materiaali. Kyseisessä tapauksessa hiilenmusta pigmentti vaikuttaa vahvasti takaisin heijastuneeseen valoon tehden tunnistamisesta mahdotonta, koska suuri osa valosta absorboituu materiaaliin (Lubongo & Alexandridis, 2022, s.5).

Spektripohjaisissa lajitteluissa, kuten IR ja NIR-lajitteluissa on myös huonoja ominaisuuksia. Yksi esimerkki on, että ne jättävät huomioimatta materiaalit joissa on etikettejä tai muita vastaavia pinnan epäpuhtauksia (Gundupalli ym., 2017, s.69).

Kuvassa 2 nähdään malli NIR-spektroskopiaan perustuvasta lajittelujärjestelmästä. Optisiin menetelmiin perustuvissa lajittelujärjestelmissä myös esimerkiksi laseriin perustuva lajittelujärjestelmä on hyvin samanlainen, koska jokaisesta löytyy moduuli, joka lähettää materiaaliin jotain säteilyä tai valoa, moduuli, joka prosessoi mittaukset, ja viimeisenä itse fyysisesti lajitteleva osa kuten ilmasuutin.



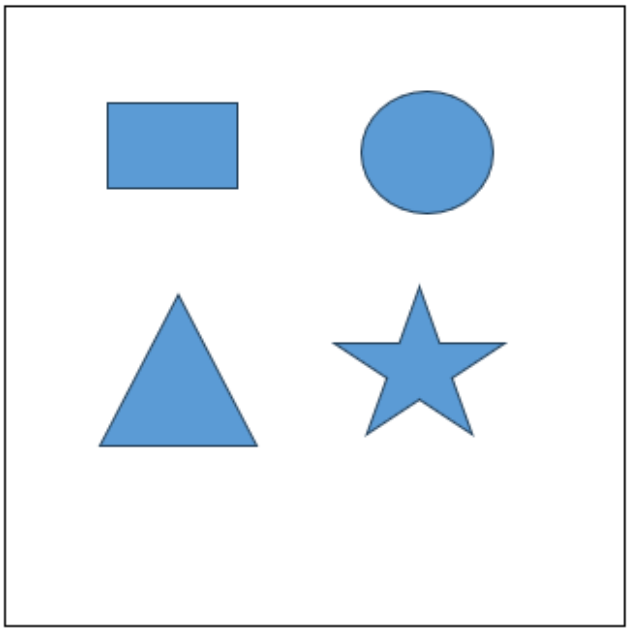
Kuva 2. Malli optisesta lajittelujärjestelmästä

Fluoresoiviin merkkeihin perustuva lajittelu, tunnetaan myös termillä röntgenfluoresenssi. Tässä lajittelumenetelmässä röntgensäteet tunkeutuvat materiaaliin ja joko absorboituvat tai siroavat materiaalin mukaan. Menetelmä toimii siten, että tutkittavaan muoviin kohdistetaan primäärisiä röntgensäteitä, ja mitataan muovissa olevien alkuaineiden lähettämää fluoresoivaa röntgensäteilyä toisella aallonpituudella. Jokaisella alkuaineella on sille ominainen tunniste eli spektri, mikä mahdollistaa raskaiden alkuaineiden, kuten kloorin ja bromin, tunnistamisen. XRF-lajittelijoita käytetään laajasti PVC:n ja bromattuja palonestoaineita (BFR) sisältävien muovien lajitteluun (Lubongo & Alexandridis, 2022, s.5).

Laseriin perustuva lajittelu on alun perin kehitetty metallijätteen tunnistamiseen. Yksi Laseriin perustuva menetelmä on nimeltään LIBS – Laser Induced Breakdown Spectroscopy, joka mahdollistaa spektrometrisen tiedon saamista metalliseoksista (Gundupalli ym., 2017, s.64). Järjestelmä koostuu itse laserista, CCD-spektrometristä ja prosessointiyksiköstä nopeaa datan prosessointia varten. Menetelmässä jäte tuodaan laserin alle, jossa laser keskitetään jätteeseen. Tämä johtaa jätemateriaalin ablaatioon, jolloin syntyy plasmapilviä. Ablaatiosta vapautuva säteily tallennetaan CCD-spektrometrillä. Optinen spektroskopia lukee ja erottelee atomien tyypilliset päästölinjat, mikä mahdollistaa jäteaineksen nopean analyysin ja sen sisältämien materiaalien tunnistamisen. Tämän jälkeen mekaaninen järjestelmä lajittelee havaitut materiaalit omiin säiliöihinsä (Gundupalli ym., 2017, s.64).

Laserin avulla pystyy myös lajittelemaan muovia sekä puuta, ja näissä tapauksessa teknologia toimii samalla periaatteella kohdistaen laserin jätteeseen, joka vapauttaa plasmaa. Tämän jälkeen CCD-spektrometri käsittelee plasman fluoresenssin.
Laserin huonoja puolia lajittelussa on, että mittaustulokset voivat olla eroavia lajiteltavien materiaalien ollessa monimutkaisen muotoisia (Gundupalli ym., 2017, s.67).

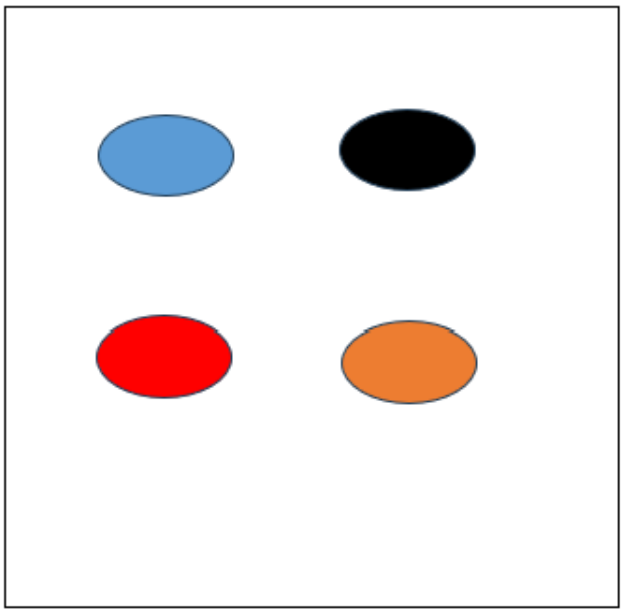
Optiseen harmaasävyyn perustuvassa lajittelussa hyödynnetään konenäköä erottelemaan materiaalit niiden ympäröivistä taustasta. Yksi menetelmä, joka perustuu tähän, on Hu:n momentit, jossa harmaasävykuvaa käsitellään kynnysarvo-menetelmällä. Tämä toteutetaan matemaattisesti laskemalla kuvan momentteja, joita verrataan toisten kuvien momentteihin ja ympäröivään taustaan (Tomaselli, 2020, s.12). Harmaasävy toimii siis hyvin lajittelumenetelmänä, kun halutaan lajitella muodon perusteella esimerkiksi pulloja liukuhihnalla. Kuvassa 3 on havainnollistus siitä, miten optinen harmaasävy näkee eri elementit tunnistaen ne taustastaan.



Optinen harmaasävy

Kuva 3: Optinen harmaasävy

Optiseen värisävyyn perustuvassa lajittelussa lajitellaan esineitä ja materiaaleja perustuen niiden eri väreihin. Väriin perustuvaa lajittelua voidaan käyttää useassa kierrätyksen sovelluksessa ja se toimii monelle materiaalille, usein yhdistettynä muihin teknologioihin. Materiaaleja joihin värinäköä sovelletaan ovat esimerkiksi metalli ja lasi (Gundupalli ym., 2017, s.65–66.). Kuvassa 4 on havainnollistus optisen värisävyn toiminnasta, kun tunnistetaan esineitä niiden värin perusteella.



Optinen värisävy

Kuva 4: Optinen värisävy

4.3 Tekniikoiden vertailu

Eri tekniikoille löytyi tutkimuksen tuloksena omia vahvuuksia ja heikkouksia. Tutkimuksessa saadut tulokset on tiivistetty taulukkoon 4.

Taulukko 4. Tutkimuksen tulokset.

Teknologia	**Hyödyt**	**Heikkoudet/ongelmat**
Infrapuna spektroskopia	Yleishyvä teknologia lajitteluun, paljon sovelluskohteita	Mustat materiaalit imevät säteilyn. Pinnan epäpuhtaudet esim. etiketit
Lähi-infrapuna spektroskopia (NIR)	Yleishyvä teknologia lajitteluun, paljon sovelluskohteita	Mustat materiaalit imevät säteilyn. Pinnan epäpuhtaudet esim. etiketit
Fluoresoivat merkit	Soveltuu erottamaan eri alkuaineita toisistaan.	

Laser	Soveltuu hyvin metallien tunnistamiseen.	Monimutkaiset muodot vääristävät mittauksia.
Näkö/optinen harmaasävy	Soveltuu erottamaan eri muotoisia materiaaleja toisistaan	
Näkö/optinen värisävy	Soveltuu erottamaan eri värisiä materiaaleja toisistaan.	

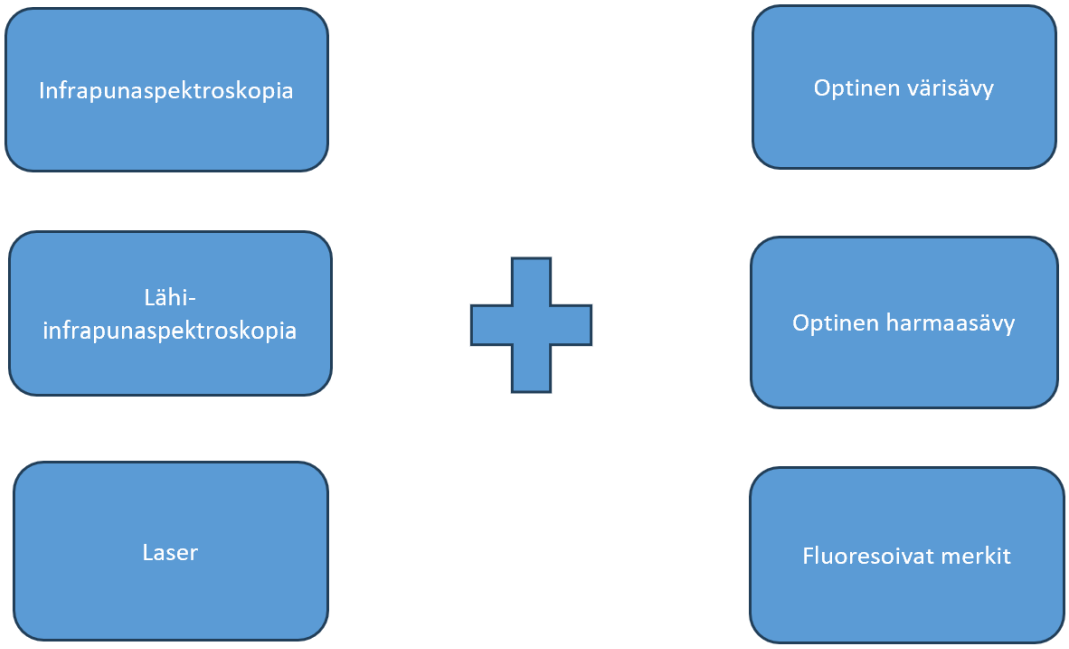
Infrapuna- ja lähi-infrapunaspektroskopia ovat hyvin yleisesti käytettyjä tunnistamismenetelmiä, koska kyseiset teknologiat soveltuvat monen eri materiaalin tunnistamiseen. Näitä teknologioita käytetään usein muovin tunnistamisessa, mutta niiden ainoa selkeä heikkous on musta muovi, tai muut mustat materiaalit. Musta muovi ja muut mustat materiaalit jäävät tunnistamatta, koska ne imevät kaiken valon itseensä eivätkä heijasta mitään mitä analysoida pois tunnistettavasta esineestä. Infrapunaspektriin perustuvat optiset menetelmät voivat olla erinomainen vaihtoehto lajittelulle, jos ne paritetaan tekniikan kanssa, joka pystyy tunnistamaan mustia materiaaleja. Esimerkiksi näkö/optinen värisävy tai optinen harmaasävy voi olla toimiva yhdistelmä, koska ne mahdollistavat lajiteltavan materiaalin tunnistaminen menetelmin, joka ei nojaa materiaalista minkään asian heijastumiseen.

Näkö ja optinen harmaasävy on myös teknologia, joka olisi erinomainen yhdistettävä laseriin perustuvaan tunnistamiseen. Tämä johtuu siitä, että laser on epäluotettava tunnistamaan materiaaleja niiden ollessa monimutkaisen muotoisia. Optinen harmaasävy ja sen kyky tunnistaa materiaaleja muodon perusteella olisi siis erinomainen pari tälle menetelmälle.

Tutkimuksessa käsiteltävistä menetelmistä Fluoresoivat merkit, optinen harmaasävy sekä optinen värisävy todetaan hyviksi menetelmiksi moneen eri käyttöön, koska niillä ei

esiinny yhtä tai useampaa selkeää heikkoutta. Nämä tekniikat eivät ole silti tästä huolimatta täysin virheettömiä. Fluoresoivat merkit ovat erinomainen menetelmä, kun pyritään tunnistamaan eri alkuaineita ja täten eri materiaaleja, mutta usein kierrätysjärjestelmä ei voisi nojata vain tähän teknologiaan. Sama haaste on väri- ja harmaasävyllä, koska usein on edullista parittaa joku mainituista menetelmistä jonkun toisen taulukon 4 menetelmän kanssa.

Voimme siis todeta, että Infrapuna- ja lähi-infrapunaspektroskopia sekä laser ovat hyvä yhdistää jonkun teknologian kanssa, kuten optinen väri- tai harmaasävy tai fluoresoivat merkit. Näistä kahdesta kolmen teknologian setistä voidaan rakentaa automatisoitu kierrätysjärjestelmä, joka toimii optisin menetelmin. Kuviossa 1 havainnollistetaan lopputulosta, jossa valitsemalla yksi menetelmä per puoli voidaan rakentaa varteenotettava kierrätysjärjestelmä.



Kuvio 1. Malli kierrätysjärjestelmän luomiseen

5 Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa oli tarkoitus selvittää miten ja mitä eri tekniikoita käyttäen konenäköä ja optisia menetelmiä voidaan hyödyntää kierrätyksessä.

Kappaleessa neljä käsiteltiin tutkittavien menetelmien yleisimmät ja parhaimmat sovelluskohteet, sekä mahdolliset heikkoudet.
Eri teknologioilla on selkeät hyvät ja huonot puolensa. Materiaalien tunnistamiseen on parasta käyttää useampaa kuin yhtä teknologiaa, jotta varmistetaan materiaalien lajittelun onnistuminen.

Erilaisten konenäköä hyödyntävien teknologioiden tutkimisen jälkeen taulukossa 4 näkee käsiteltävien teknologioiden hyvät ominaisuudet, sekä mahdolliset rajoittavat tekijät. Lopputuloksena tutkimuksessa saatiin selville, että valitsemalla joko IR- tai NIR-spektroskopia tai laser, ja yhdistämällä se optiseen väri- tai harmaasävyyn tai fluoresoiviin merkkeihin saadaan varteenotettava kierrätysmenetelmä käyttämällä optisia menetelmiä. Kuvassa 5 havainnollistetaan tätä valintaa.

Konenäköä ja erityisesti optisia menetelmiä voidaan hyödyntää automaattisessa kierrätyksessä, koska ne tarjoavat tehokkaan ja nopean tavan lajitella materiaaleja. Mahdollisia menetelmien yhdistelmiä on useita, mutta valitsemalla vähintään kaksi toisiaan tukevaa menetelmää saadaan rakennettua luotettava kierrätysjärjestelmä, joka toimii vain optisin menetelmin.

Jatkotutkimuksena olisi mahdollista testata tämän tutkimuksen perusteella löytyneitä menetelmien yhdistämistä käytännössä. Lisäksi jatkotutkimuksena tutkimusta voisi laajentaa optisiin menetelmiin, joita ei käsitelty tässä tutkielmassa, tai tuoda tutkimukseen muita kuin optisia lajittelumenetelmiä.

Lähteet

Alpert, N. L., Keiser, W. E., & Szymanski, H. A. (12.6.2012). IR: Theory and Practice of Infrared Spectroscopy. Springer Science & Business Media.

Charan, A., Karthik Chowdary, C., & Komal, P. (2022). The Future of Machine Vision in Industries- A systematic review. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1224(1), 012027. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1224/1/012027

Choi, J., Lim, B., & Yoo, Y. (2023). Advancing Plastic Waste Classification and Recycling Efficiency: Integrating Image Sensors and Deep Learning Algorithms. Applied Sciences, 13(18), Article 18. https://doi.org/10.3390/app131810224

Cuc, S., & Vidovic, M. (2014). Environmental Sustainability through Clothing Recycling. Operations and Supply Chain Management: An International Journal, 4(2), 108–115. https://doi.org/10.31387/oscm0100064

d'Ambrières, W. (2019). Plastics recycling worldwide: Current overview and desirable changes. Field Actions Science Reports. The Journal of Field Actions, Special Issue 19, Article Special Issue 19, https://journals.openedition.org/factsreports/5102

Damanhuri, E. (2012). Post-Consumer Waste Recycling and Optimal Production. BoD – Books on Demand.

Davies, E. R. (2004). Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities. Elsevier – Google Books.

Elo, K. (2013). Automation in the recycling industry: Recycling of plastics and large liquid crystal displays. Department of Management and Engineering, Linköping University,

https://www.researchgate.net/publication/260246179_Automation_in_the_recycling_industry_-_Recycling_of_plastics_and_large_liquid_crystal_displays

Gundupalli, S. P., Hait, S., & Thakur, A. (2017). A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling. Waste Management, 60, 56–74. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.015

Kior, A., Yudina, L., Zolin, Y., Sukhov, V., & Sukhova, E. (2024). RGB Imaging as a Tool for Remote Sensing of Characteristics of Terrestrial Plants: A Review. Plants, 13(9), Article 9. https://doi.org/10.3390/plants13091262

Labudzki, R., Legutko, S., & Raos, P. (2014). The essence and applications of machine vision, https://www.researchgate.net/publication/286283684_The_essence_and_applications_of_machine_vision.

Lubongo, C., & Alexandridis, P. (2022). Assessment of Performance and Challenges in Use of Commercial Automated Sorting Technology for Plastic Waste. Recycling, 7(2), Article 2. https://doi.org/10.3390/recycling7020011

Miko. (ei pvm.). The Importance of Near-Infrared Sensors and Their Typical Applications in Hyperspectral Cameras and Spectral Imaging. Specim. Noudettu 1. kesäkuuta 2025, osoitteesta https://www.specim.com/technology/nir-hyperspectral-imaging/

Ozaki, Y., Huck, C., Tsuchikawa, S., & Engelsen, S. B. (2020). Near-Infrared Spectroscopy: Theory, Spectral Analysis, Instrumentation, and Applications. Springer Nature, https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-15-8648-4.

Tomaselli, D. (2020). Automated Recycling System Using Computer Vision, Union College, https://bpb-us-w2.wpmucdn.com/muse.union.edu/dist/d/600/files/2020/03/ECE-499-Final-Paper-Desi.pdf

Tsuchikawa, S., & Kobori, H. (2015). A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. Journal of Wood Science, 61(3), 213–220. https://doi.org/10.1007/s10086-015-1467-x

Yoon, J. (2022). Hyperspectral Imaging for Clinical Applications. BioChip Journal, 16(1), 1–12. https://doi.org/10.1007/s13206-021-00041-0