



Autoteollisuuden teknistä puh- tautta tarkkailevan partikke- lianalyysin kehittäminen

Milka Turila

OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2023

Laboratoriotekniikan tutkinto-ohjelma

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Laboratoriotekniikan tutkinto-ohjelma

TURILA, MILKA:

Autoteollisuuden teknistä puhtautta tarkkailevan partikkelianalyysin kehittäminen

Opinnäytetyö 63 sivua, joista liitteitä 10 sivua
Maaliskuu 2023

Opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää Valmet Automotive EV Power Oy:n Salon akkutehtaan teknistä puhtautta tarkkailevaa partikkelianalyysimenetelmää. Tarkoituksena oli suunnitella ja toteuttaa tutkimus partikkelianalyysimenetelmän täsmällisyydestä. Työ jaettiin tutkimustehtäviin, jotka olivat alkutilanteen selvitys tilastollisen analysoinnin avulla, vaihtelulähteiden selvitys, vaihtelulähteiden minimoiminen sekä kehitystyön vaikutuksen tutkiminen partikkelianalyysin täsmällisyyteen tilastollisen analysoinnin avulla.

Alkutilanteen selvityksessä todettiin partikkelianalyysimenetelmän täsmällisyyden olevan liian heikko sen hyväksymiseksi. Vaihtelulähteiden selvityksessä määritettiin partikkelianalyysimenetelmän vaihteluun vaikuttavat tekijät. Selvitetyt tekijät pyrittiin poistamaan työhjeeseen muokkaamisella sekä mittaaajien perehdytyksellä päivitettyyn työhjeeseen. Vaihtelulähteiden minimoimisen jälkeen gage R&R -tutkimus toistettiin, jotta havaittiin, auttoivatko toimenpiteet kehittämään partikkelianalyysimenetelmän täsmällisyyttä. Lopputuloksena saavutettiin täsmällinen mittausmenetelmä toimeksiantajayrityksen käyttöön.

Valmet Automotive EV Power Oy:n Salon akkutehtaan laatuosasto voi jatkaa partikkelianalyysimenetelmän täsmällisyyden kehittämistä ottamalla tutkimuksiin mukaan metallisten ja ei-metallisten partikkelien erottamisen toisistaan. Lisäksi tulevaisuudessa analyysiä voi kehittää vaikeiden rajatapauspartikkelien arvioimisen yhdenmukaistamisella sekä käytettävän laitteiston toistettavuuden edelleen kehittämällä.

Avainsanat: tekninen puhtaus, täsmällisyys, gage R&R, mittausjärjestelmän analyysi

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Laboratory Engineering

TURILA, MILKA:

Development of Particle Analysis Used to Inspect Technical Cleanliness in The Automotive Industry

Bachelor's thesis 63 pages, appendices 10 pages
March 2023

The goal of the thesis was to develop the precision of the particle analysis system used in the quality department of Valmet Automotive EV Power Oy Salo premises. The purpose of the work was to design and implement a study focusing on the precision of the measurement system. The objective was to evaluate the initial situation using statistical analysis, to chart and eliminate variation sources and study the effect of the improvements to the particle analysis system with statistical analysis.

During the evaluation of the initial situation, it was noticed that the precision of the particle analysis system was too low. The next step was to determine the sources of the variation in the particle analysis system. In this step various implementations were used. Work instruction updates and retraining the measuring staff were used to eliminate the determined sources of variation. After eliminating the sources of variation, the study was implemented again in order to clarify how the update of work instruction and retraining affected the study results. A precise measurement system was accomplished as a final result.

There are several matters that may be taken into consideration in the future. The quality department of the Valmet Automotive EV Power Oy Salo premises could examine and develop their specification of reflective and non-reflective particles. Other improvements could be development of the repeatability of the instrumentation and harmonization of the specification of borderline objects. With these actions the precision of the measurement system can be evolved further.

Key words: technical cleanliness, precision, gage R&R, measurement system analysis

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	TEKNINEN PUHTAUS AUTOTEOLLISUUDESSA	7
	2.1 Autoteollisuuden tekninen puhtaus yleisesti	7
	2.2 Autoteollisuuden teknistä puhtautta ohjaavat standardit	9
	2.3 Teknisen puhtauden analysointimenetelmät	10
	2.3.1 Partikkeliloukkuanalyysi	13
3	MITTAUSMENETELMÄN LAADUNVARMISTUS	16
	3.1 Mittausjärjestelmän analyysi (MSA)	16
	3.1.1 Mittausjärjestelmän tarkkuus	16
	3.2 MSA-metodeja	18
	3.3 Gage R&R	19
	3.3.1 Menetelmät ja datan analysointi	21
	3.3.2 Gage R&R -tutkimuksen toteuttaminen	23
	3.3.3 Gage R&R -tutkimuksen tulosten analysointi	24
4	PARTIKKELIANALYYSIN KEHITTÄMINEN	27
	4.1 Kehitystyön lähtökohdat	27
	4.2 Alkutilanteen selvitys	29
	4.2.1 Tutkimuksen suunnittelu ja suoritus	29
	4.2.2 Alkutilanteen selvityksen tulos	33
	4.3 Vaihtelulähteiden selvitys	38
	4.4 Vaihtelulähteiden minimoiminen	42
	4.5 Kehitystyön vaikutuksen tutkiminen	44
5	POHDINTA	48
	LÄHTEET	52
	LIITTEET	54
	Liite 1. Alkuseelvityksessä toteutetun gage R&R -tutkimuksen tulosraportti	54
	Liite 2. Vaihtelulähteiden selvityksessä työkaluna käytetyn Attribuutti gage R&R -tutkimuksen tulosraportit	56
	Liite 3. Työohjeen liitteeksi lisätty juliste	59
	Liite 4. Analyysin toistossa toteutetun gage R&R -tutkimuksen tulosraportti	62

LYHENTEET JA TERMIT

AIAG	Automotive Industry Action Group, kansainvälinen autoalan toimijoiden organisaatio
ANOVA	Analysis of Variance, varianssianalyysi
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis, vika- ja vaikutusanalyysi
EDX	Energy-dispersive x-ray spectroscopy, energiadisersiivinen röntgenspektroskopia
GRR	Gage repeatability and reproducibility, mittausmenetelmän toistettavuus ja uusittavuus
ISO	International Organization for Standardization, kansainvälinen standardointiorganisaatio
LIBS	Laser-induced breakdown spectroscopy, laseravusteinen hajotusspektroskopia
MSA	Measurement System Analysis, mittausjärjestelmän analyysi
NDC	Number of Distinct Categories, erotettavien ryhmien lukumäärä
R&R	Repeatability & Reproducibility, toistettavuus & uusittavuus
SEM	Scanning electron microscope, pyyhkäiselektronimikroskopia
Std Dev, σ	Standard deviation, keskihajonta
Study Var	Study variation, komponentin vaihtelu
%Study Var	%Study variation, komponentin prosentuaalinen vaihtelu
VDA	Verband der Automobilindustrie, Saksan autoteollisuuden liitto
Var Comp	Variance Component, varianssikomponentti

1 JOHDANTO

Teknisellä puhtaudella on suuri merkitys autoteollisuudessa, sillä partikkelikontaminaatiot voivat aiheuttaa häiriöitä komponenteissa sekä valmiissa tuotteissa. Partikkelikontaminaatioiden aiheuttamien häiriöiden ehkäisemiseksi autoteollisuudessa käytetään erilaisia menetelmiä teknisen puhtauden tarkkailemiseen. Lisäksi autoteollisuuden teknistä puhtautta ohjaamaan on laadittu kansainvälisiä standardeja.

Opinnäytetyö tehdään Valmet Automotive EV Power Oy:n Salon akkutehtaan laatuosastolle. Valmet Automotive EV Power Oy kuuluu Valmet Automotive -konserniin, joka on autoteollisuuden kansainvälinen palveluntarjoaja. Valmet Automotiven palvelutarjontaan kuuluu autojen, akkujärjestelmien sekä katto- ja kinematiikkajärjestelmien sopimusvalmistus.

Salon akkutehtaalla teknisen puhtauden tarkkailussa käytetään partikkeliloukkuja. Niiden toimintaperiaate on partikkelien sedimentoituminen liimapinnalle. Partikkeliloukkujen analysoinnissa käytettävän partikkelianalyysin täsmällisyys haluttiin todentaa, joten siitä muodostui aihe opinnäytetyölle. Opinnäytetyön tavoitteena on kehittää Salon akkutehtaan käyttämän partikkelianalyysimenetelmän täsmällisyyttä. Kehittämisen myötä toimeksiantajayritys saa todennetusti täsmällisen partikkelianalyysimenetelmän käyttöönsä. Työn tarkoituksena on suunnitella ja toteuttaa tutkimus partikkelianalyysimenetelmän täsmällisyydestä. Opinnäytetyö jaetaan tutkimustehtäviin, jotka ovat alkutilanteen selvitys tilastollisen analysoinnin avulla, vaihtelulähteiden selvitys, vaihtelulähteiden minimoiminen sekä kehitystyön vaikutuksen tutkiminen tilastollisen analysoinnin avulla.

2 TEKNINEN PUHTAUS AUTOTEOLLISUUDESSA

2.1 Autoteollisuuden tekninen puhtaus yleisesti

Systeemiä voidaan sanoa teknisesti puhtaaksi, jos siellä olevaa likaa on niin vähän, ettei systeemi vaurioidu. Teknisen puhtauden merkitys autoteollisuudessa perustuu partikkeleiden aiheuttamalle saastumiselle eli partikkelikontaminaatioille. Partikkeleilla tarkoitetaan kooltaan mikrometrien (μm) kokoluokkaa olevia, näkyviä aineen kasaantumia, jotka kerääntyvät pinnoille (Tribble 2000, 61). Partikkelikontaminaatiot saattavat aiheuttaa komponenttien tai valmiiden tuotteiden toimintahäiriöitä, esimerkiksi moottorin toimintahäiriön, jolla on suora vaikutus ihmisten terveyteen ja turvallisuuteen. Siksi teknisellä puhtaudella on suuri merkitys autoteollisuudessa. (Zeiss n.d.; ThermoFisher n.d.)

Partikkelien lähteenä voi olla ympäristö tai valmistusprosessi. Jos lähteenä on ympäristö, partikkelit kulkeutuvat ilman tai ihmisten välityksellä. Vastaavasti lähteen ollessa valmistusprosessi, komponentti tai valmis tuote altistuu valmistusprosessissa muodostuville partikkeleille prosessin aikana. Autoteollisuudessa suurimman riskin aiheuttavat partikkelit, jotka muodostuvat valmistusprosessin vaiheiden aikana. Tällaisia vaiheita voivat olla esimerkiksi puristaminen tai liittäminen. Edellä esitellyissä valmistusvaiheissa voi muodostua partikkeleita, jotka ovat muodoltaan, kooltaan tai materiaaliltaan sellaisia, että ne heikentävät tai estävät komponentin toimintoja. Valmistusvaiheessa muodostuvien partikkeleiden aiheuttamat haitat komponenttien toiminnoissa ovat useimmiten vakavampia kuin ympäristöstä laskeutuvien partikkelien. Tämä perustuu siihen, että ympäristössä leijuvien partikkeleiden massa on pienempi kuin niiden, jotka muodostuvat suoraan komponentin valmistusprosessissa. Komponentin altistuminen partikkelikontaminaatiolle valmistusvaiheessa on kriittistä myös sen vuoksi, ettei komponenttia voida suojata esimerkiksi peittämällä valmistusprosessin aikana. Tällöin partikkelit pääsevät suoraan kontaktiin mahdollisesti herkkien osien kanssa. Taulukossa 1 (sivu 8) on esitelty erilaisia partikkeleiden kulkeutumismekanismeja ja niiden merkittävyyttä komponenttien kontaminoitumiselle. (VDA 19.2 2010, 18.)

TAULUKKO 1. Partikkelien kulkeutumismekanismeja sekä mekanismin merkittävyys komponentin kontaminoitumiselle (VDA 19.2 2010, 19).

Partikkelien kulkeutumis- mekanismi	Merkittävyys komponentin kontaminoitumiselle
Kulkeutuminen ympäristöstä ilmakeitse	Matala
Ballistinen leviäminen (kappaleella selkeä lentorata)	Korkea, mutta rajoitettu paikallisesti
Painovoima	Erittäin korkea, mutta rajoitettu paikallisesti
Kulkeutuminen pinnan tai henkilöstön kautta	Korkea

Partikkeleiden tuottama riski riippuu valmistettavan komponentin herkkyydestä. Tämän vuoksi teknistä puhtautta arvioitaessa on otettava huomioon mahdollista vaaraa aiheuttavat partikkelilähteet juuri kyseisiä tuotteita tai komponentteja ajatellen. Lisäksi on huomioitava, mitkä partikkelit ovat juuri kyseiselle tuotteelle haitallisia. Ei ole järkevää eikä taloudellista pyrkiä estämään kaikkien partikkeleiden syntymistä tai kulkeutumista, vaan ainoastaan niiden, jotka ovat mahdollisia riskitekijöitä. Arvioitaessa partikkeleiden vaarallisuutta on otettava huomioon esimerkiksi partikkelien materiaali, koko, määrä sekä mahdollisen vaurion mekanismi esimerkiksi kiinnijuuttuminen ja oikosulku. Partikkeleille on määritetty kokoluokat, joita voidaan käyttää hyväksi partikkeleiden kokoon perustuvassa riskiarvioinnissa (taulukko 2, sivu 9). (VDA 19.2 2010, 18, 22; VDA 19.1 2015, 19.)

TAULUKKO 2. Partikkelien kokoluokitus (VDA 19.2 2010, 151).

Partikkeli- koko (μm)	VDA 19.1 -stan- dardin mukainen kokoluokittelu
$5 \leq x < 15$	B
$15 \leq x < 25$	C
$25 \leq x < 50$	D
$50 \leq x < 100$	E
$100 \leq x < 150$	F
$150 \leq x < 200$	G
$200 \leq x < 400$	H
$400 \leq x < 600$	I
$600 \leq x < 1000$	J
$1000 \leq x$	K

2.2 Autoteollisuuden teknistä puhtautta ohjaavat standardit

Teknisen puhtauden merkitys autoteollisuudessa näkyy kansainvälisinä standardeina. Autoteollisuuden teknistä puhtautta ohjaavat VDA 19- (Verband der Automobilindustrie 19) sekä ISO 16232 -standardit (International Organization for Standardization 16232). Kyseiset standardit tulivat voimaan 2000-luvun alussa, ja niiden kautta epäpuhtauksien analysoinnista tuli pakollista autoteollisuudessa. Standardien tarkoituksena on luoda autoteollisuuteen vertailtavia menetelmiä puhtauden arviointiin sekä määritellä teknisen puhtauden hallinta sekä sen todentamisessa käytettävät analysointimenetelmät. (Brodzik, Faber & Nycz 2021, 41; ThermoFisher n.d.)

VDA 19 -standardi on Saksan autoteollisuuden liiton (Verband der Automobilindustrie) laatima. VDA 19 -standardi pohjalta on laadittu ISO 16232 -standardi, joka on kansainvälisen standardointiorganisaation (International Organization for Standardization) laatima. Standardit ovat keskenään hyvin samanlaisia. Erona

niiden välillä on, että VDA 19 -standardi sisältää enemmän yksityiskohtaista tietoa ja esimerkkejä kuin ISO 16232 -standardi. VDA 19 -standardissa on esimerkiksi määritetty kokoluokat, joita voidaan käyttää partikkelien kokoon perustavassa riskiarvioinnissa (taulukko 2, sivu 9). Edellä mainittujen standardien lisäksi auto- ja komponenttivalmistajilla on omia sisäisiä standardeja, jotka määrittävät puhtaustason sekä täsmentävät puhdistusprosessia. Taulukossa 3 on esitelty standardien ja eri valmistajien asettamia määreitä kontaminanteille. (ThermoFisher n.d.; Brodzik ym. 2021, 41.)

TAULUKKO 3. Standardien sekä auto- ja komponenttivalmistajien määritelmiä erilaisilla partikkelikontaminaatioille (Brodzik ym. 2021, 43, muokattu).

Standardi/ Alkuperäinen valmistaja	Partikkelit		Kuidut
ISO 16232/ VDA 19.1	Pieni kiinteä rakenne, joka on muodostunut joko orgaanisesta tai epäorgaanisesta aineksesta		pitkä, ohut rakenne, pitkitäisen pituuden ja maksimisisäympyrän halkaisijan suhde: ≥ 20 ; leveys $\leq 50 \mu\text{m}$
VW	Kovat partikkelit, metalliset partikkelit (sisältäen kiiltävät ja ei-kiiltävät: korrooituneet, hapettuneet); ei-metalliset hiomajäämät (hiekkajäämät ja hiekkapuhalluspartikkelit ja hiertymispartikkelit, muut hioutuneet partikkelit)	Pehmeät partikkelit: ei-metalliset, ei-hioutuneet	Kuidut: puuvillakuidut, metalliset kuidut, lasikuidut
BMW	Kovat partikkelit - mineraalit (H1): mineraalit, keraaminen luonne (korrundi Al_2O_3 , silikonikarbidi SiC, boorinitraatti BN, timantti C, hiekka SiO_2 , muut nitriitit, oksidit, karbidit, muut mineraalit ja keraamit, lasi, lasikuidut, mineraalikuidut Kovat partikkelit - metalliset (H2): teräs, kovat pinnoitusmateriaalit (kulutuskestävät pinnoitteet)		
Mercedes-Daimler	Jäännöslika: koneistuslastut, hiekka, hiekkapuhallusmateriaali, metallit, hiomajäämät, nukka, maali, muoviset partikkelit		
GM	Koneistuksesta, valuprosessista jne. aiheutuvat valupurseet ja irtotainelastut		
Volvo	Kiinteä aines Kovat partikkelit	Pehmeät partikkelit: esimerkiksi tekstiilit, nukka, paperi, muovit, kalvo, hiukset/karvat	Partikkelit joiden pituus/halkaisija suhde: $\geq 20:1$, minimi pituus: $500 \mu\text{m}$
Scania	Kovat partikkelit: koneistuslastut, tavalliset metalliset partikkelit, hiekkapuhallusmateriaali, valumajäämät, hiekka, keraamit, kovat hapettumat, hiomajäämät, kovat pinnoitusmateriaalit, amorfiset lasipartikkelit	Pehmeät partikkelit: pinnoite/maali partikkelit, hapettumahiutaaleet, muovit, puupartikkelit, yhdistyneet kuidut, kemialliset jäämät	Yksittäinen pidentynyt, pehmeät partikkelit, joiden pituus/halkaisija suhde: $\geq 20:1$

2.3 Teknisen puhtauden analysointimenetelmät

VDA 19.1 -standardissa esitellään useita teknisen puhtauden määrittämiseksi käytettäviä analyysimenetelmiä, jotka jaetaan kolmeen ryhmään: standardianalyysit (standard analyses), laajennetut analyysit (extended analyses) ja lyhennetyt analyysit (shortened analyses). Riippuen käytettävän analyysin kyvykkyydestä

voidaan määrittää erilaisia partikkelityyppejä (metalliset, ei-metalliset ja kuidut), partikkelien koko ja määrä sekä esimerkiksi partikkelien kemiallinen koostumus ja kovuus. (VDA 19.1 2015, 42–46; Brodzik ym. 2021, 42.)

Standardianalyysimenetelmiä ovat gravimetrinen menetelmä ja valo-optinen menetelmä. Gravimetrisellä menetelmällä määritetään komponentista eristettyjen partikkelien kokonaismassa. Valo-optisessa menetelmässä käytetään mikroskopiaa tai skanneritekniikkaa partikkelien kokoluokkien ja ominaisuuksien määrittämiseen. Partikkelien määritettäviä ominaisuuksia ovat esimerkiksi pituus, leveys, kuitumaisuus, metallinen kiilto sekä määrä. (VDA 19.1 2015, 43–45.)

Laajennettuja analyysimenetelmiä ovat osa valo-optisista menetelmistä, tietokonetomografia, SEM/EDX (pyyhkäisyelektronimikroskopia/energiadiispersiivinen röntgenspektroskopia), LIBS (laseravusteinen hajotusspektroskopia), Raman-spektroskopia ja infrapunaspektroskopia. Laajennettuja analyysijä käytetään, jos halutaan tietää partikkeleiden tarkempia ominaisuuksia, joita on esimerkiksi alle 50 µm koko. Lisäksi muiden mittojen kuin pituuden ja leveyden sekä tarkempien materiaalien ominaisuuksien kuten kovuuden määrittämiseen tarvitaan laajennettuja analyysijä. (VDA 19.1 2015, 44–45.)

Lyhennettyjä analyysimenetelmiä ovat Liquid Particle Counter -menetelmä (määrittää partikkelien koon ja lukumäärän nesteestä) sekä Optical Filter-Blocking -menetelmä (nestemäinen näyte ohjataan läpi suodattimesta, johon jääneet partikkelit analysoidaan kameran avulla). Lyhennetyt analyysit ovat analyysijä, jotka tarvitsevat erotusvaiheen, mutta jotka eivät vaadi suodattamista varsinaisen analyysin suorittamiseksi. Koska analyysit eivät vaadi suodattamista, on niiden avulla mahdollista analysoida suurempi määrä komponentteja samassa ajassa. On kuitenkin huomioitava, etteivät lyhennettyjen analyysien tulokset täsmää täysin standardianalyysien tuloksiin ja tämän vuoksi lyhennettyjä analyysijä ei käytetä puhautusrajojen määrittämiseen, ellei sitä ole erityisesti sovittu. Taulukossa 4 (sivu 12) on vertailtu kaikkien edellä mainittujen analyysimenetelmien ominaisuuksia ja rajoituksia. (VDA 19.1 2015, 44–45, 193, 197).

TAULUKKO 4. Teknisen puhtauden analysointimenetelmiä (VDA 19.1 2015, 46, muokattu).

	Menetelmä	Informaatio						Rajoitukset		
		Kokonaispartikkelil-	Partikkelin koko			Muut ominaisuudet				
			Pituus	Leveys	Korkeus	Metallinen kiilto	Materiaali			
Standardiana-	Gravimetria	x						Ei anna tietoa yksittäisistä partikkeleista		
	Skanneritekniikka		x	x			(x) ²	Voidaan verifioida vain kuvalla. Suuremman suurennoksen tai muiden kontrastia parantavien menetelmien käyttö ei ole mahdollista.		
	Valomikroskopia		x	x	(x) ¹		(x) ²	Kaikki ominaisuudet eivät ole käytössä samaa optiikkaa käyttäessä		
Laajennetut analyysit	Tietokone-tomografia		x	x	x ⁵			Kestoltaan pidentyneet analyysiajat		
	SEM/EDX		x	x				x	Ei erottelua orgaanisten ja epäorgaanisten partikkelien välillä	
	LIBS		x ³	x ³					x	Ei erottelua orgaanisten ja epäorgaanisten partikkelien välillä
	Raman-spektroskopia		x ³	x ³					x	Metalleja ei havaita, rajoituksia fluoresoivien ja mustien partikkeleiden kanssa
	Infrapunaspektroskopia		x ³	x ³					x	Vain orgaaniset partikkelit, ei täysin automatisoitu analyysi
Lyhennetyt analyysit	Liquid Particle Counter – menetelmä		x ⁴							Tulokset voivat olla epätarkkoja, jos näytteessä on ilmakuplia
	Optical Filter-Blocking – menetelmä		x	x						Tulokset voivat olla epätarkkoja, jos linssissä on likaa/jäämiä

() Riippuen optiikasta ja mallista

¹ Mahdollista materiaalmikroskoopeilla, joissa pieni kuvakentän syvyys (tarkennusalue näytteen taustan ja partikkelin korkeimman kohdan välillä)

² Edellytys: Manuaalinen kaksoistarkistus

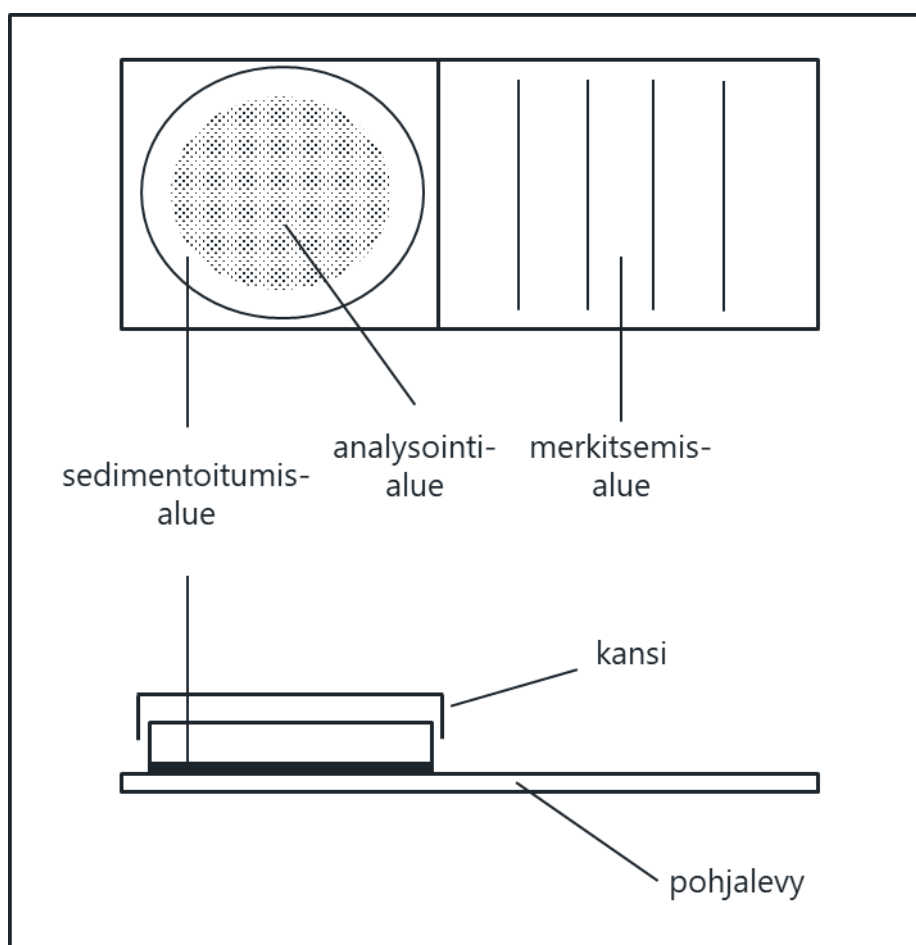
³ Materiaalianalyysit automatisoidulla valo-optisella partikkelidetektioilla

⁴ Koko määritetään usein ympyrän halkaisijalla, jolla vastaava pinta-ala

⁵ Kaikki kokoon liittyvä tieto voidaan määrittää (määrä, tiheys, poikkileikkaus)

2.3.1 Partikkeliloukkuanalyysi

Teknisen puhtauden valvonnassa voidaan käyttää partikkeliloukkuja (kuvio 1). Partikkeliloukkujen toiminta perustuu sedimentoitumiseen. Ilmassa leijuvat sekä tuotantoprosessissa muodostuvat partikkelit sedimentoituvat partikkeliloukkuun ja jäävät kiinni loukussa olevaan liimapintaan. Partikkeliloukkujen käyttökohteita ovat prosessin tutkiminen, partikkelilähteiden määrittäminen sekä tuotantotilan eri alueiden partikkelikoostumuksen selvittäminen. (VDA 19.2 2010, 147–151; VDA 19.1 2015, 144–151.)

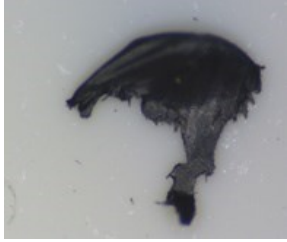
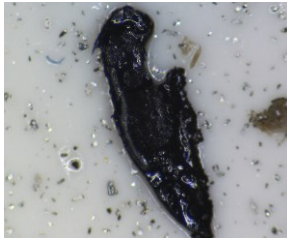
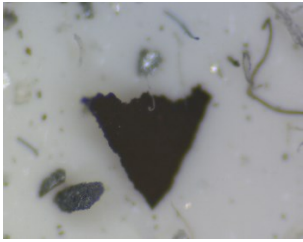

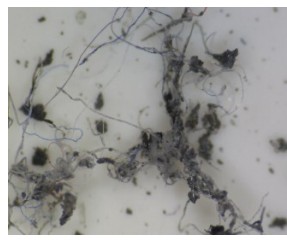


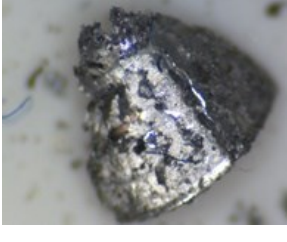
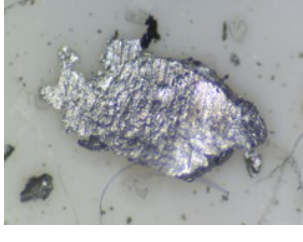
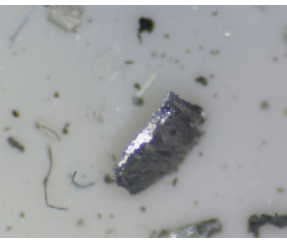
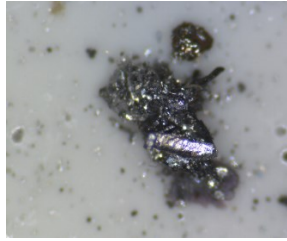






KUVIO 1. Partikkeliloukku (VDA 19.2 2010, 148, muokattu).

Loukkujen sijoittamisessa huomioidaan partikkeleita mahdollisesti muodostavat prosessit tai prosessien vaiheet. Sijaintien päättämässä voidaan käyttää apuna esimerkiksi vika- ja vaikutusanalyysiä (FMEA – Failure Mode and Effects Analysis) tai puhtauden potentiaalinen analyysiä (Analysis of Cleanliness Potentials). Loukut asetetaan niille määritettyihin paikkoihin keräämään partikkeleita ennalta määritetyksi ajaksi. Loukun aktiivinen aika on erään valmistajan mukaan noin 7–

10 vuorokautta (CleanControlling 2016). VDA 19 -standardi ei ota kantaa aktiiviseen aikaan, mutta korostaa, ettei loukku saa olla saturoitunut eli niin täynnä partikkeleita, että se häiritsee partikkeleiden erottumista. Tämä seikka on otettava huomioon aktiivista aikaa suunniteltaessa. Partikkeliloukkujen analysoinnissa käytetään mikroskopiaa tai skanneritekniikkaa. Partikkeleiden pituuden ja leveyden määrittämisen lisäksi heijastavuus eli reflektioisuus voidaan määrittää käyttämällä valomikroskooppia, jossa on polarisaattori. Taulukossa 5 (sivu 15) on esitelty, miten erilaiset partikkelit jaotellaan ryhmiin mikroskooppitutkimuksen perusteella. Taulukon 5 kuvat ovat Valmet Automotive EV Power Oy:n, mutta ne on jaoteltu ryhmiin Brodzik ym. -artikkelin mukaisesti. (VDA 19.2 2010, 122, 147–151, 171, 173; VDA 19.1 2015, 136, 144–151.)

TAULUKKO 5. Erialaisten partikkelien jäsentely ryhmiin ulkoisten ominaisuuksien perusteella (Brodzik ym. 2021, 43–44; Valmet Automotive EV Power Oy 2022).

Typpi	Esimerkkikuva		
Partikkelit, joilla on ei-metallinen ulkonäkö			
			
Partikkelit, joilla on metallinen ulkonäkö			
			
Kuidut			

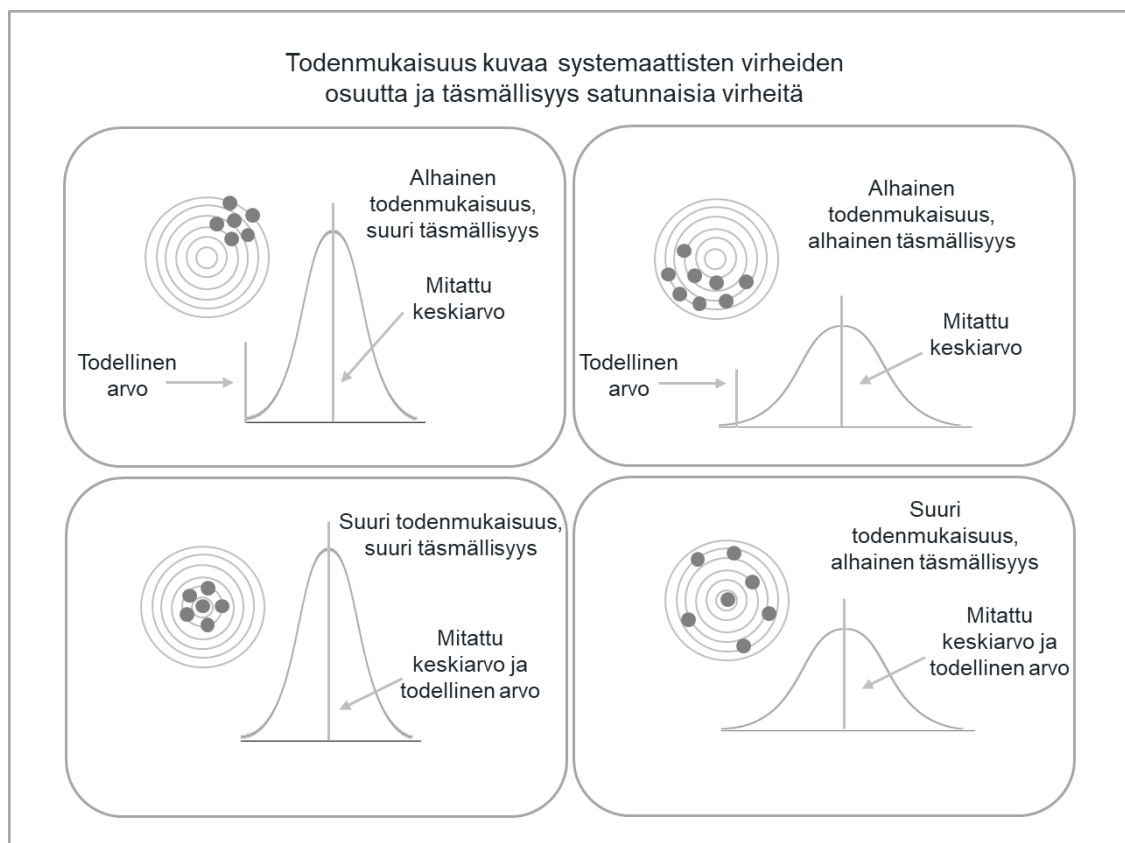
3 MITTAUSMENETELMÄN LAADUNVARMISTUS

3.1 Mittausjärjestelmän analyysi (MSA)

Mittausjärjestelmän analyysi (Measurement System Analysis – MSA) on tilastollinen laadunhallintatyökalu, jolla tutkitaan mittausmenetelmän sekä sen tuottaman datan laatua. Mittausdatan laatu koostuu usean tavallisissa olosuhteissa suoritettun mittauksen tilastollisista ominaisuuksista. MSA:n avulla pyritään kehittämään mittausmenetelmää selvittämällä mikä tai mitkä tekijät aiheuttavat mitatun datan heikon laadun. AIAG:n (Automotive Industry Action Group) mukaan dataa sanotaan huonolaatuiseksi, jos mitatut arvot eroavat merkittävästi referenssiarvosta eli tunnetusta arvosta. MSA:lla verrataan mittavälineitä sekä mittauksen tekijöitä keskenään, jolloin saadaan laskennallinen todiste esimerkiksi kahden mittajaan tulosten välisestä erosta tai laitteen kyvykkyydestä. (Saikaew 2018; Automotive Industry Action Group 2010, 3–4.)

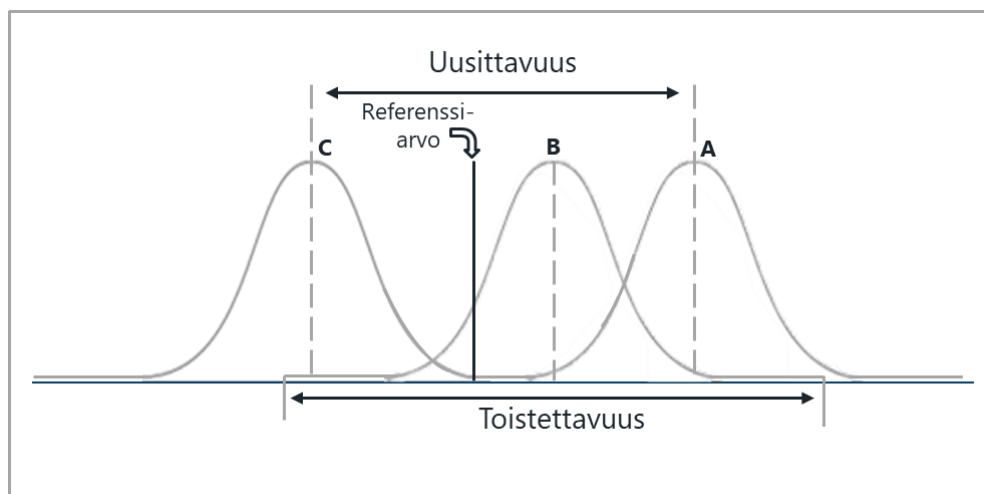
3.1.1 Mittausjärjestelmän tarkkuus

Puhuttaessa tarkkuudesta MSA:ssa, pidetään tarkkuutta mittauksen todenmukaisuuden (trueness) ja täsmällisyyden (precision) kokonaisuutena. Todenmukaisuutta kutsutaan myös joissain lähteissä harhaksi (bias), joka on SFS:n (Suomen Standardisoimisliitto) mukaan systemaattisen mittausvirheen estimaatti. Todenmukaisuus on usealla toistolla mitattujen tulosten keskiarvon ja referenssiarvon yhtäpitävyys. Täsmällisyys kuvastaa toistolla mitattujen arvojen keskinäistä yhtäpitävyyttä, kun mittaukset on suoritettu määritellyissä olosuhteissa. Mittauksen täsmällisyys koostuu toistettavuudesta (repeatability) ja uusittavuudesta (reproducibility). Kuviossa 2 (sivu 17) on havainnollistettu todenmukaisuus (systemaattiset virheet) ja täsmällisyys (satunnaiset virheet). (Muelaner 2020; SFS-OPAS 99 2010, 32–33; ISO 5725-1 1994, 5.)



KUVIO 2. Todenmukaisuus ja täsmällisyys havainnollistettuna (Hemminki ym. 2011, muokattu).

Mittauksen toistettavuus on laitteiston kyky saavuttaa sama tulos samalla tarkkuudella mittausta toistettaessa. Toisin sanoen, toistettavuudella mitataan sitä, kuinka lähellä mittaustulokset ovat toisiaan, kun mittauksesta tehdään toistoja samoissa mittausolosuhteissa käyttäen samaa laitteistoa. Toistettavuudella kuvataan yleisimmin sellaisten mittausten täsmällisyyttä, joissa on rajalliset olosuhteet, kuten yksittäinen mittaja. Toistettavuus on havainnollistettu kuviossa 3 (sivu 18), jossa toistettavuus muodostuu yhden mittaajan tulosjakauman vaihtelusta. (Benbow, Elshennawy & Walker 2012, 76, 140.)



KUVIO 3. Toistettavuus ja uusittavuus havainnollistettuna (Barbosa, Hermosilla, & Peres 2014, muokattu).

Mittauksen uusittavuus on kahden mittauksen välistä yhtäpitävyyttä, mitkä on tehty samaa näytettä käyttäen esimerkiksi eri laboratorioissa. Uusittavuudella kuvataan yleisimmin sellaisten mittausten täsmällisyyttä, missä esiintyy vaihtelua eri kokonaisuuksien välillä, esimerkiksi sama mittausten menetelmä, mutta eri mitaajat. Tällaisia erilaisia kokonaisuuksia voivat olla esimerkiksi eri laboratoriot, laboratorion eri laitteet tai eri mitaajat. Uusittavuus on havainnollistettu kuviossa 3, jossa uusittavuus muodostuu kaikkien kolmen mitaajan tulosjakaumien keskiarvojen vaihtelusta. (Benbow ym. 2012, 76.)

3.2 MSA-metodeja

Usein käytettyjä MSA-työkaluja ovat niin sanotut gage-tutkimukset eli mittausmenetelmän tutkimukset. Niiden avulla pyritään selvittämään mittauksen tarkkuutta. Gage-tutkimuksia ovat esimerkiksi tyypin 1 gage -tutkimus (Type 1 Gage Study/Gage Repeatability & Bias), attribuutti gage R&R -tutkimus (Attribute Gage R&R/Attribute Agreement) sekä gage R&R -tutkimus (Gage Repeatability & Reproducibility), josta on tarkempaa tietoa luvussa 3.3. (Muelaner 2020; Delgado ym. Santos 2018.)

Tyypin 1 Gage -tutkimuksessa selvitetään mittausmenetelmän todenmukaisuus sekä toistettavuus. Tutkimuksessa mitataan kalibroituja referenssinäytettä useita

kertoja lyhyen ajan sisällä. Toistojen määräksi suositellaan yli 50 toistoa. Todenmukaisuus lasketaan vähentämällä referenssiarvo tehtyjen mittausten keskiarvosta. Vastaavasti toistettavuus lasketaan ottamalla keskihajonta kaikista mitaustuloksista. (Muelaner 2020.)

Attribuutti Gage R&R -tutkimusta käytetään verrattaessa mittaajien tekemiä ratkaisuja ja standardia tai referenssiä toisiinsa. Tutkimusta voidaan hyödyntää tilanteissa, joissa data on binääristä (voi saada vain kaksi arvoa) ja epäjatkovaa eli esimerkiksi datan luokittelu on hyvä/huono tai hyväksyty/hylätty. Tutkimuksessa mittaajat arvioivat samat näytteet satunnaisessa järjestyksessä vähintään kahdella toistolla. Tuloksena saadaan tietoa siitä, kuinka tarkkoja mittaajien arviot kutakin näytettä kohtaan ovat ja mitkä näytteet ovat olleet mittaajille kaikkein vaikeimpia arvioida. Attribuutti Gage R&R -tutkimuksen avulla pystytään tutkimaan virhettä, joka muodostuu mittaajien subjektiivisesta arvioinnista. (Delgado ym. 2018; Kaunismäki 2020.)

3.3 Gage R&R

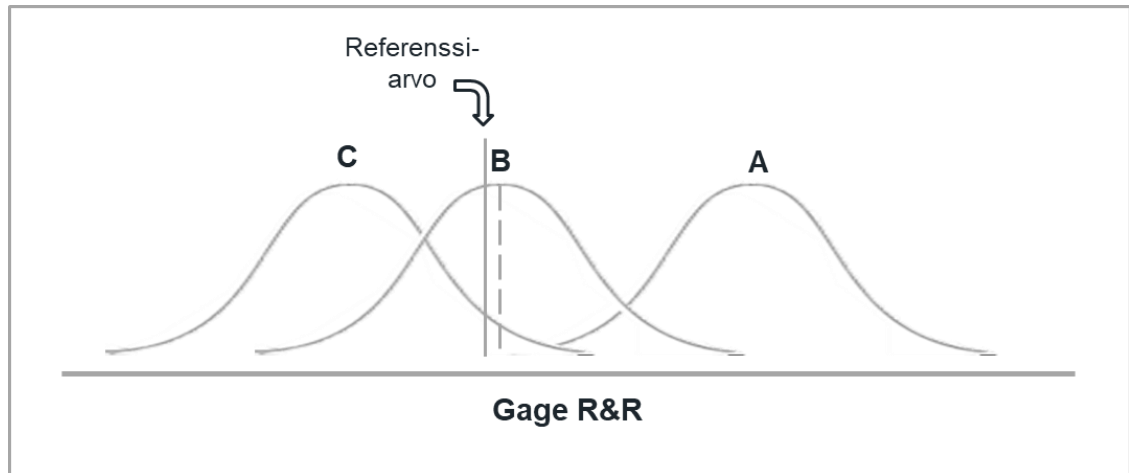
Gage R&R kuvaa mittausmenetelmän vaihtelua. Gage R&R -tutkimuksella määritetään mittausmenetelmän toistettavuus sekä uusittavuus eli täsmällisyys (kaava 1). Tutkimuksessa toistettavuus määrittää mittauksessa olevan vaihtelun ja uusittavuus määrittää eri mittaajien tekemien mittausten välisen vaihtelun. (American Society for Quality n.d.)

$$\sigma^2_{GRR} = \sigma^2_{toistettavuus} + \sigma^2_{uusittavuus}, \quad (1)$$

jossa σ^2_{GRR} on Gage R&R:n eli mittausmenetelmän varianssi, $\sigma^2_{toistettavuus}$ on toistettavuuden varianssi ja $\sigma^2_{uusittavuus}$ on uusittavuuden varianssi. Varianssi ilmaisee vaihtelua. (Automotive Industry Action Group 2010, 57; American Society for Quality n.d.)

Gage R&R -tutkimuksen vaihtelu on havainnollistettu kuviossa 4 (sivu 20), jossa kirjaimet edustavat eri mittaajia ja käyrät kunkin mittaajan mittaamien tulosten

jakaumaa. Gage R&R koostuu kaikkien mittaajien tulosjakaumista. (Automotive Industry Action Group 2010, 57.)



KUVIO 4. Gage R&R -tutkimuksen vaihtelu havainnollistettuna (Automotive Industry Action Group 2010, 57, muokattu).

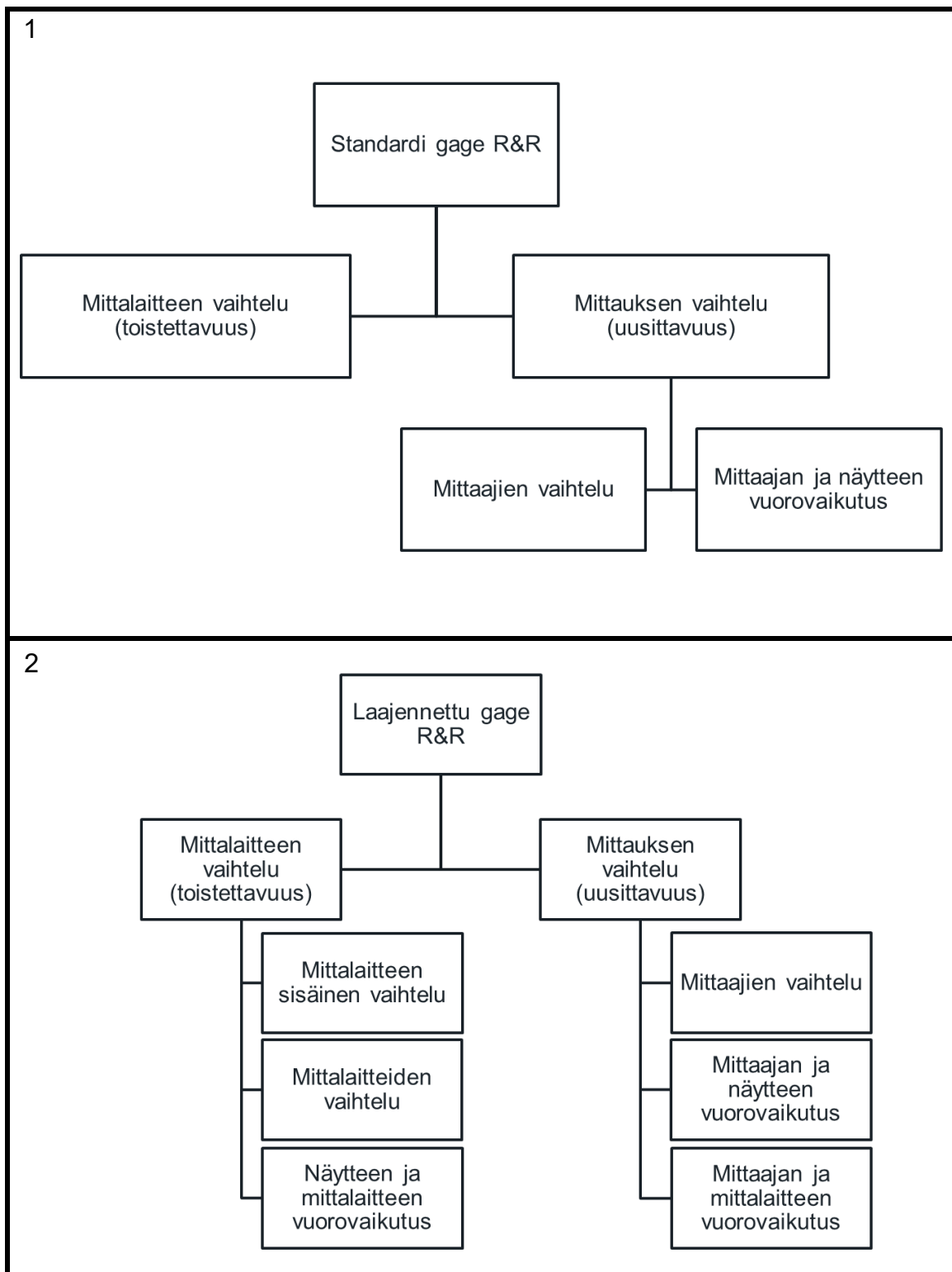
AIAG on asettanut taulukon 6 (sivu 21) mukaiset yleisohjeet mittausmenetelmän arviointiin gage R&R -tutkimuksen tulosten perusteella. Taulukossa on mittausmenetelmän vaihtelun prosenttiosuus kokonaisvaihtelusta (Gage R&R:n osuus kokonaisvaihtelusta) ja tätä vastaava päätös siitä, onko mittausmenetelmä hyväksyttävissä täsmällisyyden suhteen. (Automotive Industry Action Group 2010, 78.)

TAULUKKO 6. AIAG:n yleisohje mittausmenetelmän arvioinnille gage R&R -tulosten perusteella (Automotive Industry Action Group 2010, 78).

Mittausmenetelmän osuus kokonaisvaihtelusta	Päätös	Kommentit
Alle 10 %	Hyväksyttävä mittausmenetelmänä	Suositeltu, erityisen hyödyllinen tilanteissa, joissa tehdään osien lajittelua ja luokittelua sekä tilanteissa, joissa vaaditaan tarkkaa prosessin hallintaa.
10–30 %	Voidaan mahdollisesti hyväksyä joillekin soveluksille	Hyväksymisessä on otettava huomioon esimerkiksi sovelluksen merkitys, mittauslaitteiston kustannus sekä uusintatyön tai korjauksen kustannukset. Pitää saada asiakkaan hyväksyntä mittausmenetelmän käytölle.
yli 30 %	Hylätty	Mittausmenetelmää tulee kehittää. Tämä tilanne voidaan mahdollisesti selvittää käyttämällä sopivaa mittausstrategiaa. Esimerkiksi tulosten keskiarvon käyttäminen lopullisen mittausvaihtelun vähentämiseksi.

3.3.1 Menetelmät ja datan analysointi

Gage R&R:n toteuttamiseen on kolme erilaista menetelmää: risteävä (crossed), sisäkkäinen (nested) sekä laajennettu (expanded). Edellä mainituista menetelmistä risteävä ja sisäkkäinen ovat niin sanottuja standarditutkimuksia (kuvio 5, sivu 22), joissa on mukana kaksi tekijää (mittaaja ja näyte). Vastaavasti laajennetussa menetelmässä (kuvio 5, sivu 22) tekijöitä on kolme tai enemmän. Valittaessa menetelmää gage R&R -tutkimuksen toteuttamiseen on otettava huomioon käytettävän datan määrä sekä tuhoutuuko tutkittava näyte analyysiä suoritettaessa. (American Society for Quality. n.d.)



KUVIO 5. Paneelissa 1 standardi gage R&R -menetelmien sisältö ja paneelissa 2 laajennetun gage R&R -menetelmän sisältö (American Society for Quality n.d., muokattu).

Risteävää gage R&R -menetelmää käytetään tilanteissa, joissa näytteen analysointi ei vahingoita tai tuhoa näytettä. Koska näyte ei tuhoudu analysoitaessa, mittaajat mittaavat samoja näytteitä useita kertoja. Esimerkki tällaisesta analyysistä on kappaleen pituuden mittaaminen. (American Society for Quality. n.d.)

Sisäkkäistä gage R&R -menetelmää käytetään kun näytteen analysointi vahingoittaa tai tuhoaa näytteen. Näytteen tuhoutumisesta johtuen jokainen mittaaja mittaa jokaisella mittauskerralla eri näytettä. Tämän menetelmän käytön kannalta on tärkeää, että näytteet ovat keskenään identtisiä. Sisäkkäisen gage R&R -menetelmän käyttö tulee kysymykseen esimerkiksi tilanteessa, jossa tutkitaan, kuinka paljon voimaa vaaditaan köyden katkaisemiseksi. (American Society for Quality. n.d.)

Laajennettua gage R&R -menetelmää käytetään kun halutaan sisällyttää tutkimukseen muitakin tekijöitä kuin mittaaja ja näyte. Laajennettua menetelmää voi käyttää, vaikka data sisältäisi tyhjiä datapisteitä tai datan määrä olisi pienempi, mikä ei standardimenetelmiä käytettäessä ole mahdollista. Laajennetun menetelmän käyttökohde voisi olla esimerkiksi tilanne, jossa halutaan vertailla eri laboratorioissa olevien laitteiden ja niitä käyttävien eri mittaajien tulosten toistettavuutta ja uusittavuutta. (American Society for Quality. n.d.)

Valitulla Gage R&R -menetelmällä saatua dataa voidaan käsitellä usealla eri tavalla. ANOVA (Analysis of Variance – varianssianalyysi) on tilastollinen tekniikka, joka on kaikkein tarkin tapa analysoida gage R&R:llä saatua dataa. ANOVA-tekniikassa varianssi jaotellaan neljään osaan: näytteet, mittaajat, vuorovaikutus näytteiden ja mittaajien välillä sekä toistoista johtuva laitteiston virhe. (Muelaner 2020; Automotive Industry Action Group 2010, 123.)

3.3.2 Gage R&R -tutkimuksen toteuttaminen

Gage R&R -tutkimuksen toteuttamiseen on olemassa yleiset käytännöt. Tutkimus toteutetaan käyttämällä vähintään 10 näytettä, jotka on valittu edustavasti eli ne kuvastavat koko näytteiden kokonaisuutta, jota mittausmenetelmällä tavallisesti analysoidaan. Tutkimukseen osallistuvien mittaajien tulisi olla henkilöitä, jotka

käyttävät tutkittavaa mittausmenetelmää jatkuvasti. Mittaajien ja toistojen määrää valitessa on otettava huomioon tekijöitä, kuten näytteiden monimutkaisuus, näytteiden mittasuhteet sekä asiakasvaatimukset. Ohjeellinen mittaajien määrä on noin kolme ja toistojen määrä myös noin kolme. Toistoilla tarkoitetaan, että joka toistolla mittaaja analysoi kerran kaikki näytteet. Mittaajien pitää mitata näytteet satunnaisessa järjestyksessä ja mittaamisessa käytetään tavallisia toimintatapoja, työohjetta sekä kalibrointikäytäntöjä. (Automotive Industry Action Group 2010, 74, 104; Muelaner 2020.)

3.3.3 Gage R&R -tutkimuksen tulosten analysointi

Käytettäessä ANOVA-tekniikkaa datan analysoinnissa tutkimuksen kokonaisvaihtelun komponentteja ovat Gage R&R:n vaihtelu eli mittausmenetelmän vaihtelu sekä näytteiden vaihtelu. Mittausmenetelmän vaihtelu koostuu edelleen toistettavuuden ja uusittavuuden vaihtelusta. Kokonaisvaihtelun komponenteille määritetään varianssit (varianssikomponentti – VarComp). Komponentin VarComp-arvon neliöjuuri on komponentin keskihajonta (standard deviation – StdDev). Keskihajonnan avulla voidaan määrittää komponentin vaihtelu (Study Var) sekä prosentuaalinen vaihtelu kokonaisvaihtelusta eli %Study Var. (American Society for Quality. n.d.; Kaunismäki 2020.)

Vaihtelua kuvataan varianssilla. Varianssikomponentin arvo kuvaa komponentin varianssin osuutta kokonaisvarianssista. VarComp-arvo on additiivinen eli komponenttien VarComp-arvot voidaan laskea yhteen ja summa muodostaa kokonaisvaihtelun VarComp-arvon. (Kaunismäki 2020.)

Keskihajonta (standard deviation – StdDev) kuvastaa mittaustulosten jakautumista. Keskihajonta voidaan määrittää kaavalla 2 (sivu 25), jossa määrittäminen tehdään varianssikomponentin (VarComp) avulla. Keskihajonta ei ole additiivinen, joten suureet, joiden laskemisessa käytetään keskihajontaa eivät ole additiivisia. Tämä tarkoittaa, että kokonaisvaihtelun arvo ei muodostu yhteen laskemalla komponenttien keskihajontojen arvoja toisiinsa. (Kaunismäki 2020.)

$$\sigma = \sqrt{Var\ Comp}, \quad (2)$$

jossa σ on keskihajonta (Std Dev) ja *VarComp* komponentin varianssi. (Kaunismäki 2020.)

Tutkimuksen komponenteille saadaan määritettyä vaihtelu (study variation – Study Var) tekijän keskihajonnan avulla. Komponentin Study Var -arvon laskemisessa käytetään kaavaa 3, jossa se määritetään keskihajonnan avulla. Komponenttien Study Var -arvojen prosentuaaliset osuudet (%Study Var) lasketaan kokonaisvaihtelun Study Var -arvosta kaavalla 4. Komponenttien %Study Var -prosentit muodostavat tutkimuksen vaihtelun komponentit, joista mittausmenetelmän vaihtelun (Gage R&R -vaihtelu) prosenttiosuutta käytetään mittalaitteen täsmällisyyden arvioinnissa (taulukko 6, sivu 21). (Kaunismäki 2020.)

$$Study\ Var = 6 \cdot \sigma, \quad (3)$$

jossa *Study Var* on komponentin vaihtelu ja sigma eli komponentin keskihajonta (σ) kerrottuna kuudella kuvaa, että normaalijakauman mukaisesti jakautuvasta datasta 99,73 prosenttia sisältyy kuuden sigman leveyteen. (Kaunismäki 2020.)

$$\%Study\ Var = \frac{Study\ Var_{komponentti}}{Study\ Var_{kokonaisvaihtelu}} \cdot 100, \quad (4)$$

jossa %*Study Var* on komponentin prosentuaalinen vaihtelu, *Study Var*_{komponentti} on komponentin Study Var -arvo, *Study Var*_{kokonaisvaihtelu} on kokonaisvaihtelun Study Var -arvo ja jakolasku kerrotaan 100:lla, jotta tulos saadaan prosentteina. (Kaunismäki 2020.)

Erotettavien ryhmien lukumäärä (Number of Distinct Categories - NDC) kuvaa kuinka monta erillistä ryhmää mittausmenetelmä pystyy erottamaan tutkituista näytteistä. AIAG suosittelee erotettavien ryhmien lukumääräksi vähintään viittä ryhmää (Automotive Industry Action Group 2010, 47). Jos mittausmenetelmän erotettavien ryhmien lukumäärä on kaksi, tarkoittaa se, että menetelmä pystyy

jakamaan mittaukset vain kahteen ryhmään eli esimerkiksi suuriin ja pieniin mittauksiin. Erotettavien ryhmien lukumäärää voidaan käyttää mittausmenetelmän erotuskyvyn arvioimiseen. Kaavaa 5 käyttämällä voidaan laskea mittausmenetelmän erotettavien ryhmien lukumäärä. (Automotive Industry Action Group 2010, 46–47; Kaunismäki 2020.)

$$NDC = \left(\frac{\sigma_{\text{näytteet}}}{\sigma_{GRR}} \right) \cdot \sqrt{2}, \quad (5)$$

jossa NDC on erotettavien ryhmien lukumäärä (Number of Distinct Categories), $\sigma_{\text{näytteet}}$ on näytteiden vaihtelun keskihajonta, σ_{GRR} on mittausmenetelmän vaihtelun keskihajonta ja $\sqrt{2}$ on vakiotermi. (Automotive Industry Action Group 2010, 198; Kaunismäki 2020.)

4 PARTIKKELIANALYYSIN KEHITTÄMINEN

4.1 Kehitystyön lähtökohdat

Valmet Automotive EV Power Oy:n Salon akkutehtaalla teknisen puhtauden tarkkailussa käytetään partikkeliloukkuja. Partikkeliloukkujen analysoinnissa käytetään Leican DMS 1000 -stereomikroskooppia ja siihen suunniteltua Leican LASX CleanlinessExpert -ohjelmistoa. Kyseisessä mikroskoopissa on polarisaattori, joten metallisten partikkelien havaitsemisessa voidaan käyttää polarisoitua valoa. Laitteisto verifioidaan vuosittain käyttämällä sertifioitua referenssilevyä. Laitteesta oli tehnyt viimeisimmät verifiointit 2.8.2022 sekä 17.01.2023 hyväksytysti. Ennen opinnäytetyön aloittamista mittausmenetelmälle oli tehty tyypin 1 gage - tutkimus, jolla varmistuttiin siitä, että menetelmä on todenmukainen ja toistettava. Tällöin käytettiin edellä mainittua referenssilevyä referenssinäytteenä.

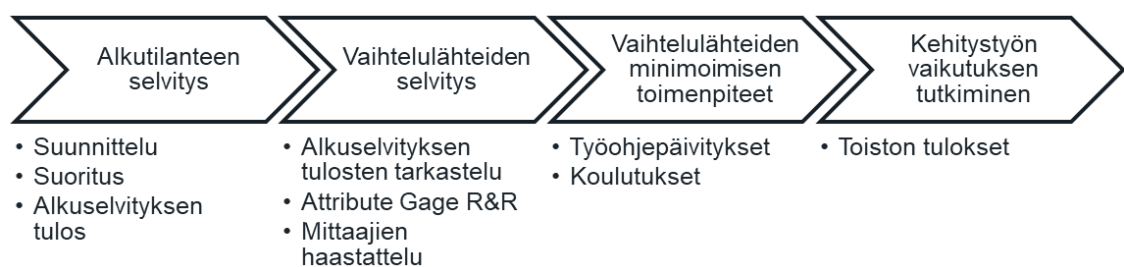
Partikkeliloukuissa olevat objektit jaetaan ominaisuuksiensa mukaan metallisiin, ei-metallisiin partikkeleihin sekä hylättäviin objekteihin (esimerkiksi partikkelikauma) ja kuituihin. Partikkeliloukku saa NOK-tuloksen (ei ok - not ok) jos siellä on partikkeleita, joiden pituus ylittää spesifikaatorajan. Erityistä huomiota kiinnitetään metallisiin ja ei-metallisiin partikkeleihin, joiden pituuden ylittäessä spesifikaatorajan seuraa koko partikkeliloukun hylkääminen eli NOK-tulos. NOK-tuloksen saanut partikkeliloukku indikoi, että linjalla on puhtausongelma, joka mahdollisesti uhkaa tuotteen turvallisuutta ja laatua.

Partikkeliloukkuja käytetään Valmet Automotiven Salon akkutehtaalla kahdella tuotantolinjalla. Molemmat tuotantolinjat jaetaan etuosaan (front end) ja takaosaan (back end). Etuosassa puhtaus on kriittisempää siellä olevien partikkeleille herkempien valmistusvaiheiden vuoksi. Tämän vuoksi etuosassa olleita partikkeliloukkuja analysoitaessa tutkitaan kaikki pituudeltaan yli 590 µm olevat objektit. Etuosan partikkeliloukuille spesifikaatoraja on 600 µm, jolloin partikkeliloukku saa NOK-tuloksen, jos se sisältää rajaa pidempiä partikkeleita. Vastaavasti takaosan partikkeliloukuista tutkitaan kaikki yli 990 µm olevat objektit. Takaosan par-

tikkeliloukuille spesifikaatoraja on 1000 µm. Sekä etu- että takaosassa on erikseen niin sanottu tutkimusraja sekä spesifikaatoraja, jotta nähdään, kuinka paljon löytyy sellaisia objekteja, jotka ovat hyvin lähellä spesifikaatorajaa.

Akkutehtaalla partikkeliloukkuja pidetään aktiivisena seitsemän vuorokautta. Aktiivisen ajan jälkeen partikkeliloukkujen objektikoostumuksessa on merkittäviä eroja, sijainnista riippuen. Molemmat tuotantolinjat jaetaan asemiin (tuotantoprosessin vaiheet), joiden nimeämisessä käytetään lyhennettä OP (lyhenne saksan kielen sanasta operation eli operaatio) ja lyhenteen perässä numeroyhdistelmää. Molemmat linjat sisältävät samat asemat, jolloin eri linjojen samoilla asemilla olevien partikkeliloukkujen objektikoostumus muistuttaa erittäin paljon toisiaan. Partikkeliloukkujen objektikoostumus vaihtelee asemien välillä, koska eri asemilla toteutetaan erilaisia työvaiheita. Esimerkkejä työvaiheista, jotka aiheuttavat hyvin erilaisen objektikoostumuksen ovat ruuvaaminen sekä sähköiset testit. Näistä esimerkeistä ruuvausasemalla ollut partikkeliloukku sisältää suuria määriä objekteja, erityisesti partikkeleja. Vastaavasti sähköisestä testauksesta ei muodostu partikkeleja, jolloin ainoat partikkeliloukkuun kertyneet objektit ovat ympäristöstä kulkeutuvia kuituja tai erittäin pieniä partikkeleja.

Valmet Automotiven Salon akkutehtaalla käytettävän partikkelianalyysin kehittämiseksi tehtävät toimenpiteet on kuvattu kuviossa 6.



KUVIO 6. Partikkelianalyysin kehittämisen vaiheet.

4.2 Alkutilanteen selvitys

4.2.1 Tutkimuksen suunnittelu ja suoritus

Tutkimuksessa päätettiin käyttää 10 näytettä, kolmea mittaajaa ja kahta toistoa. Näytteiden määräksi valittiin gage R&R -tutkimuksen ohjeistettu miniminäytemäärä, koska osa näytteinä toimineista partikkeliloukuista sisälsi paljon analysoitavia objekteja ja suurempi näytemäärä olisi ollut liian kuormittavaa mittaajille. Kymmenellä näytteellä yhden toiston arvioitiin kestävän 2–2,5 tuntia. Mittaajien määräksi valittiin kolme, koska nämä kolme laboratorion työntekijää olivat ainoat, jotka olivat saaneet koulutuksen kyseiseen analyysiin ja suorittavat analyysiä toistuvasti työtehtävänänsä. Toistojen määräksi päätettiin kaksi toistoa, koska uskottiin, että jo kahdella toistolla saadaan näkyviin mahdolliset erot analyysin suorittamisessa. Lisäksi toistojen määrään vaikutti yhden toiston pitkä kesto, mikä johtui näytteiden lukumäärästä sekä yhden näytteen analysointiin kuluvaan analysointiajasta.

Tutkimusnäytteet olivat partikkeliloukkuja tavallisesta teknisen puhtauden monitorointi -prosessista, jotka oli aiemmin analysoitu ja arkistoitu. Näytteiden valinnassa hyödynnettiin laitteiston muodostamia raportteja, jotka olivat tallennettu partikkeliloukkujen analysoinnin yhteydessä. Raporttien pohjalta tehtiin lista potentiaalisista partikkeliloukuista, jotta tutkimukseen valitut näytteet edustaisivat mahdollisimman hyvin normaalia tuotantoprosessia. Tutkimusnäytteet valittiin niin, että ne sisälsivät sekä metallisia että ei-metallisia partikkeleja ja lisäksi kuituja ja hylättäviä objekteja. Opinnäytetyöntekijä analysoi valitut partikkeliloukut uudestaan, jotta varmistuttiin partikkeliloukkujen sisältämien objektien ominaisuuksista.

Analysoinnin perusteella valittiin kymmenen partikkeliloukku gage R&R:n näytteiksi. Näytteitä otettiin molemmilta linjoilta sekä etu- että takaosaan kuuluvilta asemilta. Molempien linjojen kaikkia asemia ei sisällytetty näytevalikoimaan, koska eri linjojen samoilla asemilla olleet partikkeliloukut sisältävät hyvin samanlaisen kokonaisuuden objekteja. Lisäksi joidenkin asemien partikkeliloukut olivat

jatkuvasti tyhjiä tai sisälsivät samanlaisia objekteja kuin valittujen asemien partikkeliloukut. Tutkimukseen valittujen partikkeliloukkujen asemat ovat esiteltynä taulukossa 7.

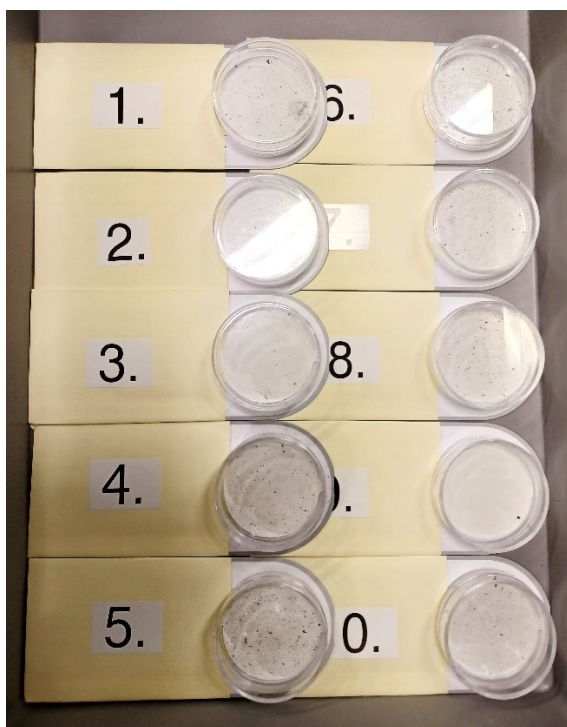
TAULUKKO 7. Näytteiden valinta asemoittain linjoilta 2 ja 3.

Selite	Linja 2		Linja 3	
	Arvo	Huomio	Arvo	Huomio
Partikkeliloukkujen kokonaismäärä linjalla	10		10	
Tutkimukseen valittujen partikkeliloukkujen määrä	6	Linjojen 2 ja 3 tuottamat partikkelit ovat hyvin samanlaisia	4	Linjojen 2 ja 3 tuottamat partikkelit ovat hyvin samanlaisia
Valittujen partikkeliloukkujen aikajana	viikot 46-49	Samalla asemalla partikkelikoostumus on hyvin samanlainen viikoittain	CW 47-49	Samalla asemalla partikkelikoostumus on hyvin samanlainen viikoittain
Asemat, joilta tutkimukseen valitut partikkeliloukut ovat	OP1510, OP1100, OP1920, OP2700		OP1920, OP2500, OP2700	
Asemat, joissa partikkeliloukut ovat yleensä tyhjiä	OP1910, OP2300, OP3710		OP1510, OP1910, OP2300, OP3200, OP3710	
Muut asemat	OP2500, OP2810, OP3200	OP2500: samanlaisia partikkeleita kuin linjan 3 asemalla OP2500 OP2810: Yleensä hyvin vähän partikkeleita, samanlaisia partikkeleita muillakin asemilla OP3200: Yleensä hyvin vähän partikkeleita, samanlaisia partikkeleita muillakin asemilla	OP1100, OP2810	OP1100: Samanlaisia partikkeleita kuin muillakin asemilla, yleensä pienempiä partikkeleita kuin raja (990 µm) OP2810: Hyvin vähän partikkeleita, samanlaisia partikkeleita kuin muillakin asemilla

Valitut näytteet olivat neljän viikon ajanjaksolta (viikoilta 46–49/2022). Kyseinen ajanjakso valittiin sen vuoksi, että partikkeliloukut olivat suhteellisen uusia ja todennäköisesti partikkeliloukuissa ei ollut tapahtunut muutoksia, esimerkiksi objektien irtoamista liimapinnasta. Lisäksi todettiin kyseisen ajanjakson riittävän,

koska kunkin aseman tuottamassa objektikoostumuksessa ei ole pitkälläkään aikavälillä tapahtunut muutoksia, jolloin samassa asemassa olleissa partikkeliloukuissa on samanlainen objektikoostumus.

Tutkimuksessa haluttiin välttyä siltä, että mittaja muistaisi kuinka toimi edellisellä toistolla, vaan tekisi jokaisella kerralla arvion parhaaksi katsomallaan tavalla. Tämän vuoksi päätettiin tehdä aina yksi toisto yhtäjaksoisesti pientä taukoa lukuun ottamatta. Lisäksi saman mittajan toistot päätettiin järjestää eri päivinä. Jotta mittajille ei jäänyt voimakasta mielikuvaa näytteistä, tutkimus toteutettiin sokkona. Tämä toteutettiin peittämällä partikkeliloukuissa olleet tiedot, kuten asema ja aktiivisuus aika. Partikkeliloukuista näkyivät mittajille vain näytenumero sekä itse partikkeliloukut (kuva 1). Näytteiden analysointijärjestys arvottiin kaikkien mittajien molemmille toistoille. Lisäksi näytteet annettiin mittajille, jotta analysointi suoritettaisiin arvotun järjestyksen mukaisesti.

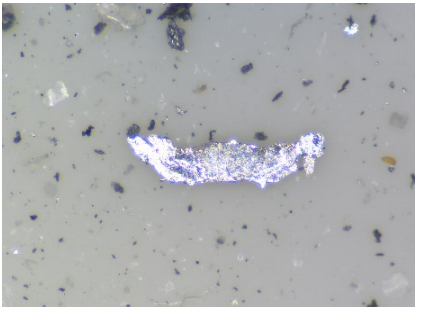

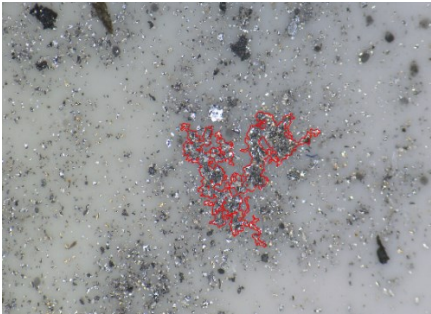
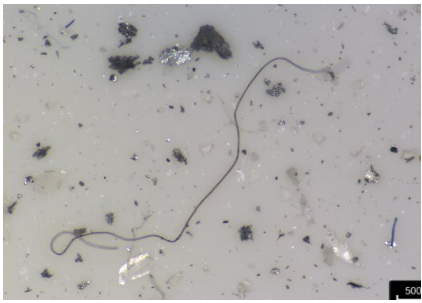


KUVA 1. Näytteiksi valitut partikkeliloukut (Milka Turila 2023)

Tutkimuksessa päätettiin valita käytettäväksi objektikoon rajaksi takaosan raja eli 990 μm , koska matalammalla rajalla analysoitavia objekteja olisi voinut olla yli 50 kappaletta partikkeliloukkuun kohden. Mittaja tarkisti kaikki yli 990 μm pituiset ob-

jektit ja arvioi ne työohjeen mukaisesti metallisiksi, ei-metallisiksi tai hylätyiksi objekteiksi tai kuiduiksi. Taulukossa 8 on esitelty muutamia tutkimuksessa mukana olleiden partikkeliloukkujen objekteja ja niiden arviointi.

TAULUKKO 8. Tutkimuksessa olleiden objektien kuvia ja arviointi

Metallinen partikkeli	
Ei-metallinen partikkeli	
Hylätty objekti	
Kuitu	

Opinnäytetyöntekijä toimi analyysissä avustajana eli antoi aina seuraavan näytteen mittaajan analysoitavaksi. Lisäksi hän teki muistiinpanoja havainnoistaan analyysin suorituksen aikana. Mittaajan kanssa varattiin noin kolmen tunnin aika

yhden toiston tekemiseen, mutta he saivat käyttää analysointiin kaiken tarvitsemansa ajan.

4.2.2 Alkutilanteen selvityksen tulos

Kaikkien mittaajien suoritettua tutkimus kerättiin mittaajien tallentamista analyysiraporteista ylisuurten partikkelien lukumäärä Excel-ohjelmistoon. Varsinaisen gage R&R -tutkimuksen (liite 1, sivu 54) laatiminen toteutettiin Minitab-ohjelmistolla. Minitab-ohjelmisto on Excel-ohjelmiston tyyppinen työkalu, jota käytetään datan tilastolliseen analysointiin. Gage R&R -tutkimukseen otettiin huomioon kaikki ylisuuret objektit (pituudeltaan yli 990 μm), jotka mittaaja oli arvioinut partikkeliksi. Tutkimuksen mitattavana suurena oli ylisuurten partikkelien lukumäärä näytteittäin. Kuituja ja hylättäviä objekteja ei otettu huomioon, ellei mittaaja ollut arvioinut niitä partikkeleiksi. Gage R&R -tutkimuksessa käytettiin risteävää menetelmää (crossed), koska mittaajat analysoivat samoja näytteitä. Datan analysoinnissa käytettiin ANOVA-tekniikkaa, joka on AIAG:n suosittama tekniikka.

Kaikki laskut lasketettiin Minitab-ohjelmistolla, joten seuraavaksi esiteltävät manuaaliset laskut on esitelty tulosten muodostumisen ymmärtämisen vuoksi. Komponenttien VarComp-arvot ovat näkyvissä taulukossa 9.

TAULUKKO 9. Minitab-ohjelmiston laskemat VarComp-arvot tutkimuksen vaihtelun komponenteille.

Komponentti	VarComp (partikkelilukumäärä ²)
Gage R&R	3,3170
Toistettavuus	2,4986
Uusittavuus	0,8184
Näytteet	27,0848
Kokonaisvaihtelu	30,4018

Komponenttien VarComp-arvoista (taulukko 9), lasketaan kaavaa 2 (sivu 25) käyttäen komponenttien keskihajonnat (Std Dev). Koska keskihajonta ei ole additiivinen suure, keskihajonnan laskemisen jälkeen kokonaisvaihtelun arvoa ei

voida laskea summaamalla komponenttien arvoja. Keskihajonnoista lasketaan kaavalla 3 (sivu 25) Study Var -arvot, joista saadaan tutkimuksen komponenttien prosentuaalinen vaihtelu (%Study Var) kaavalla 4 (sivu 25). Laskuesimerkeissä on laskettu mittausmenetelmän kokonaishajonta, Study Var -arvo sekä viimeiseksi %Study Var. Edellä mainitut suureet komponenteille on esitelty taulukossa 10.

$$Std\ Dev_{Gage\ R\&R} = \sqrt{3,3170} = 1,82127$$

$$Study\ Var_{Gage\ R\&R} = 6 \cdot 1,82127 = 10,9276$$

$$\%Study\ Var_{Gage\ R\&R} = \frac{10,9276}{33,0827} \cdot 100 = 33,03\%$$

TAULUKKO 10. Minitab-ohjelmiston laskemat keskihajonnat, Study Var -arvot sekä %Study Var -prosentit tutkimuksen vaihtelun komponenteille.

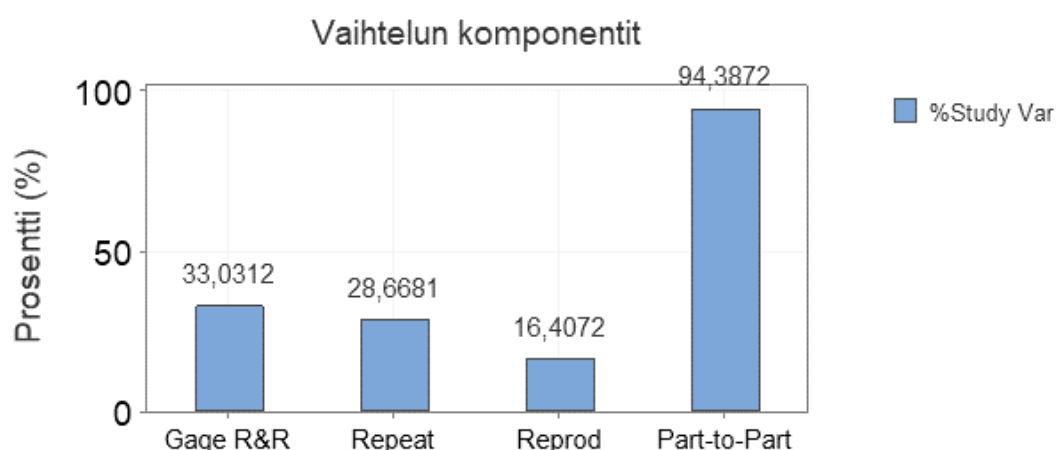
Komponentti	Keskihajonta (partikkelilukumäärä)	Study Var (partikkelilukumäärä)	%Study Var (%)
Gage R&R	1,82127	10,9276	33,03
Toistettavuus	1,58070	9,4842	28,67
Uusittavuus	0,90466	5,4279	16,41
Näytteet	5,20431	31,2258	94,39
Kokonaisvaihtelu	5,51378	33,0827	100,0

Minitab-ohjelmisto määrittää mittausmenetelmälle erotettavien ryhmien lukumäärän käyttämällä kaavaa 5 (sivu 26). Kaavan 5 käyttö on esitelty ja kaavassa käytettävät arvot löytyvät tauluosta 10.

$$NDC = \left(\frac{5,20431}{1,82127} \right) \cdot \sqrt{2} = 4,04 \approx 4$$

Minitab-ohjelmiston määrittämä erotettavien ryhmien määrä mittausmenetelmälle alkutilanteessa on neljä. AIAG:n mukaan erotettavia ryhmiä pitäisi olla vähintään viisi, jotta mittausmenetelmän erotuskyky on riittävä.

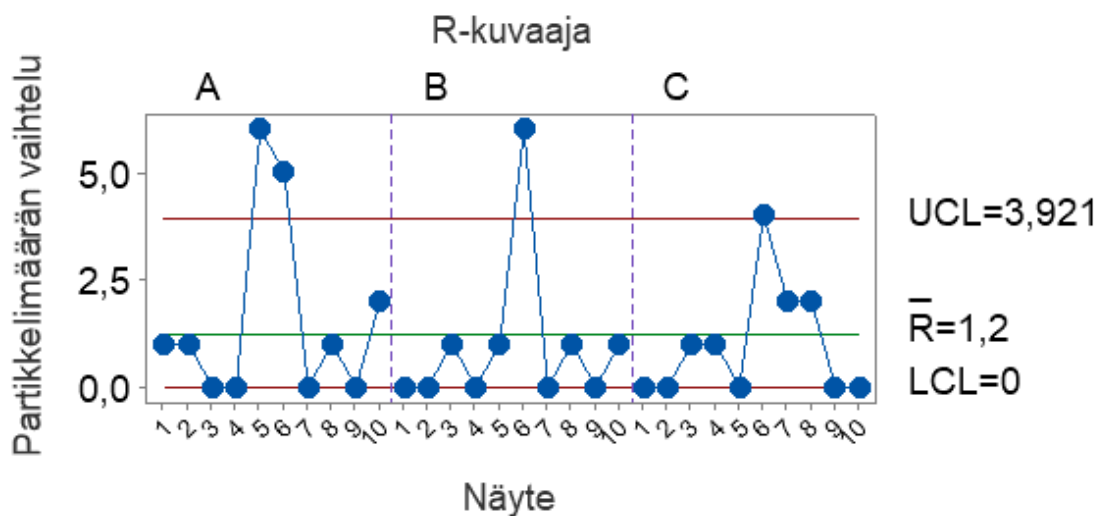
Kuvaajassa (kuvio 7) on esiteltynä %Study Var -prosentit mittaamenetelmälle (gage R&R -pylväs), toistettavuudelle (Repeat-pylväs), uusittavuudelle (Reprod-pylväs) sekä näytteille (Part-to-Part -pylväs). Samat prosentuaaliset vaihtelut löytyvät myös taulukosta 10 (sivu 34). Tuloksista havaitaan, että mittaamenetelmän %Study Var -prosentti on 33 %. Mittaamenetelmän vaihtelu muodostuu toistettavuudesta ja uusittavuudesta. Taulukossa 6 (sivu 21) on todettu, että mittaamenetelmää, jonka vaihtelu on yli 30 % ei voida hyväksyä. Saadut tulokset osoittavat, ettei tutkittu mittaamenetelmä ole tarpeeksi täsmällinen. Kuviosta 7 nähdään, että toistettavuuden vaihtelu (28,7 %) on selkeästi suurempi ongelma kuin uusittavuuden vaihtelu (16,4 %), vaikkakin molempien vaihtelevuuden prosenttiosuudet ovat liian korkeat. Näytteiden vaihtelun suuruus on hyvä asia, koska hyvässä mittaamenetelmässä kokonaisvaihtelu muodostuu näytteiden vaihtelusta eikä mittaamenetelmän vaihtelusta.



KUVIO 7. Tutkimuksen vaihtelun komponentit ja niiden %Study Var -prosentit, jotka löytyvät taulukoituna taulukosta 10 (sivu 34).

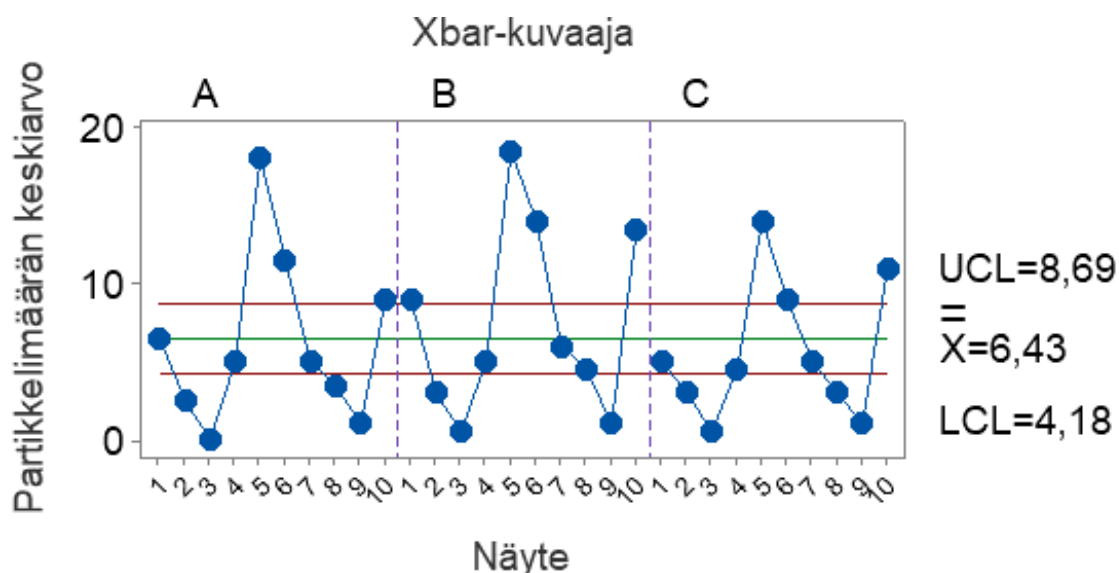
Kuviossa 8 (sivu 36) oleva R-kuvaaja (R-Chart) kuvaa kaikille mittaajille A, B ja C toistojen välistä eroa kunkin näytteen kohdalla. Kuviossa y-akselilla on partikkelimäärän vaihtelu eli mitatun partikkelimäärän ero toistojen välillä ja x-akselilla näyttenumerot. Kuviosta havaitaan, että kaikkien mittaajien kaikkien näytteiden toistojen välisen eron keskiarvo on 1,2 partikkelia ($R = 1,2$). Lisäksi ohjelma on laskenut annetun datan perusteella ylemmän kontrollirajan (upper control limit – UCL) sekä alemman kontrollirajan (lower control limit – LCL). Merkittävintä kuvaajassa on se, että kaikilla mittaajilla on havaittavissa eroja toistojen välillä eli

heillä on ollut ongelmia saada sama tulos samoista näytteistä toistojen välillä. Erityisesti näyte kuusi on tuottanut vaikeuksia kaikille mittajille.



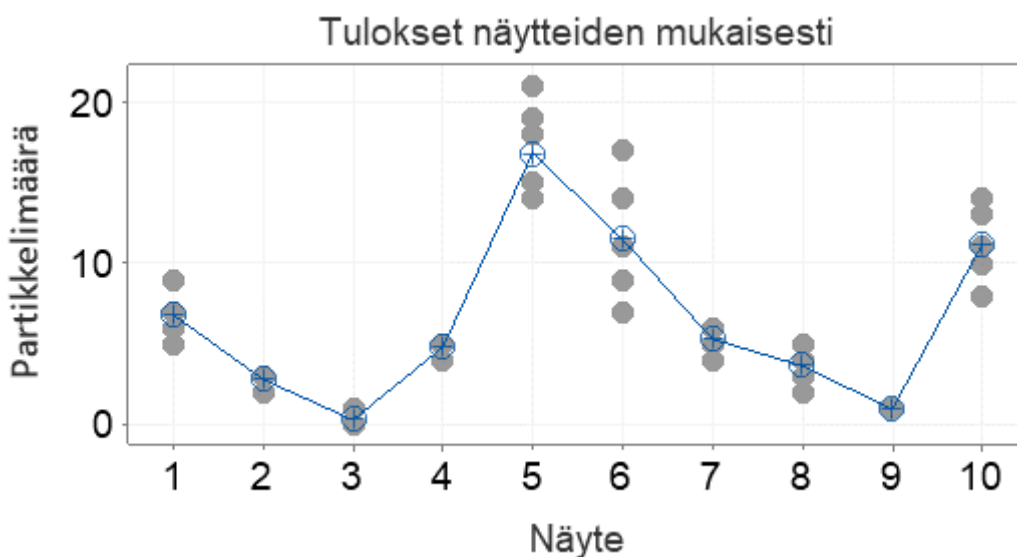
KUVIO 8. Gage R&R -tutkimuksen tulosraportin R-kuvaaja.

Kuviossa 9 (sivu 37) oleva Xbar-kuvaaja (Xbar-Chart) kuvaa kaikille mittajille A, B ja C toistojen välisen keskiarvon vaihtelua näytteiden ja mittajien välillä. Kuviossa y-akselilla on partikkelien lukumäärän keskiarvo ja x-akselilla näytenuumerot. Kuviossa on havaittavissa, että kaikkien mittajien näytekohtaisten keskiarvojen keskiarvo on 6,43 partikkelia ($\bar{X} = 6,43$). Lisäksi ohjelma on laskenut annetun datan perusteella ylemmän kontrollirajan (upper control limit – UCL) sekä alemman kontrollirajan (lower control limit – LCL). Kuviossa havaitaan, että mittajat A ja B ovat merkinneet useamman objektin partikkeleiksi kuin mittaja C. Eroista huolimatta mittajien käyrät noudattavat samaa muotoa, joten voidaan todeta, että mittajat ovat mitanneet näytesarjat hyvin samankaltaisesti.



KUVIO 9. Gage R&R -tutkimuksen tuloraportin Xbar-kuvaaja.

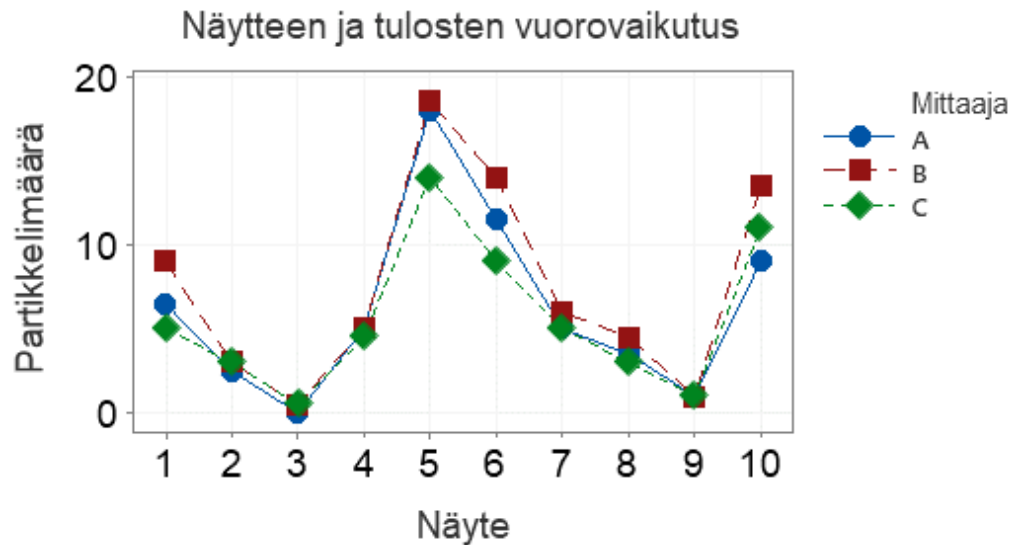
Kuviossa 10 on näkyvissä kaikkien mittaajien molempien toistojen tulokset näytekohtaisesti. Kuviossa y-akselilla on ylisuurien partikkelien lukumäärä ja x-akselilla näytenuumerot. Kuvioista nähdään, että näytteet 1, 5, 6, 8 ja 10 ovat olleet erityisen vaikeita arvioitavia, eli mittaajat ovat keskenään sekä toistojensa välillä merkinneet eri määrän objekteja partikkeleiksi.



KUVIO 10. Gage R&R -tutkimuksen mittaustulokset näytteiden mukaisesti.

Kuviossa 11 (sivu 38) on mittaajien näytekohtaisten tulosten keskiarvo, joten kuviossa on havaittavissa näyte- ja operaattorikohtaisia eroja. Y-akselilla on näkyvissä partikkelimäärän keskiarvo ja x-akselilla näytenuumerot. Kuviossa 11 on havaittavissa, että mittaaja B on lähes jokaisen näytteen kohdalla merkinnyt

useamman objektin partikkeliksi ja vastaavasti mittaaja C on merkinnyt objekteja vähiten partikkeleiksi lähes kaikissa näytteissä. Kyseinen trendi on havaittavissa erityisesti aikaisemmin viitatuissa erityisen vaikeissa näytteissä.



KUVIO 11. Gage R&R -tutkimuksen mittaajien tulosten keskiarvo näytteittäin.

4.3 Vaihtelulähteiden selvitys

Tässä vaiheessa määritettiin tekijät, jotka aiheuttivat vaihtelua gage R&R -tuloksiin. Vaihtelulähteiden selvittämisessä hyödynnettiin alkuselvityksessä tehdyn gage R&R -tutkimuksen tuloksia, attribuutti Gage R&R -työkalua sekä mittaajien haastattelua.

Alkuselvityksessä saaduista tuloksista havaittiin muutamia tekijöitä, jotka aiheuttivat vaihtelua tuloksiin. Tällaisia tekijöitä olivat ohjelmisto sekä mittaajat. Opin näytetyöntekijä arvioi partikkelimäärän muutoksiin olevan syinä kuitujen arviointi partikkeleiksi, hylättävien objektien arviointi partikkeleiksi sekä ettei kahdesta objektista muodostuvia kokonaisuuksia ollut erotettu yksittäisiksi objekteiksi.


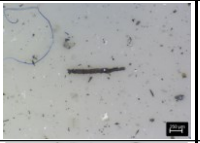
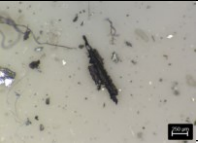

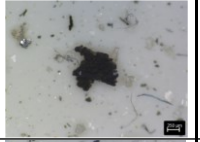
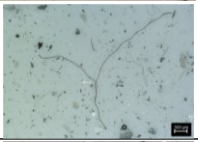







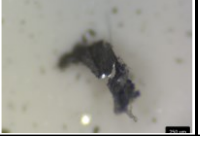

Ohjelmistosta johtuvalla vaihtelulla tarkoitetaan LASX CleanlinessExpert -ohjelmistosta aiheutuvaa eroavaisuutta näytteiden objektikoostumuksessa toistojen välillä. Analyysiraporteista huomattiin, että joidenkin näytteiden kohdalla esimerkiksi kuitujen määrä vaihteli toistojen välillä. Syy tähän kuitujen ja muiden objek-

tien määrän kasvuun ei voinut olla mittaaaja, koska mittaajat eivät muuttaneet ohjelmiston asetuksia analyysien aikana, eivätkä voineet vaikuttaa objektien määrään. Näin ollen ohjelmisto muutti itse asetuksia analyysin aikana. Viitteitä tähän ongelmaan löydettiin valottumiskynnysprosentista (threshold), joka muuttui joidenkin analyysikertojen välillä useita prosentteja. Tutkimusta suoritettaessa päätettiin jättää tämä ohjelmiston ongelma huomioimatta. Tähän päädyttiin, koska ongelma vaikutti pääasiallisesti kuitujen määrään, joita ei tutkimuksessa otettu huomioon, ellei mittaaaja arvioinut virheellisesti kuitua partikkeliksi.

Mittaajien tekemien virheellisten arviointien selvittämiseksi vaikeiksi määritellyistä näytteistä 1, 5, 6, 8 ja 10 (kuvio 10, sivu 37) käytettiin attribuutti gage R&R -työkalua (liite 2, sivu 56). Tämän tutkimuksen avulla oli tarkoitus selvittää, mitkä objektit tuottivat eniten vaikeuksia edellä mainituissa näytteissä. Lisäksi haluttiin selvittää, keiden mittaajien arviot olivat aiheuttaneet eniten vaihtelua tuloksiin. Tutkimuksen toteuttamiseksi opinnäytetyöntekijä nimesi kaikki edellä mainittujen näytteiden ylikokoiset objektit (yli 990 μm) juoksevalla numerolla sekä arvioi ne metalliseksi, ei-metalliseksi, kuiduksi tai hylätyksi. Toimeksiantajayrityksen henkilöstöön kuuluva partikkelianalyysistä vastaava henkilö tarkisti kyseiset opinnäytetyöntekijän tekemät arviot. Edellä kuvatulla tavalla muodostettiin jokaiselle näytteelle referenssi eli virheetön arvio jokaisesta objektista. Tämän jälkeen mittaajien tekemiä arviointeja verrattiin referenssiin, jolloin saatiin tulokseksi jokaiselle mittaajalle tarkkuusprosentti. Tarkkuusprosentti kertoi, kuinka suurella tarkkuudella kukin mittaaaja oli arvioinut objektit samalla tavalla kuin referenssi.

Kaikille vaikeiksi todetuille näytteille 1, 5, 6, 8 sekä 10 tehtiin edellä kuvattu referenssi. Taulukossa 11 (sivu 40) on esitelty näytteelle 10 tehty referenssi, jossa ovat kaikki näytteen sisältämät objektit ja niiden arviointi joko OK tai NOK (not ok – ei ok). ”OK” tarkoittaa, että objekti on metallinen tai ei-metallinen partikkeli ja ”NOK” tarkoittaa, että objekti on kuitu tai hylätty objekti. Tämä arviointi tehtiin tutkittavan menetelmän hyväksymis- ja hylkäämisperiaatteiden mukaisesti, koska kyseisellä menetelmällä arvioidaan metallisia ja ei-metallisia partikkeleita.

TAULUKKO 11. Näytteen 10 objektien numerointi sekä referenssiarvio OK/NOK.

Näyte 10								
Partikkeli numero	OK/NOK	Kuva	Partikkeli numero	OK/NOK	Kuva	Partikkeli numero	OK/NOK	Kuva
10_1	OK		10_6	OK		10_11	OK	
10_2	OK		10_7	OK		10_12	NOK	
10_3	OK		10_8	OK		10_13	NOK	
10_4	OK		10_9	OK		10_14	NOK	
10_5	OK		10_10	OK		10_15	OK	

Taulukossa 12 esitetään attribuutti gage R&R -työkalulla saadut mittajien tarkkuusprosentit viidelle näytteelle, joiden gage R&R tulokset sisälsivät eniten vaihtelua. Taulukosta havaitaan, että mittaja C on arvioinut objekteja yhdenmukaisimmin referenssin kanssa. Vastaavasti mittajan A tarkkuusprosentti on kaikkien näytteiden kohdalla yli 77 prosenttia ja mittajan B tarkkuus on alhaisimmillaan 52 prosenttia.


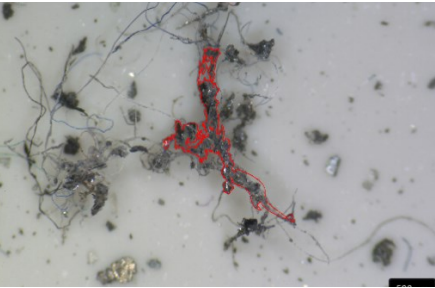

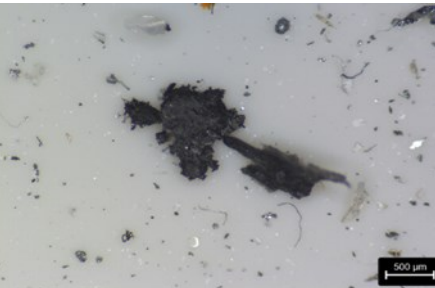
TAULUKKO 12. Attribuutti Gage R&R -työkalulla saadut mittajien tarkkuusprosentit vaikeille näytteille.

Näyte	Tarkkuusprosentti (%)		
	A	B	C
1.	100,0	52,4	100,0
5.	79,5	83,0	94,6
6.	80,0	79,3	95,5
8.	77,8	55,6	88,9
10.	100,0	90,0	100,0

Attribuutti gage R&R -työkalun perusteella todettiin, että eniten vaihtelua tuloksiin aiheuttaa se, että mittajat olivat arvioineet kuituja partikkeleiksi. Muita vaihtelua

aiheuttavia tekijöitä olivat hylättävien objektien arvioiminen partikkeleiksi sekä isojen partikkelien erottaminen toisistaan. Tulos vahvistaa aikaisemmin tehdyt arviot vaihtelun aiheuttajista. Syynä näytteiden 1, 5, 6, 8 sekä 10 haastavuudelle oli, että ne sisälsivät useita kuituja sekä hylättäviä objekteja. Lisäksi näytesarjan näytteissä 5 ja 6 oli eniten objekteja. Taulukossa 13 on kuvia objekteista, joiden arviointi tuotti eniten vaikeuksia mittajille. Taulukossa 13 on esitelty mittajien arvio sekä referenssi kyseisille objekteille.

TAULUKKO 13. Objekteja, jotka mittajat arvioivat useita kertoja väärin

Kuva	Objektin nimi (näyte_objekti)	Mittajan virheellinen arviointi	Referenssi
	1_3	Partikkeli	Hylättävä
	6_3	Partikkeli	Hylättävä
	8_4	Partikkeli	Kuitu
	5_3	Partikkeli	Kaksi erillistä ylikokoista partikkelia

Vaihtelulähteiden selvittämiseksi kaikkia tutkimukseen osallistuneita mittaajia haastateltiin yksitellen liittyen tutkimuksen toteuttamiseen, suorittamiseen sekä tuloksiin. Haastattelussa keskusteltiin myös partikkelianalyysin työohjeesta sekä attribuutti gage R&R -työkalun tuloksista. Mittaajan A kanssa käydyssä haastattelussa todettiin, että hänen tekemiinsä objektien arvioihin tarvittaisiin vielä lisää tarkkuutta. Lisäksi häneltä saatiin päivitysehdotuksia työohjeeseen. Mittaaja A piti tutkimuksen toteutusta hyvänä. Mittaaja B kertoi haastattelussa ymmärtäneensä, että teki tutkimuksessa arviointeja väärin. Lisäksi hän totesi olleensa ensimmäisellä toistolla hyvin väsynyt ja uskoi tämän selittävän ainakin osan objektien virheellisistä arvioinneista sekä toistojen välisistä eroista. Tutkimuksen toteutus oli myös hänen mielestään hyvä. Mittaaja B toivoi, että työohje käytäisiin kokonaan läpi perehdytyksessä sekä että työohjeeseen lisättäisiin enemmän esimerkkikuvia objekteista ja niiden arvioinnista. Mittaaja C koki tutkimuksen raskaaksi, muttei niin raskaaksi kuin varsinainen partikkelianalyysi, jossa tutkittavia partikkeliloukkuja on viikon aikana yhteensä 20 kappaletta. Myös mittaaja C toivoi lisää esimerkkikuvia työohjeeseen. Kaikkien mittaajien mielestä tutkimustulosten läpikäynti osallistuneiden henkilöiden kanssa oli hyvä asia. Haastatteluiden perusteella selvisi myös, että mittaaja A teki pääasiallisesti kaikki viikoittaiset partikkelianalyysit. Näin ollen mittaajat B ja C eivät olleet lähiaikoina tehneet analyysiä. Tämä saattaa olla osasy syy mittaajan B tekemille vaihteleville arvioille.

4.4 Vaihtelulähteiden minimoiminen

Vaihtelulähteiden selvityksen pohjalta päätettiin tehdä tiettyjä toimenpiteitä mitausmenetelmän täsmällisyyden kehittämiseksi. Nämä toimenpiteet olivat työohjeen muokkaaminen sekä mittaajien perehdytys päivitettyyn työohjeeseen.

Työohjeen muokkaamiseen päädyttiin, koska sekä alkuselvityksessä että vaihtelulähteiden selvityksessä selvisi, että työohjeetta pitää päivittää ja tarkentaa. Työohjeen ulkoasua selvennettiin päivittämällä osa kuvista, tekstin määrä sivua kohden, kuvien ja tekstin asettelu sekä dokumentin nimi, joka piti päivittää uuden nimeämisohjeen mukaiseksi. Asetusten tarkastamisen tärkeyttä korostettiin työohjeessa, jotta myös tämä työvaihe tehdään jokaisen analyysin aluksi. Lisäksi tarkennettiin objektien arvioinnin merkitystä ja erityisesti kuitujen merkitsemistä

kuiduiksi. Työohjeeseen lisättiin liitteenä juliste, jossa on useita esimerkkikuvia objektien arvioinneista (liite 3, sivu 59). Juliste asetettiin laboratorioon partikkelianalyysimikroskoopin viereiselle seinälle, jotta mittajaan on helppoa tarkistella sitä analysoinnin yhteydessä (kuva 2). Julisteen lisäksi työohjeeseen lisättiin analyysiä tarkentavia mainintoja kuten, että objektin arvioiminen refleктоivaksi vaatii objektilta kiillon lisäksi myös muita metallisia ulkonäön piirteitä. Työohjeen alkuun lisättiin myös prosessikaavio partikkelianalyysin suorittamisesta, jotta mittaja saa helposti kokonaiskuvan analyysin tekemisestä.



KUVA 2. Kuva julisteesta partikkelianalyysimikroskoopin vieressä (Milka Turila 2023).

Mittajat perehdyttiin päivitettyyn työohjeeseen. Työohje käytiin kohta kohdalta läpi kaikkien kolmen mittajaan kanssa. Työohjeen läpikäynnissä korostettiin mittajille erityisesti kohtia, jotka olivat aiheuttaneet vaihtelua gage R&R -tutkimuksessa. Näitä olivat esimerkiksi objektien arviointi kuiduiksi sekä hylättävien objektien kriteerit.

4.5 Kehitystyön vaikutuksen tutkiminen

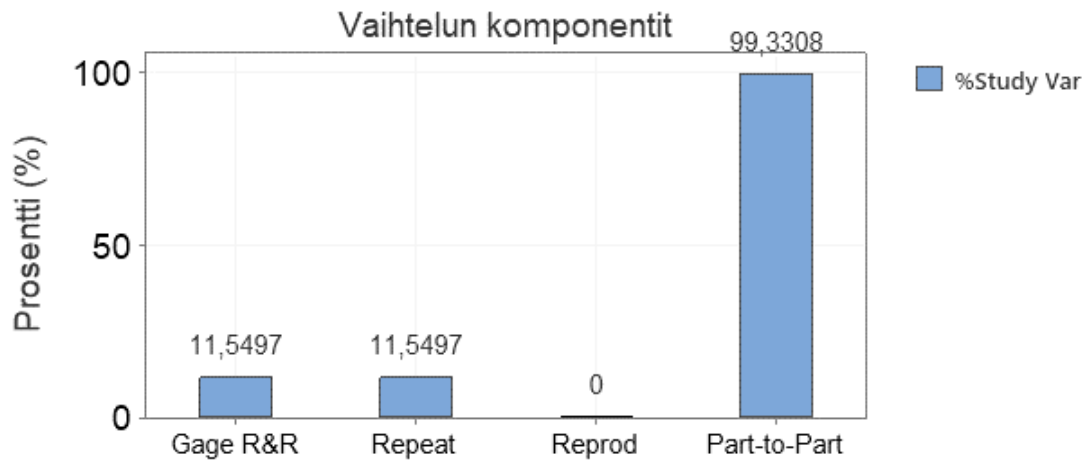
Gage R&R -tutkimus toistettiin sen jälkeen, kun työohjeen uusi versio oli perehdytetty kaikille mittaajille. Tutkimus toteutettiin kuten aikaisempi Gage R&R -tutkimus samojen mittaajien kanssa käyttämällä samoja näytteitä sekä laitteistoa. Kun kaikki mittaajat olivat suorittaneet molemmat toistot, saadut tulokset käsiteltiin samalla tavalla kuin aikaisemmin (liite 4, sivu 62). Taulukossa 14 on Minitab-ohjelmiston laskemat suureiden arvot tutkimuksen komponenteille.

TAULUKKO 14. Minitab-ohjelmiston laskemien suureiden arvot tutkimuksen vaihtelun komponenteille.

Komponentti	VarComp (partikkelilukumäärä ²)	Keskihajonta (partikkeli lukumäärä)	Study Var (partikkeli lukumäärä)	%Study Var (%)
Gage R&R	0,2743	0,52374	3,1425	11,55
Toistettavuus	0,2743	0,52374	3,1425	11,55
Uusittavuus	0,000	0,00	0,00	0,00
Näytteet	20,2892	4,50435	27,0261	99,33
Kokonaisvaihtelu	20,5635	4,53470	27,2082	100,0

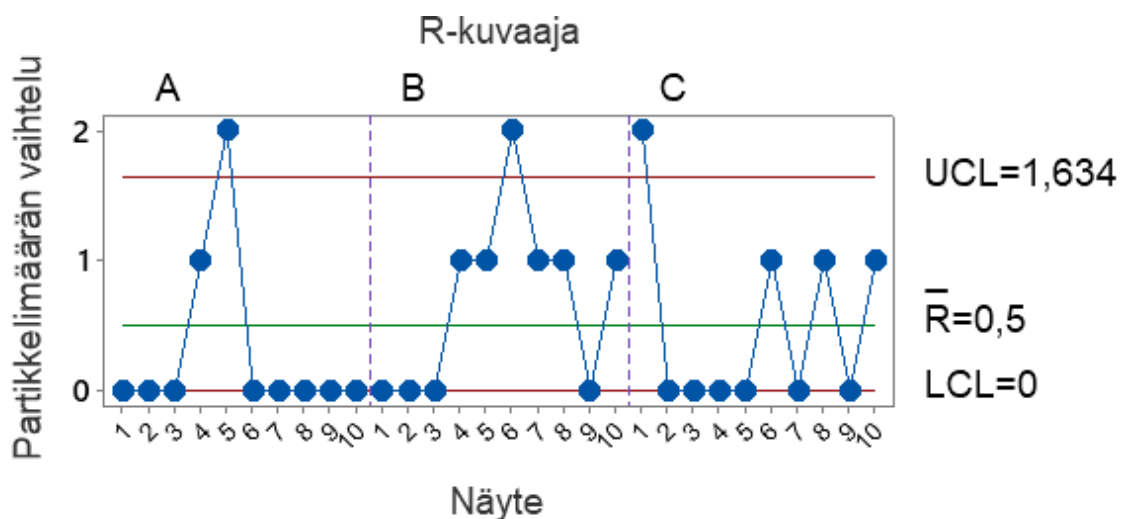
Minitab-ohjelmiston määrittämä erotettavien ryhmien lukumäärä vaihtelulähteiden minimoimisen vaikutusta tutkivalle Gage R&R -tutkimukselle oli 12. Tämä lukumäärä ylittää AIAG:n antaman viiden erotettavan ryhmän lukumäärän, jolloin tutkimuksen resoluutio on selkeästi parantunut mittausmenetelmän kehityksen myötä.

Kuviossa 12 (sivu 45) on esiteltyä tutkimuksen %Study Var -prosentit kaikille komponenteille. Kuvaajasta havaitaan, että mittausmenetelmän vaihtelun suuruus (Gage R&R -pylväs) on 11,5 %. Mittausmenetelmän vaihtelu johtuu toistettavuuden vaihtelusta (Repeat-pylväs), koska uusittavuuden vaihtelu (Reprod-pylväs) on nolla prosenttia (taulukko 14). Näytteiden vaihtelun suuruus on hyväksyttävää kuten luvussa 4.2.2 todettiin ja tässä tilanteessa näytteiden vaihtelu muodostaa suurimman osan kokonaisvaihtelusta.



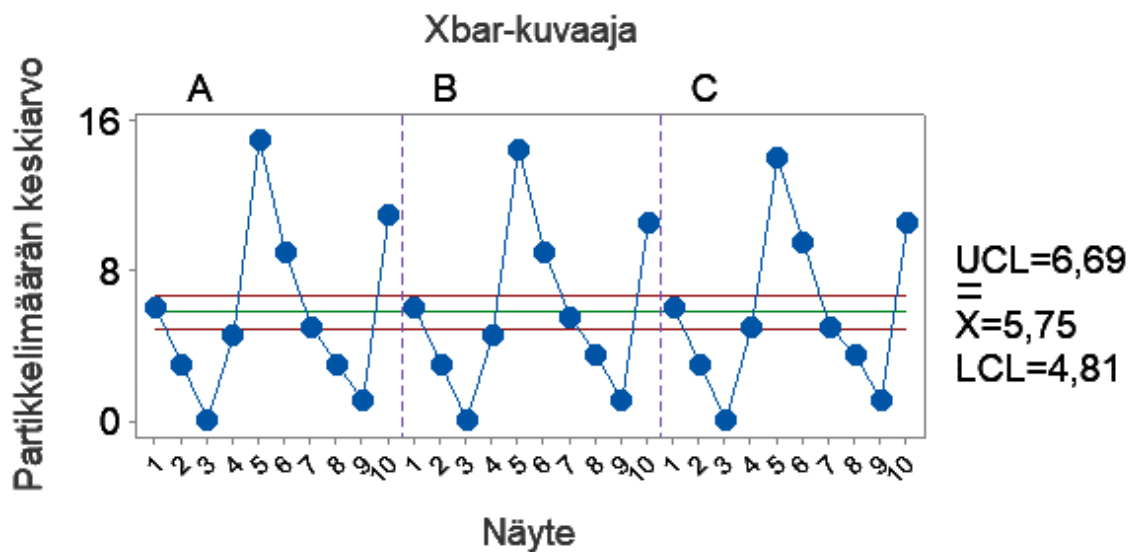
KUVIO 12. Toistetun gage R&R -tutkimuksen vaihtelun komponentit.

Kuviossa 13 oleva R-kuvaaja (R-Chart) kuvaa kaikille mittaajille A, B ja C toistojen välistä eroa kunkin näytteen kohdalla. Kuviossa y-akselilla on partikkelimäärän vaihtelu eli kuinka monen partikkelin ero on toistojen välillä ja x-akselilla näytenuumerot. Kuviossa havaitaan, että kaikkien mittaajien kaikkien näytteiden toistojen välisen eron keskiarvo on 0,5 partikkelia ($R = 0,5$). Lisäksi ohjelma on laskenut annetun datan perusteella ylemmän kontrollirajan (upper control limit – UCL) sekä alemman kontrollirajan (lower control limit – LCL). Kuvaajasta havaitaan, että mittaajien tulokset vaihtelevat toistojen välillä enää enintään kahden partikkelin verran. Mittaajien kyky toistaa analyysi on selkeästi parantunut kehitystyön myötä. R-kuvaajasta nähdään, että jokaisella mittaajalla on edelleen vaihtelua toistojen välillä, mutta vaihtelu ei sijoitu mittaajilla samoihin näytteisiin. Voidaan todeta, että aikaisemmassa gage R&R -tutkimuksessa havaitut mittaajille vaikeat näytteet eivät aiheuta enää haasteita mittaajille.



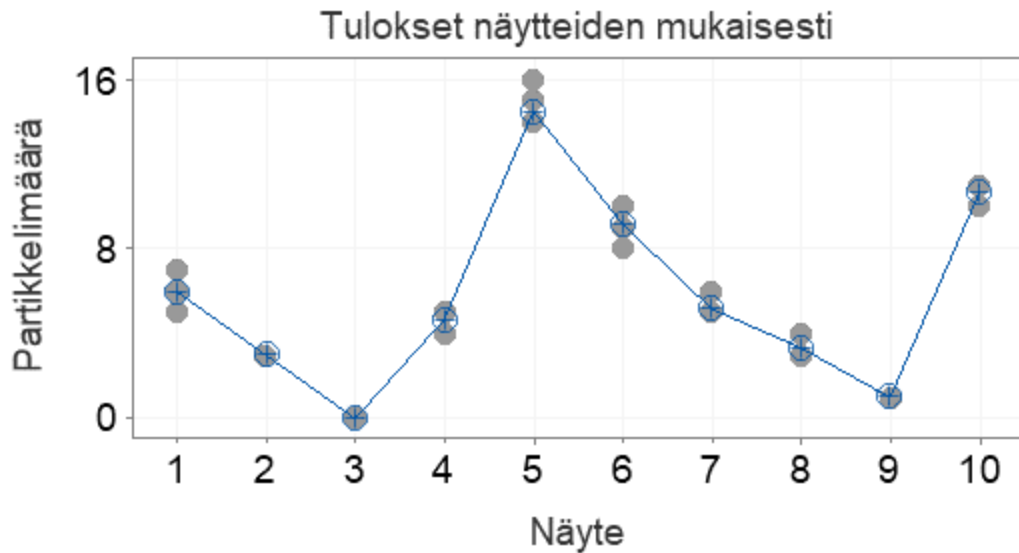
KUVIO 13. Toistetun gage R&R -tutkimuksen R-kuvaaja.

Kuviossa 14 oleva Xbar-kuvaaja (Xbar-Chart) kuvaa kaikille mittaajille A, B ja C toistojen välisen keskiarvon vaihtelua näytteiden ja mittaajien välillä. Kuviossa y-akselilla on partikkelien lukumäärän keskiarvo ja x-akselilla näytenumerot. Kuviossa on havaittavissa, että jokaisen mittaajan näytekohtaisten keskiarvojen keskiarvo on 5,75 partikkelia ($X = 5,75$). Lisäksi ohjelma on laskenut annetun datan perusteella ylemmän kontrollirajan (upper control limit – UCL) sekä alemman kontrollirajan (lower control limit – LCL). Kuviossa ei ole havaittavissa selkeitä eroja mittaajien välillä, mikä on parannus aikaisempaan gage R&R -tutkimukseen nähden.



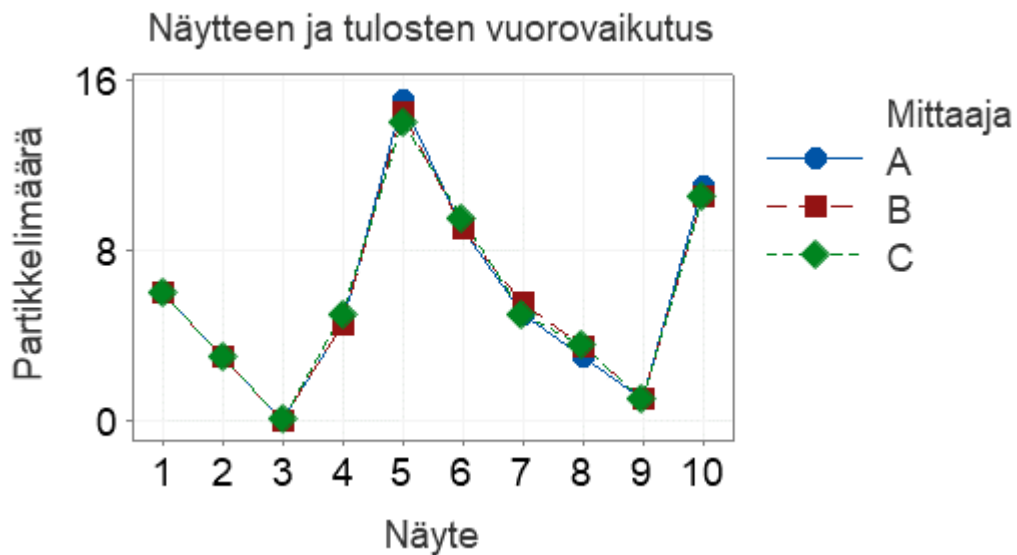
KUVIO 14. Toistetun gage R&R -tutkimuksen Xbar-kuvaaja.

Kuviossa 15 (sivu 47) on näkyvissä kaikkien mittaajien molempien toistojen tulokset näytekohtaisesti. Kuviossa y-akselilla on ylisuurien partikkelien lukumäärä ja x-akselilla näytenumerot. Kuviossa nähdään, että aikaisemmin erityisen vaikeat näytteet 1, 5, 6, 8 ja 10 eivät enää ole vaikeita, koska mittatulosten vaihtelu on laskenut merkittävästi.



KUVIO 15. Toistetun gage R&R -tutkimuksen partikkelijakauma näytteiden välillä.

Kuviossa 16 on mittaajien näytekohtaisten tulosten keskiarvo, jolloin kuvioista on havaittavissa näyte- ja operaattorikohtaisia eroja. Y-akselilla on näkyvissä partikkelimäärän keskiarvo ja x-akselilla näyttenumerot. Kuviossa 16 havaittavissa olevat mittaajien väliset erot ovat hyvin pieniä.



KUVIO 16. Toistetun gage R&R -tutkimuksen mittaajien partikkelijakauma näytteiden välillä.

5 POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää toimeksiantajayrityksen mittausmenetelmän täsmällisyyttä gage R&R -tutkimusta hyödyntäen. Tarkoituksena oli suunnitella ja toteuttaa tutkimusmittausmenetelmän täsmällisyydestä ja tulosten osoitettua täsmällisyyden olleen liian alhainen, kehittää täsmällisyyttä hyväksyttävälle tasolle.

Vertailtaessa tehtyjen gage R&R -tutkimusten tuloksia keskenään (kuvio 7, sivu 35 sekä kuvio 12, sivu 45) huomataan, että vaihtelulähteiden minimoimisen jälkeen mittausmenetelmän vaihtelu on selkeästi alhaisempi kuin ensimmäisessä tutkimuksessa. Tästä voidaan päätellä, että vaihtelulähteet saatiin minimoitua. Kehitystyön tuloksena uusittavuuden vaihtelu hävisi kokonaan ja toistettavuuden vaihtelu pieneni lähes kolmasosaan siitä mitä se oli ensimmäisessä tutkimuksessa. Tutkimusten erotettavissa ryhmissä on myös selkeä ero, ryhmien lukumäärä ollessa ensin neljä ja kehitystyön jälkeen 12. Voidaan todeta, että kehitystyön myötä mittausmenetelmän erotuskyky kehittyi merkittävästi. Lisäksi tuloksista havaitaan partikkelimäärän vaihtelun keskiarvon aleneminen noin puolella partikkelilla jälkimmäisessä tutkimuksessa. Tämä tulos tarkoittaa sitä, että jälkimmäisessä tutkimuksessa kaikkien mittaajien partikkelimäärien vaihtelu toistojen välillä oli alhaisempi kuin ensimmäisessä tutkimuksessa. Partikkelimäärän keskiarvo on myös alentunut tutkimusten välillä, mikä tarkoittaa, että kaikki mittaajat ovat merkinneet objekteja vähemmän partikkeleiksi. Partikkelimäärän keskiarvon aleneminen on myönteistä kehitystyön kannalta, koska aikaisemmassa gage R&R- tutkimuksessa osa mittaajista oli virheellisesti arvioinut kuituja partikkeleiksi, jolloin partikkelimäärä kasvoi.

Partikkelianalyysimenetelmän täsmällisyyden kehittämisen lopputuloksena analyysimenetelmän vaihtelu on 11 %. Automotive Action Groupin mukaisesti mittausmenetelmän täsmällisyys on hyväksyttävissä, jos mittausmenetelmän vaihtelu on alle 10 %. Mittausmenetelmän tyypistä riippuen, on mahdollista hyväksyä myös vaihtelu, jonka suuruus on väliltä 10–30 % (Automotive Industry Action Group 2010, 78). Tutkitun mittausmenetelmän tapauksessa on kyse visuaalisesta arvioinnista, jota tekevät siihen koulutetut henkilöt. Rajatapaukset kuten

objektit, jotka sisältävät ulkoisia piirteitä niin kuidusta kuin partikkelista tai vastavasti partikkelista ja hylättävästä objektista tekevät arvioinnista haastavaa. Koska objektin arvioinnin tekee vain yksi mittaaaja, on mahdollista, että arviointi tehdään joskus väärin. Kriittinen asia mittausmenetelmän täsmällisyyden hyväksymisen kannalta on mittausmenetelmän mittauksen erotuskyky. Mitattavana suureena on ylikokoisten partikkelien lukumäärä ja mittauksen erotuskyky yksi partikkeli. Toimeksiantajayrityksen toimintatapana on, että jos näyte eli partikkeliloukku sisältää yhdenkin ylikokoisen partikkelin, partikkeliloukku saa NOK-tuloksen. Tämän takia tässä kehitystyössä saavutettu kahden partikkelin vaihtelu toistojen välillä on hyvä tulos. Tulosten perusteella on erittäin todennäköistä, että partikkeliloukulle osataan antaa NOK-tulos eli operaattori löytää vähintään yhden partikkelin jos partikkeliloukku sisältää partikkeleita. Edellä esiteltyjen tekijöiden ansiosta mittausmenetelmän saavuttama täsmällisyys hyväksytään.

Jälkimmäisen tutkimuksen gage R&R:n vaihtelu muodostuu kokonaisuudessaan toistettavuuden vaihtelusta. Toistettavuuden vaihtelu on vaihtelua, joka muodostuu saman mittaaajan toistojen välillä. Tämä johtuu ohjelmiston tuottamista erilaisista tuloksista (objektien pituus vaihtelee, jolloin eri toistoilla eri määrä yli 990 µm pitkiä objekteja) sekä mittaaajien epävarmuudesta arvioida haastavia objekteja. Tämän vuoksi mittausmenetelmää edelleen kehitettäessä tulisi keskittyä ohjelmiston toistettavuuden kehittämiseen sekä haastavien rajatapausobjektien arviointiin. Mittausmenetelmän kehittämässä on tulevaisuudessa hyvä ottaa huomioon myös metallisten ja ei-metallisten partikkelien erottaminen.

Mittaaajien haastattelussa kävi ilmi, että partikkelianalyysiä tekee pääasiallisesti vain yksi kolmesta työhön koulutetusta mittaaajasta. Mittaajille tehdyn perehdytyksen tuoman osaamisen säilyttämiseksi on tärkeää, että kaikki mittaaajat tekevät partikkelianalyysiä, jotta kaikille muodostuu rutiini työhön. Mittaajien kanssa keskusteltiin asiasta ja he totesivat pyrkivänsä tulevaisuudessa kaikki osallistumaan analyysin tekoon.

Tutkimusten toteuttaminen sisälsi joitakin virhelähteitä, joiden vaikutusta ei huomioitu työn toteutuksen aikana. Virhettä on voinut aiheuttaa näytteinä toimineiden partikkeliloukkujen kuljetus säilytyspaikasta analysointiin laboratoriossa. Kuljetuksen aiheuttama liike on voinut aiheuttaa objektien irtoamista liimapinnasta ja

tarttumista esimerkiksi partikkeliloukun kanteen, jolloin objekti ei olisi enää analysoitavissa. Tutkimusten aikana ei kuitenkaan havaittu objektien häviämistä. Lisäksi kuljetuksen aiheuttama partikkeliloukkujen liike voisi aiheuttaa objektien liikumista liimapinnalla. Tutkimuksen aikana havaittiin yksi objekti, joka oli kääntynyt eri asentoon toistojen välillä. Tämä ei kuitenkaan aiheuttanut virhettä tutkimukseen, koska sama objekti oli edelleen olemassa ja analysoitavissa. Lisäksi virhettä on voinut aiheuttaa näytteinä toimineiden partikkeliloukkujen pahvinen pohjalevy. Havaittiin, että pohjalevy on hieman kaareva, jolloin partikkeliloukku ei ole täysin suorassa mikroskooppiin nähden. Tämä johtaa siihen, ettei koko analysointialue ole tarkennettuna samanaikaisesti. Tämä virhetekijä voi olla osasyynä objektien pituuden vaihtelulle toistojen välillä. Lisäksi laitteiston asetusten muuttaminen kesken analyysin on tekijä, joka on saattanut aiheuttaa virhettä tuloksiin. Tulevaisuudessa näiden edellä mainittujen virhelähteiden vaikutusta olisi hyvä tutkia.

Opinnäytetyönä toteutettu kehitystyö ja siihen sisältyvät gage R&R -tutkimukset suoritettiin noudattaen AIAG:n ohjeistusta gage R&R -tutkimuksen toteuttamisesta (Automotive Industry Action Group 2010, 74, 104). Tutkimusten toteuttamisessa ja tulosten käsittelyssä noudatettiin toimeksiantajayrityksen sisäistä ohjeistusta gage R&R -tutkimuksista. Lisäksi kuultiin toimeksiantajayrityksen henkilöstöä, jotka ovat aikaisemmin teettäneet gage R&R -tutkimuksia ja saaneet siihen liittyvää koulutusta. Tutkimuksessa käytetyn laitteiston toistettavuus ja todenmukaisuus olivat todennettu aikaisemmin tehdyssä tyypin 1 gage -tutkimuksessa ja käytetty laitteisto pystyi analysoimaan näytteet VDA 19.1 standardissa mainittujen laajennettujen analyysimenetelmien laajuudella (VDA 19.1 2015, 46). Vaihtelulähteiden minimoinnin toimenpiteenä tehdyssä työohjeen päivityksessä linjattiin objektien arviointi vastaamaan alalla vallinneita käsityksiä erilaisten materiaalien ulkoisista ominaisuuksista (Brodzik, Faber & Nycz 2021, 43–44). Eriteltyjen tekijöiden vuoksi tutkimusten toteutusta, tulosten käsittelyä sekä tuloksia voidaan pitää luotettavana.

Tutkimukseen liittyvät eettiset näkökohdat keskittyvät mittaajien henkilötietoihin. Tutkimuksen suunnittelun aikana opinnäytetyöntekijä antoi mittaajille tutkimuksessa käytettävät kirjaintunnukset nimien korvikkeeksi. Kirjaimia päätettiin käyt-

tää nimien sijasta, jotta mittaajien henkilöllisyys pysyy suojattuna tutkimuksen aikana sekä opinnäytetyöraportissa. Opinnäytetyöntekijän tietoon ei tullut muita mittaajien henkilötietoja kuin heidän koko nimensä sekä joulukuun ja maaliskuun välisenä aikana olleet lomat. Nämä tiedot opinnäytetyöntekijä keräsi toimeksiantajayrityksen tarjoamaan henkilökohtaiseen kansioon. Tutkimuksen tultua valmiiksi kyseiset tiedot hävitettiin.

Partikkelianalyysin kehittäminen toteutettiin suunnitelman mukaisesti. Kaikki asetetut tutkimustehtävät toteutettiin ja saavutettiin hyväksyttävä tulos mittausmenetelmän täsmällisyydestä. Työn tavoite täytettiin kehittämällä Valmet Automotiven Salon akkutehtaan partikkelianalyysimenetelmän täsmällisyyttä. Lisäksi työn tarkoitus täytettiin suunnittelemalla ja toteuttamalla partikkelianalyysimenetelmän täsmällisyyden tutkiminen. Työssä toteutetuilla gage-tutkimuksilla osoitettiin, kuinka kyseessä olevan mittausmenetelmän täsmällisyyttä voidaan luotettavasti todentaa sekä kehittää. Työn tuloksena päivitettyä työohjetta ja siihen lisättyjä esimerkkikuvia voidaan tulevaisuudessa käyttää koulutusmateriaalina uusien mittaajien koulutuksessa. Lisäksi toteutettua gage R&R -tutkimusta voidaan käyttää mallina muiden mittausmenetelmien täsmällisyyden todentamisessa. Lopputuloksena saavutetun todennetusti täsmällisen partikkelianalyysimenetelmän merkitys kulminoituu Valmet Automotive EV Power Oy:n Salon akkutehtaan laatuosaston laboratorion tuottamiin analyysituloksiin. Tämän opinnäytetyön myötä, toimeksiantaja saa käyttöönsä luotettavamman mittausmenetelmän sekä tekijästä riippumatta yhdenmukaisemmat tulokset, jos tekijänä on joku kolmesta tutkimukseen osallistuneesta työntekijästä.

LÄHTEET

American Society for Quality. n.d. Gage repeatability and reproducibility. Viitattu 25.1.2023. <https://asq.org/quality-resources/gage-repeatability#Estimating>

Automotive Industry Action Group. 2010. Measurement Systems Analysis (MSA). Reference Manual. 4. painos. Milwaukee: American Society for Quality Control.

Barbosa, G., Hermosilla, J. & Peres, G. 2014. R&R (repeatability and reproducibility) gage study applied on gaps' measurements of aircraft assemblies made by a laser technology device. Production Engineering 13.5.2014, 477–489. Viitattu 25.1.2023. Vaatii käyttöoikeuden. <https://link-springer-com.libproxy.tuni.fi/article/10.1007/s11740-014-0553-z#Fig2>

Benbow, D., Elshennawy, A. & Walker, F. 2012. The Certified Quality Technician Handbook. 2. painos. Milwaukee: American Society for Quality.

Brodzik, K., Faber, J. & Nycz, M. 2021. Understanding technical cleanliness: importance, assessment, maintenance. Combustion Engines – Polish Scientific Society of Combustion Engines 27.07.2021, 41-50. Viitattu 12.01.2023. Vaatii käyttöoikeuden. <http://www.combustion-engines.eu/pdf-140531-68360?file-name=Understanding%20technical.pdf>

CleanControlling. 2016. User Manual Particle trap. Verkkosivu. Viitattu 2.1.2023. https://www.cleancontrolling.com/fileadmin/user_upload/User_Manual_30001.pdf

Delgado, I., Delgado, P., Lopes, N., Marques, C. & Santos, G. 2018. Improving operator evaluation skills for defect classification using training strategy supported by attribute agreement analysis. Journal of the International Measurement Confederation 22.1.2018. Viitattu 25.1.2023. Vaatii käyttöoikeuden. <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0263224118300472?via%3Dihub#b0130>

Hemminki, S., Hiltunen, E., Hägg, M., Järvenpää, E., Kärhä, P., Linko, L., Saari-
nen, P. & Simonen, S. 2011. Laadukkaan mittaamisen perusteet. Espoo: Metrologian neuvottelukunta ja mittatekniikan keskus MIKES J4/2011. Viitattu 24.1.2023. <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/MIKES/2011-J4.pdf>

ISO 5725-1. 1994. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results-part 1. Genève: International Organization for Standardization. Viitattu 25.1.2023. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

Kaunismäki, M. 2020. Measurement system analysis of a drive testing laboratory. Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma. Tampereen yliopisto. Diplomityö. Viitattu 28.12.2022. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/123131/Kaunism%C3%A4kiMika.pdf?sequence=2>

Minitab. n.d. Methods and formulas for Expanded Gage R&R Study. Viitattu 14.3.2023. <https://support.minitab.com/en-us/minitab/21/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/measurement-system-analysis/how-to/gage-study/expanded-gage-r-r-study/methods-and-formulas/methods-and-formulas/>

Muelaner, J. 2020. Gage Studies and Gage R&R. Engineering.com 16.11.2020. Viitattu 24.1.2023. <https://www.engineering.com/story/gage-studies-and-gage-rr>

Saikaew, C. 2018. An implementation of measurement system analysis for assessment of machine and part variations in turning operation. Journal of the International Measurement Confederation 9.1.2018, 246-252. Viitattu 24.02.2023. Vaatii käyttöoikeuden. [An implementation of measurement system analysis for assessment of machine and part variations in turning operation \(sciedirect-tassets.com\)](https://sciedirect-tassets.com)

SFS-OPAS 99. 2010. Kansainvälisen metrologian sanasto (VIM.) Perus- ja yleiskäsitteet sekä niihin liittyvät termit. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. Viitattu 24.1.2023. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

ThermoFisher. n.d. Scanning Electron Microscopy for Technical Cleanliness. Viitattu 28.12.2022. <https://www.thermofisher.com/fi/en/home/materials-science/learning-center/applications/scanning-electron-microscopy-technical-cleanliness.html>

Tribble, A. 2000. Fundamentals of Contamination Control. 1. painos. Bellingham: Spie.

VDA 19.1. 2015. Quality management in the automotive industry – Inspection of Technical Cleanliness. Berlin. Verband der Automobilindustrie. Viitattu 28.12.2022. Vaatii käyttöoikeuden.

VDA 19.2. 2010. Quality Management in the Automotive Industry – Technical Cleanliness in Assembly. Berlin. Verband der Automobilindustrie. Viitattu 28.12.2022. Vaatii käyttöoikeuden.

Zeiss. n.d. What is technical cleanliness?. Verkkosivu. Viitattu 2.1.2023. <https://www.zeiss.fi/metrology/solutions/technical-cleanliness.html>

LIITTEET

Liite 1. Alkuseelvityksessä toteutetun gage R&R -tutkimuksen tulosraportti

1 (2)

Two-Way ANOVA Table With Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P
Näyte	9	1485,07	165,007	56,1108	0,000
Operaattori	2	37,73	18,867	6,4156	0,008
Näyte * Operaattori	18	52,93	2,941	1,3167	0,246
Repeatability	30	67,00	2,233		
Total	59	1642,73			

a to remove interaction term = 0,05

Two-Way ANOVA Table Without Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P
Näyte	9	1485,07	165,007	66,0397	0,000
Operaattori	2	37,73	18,867	7,5509	0,001
Repeatability	48	119,93	2,499		
Total	59	1642,73			

Gage R&R

Variance Components

Source	VarComp
Total Gage R&R	3,3170
Repeatability	2,4986
Reproducibility	0,8184
Operaattori	0,8184
Part-To-Part	27,0848
Total Variation	30,4018

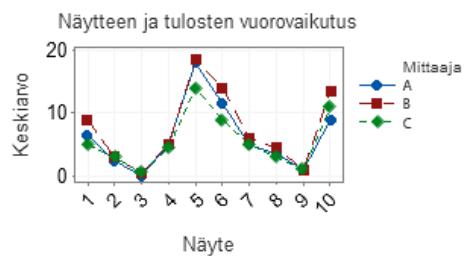
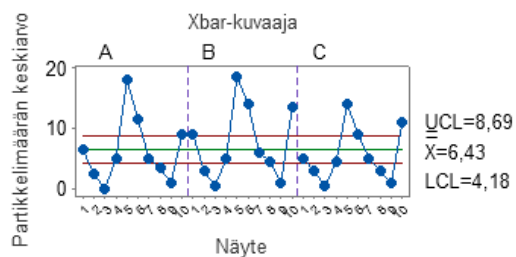
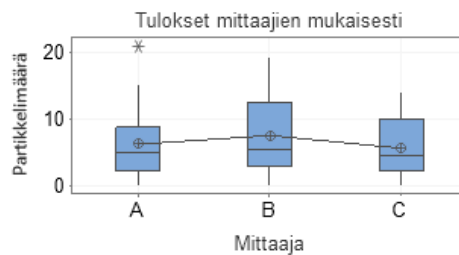
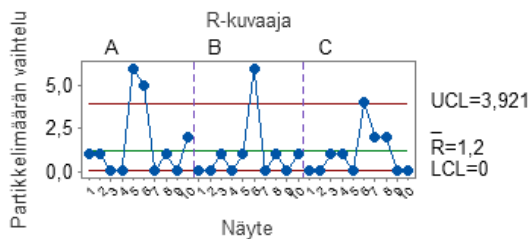
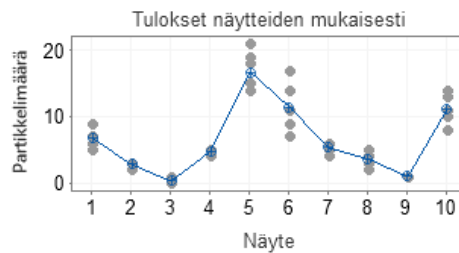
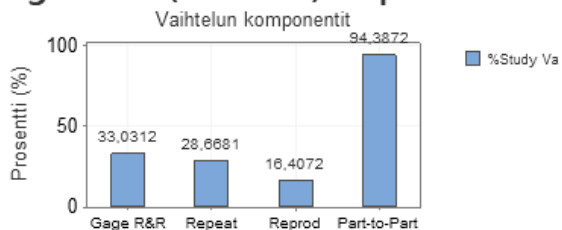
Gage Evaluation

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	1,82127	10,9276	33,03
Repeatability	1,58070	9,4842	28,67
Reproducibility	0,90466	5,4279	16,41
Operaattori	0,90466	5,4279	16,41
Part-To-Part	5,20431	31,2258	94,39
Total Variation	5,51378	33,0827	100,00

Number of Distinct Categories = 4

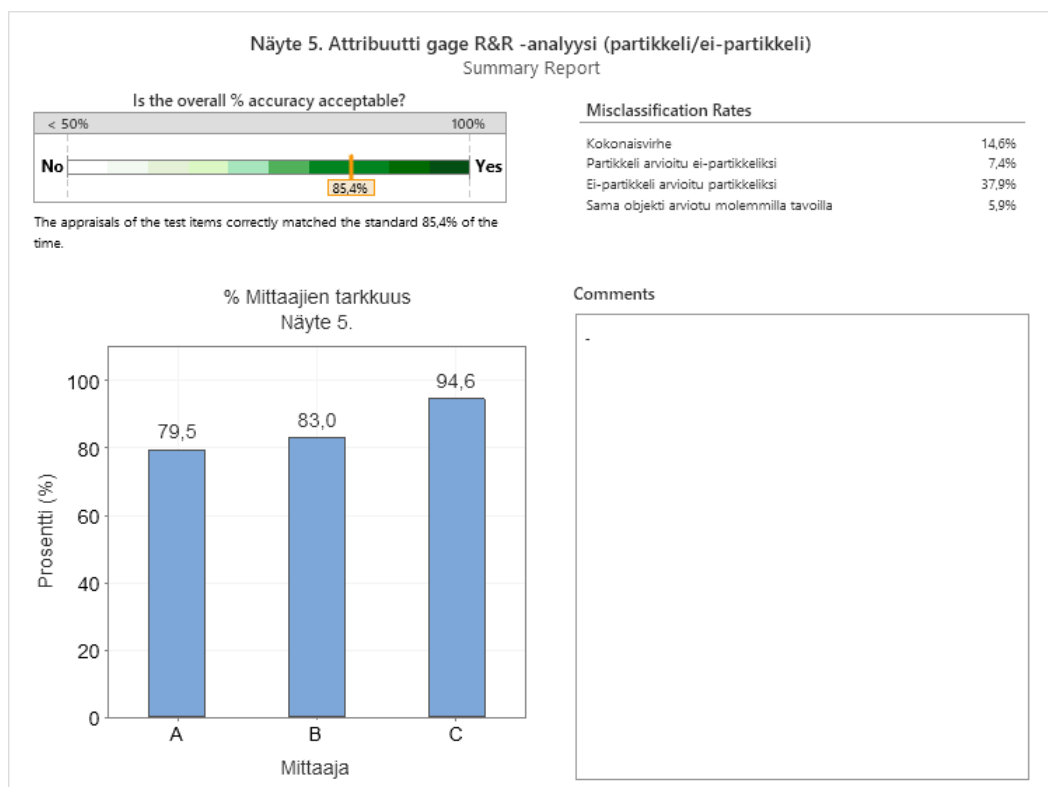
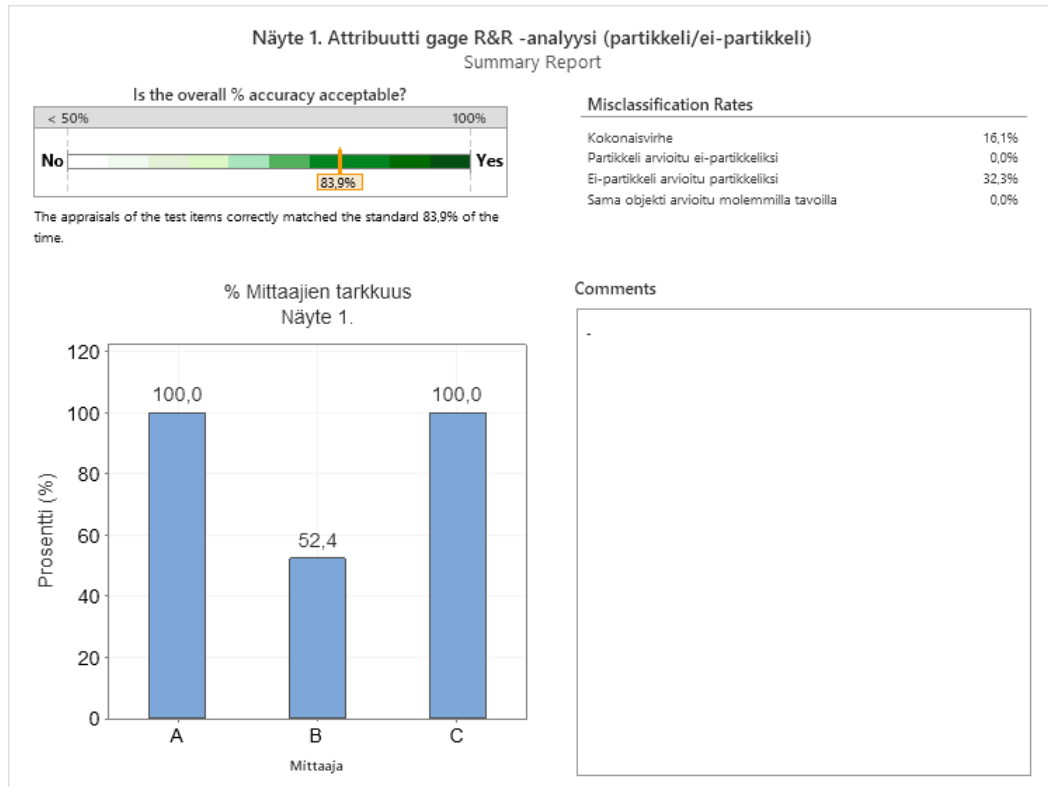
jatkuu

Gage R&R (ANOVA) Raportti



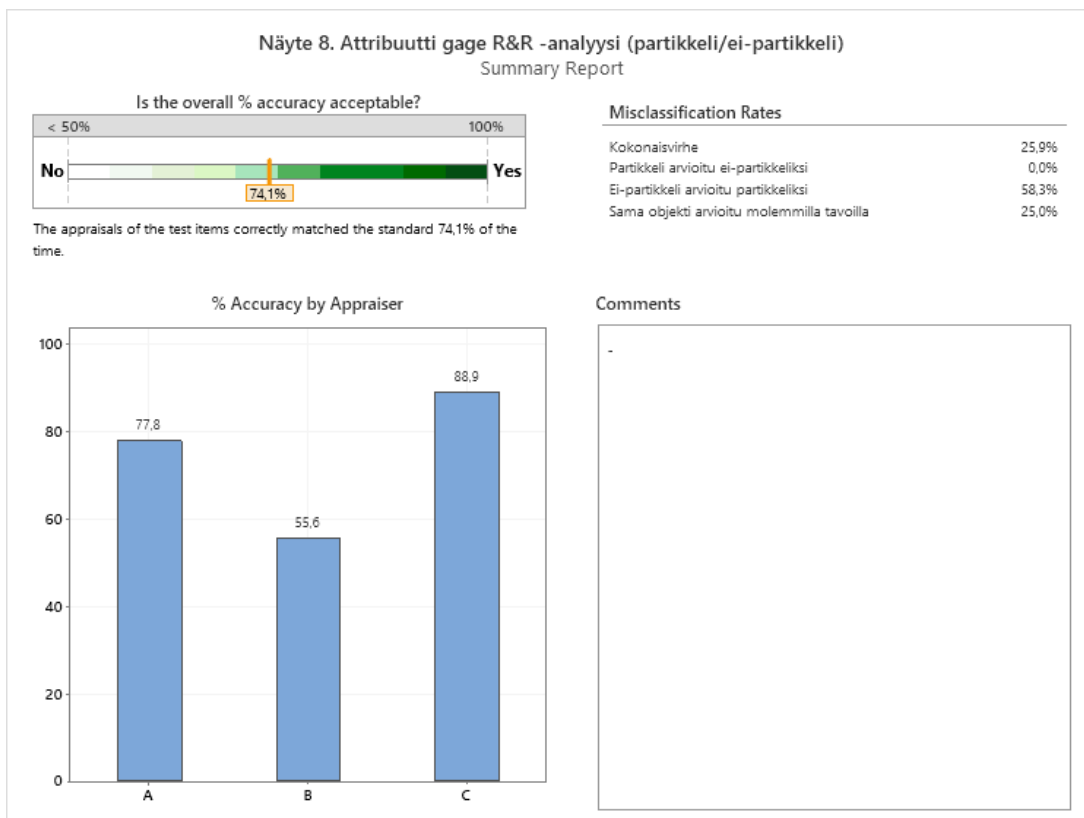
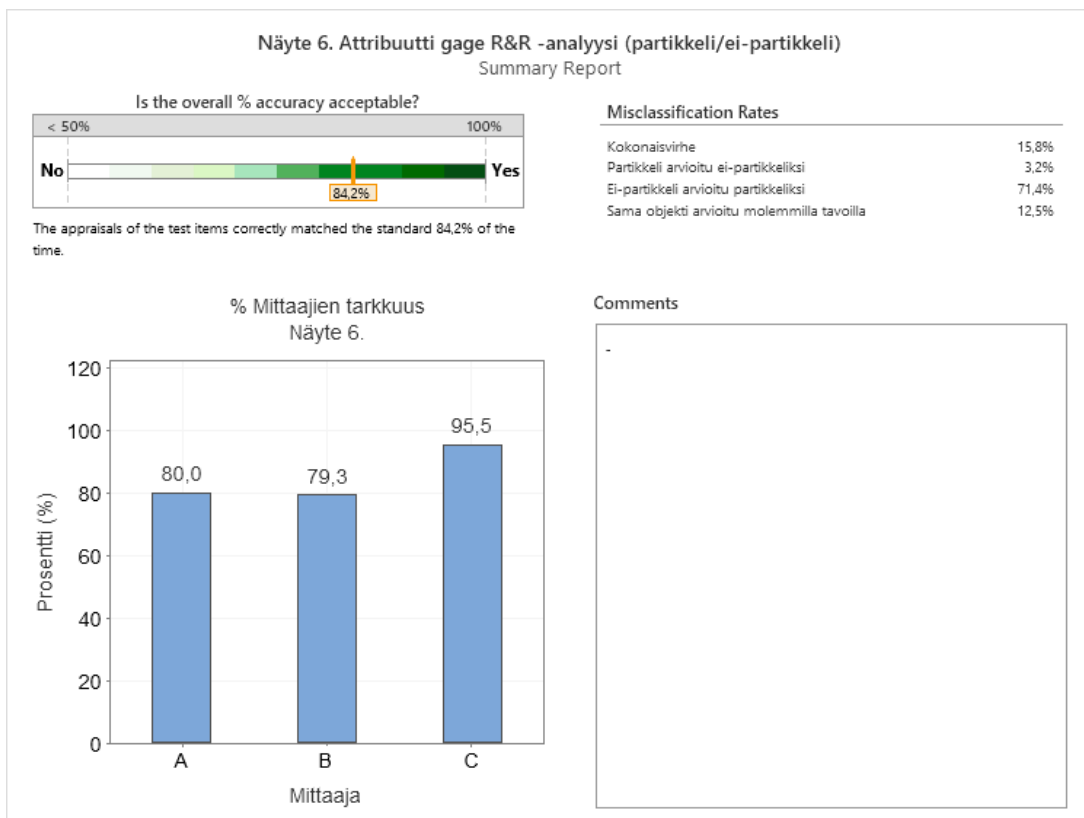
Liite 2. Vaihtelulähteiden selvityksessä työkaluna käytetyn Attribuutti gage R&R -tutkimuksen tulosraportit

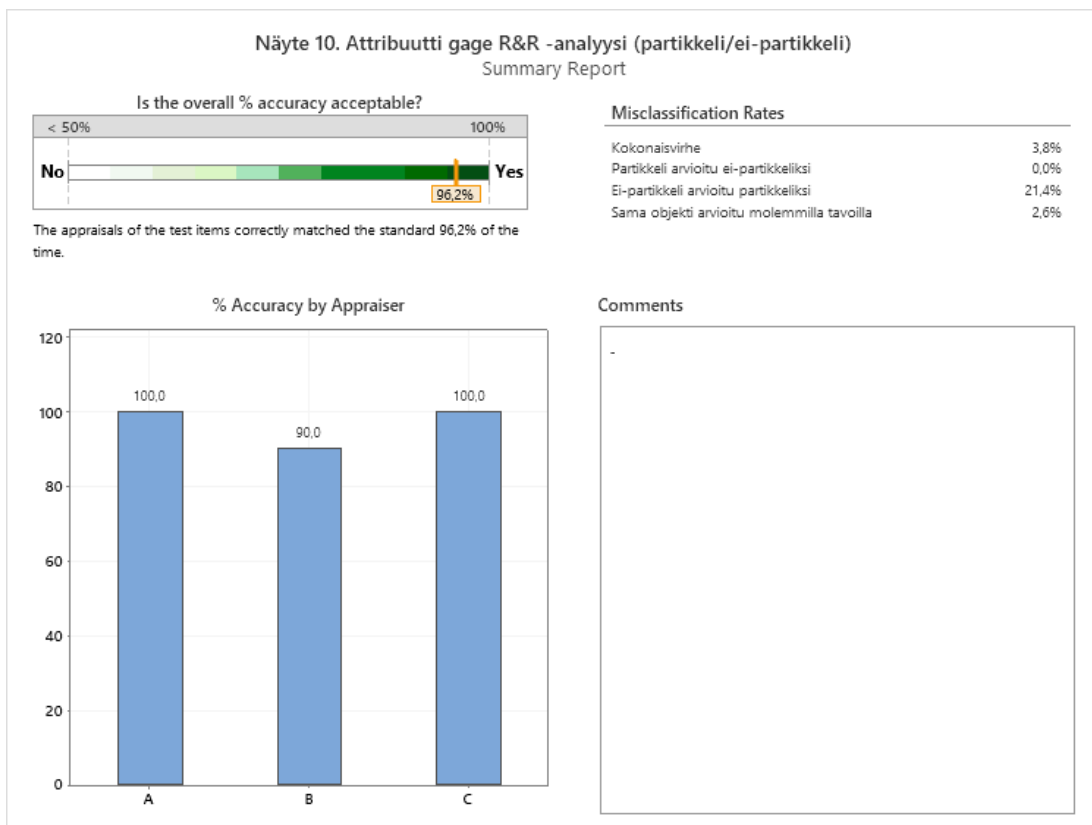
1 (3)



jatkuu

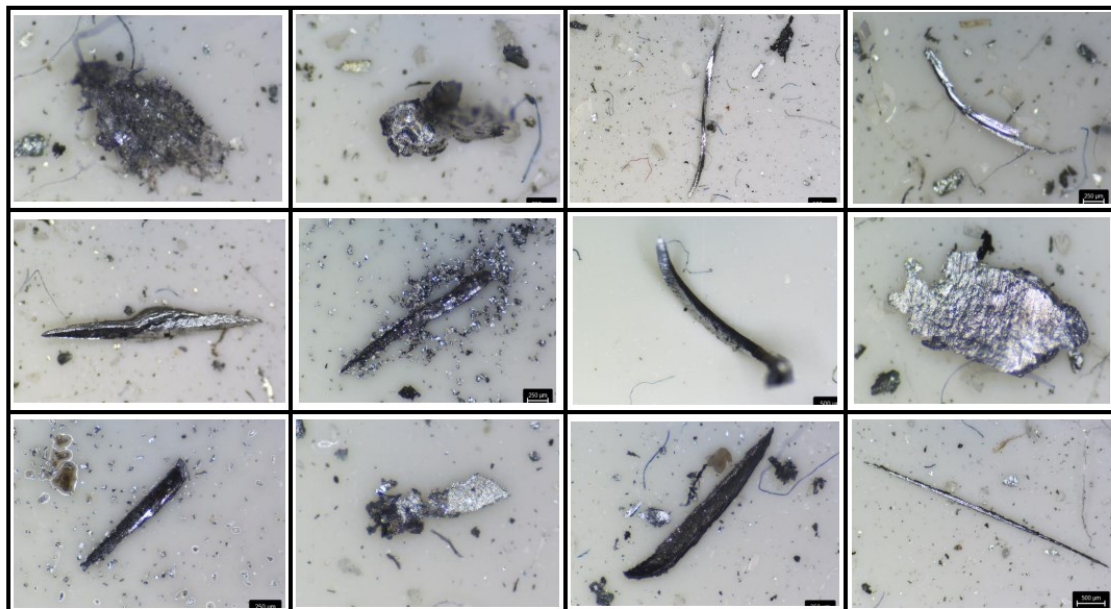
2 (3)





Liite 3. Työohjeen liitteeksi lisätty juliste

1 (3)

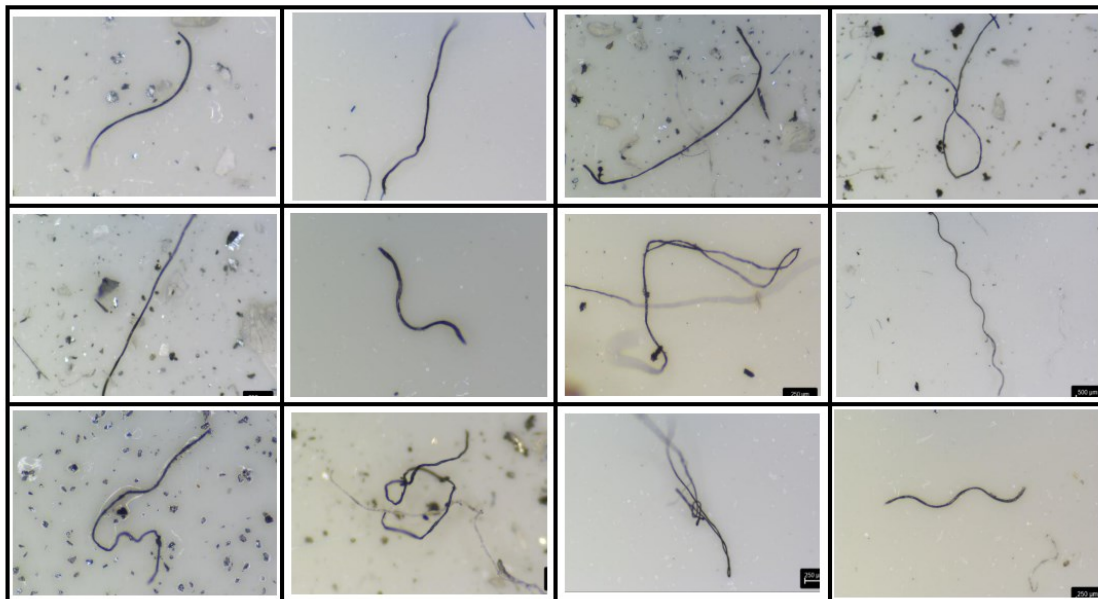
Particles with metallic appearance

jatkuu

Particles with non-metallic appearance

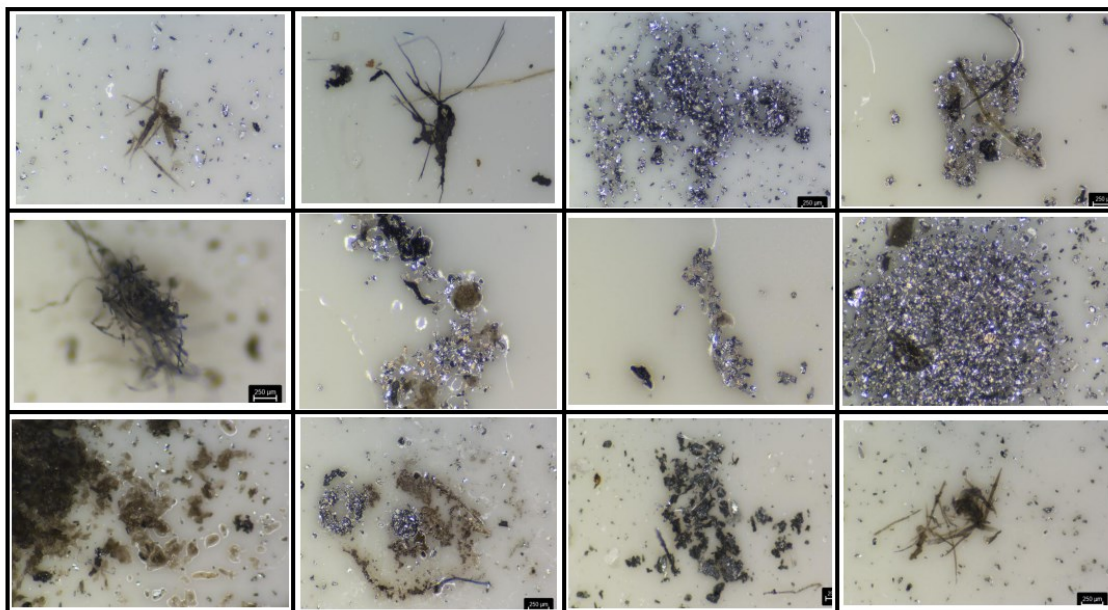


Fibers



Rejectable

These objects are rejected because they form clusters (more than one particle together) and all individual particles are smaller than the specification limit



Liite 4. Analyysin toistossa toteutetun gage R&R -tutkimuksen tulosraportti

1 (2)

Two-Way ANOVA Table With Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P
Näyte	9	1098,08	122,009	823,562	0,000
Mittaaja	2	0,00	0,000	0,000	1,000
Näyte * Mit- taaja	18	2,67	0,148	0,423	0,971
Repeatability	30	10,50	0,350		
Total	59	1111,25			

α to remove interaction term = 0,05

Two-Way ANOVA Table Without Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P
Näyte	9	1098,08	122,009	444,793	0,000
Mittaaja	2	0,00	0,000	0,000	1,000
Repeatabi- lity	48	13,17	0,274		
Total	59	1111,25			

Gage R&R**Variance Components**

Source	VarComp
Total Gage R&R	0,2743
Repeatability	0,2743
Reproducibility	0,0000
Mittaaja	0,0000
Part-To-Part	20,2892
Total Variation	20,5635

Gage Evaluation

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0,52374	3,1425	11,55
Repeatability	0,52374	3,1425	11,55
Reproducibility	0,00000	0,0000	0,00
Mittaaja	0,00000	0,0000	0,00
Part-To-Part	4,50435	27,0261	99,33
Total Variation	4,53470	27,2082	100,00

Number of Distinct Categories = 12

jatkuu

Gage R&R (ANOVA) Raportti

