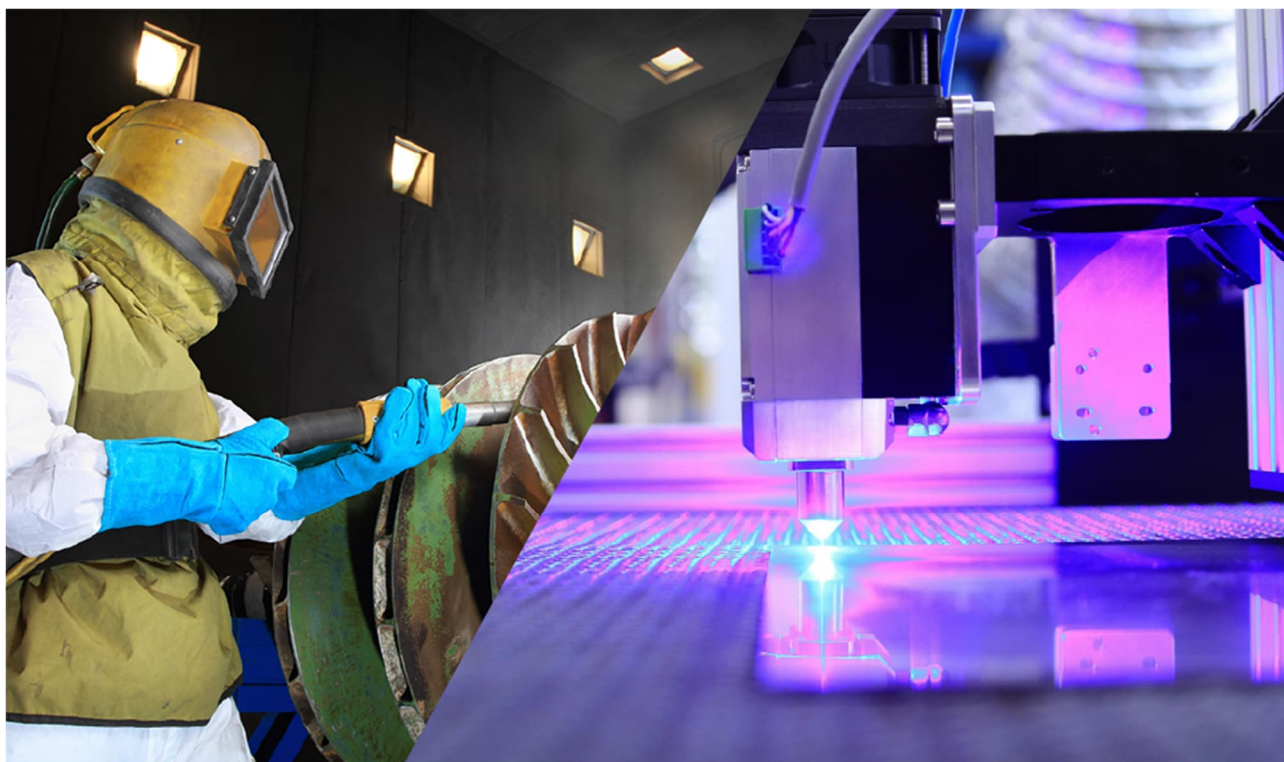


Hiekka- ja raepuhallusmenetelmien sekä laserpuhdistusteknologian nykytila-analyysi



MALAMA-hankkeen raportti 2025

Kirjoittajat:

Elisa Aro
Heidi Piili
Kirsi Laitio
Nikhil Kamboj
Inka Väisänen
Eter Tourunen
Kristina Tarson
Eetu Valtonen
Satu Tähtinen
Anna Huusko

Raportin julkaisija

MALAMA-kehittämishanke (1.5.2023–31.8.2025)

Hankkeen koodi A80056

MALAMA-investointihanke (1.5.2023–31.4.2025)

Hankkeen koodi A80057

Turun yliopisto

Turun kauppakorkeakoulu, Porin yksikkö

Teknillinen tiedekunta, Kone- ja materiaalitekniikan laitos

1 (47)

Hankkeen verkkosivut: <https://sites.utu.fi/malama/>

Julkaistu 22.8.2025

Kannen kuvat:

Sandblasting by Photosoup from iStockphoto.com

Laser cutting by OptLasers from Pixabay.com

Julkaisun sisältö vastaa kirjoittajien näkemyksiä eikä välttämättä edusta rahoittajien näkemyksiä asiasta.

Tiivistelmä

Maalattun ja maalattavan pinnan esivalmistelu laserilla Marine-kontekstissa (MALAMA) -kehittämishanke (hankekoodi A80056) on suunniteltu laivanrakennusteollisuuden pintojen edistyneen esikäsittelyn tarpeeseen. Hanke selvittää laserpuhdistustekniikan mahdollisuuksia taloudellisuuden ja ympäristön kannalta sekä edistää tekniikan saamista laivanrakennuksen ja pakkausteollisuuden käyttöön. Hankkeen toteutusaika on 1.5.2023–31.8.2025. Hankkeen rinnalla on toteutettu MALAMA-investointihanketta (hankekoodi A80057), jonka avulla hankittua laserpuhdistuslaitteistoa on osin hyödynnetty raportoiduissa laboratoriotesteissä. Investointihankkeen toteutusaika on 1.5.2023–30.4.2025.

2 (47)

Tämä käsillä oleva raportti liittyy MALAMA-hankkeen työpakettiin 2 *Nykytila-analyysit raepuhallusteknologialle ja laserteknologialle*, jossa muodostetaan kokonaiskuva nykyisin käytössä olevasta raepuhallusteknologiasta sekä laserpuhdistusteknologian mahdollisuuksista teollisuuden prosesseissa. Raportti esittelee molemmat menetelmät erityisesti niiden ympäristön kuormittavuuden ja taloudellisuuden näkökulmista. Raportti on kirjoitettu hanketoteuttajien keskinäisessä yhteistyössä. Analyysi perustuu laajaan kirjallisuuskatsaukseen, pitkäaikaiseen lasertekniikan saralla tehtyyn tutkimustyöhön ja yrityshaastatteluiden tuloksiin. Raportissa esitellään molemmat menetelmät, kartoitetaan kumpaankin menetelmään liittyviä vahvuuksia, heikkouksia, mahdollisuuksia ja uhkia SWOT- eli nelikenttämenetelmän avulla sekä vertaillaan SWOT-analyysin tuloksia toisiinsa.

Hankkeen tulokset osoittavat, että laivanrakennuksen saralla perinteiset hiekka- ja raepuhallusmenetelmät ovat edelleen tehokkaimpia ja luotettavimpia menetelmiä isojen pintojen puhdistukseen ja käsittelyyn. Hankkeen toteutuksen aikana tuli esiin, että lasertekniikan tunnettuus laivanrakennusteollisuuden pintojen puhdistuksessa on maassamme vielä suhteellisen alhaisella tasolla. Laserpuhdistuksen mahdollisuuksia nähtiin kuitenkin erityisesti joissakin tarkkuutta vaativissa ja esimerkiksi pölylle herkissä kohteissa, kuten moottorien puhdistamisessa tai laivojen sisäosien muutostöissä. Uudemman teknologian käyttöönottoon vaikuttaa hankkeen selvitysten mukaan myös lasertekniikan yleensä korkeampi alkuinvestointi verrattuna hiekka- ja raepuhallusmenetelmien alkuinvestointiin. Laserpuhdistustekniikka on digitaalisena menetelmänä monipuolinen ja sillä havaittiin erityisesti ympäristöön sekä terveyteen ja ergonomiaan liittyviä hyötyjä.

MALAMA-hanke on Euroopan unionin osarahoittama hanke, jonka toteuttajana on Turun yliopiston kauppakorkeakoulun Porin yksikkö yhteistyössä Turussa sijaitsevan kone- ja materiaalitekniikan laitoksen kanssa. Raportin kirjoittajat haluavat kiittää hankkeen rahoitusviranomasta Satakuntaliittoa rahoituksesta sekä kaikkia haastattelemiamme yrityksiä osallistumisesta tämän analyysin tekoon.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	2
Sisällysluettelo	3
1. Johdanto	5
2. Hiekka- ja raepuhallusmenetelmien nykytila-analyysi	6
2.1. Mitä hiekka- ja raepuhallusmenetelmät ovat?	6
2.2. Hiekka- ja raepuhalluksen terveysvaikutukset, ergonomia ja turvallisuus	7
2.3. Hiekka- ja raepuhalluksen ympäristötekijät ja jätteenkäsittely	7
2.4. Hiekka- ja raepuhalluksen prosessi ja arvoketjuissa toimivat yritykset	9
2.5. SWOT-analyysin tulokset: hiekka- ja raepuhallusmenetelmät.....	10
Haastatellut yritykset.....	10
Hiekka- ja raepuhalluksen vahvuudet	11
Hiekka- ja raepuhalluksen heikkoudet	13
Hiekka- ja raepuhalluksen mahdollisuudet	16
Hiekka- ja raepuhallusmenetelmään liittyvät uhat	18
3. Laserpuhdistusteknologian soveltamisen nykytila-analyysi.....	20
3.1. Mitä laserpuhdistus on?	20
3.2. Laserpuhdistuksen terveysvaikutukset, ergonomia ja turvallisuus.....	21
3.3. Laserpuhdistuksen ympäristötekijät ja jätteenkäsittely.....	22
3.4. Laserpuhdistuksessa vapautuvan pölyn määrän mittaus	23
3.5. SWOT-analyysin tulokset: Laserpuhdistus	26
Laserpuhdistuksen vahvuudet.....	27
Laserpuhdistuksen heikkoudet.....	29
Laserpuhdistuksen mahdollisuudet.....	30
Laserpuhdistukseen liittyvät uhat	32
4. Hiekka- ja raepuhallusmenetelmien ja laserpuhdistustekniikan SWOT-tulosten vertailu.....	34
Käyttökelpoisuus	34
Kustannukset	34
Tehokkuus.....	35
Laadunhallinta	35
Ympäristötekijät	36
Henkilöstöltä vaadittava osaaminen	36
Terveysvaikutukset ja ergonomiset tekijät.....	36
Turvallisuustekijät.....	37
Sääntely, standardit ja asiakasvaatimukset.....	37
Innovaatiot, digitalisaatio ja uusien toimintatapojen mahdollisuus.....	38

5. Puhdistusmenetelmien määrälliset ja laadulliset mittarit	39
6. Johtopäätökset	40
Lähteet.....	42

1. Johdanto

Teollisuuden pintojen puhdistusprosesseissa käytetään erilaisia menetelmiä, kuten hiekka- ja raepuhallusta. Laserpuhdistustekniikkaa on hyödynnetty jo pitkään teollisuusaloilla eri sovelluskohteissa, kuten hitsauksessa, leikkauksessa ja merkkauksessa, mutta laserpuhdistuksen käyttö ja tietoisuus lasersäteen käytön mahdollisuuksista puhdistusprosesseissa on vielä vähäistä. Tämä raportti liittyy MALAMA-hankkeen työpakettiin 2 ”Nykytila-analyysit raepuhallusteknologialle ja laserteknologialle”, jossa muodostetaan kokonaiskuva nykyisin käytössä olevasta hiekka- ja raepuhallusmenetelmästä sekä laserpuhdistustekniikan mahdollisuuksista teollisuuden prosesseissa.

5 (47)

Analyysi perustuu kirjallisuuslähteisiin, hankkeen aikana tehtyyn tutkimustyöhön (muun muassa laserpuhdistusteknologian osalta on tehty laboratoriotestauksia) ja yrityshaastatteluiden tuloksiin. Sekä raepuhallus- että laserpuhdistusteknologioiden kohdalla on haastateltu useita yritysedustajia, jotka työskentelevät menetelmien parissa. Kaiken kaikkiaan 12 yritystä haastateltiin. Tässä raportissa työn tuloksia tiivistetään esittäen ensin yleisesti pinnan esivalmistelussa käytössä olevaa ns. perinteistä hiekka- ja raepuhallusteknologiaa ja sen jälkeen laserpuhdistusteknologiaa. Molemmat menetelmät esitellään, minkä jälkeen SWOT- eli nelikenttään perustuvan analyysin avulla kartoitetaan ja analysoidaan kumpaankin menetelmään liittyviä vahvuuksia, heikkouksia, mahdollisuuksia ja uhkia eri näkökulmista käsin, muun muassa huomioiden teknologian ympäristövaikutuksia, kustannuksia sekä ergonomiaa, mutta myös muita tekijöitä. SWOT-lyhenne juontuu englannin kielen sanoista *strengths*, *weaknesses*, *opportunities* ja *threats*. Raportin luvussa 4 vertaillaan raepuhallus- ja laserpuhdistusmenetelmien SWOT-analyysin esiin tuomia ominaisuuksia toisiinsa. Lisäksi projektissa tehdyn työn pohjalta on tunnistettu kvantitatiivisia ja kvalitatiivisia mittareita, joiden avulla voi arvioida hiekka- ja raepuhallusmenetelmän sekä laserpuhdistustekniikan etuja. Nämä mittarit esitellään raportin luvussa 5.

2. Hiekka- ja raepuhallusmenetelmien nykytila-analyysi

2.1. Mitä hiekka- ja raepuhallusmenetelmät ovat?

Hiekka- ja raepuhallusmenetelmiä käytetään teollisuuden aloilla erilaisten pintojen käsittelyä varten. Käytännössä menetelmiä voidaan käyttää esimerkiksi pinnan puhdistamiseen, mutta myös pinnan muokkaamiseen ja karheen pintaprofiilin saavuttamiseen. (Valmistajat.fi, 2025; Qi et al., 2021). Yritys voi esimerkiksi puhdistaa pinnan ja toivoa sille sopivaa karheutta ennen maalaamista, jolloin hiekka- ja raepuhallusmenetelmät soveltuvat tehtävään. Tarkemmin ottaen hiekka- ja raepuhallusmenetelmät soveltuvat esimerkiksi hitsauksen jälkeen tehtävään metallimateriaalin puhdistukseen tai pinnoille, jotka tarvitsevat puhdistusta esimerkiksi ruosteesta, liasta ja maalista (ibid.). Kun esivalmistelu on tehty, kappale voidaan siirtää seuraavaan työvaiheeseen, kuten jo aiemmin mainittuun uudelleen maalaamiseen (Valmistajat.fi, 2025).

Hiekka- ja raepuhallus ovat perinteisiä menetelmiä, joita useat yritykset ovat jo pitkään hyödyntäneet ja menetelmät ovat yhä käytössä eri toimialoilla. Etenkin meriteollisuudessa hiekka- ja raepuhallus on todettu toimiviksi menetelmiksi isojen pintojen puhdistamista varten. Eri puhallustekniikoita käytetään laivan pinnan puhdistamiseen, mm. laivan korjausrakentamisen yhteydessä (Qi et al., 2021), mutta myös muissa laivanrakennuksen vaiheissa. Laivan rungoissa on useita eri maalikerroksia pohjamaalista päällyslakkaan (ibid.) ja alalla on tietyt standardit, jotka tulee ottaa huomioon, kun puhalletaan pinta ennen sen uudelleen maalausta eli puhalluksella tulee saavuttaa tietty puhdistusaste esikäsittelyn aikana. Puhdistusastetta kuvataan SA-laatu kategorioinnin kautta ja usein käytetty puhdistusaste hiekka- ja raepuhalluksessa on SA 2,5 (lisätietoa SA-standardista löytyy julkaisusta SFS-EN ISO 8501-1).

Työturvallisuuskeskus kuvaa raepuhallusta KAMAT-tietokortissa, jossa mainitaan, että prosessin aikana paineilmaa käytetään puhaltamaan rakeita voimalla puhdistuksen tarpeessa olevalle pinnalle. Pinta pitää kuitenkin ensin puhdistaa, minkä jälkeen puhallus aloitetaan. (Työturvallisuuskeskus, 2019) Pinnalla voi olla esimerkiksi öljyä ja rasvaa, jotka kannattaa poistaa leviämisen estämiseksi ja puhallusprosessin nopeuttamiseksi (Valmistajat.fi, 2025). Puhalluskammioita tai -kaappeja voidaan käyttää puhallettaessa pienempiä kammioihin ja kaappeihin mahtuvia osia, jolloin rakeet voidaan kerätä, puhdistaa ja jatko käyttää, mutta myös ulkona voidaan puhalttaa (Työturvallisuuskeskus, 2019). Laivanrakennusteollisuudessa puhdistus tehdään usein ulkona käsiteltäessä isoja pintoja. Yhtä lailla puhaltaminen voi kuitenkin tapahtua esimerkiksi teollisuusyrityksen prosesseissa sisätiloissa, jolloin tilat vaativat erityissuojauksia, jotta puhalluksen aikana irtoava materiaali, pöly ja puhallusrakeet eivät leviä muihin tiloihin.

Rae- ja hiekkapuhalluksen rinnalla on muita hyödyllisiä menetelmiä, kuten kuivajää- ja kuonapuhallus sekä sooda-, sinko-, tyhjiö- ja vesihiekkapuhallus (Valmistajat.fi, 2025). Puhalluksessa käytettävä materiaali voi olla monenlaista ja useimmiten käyttökohde sekä pinnan ominaisuudet määrittävät sen, mitä menetelmää ja materiaalia käytetään. Puhalluksessa käytettävästä materiaalista käytetään tässä raportissa jatkossa sekä sanaa puhallusmateriaali että puhalle, jotka toimivat synonyymina toisilleen. Huomioitavaa on lisäksi, että tässä raportissa tarkastellaan pääosin hiekka-, rae- ja kuonapuhallusmenetelmiä.

Mitä tulee puhallusmateriaaleihin, rakeina voidaan käyttää metallipohjaisia materiaaleja, kuten valurautahiekkaa, teräshiekkaa sekä teräs-, alumiini-, kupari- ja messinkilankakatkoja tai ei-metallisia aineita. Viimeksi mainittuja aineita on sekä keinotekoisina, esimerkiksi kuparikuona tai lasikuulat, tai ne ovat luonnosta peräisin, kuten kvartsi ja luonnonhiekkä; myös orgaanisia aineita voidaan käyttää hyödyksi puhalluksessa, esimerkiksi puuta ja pähkinänkuoria. (Työturvallisuuskeskus, 2019)

Hiekka- ja raepuhalluksessa paineilmaan lisätään puhallettaessa materiaalia, kuten hiekkaa ja/tai raetta. Valmistajat.fi -sivuston (2025) mukaan hiekasta puhuttaessa tarkoitetaan särmikkäitä materiaaleja, kun taas

rakeesta puhuttaessa viitataan pyöreisiin materiaaleihin. Materiaalien kovuudessa on myös eroja ja niiden tulkitsemiseen apuna on MOHS:in asteikko, jossa materiaalin kovuus ilmaistaan asteikolla 1-10, rakeen koko puolestaan mainitaan millimetreinä (ibid.).

Hiekka- ja raepuhalluksen voi korvata eri menetelmillä kuten hionnalla, harjauksella ja peittauksella (Valmistajat.fi, 2025) tai joissakin tapauksessa uusilla tekniikoilla, kuten laserpuhdistustekniikalla, jonka käyttöä esitellään myöhemmin tässä raportissa.

2.2. Hiekka- ja raepuhalluksen terveysvaikutukset, ergonomia ja turvallisuus

7 (47)

Puhallusmenetelmillä on haittoja ja riskejä, jotka tulee ottaa huomioon. Puhalluksen aikana syntyy pölyä ja irtoaa mahdollisesti vaarallisia aineita, minkä vuoksi työntekijän asianmukainen suojaus on tärkeää. Prosessin aikana irtoavat pölyt ja materiaalit ovat peräisin puhalluksessa käytettävästä materiaalista sekä puhdistettavasta pinnasta irtoavaa ainetta, joka voi siis irrota niin alustasta kuin pinnoitteesta. On myös huomioitava, että prosessin aikana pinnasta voi irrota ihmiselle haitallisia, myrkyllisiä aineita, kuten lyijymaaleja ja piidioksidia. (OSHA, 2014)

OSHA (2014) listaa tiettyjä toimenpiteitä, jotka tulee tehdä työntekijöiden terveyden turvaamiseksi asiansa tuntevan ammattilaisen toimesta: ensimmäisenä tulee valita vähemmän myrkyllinen puhalle ja mielellään puhalle, jota voi käyttää veden kanssa. Toisena toimenpiteenä OSHA listaa eristyksen/suojauksen eli alue suojataan esimerkiksi suojaverhoilla, käytetään mahdollisuuksien mukaan puhallushuoneita tai kammioita, käytetään rajoitettuja alueita, mikäli puhallustyö suoritetaan ns. avoimessa tilassa ja rajataan pääsy alueelle muilta henkilöiltä. Viimeisenä toimenpiteenä OSHA listaa tuulettamisen/ilmanvaihdon eli pölyn keräämiseksi tulee käyttää poistoilmanvaihtojärjestelmiä. Näiden lisäksi henkilökohtaiset suojavarusteet ovat avainasemassa, kun puhalletaan avoimissa paikoissa (Valmistajat.fi, 2025), esimerkiksi kasvosuojaimet, kypärät ja ihoa suojaavat haalarit ja hanskat on hyvä olla. Lisäksi melutaso on korkea puhalluksen aikana, joten kuulosuojaus on tärkeää.

Puhalluksesta irtoavien pölyjen ja mahdollisten vaarallisten aineiden sekä melun lisäksi puhallus voi vaikuttaa työntekijän terveyteen ja turvallisuuteen muilla tavoin. Laitteiston huomioiminen on yksi merkittävä tekijä (Shuler et al., 2014). Useissa hankkeen aikana tehdyissä haastatteluissa mainittiin, että puhalluslaitteisto on raskas ja rasittaa työntekijän kehoa, lisäksi työasennot voivat olla hankalia muun muassa puhalluskohteesta riippuen. Osa haastateltavista mainitsi, että puhalluksen aikana kaatumiset ja venähdysvaarat ovat myös mahdollisia. Ergonomisiin asioihin, kuten työasentoon tulee siksi kiinnittää erityistä huomiota puhalluksen aikana. Puhallukseen liittyy myös muita riskejä ja vaaratekijöitä. Osa haastateltavista mainitsi, että puhalluslaitteissa on kovat paineet ja mikäli laitteistosta irtoaa esimerkiksi puhallusletkun liitos, se voi irrotessaan aiheuttaa vaaratilanteen tai jopa hengenvaaran puhaltajalle; myös osumat käteen ovat mahdollisia aiheuttaen vaarallisia haavoja. Shuler et al. (2014) mainitsevatkin, että työntekijän koulutukseen laitteiston käytöstä, tarkastuksiin ja laitteiston ylläpitoon tulee kiinnittää huomiota.

2.3. Hiekka- ja raepuhalluksen ympäristötekijät ja jätteenkäsittely

Hiekka- ja raepuhallusmenetelmät voivat aiheuttaa haittoja ympäristölle ja luonnolle. Aiemmin terveystekijöiden kohdalla mainittiin, että puhallusprosessin aikana irtoaa pölyä ja materiaaleja, jotka ovat peräisin puhalluksessa käytettävästä materiaalista sekä puhdistettavasta pinnasta irtoavaa ainetta (OSHA, 2014). Terveysvaikutusten lisäksi irtoava pöly ja materiaali voivat olla haitaksi luonnolle. Puhallusmateriaalin joukossa voi olla puhalletta, maalilastuja ja ruostetta (Kura et al., 2006; Qi et al. 2021). Puhallettaessa materiaalia leviää ympäriinsä ja jos kaappeja ei käytetä tai puhalleta esimerkiksi hallissa, materiaali leviää helposti luontoon (esim. Valmistajat.fi, 2025).

Yleinen tapa, että puhalluksesta irtoavaa materiaalia varastoidaan paikan päällä ja viedään kaatopaikoille hävitettäväksi, on ympäristön kannalta epäsuotuisaa ja kallista. Mikäli ko. jäte luokitellaan vaaralliseksi, jätteenkäsittelystä aiheutuu vielä ylimääräisiä kustannuksia, vaikka mainittakoon, että puhallusjäte laivankorjausteollisuudessa ei ole usein vaaralliseksi luokiteltua (Qi et al., 2021). Kaikki puhalteet eivät ole luonnolle haitallisia (Valmistajat.fi, 2025). Haitat riippuvat myös puhalluskohteesta ja puhaltteen laadusta. Esimerkiksi luonnonhiekkia ei ole vaarallista, mutta jos siihen sekoittuu pintaa puhdistuksessa maaleja, joissa on haitallisia aineita, materiaali voi muuttua vaaralliseksi jätteeksi. Lisäksi hiekkapuhalluksessa hiekkapuhaltteen määrä on usein paljon isompi kuin puhdistettavasta pinnasta lähtevä materiaali-/jäte-erä. Hankkeen haastatteluissa mainittiin kuitenkin, että sama hiekkamäärä ei jää jäljelle puhalluksen jälkeen, vaan osa siitä muuttuu pölyksi. Siitä huolimatta hiekkapuhalluksessa jäljelle jäävä hiekkamäärä on merkittävä ja haastatteluissa kävi ilmi, että hiekan lajittelu ja kierrätys vaativat lisätoimia sekä kuljetuksia rekoilla puhalluskohteesta lajitteluasemille kuluttaen samalla polttoainetta. Luonnonhiekan käytön haittapuolena on myös luonnonvarojen käyttö ja maisemalliset haitat, jotka liittyvät hiekan kaivuuseen. Hankkeen yrityshaastatteluissa kysyttiin hiekkapuhalluksesta aiheutuvan jätteenkäsittelyn kustannuksista. Eräs hiekkapuhalluspalvelua tarjoava yritys edustaja arvioi, että jättekustannukset ovat noin 0,5 % hiekkapuhalluksen hinnasta: jos hiekkapuhalluksesta laskutetaan esimerkiksi 80 euroa/tunti, jättekulu olisi siitä noin 40 senttiä. Toinen yritys arvioi kulun olevan noin prosentin tai enintään kahden prosentin luokkaa, mutta korosti kyseessä olevan arvio asiasta.

Kuonapuhalluksesta aiheutuu paljon jätettä. Eräissä hankkeen yrityshaastattelussa mainittiin, että meriteollisuudessa, jossa puhallettavat kohteet ovat usein isoja, kuonaa viedään tonneittain kaatopaikalle; kuonajätettä syntyy jopa monta sataa tonnia vuodessa. Kuona on myös kertakäyttöinen materiaali puhalluksessa. Toisessa haastattelussa kävi lisäksi ilmi, ettei kuonaa voi käyttää puhaltteenä esimerkiksi laiturirakenteiden käsittelyssä, jottei sitä pääse vesistöön. Kura et al. (2006) mukaan hiilikuonan osalta puhalluspaineella, syöttönopeudella ja pinnan kontaminaatiolla on vaikutusta lopulliseen päästömäärään. Käytännössä siis myös puhallustoimintaan liittyvillä valinnoilla on merkitystä päästömääriin, esimerkiksi alhaisempi syöttönopeus voi alentaa päästömäärää, mutta puhdistuksen teho kärsii samalla (ibid.).

Puhalttien kierrätys ja uusiokäyttömahdollisuuksia tutkitaan yhä enemmän ympäristöhaittojen vähentämiseksi, mutta joidenkin puhalttien osalta haasteena on se, että puhalle kuluu käytettäessä, jolloin koko ei ole enää riittävän suuri uudelleen käytettäessä (Qi et al., 2021). Hankkeen aikana tehdyssä yrityshaastattelussa myös pohdittiin, voisiko tällaisia kappaleita uudelleen myydä eri tarkoituksiin kuin alkuperäinen käyttötavoite oli. Vaihtoehtoisia tapoja on joka tapauksessa tutkittu ja tutkitaan koko ajan, kuten materiaalin lämpökäsittelyä ja materiaalin/jätteen uusia käyttösovelluksia, esimerkiksi niiden hyödyntämistä rakennusmateriaalien tuotannossa (ibid.) ja teräsruiakupuhalluksesta syntyvän jätteen hyödyntämistä sementtimateriaaliteollisuudessa (Lermen et al., 2020).

Pölyn leviämisen estämiseksi puhalluksessa voi käyttää vettä apuna (Valmistajat.fi, 2025) ja myös kaappeja/kammioita voi käyttää aina kun mahdollista. Näin haitat ympäristölle vähenevät samalla. Lisäksi hallien, kaappien ja kammioiden etu on se, että puhalluksesta syntyvät jäte-erät on helpompi kerätä talteen ja kierrättää uusiokäyttöön tai hävitettäväksi. Huomioitavaa on, että markkinoilla on saatavilla uusia laitteita, jotka mahdollistavat metallirakeen uudelleen käytön, jolloin ei myöskään tule kaatopaikkajätettä. Yksi yrityshaastatteluiden haastateltavista kuvasi kyseisten laitteiden käyttöä tarkemmin selittäen, että rae voidaan käyttää moneen kertaan laitteen avulla, kunnes rae muuttuu tomuksi; jäljelle jäävä pöly määritellään puolestaan metalliromuksi luokiteltavaksi materiaaliksi. Tämänkaltaisiin laitteisiin investointi voi maksaa paljon, mutta hyöty ympäristölle on selvä; käyttö myös tehostaa prosessia, sillä jälkisiivous ja seuraavaan työvaiheeseen siirtyminen tapahtuu nopeammin. Lisäksi uusia tekniikoita on kehitetty ns. perinteisten puhdistusmenetelmien tilalle jätteen määrän minimoimiseksi, kuten laserpuhdistus (Qi et al., 2021), jota tässäkin raportissa tarkastellaan.

2.4. Hiekka- ja raepuhalluksen prosessi ja arvoketjuissa toimivat yritykset

Hiekka- ja raepuhallukseen liittyvät määrättyt työvaiheet, jotka voi jaotella viiteen eri vaiheeseen (kts. kuva 1). Puhaltamisprosessiin vaikuttavat monet tekijät. Puhallettavat kohteet ja työskentely-ympäristöt ovat erilaisia, lisäksi kohteen pinta ja pinnoitteet sekä puhalluksessa käytettävä puhalle vaikuttavat prosessiin (OSHA, 2014). Esivalmisteluvaiheessa tulee ensimmäisenä pohtia näitä asioita ennen varsinaista puhaltamista. Ympäristön eristäminen ja suojaus ovat tärkeitä vaiheita eli alue tulee suojata esimerkiksi suojaverhoilla ja mahdollisuuksien mukaan esimerkiksi puhallinhuoneita tai kammioita voidaan käyttää (OSHA, 2014), mikäli puhallettava kohde on sopivan kokoinen. Lisäksi työntekijän tulee suojata itsensä asiaankuuluvilla varusteilla kuten hengityssuojaimella ja kuulosuojaimilla. Vasta suojauksen jälkeen itse puhallustyö voidaan aloittaa. Kun pinta on puhdistettu hiekka- tai raepuhaltamalla esimerkiksi maalausta varten, pinnan profiili tarkastetaan ennen seuraavaa pintakäsittelyä. Lopuksi puhdistuksen aikana syntyneet jäte-erät siivotaan ja kierrätetään.

9 (47)



Kuva 1. Hiekka- ja raepuhallusprosessin vaiheet.

Kuvassa 1 esitetty prosessi kuvaa hiekka- ja raepuhallukseen liittyviä toimintoja. Liiketoiminta-mielessä puhallusta on kuitenkin hyvä katsoa myös laajemmalla tasolla eli minkä tyyppisiä toimijoita liittyy hiekka- ja raepuhallustoimintaa koskettavaan toimitusketjuun. Porter (1991, s. 51) mainitsee yrityksen arvoketjun, johon sisältyy yritykselle strategisesti olennaisia toimintoja. Käytännössä arvoketju esittää vaiheittain sen, miten yritys tuottaa tuotteen tai palvelun, mitä vaiheita sisältyy koko ketjuun raaka-aineiden hankinnasta tuotteen ja/tai palvelun myymiseen asiakkaalle (kts. esim. Porter 1991, s. 54–55). Arvoketjua tarkastellaan usein yksittäisen yrityksen näkökulmasta, mutta yksittäisen yrityksen arvoketju on samalla osa järjestelmää, jossa eri yritysten arvoketjut vaikuttavat toisiinsa, kuten yrityksen oma arvoketju, hankkijoiden, jakelukanavien ja asiakkaiden arvoketjut (Porter, 1991, s. 51–52).

Samalla tavalla hiekka- ja raepuhalluksen osalta eri toimijat ja niiden arvoketjut linkittyvät toisiinsa. Ennen kuin puhallusyritys lähtee puhaltamaan käyttökohdetta esimerkiksi asiakkaan teollisuustiloihin tai aloittaa puhalluksen omissa tiloissaan, monta asiaa on pitänyt tapahtua. Hiekkapuhalluksen osalta esimerkiksi hiekan toimittajilla on keskeinen rooli. Hiekkaa toimittavat yritykset kuivaavat ja työstävät hiekkaa oikean kokoiseksi kohdetta varten ja pakkaavat hiekan. Yhtä lailla muita materiaaleja myyvät yritykset käsittelevät puhalteita toimitettavaksi omille asiakkailleen. Hiekka tai muu puhalle kuljetetaan yritykselle, joka puolestaan tuottaa puhalluspalvelua asiakkaalleen tai mahdollisesti puhaltaa käyttökohteita omassa teollisuusprosessissaan. Puhalteet ovat vain yksi osa koko ketjua, sillä puhallus vaatii myös laitehankintoja, kuten puhalluslaitteen, kompressorin, imurin ja suojausvälineiden hankkimista eli laite- ja materiaalitoimittajilla on myös keskeinen rooli prosessissa. Kuljetusyritykset puolestaan kuljettavat materiaaleja yritykseltä toiselle. Puhallusprosessin loppuvaiheessa lajitteluasemilla on tärkeä rooli mahdollisten materiaalien hävityksen osalta, mikäli materiaaleja ei voi uusiokäyttää. Mikäli materiaaleja puolestaan uusiokäytetään, liittyy prosessiin taas uusia toimijoita. Näin ollen hiekka- ja raepuhallusmenetelmään liittyvillä erilaisilla arvoketjujen toimijoilla on kylläkin merkitystä kokonaisuuden kannalta.

2.5. SWOT-analyysin tulokset: hiekka- ja raepuhallusmenetelmät

SWOT ('strengths, weaknesses, opportunities, threats') -taulukointi on eritoten markkinoinnin alalla, mutta myös muissa konteksteissa, käytetty työkalu, jonka avulla kartoitetaan ja analysoidaan liiketoimintaan liittyviä vahvuuksia, heikkouksia, mahdollisuuksia ja uhkia. SWOT sopii liiketoiminta-analyysin ohella muihinkin analysointitarkoituksiin. Tässä raportissa työkalua käytetään analysoimaan hiekka- ja raepuhallusmenetelmiin liittyviä vahvuuksia, heikkouksia, mahdollisuuksia ja uhkia. SWOT-analyysissa alla esitellään haastatteluaineistosta löytyneitä päätuloksia liittyen jokaiseen näistä neljästä osa-alueesta.

10 (47)

Haastatellut yritykset

Kuutta yritystä haastateltiin liittyen hiekka- ja raepuhallukseen osana pinnan puhdistamisprosessia eri teollisuuden aloilla. Haastattelut suoritettiin marraskuun 2024 ja helmikuun 2025 välillä. Haastateltavat yritykset toivat kukin erilaisen näkökulman hiekka- ja raepuhalluksen SWOT-analyysiin. Yksi haastatteluihin osallistuvista yrityksistä toimittaa hiekkaa puhallusta tekeville yrityksille eli he toimivat raaka-ainetoimittajana toimitusketjussa. Kyseinen yritys ei toimita hiekkaa suoraan meriteollisuuden toimijoille, vaan puhallusta tarjoaviin yrityksiin, joilla voi olla meriteollisuuden asiakkaita. Toinen yritys on puolestaan meriteollisuuden asiakastaho, joka hankkii raepuhalluspalvelun puhallusta tarjoavalta toimijalta. Loput neljä yritystä puolestaan ovat hiekka-/raepuhallusta tarjoavia yrityksiä. Nämä neljä yritystä toimivat osittain eri toimialoilla. Vain osa haastatelluista yrityksistä toimii meriteollisuuden parissa, mutta kaikilla oli tietämystä hiekka-/raepuhalluksen käytöstä merialan ympäristössä: yksi yritys on hiekkapuhaltanut laivoja aiemmin, toinen on tehnyt asiakastöitä satamassa oleville aluksille ja kolmas tietää yleisesti meriteollisuuden kontekstista, vaikka meriteollisuus ei kuulu yrityksen kohdemarkkinaan. Haastatelluista yritysedustajista osa työskenteli tai oli aiemmin työskennellyt useampien puhallusmenetelmien parissa. Kaiken kaikkiaan neljä haastatelluista henkilöistä työskenteli hiekkapuhalluksen saralla, kahdella oli kokemusta kuonapuhaltamisesta ja kolmella kokemusta ja/tai tietoa muusta raepuhalluksesta, kuten metallirakeen käytöstä puhalluksessa.

Aineiston analyysi eteni vaiheittain. Ensin yrityskohtaisten haastattelujen tulokset jaoteltiin nelikenttämenetelmän mukaisesti vahvuuksiin, heikkouksiin, mahdollisuuksiin ja uhkiin. Tämän jälkeen aineistosta nousseet vahvuudet, heikkoudet, mahdollisuudet ja uhat jaoteltiin eri teemojen alle. Aineistosta nousi esiin kaiken kaikkiaan 10 teemaa, jotka olivat seuraavat:

- menetelmän käyttökelpoisuus,
- kustannukset (edullisuus/kalleus),
- tehokkuus/tehottomuus,
- laadunhallinta,
- ympäristötekijät,
- henkilöstön osaaminen,
- terveysvaikutukset ja ergonomiset tekijät,
- turvallisuustekijät,
- sääntely, standardit ja asiakasvaatimukset sekä
- innovaatiot, digitalisaatio ja uudet toimintatavat.

Vastuullisuus on nyky-yhteiskunnassa oleellinen osa liiketoimintaa ja yrityksiltä vaaditaan yhä läpinäkyvämpää toimintaa ja viestintää vastuullisuusasioissa. Vastuullisuusteemaa ei nostettu erillisenä teemana esiin analyysin aikana, koska vastuullisuus on käsitteenä laaja ja sen ajatellaan yleisesti sisältävän ympäristön, taloudellisen ja sosiaalisen vastuullisuuden näkökulmat (kts. esim. United Nations, 2015, s. 1). Näin ollen esimerkiksi ympäristölle kestävät ratkaisut, henkilöstön hyvinvointiin liittyvät tekijät, kuten

terveydelliset ja ergonomiset tekijät sekä henkilöstön turvallisuuden huomioon ottava toiminta, edistävät vastuullisuutta ja sisältyvät siten analyysiin.

Kun kaikki yritys haastattelut oli yksitellen jaoteltu SWOT-kaavion mukaisesti teemoihin, luotiin yksi yhteinen SWOT-analyysi eri kontekstit huomioiden. Mitä tulee SWOT-nelikenttäjako, erilaisia teemoja löytyi kustakin nelikentästä vaihtelevasti, kuten kuva 2 osoittaa. Osa teemoista löytyy useammasta kentästä tai jopa jokaisesta neljästä kohdasta, mikä osoittaa sen, että asioilla on monia eri puolia ja haastateltavilla voi olla myös eriäviä näkemyksiä teemoista. Huomioitavaa on myös, että osa aineistosta nousseista näkemyksistä sopi usean eri teeman alle yhdessä nelikenttäosiossa, esimerkiksi menetelmään liittyvä sääherkkyys ja siitä aiheutuva puhdistusvaiheen siirtäminen yöaikaan saattoi linkittyä niin menetelmän käyttökelpoisuuteen, tehokkuuteen kuin kustannuksiin.

11 (47)



Kuva 2. Hiekka- ja raepuhalluksen SWOT-analyysin teemat.

Hiekka- ja raepuhalluksen vahvuudet

Hiekka- ja raepuhalluksen vahvuuksina (kts. kuva 3) nousi isoimpina teemoina esiin menetelmän käyttökelpoisuus, edulliset kustannukset, tehokkuus ja tietyt ympäristötekijät. Myös muun muassa henkilöstön osaamiseen liittyvät koulutusasiat, laatuun, terveyteen ja ergonomiaan vaikuttavat tekijät, standardit ja asiakasvaatimukset sekä uusiin toimintatapoihin liittyvät seikat nousivat esiin joissakin haastatteluissa.

Vahvuudet

Menetelmän käyttökelpoisuus

- Perinteinen, tuttu ja turvallinen, kauan käytössä ollut, helppo menetelmä
- Suojaaminen helposti toteutettavissa
- Isojen kappaleiden käsittely onnistuu (soveltuu esim. meriteollisuuteen)
- Sopii esim. voimalaitoksiin, jotka voi siivota puhalluksen jälkeen
- Pieniä kohteita voi puhallaa sisätiloissa
- Laitteet yksinkertaisia ja pitkäikäisiä

Kustannukset

- Edullinen ja kustannustehokas (hiekkä, jätteenkäsittely ja suojaaminen)
- Käyttökustannukset ja raaka-ainekustannukset ovat pienemmät moneen muuhun menetelmään verrattuna
- Alhaiset aloitusinvestoinnin kustannukset
- Laitteet yksinkertaisia ja pitkäikäisiä
- Vähän huolto- ja korjauskuluja

Tehokkuus

- Raepuhallus ylivoimainen laivan puhdistamiseen
- Tehokas ja nopea menetelmä

Laadunhallinta

- Raepuhallus on laadullisesti hyvä
- Joissakin kohteissa saa hyvän pinnan vain raepuhalluksen avulla
- Raekoko on tasalaatuista
- Raepuhallukselle on standardit ohjeena, luotettava

Ympäristötekijät

- Karkeaa hiekkaa pystyy kierrättämään (mm. puhdistuksen avulla)
- Metallirakeen voi käyttää moneen kertaan, kunnes muuttuu tomuksi
- Sijainti teollisuusalueella: melu ei haittaa

Henkilöstön osaaminen

- Menetelmä ei vaadi erityistä koulutusta

Terveysvaikutukset ja ergonomiset tekijät

- Nykyiset laitteet ovat melko kevyitä ja pienet puhalluslaitteet ovat ergonomisia
- Suojautuminen ei ole monimutkaista

Turvallisuustekijät

- Isojakin kappaleita käsitellessä suoraa vaaraa/henkilövahinkoja ei aiheudu ympäristölle tai puhaltajalle

Sääntely, standardit ja asiakasvaatimukset

- Alalla on saatavilla standardit, joiden noudattaminen on helppoa, ne on myös helppo oppia.
- Tilaajilta saa ohjeet, mikä tekee menetelmän käytöstä yksinkertaisen.
- Rakeen puhtautta valvotaan

Innovaatiot, digitalisaatio ja uudet toimintatavat

- Metallijätettä voi kierrättää myymällä, jolloin jätteestä syntyy uusia tulovirtoja
- Metallisten laitteiden kierrätyksestä saa myös tuloja.

Kuva 3. Hiekka- ja raepuhallusmenetelmän vahvuudet.

Haastatteluaineiston pohjalta on nähtävissä, että hiekka- ja raepuhallus nähdään perinteisenä, ns. tuttuna ja turvallisena menetelmänä. Kyseessä on menetelmä, joka on ollut kauan käytössä ja on helppo menetelmä käyttää, esimerkiksi henkilöstön koulutus sujuu vaivattomasti. Menetelmä soveltuu erinomaisesti isojen kappaleiden käsittelyyn ja on siksi esimerkiksi meriteollisuuteen sopiva menetelmä. Erään haastateltavan mukaan kyseessä on jopa ”ylivoimainen” menetelmä meriteollisuuteen. Siitä huolimatta, että isojen kappaleiden puhallus on menetelmällä tehokasta, hiekka- ja raepuhallusta voi myös käyttää pienempien kohteiden puhdistukseen sisätiloissa ja se on nopea menetelmä myös monimuotoisille pinnoille. Laitteet ovat pitkäikäisiä ja yksinkertaisia, mikä heijastuu myös kustannuksiin. Eräs yritys sanoi käyttävänsä puhalluksessa kahta puhalluskelloa eli hiekkapuhallusyksikköä, mikä tekee puhalluksesta nopeampaa ja mikä vaikuttaa myös positiivisesti palkkakustannuksiin (syynä se, että puhaltajat tarvitsevat kaverikseen apumiehen ja kun kaksi puhallaa kerralla, he saavat avun yhdeltä ja samalta apumieheltä). Myös samaa kompressoria voidaan käyttää. Yleisesti haastatteluissa tuli ilmi, että menetelmä on tehokas ja nopea menetelmä käytti sitten rae-, hiekka- tai kuonapuhallusta. Yhdessä haastattelussa mainittiin lisäksi, että isojen pintojen puhaltaminen teräsrakeella on tehokkaampaa kuin kuonan käyttäminen verrattaessa näitä kahta toisiinsa. Raepuhallusta kehuttiin lisäksi laadullisesti hyväksi ja luotettavaksi menetelmäksi.

Myös kustannusten osalta mainittiin useita vahvuuksia. Moni haastateltava näki hiekka- ja raepuhalluksen edullisena ja kustannustehokkaana menetelmänä. Aloitusinvestointi on suhteellisen alhainen ja usean haastateltavan mukaan käyttökustannukset sekä raaka-ainekustannukset ovat pienemmät esimerkiksi moneen muuhun menetelmään verrattuna. Toki eräessä haastattelussa mainittiin, että aloitusinvestointi voi olla suurempikin, mikäli yrityksellä on tarvetta investoida esimerkiksi uuteen rakennukseen. Puhaltajien kustannuksista mainittiin myös parissa haastattelussa. Hiekka on edullista samoin kuin kuona, mutta kuonan haittapuoli on sen kertakäyttöisyys. Hiekka- ja raepuhalluksen käyttökustannuksia pidettiin yleisesti edullisina, osa oli myös sitä mieltä, että huolto- ja korjauskustannukset ovat alhaiset, mikä oli osa tämän menetelmän vahvuutta. Esimerkkinä mainittiin letkujen ja liittimien vaihtaminen; eräs haastateltava arvioi, että kustannukset olisivat vain 1–2 % laitteiston arvosta vuositasolla, mutta heillä puhallusta tehdään satunnaisesti muun liiketoiminnan lomassa. Huolto- ja korjauskustannuksista löytyi myös eriäviä mielipiteitä. Eräessä haastattelussa mainittiin haasteena, että laitteet vaativat jatkuvaa huoltoa, ja toisessa haastattelussa

nostettiin esiin kompressorien huollon kallis hinta; näistä molemmissa yrityksissä puhallusta tehdään aktiivisesti. Käyttöasteella onkin merkitystä laitteiston huoltotarpeeseen ja sitä kautta kustannukseen.

Ympäristötekijöiden osalta lähes jokainen haastateltava mainitsi jonkun vahvuuden, mutta sanottakoon heti alkuun, että heikkouksissa ympäristötekijöiden lista oli pidempi. Näitä puolia käsitellään lisää heikkouksien kohdalla. Hiekan osalta mainittiin, että karkeaa hiekkaa voi kierrättää puhdistuksen kautta, vaikkakin toinen haastateltava mainitsi, että hiekan särmikkyys katoaa, mikä tekee kierrätyksestä vaikeaa. Toisaalta eräs haastateltava lisäsi, että kun hiekkaa puhalletaan hallissa, sen voi kerätä ja käyttää uudelleen esimerkiksi täyttömaana. Jos hiekan seassa on maalia, se voi muuttua kuitenkin vaaralliseksi jätteeksi riippuen tilanteesta. Kuonan ei puolestaan katsota olevan vaarallista jätettä, joten sekin kelpaa kaatopaikan maantäytteeksi. Yksi haastateltava mainitsi lisäksi ulkona olevat paikat, joissa hiekka leviää puhallettaessa ulos ympäristöön. Tämä on haaste jätteen keräämisen osalta, minkä vuoksi huolellinen kohteen suojaus onkin tärkeä työvaihe leviämisen estämiseksi. Mitä tulee jätekäsittelyn kuluihin, osa haastateltavista piti kuluja kuitenkin alhaisina.

Metalliraetta puolestaan voidaan käyttää erityisen laitteiston avulla moneen kertaan, kunnes se muuttuu tomuksi, mikä tarkoittaa, että siitä ei synny kaatopaikkajätettä vaan metalliromuksi luokiteltavaa pölyä. Melusaaste on yleisesti katsottu haasteena hiekka- ja raepuhalluksessa esimerkiksi taajamissa, mutta menetelmän etu teollisuusalueella on se, että naapurustolle ei aiheudu meluhaittaa. Suojaus on hiekka- ja raepuhalluksessa tärkeää, mutta eräs vahvuus turvallisuustekijöiden osalta on se, että menetelmä ei aiheuta suoraa vaaraa ympäristölle tai puhaltajalle (menetelmässä ei ole esimerkiksi sokeutumisvaaraa).

Ergonomian osalta parissa haastattelussa mainittiin, että puhallukseen käytettävät pienet laitteet ovat suhteellisen kevyitä käyttää ja ergonomisia. Usein laitteisto on kuitenkin raskasta, mikä tuli ilmi menetelmän heikkouksia käsitellessä. Sääntelystä kysyessä, jotkut haastateltavat mainitsivat asian todeten, että toimialalla ei ole erityistä menetelmään liittyvää sääntelyä ympäristösääntelyn lisäksi. Standardeja noudatetaan ja muun muassa rakeen laatua valvotaan. Lisäksi asiakasvaatimukset ohjaavat toimintaa. Mitä tulee uusiin toimintatapoihin, yksi potentiaalinen vahvuus on se, että kierrätyksestä yritykset voivat saada lisätuloja. Esimerkiksi yksi haastateltava kertoi yrityksen myyvän metallijätettä ja kierrättävän myös metalliset laitteet, joista yritys saa niin ikään tuloja.

Hiekka- ja raepuhalluksen heikkoudet

Hiekka- ja raepuhalluksen heikkouksissa suurin osa haastateltavista mainitsi heikkouksia, jotka liittyivät ympäristötekijöihin, terveysvaikutuksiin ja ergonomisiin tekijöihin, menetelmän käyttökelpoisuuteen ja turvallisuustekijöihin (kts. kuva 4). Lisäksi mainittiin muun muassa kustannuksiin, säädöksiin, ja laadunhallintaan liittyviä tekijöitä, myös tehottomuusnäkökulmaa sivuttiin.

Heikkoudet

Menetelmän käyttökelpoisuus

- Sääherkkämenetelmä
- Meluhaitan vuoksi puhaltamiselle on aikarajoja
- Aikaa menee paljon esim. loppusiivoukseen, raetta lentää usein laajalle alueelle
- Kaikkia kohteita ei voi hiekkapuhaltaa (esim. herkätkä kohteet/laitteet)
- Raskaita laitteita, myös hiekkasäkit raskaita
- Hankala puhallusjätteen hallinta puhalluksen aikana
- Ympäristön suojaus on välttämätön ja usein puhallettava pinta suojattava
- Tarvitsee tuuletusta, imurointia sekä yli- ja alipainetta
- Toinen työpari tarvitaan (esim. ahtaat tilat)
- Raepuhalluslaitteiden huollon tarve kova

Kustannukset

- Nousevat kuljetuskustannukset
- Energian kulutus ja energian hinnan vaikutukset
- Isojen tilojen suojaamisen kalleus
- Laitteiston huollot kalliita (puhallus on kuluttavaa)

Tehokkuus/tehottomuus

- Sääherkkämenetelmä

Laadunhallinta

- Käsitellyn pinnan herkkyyks
- Jos hiekassa on esimerkiksi ruostetta, voi ruostuttaa rosterin.
- Puhallusetaisyyden ja hiekan seoksen määrän vaikutukset puhdistettavaan pintaan voi olla vaikea arvioida.
- Metallirakeen kuluessa, rae pienenee ja jälki muuttuu (eli pinnan profiili muuttuu)

Ympäristötekijät

- Kuona on puhallusmateriaalina kertakäyttöistä, jätettä syntyy paljon eikä sitä voi päästää luontoon

- Pölyhaitta niin puhaltajalle kuin ympäristölle; paineet ovat kovat ja pölyämisen takia alue pitää suojata hyvin
- Melusaaste asuinalueella (ei teollisuusalueen ongelma)
- Maisemahaitta hiekan kaivuun vuoksi ja luonnonhiekan riittävyys
- Hiekan kierrätys (puhdistusasteen ongelmat ja särmikkyyden katoaminen)
- Kuljetus ja polttoainekulutus
- Energiaa kuluttava menetelmä (etenkin kompressorit, mutta myös kiinteät laitteet)
- Hävikkiä on vaikea mitata, koska puhallus ei ole digitaalinen menetelmä
- Vaarallista jätettä voi syntyä maalipintoja käsitellessä
- Tekijän oma asenne ympäristöasioihin vaikuttaa taustalla

Terveysvaikutukset ja ergonomiset tekijät

- Melu-, pöly- ja hiukkasista aiheutuva haitta
- Tuuletus ja suojaus otettava huomioon (toisaalta ei ole monimutkaista)
- Hankalat työasennot, välillä ahtaat tilat sekä raskas laitteisto ja usein myös raskaat suojavälineet
- Liukastumis- ja kaatumisvaara, isoja kappaleita nostellessa venähdysvaara sekä muut henkilön kohdistuvat riskit, kuten osumat käteen

Turvallisuustekijät

- Suuren paineen vuoksi menetelmässä on vaaratilanteiden, jopa hengenvaarallisen riski
- Vaaroja ahtaissa tiloissa, säiliöissä ja tiiviissä rakennelmissa (pöly ja pimeys), vaatii työkalun avuksi/turvaksi

Säätely, standardit ja asiakasvaatimukset

- Ympäristölupa ja rakeiden poisvientiin liittyvät toimet vaaditaan
- Hiekkapuhalluslupa tarvitaan esim. kaupungeissa pöly- ja meluhaitan vuoksi

Kuva 4. Hiekka- ja raepuhallusmenetelmän heikkoudet

Hiekkapuhalluksen haittana mainittiin menetelmän sääherkkyys. Vesisateessa ei voida puhaltaa ja pakkasen on osittain haasteellinen. Joskus yritykset joutuvat puhaltamaan esimerkiksi sunnuntaina yöllä. Teollisuusympäristössä pitää puolestaan ottaa huomioon puhalluksen aikaikkuna melutasot huomioiden. Melua välttääkseen yritykset puhaltavat jopa yöaikaan. Sääherkkyys ja melutasot vaikuttavat siten yhtä aikaa menetelmän käyttökelpoisuuteen vaikeuttamalla prosessia, mutta samalla koko prosessin tehokkuus voi käytännössä kärsiä ja/tai aiheuttaa lisäkustannuksia yritykselle. Heikkoutena haastatteluissa nousi myös esiin se, että joitakin kohteita ei voi hiekkapuhaltaa (esim. kallis automatisoitu laite, satamanosturin jarru), koska pölyltä suojaaminen on hankala ja kallis toteuttaa. Hiekan osalta mainittiin lisäksi, että se ei aina sovellu puhalteeksi, vaan välillä muut rakeet soveltuvat käyttökohteisiin paremmin kuin hiekka.

Menetelmän haittapuolena mainittiin lisäksi laitteiston raskaus ja painavat hiekkasäkit, joita on raskas tyhjentää puhalluskelloon. Eräissä haastattelussa mainittiin heikkoutena se, että ahtaissa tiloissa tarvitaan toinen henkilö vahdiksi ja avustamaan muissa tehtävissä. Toisessa haastattelussa puolestaan nostettiin esiin raepuhalluslaitteiden jatkuva huollon tarve, koska puhallus kuluttaa laitteistoa suurella käytössä.

Puhallusjäte aiheuttaa hankaluuksia puhalluksen aikana ja jälkeen. Puhalluksessa syntyy pölyä, mikä mainittiin haastatteluissa yleisesti menetelmän heikkoutena. Hiekka- ja raepuhallus vaatiikin kunnon suojauksen pressuineen ja huputuksineen. Suojaukseen ja aikaan liittyviä muita hankaluuksia liittyy muun muassa siihen, että suoja ei aina pidä raetta vaan pöly ja lika saattavat päästä karkaamaan pienistä koloista suojauksesta huolimatta. Tästä muodostuu haaste, sillä seuraava työvaihe ei pääse alkamaan, ennen kuin siivous on suoritettu, ja se vie aikaa. Eräs haastateltava mainitsi, että välillä puhallettu pintakin on suojattava, ettei pinta ehdi likaantua ennen jatkokäsittelyä; lisäksi pinnan jatkokäsittely on tehtävä tietyn aikaikkunan sisällä.

Lisäksi haastatteluissa mainittiin, että puhallusta varten tarvitaan sopiva lämpötila ja kuivuus, tuuletusta, alipaine puhallusalueelle, ylipaine ympärillä, jottei pöly kulkeudu, ja imurointi. Useampi haastateltava mainitsi haastatteluissa työnsä ja aikaa vievän loppusiivouksen. Eräissä haastattelussa mainittiin, että siivous voi viedä jopa pidemmän ajan kuin jonkin tietyn kohteen puhallus. Eräs haastateltavista muistutti kuitenkin, että pölyn hallinta ei ole kaikille yrityksille yhtä oleellinen tekijä: ne, jotka suorittavat työn ulkona

tai hiekkapuhallushallissa eivät joudu samalla lailla keskittymään asiaan kuin ne yritykset, jotka puhaltavat esimerkiksi telakoilla.

Menetelmän käyttö vaikuttaa eri tavoin ympäristöön, ja ympäristövaikutusten osalta haastatteluissa mainittiin useita heikkouksia. Eri puhalteiden osalta mainittiin haastatteluissa myös heikkouksia. Esimerkiksi kuona puhalteena on kertakäyttöistä ja lisäksi siitä tulee paljon jätettä eikä kuonajätettä voi päästää sellaisenaan luontoon. Tämä vaikuttaa siihen, minkä puhallusmenetelmän tai puhaltteen yritys voi valita tiettyihin kohteisiin, kuten laiturirakenteisiin. Luonnonhiekan osalta puolestaan heikkoutena on ympäristöarvojen vastakkaisuus, koska kaivuun myötä tulee maisemahaittoja ja luonnonhiekkä on myös uusiutumaton luonnonvara. Eräs haastateltava mainitsi, että karkeaa hiekkää pystyy periaatteessa kierrättämään, mutta näki heikkoutena hiekan puhtausasteen aiheuttamat mahdolliset ongelmat uusiokäytössä. Toinen yritys edustaja totesi, että myös särmikkyys saattaa kadota käytettäessä, mikä estää kierrätyksen.

15 (47)

Hiekka- ja raepuhalluksesta syntyy pölyä, josta myös naapurit voivat valittaa. Haastatteluissa mainittiin muun muassa kvartsipöly, joka haittaa sekä puhaltajaa että lähiympäristöä. Pölyä voi puhalluspaikasta riippuen levitä esimerkiksi mereen ja siltojen pätyihin; määrää on myös tästä syystä johtuen vaikea arvioida. Hiekka pölyä vielä jätteenkäsittelyvaiheessakin. Puhdistettaessa pintoja voi mahdollisesti syntyä puolestaan vaarallista jätettä, kun materiaalin seassa on maalia. Puhallettava jäte on myös kerättävä ja vietävä tai lähetettävä jätehuoltoon. Eräs haastateltava mainitsi, että koska hiekkapuhallusmenetelmä ei ole digitaalinen menetelmä, ei hävikkiäkään voida seurata tarkkaan. Haastateltavat antoivat arvioita jätteen määrästä, mikä on riippuvainen käyttökohteesta. Esimerkiksi eräs yritys arvioi kuonajätettä syntyvän monta sataa tonnia vuodessa ja toinen arvioi, että jätteen määrä on mittava ja sitä lähtee rekkalastina pois kymmeniä kuutioita.

Haastatteluissa mainittiin, että hiekkapuhalluksen alue pitää suojata hyvin, sillä paineet laitteessa ovat kovat ja materiaali pölyyää. Puhaltajan pitää olla myös tarkkana siitä, että lasia ei ole lähellä. Eräs haastateltava mainitsi, että yleisesti työntekijöillä täytyy olla ympäristöystävällinen asenne (esimerkiksi nesteitä ja muita aineita ei tule kaataa luontoon, teollisuustiloissa työskennellessä roskat otetaan mukaan ja jos maalattaessa pressuissa on pinnoitteita, pressut viedään jätteenkäsittelylaitokseen).

Melusaaste on myös haasteena erityisesti, kun puhalletaan asutusalueella, mikä aiheuttaa valituksia. Teollisuusalueella sen sijaan ei tätä ongelmaa ole samassa mittakaavassa paitsi, kun puhalletaan esimerkiksi telakalla, jossa on paljon muitakin työntekijöitä ympärillä.

Kustannusten osalta haastateltavat nostivat hieman eri asioita esiin. Heikkoutena mainittiin, että kuljetuskustannukset nousevat jatkuvasti ja energian hinnalla on vaikutuksia kustannuksiin. Kuljetuskustannukset esiin nostanut haastateltava mainitsi, että valinnoilla on merkitystä eli se, millä polttoaineella kuljetus tapahtuu, on vaikutuksia ja hän odotti, että vaihtoehtoja kuljetuksiin tulisi yhä enemmän. Energian kulutus on myös korkeaa puhalluksen aikana, menetelmään tarvitaan polttomoottorikäyttöinen kompressori, joka kuluttaa energiaa ja josta tulee päästöjä, mutta myös kiinteät laitteet kuluttavat sähköä.

Isojen työtilojen suojaaminen saattaa käydä kalliiksi ja kompressorien huollot ovat kalliita. Eräessä haastattelussa mainittiin, että metallirae puhalteena on kalliimpaa kuin jotkin toiset vaihtoehdot, mutta markkinoilla on saatavilla uusia laitteistoja, jotka mahdollistavat rakeen uudelleenkäytön, jolloin ei tule kaatopaikkajätettä. Investoinnit tällaisiin laitteisiin ovat kalliita, mutta laskevat toisaalta muita kustannuksia.

Laadunhallinnan osalta mainittiin neljä eri näkökulmaa eri haastatteluissa. Ensinnäkin käsitelty pinta on herkkä, jolloin esim. vesipisara saattaa pilata pinnan. Halli suojaa tältä haitalta, mutta voi olla kallis vaihtoehto yritykselle. Toiseksi, jos hiekan joukossa on ruostetta, se voi ruostuttaa ruostumattoman teräksen.

Kolmanneksi puhallusetäisyyden ja hiekan seoksen määrä vaikuttaa lopputulokseen ja eräs haastateltava mainitsi, että aina ei pystytäkään tarkkaan tietämään, miten se vaurioittaa metallirakennetta/-pintaa, sen vuoksi joskus on päädytty puhdistamaan esimerkiksi säiliöitä korkeapainepesulla. Viimeisenä, kun käytetään metalliraetta puhalluslaitteena, metallirakeen kuluessa rae pienenee, minkä myötä rakeen aiheuttama jälki eli pinnan profiili muuttuu.

Jokainen haastateltava mainitsi vähintään yhden tekijän, joka liittyy henkilöstön terveyteen ja ergonomiaan. Menetelmän heikkoutena mainittiin melu- ja pölyhaitta, kohteen tuuletus ja suojaustarve sekä henkilökohtaisen suojauksen tarve (mm. silmä- ja kuulosuojaimet, kypärä). Suojausvälineiden kohdalla eräs haastateltava mainitsi myös, että korvien suojaus on osittain hankalaa, koska kuulokkeet eivät mahdu kypärään. Korvakäytävään tulevat suojat ovat puolestaan hintavia eikä työnantajalla ole varmuutta, että niitä varmasti käytetään. Menetelmän heikkouksiin liittyvät myös hankalat työasennot ja laitteiston käytön aiheuttama rasitus ja väsymys, mikä tekeekin työasennon merkityksestä yhä tärkeämmän. Ahtaat tilat aiheuttavat myös haasteita eikä niiden yhteydessä voi puhalltaa yksin, vaan tarvitaan toinen henkilö varmistamaan, että kaikki sujuu hyvin. Tämä tilanne tulee eteen esimerkiksi säiliöpuhalluksessa, sillä säiliöissä on pimeää ja pölyä, jolloin vaaratilanteen sattuessa työntekijän voi olla hankala päästä tilasta ulos ilman apua.

Menetelmään liittyviä vaaroja ja turvallisuusriskejä mainittiin myös haastatteluissa, esimerkiksi paine horjuttaa työntekijää, mikä voi pyrkiä kaatamaan hänet, puhaltamisessa on liukastumisvaara ja isoja kappaleita nostellessa venähdysvaara. Turvallisuusriskinä on myös, että puhalltaessa saa osuman esimerkiksi käteen, mikä aiheuttaa vaarallisen haavan. Menetelmään liittyy myös hengenvaara siltä osin, että paineet ovat kovat ja jos jokin osa irtoaa, osa voi irrotessaan aiheuttaa hengenvaaran.

Säätelyn osalta haastatteluissa mainittiin joitain vaatimuksia. Tiettyjä lupia vaaditaan, kuten ympäristölupa. Hiekkapuhalluslupa tulee olla puhallettaessa kaupungeissa pöly- ja meluhaitan vuoksi. Lisäksi esimerkiksi hiekan pakkaamiseen on tullut säätelyä.

Hiekka- ja raepuhalluksen mahdollisuudet

Hiekka- ja raepuhallusmenetelmät tarjoavat edelleen merkittäviä mahdollisuuksia teollisuuden pintakäsittelyssä, erityisesti silloin kun tarvitaan tehokasta ja laajapintaista puhdistusta. Vaikka uusia teknologioita, kuten laserpuhdistusta, kehitetään jatkuvasti, perinteiset menetelmät säilyttävät arvonsa monipuolisuutensa, skaalautuvuutensa ja kustannustehokkuutensa ansiosta. Kuvassa 5 on esitetty hiekka- ja raepuhallusmenetelmän mahdollisuudet.

Mahdollisuudet

Menetelmän käyttökelpoisuus

- Käyttökelpoinen menetelmä (tulevaisuudessakin)

Kustannukset

- Hiekan käytössä kustannukset alhaiset (käyttö ja raaka-aineet)
- Hiekkapuhallus edullisempaa käyttää ja esim. laserlaitteet vielä kalliita useille toimijoille käyttöön nähden
- Kompressorit voisivat kuluttaa vähemmän energiaa tai sähköllä paineen tuottaminen voisi olla edullisempaa, mutta molemmissa tapauksissa hinnoittelu vaikuttaa
- Tulevaisuuskuva voisi olla: robotiikka puhallukseen, jolloin poistuu työvoimakustannus

Tehokkuus

- Raepuhallusta vaikea syrjäyttää, koska soveltuu isoihin pintoihin ja on nopea
- Tehostus/parannusmahdollisuuksia on esimerkiksi töiden ja prosessien paremman yhteensovittamisen osalta teollisuusprosesseissa

Ympäristötekijät

- Kompressorien energiankulutuksessa säästöpotentiaalia
- Saatavilla uusia laitteita, jotka mahdollistavat metallirakeen uudelleen käytön, jolloin ei tule kaatopaikkajätettä

Säätely, standardit ja asiakasvaatimukset

- Kiristyvät ympäristösäädökset voivat tuoda etuja (pohditaan säästöjä ja korjataan mahdollisia systemaattisia virheitä)
- On olemassa standardit (laserille ei)

Innovaatiot, digitalisaatio ja uudet toimintatavat

- Digitalisointi prosessin osissa ja huoltotarpeen optimoinnissa voisi tuoda tehokkuutta ja ympäristöystävällisyyttä sekä kustannussäästöjä.
- Hiekkapuhallusrobotiikkaa lisääntynee, ruiskuissa tietotekniikkaa
- Hiekkapuhallus menee ainakin toistaiseksi laserlaitteen ohi (laserin alkuinvestointi korkea ja voi olla esteenä aloitukselle etenkin mikroyrityksille)
- On paikkoja/kohteita, joihin lasertekniikka ei tule soveltumaan ja ne ovat puhalluksen mahdollisuus (esim. voimalaitosten lämmön-siirtopinnat)
- Paksut kerrostumat parempi puhalttaa kuin puhdistaa laserilla
- Online seurantamenetelmät ja ajanhallinnan järjestelmät mahdollisuus
- Jätteen uusiokäyttö/kierrätys on mahdollisuus (huomioitava luvat esim. jätteen vastaanottamiseen)

Kuva 5. Hiekka- ja raepuhallusmenetelmän mahdollisuudet

Mahdollisuuksien osalta haastatteluissa tuli eniten mainintoja teemaan innovaatiot, digitalisaatio ja uudet toimintatavat. Yhtenä keskeisenä teemana haastatteluissa mainittiin lasersäteen mahdollisuus hiekka- ja raepuhallusmenetelmien korvaajana pinnan puhdistuksessa. Useampi haastateltava mainitsi, että laserpuhdistus ei tulisi korvaamaan hiekka- ja raepuhallusta isojen pintojen käsittelyssä, sillä nykyinen menetelmä on nopea ja tehokas. Myös tietyt pinnat ja pinnanmuodot ovat helppoja puhdistaa puhaltaen, kuten teräsrakenteet ja vanteet. Teollisuuden sisätiloissa uusille menetelmille on kuitenkin tilausta. Lisäksi osa haastateltavista vastasi, että laserpuhdistustekniikalla on mahdollisuuksia tulevaisuudessa. Laserpuhdistuksen korkea alkuinvestointi on osalle este ja etenkin mikroyrityksille hankinta on haasteellinen. Yksi haastateltava mainitsi, että hiekkapuhallus on nopeampi ja toinen pohti, että raepuhalluksessa lähtee paksukin likakerrostuma pinnasta, kun taas laserpuhdistus ei ehkä pysty siihen. Muita digitalisaation mahdollisuuksia mainittiin lisäksi yleisesti haastatteluissa, osassa yrityksiä digitalisaatiota jo hyödynnetäänkin. Useampi näki esimerkiksi tehostamismahdollisuuksia digitalisaation kautta, kuten seurantajärjestelmien hyödyntämistä, prosessin osittaista digitalisointia, huollon optimointia digitalisoinnin kautta ja hiekkapuhallusrobotiikan lisääntyntä käyttöä tulevaisuudessa. Uusia toimintamalleja ja ansaintalogiikkaa sivuttiin myös haastatteluissa. Eräs haastateltava mainitsi jätteen uusiokäytön mahdollisuutena, kunhan luvat ovat kunnossa jätteen vastaanottamiseen. Rakeiden uusiokäytön osalta pitää puolestaan pohtia kierrätettävän rakeen kokoa, jonka pitää vastata asiakkaan tarvetta. Toinen haastateltava sanoi, että uudenlaisia laitteistoja voitaisiin hankkia uusien asiakkaiden houkuttamiseksi tai asiakkaiden toiveesta.

Muita esiin nousevia teemoja mahdollisuuksien osalta oli myös, mutta niitä otettiin esiin lähinnä yksittäisissä haastatteluissa. Esimerkiksi hiekkapuhalluksen käyttökelpoisuus mainittiin mahdollisuutena myös tulevaisuudessa. Kustannusten osalta mahdollisuutena nähtiin hiekan alhaisemmat käyttö- ja raaka-ainekustannukset. Haastatteluissa mainittiin myös kustannusmahdollisuudet erilaisten uusien teknologioiden käytön osalta. Esimerkiksi eräs haastateltava pohti automaatin hintaa tapauksessa, jossa tavaravirta on vilkasta: investoinnin alkukustannus on suuri, mutta se maksaa itsensä takaisin olettaen, että tavaraa liikkuu paljon. Laserlaitteilla voi katsoa olevan samankaltainen tilanne. Sama haastateltava pohti, että laserlaitteet ovat vielä kalliita käyttöasteen ollessa alhainen, mikä on hankinnan esteenä. Energian hinnan vaikutuksia pohdittiin myös haastattelussa. Esimerkiksi kompressorien energian kulutuksessa olisi

säästöpotentiaalia, toisaalta polttoaineen hinnoittelu vaikuttaa asiaan. Mikäli tulevaisuudessa käytetään enemmän puhallusrobotiikkaa, poistuu puolestaan työvoimakustannus.

Yksi haastateltavista pohti mahdollisuuksia tehostaa nykytoimintoja erilaisin keinoin, vaikkakin oli sitä mieltä, että raepuhallusta ei tulla syrjäyttämään sen nopeuden vuoksi isojen pintojen käsittelyssä. Hän koki, että tehostusmahdollisuuksia olisi esimerkiksi, jos pintakäsittelyä tehtäisiin hallissa ja eri työvaiheita sovitettaisiin yhteen paremmin.

Ympäristötekijöiden mahdollisuuksissa mainittiin asiakkaiden vaatimat päästöraportoinnit, jotka lisääntyvät etenkin isojen organisaatioiden toimesta. Eräs haastateltavista koki, että heillä on valmius tuottaa vaaditut tiedot eikä nähnyt asiaa välttämättä huonona seikkana. Jo aiemmin mainittu kompressorien polttoaineen vähäisempi kulutus olisi mahdollisuus ympäristötekijöiden osalta. Samoin nykyään on saatavilla uusia laitteistoja, jotka mahdollistavat rakeen uudelleen käytön raepuhalluksessa. Silloin ei tule kaatopaikkajätettä, mikä on mahdollisuus ympäristön kannalta. Ympäristösäädökset kiristyvät ja yhdessä haastattelussa mainittiin, että sääntely voi myös poikia etuja säästöjen muodossa, kun yritetään säästää ja etsiä virheitä. Standardit nähtiin myös mahdollisuutena hiekka- ja raepuhalluksen käytössä, sillä laserpuhdistustekniikalle standardeja ei ole vielä luotu.

Hiekka- ja raepuhallusmenetelmään liittyvät uhat

Vaikka hiekka- ja raepuhallusmenetelmät ovat vakiintuneita ja tehokkaita ratkaisuja metallipintojen puhdistuksessa, niihin liittyy myös merkittäviä riskejä, jotka korostuvat erityisesti keskusteluissa innovaatioiden, digitalisaation ja uusien toimintatapojen yhteydessä. Kuvassa 6 on koostettu hiekka- ja raepuhallusmenetelmän uhat.

Uhat	
Menetelmän käyttökelpoisuus Hiekkapuhallus on hiipuva toimiala	Sääntely, standardit ja asiakasvaatimukset - Kiristyvät ympäristösäännökset (mm. aineksen otto hiekkapuhalluksessa, kiristyvät suojaukset) - Sääntely voi vaikuttaa raepuhalluksen käyttömahdollisuuksiin
Kustannukset - Kustannustehokkaampien menetelmien tulo markkinoille - Nousevat kuljetus- ja energiakulut - Pienillä yrityksillä ei mahdollisuutta uusien hiekanpuhdistuslaitteistoa, koska on suuri investointi - Kaupungeissa riskinä ovat vahingonkorvaukset puhalluksesta aiheutuvista haitoista, kuten pölystä.	Innovaatiot, digitalisaatio ja uudet toimintatavat - Korvaavia menetelmiä saattaa tulla ympäristösyistä ja tehokkuuden vuoksi - Digitalisaatio maksaa ja vaatii kehittämistä (etenkin pienille toimijoille haaste); pitkä prosessi ja se pitää osata johtaa. Riskinä, että pitkälinen siirtymä/modernisointi ei kuitenkaan toisi tarvittavaa määrää asiakkuuksia. - Digitalisaation uhkana myös vastarinta sialle (esim. seurantatyökalut) - Joillakin aloilla ja tietyissä puhdistuskohteissa lasertekniikka saattaa olla uhka hiekka- ja raepuhaltamiselle. - Jos pinnan standardi SA2,5 saavutetaan, pinnan puhdistus laserlaitteilla on järkevää ja lasertekniikan käyttö voi lisääntyä puhalluksen tilalle.
Tehokkuus/Tehottomuus Tehokkaampien menetelmien tulo markkinoille, hiekkapuhalluksessa ei ole merkittävää tehostamismahdollisuutta	
Ympäristötekijät Toistaiseksi käytetylle hiekalle ei ole järjestetty kierrätysmahdollisuutta tai keksitty jälkikäyttöä	

Kuva 6. Hiekka- ja raepuhallusmenetelmän uhat.

Samoin kuin mahdollisuuksien kohdalla hiekka- ja raepuhallusmenetelmään liittyviä uhkia mainittiin haastatteluissa eniten teemaan innovaatiot, digitalisaatio ja uudet toimintatavat. Muissa teemoissa oli vain yksittäisiä mainintoja eri haastatteluista.

Hiekka- ja raepuhallusmenetelmän uhkana nähtiin uudet ja tehokkaammat menetelmät tai uhkakuva siitä, että asiakkaat siirtyvät ostamaan palvelua toiselta yritykseltä, joka käyttää ympäristöystävällisempää menetelmää kuin yritys itse. Laserpuhdistus mainittiin mahdollisena uhkana joillakin aloilla ja käyttökohteissa. Toisaalta tiedostettiin myös, että laserpuhdistukselle on paikkansa tietyissä kohteissa (esim. satamanosturin jarru), joissa laserpuhdistus on paljon tehokkaampi kuin muut perinteiset menetelmät, tai sisätiloissa kuten uimahallissa, johon hiekkapuhallus ei sovi. Yhdessä haastattelussa mainittiin, että laivan rungon saumojen ruosteen puhdistukseenkin voisi soveltua kevyempi menetelmä korvaamaan nykyisiä menetelmiä. Samoin ahtaat tilat vaativat pienempiä ja ketterämpiä laitteita. Laserlaitteisto on tehoista riippuen kätevä käyttää ergonomisesti (isot laitteet ovat poikkeus), mikä voisi uhata perinteisiä menetelmiä ergonomian kannalta katsottuna. Mikäli toivottu SA2,5-puhtausaste saavutetaan, laserpuhdistuksen käyttö voisi lisääntyä ns. perinteisten menetelmien tilalla.

Osa haastateltavista pohti yleisesti digitalisaation roolia tulevaisuudessa ja mikä digitalisaation uhkana tai esteenä on. Yksi haastateltavista pohti digitalisaation pitkää prosessia, tarvetta onnistuneelle muutosjohtamiselle sekä digitaalisesta muutoksesta aiheutuvaa mahdollista muutosvastarintaa. Riskinä on myös, että muutos ei kuitenkaan toisi mukanaan tarvittavaa määrää asiakkuuksia. Digitaalisille seurantajärjestelmille nähdään tarvetta, kuten aiemmin mainittiin, mutta nekin voivat aiheuttaa vastarintaa jopa asiakkaan tai ammattiyhdistysten osalta siitä, millä tasolla esimerkiksi työntekijöiden työtä tai ohjaamia laitteita voi ja/tai kannattaa seurata. Osa pohti kehittämisen kalleutta, joka estää mukaan lähtemisen.

Toisena kustannuksiin vaikuttavana uhkana mainittiin jatkuvasti nousevat kuljetus- ja energiakulut ja kolmantena uhkana korkeisiin kustannuksiin liittyvänä tekijänä se, että pienillä, esimerkiksi hiekkaa myyvillä yrityksillä, ei ole välttämättä mahdollisuutta uusien hiekanpuhdistuskalustoa, koska kyseessä on suuri investointi. Eräs haastateltava mainitsi, että puhaltaminen kaupungeissa on riski, koska lisäkustannuksia voisi potentiaalisesti syntyä, jos joku tekisi vahingonkorvauksen puhalluksen vaikutusten takia. Siksi kyseinen yritys pohtiikin, mihin urakoihin lähtee mukaan. Tehokkuuden osalta haastatteluissa mainittiin, että hiekkapuhallusmenetelmää ei voi merkittävästi tehostaa ja tehokkaampia korvaavia menetelmiä voisi tulevaisuudessa tulla. Eräs haastateltava pohti menetelmän käyttökelpoisuutta tulevaisuudessa ja mainitsi hiekkapuhalluksen olevan hiipuva ala. Sama haastateltava pohti, että kustannustehokkaampien menetelmien tulo markkinoille voisi olla tulevaisuudessa uhka hiekkapuhallusmarkkinoilla, joskaan kaikki haastateltavat eivät nostaneet tätä seikkaa esiin.

Ympäristöön liittyvä hiekkapuhallusmarkkinaa uhkaava tekijä tulevaisuudessa voi liittyä käytetyn hiekan kierrätysmahdollisuuden puutteeseen: kaikki eivät nähneet käytetyllä hiekalla kierrätysmahdollisuutta tai uusiokäyttöä. Kuten aiemmin on mainittu, eräs haastateltava näki kierrätysmahdollisuuksia, mutta hiekan puhtausaste voi aiheuttaa haasteita jälkikäyttöön. Sääntelyn osalta uhkana nähtiin niin ikään ympäristöön liittyviä tekijöitä nimittäin uudet tai kiristyvät ympäristösäädökset: yksi haastateltava mainitsi, että uudet säädökset voivat vaikuttaa raepuhalluksen käyttömahdollisuuksiin ja toinen pohti hiekkapuhalluksen tulevaisuutta, mikäli hiekkaa ei voisi enää käyttää. Eräs haastateltava lisäsi, että ympäristötekijöiden osalta on odotettavissa läpinäkyvyysvaatimuksia viiden vuoden aikajänteellä muun muassa sähkön käytön ja jätteen osalta.

3. Laserpuhdistusteknologian soveltamisen nykytila-analyysi

3.1. Mitä laserpuhdistus on?

Laserpuhdistus on menetelmä, jota käytetään pintojen puhdistukseen. Sillä voidaan poistaa esimerkiksi maalikerroksia, ruostetta tai muuta likaa vaikuttamatta puhdistettavan perusaineen pinnanlaatuun tai materiaalin ominaisuuksiin. Laserpuhdistuksessa lasersädettä käytetään reaaliajassa valitun materiaalin puhdistamiseen hyödyntäen sen erityisiä pintaominaisuuksia. Laserpuhdistuksessa selvitetään ensin puhdistettavan pinnan tyyppi, sen kemiallinen koostumus sekä poistettavat epäpuhtaudet, kuten maali tai ruoste. Tämän jälkeen valitaan puhdistukseen sopivat parametrit, jotka vaikuttavat puhdistustulokseen. Näitä parametreja ovat esimerkiksi säteen aallonpituus, pulssin energia ja kesto, skannausnopeus ja energiatiheys. Hyviin tuloksiin vaikuttavat myös pinnoitteen laatu, kemiallinen koostumus sekä suojakaasun käyttö. Suojakaasuna käytetään yleensä argonkaasua, joka estää pinnan hapettumisen laserpuhdistusprosessin aikana. (Tourunen, 2024)

Toisin kuin perinteiset menetelmät, joissa käytetään usein hankaavia aineita tai vaarallisia kemikaaleja, laserpuhdistus tuottaa vain vähän sivutuotteita ja jätettä tarkkuutensa ja kohdennetun toimintansa ansiosta, mikä tekee siitä ympäristöystävällisemmän vaihtoehdon. (Wang et al., 2019)

Tutkimukset osoittavat, että laserpuhdistuksella voidaan tehokkaasti poistaa laaja kirjo epäpuhtauksia, kuten pinnoitteita, pölyä ja korroosiotuotteita, ilman että syntyy ylimääräistä jätettä, kuten kemiallisia jätteitä tai mekaanisen hionnan aiheuttamaa roska-jätettä. (Deng et al., 2022) Laserpuhdistuksen hyödyt eivät rajoitu jätteen vähentämiseen; menetelmä myös säilyttää alustan materiaalin eheyden vähentämällä pinnan vaurioitumista, mikä on erityisen tärkeää esimerkiksi ilmailu- ja autoteollisuudessa, joissa komponenttien luotettavuus on kriittistä. (Kim et al., 2021)

Lasersäde kohdistetaan valittuun eli likaantuneeseen pintaan, jolloin epäpuhtaudet höyrystyvät ja/tai irtoavat pois pinnasta. Puhdistuksen lopuksi tarkastellaan pintojen puhtautta silmämääräisesti sekä analyysimenetelmillä, joiden avulla voidaan todeta puhdistuksen onnistuminen. Laserpuhdistuksessa käytetään erilaisia mekanismeja, joita ovat mm. laserablaatiomekanismi, terminen jännitysmalli ja shokkiaaltomekanismi. (Tourunen, 2024)

Laserablaatiomekanismissa laserpulssin osuessa puhdistettavan systeemin pintaan sen lämpötila nousee nopeasti ja pinnalla oleva materiaali saavuttaa höyrystymislämpötilan. Lasersäteen energia on riittävän suuri atomien sidosten katkomiseen sekä lämpötilan nostamiseen höyrystymispisteen yli. Lopputuloksena pinnoite haihtuu ja paljastaa puhtaan perusaineen pinnan.

Termisessä jännitysmallissa taas lasersäteen vaikutus ei riitä materiaalin höyrystämiseen, vaan säde kuumentaa perusaineen. Jäähdyessään perusaineeseen syntyy lämpölaajenemista, josta aiheutuu termistä jännitystä. Termisen jännityksen on oltava suurempi kuin systeemin adheesiovoima kahden eri kerroksen välillä – tämä mahdollistaa pinnoitteen irtoamisen perusaineen pinnasta. Tuloksena saadaan, että pinnoite lohkeaa pois perusaineen pinnasta, vaikka ei höyrystyisikään.

Shokkiaaltomekanismin toimintaperiaate eroaa laserablaatiosta sekä termisestä jännitysmallista, sillä lasersädettä ei kohdisteta perusaineeseen. Shokkiaaltomekanismissa lasersäde kohdistetaan ilmaan puhdistettavan pinnan yläpuolelle. Lasersäde aiheuttaa ilman ionisoitumisen, jonka seurauksena syntyy shokkiaalto. Tuloksena saadaan, että perusaineen päällä oleva materiaali irtoaa shokkiaallon paineen vaikutuksesta ilman lasersäteen lämpövaikutusta perusaineesta.

Laserpuhdistusteknologia on noussut erääksi mahdolliseksi tehokkaaksi ratkaisuksi erilaisten pintojen epäpuhtauksien poistamiseen, ja se tuottaa usein vähemmän jätettä verrattuna perinteisiin puhdistusmenetelmiin. Pieni- ja suuritehoisilla laserlaitteilla on molemmilla omat erityiset roolinsa laserpuhdistussovelluksissa, ja ne soveltuvat eri tarkoituksiin. Pienitehoiset laserlaitteet sopivat erinomaisesti tarkkoihin puhdistustöihin, joissa poistetaan pieniä epäpuhtauksia tai ohuita pinnoitteita tarkasti ja minimaalisella riskillä vaurioittaa alustaa (Ling et al., 2016). Tämä tekee niistä käyttökelpoisia esim. lämpöherkille materiaaleille, kuten elektroniikkakomponenteille. Suuritehoiset laserlaitteet puolestaan soveltuvat paremmin paksumpien epäpuhtauksien ja pinnoitteiden poistoon, sillä niillä on riittävästi tehoa tehokkaaseen materiaalin poistoon ablaation tai lämpöshokin avulla vaarantamatta kuitenkaan alustan eheyttä. Valinta näiden lasertyyppien välillä riippuu lopulta puhdistuksen vaatimuksista, kuten epäpuhtauden luonteesta ja alustan herkkyydestä. (Zhang et al., 2018)

3.2. Laserpuhdistuksen terveysvaikutukset, ergonomia ja turvallisuus

Laserpuhdistusteknologian käyttö teollisuudessa tarjoaa merkittäviä etuja työympäristön turvallisuuden ja terveellisyyden kannalta. Verrattuna perinteisiin puhdistusmenetelmiin, kuten hiekkapuhallukseen tai kemiallisiin liuoksiin, laserpuhdistus vähentää merkittävästi pölyn, kemikaalien ja muiden haitallisten aineiden muodostumista. Tämä parantaa sisäilman laatua ja vähentää työntekijöiden altistumista hengitysteitä ärsyttävälle tai myrkyllisille aineille (Herrera-Márquez et al., 2019). Laserpuhdistuksen päästöttömyys auttaa myös ympäristönsuojelutavoitteiden saavuttamisessa, sillä tällä menetelmällä ei synny suuria määriä jätettä tai epäpuhtauksia, mikä tukee yritysten ympäristötavoitteita ja auttaa noudattamaan tiukentuvia ympäristömääräyksiä (Flachbart et al., 2025).

Vaikka laserpuhdistus vähentää monia perinteisiin menetelmiin liittyviä riskejä, sen käyttöön liittyy myös omia terveys- ja turvallisuushaasteitaan. Lasersäde voi aiheuttaa vakavia vammoja, kuten palovammoja tai pysyviä silmävaurioita, mikäli laitteiden käyttöön ei sovelleta asianmukaisia turvatoimia (Chen, 2012; Vergès-Belmin et al., 2003). Tämän vuoksi laserpuhdistus edellyttää hyvin suunniteltuja suojaruosteita, kuten suojalaseja ja suljettuja työtiloja sekä työntekijöiden koulutusta laitteiden turvalliseen käyttöön. Asianmukaisista suojaruosteista huolehtiminen on hyvin oleellista työntekijöiden suojelemiseksi.

Ergonomiset näkökohdat ovat keskeinen osa laserpuhdistusteknologian käyttöönottoa teollisissa ympäristöissä. Koska työntekijät ovat usein suorassa vuorovaikutuksessa laserjärjestelmien kanssa, laitteiden ergonominen suunnittelu vaikuttaa suoraan työn sujuvuuteen, tehokkuuteen ja työhyvinvointiin (Z. Zhou et al., 2023). Hyvin suunnitellut laitteet, jotka tukevat käyttäjän luonnollisia liikkeitä ja asentoa, voivat merkittävästi vähentää fyysistä kuormitusta ja ehkäistä tuki- ja liikuntaelinsairauksia (Costantino et al., 2021; K. Zhou et al., 2022).

Laserpuhdistuslaitteiden ergonomiaan voidaan panostaa esimerkiksi säätömahdollisuuksilla, kevyillä käsiosilla ja helppokäyttöisillä ohjausjärjestelmillä. Kun laitteet mukautuvat käyttäjän pituuteen, työskentelyasentoon ja voimankäyttöön, voidaan vähentää tarpeettomia kuormittavia liikkeitä ja pitkään jatkuvaa staattista rasitusta. Tämä ei ainoastaan paranna työntekijöiden mukavuutta, vaan myös vähentää tapaturmien ja rasitusvammojen riskiä (Büchter, 2018; Lu et al., 2021).

Laserpuhdistuksen turvallisuuskysymykset ovat erityisen tärkeitä teollisissa ympäristöissä, kuten telakoilla, konepajoissa ja korjaamoilla. Laserpuhdistuslaitteiden käyttö vaatii erityisiä turvatoimia, sillä laservalo voi aiheuttaa vakavia vammoja, kuten silmä- ja ihovaurioita, ilman asianmukaista suojaa. Työntekijöiden on aina käytettävä hyväksyttyjä suojalaseja, jotka on suunniteltu estämään lasersäteiden pääsy silmiin (Ninos et al., 2024). Muita henkilökohtaisia suojaruosteita, kuten suojavaatteita ja käsineitä, saatetaan tarvita riippuen sovelluksesta ja lasersäteiden tehosta (Costantino et al., 2021).

Työpaikan turvallisuusohjeet ja menettelyt on suunniteltava huolellisesti. On tärkeää, että työalueet, joilla laserpuhdistusta tehdään, merkitään selkeästi varoituskyltein, ja ettei alueelle pääse luvattomia henkilöitä kesken työn. Työntekijöiden koulutus on elintärkeä osa turvallisuuden varmistamista, ja käyttäjien on ymmärrettävä sekä laitteen tekniset ominaisuudet että siihen liittyvät riskit ja turvallisuustoimet. Säännölliset koulutukset ja päivitykset auttavat pitämään turvallisuuskulttuurin ajan tasalla (Li et al., 2024). Lisäksi on huomioitava, että laserpuhdistuksessa syntyy joskus höyryjä tai kaasuja, kun pintamateriaalia höyrystyy. Näiden poistamiseen tarvitaan tehokas ilmanvaihto tai suodatusjärjestelmä, jotta haitalliset aineet eivät pääse leviämään hengitysilmaan (Li et al., 2024). Puhdistusteollisuuden kasvavien tarpeiden myötä ergonomian ja turvallisuuden huomioiminen tulee yhä tärkeämmäksi. Laserpuhdistusteknologian tehokkuuden parantamiseksi on olennaista kehittää työntekijöille kattava valikoima koulutusohjelmia, joissa keskitytään laserlaitteiden turvalliseen käyttöön (Gisario et al., 2022; K. Zhou et al., 2022). Ergonomiaan ja turvallisuuteen liittyvää koulutusta voidaan vahvistaa myös siten, että työntekijöiltä kerätään palautetta ja heitä osallistetaan prosessien kehittämiseen (Z. Zhou et al., 2023).

3.3. Laserpuhdistuksen ympäristötekijät ja jätteenkäsittely

Laserpuhdistus on nykyaikainen menetelmä, joka poistaa epäpuhtauksia, kuten pinnoitteita, ruostetta ja eliöiden aiheuttamaa likaantumista, lasersäteen avulla. Lasertyöstömaailmassa materiaalien työstöä voidaan tehdä kahdenlaisen lasersäteen avulla: jatkuva lasersäde tai pulssitettu lasersäde. Jatkuva lasersäde (CW) tarkoittaa, että laser tuottaa tasaista säteilyä ilman katkoja. Se sopii hyvin sovelluksiin, kuten hitsaukseen ja puhdistamiseen, joissa tarvitaan jatkuvaa energiaa pinnan käsittelyyn. Pulssitettu lasersäde taas tuottaa lyhyitä, voimakkaita valopulsseja tietyin aikavälein. Tämä mahdollistaa korkeampien energiapakettien käyttämisen lyhyessä ajassa, mikä on hyödyllistä esimerkiksi materiaalien leikkuussa tai tarkassa puhdistuksessa. Laserpuhdistuksessa kohdistetaan nimenomaan pulssitettu lasersäde puhdistettavaan pintaan, jolloin epäpuhtaus haihtuu kaasuksi tai muuttuu hienoksi pölyksi. Menetelmä eroaa perinteisistä tekniikoista, kuten hiekkapuhalluksesta, koska se ei vaadi hankaavia aineita eikä synnytä toissijaista jätettä, kuten hiekkaa, soraa tai lietettä. Tämä vähentää merkittävästi kiinteän jätteen määrää ja estää mikromuovien sekä raskasmetallien päätyminen ympäristöön, mikä on erityisen tärkeää meri- ja rannikkoalueilla. (Z. Zhou et al., 2023; Zhu et al., 2022)

Laserpuhdistus on täysin kuiva ja kemikaalivapaa prosessi. Koska se ei tarvitse liuottimia tai happoja, vaarallisen nestemäisen jätteen synty jää kokonaan pois. Tämä tekee menetelmästä houkuttelevan vaihtoehdon ympäristöherkille alueille, kuten satamiin ja telakoille, joissa ympäristöriskien hallinta on ensiarvoisen tärkeää. Lisäksi kemikaalien ja hankaavien aineiden puuttuminen parantaa työympäristön turvallisuutta ja vähentää altistumista haitallisille aineille. (Z. Zhou et al., 2023)

Melutason vähäisyys on toinen merkittävä etu. Laserpuhdistuksen melu pysyy suljetuissa tiloissa noin 65–75 desibelissä, mikä on huomattavasti vähemmän kuin hiekkapuhalluksen aiheuttama 100–115 desibelin melu. Tämä vähentää melusaastetta ympäristössä. Myös pölypäästöjä syntyy hyvin vähän, ja ne voidaan hallita tehokkaasti savunpoistolla tai HEPA-suodatuksella. Näin laserpuhdistus täyttää työpaikkojen ilmanlaatuvaatimukset ja tukee työterveyttä. (Chen et al., 2010; Zhang et al., 2018; Z. Zhou et al., 2023)

Vaikka laserpuhdistus kuluttaa sähköä, tyypillisesti 2–6 kW teollisuudessa ja noin 100 W laboratorioolosuhteissa, se korvaa monia energiaa ja resursseja kuluttavia vaiheita. Esimerkiksi hankaavien aineiden kuljetus ja saastuneen jätteen hävittäminen jäävät pois. Elinkaarensa aikana laserpuhdistuksen hiilijalanjälki jää usein pienemmäksi, koska materiaalin käyttö ja kuljetus vähenevät huomattavasti.

Laserpuhdistuksen hyödyt kytkeytyvät moniin YK:n kestävän kehityksen tavoitteisiin. Se tukee puhtaan ja edullisen energian tavoitetta (tavoite 7) vähäisen energiankulutuksen ansiosta ja edistää kestävä teollisuutta sekä innovaatioita (tavoite 9). Kaupunkiympäristöissä laserpuhdistus parantaa ilmanlaatua

(tavoite 11), pienempi hiilijalanjälki tukee ilmastotekoja (tavoite 13), ja merten suojelu hyöttyy siitä, että mikromuovien ja raskasmetallien pääsy vesistöihin vähenee (tavoite 14). (THE 17 GOALS | Sustainable Development, n.d.; Tian et al., 2020; Zhang et al., 2018)

Laserpuhdistuksessa syntyvien pölyjen ja hiukkasten hallinta on olennainen osa prosessin turvallisuutta ja ympäristöystävällisyyttä. Puhdistuksen aikana syntyy höyrystyneitä pinnoitteita ja metallihiukkasia, jotka kerätään integroiduilla savunpoistolaitteilla, ilmansuodattimilla tai koteloilla. Usein syntynyt pöly luokitellaan ei-vaaralliseksi, mutta jos mukana on esimerkiksi lyijypohjaisia maaleja tai eliöiden kasvua vähentäviä aineita, jäte saattaa vaatia vaarallisen jätteen käsittelyä. (Kim et al., 2021; Shamsujjoha et al., 2015)

23 (47)

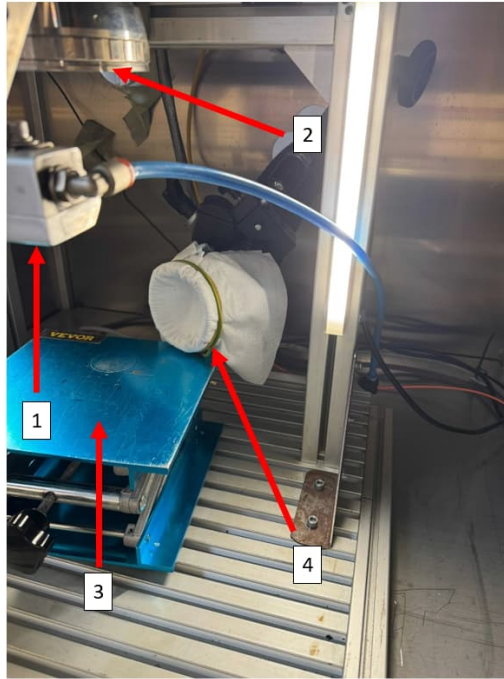
Laserpuhdistuksessa jätteen määrä on erittäin pieni – tavallisesti vain joitakin grammoja neliometriä kohden. Tämä vähäinen määrä helpottaa jätteen käsittelyä ja pienentää ympäristökuormitusta. Hyvin toimiva pölyn ja hiukkasten keräysjärjestelmä suojaa sekä työntekijöitä että ympäristöä ja auttaa noudattamaan tiukkoja ympäristö- ja työturvallisuusmääräyksiä. (Lei Zhenglong et al., 2018; Tian et al., 2020) Laitteiston huollossa syntyy myös jonkin verran jätettä, kuten käytettyjä suodattimia ja savunpoistolaitteiden keräysastioita. Näiden tyhjentäminen ja vaihtaminen on hallittua, ja syntyvä jäte toimitetaan tavallisesti teollisuusjätteen käsittelyyn. Asianmukainen huolto ja jätteiden käsittely varmistavat, että laserpuhdistuksen käyttö pysyy kestäväenä ja ympäristöystävällisenä pitkällä aikavälillä. (Kim et al., 2021)

Sääntelydokumentaatio on tärkeä osa laserpuhdistuksen jätteiden hallintaa. Erityisesti meriteollisuudessa jätteet, kuten pinnoitepöly ja eliöiden pinnanlikaantumisesta aiheutuva jäte, tulee kirjata ja dokumentoida esimerkiksi EU:n laivan kierrätysasetusten mukaisesti. Tämä varmistaa, että kaikki jätteet käsitellään asianmukaisesti, ja tukee ympäristönsuojelua. (Tang et al., 2015)

Laserpuhdistus sopii hyvin kiertotalouden periaatteisiin. Koska menetelmä tuottaa vain vähän jätettä, se vähentää sekä raaka-aineiden tarvetta että hävitettävän jätteen määrää. Samalla paranevat työolosuhteet, koska haitalliset päästöt ja melu vähenevät, ja yritykset säästävät hävittämiskustannuksissa. Huolellinen dokumentointi puolestaan varmistaa, että prosessi täyttää ympäristö- ja turvallisuusvaatimukset, mikä edistää kestävä kehityksen tavoitteita.

3.4. Laserpuhdistuksessa vapautuvan pölyn määrän mittaus

Laserpuhdistusprosessin aikana poistettu materiaali poistuu kappaleen pinnalta usein höyrystymällä tai kuoriutumalla. Muodostunut pöly voi olla terveydelle vaarallista, joten pölyn tehokas kerääminen on erityisen tärkeää. MALAMA kokeissa pölyn määrää pyrittiin mittaamaan prosessien aikana, jolloin pystytään arvioimaan tarvittavat turvatoimet, kuten pölyn imukeräys ja erilaiset suodattimet. Tutkimuksessa käytetty suodatin ja koejärjestys näkyy kuvassa 7.



Kuva 7. Suodatin imukeräyslaitteiston suulla, jolla kerättiin laserpuhdistuksesta aiheutuva pöly. Kuvassa näkyy huoneilmasuutin (1), joka estää lian ja kipinöiden osumisen lasersäteen linssiin (2). Puhdistettava näyte asetetaan nostettavalle työtasolle (3), jonka läheisyydessä on imukeräyslaitteisto ja suodatin (4).

Kuten kuvasta 7 nähdään, kokeissa käytettiin huoneilmasuutinta (1), joka estää lian ja kipinöiden osumisen lasersäteen linssiin (2). Puhdistettava näyte asetetaan nostettavalle työtasolle (3), jolloin lasersäde voidaan fokusoida näytteen pintaan. Imukeräyslaitteisto ja suodatin (4) kerää laserpuhdistuksen aikana irrotetun pölyn. Kokeet suoritettiin käyttämällä IPG 100 W nanosekunnin pulssilaseria, jonka keskimääräinen aallonpituus on 1064 nm. Laserpuhdistusprosessi suoritettiin 40 mm x 40 mm alueelle, ja kappaleet käsiteltiin neljä tai kahdeksan kertaa riippuen maalikerroksien paksuudesta. Käsitelty kappale ennen laserpuhdistusta ja puhdistuksen jälkeen ovat kuvassa 8.



Kuva 8. Maalattu metallilevy ennen (vas.) ja jälkeen (oik.) laserpuhdistuksen.

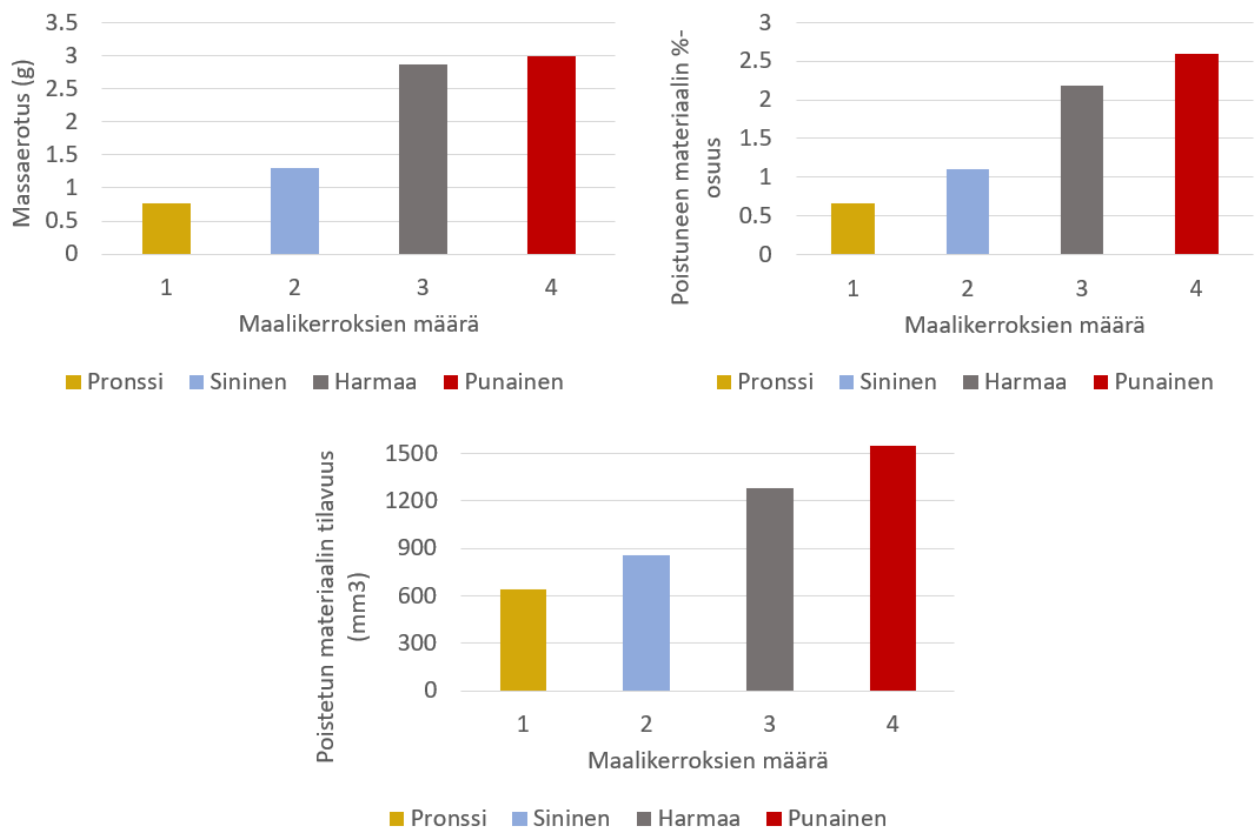
Laserlaitteiston parametrit olivat määritetty aiemmissa maalipuhdistuskokeissa. Pölyn määrän arviointi suoritettiin punnitsemalla kappaleet ennen ja jälkeen puhdistusprosessin, sekä mittaamalla käsitellyn alueen tilavuus. Näillä tiedoilla voitiin arvioida poistetun materiaalin määrä ja täten myös muodostuneen pölyn määrä. Mitatut massat, tilavuudet sekä laskennalliset prosenttiosuudet ovat esitettynä Taulukossa 1.

Taulukko 1. Puhdistettujen metallilevyjen poistetun materiaalin määrä.

Maali	Maalikerroksien lkm	Massa erotus (g)	Poistuneen materiaalin osuus %	Poistetun materiaalin tilavuus (mm ³)
Pronssi	1	0.776	0.663	664
Sininen	2	1.31	1.11	856
Harmaa	3	2.87	2.19	1280
Punainen	4	2.99	2.60	1550

25 (47)

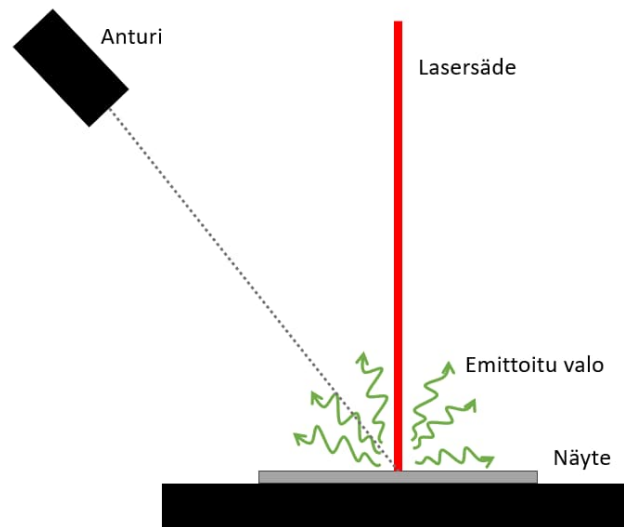
Taulukon 1 mukaan materiaalia on poistettu sitä enemmän, mitä enemmän maalikerroksia metallilevyn pinnalla on ollut. Punaista maalia on poistettu eniten, ja siinä on myös eniten maalikerroksia (4) ja pronssia vähiten (maalikerroksia 1). Taulukon tiedot ovat myös kuvattuna pylväsdiagrammeina, massaerotuksena, poistuneen materiaalin prosentuaalisena osuutena sekä tilavuutena kuvassa 9.



Kuva 9. Pylväsdiagrammit poistetun maalin aiheuttamasta massaerotuksesta (ylhäällä vasemmalla), poistuneen materiaalin %-osuus (ylhäällä oikealla) sekä poistuneen materiaalin tilavuus (alla) verrattuna maalikerrosten lukumääriin. Värit viittaavat eri maaliväreihin.

Kaikista kuvaajista (kuva 9) voidaan huomata, että poistetun materiaalin määrä kasvaa lineaarisessa suhteessa maalikerroksien määrään. Kuten aiemmin mainittiin, punaista nelikerroksista maalia poistettiin massalta eniten, pronssista yksikerroksista maalia vähiten. Sama toistuu myös poistuneen materiaalin prosentuaalisessa osuudessa sekä tilavuudessa.

Laserpuhdistusprosessia seurattiin reaaliaikaisesti spektrometrin avulla, jolla pyrittiin tarkastelemaan aineiden ablaatiota jo prosessin aikana selvittämällä, mitä alkuaineita irtoaa pölyn mukana. Näin voidaan välttää perusaineen vaurioituminen laserpuhdistusprosessin aikana ja puhdistus etenee hallitusti. Spektrometrin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Spektrometrin toimintaperiaate laserpuhdistuksessa.

Kuten kuvasta 10 käy ilmi, lasersäteen vuorovaikuttaessa näytteen kanssa emittoituu valoa. Anturi tunnistaa emittoituneen valon ja muodostaa siitä spektrogrammin. Spektrogrammin spektrin avulla voidaan emittoituneesta valosta tunnistaa alkuaineita, sillä jokaisella alkuaineella on tyypillinen aallonpituus, jota se emittoi. Spektrogrammin avulla voitiin tunnistaa puhdistuksen aikana tärkeimmiksi alkuaineiksi alumiini, mangaani, sinkki, happi, hiili, typpi, rauta ja kromi, jotka vuorovaikuttivat lasersäteiden kanssa.

Näiden tulosten avulla voidaan syventää ymmärrystä laserpuhdistusprosessista, erityisesti lasersäteiden ja pinnoitteiden välistä vuorovaikutusta. Kokeissa pyrittiin myös arvioimaan käytetyn energian määrää. Kokeet suoritettiin edellä mainitulla IPG 100 W nanosekuntipulssilasilalla, jonka keskitehoksi asetettiin 25 W ja pulssin taajuudeksi 100 kHz. Lasersäteiden tehoitiheys määritettiin laskennallisesti $8,85 \text{ J/cm}^2\text{:ksi}$, ja kokonaisenergiaksi saatiin 8135 J. Näiden tietojen avulla voitiin arvioida, että keskimääräinen energian kulutus prosessin aikana oli noin 0,238 W. Tämä energian kulutus on huomattavasti pienempi kuin puhdistusprosessiin valittu nimellisteho (25 W), mikä tukee pulssilaserlaitteen valintaa tehokkaaksi laserpuhdistuksessa.

3.5. SWOT-analyysin tulokset: Laserpuhdistus

Tämä laserpuhdistuksen SWOT-analyysi on laadittu Turun yliopiston konetekniikan DMS-tutkimusryhmän pitkäaikaiseen lasertekniikan osaamiseen perustuen sekä laajan kirjallisuuskatsauksen pohjalta. Analyysi yhdistää käytännön kokemuksen ja ajankohtaisen tutkimustiedon, mikä mahdollistaa menetelmän monipuolisen arvioinnin. SWOT-analyysissä tarkasteltiin menetelmän vahvuuksia, heikkouksia, mahdollisuuksia ja uhkia erityisesti seuraavien näkökulmien kautta aina, kun se oli mahdollista: menetelmän käytettävyyttä, kustannuksia ja edullisuutta, tehokkuutta, laadunhallintaa, ympäristötekijöitä, henkilöstön osaamista, terveysvaikutuksia ja ergonomiaa, turvallisuustekijöitä sekä sääntelyyn, standardeihin ja asiakasvaatimuksiin liittyviä asioita. Lisäksi analyysissä huomioitiin innovaatiot, digitalisaation mahdollisuudet ja uudet toimintatavat. Tämä kokonaisvaltainen lähestymistapa auttaa tunnistamaan laserpuhdistuksen roolia ja potentiaalia erityisesti teollisissa sovelluksissa. Taulukossa 2 on esitetty laserpuhdistuksen SWOT-tili.

Taulukko 2. Laserpuhdistuksen SWOT.

SWOT-ANALYYSI: LASERPUHDISTUS	
VAHVUUDET	HEIKKOUEDET
Ympäristöystävällisyys (ei kemikaaleja, vähän jätettä, vähentää ympäristökuormitusta)	Korkeat alkuinvestoinnit (laitteet, jäähdytys, optiikka)
Tehokkuus (nopea ja tarkka ilman alustan vaurioita)	Korkeat huolto- ja ylläpitokustannukset (optiset osat, kalibrointi)
Laadunhallinta (tasalaatuiset ja toistettavat tulokset, hallittava prosessi)	Hidas suurilla pinnoilla (aikaa vievä verrattuna perinteisiin menetelmiin)
Automaatio ja digitalisaatio (integrointi automaatioon ja reaaliaikaiseen seurantaan)	Riippuvuus osaamisesta (tarvitsee koulutettua henkilökuntaa ja tarkkaa säätöä)
Turvallisuus (vähentää altistumista haitallisille aineille ja pölylle)	Ei standardeja (erikoissovelluksilta puuttuu yhtenäiset käytännöt)
Soveltuvuus vaikeille ja herkille pinnoille (esim. lämpöherkät, vaikeapääsyiset alueet)	Turvallisuushaasteet (tiukat suojausvaatimukset, silmä- ja palovammariski)
	Pinnankohittaiset rajoitteet (heijastavat tai epätasaiset pinnat heikentävät laatua)
MAHDOLLISUUDET	UHAT
Kustannussäästöt pitkällä aikavälillä (vähemmän kemikaali- ja jätteenkäsittelykuluja)	Korkeat alkuinvestoinnit (taloudellinen este käyttöönotolle)
Yhdistettävyyys muihin menetelmiin (esim. laserpinnankuviointi, kiillotus)	Hidas suurten pintojen käsittely (esim. laivanrungot)
Robottiikan integrointi (nopeampi, tarkempi, vähemmän työvoimaa)	Monimutkainen kalibrointi (aikaa ja osaamista vaativa)
Kannettavat ja modulaariset laitteet (joustava käyttö eri kohteissa)	Säätely- ja sertifiointiepävarmuus (hidastaa käyttöönottoa)
Kehittyneet laserteknologiat (esim. femtosekunnin laserit, tarkempi puhdistus)	Teknologian nopea vanhentuminen (investointien riski)
Reaaliaikainen prosessinseuranta (dynaaminen parametrien säätö)	Toimittajaloukku (suljetut järjestelmät rajoittavat päivityksiä)
Parempi laadunvarmistus (digitaalinen dokumentointi, esim. ennen-jälkeen-kuvat)	Kilpailun lisääntyminen (uudet teknologiat haastavat aseman)
Standardoitujen protokollien kehittäminen (yhtenäiset käytännöt ja laatuvaatimukset)	
Monitoimijärjestelmien kehittäminen (esim. maalin tarttuvuus, antibakteerisuus)	
Ympäristöystävällisyys ja kiertotalous (vähentää päästöjä, materiaalihukkaa)	

Laserpuhdistuksen vahvuudet

Laserpuhdistus on moderni pintojen puhdistusmenetelmä, joka tarjoaa monia etuja perinteisiin menetelmiin verrattuna. Yksi sen merkittävimmistä vahvuuksista on käytettävyys: menetelmä on monipuolinen ja soveltuu hyvin erilaisiin kohteisiin, myös vaikeapääsyisille alueille ja herkille pinnoille. Laserpuhdistus voidaan

automatisoida ja ohjelmoida, mikä lisää sen sovellettavuutta teollisuudessa ja parantaa työn tehokkuutta. (Costantino et al., 2021) Laserpuhdistuksen keskeisimmät vahvuudet on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Laserpuhdistuksen keskeisimmät vahvuudet.

Keskeinen vahvuus	Selitys
Ympäristöystävällisyys	Ei kemikaaleja, vähän jätettä, vähentää ympäristökuormitusta
Tehokkuus	Nopea ja tarkka puhdistus ilman alustan vaurioita
Laadunhallinta	Tasalaatuiset ja toistettavat tulokset, paremmin hallittava prosessi
Automaatio ja digitalisaatio	Voidaan integroida automaatioon ja reaaliaikaiseen seurantaan
Turvallisuus	Vähentää altistumista haitallisille aineille ja pölylle
Soveltuvuus mm. lämpöherkille pinnoille	Sopii vaikeapääsyisille ja esim. lämpöherkille alueille

Kustannusten osalta laserpuhdistus voi vaatia korkeampia alkuinvestointeja laitteistoon, mutta pitkällä aikavälillä se voi olla taloudellisesti kannattavampi. Koska menetelmä ei tarvitse kemikaaleja, hankaavia aineita tai laajaa jätteenkäsittelyä, säästetään käyttökustannuksissa ja materiaalihankinnoissa. Lisäksi laserpuhdistus vähentää seisokkiaikoja ja huoltokustannuksia. (Z. Zhou et al., 2023)

Tehokkuus on yksi laserpuhdistuksen keskeisistä vahvuuksista. Menetelmä poistaa epäpuhtauksia nopeasti ja tarkasti ilman, että se vahingoittaa puhdistettavaa alustaa. Laserpuhdistuksen parametreja, kuten käytettävää tehoa ja pulssin kestoa, voidaan säätää kohteen ja epäpuhtauden mukaan, mikä mahdollistaa hyvin kohdennetun ja materiaaliakohtaisen puhdistuksen. (Maharjan et al., 2017) Laadunhallinta hyötyy laserpuhdistuksesta, koska menetelmä tarjoaa tasalaatuisen ja toistettavan lopputuloksen. Kun prosessi on tarkasti säädettävissä ja automatisoitavissa, voidaan varmistaa, että laatu pysyy tasaisena koko tuotantoprosessin ajan. Tämä on erityisen tärkeää aloilla, joilla vaaditaan korkeaa puhtautta ja tarkkuutta, kuten ilmailu- ja autoteollisuudessa. (AlShaer et al., 2014)

Laserpuhdistuksen ympäristöystävällisyys on merkittävä etu. Ympäristötekijöiden näkökulmasta menetelmä vähentää kemiallisten puhdistusaineiden käyttöä ja tuottaa vain vähän jätettä. Koska laserpuhdistus ei käytä lisäaineita eikä synnytä haitallisia päästöjä, sen ympäristöjalanjälki on huomattavasti pienempi kuin monilla perinteisillä menetelmillä. (Marimuthu et al., 2019)

Myös henkilöstön osaaminen on keskeinen osa laserpuhdistuksen onnistunutta käyttöä. Vaikka teknologia vaatii perehtyneisyyttä ja koulutusta, kehittyneet käyttöliittymät ja automaatioteknologiat tekevät laitteiden käytöstä yhä intuitiivisempaa ja helpommin omaksuttavaa. Tämä alentaa osaamiskynnystä ja mahdollistaa tehokkaan työn tekemisen. Terveysvaikutusten ja ergonomisten tekijöiden osalta laserpuhdistus tarjoaa turvallisemman vaihtoehdon, koska työntekijät eivät altistu haitallisille kemikaaleille tai pölylle.

Laserpuhdistuksen vahvuuksiin kuuluu myös innovaatioiden, digitalisaation ja uusien toimintatapojen tukeminen. Menetelmä soveltuu hyvin osaksi automatisoituja tuotantolinjoja ja robotiikkaa, ja puhdistustuloksia voidaan seurata ja analysoida digitaalisesti reaaliaikaisesti. Tämä mahdollistaa jatkuvan prosessikehityksen ja lisää tuotannon tehokkuutta ja laatua. (Li et al., 2024; Rodríguez et al., 2021)

Laserpuhdistuksen heikkoudet

Laserpuhdistus vaatii koulutettua henkilökuntaa järjestelmien tehokkaaseen käyttöön ja kalibrointiin. Tämä voi tuoda haasteita erityisesti suurten pintojen, kuten kokonaisen aluksen runkojen, puhdistuksessa. Tällöin robottien tai automatisoitujen alustojen yhdistäminen laserpuhdistukseen voi olla tarpeen tulosten optimoimiseksi. (Chen, 2012) Lisäksi laserpuhdistuksen suorituskky on rajoitettu monikerroksisilla pinnoitteilla ja syvissä korroosiohinnoilla, missä mekaaniset menetelmät korostavat voimakkaampaa puhdistuskkyään. Myös pinnan heijastavuus tai epätasaiset pinnoitteet voivat häiritä puhdistusprosessin tasalaatuisuutta, mikä heikentää lopputulosta. Tällaiset rajoitukset on otettava huomioon laserpuhdistuksen soveltamisessa teollisissa ympäristöissä ja erityishankkeissa. (Kim et al., 2021; Yang et al., 2025) Laserpuhdistuksen keskeisimmät heikkoudet on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Laserpuhdistuksen keskeisimmät heikkoudet.

Keskeinen heikkous	Selitys
Korkeat alkuinvestoinnit	Laitteistot, jäähdytysyksiköt ja optiikka vaativat suuria hankintakustannuksia
Korkeat huolto- ja ylläpitokulut	Optisten osien vaihto, kalibrointi ja huolto nostavat kustannuksia
Hidas suurilla pinnoilla	Suurten alueiden tai paksujen pinnoitteiden puhdistus vie enemmän aikaa kuin perinteiset menetelmät
Riippuvuus osaamisesta	Prosessin tehokkuus vaatii koulutettua henkilökuntaa ja tarkkaa parametrien säätöä
Ei standardeja	Monilta erikoissovelluksilta puuttuvat yhtenäiset laatu- ja sertifiointistandardit
Turvallisuushaasteet	Vaatii tiukat suojaustoimet silmävammojen ja palovammojen ehkäisyyn
Pinnan ominaisuuksiin liittyvät rajoitteet	Heijastavat tai epätasaiset pinnat voivat heikentää puhdistuksen tasalaatuisuutta

Laserjärjestelmien, jäähdytysyksiköiden, suojakoteloiden ja säteenohjausoptiikan korkeat alkuinvestoinnit voivat muodostaa merkittävän taloudellisen kynnyksen yrityksille. (Novikov & Strite, 2024) Näiden järjestelmien hankintahinta ei ole ainoa kustannustekijä, sillä myös huolto- ja varaosakulut voivat kasvaa suuriksi, erityisesti jos lasereiden päät tai optiset komponentit vaativat säännöllistä vaihtoa tai kalibrointia. (Pan et al., 2023)

Laserpuhdistuksen tehokkuuden haasteet korostuvat erityisesti suurten pintojen, paksujen pinnoitteiden ja monikerroksisten maalien poistossa, koska prosessi on hitaampi ja vaatii usein useita käsittelykertoja verrattuna perinteisiin menetelmiin kuten hiekkapuhallukseen. Optimaalinen lopputulos edellyttää materiaalikohtaista säätöä (käytetty lasertehto, pulssienergia, nopeus), mikä lisää valmistelu-aikaa ja vaatii asiantuntemusta. Lisäksi kosteus ja pintakontaminaatiot voivat heikentää lasersäteen absorboitumista, mikä vähentää puhdistustehokkuutta. (Chen et al., 2010)

Laserpuhdistuksen heikkouksia ovat muun muassa se, että tulokset ovat erittäin riippuvaisia operaattorin osaamisesta ja oikeiden parametrien säätämisestä. Monille erityissovelluksille ei ole yleisesti hyväksyttyjä standardeja, mikä voi tehdä laadunvalvonnasta ja sertifiointista vaikeampaa. (Song & Lin, 2024)

Vaikka laserpuhdistus on ympäristöystävällinen vaihtoehto, erityisesti jätteen minimoinnin osalta, se vaatii kuitenkin sähköenergiaa, minkä käyttö voi olla ristiriidassa YK:n kestävän energian tavoitteiden kanssa, jos käytettävä energianlähde ei ole uusiutuva. Tämän vuoksi energia- ja ympäristönäkökulmat ovat keskeisiä laserpuhdistuksen tarkastelussa. Puhdistuksen aikana, erityisesti pinnoitteiden poistossa, syntyy huuruja ja hiukkasia, jolloin riittävä kohdepoisto on tarpeen. (Pan et al., 2023)

Laserpuhdistuksessa on useita haasteita, kuten lasersäteiden aiheuttamat vaarat silmille, mikä vaatii tiukkoja henkilökohtaisia suojaimia ja suojaseinien asentamista työaseman ympärille. Tämä on erityisen tärkeää turvallisuuden takaamiseksi. Erityisesti nämä haasteet liittyvät luokan 4 laserlaitteiden käyttöön, joita käytetään useimmissa teollisissa puhdistuslaitteissa. (Cieciński, 2024) Tämä luokka aiheuttaa vakavan riskin mm. silmille, jos turvallisuusprotokollia ei noudateta. Säteiden tarkka hallinta ja työkohteen suojaus ovat välttämättömiä, mikä lisää järjestelmän monimutkaisuutta. Käsikäyttöisissä puhdistuslaserlaitteissa pitkät työskentelyajat voivat johtaa operaattorin väsymiseen ja heikentää tehokkuutta, ellei laitteiden ergonomia ole huolellisesti suunniteltu. (Kim et al., 2021)

Laserpuhdistuksen mahdollisuudet

Laserpuhdistus tarjoaa useita mahdollisuuksia pitkäaikaisten kustannussäästöjen saavuttamiseen verrattuna perinteisiin puhdistusmenetelmiin, kuten hiekkapuhallukseen. Esimerkiksi säästöjä syntyy hiekan ja kemikaalien vähentyneen tarpeen sekä jätteiden määrän vähentymisen myötä. Tämä voi johtaa merkittäviin toimintakustannusten alentumisiin. (Song & Lin, 2024) Lisäksi laserpuhdistus voidaan yhdistää muihin pintakäsittelytekniikoihin, kuten laserpinnankuviointiin tai kiillotukseen. Tällöin teknologian arvo ja monipuolisuus kasvavat, tehden siitä houkuttelevan vaihtoehdon useilla teollisuudenaloilla. (Shivakoti et al., 2021; Z. Zhou et al., 2023) Laserpuhdistuksen keskeisimmät mahdollisuudet on esitetty taulukossa 5.

Laserpuhdistuksen integroiminen robottijärjestelmiin voi merkittävästi nopeuttaa puhdistusprosessia ja vähentää manuaalisen työvoiman tarvetta. Robotiikan avulla voidaan saavuttaa tarkka ja tehokas puhdistus, joka minimoi inhimilliset virheet. Lisäksi modulaaristen, kannettavien laserjärjestelmien suunnittelu mahdollistaa joustavamman käytön eri sovelluksissa. Kehittyneet tarkkuuslaserlaitteet, kuten femtosekunnin laserit, tarjoavat erinomaisia mahdollisuuksia liian poistoon erilaisilta pinnoilta, mikä parantaa puhdistustuloksia. Reaaliaikainen puhdistusprosessin seuranta, kuten lämpötilan mittauksen avulla, voi auttaa optimoimaan puhdistusparametreja dynaamisesti eri likaantumis- tai pinnoitekohteiden mukaan, mikä lisää prosessin tehokkuutta ja tarkkuutta. (Li et al., 2024)

Laserpuhdistus mahdollistaa digitaalisten seurantatyökalujen, kuten laserlaitteen parametrien tallennuksen ja puhdistettujen pintojen ennen–jälkeen-kuvauksen, integroimisen osaksi laadunvarmistusta. Tämä parantaa jäljitettävyyttä ja dokumentaatiota tuotantoprosessissa. Laserpuhdistuksen avulla voidaan myös luoda standardoituja pintakäsittelyprotokollia, mikä tukee yhtenäisten laatukäytäntöjen vakiinnuttamista eri toimialoilla. Lisäksi teknologia mahdollistaa monitoimijärjestelmien kehittämisen, joissa puhdistuksen ohella voidaan muokata pinnan ominaisuuksia esimerkiksi parantamalla maalin tarttuvuutta tai lisäämällä antimikrobisia piirteitä. Laserpuhdistus tarjoaa parempaa toistettavuutta ja vähäisempää vaihtelua verrattuna manuaalisiin hiekkapuhalluksiin, mikä tukee pitkäjänteistä laadunhallintaa ja tuotannon ennustettavuutta. (Herrera-Márquez et al., 2019)

Taulukko 5. Laserpuhdistuksen keskeisimmät mahdollisuudet.

Keskeinen mahdollisuus	Selitys
Kustannussäästöt pitkällä aikavälillä	Säästöjä syntyy kemikaalien, hiekan ja jätteenkäsittelyn vähentyessä
Yhdistettävyyys muihin menetelmiin	Voidaan yhdistää laserpinnankuviointiin, kiillotukseen ja muihin pintakäsittelyihin
Robottiikan integrointi	Robottien avulla nopeampi, tarkempi ja vähemmän työvoimaa vaativa puhdistus
Kannettavat ja modulaariset laitteet	Mahdollistavat joustavan käytön eri kohteissa ja ympäristöissä
Kehittyneet laserteknologiat	Esim. femtosekunnin laserit tarjoavat paremman puhdistustarkkuuden
Reaaliaikainen prosessinseuranta	Mahdollistaa parametrejen dynaamisen säädön puhdistustilanteen mukaan
Parempi laadunvarmistus	Parametrit ja tulokset voidaan dokumentoida digitaalisesti, esim. ennen–jälkeen-kuvat
Standardoitujen protokollien kehittäminen	Tukee yhtenäisten laatu- ja tuotantokäytäntöjen luomista
Monitoimijärjestelmien kehittäminen	Puhdistuksen ohella voidaan muokata pinnan ominaisuuksia (esim. maalin tarttuvuus, antibakteerisuus)
Ympäristöystävällisyys	Ei kemikaaleja tai hiekkapuhallusmateriaaleja → vähentää päästöjä ja jätettä
Tukee kiertotaloutta	Vähentää materiaalihukkaa ja kertakäyttöisten puhdistusmateriaalien tarvetta
Markkinamahdollisuudet	Kasvava kysyntä merenkulussa, puolustuksessa ja muilla teollisuudenaloilla
Integrointi teollisuus 4.0 - ekosysteemiin	Sopii digitaalisiin kaksosiin, ennakoivaan kunnossapitoon ja pilvipohjaisiin järjestelmiin
Tekoälyavusteinen mukautuva puhdistus	Mahdollisuus kehittää järjestelmiä, jotka säätävät parametreja automaattisesti

Laserpuhdistus tarjoaa ympäristön kannalta kestävän vaihtoehdon perinteisille puhdistusmenetelmille, erityisesti kiristyvien ympäristömääräysten ja päästörajoitusten aikakaudella. Menetelmä ei vaadi kemikaaleja tai hiekkapuhallusmateriaaleja, mikä vähentää merkittävästi jätettä ja haitallisia päästöjä. Globaali pyrkimys hiilineutraaliuteen ja ympäristöystävälliseen laivanhuoltoon lisää kysyntää saasteettomille ratkaisuille, kuten laserpuhdistukselle. (Fang et al., 2025) Teknologia tukee kiertotaloutta vähentämällä materiaalihukkaa ja tarvetta kertakäyttöisille puhdistusmateriaaleille. Lisäksi laserpuhdistus eliminoi toissijaiset epäpuhtaudet, kuten mikromuovit ja pölyn. (K. Zhou et al., 2022)

Laserpuhdistuksen kasvava suosio mm. merenkulku- ja puolustussektorilla avaa mahdollisuuksia vaikuttaa uusiin sääntöihin ja standardeihin, kuten IMO:n (International Maritime Organization) ympäristöystävällisiin huoltoteknologioihin liittyen. (Luo et al., 2024) Laserpuhdistus täyttää tiukempia sääntelyvaatimuksia, mikä tekee siitä houkuttelevan vaihtoehdon kestävän kehityksen ja vaatimustenmukaisuuden näkökulmasta. Asiakkaiden kasvava kysyntä puhtaampia, vähäriskisempiä huoltomenetelmiä kohtaan tukee teknologian käyttöönottoa, erityisesti yrityksissä, jotka ovat sitoutuneet ympäristötavoitteisiinsa. (*The Surface Properties of an Aviation Aluminum Alloy after Laser Cleaning*, n.d.)

Laserpuhdistus voidaan yhdistää digitaalisiin kaksosiin, ennakoivaan kunnossapitoon ja pilvipohjaisiin kunnonvalvontajärjestelmiin. Se sopii erinomaisesti teollisuuden 4.0 ekosysteemiin, edistäen automaatiota, datalähtöisiä puhdistuspäätöksiä ja etäohjausta. (Ye et al., 2020) Tähän liittyy mahdollisuus kehittää tekoälyavusteista, mukautuvaa puhdistusta, joka säättää laserparametreja likaantumisen tai materiaalin tyypin mukaan.

Laserpuhdistukseen liittyvät uhat

Laserpuhdistuksen käyttöönotto vaatii merkittävän alkuinvestoinnin, joka kattaa mm. laserjärjestelmän, jäähdytys- ja turvalaitteiden kustannukset. Tämä voi olla erityisen haastavaa pienille ja keskisuurille telakoille. Pienet ja keskisuuret telakat kohtaavat usein haasteita laserpuhdistuksen käyttöönotossa, erityisesti suurten alkuinvestointien vuoksi. Tällöin pintakäsittelypalvelun ostaminen ulkopuolisilta toimittajilta tarjoaa ratkaisun. Ostamalla palvelun telakat voivat hyödyntää laserpuhdistuksen etuja ilman merkittäviä pääomakustannuksia, sillä he eivät tarvitse investoida kalliisiin laitteisiin tai ylläpitokustannuksiin. Tämä mahdollistaa resurssien keskittymisen ydintoimintoihin, kuten tuotantoon ja projektinhallintaan, samalla kun saadaan korkealaatuisia pintakäsittelypalveluja asiantuntevilta tarjoajilta. Lisäksi ulkopuoliset palveluntarjoajat voivat tarjota joustavaa kapasiteettia, mikä auttaa telakoita sopeutumaan vaihtelevaan kysyntään ja projekteihin. Tämä malli ei ainoastaan vähennä taloudellista raskautta, vaan myös mahdollistaa pääsyn uusimpiin teknologioihin ja asiantuntemukseen, mikä edistää kilpailukykyä markkinoilla. Laserpuhdistukseen liittyvät keskeisimmät uhat on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Laserpuhdistuksen keskeisimmät uhat.

Keskeisimmät uhat	Selitys
Korkea alkuinvestointi	Laserjärjestelmän, jäähdytyksen ja turvalaitteiden korkeat hankintakustannukset
Hidas suurten pintojen käsittely	Laserpuhdistus koetaan hitaaksi laajoilla alueilla, kuten laivanrungoissa
Monimutkainen kalibrointi	Laitteiden säätäminen ja optimointi vaativat osaamista ja aikaa
Säätely- ja sertifiointipävarmuus	Standardien ja hyväksyntäprosessien puute hidastaa käyttöönottoa erityisesti merenkulussa
Teknologian nopea vanhentuminen	Järjestelmien nopea kehitys voi tehdä aiemmista investoinneista nopeasti vanhentuneita
Toimittajaloukku	Suljetut järjestelmät voivat rajoittaa päivitettävyyttä ja mukautettavuutta
Kilpailun lisääntyminen	Uudet teknologiat voivat heikentää laserpuhdistuksen kilpailuasemaa

Investoinnin hitaampi takaisinmaksu verrattuna perinteisiin menetelmiin, kuten hiekkapuhallukseen, voi hidastaa teknologian leviämistä. Lisäksi erikoistuneen koulutuksen, laitteiston huollon ja varaosien korkeat kustannukset voivat lisätä käyttöön liittyviä kuluja.

Laserpuhdistusta saatetaan pitää liian hitaana suurten pinta-alojen käsittelyyn, mikä voi herättää vastustusta aloilla, joilla nopeus on tarkkuutta tärkeämpää. Monimutkainen kalibrointi ja laitteiden mahdolliset viat voivat lisätä seisokkien riskiä erityisesti vaativissa olosuhteissa, kuten satamissa tai telakoilla. Osaavan henkilöstön puute voi viivästyttää teknologian käyttöönottoa ja heikentää menetelmän tehokkuutta käytännön työympäristöissä. (Lei Zhenglong et al., 2018)

Korkea sähkönkulutus, erityisesti suuritehoisissa laserlaitteissa, voi lisätä hiilijalanjälkeä, jos sähkö ei ole uusiutuvaa. Lisäksi laserpuhdistuksessa syntyvät höyryt ja kaasut, kuten pinnoitteiden tai biologisen kasvuston höyrystyessä vapautuvat yhdisteet, voivat vaatia erillisiä suodatusjärjestelmiä estämään päästöjä ympäristöön. (Flachbart et al., 2025; Murthy Peri et al., 2011)

Laserpuhdistuksen käyttö mm. laivanrakennuksessa voi hidastua standardoitujen säädösten ja sertifiointiprotokollien puuttuessa. Luokituslaitokset ja merenkulun viranomaiset saattavat epäröidä hyväksyä laserilla puhdistettuja pintoja, kunnes pitkäaikaisia kenttätutkimuksia on saatavilla. Lisäksi on riski, että kansainväliset merenkulun säädökset eivät päivitty riittävän nopeasti tunnistamaan laserpuhdistusta, mikä voi aiheuttaa epäselvyyksiä vaatimustenmukaisuudessa ja hidastaa teknologian laajempaa käyttöönottoa. (Chen, 2012)

33 (47)

Nopeasti kehittyvä teknologia voi tehdä varhaisista laserpuhdistusjärjestelmistä nopeasti vanhentuneita, mikä saattaa vähentää investointihalukkuutta. On olemassa riski toimittajaloukkuun joutumisesta, jos laserjärjestelmät ovat suljettuja ja vaikeasti päivitettäviä tai mukautettavia erilaisiin operatiivisiin tarpeisiin. Lisäksi kilpailijat voivat kehittää vaihtoehtoisia edistyneitä puhdistusteknologioita, mikä voi pitkällä aikavälillä heikentää laserpuhdistuksen kilpailuasemaa markkinoilla. (Omkumar & Saravanan, 2024)

4. Hiekka- ja raepuhallusmenetelmien ja laserpuhdistustekniikan SWOT-tulosten vertailu

34 (47)

Hankkeessa analysoitiin kahden pintojen puhdistusmenetelmän eli hiekka- ja raepuhalluksen ja laserpuhdistuksen soveltuvuutta teollisiin käyttökohteisiin. Molempia teknologioita analysoitiin SWOT- eli nelikenttäanalyysin avulla. Niissä tehdyistä yrityshaastatteluista ja kirjallisuudesta saadut tekijät jaoteltiin vahvuuksiin, heikkouksiin, mahdollisuuksiin ja uhkiin. Molempien teknologioiden osalta tarkasteltiin menetelmän käyttökelpoisuutta, kustannuksia, tehokkuutta, laadunhallintaa, ympäristötekijöitä, henkilöstöltä vaadittavaa osaamista, terveysvaikutuksia ja ergonomisia tekijöitä, turvallisuustekijöitä, sääntelyä, standardeja ja asiakasvaatimuksia sekä innovaatio- digitalisaatio- ja uusien toimintatapojen mahdollisuuksia aina tilanteeseen soveltuvien osin. Kaikki teemat eivät olleet relevantteja kaikille haastatetuille yrityksille eikä kaikissa yrityksissä seurattu tarkkaan esimerkiksi menetelmien käytöstä aiheutuvia kustannuksia tai jätemääriä ja niiden käsittelyyn liittyviä kuluja. Tässä osiossa vertaillaan näiden kahden teknologian ominaisuuksia toisiinsa saatujen SWOT-analyysitulosten pohjalta. Luvuissa 2 ja 3 avataan molempien teknologioiden analyysituloksia yksityiskohtaisesti.

Käyttökelpoisuus

Hiekka- ja raepuhalluksen suurena vahvuutena analyysin mukaan on, että se on pitkään laivanrakennusteollisuudessa käytössä ollut menetelmä, jonka käyttöominaisuudet tunnetaan ja niihin luotetaan. Se on tällä hetkellä kaikkein soveltuvien ja tehokkain menetelmä laivanrakennuksen isojen pintojen käsittelyyn. Menetelmä nähtiin vahvana eikä lasertekniikan uskota pystyvän syrjäyttämään sitä laivanrakennuksessa ainakaan isoilla pinnoilla, vaikkakin muita mahdollisuuksia lasertekniikan käytölle meriteollisuudessa nähtiin. Merkittävä luottamusta käyttöön herättävä tekijä on lisäksi se, että hiekka- ja raepuhdistustulokselle on asetettu selkeät standardit. Menetelmän hankaluutena on, ettei se sovellu hyvin esimerkiksi pölylle arkojen kohteiden käsittelyyn eikä kokonsa puolesta ole kätevä ahtaisiin paikkoihin. Menetelmä on myös sääherkkä ja käytöstä lähtevä melu vaikuttaa käyttöpaikkoihin. Uhkana nähtiin, että hiekka- ja raepuhallus voi olla hiipuva toimiala, sillä asiakkaat saattavat ostaa palvelunsa ympäristöystävällisempää menetelmää käyttävältä yritykseltä.

Laserpuhdistus ei nykyisellään ole vaihtoehto laivanrakennusteollisuuden isojen pintojen käsittelyyn, mutta sen käyttöön liittyvänä vahvuutena on menetelmän monipuolisuus ja soveltuvuus hyvinkin erilaisiin kohteisiin. Ketterämpänä laitteistona lasertekniikka mahdollistaa käytön vaikeapääsyisillä alueilla ja herkillä pinnoilla. Laserpuhdistus ei muokkaa puhdistettavaa materiaalia eikä tuota pölyä. Laserpuhdistus on mahdollista integroida robottijärjestelmiin ja näin nopeuttaa puhdistusprosessia ja vähentää manuaalisen työn tarvetta. Robotiikan avulla voidaan puhdistaa tarkasti ja tehokkaasti ja näin minimoida inhimilliset virheet.

Kustannukset

Hiekka- ja raepuhallus koetaan edullisena ja kustannustehokkaana menetelmänä, mitä tukee suhteellisen alhainen aloitusinvestointi. Kustannusten kannalta hiekka- ja raepuhalluksen etuna on laitteiden yksinkertaisuus ja pitkäikäisyys. Analyysin mukaan myös käyttökustannukset ovat suhteellisen alhaiset, samoin huolto- ja korjauskustannukset, tosin tilanteet vaihtelevat hieman: laitteet voivat myös vaatia enemmän huoltoa riippuen käyttöasteesta ja kompressorien huollot voivat olla kalliita. Edullisuutta lisää kuitenkin se, ettei hiekka- ja raepuhallukseen tarvita kovinkaan koulutettuja työntekijöitä toisin kuin laserpuhdistukseen. Kustannuksiin vaikuttavana uhkana nousi esiin alati nousevat kuljetus- ja energiakulut. Lisäkustannuksia pelättiin syntyvän myös siitä, että kaupunkiympäristössä toimimisesta saattaa aiheutuvien päästöjen vuoksi tulla vahingonkorvausvaateita.

Laserjärjestelmien ja niihin tarvittavan muun laitteiston alkuinvestoinnit ovat selkeästi kalliimpia perinteisiin menetelmiin verrattuna. Laserlaitteistojen huolto- ja varaosakulut voivat niin ikään kasvaa suuriksi, erityisesti jos lasereiden päät tai optiset komponentit pitää vaihtaa ja kalibroida. Laserpuhdistuksen kustannuksia lisää myös koulutetun/koulutettavan henkilöstön tarve varmistamaan järjestelmien tehokas käyttö ja kalibrointi. Myös korkea sähkönkulutus etenkin suuritehoisissa laserlaitteissa saattaa suurentaa hiilijalanjälkeä. Kustannuksissa ei ole kuitenkaan aina kyse pelkistä hankinta- tai käyttökuluista. Mikäli yritys investoi uuteen teknologiaan, pitää sillä olla etukäteen varmuus siitä, että asiakas hyväksyy sillä tehtävän pintakäsittelyn tuloksen tai esimerkiksi investoinnin kalleudesta johtuvan lisäkustannuksen. Laserpuhdistus tarjoaa kuitenkin useita mahdollisuuksia pitkäaikaisten kustannussäästöjen saavuttamiseen verrattuna perinteisiin puhdistusmenetelmiin. Tällöin säästöjä syntyy, kun hiekan ja kemikaalien käyttö sekä jätteen määrä vähenee. Samoin käytettävän teknologian arvo ja monipuolisuus lisääntyvät, mikä voi houkutella lisäkäyttöä useilla teollisuudenaloilla.

Tehokkuus

Yleisesti ottaen haastatteluissa nähtiin hiekka- ja raepuhdistuksen olevan laivanrakennuksessa menetelmänä nopea ja tehokas eikä sitä näin ollen ole helppo syrjäyttää. Tehokkuuteen ei vaikuta edes käytetyn puhaltimen tyyppi; tulos on hyvä käytti sitten raetta, hiekkaa tai kuonaa. Haastatteluiden mukaan voisi tehokkuutta vielä lisätä esimerkiksi sovittamalla tehtävät työt ja prosessien eteneminen paremmin yhteen. Pientä uhkaa menetelmän käytölle nähtiin tulevaisuudessa: markkinoille saattaa tulla parempia puhdistusmenetelmiä tai asiakkaat voivat siirtyä käyttämään ympäristöystävällisempiä palveluja.

Laserpuhdistuksen osalta juuri tehokkuuden haasteet korostuvat teollisuudenalan suurten pintojen käsittelyssä. Laajojen pintojen, paksujen pinnoitteiden ja monikerroksisten maalien poisto on hitaampaa ja vaatii usein monia käsittelykertoja verrattuna perinteisiin menetelmiin kuten hiekka- ja raepuhallukseen. Jos tehokkuutta tarkastellaan eri näkökulmasta ja yleisesti laserpuhdistuksen ominaisuuksia pienempien kohteiden puhdistuksessa, on itse asiassa tehokkuus yksi tämän menetelmän keskeinen vahvuus. Laserlaitteen avulla voidaan poistaa epäpuhtauksia nopeasti ja tarkasti puhdistettavan materiaalin siitä muuttumatta. Uhkana laserpuhdistukselle nähtiin mm., että sitä saatetaan pitää liian hitaana suurten laivanrakennusteollisuuden pintojen käsittelyyn.

Laadunhallinta

Hiekka- ja raepuhallus näyttäytyvät analyysin valossa laadullisesti hyvinä laivanrakennusteollisuuden pintojen puhdistusmenetelminä. On peräti kohteita, joihin ei edes saa oikeanlaista pintaa ilman hiekka- tai raepuhalluskäsittelyä. Laadunhallintaa tukevat olemassa olevat standardit karheudelle/puhdistustulokselle. Laserpuhdistus puolestaan on menetelmä, jonka avulla saadaan erityisen tasalaatuista ja myös toistettavaa tulosta. Digitaalisuutensa ansiosta laserpuhdistusprosessi on tarkasti säädettävissä ja automatisoitavissa, jolloin laatu pysyy tasaisena koko tuotantoprosessin ajan.

Tehdyissä yrityshaastatteluissa tuli käsittelyn laatu usein esiin, sillä perinteisten puhdistusmenetelmien käyttäjät suhtautuivat tietyllä skeptisyydellä laserpuhdistuksen esikäsittelylle pinnalle jättämää karheutta kohtaan. Huoli on toisaalta aiheellinen, sillä laserpuhdistuskäsittelylle ei ole vielä asetettu karheusstandardeja samoin kuin hiekka- ja raepuhalluksella puhdistetulle pinnalle on. Erityisesti laivanrakennuksessa on pinnan esikäsittelyn jättämä karheus merkittävä asia jatkotoimenpiteiden onnistumisen kannalta, kuten maalaamisen ja etenkin maalin tarttumisen varmistamisen. Laadun ohella vaikuttavat luonnollisesti siis myös mahdolliset lisäkustannukset. Tosin hankkeen testien lähtökohtana on ollut, ettei alkuperäistä käsiteltävää pintaa/pintamateriaalia muuteta millään tavoin lasertyöstön aikana,

vaan pinta puhdistetaan esim. vanhasta maalista, liasta tai ruosteesta. Lasertyöstön arvo on mm. siinä, että tekniikalla saadaan hyvää puhdistusjälkeä alkuperäistä materiaalia muokkaamatta.

Ympäristötekijät

Hiekka- ja raepuhallus osoittautuivat odotetusti enemmänkin ympäristöä rasittaviksi menetelmiksi kuin ympäristöystävällisiksi. Haastateltavista melkein jokainen kuitenkin mainitsi menetelmästä jotakin ympäristön kannalta myönteistä, kuten sen, että hiekka on puhaltamalla puhdistuksen jälkeen kierrätettävää. Tosiasia kuitenkin on, että hyvistä suojauksista huolimatta menetelmä rasittaa ympäristöä, sillä puhallettaessa saattaa levitä pölyä ympäristöön. Samoin prosessista syntyy melua. Mikäli puhdistettava pinta sisältää esim. haitallisia aineita sisältävää maalia, syntyy jätettä, joka vaatii oman käsittelynsä. Analyysin mukaan menetelmän ympäristövaikutuksia voitaisiin vähentää esimerkiksi kompressorien pienemmällä polttoaineen kulutuksella. Nykyään on saatavilla myös laitteistoja, jotka mahdollistavat metallirakeen uudelleen käytön.

36 (47)

Laserpuhdistustekniikka on ympäristöystävällisempi menetelmä hiekka- ja raepuhallusmenetelmiin verrattuna. Prosessissa ei käytännössä synny jätettä, sillä puhdistettava aines haihtuu pois. Menetelmä ei myöskään tarvitse kemikaaleja, hankaavia aineita eikä erityistä jätteenkäsittelyä, mikä tekee siitä kestävämmällä pohjalla olevan puhdistusmenetelmän. Teknologia myös tukee kiertotaloutta vähentämällä materiaalihukkaa ja tarvetta kertakäyttöisille puhdistusmateriaaleille. Ympäristötekijöihin liittyvänä uhkana tuli esiin suuritehoisten laserlaitteiden suuri sähkönkulutus, mikä saattaa lisätä hiilijalanjälkeä, ellei käytetty sähkö ole tuotettu uusiutuvilla tuotantotavoilla.

Henkilöstöltä vaadittava osaaminen

Tarkasteltaessa eri teknologioiden henkilöstöltä vaatimaa osaamista, osoittautui hiekka- ja raepuhallus tässä suhteessa helppokäyttöisemmäksi, sillä ne eivät vaadi käyttäjiltä erityistä osaamista tai koulutusta.

Laserpuhdistus toisaalta vaatii koulutettua henkilökuntaa järjestelmien tehokkaaseen käyttöön ja kalibrointiin, turvallisuusvaatimuksia unohtamatta. Lasertekniikan riskinä on edelleen se, ettei luotettavaa ja oikeanlaista koulutusta laserpuhdistuslaitteen käyttöön ole välttämättä saatavilla, esimerkiksi jos työntekijät tulevat ulkomailta. Lisäksi osaavan henkilöstön puute voi viivästyttää teknologian käyttöönottoa ja heikentää menetelmän tehokkuutta käytännön työympäristöissä.

Terveysvaikutukset ja ergonomiset tekijät

Hiekka- ja raepuhallukseen liittyy oleellisesti terveysvaikutuksia ja ergonomiatekijöitä. Puhalluksessa käytettävä laitteisto on usein raskasta ja menetelmän heikkouksiin kuuluukin laitteiston käytön aiheuttama rasitus ja väsymys, toisinaan hankalat työasennot sekä horjahtamis- ja liukastumisvaara. Laitteissa käytettävä suuri ilmanpaine voi horjuttaa työntekijää tai aiheuttaa jopa hengenvaaran, mikäli jokin osa irtaoo, ja raskaiden laitteiden raahaaminen saattaa johtaa liukastumiseen. Markkinoilla toki on saatavilla joitakin kevyempiäkin laitteita. Muita esiin tulleita terveyteen liittyviä heikkouksia oli mm. melu- ja pölyhaitta sekä henkilökohtaisen suojauksen tarve (mm. silmä- ja kuulosuojaimet, kypärä).

Laserpuhdistustekniikalla oli selkeitä etuja terveyttä ja ergonomiaa tarkasteltaessa. Kun laitetta käyttää oikein ja työntekijä ja ympäristö ovat asianmukaisesti suojattuja lasersäteiltä, ei työntekijälle tai lähellä oleville muille ihmisille koidu haittoja puhdistuksen aikana. Laserpuhdistuksessa eivät työntekijät myöskään

altistu haitallisille kemikaaleille tai pölylle. Ergonomian osalta lasertekniikan etuna on muun muassa erilaisten säätömahdollisuuksien ja ohjausjärjestelmien hyödyntäminen.

Turvallisuustekijät

Hiekka- ja raepuhallusmenetelmiin liittyviä vaaroja ja turvallisuusriskejä mainittiin yrityshaastatteluissa. Kuten edellä terveysvaikutuksia käsiteltäessä tuotiin esiin, mahdollisena nähtiin, että esimerkiksi paine voi horjuttaa työntekijää, puhaltamisessa on liukastumisvaara ja isoja kappaleita nosteltaessa myös venähdysvaara. Laitteen käytöstä voi myös saada osumia esimerkiksi käteen.

37 (47)

Laserpuhdistuksessa turvallisuustekijät ovat vielä merkittävämmässä osassa ja mahdolliset siitä aiheutuvat vammat osin korjaamattomia. Lasersäde aiheuttaa osuessaan palovammoja ja erityistä vaaraa silmille, jopa sokeuttaen. Vaarassa eivät ole pelkästään laserpuhdistuksen suorittaja vaan myös lähiympäristön ihmiset. Tämän vuoksi lasertekniikka käytettäessä pitää turvallisuuskäytänteet ja suojaukset olla ehdottomasti oikeanlaiset, kuten henkilökohtaiset suojaimet ja suojaseinien asentaminen työaseman ympärille.

Säätely, standardit ja asiakasvaatimukset

Standardien olemassaolo koettiin hiekka- ja raepuhallusmenetelmän käytössä etuna. Haastateltavat mainitsivat sääntelyn osalta, että joitakin lupia vaaditaan koskien esimerkiksi pölyhaittaa ja hiekan pakkaamista. Myös rakeen puhtautta valvotaan. Tuotiinpa esiin lisäksi, että asiakkailtakin tulee vaatimuksia erityisesti laatuun liittyen. Osa yrityksistä odotti asiakkaiden vaatiman vastuullisuuden merkityksen kasvua. Mahdollisuutena mainittiin, että kiristyvät säännökset voivat jopa tuoda yritykselle taloudellista etua, kun joudutaan pohtimaan säästöjä ja kenties korjaamaan nykykäytäntöjä. Toisaalta kiristyvät säännökset esimerkiksi maa-aineksen ottoon liittyen voivat vaikuttaa menetelmän käyttömahdollisuuksiin.

Laserpuhdistus on suhteellisen uusi teknologia teollisessa käytössä, joten sen sääntely vaihtelee eri maissa ja alueilla. Tämä tarkoittaa, että monissa maissa laserpuhdistuksen käyttöä ei ole vielä tarkasti säännelty, erityisesti verrattuna perinteisempiin puhdistusmenetelmiin, kuten kemialliseen puhdistukseen tai hiekkaelätykseen.

Kuitenkin turvallisuus- ja ympäristövaatimuksia, kuten työturvallisuusstandardeja (esimerkiksi OSHA eli Occupational Safety and Health Administration Yhdysvalloissa) ja ympäristönsuojeluun liittyviä lakeja, saatetaan soveltaa laserpuhdistusprosesseihin. Tämä tarkoittaa, että vaikka laserpuhdistustekniikkaa itsessään ei välttämättä säädellä tiukasti, siihen liittyvää käyttöä ja toimintaa saatetaan valvoa muiden sääntöjen ja standardien kautta.

Suomessa laserpuhdistuksen sääntely ei ole vielä yhtä tiukkaa kuin monilla perinteisillä teollisilla puhdistusmenetelmillä, kuten kemiallisella puhdistuksella tai hiekkaelätyksellä. Kuitenkin laserpuhdistukseen liittyy erilaisia turvallisuus- ja ympäristövaatimuksia, jotka on otettava huomioon. Työturvallisuuslaki, jonka noudattamista valvoo Työsuojeluhallinto, asettaa vaatimuksia työntekijöiden turvallisuudelle ja terveydelle työpaikalla, ja tätä lainsäädäntöä sovelletaan myös laserpuhdistuksen käyttöönottoon.

Lisäksi laserpuhdistuslaitteiden käyttöön liittyvät vaatimukset, kuten laitteiden turvallisuudelle ja sähköturvallisuudelle asetetut normit, ovat tärkeitä huomioitavia asioita. Ympäristönsuojeluun liittyvät säännökset, kuten ympäristölainsäädäntö, voivat myös vaikuttaa laserpuhdistuksen käytön sääntelyyn, vaikka se itse asiassa ei olisi eksplisiittisesti säännelty.

Tulevaisuudessa, kun laserpuhdistusteknologian käyttö yleistyy ja kehittyy, on mahdollista, että sen sääntely tiukentuu ja että alan erityisiä ohjeita ja standardeja kehitetään Suomessa. Tässä yhteydessä on tärkeää pysyä ajan tasalla nykyisistä ja mahdollisista tulevista sääntelyvaatimuksista.

Laserpuhdistusta ei siis vielä niinkään säännellä, mutta sen mahdollisuudeksi kuitenkin nähtiin, että laserpuhdistus ja -tekniikka yleensä kykenee täyttämään tiukempiakin sääntelyvaatimuksia, mikä todennäköisesti edistäisi tekniikan käyttöä tulevaisuudessa. Samoin asiakkaiden lisääntyvät vaatimukset puhtaampiin vaihtoehtoihin voi tulevaisuudessa lisätä teknologian käyttöönottoa. Toisaalta standardoitujen säädösten ja sertifiointiprotokollien puuttuminen nähtiin osin uhkana laivanrakennuksessa, sillä se voi hidastaa teknologian käyttöönottoa.

Innovaatiot, digitalisaatio ja uusien toimintatapojen mahdollisuus

Hiekka- ja raepuhallusmenetelmien mahdollisuus uusien sovellusten ja toimintatapojen käyttöönottoon on analyysin mukaan suppeampi kuin laserpuhdistustekniikalla. Analyysistä kävi kuitenkin ilmi, että haastateltavat näkevät digitalisaation mahdollisuuksia osin hiekka- ja raepuhalluksessa, mutta erityisesti yleisesti yritysten prosesseissa, osa hyödyntääkin jo digitalisaatiota prosesseissaan. Varsin moni näki tehostamismahdollisuuksia digitalisaation kautta, kuten erilaisten seurantajärjestelmien hyödyntämistä, prosessin osittaista digitalisointia, huollon optimointia digitalisoinnin kautta tai hiekkapuhallusrobotiikan lisääntyntä käyttöä tulevaisuudessa. Samoin uusia toimintamalleja ja ansaintalogiikkaa tuotiin esiin, kuten syntyvän metallijätteen kierrätysmahdollisuutta ja siitä saatavaa tulovirtaa.

Laserpuhdistuksen vahvuudet tulevat hyvin esiin nimenomaan sen soveltuvuudessa innovaatioiden, digitalisaation ja uusien toimintatapojen toteuttamisessa. Menetelmää voidaan hyödyntää hyvin osana automatisoituja tuotantolinjoja ja robotiikkaa. Lisäksi puhdistustuloksia voidaan seurata ja analysoida reaaliaikaisesti digitaalisesti. Tekniikka voidaan myös yhdistää digitaalisiin kaksosiin tai ennakoivaan kunnossapitoon. Sen avulla voidaan edistää automaatiota, datalähtöisiä puhdistuspäätöksiä ja etäohjausta.

5. Puhdistusmenetelmien määrälliset ja laadulliset mittarit

Projektissa ja eritoten työpaketissa 2 tehdyn työn pohjalta on tunnistettu määrällisiä ja laadullisia mittareita. Mittarit kuvaavat hiekka- ja raepuhallusmenetelmän sekä laserpuhdistustekniikan eri näkökulmia, haittoja ja etuja ottaen huomioon esimerkiksi menetelmien resurssien käytön, työturvallisuusnäkökulmat ja vaikutukset ympäristöön. Nämä erilaiset näkökulmat ja arvioinnit näkyvät myös monelta osin tämän raportin kirjallisuuskatsauksessa ja SWOT-analyyseissä.

Hankkeen työpaketissa 5 “Kustannusanalyysi eri teknologioista/niiden käyttöönotosta sekä analyysi uusien teknologioiden optimaalisesta integraatiosta tiedonsiirron näkökulmasta” on arvioitu näiden puhdistusmenetelmien kvantifioitavissa olevia ominaispiirteitä ns. nettovaikutusmenetelmän avulla. Analyysi on Upright Projectin kehittämä matemaattinen malli, jolla voidaan mitata kustannusten eli negatiivisten vaikutusten ja hyötyjen eli myönteisten vaikutusten “summaa” neljässä ulottuvuudessa: ympäristö, terveys, yhteiskunta ja tieto. (*Illustrative Example in a Simplified Economy | Upright Knowledge Base, 2024; Model - The Upright Project, n.d.*)

Nettovaikutusmenetelmä on alun perin suunnattu yritysten kestävyys- ja vaikutusten arvioimiseen, mutta sitä sovellettiin nyt menetelmien arvioimiseen. MALAMAssa tehtyjen SWOT-analyysien pohjalta nettovaikutusta arvioitiin jo edellä SWOT-analyysien vertailussa tutuksi tulleiden kahdeksan eri muuttujan kannalta:

- 1) ympäristövaikutus (esim. pölypäästö, jätteen määrä),
- 2) taloudellinen vaikutus (esim. alkuinvestointi, käyttökustannukset),
- 3) yhteiskunnallinen/sosiaalinen vaikutus (esim. käyttäjäriskit),
- 4) tehokkuus (esim. puhdistettu alue suhteessa aikaan),
- 5) laadunhallinta (esim. saavutettu pinnan karheus, pinnalle jääneet partikkelit),
- 6) turvallisuus (esim. riskiluokka, ilmassa leijuvien hiukkasten määrä),
- 7) sääntely (esim. standardien noudattaminen nyt ja tulevaisuudessa) sekä
- 8) innovaatio ja digitalisaatio (esim. digitaalisuus vs. manuaalinen, yhteensopivuus eri järjestelmien kanssa).

Nettovaikutusmenetelmän soveltaminen ja eri tekijöiden määrällinen arvottaminen selitetään yksityiskohtaisesti hankkeen työpaketti 5:stä tehdyssä raportissa (Aro & Kamboj, 2025), mutta esimerkiksi yllä lueteltujen mittareiden avulla on yritysten mahdollista vertailla perinteisten eli hiekka- ja raepuhallusmenetelmien sekä laserpuhdistusmenetelmän määrällisiä vaikutuksia keskenään. Työpaketissa 5 tehdyssä raportissa esitellään myös kustannuslaskelmapohja, joka on kehitetty helpottamaan yritysten investointilaskelmia uutta teknologiaa harkitessaan.

Hankkeen analyyseissä määriteltiin myös joukko muitakin mittareita tukemaan yritysten päätöksentekoa uuden teknologian käyttöönottoon liittyen. Mittareina voidaan käyttää molempien puhdistusmenetelmien osalta esimerkiksi seuraavia:

- 1) käytetyn energian määrä,
- 2) sitoutunut pääoma,
- 3) miten suhteutuu yrityksen/yhteiskunnan vastuullisuusvaatimuksiin sekä
- 4) mahdollisuus isojen kappaleiden työstöön.

MALAMA-hankkeessa on mittariston avulla tuotu esiin esimerkinomaisesti sellaisia tekijöitä, joiden avulla yritysten on mahdollista vertailla eri puhdistusmenetelmien hyötyjä ja niiden asettamia haasteita toiminnalleen. Hankkeen toteutuksen aikana ovat haastatellut yritysedustajat ja myös eri tilaisuuksien keskusteluihin osallistuneet henkilöt pohtineet organisaatioidensa prosessien kehittämismahdollisuuksia, kuten juuri uuteen teknologiaan siirtymistä. Tavoitteena on ollut, että esitetyistä mittareista olisi tukea varsinkin pk-yritysten pohdinnoissa ja päätöksenteossa perinteisten ja uuden teknologian välillä.

6. Johtopäätökset

Teollisuuden pintojen puhdistusprosesseissa hyödynnetään erilaisia menetelmiä, ja yksi perinteisimmistä menetelmistä on hiekka- ja raepuhallus. Lasersädetekniikkaa on puolestaan hyödynnetty pitkään eri sovelluskohteissa teollisuudessa, kuten hitsauksessa, leikkauksessa ja merkkauksessa, mutta puhdistusprosesseissa lasersädetekniikan hyödyntäminen on ollut vähäisempää. MALAMA-hankkeen työpaketissa 2 “Nykytila-analyysit raepuhallusteknologialle ja laserteknologialle”, selvitettiin molempien menetelmien nykytilaa ja mahdollisuuksia teollisuuden prosesseissa nyt ja tulevaisuudessa.

40 (47)

Hiekka- ja raepuhallusmenetelmien ja laserpuhdistusteknologian nykytila-analyysin tulokset osoittavat, että kaikille tekniikoille on kysyntää meriteollisuusyrityksissä. Puhdistusta vaativia sovelluskohteita on erilaisia ja kunkin kohteen kohdalla pitää miettiä, mikä menetelmä sopii parhaiten tilanteeseen. Hiekka- ja raepuhallusmenetelmät soveltuvat edelleen nopeuden ja tehokkuuden puolesta muun muassa isojen kappaleiden puhdistamiseen (esimerkiksi telakoilla laivanrungot) eikä laserpuhdistustekniikka käytännössä kilpaile tällä saralla vielä, vaan laserpuhdistustekniikalle on omat käyttökohteensa. Laserpuhdistus on puolestaan nopeampi ja tehokkaampi menetelmä esimerkiksi tarkkoihin puhdistustöihin, kuten moottorien puhdistamiseen tai muihin herkkiin kohteisiin, joihin ei saa päätyä pölyä.

Hiekka- ja raepuhallusmenetelmien vahvuutena on niiden luotettavuus puhtausasteen osalta, sillä standardi on saatavilla hiekka- ja raepuhallusmenetelmille. Hankkeen aikana selvisi, että erityisesti laivanrakennuksessa pinnan esikäsittelyn jättämä karheus on äärimmäisen tärkeä asia jatkotoimenpiteiden onnistumiseksi, kuten maalaamisen ja etenkin maalin tarttumisen varmistamisen kannalta. Laserpuhdistuskäsittelylle ei ole vielä asetettu karheusstandardeja samoin kuin hiekka- ja raepuhalluksella puhdistetulle pinnalle, minkä vuoksi osa haastatelluista yrityksistä toivoi vastaavaa standardia laserpuhdistukselle. Standardin puuttuminen koettiin osassa yrityksissä lasermenetelmän heikkoutena tällä hetkellä.

Kirjallisuuskatsaus ja hankkeen aikana saadut yritystulokset viittaavat siihen, että laserlaitteiston alkuinvestointi on vielä kalliimpi kuin hiekka- ja raepuhalluksessa, mutta investointi voi olla pidemmällä aikavälillä varteenotettava. Kustannussäästöjä syntyy esimerkiksi kemikaalien, hiekan ja jätteenkäsittelyn vähentyessä. On myös odotettavissa, että laitteiston hinnat laskevat lähitulevaisuudessa. Hiekka- ja raepuhallusmenetelmiin verrattuna laserpuhdistus vähentää huomattavasti haitallisia ympäristövaikutuksia kuten pölyn muodostumista, kemikaalien käyttöä sekä jätteiden syntyä puhdistusprosessin aikana. Laserpuhdistustekniikka on siten ympäristöystävällisempi menetelmä verrattuna hiekka- ja raepuhallusmenetelmiin. Ympäristövaikutusten lisäksi laserpuhdistustekniikan hyöty liittyy laitteen käyttäjään heijastuviin terveysvaikutuksiin ja ergonomiaan. Esimerkiksi pölyhaittoja ei aiheudu tekijälle samalla tavalla kuin hiekka- ja raepuhalluksessa. Mikäli laitetta käyttää oikein ja työntekijä ja ympäristö ovat asianmukaisesti suojattuja säteiltä, puhdistajalle ei aiheudu haittoja puhdistuksen aikana. Lasertekniikassa turvallisuustekijät ovatkin merkittävässä osassa, eikä turvallisuutta voi laiminlyödä, joskin on huomioitava, että myös hiekka-/raepuhallusmenetelmien osalta pitää huomioida mahdolliset vaaratilanteet, kuten liukastumisvaarat, laitteen käytöstä aiheutuvat osumat sekä ahtaissa tiloissa työskentelyn vaarat.

MALAMA-hankkeen kirjallisuuteen, yrityshaastatteluihin sekä laboratorio- ja telakkahallissa tehtyihin testeihin perustuvien eri puhdistusmenetelmien vertailujen avulla saatiin runsaasti lisätietoa perinteisten puhdistusmenetelmien ja uudempaan teknologiaan perustuvan lasertekniikan ominaisuuksista ja nykytilasta. Erityisesti laivanrakennusteollisuudessa toimivien yritysten näkemykset olivat arvokkaita ja auttoivat luotaamaan tulevaisuuden tarpeisiin. Vaikka lasertekniikka ei vielä olekaan käypä keino laivanrakennuksen suurten pintojen esikäsittelyyn, oli haastateltujen yritysedustajien suhtautuminen siihen avointa ja he näkivät tekniikalla mahdollisuuksia tulevaisuudessa. Tosin nykyinen suhteellisen kallis alkuinvestointi laserlaitteistoon askarrutti puhdistustoimijoita, etenkin kun yrityksillä ei ole vielä tiedossa asiakkaitensa suhtautuminen uuden teknologian käyttöön yleisesti, sen tekemään puhdistusjälkeen ja kenties hieman

kalliimpaan hintaan. Yritykset haluavat myös seurata vielä mm. ympäristöön liittyvän sääntelyn kehittymistä. Yksi iso kokonaisuus, joka vielä vaatii selvitys- ja koulutustyötä, on laserlaitteiston käyttöön liittyvät turvallisuusvaatimukset sekä luotettavan ja oikeellisen tiedon saaminen yrityksille. Turvallisen käytön varmistamiseen kaivataan selkeää ohjeistusta.

Lähteet

Kappale 2: Hiekka- ja raepuhallusmenetelmien nykytila-analyysi

Kappale 5: Puhdistusmenetelmien määrälliset ja laadulliset mittarit

- Aro, E. & Kamboj, N. (2025). Laserteknologian investoinnin arviointi - Laserpuhdistus meriteollisuudessa ja lasermerkkaus pakkausteollisuudessa. MALAMA-hankkeen raportti, Turun yliopisto.
- Kura, B., Kambham, K., Sangameswaran, S & Potana, S. (2006). Atmospheric particulate emissions from dry abrasive blasting using coal slag. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56:8, 1205-1215, DOI: 10.1080/10473289.2006.10464533.
- Lermen, R. T., Prauchner, M. B., Silva, R. d. A., & Bonsembiante, F. T. (2020). Using wastes from the process of blasting with steel shot to make a radiation shield in mortar. *Sustainability*, 12, 6674. <https://doi.org/10.3390/su12166674>
- OSHA (2014). Protecting Workers from the Hazards of Abrasive Blasting Materials. OSHA Fact Sheet. 09/2014. Occupational Safety and Health Administration. <https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/OSHA3697.pdf>, Luettu 20.3.2025.
- Porter, M. E. (1991). *Kilpailuetu, Miten ylivoimainen osaaminen luodaan ja säilytetään*. (3. painos) (Maarit Tillman, suom.). Alkuperäinen teos: Competitive Advantage – Creating and Sustaining Superior Performance. Weilin+Göös.
- Qi, C., Weinell, C. E., Dam-Johansen, K. & Wu, H. (2021). A review of blasting waste generation and management in the ship repair industry. *Journal of Environmental Management*. Volume 300, 15 December 2021, 113714.
- Shuler, W., Theo, J., & McGinness, M. (2014). *Safety considerations for abrasive blasting operations*. 31(5), 23–27. https://www.researchgate.net/publication/287937129_Safety_considerations_for_abrasive_blasting_operations, luettu 30.4.2025.
- Työturvallisuuskeskus (2019) KAMAT Tietokortti kemiallisesta altistumisesta metalli- ja autoalojen työtehtävissä. 15.10.2019. <https://ttk.fi/wp-content/uploads/2022/04/Rae-ja-hiekkapuhallus.pdf>, luettu 7.2.2025.
- United Nations (2015) *Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015, Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. (A/RES/70/1). https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf, luettu 20.3.2025.
- Valmistajat.fi (2025). *Rae- ja hiekkapuhallus*. <https://valmistajat.fi/menetelmat/pintakasittely/rae-ja-hiekkapuhallus>, luettu 7.2.2025.

- AlShaer, A. W., Li, L., & Mistry, A. (2014). The effects of short pulse laser surface cleaning on porosity formation and reduction in laser welding of aluminium alloy for automotive component manufacture. *Optics & Laser Technology*, 64, 162–171. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2014.05.010>
- Büchter, E. (2018). “Cleaning with Light”: Laser beam surface treatment opens up a wide range of industrial applications thanks to state-of-the-art laser technology. *Laser Technik Journal*, 15(2), 36–39. <https://doi.org/10.1002/latj.201800010>
- Chen, G. X. (2012). High-Power Fibre Laser Cleaning for Green Shipbuilding. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 7(3), 249–253. <https://doi.org/10.2961/jlmn.2012.03.0003>
- Chen, G. X., Kwee, T. J., Tan, K. P., Choo, Y. S., & Hong, M. H. (2010). Laser cleaning of steel for paint removal. *Applied Physics A*, 101(2), 249–253. <https://doi.org/10.1007/s00339-010-5811-0>
- Cieciński, B. (2024). Hazard analysis and risk assessment on laser cleaning workstations. *Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie / Politechnika Śląska*, z. 191. <https://doi.org/10.29119/1641-3466.2024.191.6>
- Costantino, F., Falegnami, A., Fedele, L., Bernabei, M., Stabile, S., & Bentivenga, R. (2021). New and Emerging Hazards for Health and Safety within Digitalized Manufacturing Systems. *Sustainability*, 13(19), 10948. <https://doi.org/10.3390/su131910948>
- Fang, G., Pan, Y., Wu, D., & Zhao, W. (2025). Research progress of laser cleaning technology for industrial fields in the past decade. *Optik*, 331, 172354. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2025.172354>
- Flachbart, N., Onufrák, R., Žoldák, G., & Ragan, P. (2025). *Laser Cleaning Technologies in Industry: Mechanisms, Applications, and Future Directions for Sustainable Surface Treatment*. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2025-jv5b5>
- Gisario, A., Barletta, M., & Veniali, F. (2022). Laser polishing: A review of a constantly growing technology in the surface finishing of components made by additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(3–4), 1433–1472. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08840-x>
- Herrera-Márquez, O., Vicaria, J. M., & Jurado-Alameda, E. (2019). Experimental Design for Optimizing the Cleaning of Starch Adhering to Stainless-Steel Surfaces Using Nonionic Surfactants and Silica Microparticles. *Journal of Surfactants and Detergents*, 22(3), 559–569. <https://doi.org/10.1002/jsde.12251>
- Illustrative example in a simplified economy | Upright Knowledge Base*. (2024, June 19). <https://docs.uprightplatform.com/methodology/net-impact/illustrative-example-in-a-simplified-economy>
- Kim, J.-E., Song, M.-K., Lee, J.-M., Hyun, J.-H., Lee, G.-H., & Kim, J.-D. (2021). Experimental Investigations into Improvement of Cleaning Performance for Anticorrosive Paints for Shipbuilding using Handheld-Type Laser Cleaning Equipment. *Journal of Welding and Joining*, 39(5), 536–541. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2021.39.5.10>
- Lei Zhenglong, 雷正龙, Tian Ze, 田泽, & Chen Yanbin, 陈彦宾. (2018). Laser Cleaning Technology in Industrial Fields. *Laser & Optoelectronics Progress*, 55(3), 030005. <https://doi.org/10.3788/LOP55.030005>
- Li, Z., Wang, S., Zheng, W., Wang, Y., & Pan, Y. (2024). A review of dynamic monitoring technology and application research of laser cleaning interface. *Measurement*, 238, 115311. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115311>

- Lu, Y., Ding, Y., Wang, M., Yang, L., & Wang, Y. (2021). A characterization of laser cleaning painting layer from steel surface based on thermodynamic model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116(5–6), 1989–2002. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07566-6>
- Luo, L., Liu, L., Li, C., Ling, K., Fan, X., & Zhang, J. (2024). Application of laser rust removal technology in the field of ships. In J. Zhou & I. B. Aris (Eds.), *Ninth International Conference on Energy Materials and Electrical Engineering (ICEMEE 2023)* (p. 186). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.3015449>
- Maharjan, N., Zhou, W., Zhou, Y., & Guan, Y. (2017). Femtosecond laser cleaning for aerospace manufacturing and remanufacturing. *2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/CLEOPR.2017.8119087>
- Marimuthu, S., Sezer, H. K., & Kamara, A. M. (2019). Applications of Laser Cleaning Process in High Value Manufacturing Industries. In *Developments in Surface Contamination and Cleaning: Applications of Cleaning Techniques* (pp. 251–288). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815577-6.00007-4>
- Model—The Upright Project. (n.d.). Upright Project. Retrieved 18 September 2025, from <https://www.uprightproject.com/model>
- Murthy Peri, M. D., Varghese, I., & Cetinkaya, C. (2011). Laser Cleaning for Removal of Nano/Micro-Scale Particles and Film Contamination. In *Developments in Surface Contamination and Cleaning* (pp. 63–122). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-7885-4.10003-X>
- Ninos, G., Biskanaki, F., Chaniotis, D., & Tertipi, N. (2024). Development of a proposed Laser Safety Protocol (LSP) for the prevention of eye and skin hazards in Biomedical Laser facilities. *Review of Clinical Pharmacology and Pharmacokinetics - International Edition*, 38(Sup1), 51–56. <https://doi.org/10.61873/KEVF7219>
- Novikov, D., & Strite, T. (2024). *Automated Laser Cleaning/Ablation as a Novel Tool in Aerospace Manufacturing*. 79–83. <https://doi.org/10.31399/asm.cp.ifhtse2024p0079>
- Omkumar, M., & Saravanan, R. (2024). Laser Cleaning and Its Advancements. In S. Kunar & P. Chatterjee (Eds.), *Laser-Assisted Machining* (1st ed., pp. 447–459). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781394214655.ch26>
- Pan, Z., Liu, D., Li, S., Deng, Z., Liu, J., & Chen, T. (2023). Path planning and pose correction of robot laser cleaning process for specific surfaces of parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 127(1–2), 349–364. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11535-6>
- Rodríguez, A., López, A. J., Lamas, J., Moreno, A., & Ramil, A. (2021). Development of a laser cleaning robot system for the processing of 3D surfaces. In S. Negahdaripour, E. Stella, D. Ceglarek, & C. Möller (Eds.), *Multimodal Sensing and Artificial Intelligence: Technologies and Applications II* (p. 28). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2592111>
- Shamsujjoha, Md., Agnew, S. R., Melia, M. A., Brooks, J. R., Tyler, T. J., & Fitz-Gerald, J. M. (2015). Effects of laser ablation coating removal (LACR) on a steel substrate: Part 1: Surface profile, microstructure, hardness, and adhesion. *Surface and Coatings Technology*, 281, 193–205. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.01.071>
- Shivakoti, I., Kibria, G., Cep, R., Pradhan, B. B., & Sharma, A. (2021). Laser Surface Texturing for Biomedical Applications: A Review. *Coatings*, 11(2), 124. <https://doi.org/10.3390/coatings11020124>
- Song, F., & Lin, X. (2024). Laser Cleaning Equipment. In F. Song & X. Lin, *Laser Cleaning* (pp. 113–169). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-6631-4_4
- Tang, Q. H., Zhou, D., Wang, Y. L., & Liu, G. F. (2015). Laser cleaning of sulfide scale on compressor impeller blade. *Applied Surface Science*, 355, 334–340. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.07.128>
- THE 17 GOALS | Sustainable Development. (n.d.). Retrieved 7 May 2025, from <https://sdgs.un.org/goals>

- The Surface Properties of an Aviation Aluminum Alloy after Laser Cleaning.* (n.d.). Retrieved 5 June 2025, from <https://www.mdpi.com/2079-6412/12/2/273>
- Tian, Z., Lei, Z., Chen, Y., Chen, C., Zhang, R., Chen, X., Bi, J., & Sun, H. (2020). Inhibition Effectiveness of Laser-Cleaned Nanostructured Aluminum Alloys to Sulfate-reducing Bacteria Based on Superwetting and Ultraslippery Surfaces. *ACS Applied Bio Materials*, 3(9), 6131–6144. <https://doi.org/10.1021/acsabm.0c00714>
- Tourunen, E. (2024, February 21). *Olomuodonmuutokset laserpuhdistuksessa*. utupub. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe202402268832>
- Vergès-Belmin, V., Wiedemann, G., Weber, L., Cooper, M., Crump, D., & Gouverne, R. (2003). A review of health hazards linked to the use of lasers for stone cleaning. *Journal of Cultural Heritage*, 4, 33–37. [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(02\)01224-4](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(02)01224-4)
- Yang, G., Liu, Y., Liu, L., Xiong, W., Deng, L., & Zhao, S. (2025). Mechanism and technology of laser adaptive cleaning for aircraft skin multilayer coatings of airbus A320. *Journal of Manufacturing Processes*, 135, 230–239. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.01.050>
- Ye, X., Luo, L., Hou, L., Duan, Y., & Wu, Y. (2020). Laser Ablation Manipulator Coverage Path Planning Method Based on an Improved Ant Colony Algorithm. *Applied Sciences*, 10(23), 8641. <https://doi.org/10.3390/app10238641>
- Zhang, F. D., Liu, H., Suebka, C., Liu, Y. X., Liu, Z., Guo, W., Cheng, Y. M., Zhang, S. L., & Li, L. (2018). Corrosion behaviour of laser-cleaned AA7024 aluminium alloy. *Applied Surface Science*, 435, 452–461. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.11.141>
- Zhou, K., Sang, S., Wang, C., & Zhou, Y. (2022). Principle, application and development trend of laser cleaning. *Journal of Physics: Conference Series*, 2383(1), 012075. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2383/1/012075>
- Zhou, Z., Sun, W., Wu, J., Chen, H., Zhang, F., & Wang, S. (2023). The Fundamental Mechanisms of Laser Cleaning Technology and Its Typical Applications in Industry. *Processes*, 11(5), 1445. <https://doi.org/10.3390/pr11051445>
- Zhu, G., Xu, Z., Jin, Y., Chen, X., Yang, L., Xu, J., Shan, D., Chen, Y., & Guo, B. (2022). Mechanism and application of laser cleaning: A review. *Optics and Lasers in Engineering*, 157, 107130. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2022.107130>