

Puhtauden mittausmenetelmät tuuliturbiinivaihteen komponenteille

Elmeri Takkunen

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2021
Tekniikan ala
Insinööri (AMK), kone- ja tuotantotekniikka

Tekijä(t) Takkunen, Elmeri	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Huhtikuu 2021
	Sivumäärä 46	Julkaisun kieli Suomi
		Verkkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Puhtauden mittausmenetelmät tuuliturbiinivaihteen komponenteille		
Tutkinto-ohjelma Kone- ja tuotantotekniikka		
Työn ohjaaja(t) Kalevi Jaaranen, Harri Tuukkanen		
Toimeksiantaja(t) Moventas Gears Oy		
Tiivistelmä <p>Puhtaus on yhä merkittävämmässä roolissa teollisen valmistuksen laadunvalvonnassa, sillä laaduntuottokyky parantaa teollisuusyritysten kilpailukykyä. Tuuliturbiinivaihte valmistajien teknologiajohtaja Moventas Gears Oy haluaa kehittää laadunvalvonta toimintaansa vastaamaan omien sekä asiakkaidensa määrittämiä puhtauden vaatimuksia. Komponenttien puhtautta on mahdollista hallita vain, mikäli sitä pystytään mittaamaan.</p> <p>Tutkimuksen tehtävänä oli selvittää, millaisia puhtaudenmittaus menetelmiä käytetään valmistavassa teollisuudessa ja kuinka niitä on esitelty alan standardeissa. Tavoitteena oli kasvattaa yrityksen tietoisuutta eri puhtaudenmittausmenetelmistä ja löytää niistä erityyppisille tuuliturbiinivaihteen komponenteille sopivimmat.</p> <p>Tutkimus toteutettiin kehitystutkimuksena, jossa käytettiin laadullisia menetelmiä. Laadullinen menetelmä valikoitui menetelmäksi eri konseptien ymmärtämistä varten. Aineisto kerättiin systemaattisen kirjallisuuskatsauksen menetelmin sekä teemahaastatteluilla kattavan aineiston luomiseksi. Laajan aineiston analysoimiseksi käytettiin sisältöanalyysin työkaluja.</p> <p>Yritykselle saatiin kerättyä kattava tietopohja puhtaudesta, sekä puhtauden mittaamisen eri vaiheista laadunvalvonnan kehittämiseksi. Tutkimustuloksien perusteella pystyttiin määrittellä suosituksia puhtauden mittausmenetelmistä ja näitä tietoja yritys voi hyödyntää jatkossa, mutta selvitystyötä tulisi jatkaa. Yhtenä tutkimuksen tuloksena voidaan pitää tutkimuksessa ilmenneitä jatkotutkimuskohteita.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Puhtauden mittausmenetelmät, partikkelipuhtaus, tuuliturbiinin vaihdelaatikko		
Muut tiedot (Salassa pidettävät liitteet)		

Author(s) Takkunen, Elmeri	Type of publication Bachelor's thesis	Date April 2021 Language of publication: Finnish
	Number of pages 46	Permission for web publication: x
Title of publication Cleanliness measurement methods for wind turbine gear components		
Degree programme Degree Programme in Mechanical Engineering		
Supervisor(s) Jaaranen Kalevi, Tuukkanen Harri		
Assigned by Moventas Gears Oy		
Abstract <p>Cleanliness is playing an increasingly important role in quality control of industrial manufacturing, as the ability to produce quality improves the competitiveness of industrial enterprises. Moventas Gears Oy, the technology leader of wind turbine gearbox manufacturers, wants to develop its quality control operations to meet the cleanliness requirements set by itself and its customers. The cleanliness of the components can only be controlled if it can be measured.</p> <p>The purpose of the study was to find out what kind of cleanliness measurement methods are used in the manufacturing industry and how they are presented in industry standards. The goal was to increase the company's awareness of different cleanliness measurement methods and to find the most suitable ones for different types of components for wind turbine gears.</p> <p>The study was conducted as a development study using qualitative methods. The qualitative method was selected as a method for understanding different concepts. The material was collected using the methods of a systematic literature review and thematic interviews to create comprehensive material. Content analysis tools were used to analyze the extensive data.</p> <p>A comprehensive information base on cleanliness was collected for the company, as well as on the various stages of measuring cleanliness in order to develop quality control. Based on the research results, it was possible to define recommendations for cleanliness measurement methods, and this information can be used by the company in the future, however the study should be continued. One of the results of the research is the future research suggestions that emerged during the research.</p>		
Keywords/tags (subjects) Cleanliness measurement methods, Particle cleanliness, Wind turbine gearbox		
Miscellaneous (Confidential information)		

Sisältö

1	Johdanto	4
1.1	Puhtauden merkitys	4
1.2	Moventas Gears Oy.....	6
1.3	Tuuliturbiinivaihte	7
2	Tutkimusmenetelmät.....	9
2.1	Kehitystutkimusmenetelmä	9
2.2	Systemaattinen kirjallisuuskatsaus.....	11
2.3	Teemahaastattelu	11
2.4	Sisältöanalyysi	12
3	Tietoperusta.....	12
3.1	Puhtauden määritelmä	12
3.2	Puhtauden mittausmenetelmät	16
3.2.1	Irrotusmenetelmät	18
3.2.2	Näytteen suodatus	22
3.2.3	Näytteen analysointi.....	22
3.2.4	Suorat menetelmät.....	26
4	Tutkimustulokset	29
4.1.1	Nykytilan kuvaus.....	29
4.1.2	Vaatimukset.....	31
4.2	Teoreettinen viitekehys.....	32
5	Johtopäätökset	34
6	Pohdinta	37
	Lähteet	40
	Liitteet	42
	Liite 1. Muokattu komponenttilista	42
	Liite 2. Teemahaastattelujen johdattelevat kysymykset	43

Kuviot

Kuvio 1. Puhtaustason puutteesta johtuvaa naarmuuntumista	4
Kuvio 2. Moventaksen toimipisteet.....	6
Kuvio 3. Tuuliturbiinin vaihteiston rakenne.....	7
Kuvio 4. Planeettapyörän liukulaakeriholkki kokoonpanovaiheessa	8
Kuvio 5. Komponentin vaikeasti saavutettavia sisäpintoja	9
Kuvio 6. Näytteenoton menetelmät	17
Kuvio 7. Toistettavien puhtauden mittaustulosten kehitys	18
Kuvio 8. Suodattimen kuvaamisen toimintaperiaate.....	26
Kuvio 9. Esimerkki porauksesta, joka tarkastetaan silmämääräisesti	30

Taulukot

Taulukko 1. Partikkelien kokoluokat ja havainnointimenetelmät.....	14
Taulukko 2. Partikkelien kokoluokat.....	14
Taulukko 3. Likapartikkelien jakautumisen arvoasteikko	16
Taulukko 4. Asiakkaan vaatima puhtausluokka	32
Taulukko 5. Mittausmenetelmien kategorisointi.....	33
Taulukko 6. Analyysimenetelmien kategorisointi	34

Käsitteet

Kontaminaatio

Erityyppisten epäpuhtauksien tai yleisesti saastumisen läsnäoloa esimerkiksi pinnoilla tai ympäristössä. (COLLINS ENGLISH DICTIONARY. 2012.)

Likapartikkeli

Yksittäinen pieni likahiukkanen, joka koostuu epäorgaanisesta tai kiinteästä orgaanisesta aineesta. (ISO 16232:2018.)

Planeettaporras

Kehäpyörästä, planeettapyöristä ja aurinkoakselista koostuva kokonaisuus, joka on osana tuuliturbiini vaihdetta.

Roottori

Kokonaisuus joka tuulivoimaloissa koostuu navasta ja lavoista.

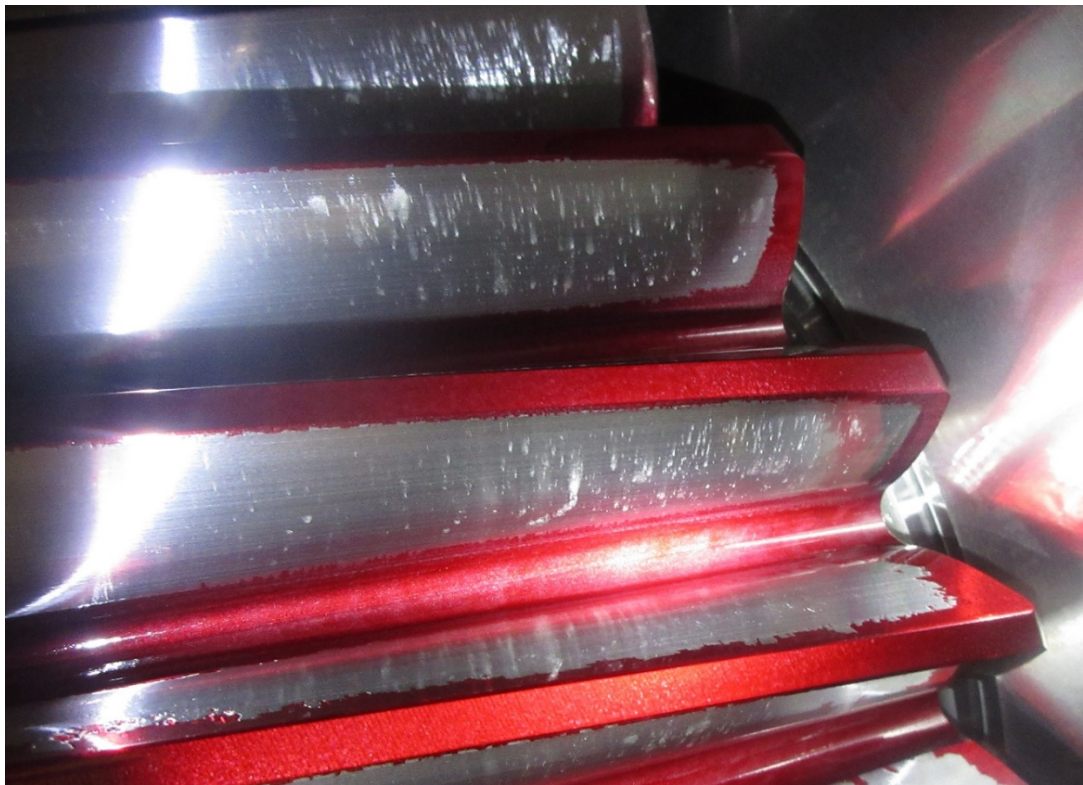
Tuuliturbiini

Tuulivoimala kokonaisuudessaan.

1 Johdanto

1.1 Puhtauden merkitys

Modernien koneiden suorituskyky on herkkä kriittisten likahiukkasten päätymiselle komponentteihin ja järjestelmiin. Niiden luotettavan toiminnan saavuttamiseksi on tärkeää hallita järjestelmään päätyvien likahiukkasten määrää jo koneen valmistusvaiheessa. Erityyppiset nesteet usein kulkevat näiden komponenttien kautta ja nesteiden kuljettamana hiukkaset voivat päätyä järjestelmän herkimpiin alueisiin. Tämä voi esimerkiksi aiheuttaa järjestelmien komponenteissa vaurioita tukkimalla suodattimia, jumiuttamalla järjestelmän osia kuten laakereita, venttiileitä ja pumppuja. Lisäksi metallilastut aiheuttavat naarmuuntumista komponenttien pinnoilla kuten kuviossa 1 esiintyvissä hammastuksessa. Tämä vaikuttaa negatiivisesti koneiden laskennalliseen käyttöikään ja voi heikentää niiden suorituskykyä. Hallinnan perustana toimii hiukkasten mittaaminen. (ISO 18413:2002.)



Kuvio 1. Puhtaustason puutteesta johtuvaa naarmuuntumista

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin komponenttien puhtautta ja sen mittaamista valmistavassa teollisuudessa. Opinnäytetyön toimeksiantajalla Moventas Gears Oy:llä oli tarve kehittää laadunvalvontaa tuuliturbiinivaihteen komponenttien puhtauden mittaamisen osalta asiakkaan vaatimusten mukaisiksi sekä vastaamaan yhtiön omia tavoitteita vaihteen pitkän elinkaaren varmistamiseksi. Työn aihe valittiin tämän tarpeen mukaisesti ja rajattiin vastaamaan opinnäytetyön laajuutta. Tässä opinnäytetyössä ei oteta kantaa puhtausluokkien saavuttamiseen tai toiminnan kehittämiseen puhtauden osalta, vaan keskitytään puhtauden mittaamiseen laadunvalvonnan yhteydessä. Toimeksiantaja tarjosi työskentelyyn tietokoneen sekä työpisteen toimeksiantajan tiloissa Ikolan tehtaan yhteydessä.

Tavoitteena tässä opinnäytetyössä on tarjota toimeksiantajayritykselle tietoa eri puhtaudenmittausmenetelmistä ja löytää niistä erityyppisille komponenteille sopivimmat. Tehtävään kuuluu tutustua valmistavan teollisuuden puhtaudenmittausmenetelmiin ja -standardeihin. Tutkimusongelmana tässä opinnäytetyössä on toimeksiantajan puutteellinen puhtauden mittauskäytäntö. Tästä johdettiin seuraavat tutkimuskysymykset:

- Miten valmistavassa teollisuudessa puhtaus määritellään?
- Millä menetelmillä edellä mainittu määritelmä mitataan?

Opinnäytetyön rakenne etenee seuraavasti: ensimmäinen osio koostuu toimeksiantajan sekä tuuliturbiinivaihteen esittelystä. Toisessa luvussa esitellään opinnäytetyöhön käytettyä datan keruu sekä sen analysointimenetelmiä. Työn tietoperustaa käsitellään kolmannessa luvussa, joka koostuu sekä puhtauden teoriasta että eräistä työhön valikoiduista menetelmistä. Tietoperustan lähtökohtana käytetään kahta toimeksiantajan suosittamaa standardia: ISO 4404 ja ISO 16232. Näitä yleisesti käytetään valmistavassa teollisuudessa puhtauden mittaamiseen ja analysointiin. Neljännessä luvussa esitellään tutkimustuloksia, jotka koostuvat haastatteluiden yhteenvedosta sekä teoriaosuuden viitekehyksestä. Tulosten jälkeen esitetään työn johtopäätökset omassa luvussaan, joka sisältää analyysin työn tuloksista, sekä suosituksia mittausmenetelmien valintaan. Viimeisenä lukuna on pohdinta työn kokonaisuudesta sekä tutkimuksen onnistumisesta.

1.2 Moventas Gears Oy

Työn toimeksiantajana toimii Moventas Gears Oy, joka on kotimainen tuulivoimailoiden vaihteistoja valmistava yhtiö. Yritys on alan teknologiajohtaja, joka panostaa jatkuvaan tutkimukseen ja tuotekehitykseen pitääkseen tämän asemansa. Moventaksen tuuliturbiinivaihteistoja on toimitettu yli 15 000 kappaletta valmistuksen alettua vuonna 1980. Yhtiö työllistää noin 500 henkeä maailmanlaajuisesti, joista Suomessa on yli 400 työntekijää. Yhtiön omistaa skotlantilainen teollisuusyhtiö Clyde Blowers Capital. (Moventas Company presentation ENG – 2021. 2021.) Sen viimeisin saatavilla oleva tilikauden tulos oli vuonna 2019 noin 10,9 miljoonaa euroa tappiolla ja liikevaihto reilut 121 miljoonaa euroa. (Suomen Asiakastieto Oy N/A.)

Moventas toimii kansainvälisillä markkinoilla ja sen päätoimipiste sijaitsee Jyväskylässä Ikolassa ja Rautpohjassa. Yhtiöllä on lisäksi tehdas Karkkilassa. Suomen lisäksi yhtiöllä on toimipisteitä ympäri maailmaa yhdeksässä maassa, jotka ovat esitetty kuviossa 2. Moventas tarjoaa myös globaalisti huoltopalveluita tuulivoimateollisuuden eri valmistajien vaihteille. (Moventas Gears Oy 2021.)



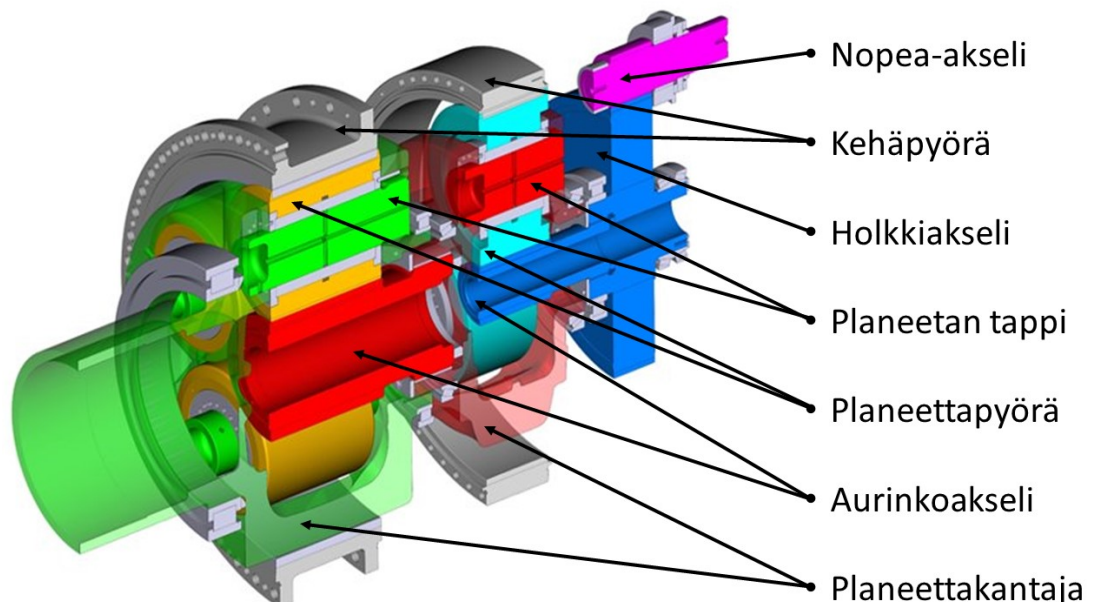
Kuvio 2. Moventaksen toimipisteet (Moventas Gears Oy 2021.)

1.3 Tuuliturbiinivaihde

Tuulivoimalat koostuvat pääsääntöisesti tornista, roottorista, lavoista sekä konehuoneesta. Tuulivoimateollisuuden viime vuosien trendinä on ollut kasvattaa voimaloiden kokoa, sillä tehontuotto on suoraan verrannollinen roottorin siipien muodostamaan pinta-alaan ja siitä johtuen siipien pituuteen.

Yleensä tuulivoimaloissa käytetään vaihdelaatikkoa, joka siirtää roottorin hitaan pyörimisnopeuden sähköä tuottavan generaattorin vaatimaksi pyörimisnopeudeksi. Vaihdelaatikko on yksi tuulivoimalan toimivuuden sekä tehokkuuden kannalta kriittisimmistä komponenteista.

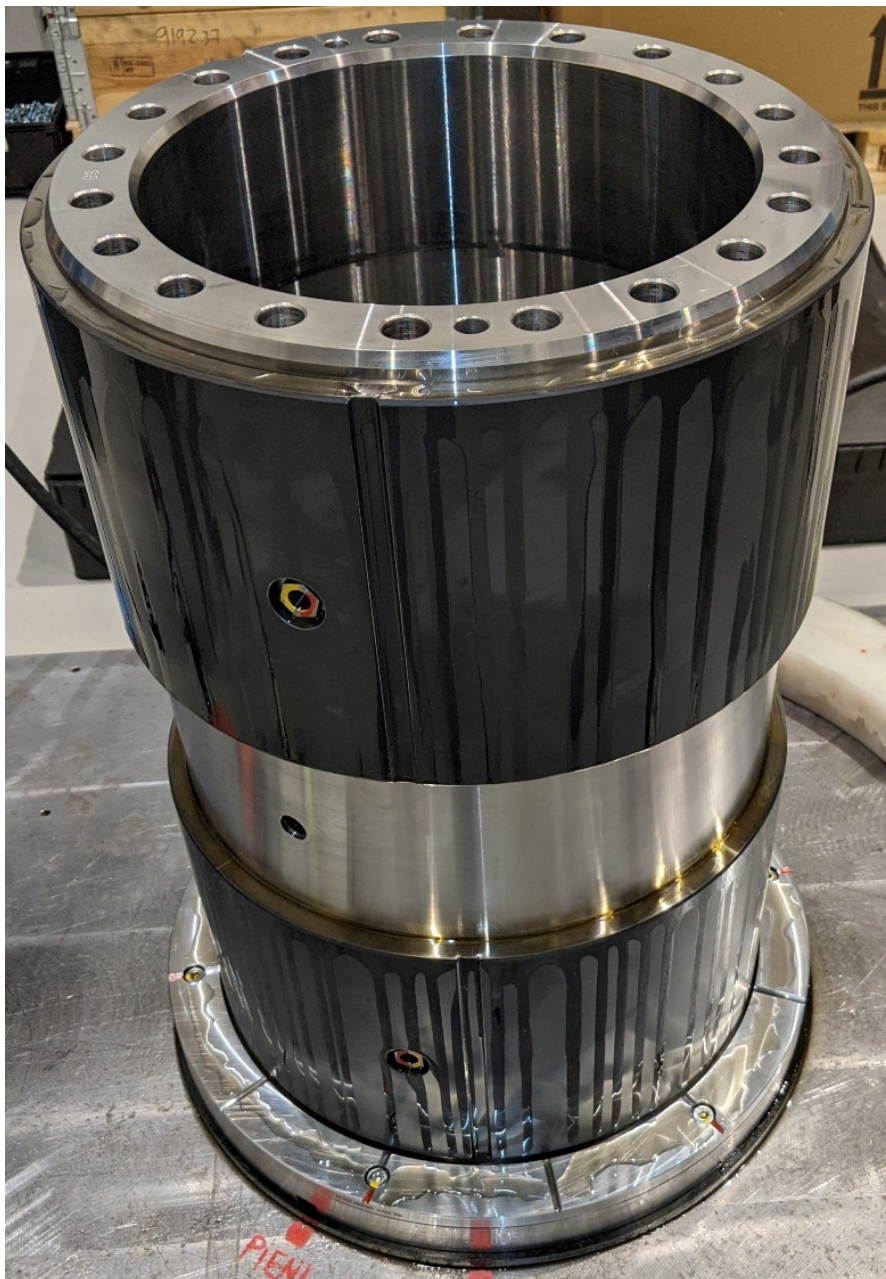
Tässä työssä käsitellään Moventaksen viiden megawatin Exceed Evo mallin tuuliturbiinivaihdetta. Exceed Evo pystyy hyödyntämään 6000 kilonewtonmetrin vääntömomenttia ja painaa 35000 kilogrammaa. Se koostuu kahdesta planeettaportaasta ja lieriöportaasta. Lieriöportaasta on kuvattu kuviossa 3 siihen kuuluvalla holkkiakselilla, joka esitetään sinisenä. (Moventas Gears Oy 2021.)



Kuvio 3. Tuuliturbiinin vaihteiston rakenne (Moventas Gears Oy 2021, muokattu)

Komponentit

Tuuliturbiinivaihteen komponentit ovat suurikokoisia, kuten kuviossa 4 esiintyvistä planeettapyörän liukulaakeriholkista voidaan havaita. Puhtauden mittaamisen tarkoituksena on havaita likapartikkelit komponenttien kriittisiltä pinnoilta. Tällaisia pintoja ovat tyypillisesti säiliöt, putkistot, kotelot ja kanavat, jotka ovat yhteydessä lian kanalta herkkiin komponentteihin esimerkiksi pumppuihin ja venttiileihin tai kuten tämän opinnäytetyön tapauksessa, laakereihin. Tällaisten komponenttien kriittiset pinnat ovat usein sisäpintoja, joiden visuaalista havainnointia on mahdotonta tehdä, kuten poraukset jotka ovat esitetty kuviossa 5.



Kuvio 4. Planeettapyörän liukulaakeriholkki kokoonpanovaiheessa



Kuvio 5. Komponentin vaikeasti saavutettavia sisäpintoja

Toimeksiantajalla on valmis asiakaskomponenttalista, josta tutkittavat komponentit rajattiin. Komponenttalista (Liite 1) on työssä käännetty alkuperäisesti poiketen suomeksi ja salassa pidettävät tiedot on poistettu, sillä ne eivät olleet työn kannalta relevantteja. Tässä työssä käsiteltiin vain öljyn kanssa kosketuksessa olevia komponentteja.

2 Tutkimusmenetelmät

2.1 Kehitystutkimusmenetelmä

Koska työn aiheeseen kuuluu myös toiminnan kehittäminen, työssä tullaan käyttämään kehitystutkimusmenetelmää. Tämä on monitoimiminen menetelmä, jonka erilaisia tutkimusmenetelmiä käytetään tilanteen ja kehittämiskohteen mukaan. Kehitystutkimuksen tavoitteena on muutos yrityksen tuotteiden, prosessien tai muiden vaikutettavissa olevien kohteiden parantamiseksi. Kehittämistutkimusmenetelmässä

voidaan yhdistellä kvantitatiivisia ja kvalitatiivisia tutkimustapoja toisiaan täydentäen. (Kananen 2012.)

Kvantitatiivisessa eli määrällisessä tutkimuksessa lopputuloksena on numeerisista suureista koostuva aineisto, jolla voidaan luoda objektiivinen kuvaus olemassa olevasta tilanteesta. Tutkimus painottuu lukumääriin ja prosenttiosuuksiin, asioiden välisiin riippuvuuksiin tai mitattaviin muutoksiin ottamatta kantaa ilmiöiden syihin. (Heikkilä 2014.)

Kvalitatiivisessa eli laadullisessa tutkimusotteessa lopputuloksena on teoria tai yleisyys, jolla pyritään luomaan ilmiöstä hyvä kuvaus. Laadullisessa tutkimuksessa on mahdollista saada esille henkilökohtaisia kokemuksia ilmiöstä ja selvittää, miten asia tehdään. Tämä metodi luo myös syvällisemmän ymmärryksen aiheesta ja eri osa-alueiden kytköksistä. Tutkimus painottuu syy-seuraussuhteen kartoittamiseen ja se sopii toiminnan kehittämisen menetelmäksi. (Kananen 2012; Tuomi & Sarajärvi 2018.)

Laadullista tutkimusta käytetään siis usein kokemusten ja eri konseptien ymmärtämiseen. Laadullinen menetelmä on erityisesti hyödyllinen, kun tutkittavan ilmiön kirjallisuus on rajallista. Tutkimustekniikat ovat myös usein epämuodollisia ja ennalta määrittelemättömiä; usein tutkimusmenetelmä saattaa muuttua tutkimuksen aikana vastaamaan paremmin tutkimuksen tarkoitusta. Menetelmän muutokseen voi olla syynä esimerkiksi esiin tullut uusi tieto, jota ei oltu huomioitu aiemmin tai uusien vaihtoehtojen syntyminen tutkimuksen edetessä. (Tuomi, Sarajärvi 2018.)

Tutkimuksen tulosten luotettavuuden varmistaminen on ensiarvoisen tärkeää tutkimusta tehdessä ja näin tutkimusaineiston analyysimenetelmät tulee olla tutkimukselle sopivat. Kvalitatiivisessa tutkimuksessa syntyy kahdenlaista aineistoa: primääriaineistoa ja sekundääriaineistoa. Primääriaineisto on tutkimuksessa valitulla tutkimusmenetelmällä (haastattelu, kysely) syntyvä aineisto ja sekundääriaineistoa ovat aiemmat tutkimustiedot, -tulokset, standardit, dokumentit ja tilastot. (Kananen 2015.)

Tässä opinnäytetyössä käytetään laadullista menetelmää esimerkiksi työn kohteen tietoperustan ja termistön esiintuomiseksi sekä ymmärtämiseksi. Aineistonkeruumetodina käytetään systemaattista kirjallisuuskatsausta tietoperustan rakentamiseen ja teemahaastattelua kattavan tutkimusaineiston keräämiseksi, jotta varmistetaan ilmiön syvällisen ymmärryksen tavoittaminen. (Kananen 2012.)

2.2 Systemaattinen kirjallisuuskatsaus

Systemaattisessa kirjallisuuskatsauksessa tavoitteena voi olla parhaimman toimintatavan löytäminen tutkimustiedon avulla. Se tiivistää olennaista tietoa tietystä aihepiiristä jo olemassa olevasta kirjallisuudesta ja tuo esiin tulosten kannalta tärkeitä tutkimuksia ja menetelmiä. Salminen (2011) kuvailee systemaattisen kirjallisuuskatsauksen myös tekniikaksi, joka rakentaa alkuasetelmaa ja tukee muita tutkimusmetodeja. Tästä syystä se soveltuu hyvin kyseessä olevan opinnäytetyön tavoitteisiin. Systemaattinen kirjallisuuskatsaus on perustellusti hyödynnettävissä kun tarvitaan paljon tietoa päätöksenteon tueksi. (Salminen 2011.)

2.3 Teemahaastattelu

Teemahaastattelu on puolistrukturoitu haastattelun muoto, missä edetään etukäteen määriteltyjen teemojen pohjalta. Vastauksien perusteella voidaan esittää tarkempia ja syventäviä kysymyksiä. Yhdenmukaisuuden vaade vaihtelee tutkimusten mukaan, joten menetelmä sallii kysymyksien vapaan muotoilun ja esittämisjärjestyksen eri haastateltavien välillä. Jokaiselta haastateltavalta ei myöskään ole välttämättöntä kysyä jokaista kysymystä. (Tuomi, Sarajärvi 2018.) Näiden tekijöiden johdosta teemahaastattelu valikoitui tähän työhön sopivimmaksi haastattelumenetelmäksi, sillä haastateltavat toimivat osittain eri vastualueilla toimeksiantajayrityksessä.

Teemahaastattelun tavoitteena on saada faktapohjainen vastauksen lisäksi syvempi ymmärrys vastauksen taustoista. Teemahaastattelun aikana voidaan saada esille informaatiota aiheesta, joka on vähemmän tunnettu tai siitä ei löydy paljon tietoa. Haastattelun etuna on kysymysten ja vastausten välisten väärinymmärrysten välttäminen. Haastateltavat kuvailevat mielipiteitään usein tarinoiden avulla ja näistä usein

pystytään löytämään tärkeitä vastauksia tutkimukselle. Haastattelut on hyvä nauhoittaa, jotta ne voidaan kuunnella uudestaan puhtaaksi kirjoittamista ja datan analysointia varten. Nauhoittamisella voidaan myös varmistaa haastattelijan keskittyminen haastattelutilanteeseen, kun hänen ei tarvitse pitää tarkkoja muistiinpanoja haastattelusta. (Puustinen 2013.)

2.4 Sisältöanalyysi

Sekä systemaattisen kirjallisuuskatsauksen että teemahaastattelusta saatu aineisto analysoidaan sisältöanalyysillä, joka on yleinen laadullisen tutkimuksen analysointimenetelmä. Sisältöanalyysi tuo esille tulosten yhteneväisyyden, merkityksiä sekä tulosten erilaisuuden. Usein analyysiä tehdään samanaikaisesti tutkimusaineiston keruun rinnalla aineiston riittävyyden varmistamiseksi. (Kananen 2015.)

Haastatteluista saatu aineisto yhteismitallisetään eli litteroidaan ja sisältöanalyysiä käytettäessä pieneen aineistomäärään aineistosta etsitään esiin nousevia teemoja kuten tekijöitä, termejä ja viestejä. Laajempaa aineistomäärää analysoitaessa, kuten kirjallisuuskatsauksen aineistoa, voidaan hyödyntää yhdenmukaistamista, kuten aineiston koodaamista taulukkotyökalun avulla ja nousevien teemojen erittelyä taulukosta, joka helpottaa aineiston käsittelyä analyysissä. Usein analysoinnin jälkeen täydennetään aineistoa ja tätä varten jo haastatteluissa on hyvä pyytää haastateltavalta lupa lähettää lisäkysymyksiä. (Kananen 2015.) Kvantitatiivisen menetelmän piirteitä löytyy tutkimusaineiston analysoinnissa puhtausluokkien numeeristen määreiden johdosta.

3 Tietoperusta

3.1 Puhtauden määritelmä

Puhtautta voidaan tarkastella monella eri tavalla ja yleisesti pintojen puhtaudella tarkoitetaan sitä, että pinnoilla ei ole likaa eli saastumista. Saastumisen eri tyyppisiä on

useita ja ne on yleisesti jaettu neljään eri kategoriaan; mikrobisaasteet, ionisaasteet, molekyylisaasteet ja hiukkassaasteet. (Kohli 2019.)

Mikrobisaasteilla tarkoitetaan ei-toivottujen eliöiden, kuten bakteerien kasvamista pinnoilla. Tämän tyyppistä saastumista havaitaan yleisesti elintarvike- ja lääketeollisuudessa. Ionisaasteilla viitataan ei-toivottuihin ioneihin pinnoilla, joihin ne voivat aiheuttaa korroosiota. Nämä saasteet päätyvät pinnoille esimerkiksi ympäristöstä tai ihmisen kosketuksesta. Molekyylisaasteilla tarkoitetaan kalvoa, joka muodostuu esimerkiksi rasvoista tai öljyistä ja peittää osan pinnasta tai koko pinnan. Nämä saasteet ovat todennäköisesti peräisin ilmasta tai valmistuksen eri vaiheista ja voivat aiheuttaa esimerkiksi riskin tulipalolle. Hiukkassaasteilla viitataan ei-toivottujen hiukkasten, eli partikkelien, esiintymiseen pinnoilla. Näitä partikkeleita ovat esimerkiksi pöly- ja metallihiukkaset tai kuidut, jotka ovat yleisesti peräisin valmistuksen eri vaiheista sekä ympäristöstä. (Kohli 2019.)

Tässä työssä käsitellään partikkelipuhtautta. Komponenttien partikkelipuhtaus vaihtelee eri kappaleiden välillä, sillä likapartikkeleita muodostuu useissa eri kokoluokissa hallitsemattomalla tavalla. Tämä koskee lähes kaikkia epäpuhtauden syntymisvaiheita valmistuksen, kuljetuksen ja varastoinnin aikana. (ISO 16232:2018.)

Puhtauden analysointimenetelmät vaikuttavat siihen, millä tavalla puhtaustaso esitetään. Erilaisia tapoja puhtausluokkien esittämiseen ovat partikkelien suurin koko, kokojakauma, kokonaisuudessa tai näiden esittämistapojen yhdistelmät. Likapartikkelien alkulähteen selvittämiseksi voidaan ilmoittaa myös niiden koostumus. Puhtaustasot ilmoitetaan joko pinta-alaan, tilavuuteen nähden tai joissakin tapauksissa myös komponenttia kohden. Puhtausmittausten tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään vain, kun ne ovat ilmoitettu samassa yksikössä. (ISO 16232:2018.)

Puhtausluokituksien kokojakauman esittämiseksi partikkelit tulee jakaa eri kokoluokkiin. Alla olevassa taulukossa 1 on esitetty eräs partikkelien luokittelumalli niiden koon ja havainnointi menetelmien mukaan.

Taulukko 1. Partikkelien kokoluokat ja havainnointimenetelmät (Kohli 2012, 113)

Partikkeliluokka	Partikkelikoko nanometreinä	Havainnointimenetelmät
Makro	>50000	Paljas silmä
Mikroni	>100-50000	Tavanomainen mikroskooppi
Submikroni	10-100	Suurteho-mikroskooppi
Nano	>1-10	Elektroni-mikroskooppi
Atomi	0,01-1	Elektroni-mikroskooppi
Subatomi	<0,01	Spektroskooppi, Atomivoimamikroskooppi

Taulukossa 2 on esitetty vaihtoehtoinen partikkelien kokoluokitus ISO 8502-3 standardin mukaan. Tätä luokitusta yleisesti käytetään esimerkiksi teräpintojen puhtauden arviointiin ennen niiden menemistä maalattavaksi. (Kohli 2019.)

Taulukko 2. Partikkelien kokoluokat (ISO 8502-3:2017)

Kokoluokka	Partikkelien kuvaus
0	Partikkeleita ei havaita 10 kertaisella suurennuksella
1	Partikkelit havaittavissa 10 kertaisella suurennuksella muttei paljain silmin (halkaisijaltaan < 0,05 mm)
2	Partikkelit juuri havaittavissa paljain silmin (halkaisijaltaan 0,05 mm-0,1 mm)
3	Partikkelit selkeästi havaittavissa paljain silmin (halkaisijaltaan < 0,5 mm)
4	Partikkelit halkaisijaltaan 0,5 mm-2,5 mm
5	Partikkelit halkaisijaltaan yli 2,5 mm

ISO 4406:2017

Hydraulinesteen puhtausstandardi ISO 4406 määrittelee hydraulinesteen puhtaus-tason. Hydrauliikanesteen puhtaustaso ei ole suoraan verrattavissa komponenttien puhtaustasoon, mutta se on sovellettavissa huuhdeltaville komponenteille.

Standardissa likapartikkelit on jaettu kolmeen eri kokoluokkaan. Ensimmäinen kokoluokka on suuremmat tai yhtä suuret kuin neljän, mutta pienemmät kuin kuuden mikrometrin kokoiset partikkelit. Toinen kokoluokka on suuremmat tai yhtä suuret kuin kuuden, mutta pienemmät kuin 14:n mikrometrin kokoiset partikkelit ja kolmas on suuremmat tai yhtä suuret kuin 14:n mikrometrin kokoiset partikkelit. Jokaisen kokoluokan partikkelien lukumäärät lasketaan millilitrassa nestettä kohden ja niiden lukumäärästä annetaan asteikko arvo taulukon 3 mukaan. Puhtautta kuvataan muodossa xx/xx/xx, joissa ilmoitetaan eri kokoluokkien lukumäärästä annettu arvo. Esimerkiksi 11/18/12 tarkoittaa että neljästä viiteen mikrometrin kokoisia partikkeleita on 11-20 kappaletta, kuudesta 14:ään mikrometrin kokoisia on 1301-2500 kappaletta ja yli 14:n mikrometrin kokoisia partikkeleita on 21-40 kappaletta millilitraan nestettä kohden. (ISO 4406:2017.)

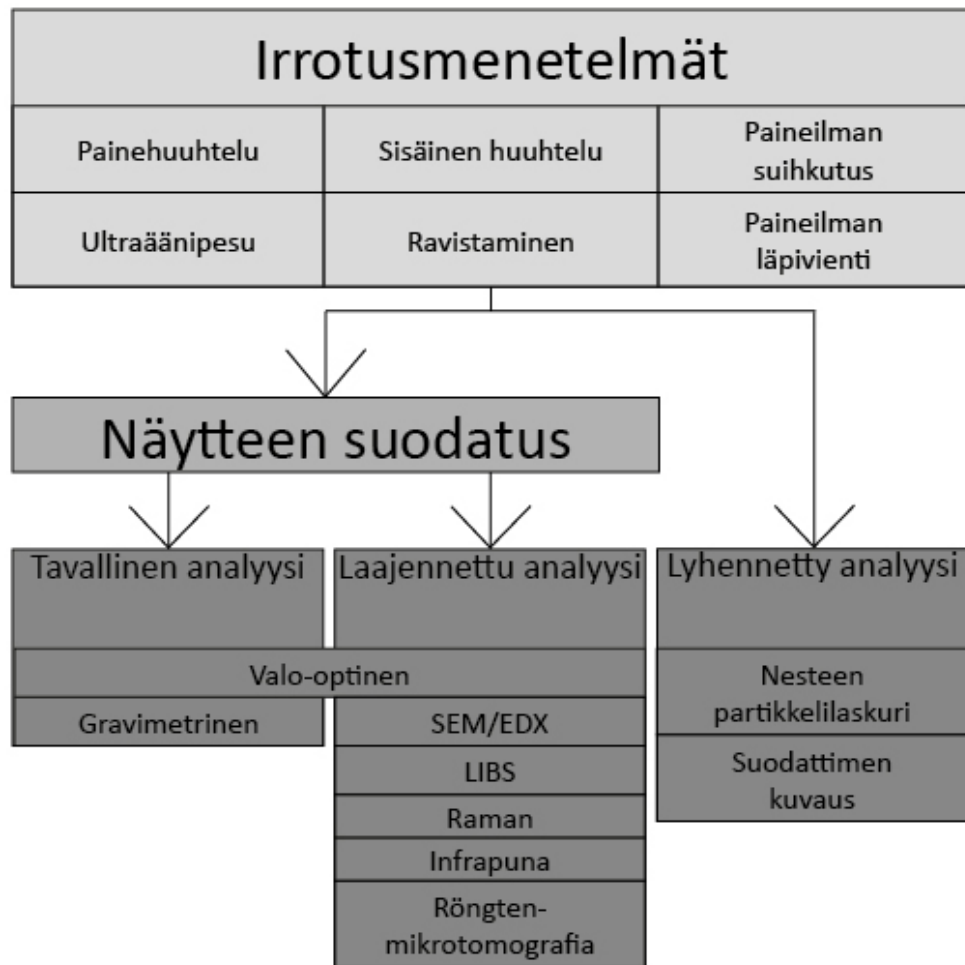
Taulukko 3. Likapartikkelien jakautumisen arvoasteikko (ISO 4406:2017)

Likapartikkelien määrä millilitrassa		Asteikko arvo
Yli	Alle ja yhtä paljon	
2500000		>28
1300000	250000	28
640000	130000	27
320000	640000	26
160000	320000	25
80000	160000	24
40000	80000	23
20000	40000	22
10000	20000	21
5000	10000	20
2500	5000	19
1300	2500	18
640	1300	17
320	640	16
160	320	15
80	160	14
40	80	13
20	40	12
10	20	11
5	10	10
2,5	5	9
1,3	2,5	8
0,64	1,3	7
0,32	0,64	6
0,16	0,32	5
0,08	0,16	4
0,04	0,08	3
0,02	0,04	2
0,01	0,02	1
0	0,01	0

3.2 Puhtauden mittausmenetelmät

ISO 16232 -standardi (Road vehicles -- Cleanliness of components of fluid circuits) käsittelee ajoneuvojen komponenttien ja järjestelmien puhtaustasojen mittausta ja raportointia. Standardi on kohdennettu satunnaisista tapahtumista johtuvan likaantumisen sijaan havaitsemaan ensisijaisesti systemaattisia virheitä tuotantoketjussa. Tällaisia systemaattisia virheitä voi olla esimerkiksi väärin säädettyjen työkalujen käyttö tai komponenttien sopimaton pakkaus ja varastointi. (ISO 16232:2018.)

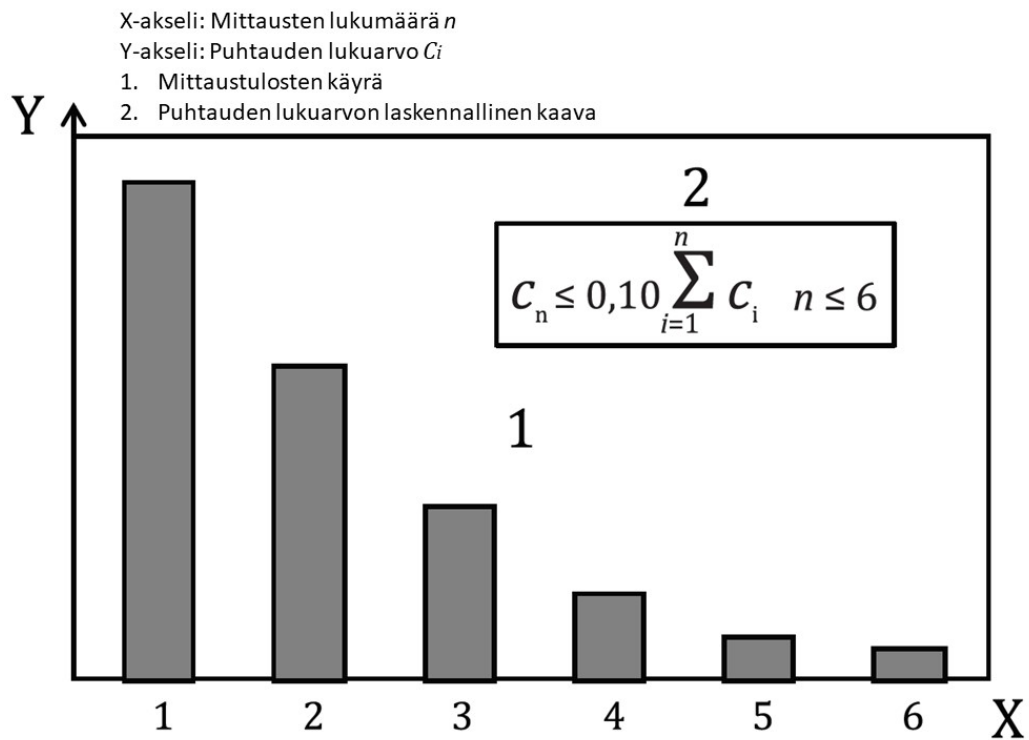
Pintojen puhtauden visuaaliselle tarkastamiselle haasteena on usein päästävyys, pinnan karheus ja materiaalin koostumus. Lisäksi esimerkiksi metallihiukkasia on vaikea havaita samansävyiseltä metalliselta pinnalta. Puhtauden varmistamiseksi komponenteille suoritetaan näytteenotto. Näytteenotto koostuu kolmesta vaiheesta: irrotusmenetelmästä, irrotetun näyteaineiston suodattamisesta ja näytteen analysoinnista. Nämä vaiheet ovat esitetty kuviossa 6. (ISO 16232:2018.)



Kuvio 6. Näytteenoton menetelmät (ISO 16232:2018)

Jotta otettuja näytteitä voidaan tarkasti vertailla, tulee näytteet irrottaa pinnoilta samantyyppisillä menetelmillä ja testausnesteillä. Lisäksi on välttämätöntä, että analyysityökaluilla on samat asetukset. Mittausta ei voida luotettavasti toistaa samalle komponentille, sillä puhtaustaso muuttuu kuvion 7 mukaisesti mittauksen seurauksena

kun partikkeleita poistetaan komponentin pinnoilta. Mikäli komponentissa on useita pintoja, joilla on eri puhtausvaatimus, on ne mitattava erikseen. (ISO 16232:2018.)



Kuvio 7. Toistettavien puhtauden mittaustulosten kehitys (ISO 16232:2018)

3.2.1 Irrotusmenetelmät

Komponenttien pinnoilta kerättävät hiukkasnäytteet voivat vaatia useampaa näytteen keräysmenetelmää. Joidenkin komponenttien kohdalla näytteen kerääminen edellyttää komponentin mekaanista aktivoimista, esimerkiksi koeajon yhteydessä, jotta likapartikkelien havainnointi tarkoituksenmukaiselta pinnalta on mahdollista. Näytteenkeräysmenetelmät on pääsääntöisesti jaettu neste- ja paineilmmamenetelmiin. Nestemenetelmissä on otettava huomioon testinesteen yhteensopivuus materiaaleihin ja pinnoitteisiin sekä kyky liuottaa erityyppisiä epäpuhtauksia esimerkiksi suoloja, öljyjä ja rasvoja. Tämän vuoksi testinesteen tulee olla hyväksytty jokaisen osapuolen, kuten toimittajan ja asiakkaan, toimesta. Valitun testinesteen tulee olla riittävän puhdasta, jotta se ei aiheuta virheitä mittaustuloksiin. Paineilmmamenetelmiä käytetään pääsääntöisesti sellaisten komponenttien kanssa, jotka voivat vaurioitua nestemenetelmistä. (ISO 16232:2018.)

Jos komponentit on käsitelty esimerkiksi rasvoilla tai säilöntäaineilla, tehokas likapartikkelien irrottaminen on mahdollista vasta, kun säilöntäaine- tai rasvakerrokset on ensin liuotettu pois. Liuottaminen voidaan suorittaa esivalmisteluna ennen varsinaista näytteenkeräysmenetelmää. Liuottaminen tapahtuu joko upottamalla komponentti sopivaan liuottimeen tai täyttämällä komponentin sisäosat liuottimella, mikäli komponentin sisäosat ovat mitattavana kohteena. (ISO 16232:2018.)

Painehuuhtelu

Painehuuhtelu soveltuu ensisijaisesti ulko- sekä helposti saavutettavien sisägeometrioiden puhdistamiseen. Puhdistus tapahtuu, kun sopivaa testausnestettä suihkutetaan paineella komponenttiin. Pääsääntöisesti huuhtelu tapahtuu, kun testineste valuu pois komponentista. Yleensä painehuuhtelussa käytetään poikkileikkaukseltaan pyöreää suutinta, mutta puhdistettavan pinnan geometrian mukaan voi puhdistamista tehostaa erimuotoisilla suuttimilla. Komponenttien sisäpinnat voidaan myös puhdistaa painehuuhtelutyökaluilla komponentin aukoista. Tällöin koko sisätila täytetään testausnesteellä. Tässä tapauksessa kyseessä ei kuitenkaan ole painehuuhtelu, vaan sisäinen huuhtelu (ks. kohta sisäinen huuhtelu), koska painesuihku ei vaikuta puhdistettavaan pintaan. (ISO 16232:2018.)

Ultraäänipesu

Ultraäänipesussa puhdistettava komponentti upotetaan testausnesteeseen, jossa värähtelyelementit värähtelevät 20–400 kilohertsin taajuudella. Menetelmä perustuu kavitaatioon, jossa alipaine aiheuttaa nesteessä paikallista kiehumista. Puhdistus tapahtuu, kun värähtely synnyttää testausnesteessä kavitaatiokuplia, jotka räjähtäessään muodostavat painehuippuja, jotka irrottavat likapartikkeleita komponentista. (ISO 16232:2018.)

Menetelmä sopii komponenttien ulko- ja sisäpintojen puhdistamiseen. Se on sopiva menetelmä erityisesti pienille komponenteille, joita voidaan puhdistaa useita samanaikaisesti. Sisäpintojen puhdistuksessa on huomioitava ääniaaltojen voimakkuuden riittäminen kavitaation tapahtumiseen. Liian pienet aukot ja liian suuri sisäontelo aiheuttavat puhdistustehon heikkenemisen kappaleen sisällä. Menetelmä ei sovellu

sellaisten komponenttien sisäpintojen puhdistamiseen, jossa käytetään ääntä vai-
mentavia materiaaleja. Kun komponentin sisä- ja ulkopintoja puhdistetaan samanai-
kaisesti, tulee menetelmän parametrit säätää sopiviksi, jotta kappaleen sisäpinnat
puhdistuvat ilman että sen ulkopinnat vaurioituvat. (ISO 16232:2018.)

Puhdistusteho riippuu ultraäänen taajuudesta sekä ultraäänipaineen muutoksista.
Ultraäänipaineeseen vaikuttaa puhdistettavan komponentin geometria sekä ultraää-
nilähtö. Mitä matalampi ultraäänen taajuus ja korkeampi sen lähtö on, sen tehok-
kaammin se irrottaa likaa. Liian tehokas ultraäänipuhdistus voi aiheuttaa vahinkoa
komponentille ja vääristää puhtauden mittaustuloksia irrottamalla komponentista
esimerkiksi pinnoitteita. (ISO 16232:2018.)

Sisäinen huuhtelu

Sisäisessä huuhtelussa komponentin läpi virtaava testineste puhdistaa komponentin
sisäpintoja. Nesteen virtauksen tulee olla turbulenttinen, jotta likapartikkelit irtoavat
tehokkaasti kaikilta sisäpinnoilta. Tätä voidaan edelleen tehostaa sykkivällä läpivir-
tauksella. Menetelmässä komponentin puhdistettavat sisäosat täytetään kokonaan
testinesteellä ilmatiiviiden liitäntöjen kautta. Kun neste on virrannut kokonaan kom-
ponentin läpi, sen annetaan valua altaaseen tai se ohjataan suljettuun huuhtelujär-
jestelmään. (ISO 16232:2018.)

Sisäinen huuhtelu on sopiva menetelmä sellaisille komponenteille, jotka johtavat
nesteitä. Tällaisia komponentteja ovat esimerkiksi kanavat, putkistot, suuttimet ja
venttiilit. Menetelmän etuna on, että sillä voidaan puhdistaa ainoastaan mitattavat
sisäpinnat ilman, että komponentin ulkopinnoilta irtoavat likapartikkelit vääristäisivät
mittaustuloksia. Jos komponentin liitännät ovat poikkileikkaukseltaan suuria, voi tar-
peeksi suurten virtausnopeuksien ja nestemäärien saavuttaminen olla haasteellista.
Näissä tapauksissa painehuuhtelu tai ravistaminen (ks. kohta ravistaminen) ovat suo-
sitteluvia puhdistusmenetelmiä. (ISO 16232:2018.)

Ravistaminen

Ravistusmenetelmä sopii komponentin sisäisten onkaloiden puhdistamiseen. Onkaloiden on kuitenkin oltava tarpeeksi suuria, jotta ravistamisen luoma impulssi on tarpeeksi tehokas puhdistaa sisäpintoja. Esimerkiksi putkistojen puhdistamiseen menetelmä ei sovellu, sillä niiden tilavuus ei ole riittävä. Puhdistus tapahtuu, kun komponentin puhdistettavat sisäosat täytetään osittain testausnesteellä ja ravistettaessa komponenttia neste iskeytyy pintoihin eri suunnista. Menetelmällä on mahdollista puhdistaa kuolleita alueita, joihin pääsy on hankalaa muilla menetelmillä. (ISO 16232:2018.)

Paineilman suihkutus

Paineilman suihkutus on menetelmänä samankaltainen painehuuhtelun kanssa. Puhdistus tapahtuu puhtaalla öljyttömällä paineilmalla. Menetelmä soveltuu komponenttien ulkoisten pintojen puhdistamiseen ja sisäpintoihin niiltä osin mihin paineilmalla on päästävyys. Erityisesti menetelmä sopii sellaisten komponenttien puhdistamiseen, joita ei voida puhdistaa nesteillä, esimerkiksi elektroniikka- tai logistiikkapakaukset. (ISO 16232:2018.)

Menetelmä vaatii täysin suljetun tilan, jossa on mahdollisuus ilmanpoistoon, jotta yli-painetta ei synny. Puhdistustilan seinämät kostutetaan nesteellä, jotta likapartikkelit kiinnittyvät niihin komponenttia puhdistettaessa. Kun komponentti on puhdistettu paineilmalla, se poistetaan tilasta ja tilan seinämät huuhdellaan nesteellä, jotta analysoidtavat likapartikkelit saadaan kerättyä. (ISO 16232:2018.)

Paineilman läpivienti

Paineilman läpivienti on menetelmänä samankaltainen sisäisen huuhtelun kanssa. Komponentin sisätilat altistetaan suurelle määrälle läpivirtaavaa puhdasta öljytöntä paineilmaa, joka irrottaa likapartikkelit pinnoilta. Partikkelit ohjataan ilmavirran mukana hienojakoiseen metallikalvosuodattimeen, joka komponentin puhdistuksen jälkeen irrotetaan sopivalla tavalla, joka ei vaaranna mittausta. Lopuksi metallikalvo puhdistetaan painehuuhtelulla. Menetelmä sopii erityisesti sellaisten komponenttien puhdistukseen, jotka johtavat ilmaa, kuten ilmastoinnit. (ISO 16232:2018.)

3.2.2 Näytteen suodatus

Näytteen suodatus on näytteenoton vaihe, jossa likapartikkelit kerätään testines-teestä analyysisuodattimen pinnalle analysoitavaksi. Suodattimen tehtävänä on kerätä ainoastaan mittaamisen kannalta merkitykselliset hiukkaset. Tämän varmistamiseksi suodattimen huokosten koko tulee olla 10–25 prosenttia pienimmän määritellyn hiukkasen koosta. Eri huokoskoon suodattimia voidaan myös asettaa peräkkäin, jolloin suurimmat likapartikkelit jäävät ensimmäiseen suodattimeen ja pienemmät jatkavat seuraavaan suodattimeen. Tämä helpottaa partikkelien laskentaa analysointivaiheessa. (ISO 16232:2018.)

Analysointimenetelmän valinta määrittelee suodatusmenetelmän, sillä tavallisesta analysoinnista poiketen laajennettu analysointimenetelmä vaatii, ettei partikkelit ole suodattimessa päällekkäin. Lisäksi suodattimen ominaisuudet täytyy vastata analysointimenetelmien vaatimuksia esimerkiksi optisten ominaisuuksien (esim. kontrastin) tai mittaussignaalin (esim. infrapunan neutraalisuuden) osalta. Suodattimen tulee kestää käsittely rikkoutumatta sekä lämpötilat, joille se altistetaan kuivatusuunissa. (ISO 16232:2018.)

3.2.3 Näytteen analysointi

Näytteen suodattamisen jälkeen kerätty likapartikkelit analysoidaan, lukuun ottamatta lyhennettyä analyysiä, jossa näytettä ei suodateta. Partikkeleista analysoidaan puhtausmääritysten mukaisesti koko, määrä, koostumus ja muut vaadittavat ominaisuudet. Näytteen analysointi menetelmät ovat jaettu kolmeen eri ryhmään: tavallisen analysoinnin menetelmät, laajennetun analysoinnin menetelmät ja lyhennetyn analysoinnin menetelmät. (ISO 16232:2018.)

Tavallinen analyysi (Standard analysis)

Tavallista analysointia käytetään yleensä asiakkaan ja tavarantoimittajan välisissä suhteissa, kun halutaan varmistaa vaadittujen puhtausluokkien toteutuminen. Tavallinen analysointi koostuu kahdesta analyysimenetelmästä, gravimetrisestä ja valo-optisesta, joita voidaan käyttää joko yhdessä tai erikseen. Käytettäessä molempia menetelmiä tulee gravimetrinen analyysi suorittaa ensin, jotta ulkopuoliset vaikuttavat

tekijät, kuten ilmankosteus, eivät vääristä analyysin tuloksia. Tällöin luotettavan tuloksen saamiseksi on huomioitava, että valo-optinen menetelmä mittaa erillisiä yksittäisiä likapartikkeleita ja gravimetrinen analyysi niistä muodostuvaa kokonaisuutta. (ISO 16232:2018.)

Gravimetrinen analyysi

Gravimetrisessä analyysissä suodatin punnitaan ennen kuin likahiukkasia sisältävä testausneste on suodatettu sen läpi. Kun suodatus on suoritettu, suodatinta kuivataan uunissa niin kauan, että se saavuttaa massavakauden, eli suodatin ei enää menetä massaa kuivatuksen seurauksena. Tämän jälkeen suodatin punnitaan uudestaan ja analyysin tuloksena saadaan likapartikkeleista muodostuva suodattimen jäännös-massa. Jäännös-massa ei anna tietoa likapartikkelien koosta tai määrästä, joten niiden vahingoittamispotentiaalin määrittäminen gravimetrisellä analyysillä on rajallinen. (ISO 16232:2018.)

Valo-optinen analyysi

Valo-optisessa analyysissä suodattamisen jälkeen suodattimen pintaa tutkitaan mikroskooppeja tai skannausjärjestelmiä käyttäen. Menetelmällä saadaan yksityiskohtaisesti määriteltyä hiukkaskokojakauma, joten se antaa gravimetristä analyysiä tarkemman kuvauksen likapartikkelien vahingoittamispotentiaalista. Kuvankäsittelyohjelmisto havaitsee ja laskee likapartikkelien määrän, koon sekä muodon. Jotta analyysin tulokset ovat keskenään vertailukelpoisia, tulee analyysi suorittaa käyttäen samoja parametreja. Tämän vuoksi valo-optinen analyysi on yleensä kokonaan automatisoitu prosessi. Valo-optista analyysiä voidaan käyttää tarkennettuna menetelmänä myös laajennetussa analyysissä. Tällöin tarkastellaan myös partikkelien muita optisia ominaisuuksia, kuten väriä ja pinnan rakennetta. (ISO 16232:2018.)

Laajennettu analyysi (Extended analysis)

Laajennettua analysointia käytetään yleensä prosessien optimoinnin tukena, esimerkiksi kun halutaan selvittää likapartikkelien alkuperä tai niiden vahinkopotentiaali. Menetelmillä saavutetaan likapartikkeleista yksityiskohtaisempia tietoja kuin tavallisen analysoinnin menetelmillä, kuten kappaleen kovuus, hankaavuus ja kolmiulotteinen muoto. Laajennetun analysoinnin menetelmät aiheuttavat yleensä huomattavia

lisäkustannuksia verrattuna tavallisen analysoinnin menetelmiin, eikä niitä lähtökoh-
taisesti käytetä puhtauden varmistamiseksi asiakkaan ja tavarantoimittajan välisissä
suhteissa, ellei niin ole erikseen vaadittu. (ISO 16232:2018.)

SEM/EDX

Menetelmässä yhdistetään kahta tekniikkaa likapartikkelien määrittelemiseksi. Pyyh-
käisyelektronimikroskoopilla (SEM, Scanning Electron Microscope) mitataan ja laske-
taan partikkelit sekä energiadiispersiivisen röntgenspektroskopian (EDX, Energy Dis-
persive X-ray) avulla kartoitetaan niiden materiaalikoostumus. (ISO 16232:2018.)

SEM on yksi teollisuudessa yleisimmin käytetyistä analyttisistä työkaluista erittäin
yksityiskohtaisten kuvien ansiosta. SEM voi olla integroitu tuotantoprosesseihin suo-
rana menetelmänä partikkelien tunnistamiseksi sovelluksissa, joissa vaaditaan korke-
amman resoluution kuvia kuin optisella mikroskopiolla on mahdollista saada. (Kohli
2019.)

LIBS

Menetelmässä määritellään likapartikkelien materiaalikoostumus käyttäen laseravus-
teisen hajotusspektroskopiaa (LIBS, Laser Induced Breakdown Spectroscopy). Laser-
pulssi muuttaa näytteen plasmaksi ja mittauslaitteisto tunnistaa näytteen alkuaineet
spektristä saadun datan avulla. EDX menetelmään verrattuna LIBS on nopeampi, sillä
se ei vaadi näytteen esikäsittelyä. (Immuno diagnostic Oy 2019.)

Raman

Menetelmässä likapartikkeliin kohdistettu lasersäde aiheuttaa reaktion aineessa,
joka tuottaa tietyn signaalin. Signaalin spektristä voidaan määrittellä likapartikkelin
molekyylin rakenne. Menetelmän rajoituksiin kuuluu, ettei puhtaita metalleja voi
analysoida, sillä ne eivät tuota signaalia. (Kohli 2019.)

Infrapuna

Raman menetelmästä eroten infrapunataajuudella pommitettuina molekyylit absor-
boivat tiettyjä energioita. Absorboiduista energioista voidaan määrittellä IR-spektri,
josta saadaan tulokseksi näytteen sisältämät infrapuna-aktiiviset aineet. Menetelmä

sopii vain orgaanisten yhdisteiden tunnistamiseen ja sitä käytetään esimerkiksi muovien, rasvojen tai öljyjen tunnistamiseen. (ISO 16232:2018.)

Röntgenmikrotomografia

Menetelmässä tarkoitukseen sopiva membraanisuo datin kuvataan tarkennettua röntgensäteilyä käyttäen. Suodatinta kierretään ja sitä kuvataan röntgenkameralla useasta kulmasta, jolloin suodattimen hiukkasista saadaan kolmiulotteinen geometria. Tämän lisäksi kuvien harmaan sävyarvoista voidaan tunnistaa hiukkastiheys, jonka avulla voidaan erottaa kevyet ja raskaat materiaalit toisistaan. Tarkempaan materiaalianalyysiin tulee kuitenkin käyttää aikaisemmin mainittuja menetelmiä. (ISO 16232:2018.)

Lyhennetty analyysi (Shortened analysis)

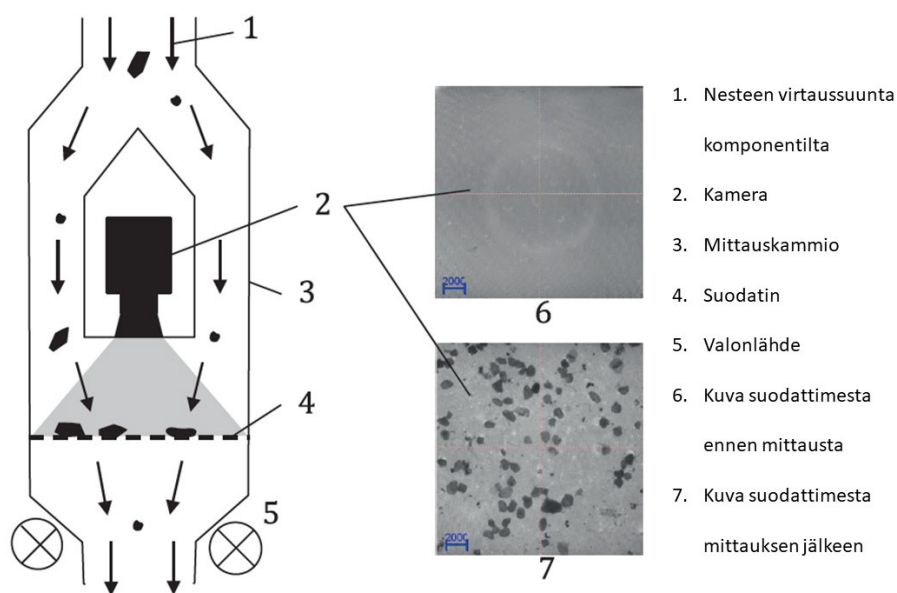
Lyhennettyä analysointia käytetään yleisesti prosessin valvontaan. Lyhennetyin analyysin menetelmiä ovat automaattisen nesteen partikkelilaskurin käyttäminen ja suodattimen kuvaaminen. Koska tulokset lyhennytyssä analyysissä eivät ole yhtä tarkkoja kuin tavallisessa analyysissä, sitä ei voida käyttää puhtausluokkien varmentamiseen, ellei niin erikseen sovita asiakkaan ja tavarantoimittajan välillä. Lyhennetyin analyysin menetelmissä testinestettä ei ennalta suodateta, vaan likapartikkelit havaitaan suoraan testinesteestä. (ISO 16232:2018.)

Nesteen partikkelilaskuri

Automaattinen partikkelilaskuri (APC) laskee virtaavasta nesteestä likapartikkelien määrän ja koon. Laskurissa on anturi, jota valaistaan ja anturi havaitsee nesteestä partikkelit niistä muodostuvien varjojen avulla. Varjojen muodostumisen varmistamiseksi nesteen virtaus on oltava tasaista. Menetelmä on suurpiirteinen, eikä se esimerkiksi havaitse likapartikkelien geometriaa. Likapartikkelit oletetaan ympyrän muotoisiksi ja etenkin pitkät ja kapeat partikkelit voivat vääristää tuloksia. Lisäksi mahdolliset nesteen ilmakuplat lasketaan likapartikkeleiksi. Menetelmä on yksinkertainen automatisoida ja laskuri voidaan esimerkiksi sisäisessä huuhtelussa asentaa suoraan testinesteen poistoletkuun. (ISO 16232:2018.)

Suodattimen kuvaus

Virtaava neste lasketaan läpi suodattimesta, jota kuvataan kameralla kuvion 8 mukaisesti. Menetelmää käytetään suurimpien yksittäisten hiukkasten havaitsemiseen, joten suodattimen huokoskoko valitaan niin, että pienimmät hiukkaset läpäisevät sen. Analyysissä otetaan kuva suodattamisesta ennen nesteen läpivirtaamista ja verrataan sitä kuvaan, joka on otettu suodattamisen jälkeen. Menetelmän analyysivaihe suoritetaan valo-optisen analyysin mukaisesti. Jos suodattimen pinnalla on niin suuri hiukkaskuorma, että se vääristää analyysiä se voidaan pestä tai kääntää ympäri, jolloin virtaava neste puhdistaa sen. (ISO 16232:2018.)



Kuvio 8. Suodattimen kuvaamisen toimintaperiaate (ISO 16232:2018)

3.2.4 Suorat menetelmät

Suorilla menetelmillä tarkoitetaan sellaisia puhtauden mittaamenetelmiä, joissa analysoidaan suoraan komponentin pintaa, eikä esimerkiksi nesteen välityksellä. Analysoinnilla varmistetaan, että pinta täyttää ennalta määritellyn puhtaustason. Koska komponenttien kriittiset pinnat ovat analyysin kohteena, suositellaan suorita menetelmiä käytettäväksi. (Kanegsberg, Kanegsberg 2000.)

Suorilla menetelmillä saadaan tietoa partikkelien fysikaalisista ja kemiallisista ominaisuuksista tutkimalla yleensä rajoitettuja pieniä pinta-aloja. Tulokset eivät edusta suoraan komponentin tai järjestelmän puhtaustasoa, sillä epäpuhtaudet eivät jakaudu tasaisesti pinnoille. Tämä on huomattava rajoitus pinnan puhtauden määrittämiselle komponenteille, jotka sisältävät monimutkaisia pintoja tai syviä reikiä. Nämä menetelmät vaativat kalliita mittauslaitteita, kuten elektronimikroskoopin tai perustuvat ihmisen harkintakyvylle, esimerkiksi suurennetuissa visuaalisessa tarkastuksessa. Useissa suorissa menetelmissä käytetään hyväksytyt/hylätty -periaatetta, mikä rajoittaa pintojen puhtaustasojen yksityiskohtaisempaa määrittelyä. (Kohli 2019.)

Pyyhintätesti

Pyyhintätesti on yksi yleisimmistä pinnanpuhtauden määrittelymenetelmistä. Menetelmässä kappaleen pintaa pyyhitään kuivalla tai kostealla liinalla, joka analysoidaan. Suorana menetelmänä pyyhintätesti on laadullinen, mutta sovellettaessa epäsuorana menetelmänä sitä voidaan käyttää partikkelien koon ja muotojen määrittämiseksi käyttäen esimerkiksi optisia tekniikoita. Vaatimusten mukaisesti liina voi olla valmistettu eri synteettisistä- tai luonnonmateriaaleista. Tällaisia vaatimuksia ovat esimerkiksi yhteensopivuus pinnan kanssa tai kestävyys. Liinan vaurioituminen johtaa kerätyn aineiston menetykseen ja testauksen vääristymiseen. Pyyhintämenetelmään on olemassa useita kaupallisia testausjärjestelmiä ja standardoituja menetelmiä. (Kohli 2019.)

Suurennettu visuaalinen tarkastus

Suurennuslasilla tai mikroskoopilla voidaan havaita suoraan pinnalta kokonaiskontaminaatio, mikä ei ole nähtävillä paljain silmin, mutta on suurempi kuin mikrometri. Menetelmä ei sovellu puhtausluokkien varmistamiseksi, vaan käytännön tarkastukseen, kun arvioidaan puhdistuksen tasoa ei-kriittisillä pinnoilla. Arviointi tapahtuu hyväksytyt/hylätty -periaatteella. Menetelmä on laitteiston kannalta halpa, mutta vaatii hyvin koulutetun henkilökunnan. (Kanegsberg, Kanegsberg 2000.)

”White glove” -testi

”White glove” -testissä eli valkoisen hansikkaan testissä puhtaalla, kuivalla ja valkoisella liinalla tai hansikkaalla pyyhitään tietty matka analysoitavasta tasaisesta pinnasta. Tämän jälkeen pyyhitty pinta tarkastetaan näkyvien partikkelien varalta. Jos

liialliset epäpuhtaudet värjäävät kangasta, komponentti ei läpäise testiä. Menetelmää voidaan käyttää komponenttien laadulliseen hyväksyntään, kun puhdistuskankaan tarkastusetäisyys ja -valaistus on määritelty vaaditun puhtaustason mukaisesti. Arviointi tapahtuu hyväksy/hylätty -periaatteella, ja arviointitulokset voivat vaihdella testaushenkilöiden välillä. (Kohli 2019.)

Teippitesti

Teippitesti soveltuu yli viiden mikrometrin kokoisten partikkelien mittaamiseen siileiltä pinnoilta. Mitattavalle pinnalle levitetään PSA-teippiä (pressure-sensitive adhesive), joka painetaan tiukasti kiinni pintaa vasten. Teippi irrotetaan ja partikkelit jäävät teipin liimapinnalle kiinni. Käytettävän teipin valintaan tulee kiinnittää huomiota esimerkiksi kaasun päästävyuden ja kokonaishäviön suhteen. Nämä ominaisuudet on määritelty ISO 8502-3 -standardissa ja sen mukaisia kaupallisia teippitestisarjoja on saatavilla. Teippitesti on nopea ja yksinkertainen menetelmä, joka optimoimalla soveltuu suurten alueiden pinnan puhtaustason arviointiin. Menetelmää voidaan myös soveltaa käyttämällä kuorittavia pinnoitteita. (Kohli 2019.)

Partikkelit voidaan mitata teipistä läpivalaistuksella käyttämällä valo-optista analyysiä. Vaihtoehtoisesti teippi voidaan liimata aluslasille ja liuottaa teipin pohja, jolloin partikkelit jäävät liimaan. Teipin puhtauden arviointiin voidaan myös käyttää ISO 8502-3 -standardissa määriteltyä partikkelien kokoluokka taulukkoa (ks. taulukko 2). Tämä on yleisesti käytetty menetelmä esimerkiksi teräspintojen puhtauden arvioinnissa ennen maalausta. (Kohli 2019.)

Mustavalo

Menetelmässä komponentti viedään pimeään huoneeseen ja tarkastetaan visuaalisesti mustavalolampun avulla. Mustavalolamppu tuottaa ultraviolettisäteilyä, joka saa fluoresoivat epäpuhtaudet säteilemään näkyvää valoa. Menetelmällä voidaan havaita vain ultraviolettiiin reagoivia epäpuhtauksia eikä analysoitava komponentti itessään saa olla fluoresoiva. Menetelmän havainnointiluokka on yksi gramma kontaminaatiota neliömillimetriä kohden. Arviointi tapahtuu hyväksy/hylätty -periaatteella eikä menetelmä sovellu puhtausluokkien todentamiseksi. (Kanegsberg, Kanegsberg 2000.)

4 Tutkimustulokset

Kirjallisuuskatsauksen aineisto on avattu kattavasti tietoperustaksi työlle. Sisältö-analyysin mukaisesti 4.2 Teoreettinen viitekehys on aineiston pohjalta koottu mittausmenetelmien kategorisointi (taulukko 5) sekä analyysimenetelmien kategorisointi (taulukko 6), jotka ovat valikoitunut potentiaalisiksi menetelmiksi toimeksiantajalle. Aineistosta kootut taulukot helpottavat aineiston käsittelyä sekä analysointia.

Kattavaan puhtauden mittauksen nykytilan sekä vaatimuksien kartoittamiseen käytettiin teemahaastattelua. Teemahaastattelun runko on esitetty liitteessä 2. Haastatteluihin osallistui viisi laadunvalvonnan ja ostamisen parissa työskentelevää Moventaksen työntekijää. Haastateltavat olivat toimeksiantajan suosittelimia henkilöitä, jotka vastasivat alihankkijalta tulevien komponenttien tai oman valmistuksen laadunvalvonnasta. Haastateltavat osallistuivat vapaaehtoisesti haastatteluun.

Haastatteluiden rakenne koottiin mukaillen teemahaastattelun teoriaa. Haastatteluissa oli tavoitteena kartoittaa nykyisiä puhtauden mittausmenetelmiä sekä millaisia tilanteita haastateltavat kohtaa puhtauden mittaamisessa ja millaisia ongelmia heillä on puhtauden ja sen mittaamisen kanssa. Haastattelut nauhoitettiin ja nauhoitteiden litterointi toteutettiin pääteemojen osalta, eli sitä ei toteutettu sanatarkasti, koska se ei työn kannalta ollut merkittävää ja näin myös työmäärää rajattiin. Litteroidusta aineistosta saatiin nostettua esiin haastatteluissa syntyneet teemat ja erityisesti vastausten eroavaisuudet sekä yhtäläisyydet. Seuraavaksi esitetty 4.1.1 Nykytilan kuvaus sekä 4.1.2 Vaatimukset esittävät haastatteluista kerätyt tulokset.

4.1.1 Nykytilan kuvaus

Haastatteluiden perusteella selvisi, että nykytilanteessa komponenttien puhtautta ei varsinaisesti mitata vaan puhtauden valvonta perustuu visuaaliseen tarkastukseen. Pesuvaiheiden jälkeen, sekä alihankinnasta tulleiden osien vastaanottotarkastuksessa komponentteja pyyhitään valkoisella liinalla, jolloin liinan likaantumisen voidaan arvioida komponentin puhtaustaso. Näiden testauksien yhteydessä on havaittu, ettei

pesusta tulleiden kangasliinojen puhtaus ole riittävä puhtausmittausten suorittamiseen, vaan liinat voivat jopa lisätä partikkelimäärää komponenteissa.

Kuviossa 9 nuolella osoitetun tyyppiset poraukset sekä kanavat tarkastetaan silmämääräisesti taskulampun avulla. Näillä menetelmillä havaitaan vain selkeästi irtoavia lastuja ja metallihippuja, eikä puhtausasosta saada numeerista arvoa. Tästä syystä Moventas ei voi todentaa täyttyykö puhtaustaso, joka toimittajilta vaaditaan. Tarkastuskäytännöt vaihtelee eri toimipisteiden välillä, jonka lisäksi arvioinnin tarkkuus vaihtelee tarkastaja- ja komponenttikohtaisesti.



Kuvio 9. Esimerkki porauksesta, joka tarkastetaan silmämääräisesti

Mittaaminen nykytilanteessa suoritetaan kokoonpanon jälkeen valmiille vaihteelle koeajossa. Tässä tapauksessa koekentässä vaihteen öljyä kierrätetään ja sen partikkelit mitataan öljystä partikkelilaskurilla. Öljyä kierrätetään, kunnes se saavuttaa halutun puhtaustason, jolloin vaihteen koeajo voidaan aloittaa.

4.1.2 Vaatimukset

Erityyppisillä komponenteilla on erilaisia vaatimuksia, mitkä tulee ottaa huomioon puhtauden mittausmenetelmää valitessa. Valtaosa vaihteen komponenteista valmistetaan alihankintana, eikä toimittajat välttämättä ole tietoisia mitkä komponentit ovat öljyn kanssa tekemisissä tai mitkä ovat niiden kriittisiä pintoja. Näihin ongelmiin on pyritty vastaamaan järjestämällä koulutuksia sekä toimittajille että toimeksiantajan henkilöstölle. Koulutuksen tarve on kuitenkin vielä suuri. Näiden koulutusten pääpainona on ollut puhtauden merkitys, eikä sen mittaaminen. Koulutusten ansiosta puhtausosaaminen on yrityksessä kasvanut ja puhtauslaatu ilmoitukset ovat kasvaneet räjähdysmäisesti. Haastateltavat henkilöt eivät olleet yksimielisiä siitä, tulisiko puhtauden mittaaminen ja dokumentointi järjestää alihankinnan vai Moventaksen toimesta.

Koska kokoonpanolinjan läpi kulkee noin 15000 komponenttia viikossa, on puhtauden mittaus suoritettava otantana. Moventaksen käytäntö on, että protovaiheessa 100% komponenteista mitataan. Tuotannon edetessä komponentti muuttuu toimittajalla rutiinituotteeksi, jolloin tarkastus suoritetaan 20% komponenteista. Lopullisen otannan koko vaihtelee 10% ja 20% välillä. Puhtauden mittaaminen ei tule pitkittää komponenttien läpimenoaikaa, vaan sen kesto tulisi olla samaa suuruusluokkaa nykyisten käytäntöjen kanssa.

Toimeksiantaja on määritellyt, että käsiteltävään vaihteistomalliin ostettaville voitelukomponenteille kuten letkut, jäähdyttimet ja suodattimet tulee olla huuhdeltu. Huuhtelun vaatimuksena on, että ISO 4406 standardin mukainen puhtausluokka 17/14/11 täyttyy (Moventas Gears N/A). Vaihteen kokoonpanossa vaadittu puhtausluokka on saman standardin mukainen x/14/11 tai parempi. Ensimmäinen kokoluokka merkitään x-kirjaimella, sillä kokoonpanossa ei mitata pienintä partikkelikokoluokkaa. (ks. kohta 3.1 Puhtauden määritelmä)

Toimeksiantajan vaatimusten lisäksi myös Moventaksen tuuliturbiinivaihteita käyttävä asiakas on määritellyt omat puhtausvaatimukset, jotka ovat esitetty alla olevassa taulukossa 4. Nämä vaatimukset poikkeavat toimeksiantajan vaatimuksista

paitsi lukuarvoiltaan myös suureltaan. Tällä tarkoitetaan sitä, että toimeksiantajan esittämässä vaatimuksissa mitataan partikkeleita pesu- tai testinesteen tilavuudesta, kun taas asiakkaan puhtausluokittelussa partikkeleita lasketaan komponentin pinnan pinta-alaa kohden. Kuten aiemmin mainittu, mittaustulokset eivät ole vertailukelpoisia keskenään, kun ne mittaavat eri suureita (kpl/cm² verrattuna kpl/ml).

Taulukko 4. Asiakkaan vaatima puhtausluokka

Partikkelimäärät kokoluokittain kpl/1000 cm ²					Gravimetrinen tulos
101-200 µm	201-400 µm	401-600 µm	601-1000 µm	1001-1500 µm	Massa (mg/1000 cm ²)
50	20	3	0	0	5

4.2 Teoreettinen viitekehys

Kootun teorian pohjalta on eritelty irrotus- ja mittausmenetelmät niiden soveltuvuuden ja tyyppin mukaan (ks. Taulukko 5). Näitä eri menetelmiä on mahdollisuus hyödyntää eri komponenttien puhtaustason mittaamisessa. Taulukossa 5 on eriteltynä mitkä menetelmät sopivat ulkoisten pintojen puhtauden mittaamiseen, sekä miten onttojen rakenteiden puhtautta on mahdollista mitata. Ontot rakenteet käsittävät tässä tapauksessa komponenttien sisäpintoja, jotka ovat tekemisissä öljynkierron kanssa. Samalla taulukko tuo esille onko menetelmä suora vai epäsuora menetelmä, joka vaikuttavat menetelmien toteutuksen yksinkertaisuuteen.

Taulukko 5. Mittausmenetelmien kategorisointi

	Pinnat	Ontot rakenteet
Epäsuorat menetelmät	Paineilman suihkutus	Paineilman läpivienti
	Painehuuhtelu	Sisäinen huuhtelu
	Ultraäänipesu	Ultraäänipesu
		Ravistaminen
Suorat menetelmät	Pyyhintätesti	
	Suurennettu visuaalinen tarkastus	
	"White glove" -testi	
	Teippitesti	

Taulukossa 6 on esiteltyä mitkä analyysimenetelmät antavat minkäkin tyyppistä dataa partikkeleista. Tämän lisäksi analyysimenetelmät ovat jaoteltu kolmeen kategoriaan tietoperustassa aiemmin mainitun ryhmittelyn mukaisesti.

Taulukko 6. Analyysimenetelmien kategorisointi

	Tavallinen analyysi	Laajennettu analyysi	Lyhennetty analyysi
Partikkelien koko	Valo-optinen analyysi	Valo-optinen analyysi	Nesteen partikkelilas-kuri
		SEM	Suodattimen kuvaus
		Röntgenmikrotomografia	
Partikkelien lukumäärä	Valo-optinen analyysi	Valo-optinen analyysi	Nesteen partikkelilas-kuri
		SEM	Suodattimen kuvaus
Partikkelien koostumus		EDX	
		LIBS	
		Raman	
		Infrapuna	
		Röntgenmikrotomografia	
Partikkelien jäännösmassa	Gravimetrinen analyysi		

5 Johtopäätökset

Asiakkaan vaatimat puhtausluokat (ks. taulukko 4) sijoittuvat partikkelien kokoluokituksessa (ks. taulukko 1) makro partikkeliluokkaan. Tämä tarkoittaa, että paljain silmin tehtävä visuaalinen tarkastus, joka Moventaksella on nykytilanteessa käytössä, olisi riittävä havaitsemaan puhtausluokan ylittävät partikkelit. Lisäksi nämä asiakkaan vaatimukset sisältyvät standardin ISO 8502-3 määrittelemiin puhtausluokkiin 2 ja 3 (ks. taulukko 2). Tämä tukee osaltaan sitä päätelmää, että visuaalinen tarkastus riittäisi näiden partikkelien havaitsemiseen. Ongelmaksi kuitenkin muodostuu, ettei visuaalinen tarkastus tarjoa mitattavia määreitä ja näin ollen puhtausluokan toteutumisen todentaminen asiakkaalle ei ole mahdollista. Lisäksi standardin ISO 8502-3 määrittelemät puhtausluokat voidaan tulkita liian suurpiirteisiksi asiakkaan vaatimiin puhtausluokkiin nähden.

Asiakkaan vaatimat tarkkuusluokat ovat mahdollisia saavuttaa käyttämällä niin epäsuoria, kuin suoria puhtaudenmittausmenetelmiä. Suorien menetelmien käyttämistä puoltaa niiden resurssitehokkuus, kuten pienemmät kustannukset sekä mittaamisen lyhyempi kesto epäsuoriin menetelmiin verrattuna. Lisäksi epäsuorien mittaussuorien tuloksia ei ole mahdollista suoraan verrata asiakkaan vaatimiin puhtausluokkiin, sillä epäsuorissa menetelmissä mitataan testinesteen puhtautta, eikä asiakkaan vaatimaa pinta-alan puhtautta. Ristiriitana kuitenkin on, ettei suorien menetelmien käyttäminen ole mahdollista öljynkierron kannalta oleellisiin onttoihin rakenteisiin, kuten porauksiin.

Taulukosta 5 voidaan päätellä, että ultraäänipesu olisi sekä ulkoisten pintojen että onttojen rakenteiden kannalta sopiva menetelmä. Se kuitenkin on tarkoituksenmukainen menetelmä pääsääntöisesti pienille komponenteille ja tuuliturbiinivaihteen suurikokoisille komponenteille skaalattuna se loisi huomattavia lisäkustannuksia. Sama pätee myös ravistamiseen, joka ei lisäksi sovellu öljynkierrossa käytettyihin porauksiin, sillä niiden tilavuus ei ole riittävä menetelmän käyttöön. Ultraäänipesun ja ravistamisen lisäksi myös paineilman suihkutus, paineilman läpivienti sekä painehuuhtelu vaativat puhtaustestikaapin. Löydetyt kaupalliset puhtaustestikaapit ovat suurimmillaan 2000 mm x 1500 mm x 1200 mm kokoisia (Pall Corporation 2021). Suurimpia komponentteja varten puhtaustestikaappi pitänee siis teettää mittatilaustyönä.

Edellä mainittujen tekijöiden johdosta ontoille rakenteille olisi suositeltavaa käyttää sisäistä huuhtelua. Sisäinen huuhtelu voidaan rakentaa suljettuun huuhtelujärjestelmään, jolloin tarvetta puhtaustestikaapille ei ole. Tämä vaihtoehto lisäksi sallii nesteen automaattisen partikkelilaskurin tai suodattimen kuvausmenetelmien käyttämistä analyysimenetelminä, mikäli niiden tarkkuus voidaan todentaa riittäväksi. Tämä mahdollistaa testauksen kohtuullisessa ajassa, jolloin komponenttien läpimenoaika ei pitkittyisi huomattavasti. Näillä lyhennetyin analyysin menetelminä ei kuitenkaan ole mahdollista saada dataa partikkelien massasta. Tämän vuoksi on syytä harkita suodattamisen käyttöönottamista jotta gravimetrinen analyysi on mahdollista suorittaa.

Koska sisäinen huuhtelu sopii ainoastaan ontoille rakenteille, on ulkoisten pintojen puhtauden mittaaminen suoritettava eri menetelmällä. Kuten aiemmin mainittu, epäsuorien menetelmien käyttäminen vaatisi uusia investointeja, eikä ajallisesti niiden käyttäminen ole optimaalista. Tästä johtuen suorien menetelmien käyttäminen olisi suositeltavaa ulkoisten pintojen puhtauden mittaamiselle, mikäli niiden riittävä tarkkuus voidaan todentaa. Suorista menetelmistä suurennettu visuaalinen tarkastus ja ”white glove” -testi eivät tarjoa määrällisiä mittaustuloksia. Pyyhintätestiin verrattuna puolestaan teippitesti on helpompi yhtenäistää yrityksen sisällä niin, että testi antaa luotettavan tuloksen riippumatta ulkoisista tekijöistä kuten mittaajasta. Näiden tekijöiden johdosta voidaan suositella teippitestiä menetelmää ulkoisten pintojen puhtauden mittaamiseksi.

Kuten taulukosta 6 voidaan päätellä, valo-optinen analyysi sopii sekä partikkelien lukumäärän, että niiden koon mittaamiseen. Tämän lisäksi valo-optinen analyysi sopii molempiin jo aiemmin suositeltujen menetelmien, sekä teippitestiin että sisäisen huuhtelun, analysointiin. Valo-optisen analyysin prosessi on mahdollista automatisoida, jolloin sen tarvitsemat ajalliset resurssit ovat kohtuulliset. Lisäksi automatisoinnin ansiosta voidaan vähentää ulkoisista tekijöistä, kuten eri mittaajista, johtuvia muutujia. Tämä parantaa mittaustulosten keskinäistä vertailukelpoisuutta. Näiden tekijöiden johdosta ulkoisten pintojen puhtauden analysointiin voidaan suositella valo-optista analyysiä. Lisäksi se on sopiva vaihtoehto aiemmin mainituille lyhennetyin analyysin menetelmille onttojen rakenteiden puhtauden analysointiin.

Toimeksiantajan tavoitteena on puhtausluokkien toteutumisen todentaminen mitatuilla määreillä, eikä esimerkiksi likapartikkelien alkuperän selvittäminen. Kuten tietoperustassa mainittu, laajennetun analyysin menetelmiä ei lähtökohtaisesti käytetä asiakkaan ja tavarantoimittajan välisissä suhteissa niiden lisäkustannusten vuoksi. Näistä syistä näiden yksityiskohtaista dataa tarjoavien menetelmien käyttäminen ei ole perusteltua.

Asiakkaan vaatimuksissa (ks. taulukko 4) tulee esille partikkelien koon ja lukumäärän lisäksi myös partikkelien kokonaisuudessa mitattavalta pinta-alalta. Tämän opinnäyte-

työn tietoperustan pohjalta ei voida todeta, että suorien menetelmien analysoimiseen olisi mahdollista käyttää gravimetristä analyysiä. Jotta tässä työssä esitetyt suositukset menetelmien valintaan voidaan ottaa käyttöön, on tästä mahdollisuudesta tehtävä lisäselvitystä.

Koska tässä työssä käsiteltyihin vaatimuksiin ei kuulu partikkelien koostumuksen selvittäminen, ei sitä mittaavia laajennetun analyysien menetelmiä käsitellä johtopäätöksissä. Näiden menetelmien lisäksi mustavalo menetelmä on esitelty tietoperusta osiossa. Nämä tietoperustan osiot ovat lisätty tutkimuksen tavoitteiden mukaisesti tarjoamaan toimeksiantajalle kattavasti tietoa puhtauteen liittyvistä käytänteistä mahdollisia jatkotutkimuksia varten.

6 Pohdinta

Tämän työn tutkimusongelma oli toimeksiantajayrityksen puutteellinen puhtauden mittauskäytäntö. Opinnäytetyössä pystyttiin vastaamaan työn alussa esitettyihin tutkimuskysymyksiin. Joista ensimmäinen on: Miten valmistavassa teollisuudessa puhtaus määritellään? Puhtauden määrittelemiseksi työssä kuvattiin eri tapoja miten puhtautta voi määrittää, sekä mitä puhtausluokissa tulee ottaa huomioon. Toinen tutkimuskysymys on: Millä menetelmillä edellä mainittu määritelmä mitataan? Mittausmenetelmiä löytyi kattavasti sekä niistä pystyttiin suositellamaan yrityksen käyttöön soveltuvia metodeja.

Yhteenvedona tämän opinnäytetyön perusteella tehdyt suositukset toimeksiantajalle ovat:

- Komponenttien ulkopintojen puhtauden mittaamiseen
 - teippitesti
 - valo-optinen analyysi
- Komponenttien onttojen rakenteiden puhtauden mittaamiseen
 - sisäinen huuhtelu
 - nesteen partikkelilaskuri
 - tai
 - suodattimen kuvaus
 - tai
 - valo-optinen analyysi

Työn aikana kuitenkin nousi esille, että tämän työn tulokset eivät täysin vastanneet toimeksiantajan tavoitteita. Vaikka työssä käsitellään useita erityyppisiä menetelmiä puhtauden mittaamisen osalta, ei täysin optimaalista ratkaisua tavoitteisiin nähden löydetty työn aikana. Työssä pystyttiin kuitenkin tarjoamaan toimeksiantajalle kattava katsaus puhtauden mittaamiseen. Suurimmat ongelmat puhtauden mittaamisen menetelmien valinnassa liittyivät öljynkierron pintojen tavoitettavuuteen suurien komponenttien osalta. Tutkimuksessa käytettyjen standardien menetelmät eivät välttämättä ole suoraan skaalattavissa esimerkiksi autoteollisuudesta tuuliturbiini-vaihteen suurille komponenteille.

Työn ensisijaisena tavoitteena oli tarjota tietoa toimeksiantajalle, jolloin työn resurssit käytettiin kattavaan kirjallisuuskatsaukseen. Opinnäytetyön tutkimusomaisen luonteen vuoksi työ ei sisällä soveltavaa osuutta. Tutkimuksen aihe oli monitahoinen eikä toimeksiantajalla ole siitä laajaa aiempaa kokemusta, kuten valmiita puhtauden mittausprosesseja. Tästä johtuen aiheen rajausta ei voida pitää täysin onnistuneena, jotta se olisi tuottanut parempaa vastinetta tavoitteisiin. Tästä syystä on suositeltavaa, että tälle työlle tehdään jatkotutkimuksia. Näiden jatkotutkimusten tutkimuskysymyksiä, joita tässä työssä nousi esiin ja joihin ei tässä työssä saatu vastausta ovat:

- Onko olemassa suoria menetelmiä onttojen rakenteiden puhtauden mittaamiseen tai onko sellainen mahdollista kehittää?
- Onko likapartikkelien massaa mahdollista mitata tässä työssä esitettyjen tai muiden olemassa olevien suorien mittausmenetelmien avulla?
- Onko mahdollista soveltaa epäsuorien puhtauden mittausmenetelmien tuloksia suoraan asiakkaan vaatimusluokkiin?

Tässä työssä käytetyt vapaassa jakelussa olevat lähteet koottiin aineistoksi toimeksiantajan käyttöön jatkotutkimusten pohjaksi.

Haastattelut suoritettiin jokaiselle haastateltavalle erikseen Teams ohjelman avulla. Yksityisyydensuojan varmistamiseksi työssä käsiteltiin haastateltavia anonymieinä. Haastatteluiden alussa haastateltavilta varmistettiin lupa haastatteluiden nauhoittamiselle ja nauhoitukset tallennettiin Moventaksen tarjoamalle Microsoft OneDrive

pilvitalennuspalveluun, jolloin ne olivat suojattuna henkilökohtaisen salasanan takana.

Työn luotettavuuden kannalta on tärkeää pohtia, onko se toistettavissa. Luotettavuuden varmistamiseksi tämä otettiin huomioon tässä tutkimuksessa kirjaamalla tarkasti ylös pöytäkirja yrityksen ensitapaamisissa ja tämä pöytäkirja lähetettiin kaikille osapuolille tarkistettavaksi. Myös tutkimuksen haastatteluosuuteen siirryessä haastattelun rakenne oli alustavasti suunniteltu, jotta pystyttiin varmistamaan tiettyjen ja tarvittavien teemojen esiintyminen haastatteluissa. Teemahaastattelu tuo kuitenkin tutkimuksen luotettavuuteen tiettyjä haasteita, koska teemahaastattelun idea on pitää keskustelu vapaamuotoisena mahdollisten uusien ideoiden ja ajatuksien löytymiseen. Samoin haastatteluun käytetty työkalu Teams - ohjelma saattaa asettaa haastattavia eri asemaan heidän teknologiaosaamisen tason mukaan. Edellä mainittujen syiden takia, haastattelutilanteiden toistettavuus voi olla haastavaa esimerkiksi, jos haastateltava on koulutetumpi aiheeseen seuraavassa haastattelussa tai haastattelu tilanne tai -väline on erilainen. Tutkimustyön uskottavuutta pohdittaessa oleelliseksi nousee tuloksien pitävyys. Työn uskottavuuden varmistamiseksi oli tärkeää valita oikeat standardit ja kirjallisuuslähteet, jotta tutkimuksen teoriapohja tukee tuloksia ja tuloksia voidaan tutkia systemaattisesti ja varmistua siitä, ettei tutkimus tulokset ole sattumanvaraisia.

Lähteet

Heikkilä, T. 2014. Tilastollinen tutkimus. Helsinki: Edita Publishing Oy.

Immuno diagnostic Oy. 2019. Mikä ihmeen LIBS?. Myyntiartikkeli. Viitattu 11.2.2021. <https://www.immunodiagnostic.fi/leica-libs-yhdista-valomikroskopia-tarkkaan-ja-nopeaan-materiaalianalytiikkaan/>

ISO 16232:2018 Road vehicles — Cleanliness of components and systems.

ISO 18413:2002 Hydraulic fluid power.

ISO 4406:2017 Method for coding the level of contamination by solid particles.

ISO 8502-3:2017 Preparation of steel substrates before application of paints and related products

Kananen, J. 2012. Kehittämistutkimus opinnäytetyönä. Tampere: Yliopistopaino Oy.

Kananen, J. 2015. kehittämistutkimuksen kirjoittamisen käytännön opas. Tampere: Suomen Yliopistopaino Oy.

Kohli, R. 2012. Developments in Surface Contamination and Cleaning. Waltham: William Andrew Publishing.

Kohli, R. 2019. Developments in Surface Contamination and Cleaning, Volume 12. Amsterdam: Elsevier.

Morelock, J. R. 2017. A systematic literature review of engineering identity: Definitions, factors, and interventions affecting development, and means of measurement. European Journal of Engineering Education S. 1-23 3. doi:10.1080/03043797.2017.1287664

Moventas Gears Oy. 2021. Moventas Company Presentation ENG - 2021. Yritysesittely. Moventas Gears Oy sisäisestä verkosta. Viitattu 18.2.2021. //moventas.sharepoint.com

Moventas Gears Oy. N/A. DOCM113891_ Technical purchase document for lubrication system PPLH-2900JCV.docx Teknisen ostamisen dokumentti. Moventas Gears Oy sisäisestä verkosta. Viitattu 18.1.2021. //moventas.sharepoint.com

Pall Corporation. 2021. Viitattu 28.3.2021. <https://shop.pall.com/us/en/industrial-manufacturing/zidhpub42gt?CategoryName=Industrial-Manufacturing&CatalogID=Industrial-Manufacturing>

Puustinen, S. 2013. Qualitative research and theme interview as a method of collecting data. Viitattu 20.3.2021. https://mycourses.aalto.fi/plu-ginfile.php/195681/mod_resource/content/1/qualitative%20research%202013-10-28_handout.pdf

Salminen, A. 2011. Mikä on kirjallisuuskatsaus?. Vaasa: Vaasan yliopiston julkaisuja.

Suomen asiakastieto Oy. N/A. Moventas Gears Oy taloustiedot. Viitattu 18.2.2021. Saatavissa: <https://www.asiakastieto.fi/yritykset/fi/moventas-gears-oy/20447264/taloustiedot>

Tuomi, J. & Sarajärvi, A. 2018. Laadullinen tutkimus ja sisällönanalyysi. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Tammi.

Liitteet

Liite 1. Muokattu komponenttilista

Komponentti	Puhdistusvastuu	Kpl/vaihde
Lieriökotelon runko	Moventas	1
Lieriökotelon kansi	Moventas	1
Nopean akselin laakerinlevy	Toimittaja 1	1
Nopean akselin genetaattorinpuoleinen laakeriholkki	Toimittaja 2	1
Tiivistelaippa	Toimittaja 3	1
Liukurengas	Toimittaja 4	1
Liukurengas	Toimittaja 5	1
2nd planeettaportaankantaja	Moventas	1
2nd planeettaportaankantajan planeettatappi	Toimittaja 2	3
Tukilaippa	Toimittaja 1	1
2nd planeettaportaankantajan planeettatapinlitapin laakeriholkki	Toimittaja 4	3
Öljyn syöttöputki	Toimittaja 6	1
Planeettatapin laakeri (öljynsyöttö)	Toimittaja 5	1
Öljynsyöttörengas	Toimittaja 4	1
Holkki		
Putki	Toimittaja 7	1
1st planeettakantaja	Moventas	1
1st planeettakantajan planeettatappi	Toimittaja 4	5
1st planeettakantajan planeettatapin laakeriholkki	Toimittaja 4	5
suodatinyksikkö		1
Letku suodatinyksiköltä vaihteistolle		1
Letku suodatinyksiköltä jäähdyttimelle		1
Letku jäähdyttimeltä vaihteistolle		1

Liite 2. Teemahaastattelujen runko

Mitä tulee ottaa huomioon, kun puhtauden mittausmenetelmiä valitaan

- käytettävissä resursseissa?
- kohteena olevissa komponenteissa?
 - Niiden materiaaleissa?
- tuotantoketjussa?
 - Moventas työympäristössä?
- Mitkä ovat ehdottomat vaatimukset?

Millaisia ovat jo käytössä olevat puhtauden mittaamisen

- laitteet/välineet?
- menetelmät/toimintatavat?
- osaaminen?

Onko ilmaantunut puhtauden puutteesta johtuvia

- vikatilanteita?
- vaurioita?
 - Jos on, onko dokumenttia?
- asiakasreklamaatioita?

Millaista puhtaudentasoa Moventaksen toimittavilta vaihteilta vaaditaan?

- Mitä on järkevää tavoitella?

Mikä on menettely, jos komponentti ei täytä vaaditun puhtausluokan vaatimuksia?

- Onko syy jäljitettävissä?