

Metallin laserpuhdistus kiertotalouden menetelmänä

24.9.2026

Taustaa

SEAMKin aiemmassa KIMORA-projektissa tutkittiin rakentamisen kiertotalouden monia mahdollisuuksia lähinnä betoni ja teräsbetonirakenteiden kannalta katsottuna. Tarkastelukohteet oli valittu sitä silmällä pitäen lähinnä betoni- ja teräsbetonirakenteista. Projektin loppusuoralla pohdittiin, että olisi tarkoituksenmukaista tarkastella rakentamisen kiertotaloutta laajemmin myös teräsrakentamisen kannalta katsottuna. Niinpä sitten luotiin uusi projekti tästä näkökulmasta, ja sen nimeksi tuli lyhyesti KiertoRaksa. Laajemminkin SEAMKin projektien tarkoituksena on edesauttaa uuden teknologian käyttöönotossa maakunnassa ja uusien liiketoimintaideoiden lanseerauksessa. Tähän konseptiin sopii hyvin metallien laserpuhdistusmenetelmän tarkastelu.

Metallin laserpuhdistus

Metallin laserpuhdistus perustuu laserablaatioon, jossa korkeatehoinen ja lyhytpulssinen lasersäde suunnataan puhdistettavalle pinnalle. Pinnoitteet, ruoste, öljy ja muu lika imevät laserenergian itseensä, kuumenevat sekunnin murto-osassa ja höyrystyvät tai irtoavat mekaanisen shockwave-ilmiön vaikutuksesta.

Laserablaatio (engl. laser ablation) on prosessi, jossa materiaalia poistetaan kiinteästä pinnasta suunnattuun lasersäteilyyn perustuvalla energialla. Puhdistussovelluksissa ja materiaalityöstössä ilmiö tapahtuu

nanosekuntien tai pikosekuntien murto-osissa. Kun voimakas lasersäde osuu materiaalin pintaan, tapahtuvat ilmiöt riippuvat säteen tehosta, pulssin kestosta sekä materiaalin fysikaalisista ominaisuuksista.

Pinnalla oleva kerros (esim. ruoste, maali tai oksidi) absorboi eli imee itseensä lasersäteen valohiukkasia (fotoneja). Absorption seurauksena materiaalin lämpötila nousee paikallisesti tuhansiin asteisiin murto-osasekunnissa. Kiinteä materiaali ei vain sula, vaan se suoraan sublimoituu tai höyrystyy kaasumaiseen muotoon.

Kun teho on riittävän korkea, höyrystynyt materiaali ionisoituu ja muodostaa pienimuotoisen plasmapilven. Plasman nopea laajeneminen synnyttää mekaanisen sokkiaallon (acoustic shockwave), joka irrottaa mekaanisesti myös niitä hiukkasia, jotka eivät ehdi höyrystyä.

Laserpuhdistus hyödyntää eri materiaalien erilaista energian imeytymistä (ablaatiokynnys). Lika ja epäpuhtaudet (kuten ruoste, maali, rasva ja oksidikerrokset) absorboivat lasersäteen energian voimakkaasti ja höyrystyvät välittömästi. Perusmetalli heijastaa suurimman osan säteilystä takaisin, jolloin sen pinta ei sula tai vahingoitu oikein säädetyillä parametreilla. Kohdennettu imu kerää höyrystyneen ja hiukkasmuotoisen jätteen talteen suoraan puhdistuspäästä.

Jotta materiaalia poistuu, laserenergian tiheyden (J/cm²) täytyy ylittää kyseiselle materiaalille ominainen ablaatiokynnys. Fluenssi F = E/A, missä E on pulssin energia ja A säteen pinta-ala pinnalla. Epäpuhtauksilla (ruoste, maali, nokikerros) on alhainen ablaatiokynnys – ne höyrystyvät helposti pienelläkin energialla. Perusmetallilla (kuten teräksellä tai alumiinilla) on korkeampi ablaatiokynnys ja korkea heijastuskyky. Kun laserin teho säädetään kahden kynnyksen väliin, pinnalla oleva kerros höyrystyy kokonaan, mutta sen alla oleva metallipinta heijastaa säteen pois eikä vaurioidu.



Työssä käytetty Wattsan-laser (kuva: Tia Kraft, 2026).



Työssä käytetty Wattsan-laserin työstöpää (kuva: Tia Kraft, 2026)

Laserpuhdistuksen keskeiset edut

Laserpuhdistus on kosketuksetonta ja hellävaraista. Siinä ei tapahdu mekaanista kulutusta tai naarmuuntumista, joten se sopii myös tarkkuusosille ja muoteille. Se on täysin kemikaaliton ja kuiva menetelmä, joten siinä ei ole tarvetta hapoille, liuottimille tai pesuaineille. Kokonaisuutena se on hyvin puhdas prosessi. Se ei synnytä puhallusjätettä (kuten hiekka-, sooda- tai lasikuulapuhalluksessa), ainoastaan irtoava epäpuhtaus imetään suodattimeen. Se on myös tarkasti kohdennettavissa, koska voidaan puhdistaa vain haluttu alue myrkyttömästi ja paikallisesti ilman suojausyksiköitä.

Säädettävätehoinen laser polttaa ja puhdistaa pinnalta halutut aineet vahingoittamatta itse pohjamateriaalia. Mekaaniseen hiontaan verrattuna työvaiheet nopeutuvat ja laser on ympäristöystävällinen valinta hionnan, maalinpoistoaineiden tai hiekkapuhalluksen rinnalle. Laserpuhdistus korvaa hiekkapuhalluksen ja soodapuhdistuksen kaltaiset työt ilman siivottavaa. Ajan säästämisen vuoksi työ on myös edullisempaa ja mahdollistaa pintojen jatkokäsittelyn heti ilman kuivumisaikoja tms.

Laserpuhdistusmenetelmän monipuolisuudesta johtuen mieleen voi tulla monenlaisia puhdistuskohteita. Tässä yhteydessä tarkastelu on rajattu lähinnä teräkseen. Rakennustekniikkaan liittyen hyvin tiheät kiviainesseulat ovat usein ongelmallisia puhdistettavia. Siksi niitä puhdistetaan muun muassa ultraäänipesurilla, kuten SEAMKin rakennustekniikan laboratoriossa tehdään. Mieleen nousee siis kysymys,

voidaanko niitä puhdistaa laserilla.

Tiheitä metalliseuloja saadaan toki puhtaaksi laserilla, mutta onnistuminen riippuu voimakkaasti seulan rakenteesta, materiaalista ja käytettävistä laserparametreista. Laboratoriokäytössä olevien hienojen seulojen kohdalla suurin riski ei yleensä ole itse epäpuhtauden poistuminen vaan:

- verkon lankojen paikallinen ylikuumeneminen
- lankojen oheneminen tai sulaminen
- verkon jännitystilojen muuttuminen
- silmäkoon muuttuminen lämpölaajenemisen seurauksena
- hyvin ohuiden lankojen vääntyminen.

Liian suuri energiatiheys voi aiheuttaa alustamateriaalin vaurioita, vaikka pienemmällä energiatiheydellä epäpuhtaus poistuisi onnistuneesti. Tämä korostaa sitä, että laserpuhdistuksessa on aina olemassa vauriokynnys. Laserpuhdistus toimii yleensä hyvin, jos:

- seula on ruostumatonta terästä
- lika on pintaruostetta, öljyä tai orgaanista materiaalia
- käytetään pulssikuitulaseria (ei jatkuvatehoista CW-laseria)
- energiatiheys pidetään riittävän alhaisena
- säde pidetään jatkuvassa liikkeessä
- verkon lanka on suhteellisen paksu verrattuna puhdistettavan lian paksuuteen.

Lämpövaurioriski kasvaa huomattavasti, jos seulassa on esimerkiksi:

- 20–100 µm lankapaksuus
- hyvin tiheä laboratoriomittaseula
- kudottu ruostumattomasta teräksestä valmistettu tarkkuusseula
- elektroformattu nikkeliseula.

Tällöin väärillä asetuksilla yksittäinen lanka voi ylikuumentua ennen kuin lika irtoaa. Tämä on erityisen tärkeää, jos seulan kalibroitu aukkokoko on kriittinen mittaustulosten kannalta. Seulojen puhdistukseen menetelmä ei siis ole kovin suositeltava.

Laserpuhdistuskalusto on liikuteltavaa ja terassit, julkisivut ja muut isot kohteetkin voidaan puhdistaa paikan päällä. Sähkö voidaan ottaa joko kohdepaikan verkkovirrasta, tai se voidaan tuottaa mukana liikkuvalla aggregaatilla. Se tuottaa myös voimavirtaa, jota vaaditaan isoissa ja haastavissa kohteissa.

Laserpuhdistuksen käyttötarkoitukset voidaan luokitella seuraavan taulukon mukaisesti.

Kohde	Käyttötarkoitus
Hitsejä edeltävä ja seuraava puhdistus	Oksidikerrosten, maalin ja rasvan poisto sauma-alueelta
Ruosteen- ja maalinpoisto	Kerrostumien irrotus teräsrakenteista ja työkaluista
Valumuottien huolto	Kumi-, muovi- ja valumuottien puhdistus ilman kulutusta
Kulttuurihistorialliset esineet	Herkkien metallien ja esineiden entisöinti

Laitteiston valintaan vaikuttavat tekijät

Oikean laserpuhdistuslaitteiston valinta riippuu pääasiassa puhdistettavasta materiaalisubstraatista, poistettavan kerroksen laadusta, tarkkuusvaatimuksista sekä tarvittavasta työskentelynopeudesta. Tärkeimmät tekniset valintakriteerit jakautuvat valonlähdetekniikkaan, optiikkaan ja laitteiston liikuteltavuuteen.

Puhdistuslaitteet jakautuvat kahteen pääluokkaan niiden energiansyöttötavan mukaan.

Ominaisuus	Pulssilaser (Pulsed Laser)	Jatkuva-aaltoinen (CW Laser)
Toimintaperiaate	Syöttää energiaa erittäin lyhyinä, korkeatehoisina pulsseina (ns. Q-switched tai MOPA)	Syöttää lasersädettä keskeytyksettä tasaisella teholla
Lämpövaikutus	Minimaalinen (kylmä/hallittu ablaatio)	Merkittävä (kuumentaa taustamateriaalia)
Pinnan laatu	Ei naarmuta, sula tai muuta metallin rakennetta	Voi aiheuttaa lievää sulamista, karkaisumuutoksia tai taipumista ohueen peltiin
Tyypillinen teho	100 W – 1000 W (korkea huipputeho)	1000 W – 3000 W (korkea keskiteho)
Hinta	Korkeampi suhteessa tehoon	Edullisempi tehoonsa nähden
Parhaat kohteet	Valumuotit, tarkkuusosat, autojen koripellit, historialliset esineet, herkät metallit (alumiini, messinki)	Raskas teräsrakenne, paksut ruostekerrokset, laivanrunkojen maalinpoisto, isot pinta-alat

Laitteiden teholuokan valinta tehdään ohjeellisesti seuraavan jaottelun mukaisesti:

- Pienteho (100 W – 200 W, pulssi) sopii tarkkuuspuhdistukseen, pienten alueiden ruosteen- ja maalinpoistoon, valumuottien huoltoon sekä erikoismateriaaleille. Se on hellävarainen ja helposti liikuteltava.
- Keskiteho (300 W – 500 W, pulssi) on monikäyttöisin luokka teollisuuteen ja entisöintiin. Se mahdollistaa riittävän puhdistusnopeuden ilman vaaraa pohjamateriaalin vaurioitumisesta.
- Suurteho (1000 W – 3000 W, CW tai pulssi) sopii raskaaseen teolliseen ruosteen- ja maalinpoistoon. Sitä käytetään, kun poistettava kerros on paksu ja käsiteltävät pinta-alat ovat suuria.

Optiikka ja säteen ohjaus (Puhdistuspää) tehdään seuraavan ohjeen mukaisesti:

- Oikean skannausleveyden ja -kuvioiden saavuttamiseksi puhdistuspäässä olevat kalvopeilit heiluttavat lasersädettä nopeasti edestakaisin (esim. viiva-, ympyrä- tai spiraalikuvio). Tämä estää pistemäisen ylikuumenemisen ja takaa tasaisen puhdistusjäljen.
- Linssin polttoväli (F-theta -linssi) määrittää työskentelyetäisyyden ja polttopisteen koon. Pidempi polttoväli antaa suuremman syvyysterävyyden, mutta pienentää energiatiheyttä.
- Optiikan uloin suojalasi altistuu roiskeille ja pöllyävälle lialle. Sen on oltava helposti vaihdettavissa

kenttäolosuhteissa.

Työturvallisuus

Laserlaitteisto ei ole toimintavalmis ilman asianmukaisia lisäjärjestelmiä:

- Kohdepoisto ja suodatus ovat erittäin tärkeitä lisävarusteita. Höyrystyvä maali, ruoste ja öljy muodostavat terveydelle vaarallisia hienojakoisia hiukkasia ja kaasuja. Laitteistoon on yhdistettävä suodattimilla (HEPA + aktiivihiili) varustettu kohdepoistoimu.
- Suojavarusteet (Luokan 4 laser) ovat erittäin tarpeellisia laitteella työskenneltäessä. Metallipinnasta heijastuva lasersäteily on vaarallista silmille ja iholle. Käyttäjät vaativat aina kyseiselle aallonpituudelle (tyypillisesti 1064 nm kuitulasereille) luokitellut suojalasit tai suojakopit/verhot ympäröivälle alueelle.

Laserpuhdistuksessa (laserablaatiossa) korkeatehoinen lasersäde höyrystää pinnalla olevan epäpuhtauden – kuten ruosteen, maalin, öljyn tai pinnoitteen – millisekunnin osissa. Tämän prosessin seurauksena epäpuhtaus ei häviä olemattomiin, vaan se muuttuu kaasumuotoisiksi höyryiksi, aerosoleiksi ja erittäin hienojakoiseksi pölyksi.

Tehokas kohdeimu ja ilmanvaihto ovat aivan olennainen osa toimivaa ja turvallista laserpuhdistus-järjestelmää. Ilmanvaihdon ja kohdeimun merkitys voidaan jakaa neljään pääalueeseen:

1. Työterveys ja -turvallisuus

- Kun laser höyrystää materiaalia, syntyvä hiukkaskoko on usein nanoluokkaa (PM2.5 ja pienemmät). Tällaiset hiukkaset ovat vapautuessaan näkymättömiä ja voivat tunkeutua keuhkorakkuloihin asti.
- Vanhoja maaleja, ruosteenestoaineita tai pinnoitteita puhdistettaessa ilmaan voi vapautua lyijyä, kromia, sinkkiä, asbestia tai muita vaarallisia yhdisteitä.
- Pinnoitteiden palamisesta ja höyrystymisestä syntyy haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (VOC) sekä mahdollisesti haitallisia kaasuseoksia.
- Korkeaenerginen valo voi muodostaa ilman hapesta otsonia ja ionisoitunutta ilmaa.

2. Laserlaitteiston ja optiikan suojaus

Laserlaitteiston kalleimmat ja herkimmät osat ovat sen optiset komponentit (suojalasit, kohdistuslinssit ja peilit puhdistuspäässä).

- Jos imu ei poista käryä välittömästi työstökohdasta, noki ja pöly laskeutuvat puhdistuspään suojalasille ja linsseille.
- Kun laservalo kohtaa suojalasiin kertyneen roskan tai nokikerroksen, pölyhiukkanen imee itseensä lasersäteilyn energian, kuumenee voimakkaasti ja polttaa linssiin vaurion. Tämä voi johtaa kalliin optiikan rikkoutumiseen sekunneissa.

3. Puhdistustuloksen ja -tehon varmistaminen

- Jos työstökohdan yläpuolelle muodostuu tiheä hiukkaspilvi tai savu, lasersäde heijastuu ja sirottuu savun hiukkasista ennen kuin se kohtaa puhdistettavan pinnan.
- Savupilvi “syö” lasersäteen tehoa, jolloin puhdistusnopeus hidastuu ja työn jäljestä tulee epätasaista. Tehokas imu pitää lasersäteen reitin kirkkaana ja varmistaa täyden tehon kohdistumisen pintaan.

4. Ympäristö- ja paloturvallisuus

- Hienojakoinen metalli- tai maalipöly voi olla syttyvää. Nyky-yksiköissä käytetään kipinäerottimia ja syttymättömiä suodatusmateriaaleja paloriskin minimoimiseksi.
- Kohdeimurin monivaiheinen suodatus estää haitallisten aineiden pääsyn suoraan ulkoilmaan tai muualle hallitilaan.

Projektin yhteydessä seurattuja toimenpiteitä

Laserpuhdistukseen liittyen tutustuimme LaserLoisto Oy:ön, joka on Sastamalan Houhajärvellä toukokuussa 2026 perustettu osakeyhtiö. Se tarjoaa laserpuhdistus- ja pintojen kunnostuspalveluita. Meillä oli tilaisuus tuoda jokin kohde heidän upouuden laserpuhdistuskalustonsa harjoituskappaleeksi.

LaserLoisto Oy on hankkinut kaksi eri Wattsan-merkkistä puhdistuslaitteistoa, toinen 3000 W:n jatkuva laser ja toinen 300 W:n pulssilaser. Näistä isompi on tarkoitettu lähinnä metallirakenteiden puhdistukseen ja pienempi soveltuu myös muiden materiaalien, kuten puun, tai pienten esineiden puhdistukseen. Näillä pääsee ainakin alkuun melko laajalla skaalalla.

Tiedämme paikkakunnalta parikin maataloa, joiden tien alkuun on viritetty yhdistetyksi tienviitaksi ja ympäristötaideteokseksi vanha hevosaura, joka on maalattu omistajan toiveiden mukaisella värillä. Teokset ovat melko pysäyttäviä ja usein keskustelua herättäviä.

Maalaus tietenkin edellyttää kohteen perusteellista puhdistamista ennen maalausta. Perinteellisesti tämä puhdistus on toteutettu hiekkapuhalluksena tai vaihtoehtoisesti sooda- tai lasikuulapuhalluksella. Näissä menetelmissä syntyy kuitenkin runsaasti ikävää maalijätettä, josta osa on lyijy-, kromi- ja kadmiumpitoisena jopa ympäristölle vaarallista.

Omista perinnevarastoista maatilaltani löytyikin kyseisenlainen 16¨ hevosaura, jota isoisäni viljelysaikana vedettiin kahden hevosen voimin. Aurassa oli paikoin jo melko lailla korroosion syövyttämiä paikkoja, mutta hyvin se silti vielä oli muodossaan. Pienet läpisyöpymät paikattiin kemiallisella metallilla ennen maalausta.



Koekohteena ja demonstraatiokappaleena toiminut hevosaura (kuva: Jorma Tuomisto, 2026).

Laserpuhdistuksen jälkeen on tärkeätä vähintäänkin pohjamaalata kohde hyvin pian puhdistuksen jälkeen. Muuten esine kerää vettä ilmankosteudesta riippuen puhtaalle uudelle pinnalleen hyvinkin pian ja saa aikaan sen nopean uudelleen ruostumisen.

Yrittäjän käytännön kokemuksia

Yrittäjä Tia Kraft kertoo, että Wattsan-laserpuhdistuslaitteiden sisäänrakennettu ohjelmisto mahdollistaa hyvinkin tarkan asetusten vaihtelun, jossa laserskannauksen nopeutta (mm/s), tehoa (W), lasertaajuutta (Hz) ja mm. skannauksen kuvion muotoa ja kokoa voi säätää melko vapaasti ja kohteen vaatimusten mukaisesti. Hyvä asia on yhdistettävyys myös puhelimeen mobiilisovelluksen kautta, jolloin laitetta voi ohjata langattomasti laitteen oman WiFi -alueen sisällä. Tämä ominaisuus tuli käyttöön toisella työmaalla, jossa laseroitiin korkeasta nosturista käsin itse laitteen ollessa maan tasalla. Laserpään johto mahdollistaa 8 metrin liikkumavaran laitteen ympärillä. Laserpuhdistuslaitteen liikuteltavuus on hyvä asia, mutta itse laitteen lisäksi työmaalla tarvitaan paineilmakompressori, joka kytketään laitteeseen jatkuvaa linssin puhdistusta varten, kohdepoistoimuri, sekä voimavirtaa.

Auraa puhdistettaessa selkein havainto liittyi lasertehon valintaan, sillä kovin ruostunut ja epätasainen pinta, josta irtoaa pieniä partikkeleita, on hyvä puhdistaa kerroksittain, ettei polta epäpuhtauksia kiinni ehjään pintaan. Miedompi teho (max 1200W) usealla kerralla ja teräsharjalla harjaus välillä antoi parhaan lopputuloksen. Aurassa oli myös lavassa reikä, jonka reunat olivat ohueksi kuluneet ja kokemus hiekkapuhalluksesta antoi lievää pelkoa reiän suurenemisesta entisestään. Mutta toisin kävi, kun pinta puhdistui hellävaraisesti ja pelko osoittautui turhaksi. Tuli myös testatuksi, että kemiallista metallia ei kannata laseroida, sillä se syttyy palamaan pienelläkin teholla.

Verrattuna hiekkapuhallukseen, työstö on nopeampaa pienilläkin tehoilla ja kerroksittainen puhdistus mahdollistaa hyvin tarkan työskentelyn. Laitteen käytettävyys on nopeaa ja helppoa, kun kesken työn laitteen voi nopeasti sammuttaa ja käynnistää uudelleen, sekä jatkaa myöhemmin ilman suurempia välioperaatioita tai siivoamisia. Ohut, kirkas lakkapinta on pigmentin puutteen vuoksi vaikeaa ja hidasta puhdistaa. Tätä testattiin mm. alumiinivanteiden kerrostuneen maalin poistoon. Laservalo tunkeutuu lakkakerroksen läpi, jolloin liian suurella teholla lakan alla oleva materiaali palaa ennen päällimmäistä lakkakerrosta. Samaa efektiä on myös valkoisen maalin poistossa, kun valo heijastuu pinnasta. Lukuisat ohuet kerrokset miedolla teholla mahdollistavat lakan ja maalin poiston, mutta siinä tapauksessa ei voida enää puhua kustannustehokkuudesta verraten hiekkapuhallukseen. Maalausta varten laserpuhdistus antaa teräkselle tarttuvuuden kannalta ihanteellisen, hieman mattaisen pinnan.



Lasersäde työssään (kuva: Tia Kraft, 2026).



Kohde-esine pohjamaalauksen jälkeen (kuva: Tia Kraft, 2026)



Testikappale lopullisessa käytössään ympäristötaiteena (kuva: Jorma Tuomisto, 2026).

Yhteenveto

Laserpuhdistus on teknisesti erittäin hyvä puhdistusmenetelmä, jonka puhdistustulos on usein parempi kuin verrokkimenetelmien, eikä se kuluta varsinaisesti itse terästä. Menetelmän yleistymistä ovat kuitenkin hidastamassa lähinnä kaksi asiaa: Sen alkuinvestoinnit ovat melko korkeat ja työskentelynopeus on hitaahko verrattuna kilpaileviin menetelmiin. Vertailussa on toki otettava huomioon koko työn vaatima aika jätteenkäsittelyineen ynnä sen muu kustannus. Laitteiston valinnassa on heti alussa panostettava riittävän tehokkaaseen kalustoon, jotta päästään tarpeelliseen työtehoon. Myös hyvin hienomekaanisissa yhteyksissä (kuten nuo tiheät, hienojakoiset seulat) on varottava ylikuumenemista.

Kiitämme rahoituksesta Etelä-Pohjanmaan Liittoa ja KiertoRaksa-hanketta, joka on Euroopan unionin osarahoittama hanke. Hankkeesta on lisää tietoa SEAMKiin projektit sivuilla: KiertoRaksa**Jorma Tuomisto**
TKI-asiantuntija
Digitaaliset ja älykkäät teknologiat
SEAMK

Kirjoittaja on tehnyt pitkän työuran SEAMKin rakennustekniikan laboratoriossa ja toiminut samaan aikaan sivutoimisena opettajana rakennustekniikkaan ja kestävään kehitykseen liittyen. Tällä hetkellä hän työskentelee SEAMKissa TKI-asiantuntijana rakentamiseen ja kiertotalouteen liittyen KiertoRaksa-hankkeessa.

Lähteet

LaserLoisto (i.a.). www.laserloisto.fi/

Kraft, T. (2026). Haastattelu yrityksessä. Henkilökohtainen tiedonanto.

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). https://doi.org/10.3390/pr11051445

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