



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

HANNU VIRTANEN

KOMPONENTTIPUHTAUDEN MITTAUSPALVELUIDEN KEHIT-
TÄMINEN

Diplomityö

Tarkastaja: professori Jari Rinkinen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Teknisten tieteiden tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 5. marras-
kuuta 2014

TIIVISTELMÄ

HANNU VIRTANEN: Komponenttipuhtauden mittauspalveluiden kehittäminen
Tampereen teknillinen yliopisto
Diplomityö, 83 sivua, 2 liitesivua
Helmikuu 2015
Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Hydrauliteknikka
Tarkastaja: professori Jari Rinkinen

Avainsanat: komponenttipuhtaus, ISO 18413 ISO 16232, painehuuhtelu, CCC-koodi, MWDS, metallisensori

Hiukkasmaiset epäpuhtaudet vaikuttavat merkittävästi hydraulijärjestelmien käyttöikään ja luotettavuuteen. Ne aiheuttavat huomattavaa ennenaikaista kulumista ensimmäisen käynnistyksen yhteydessä, käyttöiän alkuvaiheessa ja voivat pahimmillaan aiheuttaa jopa järjestelmän totaalisen vikaantumisen. Komponenttipuhtautta tutkimalla pyritään kehittämään ja parantamaan komponenttivalmistajien valmistus- ja pesuprosesseja sekä työskentelytapoja tuottamaan puhtaampia komponentteja. Puhtailla komponenteilla saadaan pienennettyä epäpuhtauksien aiheuttamien laiterikkojen kustannuksia ja pidennettyä laitteiden käyttöikää.

Tässä diplomityössä kehitettiin Tampereen teknillisen yliopiston hydraulikan ja automatiikan laitoksen komponenttipuhtauslaboratorion tarjoamia komponenttipuhtauden mittauspalveluja. Hydraulikomponenttien puhtaustutkimukset suoritetaan laboratoriossa ISO 18413 ja ISO 16232 standardien mukaisesti. Tutkimuksissa mitataan tutkittavan komponentin pinnoilta irrotettujen epäpuhtauksien massa, lukumäärä tai kokojakauma. Diplomityö tehtiin osana Pirkanmaan ELY-keskuksen rahoittamaa ELY-Kompu -projektia, jonka tavoitteena on kehittää komponenttipuhtauden mittauspalveluja teollisuuden käytettäväksi ja näin parantaa suomalaisten alihankkijoiden ja koneenrakentajien kilpailukykyä.

Diplomityössä mitattiin viiden pienehkön komponentin puhtaustasot ja selvitettiin työskentelyyn kuluneen ajan jakautuminen eri työvaiheisiin. Laboratorion käytetyimmän epäpuhtauksien irrotusmenetelmän, painehuutelukäytännön, työskentelyrutiineja kehitettiin noudattamaan tarkemmin standardien määritelmiä, tehostettiin työn suorittamista ja tutkittiin laboratorion omia virhelähteitä. Laboratoriossa suoritettavien mittauspalvelujen kehittämisen lisäksi laboratoriolle hankittiin Parker Kittiwake:n MWDS metallisensori ja tutkittiin sen soveltuvuutta käytettäväksi komponenttipuhtauden seurannassa pesunesteiden välityksellä.

Sensorin soveltuvuutta testattiin laboratorioon rakennetulla testilaitteistolla, jolla pystyttiin auttavasti simuloimaan pesutapahtuman olosuhteita. Sensorille tehtyjen laboratoriotestien tulokset olivat lupaavia ja seuraavaksi kannattaa siirtyä testaamaan sensoria suoraan komponenttipesukoneessa. Toimiessaan ratkaisu tarjoaisi komponenttivalmistajille mahdollisuuden valvoa epäsuorasti komponenttipuhtautta. Tarkkoja laboratoriotestejä ei sensorilla pystyttäisi korvaamaan, mutta siitä saataisiin komponenttipuhtautta seuraava laadun hallinnan työkalu laboratoriotutkimusten rinnalle.

ABSTRACT

HANNU VIRTANEN: Development of component cleanliness measurement services

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 83 pages, 2 Appendix pages

February 2015

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

Major: Fluid Power

Examiner: Professor Jari Rinkinen

Keywords: Component cleanliness, ISO 18413 ISO 16232, pressure rinsing, CCC-code, MWDS, metal sensor

Particulate contaminants significantly affect the service life and reliability of a hydraulic system. They cause significant premature wear of the system at the first start, during the early stages of life, and may, at worst, even cause total failure of the system. Research of component cleanliness enables the development and improvement of manufacturing, assembling and washing processes to produce cleaner components. The cost of system failures caused by particulate contaminants can be reduced and the lifetime be extended by cleaner components.

The department of Intelligent Hydraulics and Automation has a component cleanliness laboratory at the Tampere University of Technology. The measuring services offered by the laboratory were developed further in this thesis. Research in the laboratory is carried out according to ISO 18413 and ISO 16232 standards. The studies measure either the mass, number or size distribution of the particles extracted from surfaces of the studied component. The thesis was part of the ELY-Kompu project, which is funded by the Centre for Development, Transport and the Environment in Pirkanmaa. The aim of the project is to develop component cleanliness measurement services for the industry and thereby improve the competitiveness of Finnish subcontractors and machine builders.

In this thesis, the cleanliness levels of five small components were measured and the distribution of elapsed time in the various phases was studied. The working routines of the laboratory's most commonly used extraction method, pressure rinsing, were developed to comply in more detail with the standards definitions and accelerated to be more efficient. Sources of error in the laboratory were also studied. In addition to the development made for measuring services performed in the laboratory the Parker Kittiwake MWDS metal sensor was acquired and its suitability to monitor component cleanliness via washing liquids was studied.

The suitability of the sensor was tested in the laboratory with a test rig, which was able to simulate the conditions of the washing process. The results of laboratory testing were promising, and the next step would be to install the sensor directly to a component washing machine. If the sensor works as intended in the final application it enables the component manufacturers to control indirectly their component cleanliness. The exact laboratory methods cannot be replaced with the sensor, but it could provide a tool for quality control in parallel with laboratory testing.

ALKUSANAT

Tässä diplomityössä kehitettiin Tampereen teknillisen yliopiston hydrauliiikan ja automatiikan laitoksen komponenttipuhtauslaboratorion tarjoamia komponenttipuhtauden mittauspalveluja. Diplomityö tehtiin osana Pirkanmaan ELY-keskuksen rahoittamaa ELY-Kompu -projektia, jonka tavoitteena on kehittää komponenttipuhtauden mittauspalveluja teollisuuden käytettäväksi ja näin parantaa suomalaisten alihankkijoiden ja koneenrakentajien kilpailukykyä.

Haluan osoittaa suuret kiitokset työn tarkastajalle prof. Jari Rinkiselle ja ohjaajalle tutkija Lauri Elolle. Olen saanut teiltä opastusta ja neuvoja aina tarvittaessa ja olen saanut myös oman ääneni kuuluville. Työskentely kanssanne on ollut mieluista ja olen tuntenut kuuluvani työryhmään sen tasavertaisena jäsenenä.

Haluan kiittää myös itselleni hyvin tärkeää Kuninkaallista Koneenrakentajakiltaa sekä sen mahtavaa jäsenistöä ja toimijoita. Ilman kiltaa olisin varmasti valmistunut (aikaisemmin), mutta hyvin erilaisena ihmisenä. Olkoon KoRK kaikkien kaveri myös tulevaisuudessa!

Lopuksi haluan kiittää sydämeni pohjasta perhettäni, isovanhempiani ja rakasta avio puolisoani Elinaa. Teiltä olen saanut tukea ja kannustusta läpi koko opiskeluaikani. Ilman Elinaa olisin tuskin valmistunut koskaan.

Ja kuten Uuno Turhapuro on viisasti tokaissut: *”Se vaan tässä nopeesti kirjottaessa ni virhelyöntien määrä kauheesti kasvaa, mutta kiire on kiire.”*

Tampereella, 13. helmikuuta 2015

Hannu Virtanen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	HYDRAULIKOMPONENTTIEN JA -NESTEIDEN PUHTAUS	3
2.1	Komponenttipuhtaustutkimuksen periaatteet ja dokumentointi - ISO 18413	3
2.1.1	Tutkimusdokumentin laatimisen periaatteet	4
2.1.2	Epäpuhtauksien irrottamisen periaatteet	4
2.1.3	Epäpuhtauksien analysoinnin ja tulosten raportoinnin periaatteet...	6
2.2	Nestejärjestelmien komponenttien puhtaus - ISO 16232.....	8
2.2.1	Testijärjestelmän nollapuhtauskoe	11
2.2.2	Testiprosessin yleiset varusteet	12
2.2.3	Hiukkasten irrotus painehuuhtelulla	13
2.2.4	Komponentin rutiinitestaus	16
2.2.5	Hiukkasten lukumäärän ja kokojakauman analysointi mikroskoopilla	17
2.2.6	Komponentin puhtaustason ilmoitustavat.....	20
2.3	Hydraulinesteiden puhtausluokitus	22
2.3.1	ISO 4406:1999	23
2.3.2	SAE AS4059E.....	24
3.	KOMPONENTTIPUHTAUDEN MITTAUS.....	27
3.1	TTY/IHA Komponenttipuhtauslaboratorio ja sen välineistö	27
3.1.1	Puhtaustestikaapit.....	28
3.1.2	Testipenkki.....	31
3.1.3	Mikroskooppilaitteisto	32
3.1.4	Muu välineistö.....	33
3.2	Painehuuhtelun mittausprosessi	35
3.2.1	Alkuvalmistelut	36
3.2.2	Kontrollipinta-alan ja -tilavuuden määrittäminen	38
3.2.3	Hiukkasten irrottaminen.....	39
3.2.4	Mikroskooppianalyysi.....	40
3.2.5	Irrotuskäyrä ja prosessin päätepiste	43
3.2.6	Tulosten laskenta ja raportointi.....	46
3.3	Painehuuhteluprosessiin kuuluva aika	47
4.	PAINEHUUHTELUPROSESSIN KEHITTÄMINEN	50
4.1	Testinesteen määrän vaikutus nollapuhtauteen	50
4.2	Lyhyen käyttökätkön ja puhdastilan avaamisen vaikutus nollapuhtauteen	52
4.3	Prosessin päätepisteen määrittäminen ja tulosten laskenta.....	53
4.4	Suurat kuidut irrotusprosessin lopun nollapuhtausnäytteessä.....	56
4.4.1	Mittausprosessin epäpuhtauslähteet	58
4.4.2	Suurten kuitujen mitätöinti.....	63

4.5	Nollapuhtausnäytteet rutiinitestauksessa.....	64
5.	METALLISENSORI KOMPONENTTIPUHTAUDEN SEURANTAAN	65
5.1	Sensorin testijärjestelmä.....	68
5.2	Testissä käytetyt hiukkaset.....	69
5.3	Pesutapahtuman simulointi	70
6.	TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU	75
6.1	Komponenttien puhtausmittaukset.....	75
6.2	Painehuuhtelun työskentelyrutiinien kehittäminen	76
6.3	Metallisensorin alustava testaus	78
7.	YHTEENVETO	79
	LÄHTEET.....	81

LIITE A: PAINEHUUHTELUPROSESSIN VERIFIOINTIKAAVIO

LIITE B: MITTAUSRAPORTTI HYDAC CTU-1200

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Esimerkki komponentin irrotuskäyrästä mukailleen ISO 16232 irrotuskäyrän esimerkkiä. [4; 6-8].....</i>	<i>15</i>
Kuva 2.	<i>Komponentin rutiinitestausprosessin kaavio. [6; 14].....</i>	<i>16</i>
Kuva 3.	<i>Vasemmalla on esitetty suodatusprosessin periaatekuva irrotuslaitteistoon integroidulla kalustolla ja oikealla irrotusprosessista erillään. [10].....</i>	<i>18</i>
Kuva 4.	<i>TTY/IHA Komponenttipuhtauslaboratorion tutkimustila.....</i>	<i>28</i>
Kuva 5.	<i>TTY/IHA Komponenttipuhtauslaboratorion puhtaustestikaapit. Vasemmalla Pall PCC-41 ja oikealla Hydac CTU-1230.....</i>	<i>29</i>
Kuva 6.	<i>TTY/IHA Komponenttipuhtauslaboratorion loppukäytön simuloinnin puhtaustauslaitteisto eli testipenkki.....</i>	<i>31</i>
Kuva 7.	<i>Carl Zeiss Axio Imager M2 -mikroskooppi.....</i>	<i>32</i>
Kuva 8.	<i>FinnSonic-ultraäänipesukone sekä taustalla suodatustarpeisto.....</i>	<i>33</i>
Kuva 9.	<i>Komponenttipuhtauslaboratorion näyteuuni.....</i>	<i>34</i>
Kuva 10.	<i>Petrimalja, kalvosuodattimia ja pihdit.....</i>	<i>34</i>
Kuva 11.	<i>Komponenttipuhtauslaboratorion tarkkuusvaa'at.....</i>	<i>35</i>
Kuva 12.	<i>Väärin toimitetut tutkittavat komponentit.....</i>	<i>37</i>
Kuva 13.	<i>Esimerkki komponentin kontrollipinta-alan määrittämisestä CAD-mallinnuksen avulla.....</i>	<i>38</i>
Kuva 14.	<i>Havainnollistava esimerkki komponentin kontrollitulavuuden määrittämisestä.....</i>	<i>39</i>
Kuva 15.	<i>Esimerkki kuva-analyysiohjelmiston kokoamasta kuvasta koko kalvosuodattimen alalta.....</i>	<i>42</i>
Kuva 16.	<i>Kuva-analyysiohjelmistolle manuaalisesti tehtäviä korjauksia hiukkasten laskentaan ja havainnointiin, vasen kuva 16a on korjaamaton ja oikea kuva 16b on korjattu.....</i>	<i>43</i>
Kuva 17.	<i>Esimerkkiprosessien irrotuskäyrät hiukkasten lukumäärällä ilmoitettuna.....</i>	<i>44</i>
Kuva 18.	<i>Irrotuskäyrä prosentteina suhteessa ko. ajanhetkeen mennessä irrotettuihin hiukkasiin.....</i>	<i>45</i>
Kuva 19.	<i>Irrotuskäyrä prosentteina koko prosessin aikana irrotettujen hiukkasten kokonaisuudesta.....</i>	<i>45</i>
Kuva 20.	<i>Komponenttien A - C irrotuskäyrät.....</i>	<i>46</i>
Kuva 21.	<i>Ajankäytön jakautuminen eri työvaiheisiin painehuuhteluprosessissa. Vasemmassa kaaviossa on koko prosessin ajankäytön jakautuminen ja oikeassa näytteiden analysointiin kuluneen ajan jakautuminen.....</i>	<i>48</i>
Kuva 22.	<i>Testinesteen määrän vaikutus nollapuhtausnäytteen puhtaustasoon.....</i>	<i>51</i>

Kuva 23.	<i>Lyhyen käyttökätkön ja testikaapin luukun avaamisen vaikutukset nollapuhautauden kehitykseen.....</i>	<i>53</i>
Kuva 24.	<i>Hydac CTU-1230 puhtaustestikaapin kalvosuodattimen pidike.</i>	<i>59</i>
Kuva 25.	<i>Kalvosuodattimen pidikkeestä yhtä suodattimen vaihtoa kohti laskettujen hiukkasten keskiarvo ja mediaani kokoluokittain.</i>	<i>60</i>
Kuva 26.	<i>Työtakin hihasta irronneet hiukkaset kokoluokittain.</i>	<i>61</i>
Kuva 27.	<i>Valkoisesta työtakista löytyneitä hiukkasia. Kuvan punainen vertailumitta on 200 µm.....</i>	<i>62</i>
Kuva 28.	<i>Esimerkkejä nollapuhautausnäytteistä löytyneistä suurista kuiduista.</i>	<i>63</i>
Kuva 29.	<i>Parker Kittiwake Metallic Wear Debris Sensor. [25].....</i>	<i>67</i>
Kuva 30.	<i>Metallisensorin testaamiseen rakennettu testijärjestelmä, hydraulikaavio ja osaluettelo.</i>	<i>68</i>
Kuva 31.	<i>Somaloy 500 rautajauheen hiukkasjakauma ISO 16232 -standardin hiukkaskokoluokissa.</i>	<i>69</i>
Kuva 32.	<i>Somaloy 500 rautajauheen hiukkasia.....</i>	<i>70</i>
Kuva 33.	<i>Sensorin havaitsemat Fe-hiukkaset minuuttia kohden kolmessa eri hiukkaskokoluokassa.</i>	<i>72</i>
Kuva 34.	<i>Kalvosuodattimelle suodatetun näytteen hiukkaset testiajon päätteeksi.....</i>	<i>73</i>
Kuva 35.	<i>Mikroskoopin sekä metallisensorin tuloksista lasketut hiukkaslukumäärien prosentuaaliset kokojakaumat.....</i>	<i>74</i>
Kuva 36.	<i>Sensorin havaitsemat Fe-hiukkaset minuuttia kohden testissä, jossa lisättiin metallihiukkasia järjestelmään tasaisin väliajoin.....</i>	<i>74</i>

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1.	<i>Epäpuhtauksien irrotusmenetelmän valintataulukko. [1]</i>	5
Taulukko 2.	<i>Epäpuhtauksien analysointitavan valintaohje. [1]</i>	6
Taulukko 3.	<i>Mittaustulosten ilmoitustavan valintaohje. [1]</i>	7
Taulukko 4.	<i>ISO 16232 -standardin osat. [2; 3]</i>	9
Taulukko 5.	<i>Hiukkasten laskemiseen käytettyjen mikroskooppien ominaisuuksia. [3; 10]</i>	17
Taulukko 6.	<i>Esimerkkejä perusmikroskoopin havainnointikyvystä eri linsseillä ja suurennoksilla. [3; 10]</i>	19
Taulukko 7.	<i>Hiukkasten kokoluokat ISO 16232 mukaan. [13]</i>	20
Taulukko 8.	<i>Puhtaustason määräytyminen hiukkasten lukumäärän perusteella ISO 16232 mukaan. [3; 13]</i>	21
Taulukko 9.	<i>Puhtaustason määräytyminen hiukkasten lukumäärän perusteella ISO 4406:1999 mukaan. [15]</i>	24
Taulukko 10.	<i>SAE AS4059E puhtaustuokkien määrittely hiukkasten lukumäärään perustuen differentiaalisille kokoluokille 100 ml öljytilavuutta kohti. [16]</i>	25
Taulukko 11.	<i>SAE AS4059E puhtaustuokkien määrittely hiukkasten lukumäärään perustuen kumulatiivisille kokoluokille 100 ml öljytilavuutta kohti. [16]</i>	26
Taulukko 12.	<i>Puhtaustestikaappien tärkeimmät eroavat ominaisuudet. [3; 18; 19]</i>	30
Taulukko 13.	<i>Testipenkin suorituskyvyn ominaisarvot. [20]</i>	32
Taulukko 14.	<i>Viiden mitatun komponentin kontrollipinta-alat sekä -tilavuudet</i>	39
Taulukko 15.	<i>Viiden mitatun komponentin puhtaustasot CCC-koodina 1000 cm²:n kontrollipinta-alaa kohti</i>	47
Taulukko 16.	<i>Viiden mitatun komponentin puhtaustasot CCC-koodina 100 cm³:n kontrollitilavuutta kohti</i>	47
Taulukko 17.	<i>Komponenttien D ja E CCC-koodit prosessin päätepisteen ja kaikkien kuuden näytteen tuloksilla laskettuna 1000 cm²:n kontrollipinta-alaa kohti</i>	55
Taulukko 18.	<i>Komponenttien A, B ja C CCC-koodit prosessin päätepisteen ja kaikkien kuuden näytteen tuloksilla laskettuna 1000 cm²:n kontrollipinta-alaa kohti</i>	55
Taulukko 19.	<i>Irrotusprosessin lopuksi otettujen nollapuhtausnäytteiden kehitys</i>	57
Taulukko 20.	<i>Eri valmistajien metallihiukkassensoreiden vertailu. [23-27]</i>	66
Taulukko 21.	<i>MWDS:n hiukkaskokoluokkajakajo Fe- ja nFe-hiukkasille ja vertailu ISO 16232 kokoluokkajakoon</i>	67

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

APC	Automaattinen hiukkaslaskuri (engl. Automatic Particle Counter)
Apertuuri	Optisessa järjestelmässä, kuten mikroskoopissa, oleva aukko, jonka läpi valo kulkee.
B_n	Testilaitteiston n:s nollapuhtausnäyte
CCC	Komponenttipuhtauskoodi (engl. Component Cleanliness Code)
ISO	International Organization of Standardization
Kontrollipinta-ala	Komponentin pinta-ala, johon puhtausvaatimus ja/tai puhtaustutkimus kohdistuu.
Kontrollitilavuus	Komponentin tilavuus, johon puhtausvaatimus ja/tai puhtaustutkimus kohdistuu.
LM	Valomikroskooppi (engl. Light Microscope)
MWDS	Parker Kittiwaken valmistama metallisensori (Metallic Wear Debris Sensor)
NAS	National Aerospace Standard
Rutiinitestaus	Komponentin puhtaustutkimus, joka suoritetaan verifioidun irrotusprosessin parametreilla.
S_n	Komponentin n:s puhtausnäyte
SAE	Society of Automotive Engineers
SEM	Pyyhkäisyelektronimikroskooppi (engl. Scanning Electron Microscope)
Tutkimuspöytäkirja	Komponentin tilaajan ja toimittajan välinen sopimusasiakirja, johon kirjataan komponentille asetetut puhtausvaatimukset sekä puhtaustutkimukseen käytettävät menetelmät. (engl. Inspection document)
$\mu\text{m}(c)$	Mittayksikkö (mikrometriä), jolla korostetaan, että mittaus on suoritettu automaattisella hiukkaslaskurilla, joka on kalibroitu ISO 11171:1999 mukaisesti.

1. JOHDANTO

Hiukkasmaisten epäpuhtauksien läsnäololla tiedetään olevan merkittävä vaikutus hydraulijärjestelmien käyttöikään ja luotettavuuteen. Valmistus- ja kokoonpanoprosesseista komponenttien pinnoille jääneet hiukkaset aiheuttavat huomattavaa ennenaikaista kulumista systeemissä ensimmäisen käynnistyksen yhteydessä, käyttöiän alkuvaiheessa ja voivat pahimmillaan aiheuttaa jopa järjestelmän totaalisen vikaantumisen. Likaisilla uusilla komponenteilla saatetaan aiheuttaa ongelmia myös vanhemmille laitteille huoltojen yhteydessä.

Tampereen teknillisessä yliopistossa (TTY) tehdään komponenttipuhtaustutkimusta hydrauliiikan ja automatiikan laitoksen (IHA) komponenttipuhtauslaboratoriossa. TTY/IHA komponenttipuhtauslaboratorio tarjoaa komponenttipuhtauden mittauspalveluja myös teollisuudelle. Tämä komponenttipuhtauden mittauspalvelujen kehittämistä käsittelevä diplomityö käynnistettiin hydrauliiikan ja automatiikan laitoksella toukuussa 2014 osana Pirkanmaan ELY-keskuksen rahoittamaa ELY-Kompu -projektia. Projektin tavoitteena on kehittää komponenttipuhtauden mittauspalveluita teollisuuden käytettäväksi ja komponenttipuhtautta kehittämällä parantaa suomalaisten alihankkijoiden ja koneenrakentajien kilpailukykyä.

Hydraulikomponenttien puhtaustutkimuksia käsittelevä standardi ISO 18413 julkaistiin vuonna 2002. Siinä määritellään komponenttipuhtaustutkimuksen periaatteet ja dokumentointi hydrauliiikan komponenteille. Viisi vuotta myöhemmin, vuonna 2007, julkaistiin lähinnä autoteollisuuden tarpeisiin ajoneuvon nestejärjestelmien komponenttien puhtautta käsittelevä ISO 16232 -standardi. Standardeissa esitetyt menetelmät ovat täysin yhteneväiset toistensa kanssa, mutta ne on kuvattu ja määritelty tarkemmin uudemmassa ISO 16232 -standardissa. ISO 18413 -standardista löytyy muun muassa tietoa tiettyjen menetelmien soveltuvuudesta erityisesti hydraulikomponenteille.

Komponenttipuhtaustutkimuksessa epäpuhtauksiksi luokitellaan ainoastaan kiinteät hiukkaset. Nestemäiset tai kaasumaiset epäpuhtaudet eivät sisälly tutkittaviin epäpuhtauksiin. Tutkimuksissa hiukkasmaiset epäpuhtaudet irrotetaan tutkittavan komponentin pinnoilta sopivalla menetelmällä testinesteeseen. Irrotetuista hiukkasista analysoidaan massa, lukumäärä tai kokojakauma ja tulokset esitetään ISO 16232 -standardin määrittelemällä CCC-koodauksella. Tuloksista saadaan muihin komponentteihin nähden vertailukelpoisia suhteuttamalla ne joko komponentin pinta-alaan tai tilavuuteen.

Komponenttipuhtaus ja öljynpuhtaus eroavat merkittävästi toisistaan vaikka ne usein virheellisesti rinnastetaankin toisiinsa. Toisessa luvussa esitellään komponenttipuhtaus-tutkimuksessa käytettävät standardit ISO 18413 ja ISO 16232. Komponenttipuhtauden ja öljynpuhtauden erojen esiintuomiseksi esitellään myös öljynpuhtauden standardit ISO 4406:1999 ja SAE AS4059E:2005.

Kolmannessa luvussa esitellään TTY/IHA komponenttipuhtauslaboratoriota sekä sen laitteistoa, tutkitaan viiden pienehkön komponentin puhtaustasot ja kerrotaan puhtaus-tutkimuksen suorittamisesta laboratoriotyöskentelyn näkökulmasta. Tutkimuksissa käytetään painehuuhtelumenetelmää ja ne suoritetaan laboratoriolle vakiintuneilla työskentelyrutiineilla. Puhtaustasojen selvittämisen lisäksi tutkitaan ajankäytön jakautumista laboratoriotyöskentelyssä kellottamalla eri työvaiheisiin kuluneita aikoja.

Laboratorion työskentelyrutiineja kehitetään neljännessä luvussa painehuuhteluprosessin suorittamisen osalta. Luvussa tutkitaan laboratorion todennäköisiä virhelähteitä ja pyritään eliminoimaan niiden vaikutukset tarkempien tulosten saavuttamiseksi. Samalla tarkennetaan työskentelytapoja vastaamaan tarkemmin standardien määritelmiä. Kehitystyoimien tavoitteena on saada laboratorio tuottamaan tarkempia tuloksia kustannustehokkaammin.

Epäsuoran komponenttipuhtauden mittaamisen tutkimiseksi laboratoriolle hankittiin metallisensori. Sensoria ja sille tehtyjä laboratoriotestejä on esitelty viidennessä luvussa. Sensorilla olisi tarkoitus pystyä havainnoimaan komponenttipuhtautta komponenttipesukoneen pesunesteiden välityksellä. Toimiessaan sensori mahdollistaisi komponenttipuhtauden seuraamisen ja kehittämisen laboratoriotestauksen ohella myös komponentteja valmistavissa yksiköissä. Pesuprosessien eli epäsuoran komponenttipuhtauden seuraaminen saataisiin näin osaksi komponentteja valmistavien yritysten laadun varmistusta.

Lopuksi tarkastellaan työssä saavutettuja tuloksia. Tulokset ja niiden tarkastelut on jaettu työn rakenteen mukaan työssä suoritettuihin puhtaustutkimuksiin, työskentelyrutiinien kehittämiseen sekä metallisensorin testaukseen. Seitsemännessä luvussa on koko työn yhteenveto.

2. HYDRAULIKOMPONENTTIEN JA -NESTEIDEN PUHTAUS

Komponenttipuhtaus ja öljynpuhtaus sekoitetaan hyvin yleisesti toisiinsa ja monesti oletetaan, että ne tarkoittavat samaa asiaa. Käsitteet kuitenkin eroavat merkittävästi toisistaan. Järjestelmässä kiertävän öljyn puhtaudesta voidaan tehdä päätelmiä järjestelmän komponenttipuhtaudesta, mutta nämä eivät missään nimessä tarkoita samaa asiaa.

Tässä luvussa esitellään komponenttipuhtausstandardit ISO 18413 ja ISO 16232. Komponenttipuhtauden ja öljynpuhtauden erojen havainnollistamiseksi esitellään myös yleisimmin käytössä olevat öljynpuhtausstandardit ISO 4406:1999 ja SAE AS4059E:2005.

2.1 Komponenttipuhtaututkimuksen periaatteet ja dokumentointi - ISO 18413

ISO 18413 Hydraulic fluid power - Cleanliness of parts and components - Inspection document and principles related to contaminant collection, analysis and data reporting (suom. Hydrauliteknikka - Osien ja komponenttien puhtaus - Epäpuhtauksien keräämisen, analysoinnin ja raportoinnin periaatteet ja dokumentointi)

Hydraulijärjestelmissä tehon välitys tapahtuu järjestelmässä kiertävän paineistetun nesteen välityksellä. Järjestelmässä olevat epäpuhtaudet voivat aiheuttaa järjestelmän suorituskyvyn heikentymistä. Epäpuhtauksien määrää voidaan pienentää puhdistamalla järjestelmän osat ja komponentit ennen kokoonpanoa. Osan tai komponentin teknisen puhtauden vaikutuksien arvioiminen vaatii dokumentoinnin sekä komponentin puhtausvaatimuksista että toimintatavoista ja menettelyistä, joilla komponentin epäpuhtaudet on irrotettu, analysoitu ja raportoitu. [1]

ISO 18413 -standardi hydrauliiikan komponenttien puhtaudesta on julkaistu vuonna 2002. Siinä kerrotaan puhtaututkimuksen raportoinnin, tutkimusdokumentin sisällön sekä epäpuhtauksien irrottamisen ja analysoinnin periaatteet. Standardissa ei määritellä osille tai komponenteille puhtausvaatimuksia vaan ne muodostetaan järjestelmän sekä käyttöympäristön mukaan tapauskohtaisesti. Standardissa määritellään ainoastaan toimintatavat sekä menetelmät uskottavien ja vertailukelpoisten puhtaututkimuksien toteuttamiseksi.

2.1.1 Tutkimusdokumentin laatimisen periaatteet

Tutkimusdokumentilla tarkoitetaan osan tai komponentin tilaajan ja toimittajan välistä kirjallista sopimusta, johon on kirjattu osalle tai komponentille asetettu puhtausvaatimus sekä puhtaustutkimuksessa käytettävät menetelmät. Puhtausvaatimuksen pitää olla linjassa komponentin tiedetyn tai odotetun sovelluksen ja käyttökohteen kanssa. Puhtausvaatimuksen määrittelyssä voidaan käyttää hyväksi jo kerättyä mittaustietoa; olemassa olevia kansainvälisiä, kansallisia, teollisuudenhaaran tai yrityksen sisäisiä standardeja; luotettavuuden, kestävyuden ja toiminnallisen suorituskyvyn asettamia vaatimuksia sekä tietysti vastaavien osien ja komponenttien jo määritellyjä puhtausvaatimuksia. Tärkeintä kuitenkin on, että asetettu puhtausvaatimus on sekä komponentin tilaajan että toimittajan yhteisesti hyväksymä. [1]

Samoin kuin itse puhtausvaatimus, pitää myös puhtaustutkimukseen käytettävät menetelmät olla komponentin tilaajan ja toimittajan yhteisesti hyväksymät. Puhtaustutkimukseen käytettävät menetelmät pitää valita asetetun puhtausvaatimuksen sekä komponentin ominaisuuksien perusteella. Tutkimusdokumentissa pitää olla määriteltynä sopivat parametrit soveltuvalle epäpuhtauksien irrotusmenetelmälle, käytettävä analysointimenetelmä sekä tutkimuksen tuloksien esittämisen muoto. [1]

Hyväksytyt puhtausvaatimukset sekä tutkimuksessa käytettävät menetelmät kirjataan selkeästi tutkimusdokumenttiin. Tutkimusdokumentti astuu voimaan kun se on molempien sopimusosapuolten yhteisesti hyväksymä ja toimii samalla sopimusasiakirjana. Molemmat osapuolet, komponentin tilaaja sekä toimittaja, saavat tutkimusdokumentista omat kopionsa. [1]

2.1.2 Epäpuhtauksien irrottamisen periaatteet

Standardi esittelee epäpuhtauksien irrottamiselle neljä perusmenetelmää: ravistelu, painehuuhtelu, ultraäänipesu sekä loppukäytön simulointi eli testipenkki. Näiden lisäksi myös muunlaisen irrotusmenetelmän käyttö on mahdollista, kunhan menetelmän tehokkuus voidaan osoittaa ja se on hyväksytty tutkimuksen kaikkien osapuolien kesken. [1]

Irrotusmenetelmät perustuvat epäpuhtaushiukkasten irrottamiseen komponentin kontrollipinnoilta testinesteeseen. Irrotusmenetelmästä riippumatta valitun testinesteen pitää olla jokaisen tutkimuksen osapuolen hyväksymä ja riittävän puhdasta, jottei testineste itsessään vääristä tutkimuksen tulosta. Testinesteen pitää olla yhteensopiva kaikkien komponentissa tai osassa sekä koko tutkimusjärjestelyssä käytettyjen materiaalien kanssa. Testatun komponentin pitää olla tutkimuksen jälkeen toimintakuntoinen, joten testinesteen pitää olla yhteensopiva myös komponentin loppujärjestelmässä käytettävän nesteen kanssa. [1]

ISO 18413 -standardin irrotusmenetelmät ovat yhteneväiset autoteollisuuden ISO 16232:2007 Nestejärjestelmien komponenttien puhtaus -standardin kanssa. ISO 16232 määrittelee ja selostaa irrotusmenetelmät huomattavasti seikkaperäisemmin kuin ISO 18413. Tästä syystä irrotusmenetelmät esitellään tarkemmin luvussa 2.2 ja jäljempänä keskitytään lähinnä painehuuhteluirrotusmenetelmään (Luku 2.2.3).

ISO 18413 -standardissa on hydraulikomponenteille käytettävän irrotusmenetelmän valintaan epäpuhtauksien irrotusmenetelmän valintaohje (Taulukko 1).

Taulukko 1. Epäpuhtauksien irrotusmenetelmän valintaohje. [1]

Osa tai komponentti	Ravistelu	Paine huuhtelu	Ultraääni pesu	Testipenkki
Laitteistot				
Pumput, moottorit	ES	ES	EH	S
Venttiilit, sylinterit	ES	ES	EH	S
Venttiilistöt, venttiililohkot	ES	H	H	S
Akut	H	ES	EH	S
Yksinkertaiset muodot ja kotelot				
Vaihteet, levyt, akselit	H	S	S	EH
Kelat, tangot, männät	H	S	S	EH
Varusteet, tiivisteet	H	S	S	EH
Tankit, säiliöt	H	S	EH	ES
Ontot osat				
Lohkot, rungot	S	H	H	H
Letkut, putket	S	H	H	S
Liittimet	H	S	H	H
Suodatuskomponentit				
Puhdistettavat suodattimen osat	Irrutusmenetelmä sovittava tilaajan ja toimittajan kesken			
Ei-puhdistettavat suodattimen osat	Irrutusmenetelmä sovittava tilaajan ja toimittajan kesken			
Suodattimen kotelot	S	H	H	S
S = Suositeltava H = Hyväksyttävä ES = Ei suositeltava EH = Ei hyväksyttävä				

Sovittu epäpuhtauksien irrotusmenetelmä pitää olla ilmoitettu tutkimusdokumentissa

Taulukkoon 1 on listattu erilaisia tutkittavia osia ja komponentteja ja ilmoitettu niiden yhteensopivuus jokaisen neljän eri irrotusmenetelmän kanssa. Taulukko on kuitenkin vain ohjeellinen ja irrotusmenetelmän tehokkuus joudutaan todentamaan aina jokaisen uuden komponentin kohdalla erikseen osana tutkimusprosessia.

2.1.3 Epäpuhtauksien analysoinnin ja tulosten raportoinnin periaatteet

Standardi esittelee neljä perusmenetelmää epäpuhtaushiukkasten analysointiin: gravimetrinen analyysi, hiukkasen koko, kemiallinen koostumus sekä hiukkasten kokojakauma. Analysointimenetelmästä riippuen, näytteestä saadaan selville epäpuhtaushiukkasten kokonaisuudessa, -lukumäärä, kokojakauma tai kemiallinen koostumus. Epäpuhtauksien analysointimenetelmä sekä muoto, jolla analyysin tulokset ilmoitetaan, pitävät olla kaikkien tutkimuksen osapuolien hyväksymät ja kirjattuna tutkimusdokumentissa. Tutkimusosapuolet voivat sopia myös muiden analysointimenetelmien käytöstä. [1]

Kuten irrotusmenetelmät myös analysointimenetelmät ovat yhteneväiset autoteollisuuden ISO 16232:2007 -standardin kanssa. Tästä syystä irrotusmenetelmät esitellään tarkemmin luvussa 2.2. Jäljempänä keskitytään lähinnä hiukkasten lukumäärän ja kokojakauman analysointiin mikroskoopilla (luku 2.2.5).

Käytettävän analysointimenetelmän valintaan ISO 18413 -standardi tarjoaa epäpuhtauksien analysointitavan valintaohjeen (Taulukko 2).

Taulukko 2. Epäpuhtauksien analysointitavan valintaohje. [1]

Epäpuhtauksien irrotusmenetelmä	Gravimetrisen analyysi	Hiukkasen koko	Kemiallinen koostumus	Hiukkasen kokojakauma	
				Pullo	On-line
Ravistelu	S	S	S	S	EH
Painehuuhtelu	S	S	S	S	H
Ultraääni	S	S	S	S	S
Testipenkki	H	H	H	H	S

S = Suositeltava

H = Hyväksyttävä

ES = Ei suositeltava

EH = Ei hyväksyttävä

Epäpuhtauksien analysointitapa pitää olla ilmoitettu tutkimusdokumentissa

Taulukkoon 2 on merkitty jokaisen neljän analysointitavan sopivuus kaikille neljälle eri irrotustavalle. Taulukko on vain suuntaa antava ja sen informaatioarvo jääkin melko vähäiseksi. Suurimpana antina taulukosta nähdään, että on-line -analyysi ei sovellu käytettäväksi ravisteluirrotusmenetelmän kanssa.

Analyysin tulokset voidaan ilmoittaa monella eri tavalla. Tulosten ilmoittamisen muodolle ei voida antaa yhtä yksittäistä oikeaa ilmoitustapaa vaan ilmoitustapa pitää valita aina tapauskohtaisesti. Luonnollisesti myös analysointimenetelmä asettaa tulosten ilmoittamiselle omat rajoitteensa. [1]

Taulukossa 3 on esitetty standardin ohjenuorat mittaustulosten ilmoitustavan valinnalle.

Taulukko 3. Mittaustulosten ilmoitustavan valintaohje. [1]

Analysointi menetelmä	Mitattu suure	Raportoinnin yksiköt		Huomautukset
		Suosittelut	Hyväksyttävät	
Gravimetrinen analyysi	Massa	mg/m ² kontrollipinta-alaa kohti	mg/komponentti*	
		mg/L kontrollitilavuutta kohti		
		mg/komponentti	mg/kg	
Hiukkasen koko	Suurin hiukkanen	µm	mm	Suositellaan käytettäväksi pisintä dimensiota
	Määriteltyä maksimia suurempien hiukkasten lkm	µm:nä määriteltyä maksimia suurempien hiukkasten lkm	mm:nä määriteltyä maksimia suurempien hiukkasten lkm	
Kemiallinen koostumus	Kemiallinen koostumus	Tiettyjen alkuaineiden tai yhdisteiden esiintyminen tai poissaolo	massaosuus	Käytetty analysointitapa raportoitava
			tilavuusosuus	
Hiukkasten kokojakauma	Pullo	Hiukkasten koko ja kokojakauma	Määriteltyä hiukkaskokoa suurempien hiukkasten lkm kontrollipinta-alaa kohti [kpl/cm ²]	Sisältää yleensä useita hiukkaskokoja
			Määriteltyä hiukkaskokoa suurempien hiukkasten lkm kontrollitilavuutta kohti [kpl/mL]	
			Määriteltyä hiukkaskokoa suurempien hiukkasten lkm osaa kohti	
			Määriteltyä hiukkaskokoa suurempien hiukkasten lkm komponenttia kohti	
	On-line	Hiukkasten koko ja kokojakauma	Määriteltyä hiukkaskokoa suurempien hiukkasten lkm kontrollipinta-alaa kohti [kpl/cm ²]	
			Määriteltyä hiukkaskokoa suurempien hiukkasten lkm kontrollitilavuutta kohti [kpl/mL]	
			Määriteltyä hiukkaskokoa suurempien hiukkasten lkm osaa kohti	
			Määriteltyä hiukkaskokoa suurempien hiukkasten lkm komponenttia kohti	

*Ei päde yleisesti kokoonpanuille komponenteille

Tutkittaville komponenteille pitää määritellä, mistä niiden epäpuhtauksien ominaisuuksista ollaan kiinnostettu. Halutaanko esimerkiksi tietää kaikkien kokoluokkien hiukkasten lukumäärät vai riittääkö vain tiettyä kokoluokkaa suurempien hiukkasten lukumäärät. Suhteuttamalla mitatut hiukkaslukumäärät komponentin kontrollitilavuuteen tai -pinta-alaan, saadaan vertailukelpoisia tuloksia myös muihin komponentteihin nähden. Mielekäs ja tarkoituksen mukainen tulosten ilmoittamismuoto määräytyy komponentin ja sen sovelluskohteen mukaan. Valittu tulosten ilmoittamisen muoto pitää olla kaikkien tutkimuksen osapuolien hyväksymä ja kirjattuna tutkimusdokumenttiin. [1]

2.2 Nestejärjestelmien komponenttien puhtaus - ISO 16232

ISO 16232 Road vehicles - Cleanliness of components of fluid circuits (suom. Maantieajoneuvot - Nestejärjestelmien komponenttien puhtaus)

Maantieajoneuvojen nestejärjestelmien komponenttipuhtautta koskeva standardi, ISO 16232, on julkaistu vuonna 2007. Maantieajoneuvojen nestejärjestelmillä tarkoitetaan polttomoottorin järjestelmiä, joissa kiertävänä nesteenä voi toimia esimerkiksi öljy, poltto-, kylmä- tai jäähdytysaine. Tällaisia ovat muun muassa polttoaine- ja jäähdytysjärjestelmät. Standardi määrittelee, kuinka näiden järjestelmien komponenttien puhtautta voidaan tutkia ja miten mitatut tulokset tulisi esittää. Epäpuhtauksiksi luokitellaan ainoastaan kiinteät hiukkaset. Tällaisia ovat muun muassa kaikki valmistuksessa ja kokoonpanossa syntyneet sekä ympäristöstä kulkeutuneet jäännöshiukkaset. [2] Nestemäiset tai kaasumaiset epäpuhtaudet eivät sisälly tutkittaviin epäpuhtauksiin. Standardi sovellettavaksi myös hydraulijärjestelmien komponenttipuhtauden tutkimuksessa [3].

ISO 16232 standardisarjassa käytetään samoja menetelmiä, periaatteita ja termejä kuin ISO 18413:2002 Epäpuhtauksien keräämisen, analysoinnin ja raportoinnin periaatteet ja dokumentointi -standardissa. Peruseriaate on, että hiukkasmaiset epäpuhtaudet irrotetaan tutkittavan komponentin pinnoilta testinesteeseen, joka analysoidaan ja tulokset raportoidaan. ISO 18413 kertoo enemmänkin tutkimuksen periaatteista ja hyvistä käytännöistä, kun taas ISO 16232 standardisarja kertoo puhtaustutkimuksesta seikkaperäisemmin. ISO 16232:ssa määritellään tulosten esittämiseksi myös komponenttipuhtauskoodi (CCC-koodi), jollaista ei ole ISO 18413 -standardissa. Menetelmät epäpuhtauksien irrottamiselle sekä analysoinnille ovat täysin yhteneväiset molemmissa standardeissa. ISO 18413 standardi onkin hyvä perehdyttävä teknisen puhtauden tutkimiseen mutta yksityiskohtainen tieto kannattaa selvittää ISO 16232 -standardista.

Standardisarja koostuu kymmenestä osasta, joiden numerot, nimet sekä sivumäärät ovat ilmoitetut taulukossa 4.

Taulukko 4. ISO 16232 -standardin osat. [2; 3]

Osa	Nimi	Sivumäärä
16232 – 1	Sanasto	15 s
16232 – 2	Hiukkasten irrotus ravistelemalla	15 s.
16232 – 3	Hiukkasten irrotus painehuuhtelulla	15 s.
16232 – 4	Hiukkasten irrotus ultraäänellä	18 s.
16232 – 5	Hiukkasten irrotus testipenkin avulla	18 s.
16232 – 6	Hiukkasten massan laskenta gravimetrisellä analyysillä	10 s.
16232 – 7	Hiukkasten lukumäärän ja kokojakauman analysointi mikroskoopilla	22 s.
16232 – 8	Hiukkastyypin analysointi mikroskoopin avulla	7 s.
16232 – 9	Hiukkasten lukumäärän ja kokojakauman analysointi automaattisella valonpeittoon perustuvalla hiukkaslas- kurilla	18 s.
16232 – 10	Tulosten esittäminen	19 s.

Ensimmäisessä osassa selostetaan standardisarjassa käytettyjen termien ja lyhenteiden merkitykset. Seuraavat neljä osaa (osat 2 – 5) käsittelevät epäpuhtauksien irrotusmenetelmiä ja osat 6 – 9 käsittelevät epäpuhtausnäytteiden analysointimenetelmiä. Osassa 10 määritellään, miten tulokset tulisi esittää.

Hiukkasten irrottaminen komponenttia ravistelemalla soveltuu erityisesti ontoille komponenteille. Komponentti täytetään osittain testinesteellä, jonka jälkeen komponentin lähdöt tulpataan. Ravistelussa komponentin sisällä voimakkaasti liikkuva neste saa epäpuhtaushiukkaset irtoamaan kappaleen pinnoilta testinesteeseen. Komponentin ravistelu voidaan suorittaa manuaalisesti tai koneellisesti. Ravisteluprosessin tehokkuuteen vaikuttavat ainakin seuraavat parametrit: ravistelun taajuus, amplitudi, kesto sekä testinesteen tyyppi ja tilavuus. [4; 5]

Painehuuhtelussa komponentin pintoja suihkutetaan paineistetulla testinesteellä. Painehuuhtelu sopii komponenteille, joiden kontrollipinnat päästään painesuihkulla pesemään. Huuhtelun tuloksena epäpuhtaudet irtoavat tutkittavan komponentin pinnoilta ja jäävät testinesteeseen. [6] Painehuuhteluprosessi käsitellään tarkemmin luvussa 2.2.3.

Ultraääni-irrotusmenetelmässä tutkittava komponentti upotetaan kauttaaltaan testinestekylpyyn. Tämän jälkeen ultraääntä johdetaan testinesteeseen tai suoraan komponenttiin. Menetelmä perustuu ultraäänitaajuuden värähtelyn aikaansaamaan testinesteen kavitaatioon. Kavitointi muodostaa komponentin pinnoille ja epäpuhtaushiukkasten ympärille pieniä kuplia, jotka voimakkaasti luhistuessaan saavat epäpuhtaushiukkaset irtoamaan testinesteeseen. Menetelmä sopii erityisesti pienille ja keskikokoisille komponenteille, joissa on vaikeita ja monimutkaisia muotoja ja joista halutaan tutkia sisäpinnat ja/tai ulkopinnat. Tällaisia komponentteja ovat esimerkiksi liitostiivisteet ja hammaspyörät. Menetelmä mahdollistaa myös usean komponentin epäpuhtauksien irrottamisen saman-

aikaisesti, mikä nopeuttaa tutkimusprosessia huomattavasti verrattuna esimerkiksi painehuuhteluun, jossa komponentit joudutaan pesemään yksitellen. [7]

Loppukäyttöä simuloimalla epäpuhtaushiukkaset pyritään irrottamaan komponentin loppukäytön kaltaisilla paine- ja virtausolosuhteilla. Epäpuhtaushiukkaset irtoavat komponentin pinnoilta voimakkaassa liikkeessä olevaan testinesteeseen, joka analysoidaan. Simuloinnin olosuhteet tuotetaan erityisellä testipenkillä, johon komponentti kytketään. Tästä syystä menetelmää kutsutaan monissa asiayhteyksissä testipenkkimenetelmäksi. Menetelmä soveltuu kaikenlaisille komponenteille, jotka on mahdollista kytkeä testi- penkkiin ja erityisesti komponenteille, joita ei muilla keinoin saada tutkittua. Testipenkin irrotusmenetelmä ja irrotuksen parametrit pitävät olla verifioidut toimiviksi ja tehokkaiksi eikä testipenkki itsessään saa omalla puhtaustasollaan vaikuttaa tutkimuksen tuloksiin. [8]

Gravimetrisellä analyysillä selvitetään komponentista testinesteeseen irronneiden epäpuhtaushiukkasten kokonaismassa. Irrotusmenetelmänä voidaan käyttää mitä tahansa edellä mainittua irrotusmenetelmää. Kaikki käytetty testineste suodatetaan kalvosuodatimen läpi, jolloin epäpuhtaudet jäävät siihen. Kalvosuodatin punnitaan ennen ja jälkeen suodatuksen, jolloin massojen erotuksesta saadaan epäpuhtauksien kokonaismassa. [9]

Mikroskoopilla tehtävällä analyysillä pyritään selvittämään epäpuhtaushiukkasten lukumäärä ja kokojakauma. Gravimetrisessä analyysissä ja myös mikroskoopilla tehtävissä analyysissä kaikki testineste suodatetaan kalvosuodattimella, joka sitten analysoidaan mikroskoopilla. Analyysi voidaan toteuttaa joko manuaalisesti tai automaattisesti riippuen käytössä olevan mikroskooppilaitteiston ominaisuuksista. Hiukkasen kokoa mitattaessa hiukkasen pituutena ilmoitetaan hiukkasen pisin dimensio. [10] Mikroskoopilla tehtävä lukumäärän ja kokojakauman analyysi käsitellään tarkemmin luvussa 2.2.5.

Mikroskoopilla voidaan selvittää kalvosuodattimelle suodatetusta näytteestä hiukkasten lukumäärän ja kokojakauman lisäksi myös hiukkasten tyyppi eli kemiallinen koostumus. Tämä vaatii luonnollisesti analyysiin kykenevän mikroskooppilaitteiston. [11]

Epäpuhtaushiukkasten lukumäärä ja kokojakauma voidaan analysoida myös valonpeittoon perustuvalla automaattisella hiukkaslaskurilla eli APC:llä (Automatic Particle Counter). Testineste saatetaan virtaamaan läpi APC:stä, joka mittaa ja laskee jokaisen läpivirranneen hiukkasen projektiopinta-alan ja jaottelee hiukkaset kokoluokkiin. Laskuri mittaa hiukkasten projektiopinta-alaa ja ilmoittaa hiukkasen kooksi pinta-alaa vastaavan ympyrän halkaisijan. Näin ollen APC:llä ja mikroskoopilla saatuja mittaustuloksia ei voida suoraan vertailla keskenään. [12]

Standardisarjan viimeisessä osassa määritellään säännöt ja käytännöt mitattujen tulosten esittämiseksi. Osassa 10 määritellään myös koodaussysteemi (CCC-koodi) komponenttipuhtauden ilmoittamiselle. Koodauksella pyritään helpottamaan tiedon käsittelyä ja

raportointia. [13] Komponenttipuhtauden ilmoitustavat käsitellään tarkemmin luvussa 2.2.6.

2.2.1 Testijärjestelmän nollapuhtauskoe

Komponentista irrotettujen epäpuhtaushiukkasten lisäksi puhtaustutkimuksen tuloksissa näkyy aina myös testiympäristöstä tulleita hiukkasia. Tästä syystä testiympäristön puhtaustaso pitää olla tiedossa ja sen pitää olla riittävä suhteessa tutkittavan komponentin puhtaustasoon. Nollapuhtauskokeella vahvistetaan, ettei testijärjestelmän ja testausympäristön puhtaustaso vaikuta merkittävästi tutkittavan komponentin puhtaustutkimuksen tuloksiin. Nollapuhtauskoe suoritetaan peruseriaatteiltaan aina samalla tavalla ja sitä koskevat samat määritelmät riippumatta siitä, mitä ISO 16232 -standardin irrotusmenetelmää käytetään [3; 4; 6-8].

Nollapuhtauskoe suoritetaan samoissa olosuhteissa kuin tutkittavan komponentin testaus, mutta ilman komponenttia. Merkittävimmät nollapuhtausason epäpuhtauslähteet ovat:

- Ympäristö (ilma, testaaja, työalue, jne.)
- Testineste
- Testinesteen kanssa tekemisissä olevat pinnat lukuun ottamatta testattavaa komponenttia (pullot, säiliöt, jne.)
- Kalvosuodatin tai automaattinen hiukkaslaskin (APC) ja näihin liittyvät välineet
- Testinestenyönteiden käsittely niiden valmistelun ja analysoinnin aikana

Nollapuhtauskokeen tulos koostuu näiden tekijöiden yhdistelmästä. Hyväksyttävä nollapuhtausaso riippuu testattavan komponentin oletetusta tai mitatusta puhtaustasosta sekä analysointimenetelmästä.

Analysoitaessa komponentin epäpuhtaushiukkasten lukumäärää ja kokojakaumaa, hyväksytyyn nollapuhtausnäytteen pitää täyttää kaksi vaatimusta: Hiukkasten lukumäärän pitää olla alle 10 % komponentin oletetusta tai mitatusta hiukkasmäärästä kussakin hiukkaskokoluokassa ja suurin hiukkanen saa kuulua maksimissaan kokoluokkaan, joka on yhtä luokkaa alempana kuin oletetun tai komponentista mitatun suurimman hiukkasen puolikkaan kokoluokka. Esimerkiksi jos testattavalle komponentille on määritelty suurimmaksi hiukkaskooksi $x = 350 \mu\text{m}$, saa nollapuhtausnäytteessä olla maksimissaan kokoluokan F ($100 \mu\text{m} \leq x < 150 \mu\text{m}$) hiukkasia, koska

$$x = 350 \mu\text{m} \rightarrow \frac{350 \mu\text{m}}{2} = 175 \mu\text{m}$$

ja $175 \mu\text{m}$ hiukkanen kuuluu kokoluokkaan G ($150 \mu\text{m} \leq x < 200 \mu\text{m}$). Yksi kokoluokka G-luokkaa alempana on F-luokka. Tällöin suurimman nollapuhtausnäytteestä löytyvän hiukkasen koon pitää olla pienempi kuin $150 \mu\text{m}$. Standardissa on ilmoitettu kyseiselle esimerkitapaukselle virheellisesti suurimman sallitun hiukkasen kooksi $<100 \mu\text{m}$. Vir-

heellinen esimerkki toistuu standardin osissa 2 – 5. Gravimetrinen analyysi edellyttää, että nollapuhtaus on 10 % tai alle tutkittavan komponentin oletetusta tai mitatusta gravimetrisesta puhtaustasosta. ISO 16232 - 10 mukaiset hiukkasten kokoluokat on esitetty luvussa 2.2.6.

Jos tutkittavan komponentin puhtaustasolle ei ole oletusta tai mitattua arvoa, voidaan nollapuhtaustason hyväksyttäviksi arvoiksi määritellä seuraavat:

1. $\geq 5 \mu\text{m}$ hiukkasia maksimissaan 4000 kappaletta / 100 ml testinestettä
2. $\geq 15 \mu\text{m}$ hiukkasia maksimissaan 500 kappaletta / 100 ml testinestettä
3. suurin sallittu hiukkanen: 50 μm

Jos 10 %:n raja gravimetrinen analyysin tai hiukkaslukumäärien yhteydessä ylittyy, voidaan tutkittavien komponenttien lukumäärää kasvattaa. Näin saadaan tutkittavista komponenteista kerättyjen hiukkasten lukumäärää kasvatettua ja 10 %:n rajan sallimaa absoluuttista hiukasmäärää nostettua. Mikäli nollapuhtauden arvo jatkuvasti huonontuu, pitää epäpuhtauslähde paikallistaa ja poistaa, jotta jatkossa voidaan saada luotettavia mittaustuloksia.

2.2.2 Testiprosessin yleiset varusteet

Tässä luvussa esitellyt kohdat pätevät jokaiselle neljälle ISO 16232 -standardin irrotusmenetelmälle [4; 6-8].

Tutkimuksessa käytettävät työvälineet eivät saa vaikuttaa tutkimuksen tulokseen. Tutkittavasta komponentista irrotettujen epäpuhtaushiukkasten lukumäärän kokojakauman pitää pysyä muuttumattomana. Ideaalilanteessa kaikki tutkimuksessa löytyneet hiukkaset ovat peräisin ainoastaan tutkittavasta komponentista. Tästä syystä kaikkien tutkimuksessa käytettävien työvälineiden sekä testikaluston niiden osien, jotka ovat tekemisissä komponentin, testinesteen tai kalvosuodattimen kanssa pitää täyttää nollapuhtausvaatimukset.

Irrotusprosessiin käytetyn testinesteen pitää olla yhteensopiva kaikkien komponentissa käytettyjen materiaalien, komponentin lopullisen järjestelmän sekä testityökalujen ja -järjestelmien kanssa. Testinesteellä pitää olla alhainen viskositeetti ($\leq 5 \text{ mm}^2/\text{s}$) ja olisi suositeltavaa, että se kykenisi liuottamaan öljyjä ja rasvaa. Luonnollisesti myös testinesteen pitää täyttää nollapuhtausvaatimukset.

Tutkittavan komponentin kuljettamiseen ja liikutteluun tulisi käyttää sille erityisesti tarkoitettua, nollapuhtausvaatimukset täyttävää, suljettavaa kuljetuslaatikkoa. Kuljetuslaatikko estää ympäristöstä johtuvia epäpuhtauksia pääsemästä tutkimustuloksiin. Kuljetuslaatikon tulisi olla samaa kokoluokkaa testattavan komponentin kanssa ja myötäillä komponentin muotoja. Laatikon materiaalin pitää olla yhteensopiva käytettävän testinesteen kanssa.

Testausympäristön puhtaus pitää ottaa myös huomioon. Tilan, jossa irrotusprosessi suoritetaan, pitää olla puhtaustasoltaan riittävä suhteessa testattavan komponentin oletettuun puhtaustasoon. Testiympäristön soveltuvuus kulloisellekin testille nähdään nollapuhtausnäytteestä. Nollapuhtausnäytteen ollessa hyväksyttävällä tasolla voidaan olla varmoja myös siitä, että testiympäristön puhtaustaso on riittävä.

2.2.3 Hiukkasten irrotus painehuuhtelulla

Tässä luvussa käsitellään ISO 16232 – 3 mukainen hiukkasten irrotus painehuuhtelulla [6]. Painehuuhtelu on epäpuhtaushiukkasten irrotusmenetelmä, jossa hiukkaset irrotetaan komponentin kontrollipinnoilta testinesteeseen suihkuttamalla komponenttia paineistetulla testinestesuihkulla. Huuhtelun tehokkuuteen vaikuttavat ainakin seuraavat asiat:

- Testinestesuihkun paine ja tilavuusvirta
- Huuhtelun etäisyys ja huuhtelukulma
- Suuttimen koko ja muoto
- Huuhtelun suorittamistapa
- Tutkittavien komponenttien käsittelytapa
- Huuhteluun käytetty aika ja testinesteen määrä

Huuhteluun käytetty testineste kerätään talteen ja analysoidaan. Painehuuhtelu sopii irrotusmenetelmäksi erityisesti komponenteille, joiden kontrollipinnoille pääsee painesuihkulla helposti käsiksi.

Painehuuhteluprosessin alkuvalmistelut

Tutkimusprosessi alkaa tutkittavien komponenttien kuljettamisesta niiden valmistus- tai varastointipaikasta tutkimuslaboratorioon. Komponenttien käsittely, varastointi ja liikuttelu tutkimusprosessin aikana eivät saa aiheuttaa muutoksia komponentin kontrollipintojen puhtaustasoon ennen irrotusprosessin aloittamista. Kontrollipinnoille ei saa päästä lisää epäpuhtauksia, eivätkä kontrollipinnat saa myöskään päästä puhdistumaan. Esimerkiksi avoimet liitännät olisi hyvä tulpata kuljetuksen ajaksi.

Tutkittavien komponenttien lukumäärä määritellään sellaiseksi, että nollapuhtausnäytteelle asetetut vaatimukset täyttyvät. Mitä korkeampi puhtaustaso tutkittavalla komponentilla on, sitä useampi komponentti joudutaan testiin sisällyttämään, jotta nollapuhtausnäytteelle sallittu 10 %:n raja ei ylity. Komponenttien lukumäärän kasvattaminen lisää irrotettujen hiukkasten määrää ja sallii näin suuremman määrän hiukkasia nollapuhtausnäytteeseen.

Komponentille määritellään kontrollipinnat, joilta epäpuhtaudet irrotetaan. Tutkimuksen tuloksien ilmoittamisen muodosta riippuen, kontrollipinta-alalle tai -tilavuudelle pitää määrittää ja laskea myös numeroarvot. Painehuuhtelun suorittamisen parametreille mää-

ritellään sopivat arvot ja suunnitellaan pesutapahtuman kulku. Kaikki tehdyt valinnat ja määrittelyt kirjataan tutkimusdokumenttiin.

Testissä käytettävät työvälaineet ja testijärjestelmä pestään huolellisesti. Pesun jälkeen järjestelmälle tehdään nollapuhtauskoe. Nollapuhtauskokeen tulokset analysoidaan ja niiden tulee täyttää nollapuhtauskokeelle asetetut vaatimukset. Komponentin painehuuhtelu voidaan aloittaa vasta hyväksytyin nollapuhtausnäytteen jälkeen.

Viimeiseksi valmistellaan testattava komponentti testiä varten. Komponentin kontrolloimattomat pinnat, joita ei sisällytetä tutkimuksen tuloksiin, pestään huolellisesti ennen painehuuhtelua. Kontrolloimattomien pintojen peseminen pitää suorittaa jollain muulla kuin painehuuhteluun käytettävällä testilaitteistolla, jotta pestyt hiukkaset eivät päädy komponentin testituloksiin. Kuljetusta varten asennetut tulppaukset ja suojat poistetaan ja komponentin sisällä mahdollisesti oleva neste kerätään talteen ja sisällytetään tutkimuksen tuloksiin. Vaikeasti puhdistettavat komponentit voidaan tarvittaessa purkaa varoen osiin painehuuhtelua varten.

Painehuuhteluprosessi

Tutkittava komponentti asetetaan puhtaan painehuuhtelujärjestelmän keräyslaitteiston ylle. Raskaiden komponenttien siirtelyyn tulee käyttää sopivia apuvälaineitä kuten nostokehikkoa, kantoliinoja ja väkipyöriä. Komponentin tulee olla sellaisessa asennossa, että testineste pääsee vapaasti virtaamaan komponentista ulos ja keräyslaitteistoon. Vaikeasti tyhjennettävien komponenttien kohdalla voidaan testinesteen keräämiseen käyttää vakuumikeräysjärjestelmää.

Testijärjestelmälle asetetaan määritellyt painehuuhteluprosessin parametrit ja aloitetaan komponentin huuhtelu. Kontrollipinnat huudellaan huolellisesti testinestesuihkulla ennalta määritellyllä pesutavalla. Lopuksi huudellaan vielä roiskealueet keräyslaitteistosta. Huuhtelussa käytetty testineste analysoidaan tutkimusdokumenttiin määritellyllä analysointimenetelmällä. Analyysi voidaan suorittaa suoraan testilaitteistoon integroiduilla analyysivälaineillä tai testilaitteistosta erillään. Erillään tapahtuvaa analyysiä varten testineste kerätään puhtaisiin näytepulloihin. Analyysin tulos kirjataan ylös ja merkitään se näytteeksi S_1 .

Painehuuhteluprosessin tehokkuuden verifiointi

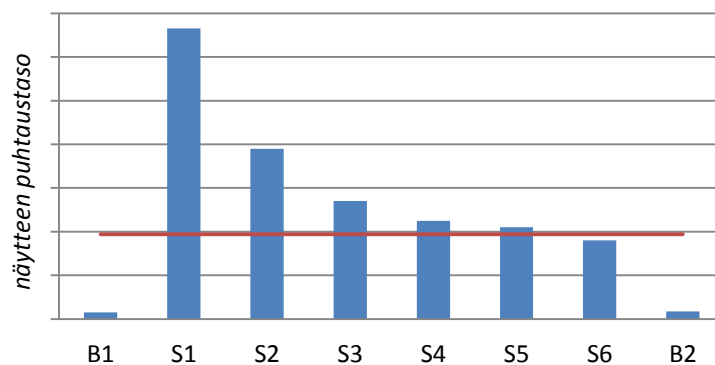
Komponentin painehuuhtelu suoritetaan ensimmäisen pesukerran jälkeen vielä kaksi kertaa. Toisen ja kolmannen huuhtelun analyysien tuloksia merkitään vastaavasti S_2 ja S_3 . Tämän jälkeen lasketaan kaikkien kolmen tuloksen (massojen tai epäpuhtaushiukkasten lukumäärien) summa $\sum S_i$. Mikäli näyte S_3 on enimmillään 10 % kokonaissummasta, on irrotusprosessi saavuttanut päätepiteensä. Mikäli 10 % vaatimus ei täyty, ei päätepiteettä ole vielä saavutettu ja painehuuhtelua pitää suorittaa vielä lisää. Huuhtelukertoja toistetaan, kunnes näyte S_n toteuttaa 10 % ehdon. Laskentakaavan yleinen muoto on esitetty yhtälössä (1).

$$S_n \leq \frac{10}{100} \sum_{i=1}^n S_i \quad (1)$$

Irrotusprosessin saavutettua päätepisteensä, pitää järjestelmälle suorittaa vielä toinen nollapuhtauskoe. Suoritettu painehuuhteluprosessi käytettyine parametreineen on verifioitu tehokkaaksi menetelmäksi kyseiselle komponentille, mikäli toisen nollapuhtausnäytteen tulos täyttää sille asetetut vaatimukset. Verifiointin jälkeen prosessia voidaan käyttää komponentin rutiinitestaukseen (Luku 2.2.4).

Mikäli vielä kuudennenkaan huuhtelukerran jälkeen irrotusprosessi ei ole saavuttanut päätepistettä, todetaan irrotusprosessi tehottomaksi. Tällöin irrotusparametreihin pitää tehdä muutoksia ja suunnitella painehuuhtelu uudelleen. Myös irrotusmenetelmän vaihto johonkin toiseen ISO 16232 määrittelemään menetelmään voi tulla kyseeseen.

Kuvassa 1 on esimerkki komponentin irrotuskäyrästä. Irrotuskäyrä kuvaa huuhteluprosessin kulkua ja kehitystä. Kuvaajassa pystyakselilla on näytteen puhtaustaso ja vaakakselilla painehuuhteluiden toistokerrat. Painehuuhteluihin on lueteltu myös alun ja lopun nollapuhtausnäytteet, joita on merkitty B_1 ja B_2 (Blank). Kuvaajaan on merkitty punaisella vaakaviivalla kaikista kuudesta näytteestä ($S_1 - S_6$) laskettu irrotusprosessin päätepisteen 10 %:n raja.



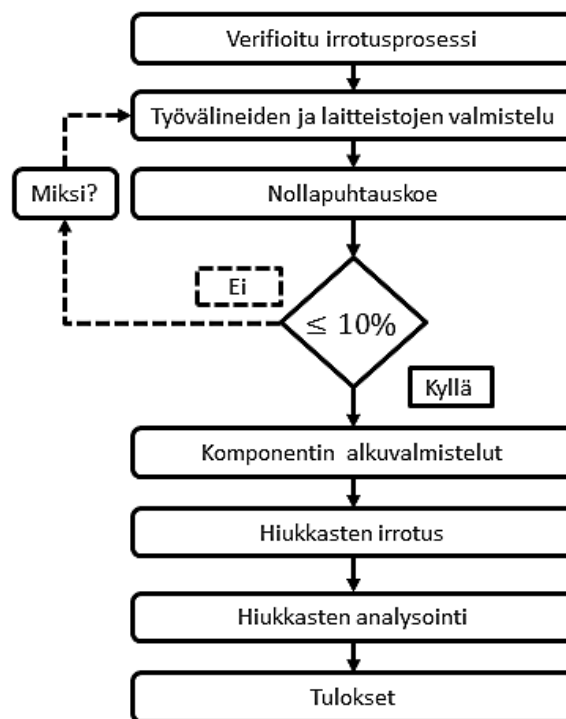
Kuva 1. Esimerkki komponentin irrotuskäyrästä mukailien ISO 16232 irrotuskäyrän esimerkkiä. [4; 6-8]

Kuvaajasta nähdään, että näytteiden sisältämät hiukkasmäärät pienenevät eli komponentin puhtaustaso paranee jokaisella huuhtelukerralla. Prosessin päätepiste on saavutettu kuudennen näytteen kohdalla ja nollapuhtausnäytteet (B_1 ja B_2) vaikuttaisivat olevan hyväksyttävällä tasolla ainakin hiukkaslukumäärien suhteen. Mikäli nollapuhtausnäytteet olisivat hyväksytyissä rajoissa myös niistä löydettyjen maksimihiukkasten suhteen, voitaisiin prosessin tehokkuus todeta verifioiduksi ja prosessia voitaisiin käyttää testatun komponentin rutiinitestaukseen.

Liitteessä A on esitetty painehuuhteluprosessin verifiointikaavio. Jokainen ISO 16232 -standardin irrotusmenetelmä noudattaa kaavion kulkua samalla tavalla. Ainoastaan hiukkasten irrotusmenetelmä muuttuu.

2.2.4 Komponentin rutiinitestaus

Komponentille verifioitua irrotusprosessia voidaan ISO 16232 -standardin mukaan käyttää samanlaisten komponenttien testaukseen [3; 4; 6-8]. Tämä tarkoittaa, että irrotusprosessi suoritetaan täsmälleen samalla tavalla kuin verifioitu prosessi. Tällaista menettelyä kutsutaan komponentin rutiinitestaukseksi. Kuvassa 2 on esitetty rutiinitestausprosessin eteneminen.



Kuva 2. Komponentin rutiinitestausprosessin kaavio. [6; 14]

Työvälineet sekä testiin käytettävät laitteistot valmistellaan normaaliin tapaan ennen nollapuhtauskokeen suorittamista. Nollapuhtauskokeen tulos analysoidaan ja sitä verrataan komponentille asetettuihin puhtausvaatimuksiin. Hyväksytyyn nollapuhtauskokeen jälkeen tutkittavat komponentit valmistellaan samoin kuin verifioidussa prosessissa. Epäpuhtaushiukkasten irrottamiseen käytetään verifioidun prosessin parametreja ja huuhtelutapaa. Myös irrotuksen toistokertojen lukumäärä pidetään samana.

Komponentin rutiinitestausprosessissa testinestenyytteitä ei tarvitse analysoida erikseen jokaisen pesukerran jälkeen. Erityisesti jos tulokset selvitetään gravimetrisellä analyysillä, testinestenyytteet voidaan analysoida kerralla. Standardin mukaan näytteiden yhdistäminen pätee myös mikroskooppianalyysille mutta käytännössä kalvosuodatin likaantuu useasta näytteestä niin likaiseksi, että hiukkasten mittaaminen ja laskeminen

tulee hyvin työlääksi ja jopa mahdottomaksi. Näytteet voidaan yhdistää myös, mikäli testataan useampaa identtistä komponenttia samanaikaisesti.

2.2.5 Hiukkasten lukumäärän ja kokojakauman analysointi mikroskoopilla

Tässä luvussa esitellään ISO 16232 mukaiset menettelyt epäpuhtaushiukkasten lukumäärän ja kokojakauman analysoimiseksi mikroskoopilla [10]. Mikroskooppianalyysiä varten testinesteeseen irrotetut hiukkaset pitää suodattaa kalvosuodattimelle. Kaikki käytetty testineste pitää suodattaa, jotta jokainen hiukkanen tulee analysoiduksi. Kalvolle jääneet hiukkaset analysoidaan käyttämällä joko valo- (LM) tai pyyhkäisyelektronimikroskooppia (SEM). Valomikroskoopit jaetaan vielä kahteen ryhmään: perus- ja stereomikroskooppeihin.

Valo- ja pyyhkäisyelektronimikroskoopilla saadut tulokset eivät ole keskenään vertailukelpoisia. Tämä johtuu mikroskooppien toimintaperiaatteiden erilaisuudesta. Valomikroskoopin toiminta perustuu hiukkasten ja kalvosuodattimen väliseen optiseen kontrasteroon. Sopiva kontrasti saadaan aikaan säätelemällä mikroskoopin valonlähteen intensiteettiä. Pyyhkäisyelektronimikroskoopin toiminta perustuu tutkittavan kohteen materiaalikontrastiin. Näyte pyyhkäistään elektronisuihkulla ja havainnointi tapahtuu takaisin sironneiden elektroneiden intensiteettien vaihteluista. Eri mikroskooppityyppien ominaisuuksia on listattu taulukkoon 5.

Taulukko 5. *Hiukkasten laskemiseen käytettyjen mikroskooppien ominaisuuksia. [3; 10]*

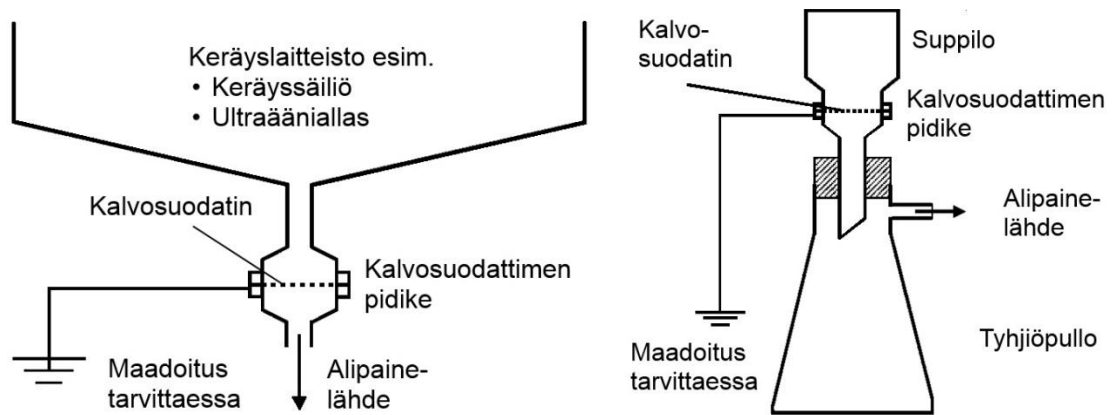
	Perusmikroskooppi	Stereomikroskooppi	SEM
Hiukkasten mittausalue	> 2 µm (riippuen linseistä)	> 25 µm	> 20 nm
Havainnointiperiaate	Kirkkauskontrasti	Kirkkauskontrasti	Materiaalikontrasti
Syvätarkkuus	Matala	Korkea	Korkea

Hiukkasten laskenta ja mittaus voidaan suorittaa manuaalisesti tai automaattisella kuvan analysointiohjelmistolla. Manuaalinen analysointi on työlästä, aikaa vievää ja virheherkkää. Tästä syystä analysointiin suositellaankin käytettäväksi automaattisia järjestelmiä.

Suodatusprosessi

Suodatusprosessi aloitetaan puhdistamalla kaikki suodatusprosessiin osallistuvat työvälineet. Työvälineiden puhtaustason tulee olla riittävä suhteessa tutkittavan komponentin puhtaustasoon, jottei suodatuskalusto merkittävästi vaikuta tutkimuksen tuloksiin. Työvälineiden mahdollinen epäpuhtaus näkyy liian likaisena nollapuhtautena.

Suodattaminen voidaan toteuttaa kahdella tavalla: suoraan irrotuslaitteistoon integroidulla suodatinkalustolla tai erillään irrotusprosessista pulloihin kerätyistä näytteistä. Kuvassa 3 on periaatekuvat molemmista menettelyistä.



Kuva 3. Vasemmalla on esitetty suodatusprosessin periaatekuva irrotuslaitteistoon integroidulla kalustolla ja oikealla irrotusprosessista erillään. [10]

Mikäli pullonäytteitä joudutaan kuljettamaan pitkiä matkoja tai varastoimaan ennen suodattamista, pitää näytteet valmistella suodattamista varten. Pitkään seisseissä näytteissä hiukkaset painuvat ja kasautuvat pullon pohjalle. Pullojen kunto sekä asianmukainen sulkeminen pitää tarkastaa, jotta voidaan varmistua, ettei näytteisiin ole päässyt epäpuhtauksia ympäristöstä. Kasaumat pitää hajottaa ja hiukkaset pitää saada uudelleen jakautumaan tasaisesti koko näytteeseen. Näytteet, joissa on kasaumia, voidaan ravistella käsin tai koneellisesti tai käyttämällä ultraäänikylpyä. Viimeiseksi ennen pullojen avaamista pitää niiden ulkopinnat vielä pestä. Irrotusjärjestelmään integroidulla suodatuksella testineste virtaa suoraan irrotusprosessista kalvosuodattimen läpi. Suodatuksen jälkeen kalvosuodatin kuivataan mikroskooppianalyysiä varten. Kuivaaminen tapahtuu näyteuunissa haihduttamalla.

Valomikroskoopit

Perusmikroskoopin kuvakenttää katsellaan yhden (monocular) tai kahden rinnakkaisen (binocular) okulaarin lävitse. Rinnakkaisuudella tarkoitetaan sitä, että molempiin okulaareihin muodostuu täsmälleen sama kuva eli, että valo kulkee molempiin täsmälleen samaa reittiä. Stereomikroskoopissa on aina kaksi okulaaria jotka katselevat kuvakenttää pienessä kulmassa toisiinsa nähden. Näin stereomikroskooppi muodostaa kuvakenttää stereokuvan, jonka katsoja näkee kolmiulotteisena.

Molemmissa valomikroskooppityypeissä okulaarit on varustettu mikrometriasteikolla manuaalista käyttöä varten. Automaattinen hiukkaslaskenta vaatii mikroskoopilta joko digitaali- tai videokameran ja yleensä myös moottoroidun näytealustan. Tällöin mikroskoopin kameralla otetaan automaattisesti yksi tai monta kuvaa näytteestä ja kuvat analysoidaan kuvan analysointiohjelmistolla.

Perusmikroskoopin suurennusaste valitaan keskenään vaihdettavien objektiivien eli linssien avulla. Käytetty linssi määrää mikroskoopin suurennukselle, resoluutiolle sekä syvätarkkuudelle arvot. Ratkaisevin arvo hiukkasten tarkalle mittaamiselle on optinen resoluutio eikä niinkään käytetyn linssin suurennos. Optinen resoluutio määräytyy mikroskoopin valonlähteen aallonpituuden sekä linssin numeerisen apertuurin funktiona.

Hiukkasten laskentaa ja mittaamista varten perusmikroskoopin linssi tulisi valita siten, että optinen resoluutio on kymmenesosan tai alle pienimmän mitattavan hiukkasen koosta. Mikäli halutaan mitata hyvin pieniä hiukkasia ($< 20 \mu\text{m}$), $1/10$ -sääntö johtaisi pitkiin mittausaikoihin johtuen korkearesoluutioisten linssien hyvin pienikokoisista kuvakentistä. Tällöin voidaan käyttää objektiivia, jonka optinen resoluutio on maksimissaan viidesosa pienimmän hiukkasen koosta. Taulukossa 6 on esimerkkejä perusmikroskoopin havainnointikyvystä eri linseillä ja suurennoksilla.

Taulukko 6. *Esimerkkejä perusmikroskoopin havainnointikyvystä eri linseillä ja suurennoksilla. [3; 10]*

Kokonais- suurennos (10x- okulaari)	Objektiivin suurennos	Objektiivin NA [-]	Optinen resoluutio [μm]	Pienin hiukkanen = 10 x resoluutio [μm]	Pienin hiukkanen = 5 x resoluutio [μm]
50x	5x	0,10	2,5	25	12,5
100x	10x	0,25	1,0	10	5
200x	20x	0,50	0,5	5	2,5
500x	50x	0,35	0,35	3,5	1,7

Stereomikroskoopeissa on yleensä vain yksi objektiivi ja suurennosta säädellään portaattomalla zoom-toiminnolla. Niillä ei saavuteta yhtä korkean tason suurennoksia tai resoluutioita kuin perusmikroskoopeilla. Muodostettu kuvakenttä on laajempi ja kuvissa on parempi syvätarkkuus. Tästä syystä stereomikroskoopit sopivat hyvin isojen hiukkasten nopeasti suoritettavaan laskentaan. Stereomikroskoopilla suositellaan mitattavaksi $25 \mu\text{m}$ ja sitä suurempia hiukkasia.

Kuva-analyysiohjelmisto

Kuva-analyysiohjelmistolla analysoidaan mikroskoopilla otetut kuvat. Ohjelmisto määrittelee tietyt alueet kuvassa hiukkasiksi ja jäljelle jääneet kalvosuodattimeksi eli taustaksi. Luokittelu tapahtuu vertailemalla kuvapisteidien kirkkauksia. Kuvapisteidien kirkkauksien skaala jaetaan yleensä 256 eri harmaan sävyyn, jotka vaihtelevat valkoisesta mustaan. Tämän jälkeen ohjelmistolle määritetään harmaasävyn kynnsarvo, jonka mukaan kuvapisteen jaetaan hiukkasiin ja taustalla olevaan kalvosuodattimeen. Sopiva kynnsarvo pitää määrittää jokaiselle tehtävälle analyysille erikseen.

Useimmiten kalvosuodattimen analyysi suoritetaan useasta otetusta kuvasta. Analyysiohjelmiston pitää yhdistää kuvat niin, ettei niiden väliin jää rakoja eivätkä kuvat

ole osittain toistensa päällä. Ohjelmiston pitää pystyä huomioimaan ja mittaamaan hiukkaset oikein myös silloin, kun jokin hiukkanen ylittää kuvan rajan ja jatkuu toisen kuvan puolelle.

Lopputuloksena saadaan tietää komponentista irrotettujen hiukkasten kokonaislukumäärä sekä jokaisen yksittäisen hiukkasen koko. Tästä tuloksesta saadaan laskettua komponentille puhtaustaso.

2.2.6 Komponentin puhtaustason ilmoitustavat

Puhtaustason ilmoitustapa määräytyy analysointitavan mukaan. Se voidaan ilmoittaa joko hiukkasten kokonaismassana, kokojakaamana, koostumuksena tai suurimman hiukkasen kokona. Riippumatta puhtaustason ilmoitustavan muodosta, ilmoitetaan se kuitenkin aina komponenttia, komponentin 1000 cm²:n kontrollipinta-alaa tai komponentin 100 cm³:n kontrollitilavuutta kohden. Mitattuja suureita voidaan myös yhdistellä ja antaa tuloksena esimerkiksi komponentista irrotettujen hiukkasten kokonaismassa ja suurimman hiukkasen koko. [13]

Erilaisten komponenttien tulokset ovat vertailukelpoisia vain, mikäli ne ovat annettu samassa yksikössä kontrollipinta-alaa tai -tilavuutta kohti. Komponenttia kohden ilmoitettuja tuloksia voidaan vertailla ainoastaan komponentille asetettuihin puhtausvaatimuksiin tai samanlaisiin komponentteihin. Seuraavassa esitellään ISO 16232 määrittelemä muoto hiukkasten lukumäärän ja kokojakauman analyysistä saatavien tulosten esittämiseksi [13].

Hiukkaset lajitellaan taulukon 7 mukaisesti kokoluokkiin. Kokoluokkia on kymmenen ja ne on nimetty nousevin aakkosin niin, että pienintä kokoluokkaa merkitään B-kirjaimella ja suurinta K-kirjaimella. Taulukosta 7 nähdään, että esimerkiksi 125 µm hiukkanen kuuluisi F-kokoluokkaan.

Taulukko 7. Hiukkasten kokoluokat ISO 16232 mukaan. [13]

Kokoluokka	Hiukkasen koko x [µm]
B	$5 \leq x < 15$
C	$15 \leq x < 25$
D	$25 \leq x < 50$
E	$50 \leq x < 100$
F	$100 \leq x < 150$
G	$150 \leq x < 200$
H	$200 \leq x < 400$
I	$400 \leq x < 600$
J	$600 \leq x < 1000$
K	$1000 \leq x$

Kokoluokan puhtaustasoa merkitään lukumäärän perusteella numeroin taulukon 8 mukaisesti. Taulukoidut hiukkasten lukumäärät on suhteutettu joko 1000 cm²:ä tai 100 cm³:ä kohden. Puhtaustasojen numerointi alkaa ”00” puhtaustasosta, joka tarkoittaa että kyseisen kokoluokan hiukkasia ei ole löydetty. Mikäli hiukkasia on löydyntynyt yksi kappale, on puhtaustaso ”0”. Tämän jälkeen puhtaustason numero nousee numerojärjestyksessä aina löydettyjen hiukkasten määrän kaksinkertaistuessa. Taulukosta 8 nähdään, että jos esimerkiksi jostakin kokoluokasta olisi löydetty 7600 hiukkasta, tulisi puhtaustasoksi 13.

Taulukko 8. Puhtaustason määräytyminen hiukkasten lukumäärän perusteella ISO 16232 mukaan. [3; 13]

Hiukkasten lukumäärä y 100 cm ³ tai 1000 cm ² kohti Alaraja < y ≤ Yläraja			Hiukkasten lukumäärä y 100 cm ³ tai 1000 cm ² kohti Alaraja < y ≤ Yläraja		
Alaraja	Yläraja	Puhtaustaso	Alaraja	Yläraja	Puhtaustaso
0	0	00	2 x 10 ³	4 x 10 ³	12
0	1	0	4 x 10 ³	8 x 10 ³	13
1	2	1	8 x 10 ³	16 x 10 ³	14
2	4	2	16 x 10 ³	32 x 10 ³	15
4	8	3	32 x 10 ³	64 x 10 ³	16
8	16	4	64 x 10 ³	130 x 10 ³	17
16	32	5	130 x 10 ³	250 x 10 ³	18
32	64	6	250 x 10 ³	500 x 10 ³	19
64	130	7	500 x 10 ³	1 x 10 ⁶	20
130	250	8	1 x 10 ⁶	2 x 10 ⁶	21
250	500	9	2 x 10 ⁶	4 x 10 ⁶	22
500	1 x 10 ³	10	4 x 10 ⁶	8 x 10 ⁶	23
1 x 10 ³	2 x 10 ³	11	8 x 10 ⁶	16 x 10 ⁶	24

Komponentin puhtaustaso ilmoitetaan komponenttipuhtaustasoksi eli CCC-koodina kokoluokkien ja puhtaustasojen avulla. Koodi muodostetaan kokoluokka ja puhtaustasopaareina, jotka järjestetään aakkosjärjestykseen ja erotellaan kauttaviivoilla. Koodi sijoitetaan sulkeiden sisään ja eteen merkitään A tai V sen mukaan, minkä suhteen tulos on annettu. Kirjain A viittaa suhdetta komponentin kontrollipinta-alaan ja V suhdetta komponentin kontrollitilavuuteen. Seuraavassa esitellään muutamia esimerkitapauksia CCC-koodauksen käytöstä. Jokaisessa esimerkissä tulos on annettu kontrollitilavuutta kohden, mutta samat periaatteet pätevät myös kontrollipinta-alan suhteen ilmoitettuihin tuloksiin.

CCC-koodi, jolla on haluttu ilmoittaa jokaisen kymmenen kokoluokan puhtaustasot näyttää seuraavalta:

$$CCC = V(B20 / C16 / D18 / E12 / F12 / G12 / H8 / I0 / J0 / K00)$$

Koodilla voidaan viitata myös vain tiettyihin kokoluokkiin. Tällöin ne kokoluokat, joista ei olla kiinnostuttu tai joita ei ole esimerkiksi mitattu, jätetään merkitsemättä. Seuraa-

vasta esimerkistä on jätetty luokat B, H, I ja K merkitsemättä. Tämä tarkoittaa, että kyseisille kokoluokille ei ollut asetettu vaatimuksia tai kokoluokista ei ollut mittausdataa.

$$CCC = V(C16 / D18 / E12 / F12 / G12 / J0)$$

Mikäli usean peräkkäisen kokoluokan puhtaustasot ovat samat, voidaan näiden merkitseminen yhdistää koodissa. Kokoluokkien kirjaimet merkitään peräkkäin yhteen ja yhteinen puhtaustaso näiden perään vain kerran. Seuraavassa esimerkissä kokoluokkien E, F ja G puhtaustaso on 12. Esimerkkiin on sovellettu myös edellisen esimerkin tapaa jättää jotain kokoluokkia merkitsemättä. Nyt koodista puuttuu kokoluokat B, I ja K.

$$CCC = V(C16 / D18 / EFG12 / H8 / J0)$$

Koodilla voidaan viitata myös peräkkäisten kokoluokkien muodostamiin yhdistelmiin. Tällöin koodiin merkataan laajan kokoalueen pienimmän ja suurimman kokoluokan kirjaimet viivalla erotettuna ja näiden perään alueen puhtaustaso. Seuraavassa esimerkissä kokoluokat G, H, I ja J ovat yhdistetty yhdeksi suureksi kokoluokaksi, jonka puhtaustaso on 20. Tämä tarkoittaa siis, että $150 \leq x < 1000 \mu\text{m}$ kokoluokan hiukkasia löytyi 500 001 – 1 000 000 kappaletta suhteutettuna 100 cm^3 :n kontrollitilavuuteen. Kyseistä merkintää ei pidä sotkea edellisen esimerkin tyyliin yhdistää kokoluokkien merkinnät, joilla on sama puhtaustaso.

$$CCC = V(C16 / D18 / EF12 / G-J20)$$

Komponentin puhtaustaso voidaan ilmaista CCC-koodilla myös komponenttia kohden. Tällöin puhtaustasoa ei koodata taulukon 8 puhtaustasoilla, vaan puhtaustaso ilmaistaan suoraan löytyneiden hiukkasten lukumääränä:

$$CCC = N(B585600/C58200/D180500/E3600/F2800/G2900/H190/I4/J0)$$

Esimerkissä B-luokan hiukkasia on löytynyt 585 600 kappaletta, C-luokan hiukkasia 58 200 kappaletta ja niin edelleen. Komponenttia kohden ilmoitetuissa tuloksissa hiukkasten kokoluokkien merkitsemiseen pätevät samat periaatteet, kuin edellä luetelluissa esimerkkitapauksissa.

2.3 Hydraulinesteiden puhtausluokitus

Tässä luvussa esitellään kaksi öljynpuhtausta käsittelevää standardia: ISO 4406 [15] sekä SAE AS4059E [16]. Öljynpuhtaustaso sekä komponenttipuhtaustaso ovat hyvin läheisesti kytköksissä toisiinsa, mutta ne ovat pohjimmiltaan täysin eri asioita. Tarkasteltavien hiukkaskokojen osalta komponenttipuhtaudessa ollaan ensisijaisesti kiinnostuneita huomattavasti suuremmista hiukkasista kuin öljynpuhtaudessa. Öljynpuhtaustasot esitellään tässä työssä lähinnä vertailun vuoksi ja selvittämään eroja komponenttipuhtauteen nähden.

2.3.1 ISO 4406:1999

ISO 4406 Hydraulic fluid power - Fluids -

Method for coding the level of contamination by solid particles

(suom. Hydrauliteknikka - Nesteet - Hydraulinesteen puhtausluokitus)

Tässä luvussa esitellään hydraulinesteiden puhtausluokituksia koskeva standardi ISO 4406 [15]. Se julkaistiin ensimmäisen kerran vuonna 1987. Standardi kumottiin ja korvattiin uudella tarkistetulla versiolla vuonna 1999, jolloin kumotun version tapa ilmoittaa nesteen puhtaustaso kahdella kokoluokalla muuttui kolmeen kokoluokkaan perustavaksi. Standardissa ohjeistetaan, miten hydraulinesteestä automaattisella hiukkaslaskurilla (APC) laskettujen kiinteiden hiukkasten lukumäärä voidaan ilmoittaa puhtauskoodilla. Standardin esittämällä koodauksella halutaan yksinkertaistaa hiukkaslaskurien tulosten esittämistä. Suurten hiukkaslukumäärien sijaan, esitetään tiettyä öljytilavuutta kohti mitattujen hiukkasten lukumäärät puhtaustasoiksi muutettuna.

Alkuperäisessä (ISO 4406:1987) painoksessa puhtausluokat ilmoitettiin kahdelle kokoluokalle: $\geq 5 \mu\text{m}$ ja $\geq 15 \mu\text{m}$. Uusimmassa painoksessa (ISO 4406:1999) kokoluokat ovat $\geq 4 \mu\text{m(c)}$, $\geq 6 \mu\text{m(c)}$ ja $\geq 14 \mu\text{m(c)}$. Mittayksikkö $\mu\text{m(c)}$ korostaa, että mittaus on suoritettu ISO 11171:1999 mukaan kalibroidulla hiukkaslaskurilla.

Puhtaustasojen määräytyminen hiukkaslukumäärien perusteella on esitetty taulukossa 9. Kahden peräkkäisen puhtaustason hiukkaslukumäärien ero on aina noin kaksinkertainen. Puhtaustasot on määrätty siten, että tasojen lukumäärä pysyy kohtuullisena ja tason muutos yhdellä suuntaan tai toiseen on merkityksellinen. Hiukkaslukumäärät ilmoitetaan yhden millilitran nestetilavuutta kohti. Puhtaustasot kulkevat nolasta 28:aan siten, että suuri luku puhtaustasossa merkitsee suurta määrää laskettuja hiukkasia. Puhtaustasolla 0 millilitrasta nestettä saa löytyä enimmillään 0,01 hiukkasta eli sallitaan yksi hiukkanen 100 ml kohti. Asteikon likaisin puhtaustaso on 28, jossa saa olla enimmillään 2 500 000 hiukkasta. Tämän puhtaustason ylittävät hiukasmäärät merkitään >28 merkinnällä.

Taulukko 9. Puhtaustason määräytyminen hiukkasten lukumäärän perusteella ISO 4406:1999 mukaan. [15]

Hiukkasten lukumäärä y millilitraa kohti			Hiukkasten lukumäärä y millilitraa kohti		
Alaraja < y ≤ Yläraja			Alaraja < y ≤ Yläraja		
Alaraja	Yläraja	Puhtaustaso	Alaraja	Yläraja	Puhtaustaso
2 500 000		> 28	80	160	14
1 300 000	2 500 000	28	40	80	13
640 000	1 300 000	27	20	40	12
320 000	640 000	26	10	20	11
160 000	320 000	25	5	10	10
80 000	160 000	24	2,5	5	9
40 000	80 000	23	1,3	2,5	8
20 000	40 000	22	0,64	1,3	7
10 000	20 000	21	0,32	0,64	6
5 000	10 000	20	0,16	0,32	5
2 500	5 000	19	0,08	0,16	4
1 300	2 500	18	0,04	0,08	3
640	1 300	17	0,02	0,04	2
320	640	16	0,01	0,02	1
160	320	15	0,00	0,01	0

Puhtauskoodi koostetaan kirjoittamalla jokaisen kokoluokan puhtaustaso peräkkäin kauttaviivoilla erotettuna. Öljyn puhtaus voidaan ilmoittaa esimerkiksi seuraavasti: 22/18/13. Tämä tarkoittaa, että kyseisestä öljystä on mitattu 20 001 – 40 000 kappaletta 4 µm(c) tai suurempia hiukkasia, 1301 – 2500 kappaletta 6 µm(c) tai suurempia hiukkasia ja 41 – 80 kappaletta 14 µm(c) tai suurempia hiukkasia yhtä millilitraa kohti. Mikäli jossakin kokoluokassa olisi niin paljon hiukkasia, ettei hiukkaslaskuri pystyisi antamaan tulosta, merkittäisiin kokoluokkaa ”*” merkillä (esim. */19/14). Mikäli taas jollakin kokoluokalla ei olisi puhtausvaatimusta, merkittäisiin sitä ”-” merkinnällä (esim. -/19/14).

2.3.2 SAE AS4059E

SAE AS4059 Rev E Aerospace fluid power -

Cleanliness Classification for Hydraulic Fluids

(suom. Ilmailun hydrauliteknikka - Hydraulinesteen puhtausluokitus)

SAE (Society of Automotive Engineers) on yhdysvaltalainen standardisointijärjestö. Nimensä mukaisesti SAE oli alun alkaen keskittynyt ainoastaan autoalaan, mutta nykyisellään SAE on laajentanut toimintansa ulottumaan myös ilmailuun ja hyötyajoneuvoihin. Tässä luvussa esitellään SAE AS4059E standardin mukaiset määritelmät hydraulinesteen puhtausluokitukselle [16].

Peruseriaatteeltaan SAE AS4059E on hyvin samanlainen kuin edellä esitelty ISO 4406. Molemmissa lasketaan hiukkaslukumääriä tietyissä kokoluokissa ja lukumäärien

perusteella koodataan puhtaudelle lukuarvo. Merkittävin ero standardeissa on kokoluokkien jaossa. Kumulatiivisesti määritellyjä kokoluokkia on ISO 4406 standardissa kolme kappaletta, kun taas SAE AS4059E standardissa niitä on kuusi.

Taulukossa 10 on esitetty SAE AS4059E standardin puhtausluokkien määrittelyt differentiaalisille hiukkaskokoluokille. Kokoluokat määräytyvät käytetyn APC:n tai mikroskoopin kalibroinnin mukaan. Taulukon ylempiä kokoluokkia (5 - 15 μm , 15 - 25 μm , 25 - 50 μm ...) käytetään, kun APC on kalibroitu ISO 4402:1991 mukaan tai jos hiukkaset on mitattu optisella mikroskoopilla ARP 598 mukaan. Alempia kokoluokkia (6 - 14 $\mu\text{m(c)}$, 14 - 21 $\mu\text{m(c)}$, 21 - 38 $\mu\text{m(c)}$...) käytetään silloin, kun APC on kalibroitu ISO 11171 mukaan tai jos hiukkaset on mitattu elektronimikroskoopilla. Puhtausluokkia on 14 kappaletta alkaen puhtaimmasta 00-luokasta ja päättyen likaisimpaan 12-luokkaan. Taulukon arvot kertovat suurimman sallitun hiukkaslukumäärän jokaisessa puhtausluokassa kullekin kokoluokalle. Hiukkasmäärät ovat ilmoitettu 100 ml öljytilavuutta kohti. Jos esimerkiksi 21 - 38 $\mu\text{m(c)}$ kokoluokan kuuluvia hiukkasia laskettaisiin 6000 kappaletta, tarkoittaisi se puhtausluokkaa 10. Öljynäytettä analysoidessa lasketaan kaikki hiukkaset jokaisessa kokoluokassa. Näytteen tulokseksi annetaan suurin puhtausluokka eli suhteessa likaisimman kokoluokan puhtausluokka. Differentiaaliset kokoluokat ovat yhteneväiset käytöstä jo poistetun NAS 1638 öljynpuhtausstandardin kanssa.

Taulukko 10. SAE AS4059E puhtausluokkien määrittely hiukkasten lukumäärään perustuen differentiaalisille kokoluokille 100 ml öljytilavuutta kohti. [16]

Luokka	(1)	5 – 15 μm	15 – 25 μm	25 – 50 μm	50 - 100 μm	> 100 μm
	(2)	6 – 14 $\mu\text{m(c)}$	14 - 21 $\mu\text{m(c)}$	21 – 38 $\mu\text{m(c)}$	38 – 70 $\mu\text{m(c)}$	> 70 $\mu\text{m(c)}$
00		125	22	4	1	0
0		250	44	8	2	0
1		500	89	16	3	1
2		1 000	178	32	6	1
3		2 000	356	63	11	2
4		4 000	712	126	22	4
5		8 000	1 425	253	45	8
6		16 000	2 850	506	90	16
7		32 000	5 700	1 012	180	32
8		64 000	11 400	2 025	360	64
9		128 000	22 800	4 050	720	128
10		256 000	45 600	8 100	1 440	256
11		512 000	91 200	16 200	2 880	512
12		1 024 000	182 400	32 400	5 760	1 024

(1) Kokoluokat mitattuna ISO 4402:1991 mukaan kalibroidulla APC:llä tai optisella mikroskoopilla ARP598 mukaan

(2) Kokoluokat mitattuna ISO 11171 mukaan kalibroidulla APC:llä tai elektroni mikroskoopilla, jonka mittaus perustuu projektiopinta-alaa vastaavaan ympyrähalkaisijaan

Taulukossa 11 on esitetty puhtausluokkien määrittelyt kumulatiivisille kokoluokille. Kokoluokkien rajat määräytyvät käytetyn APC:n tai mikroskoopin kalibroinnin mukaan

samoin, kuin edellä differentiaalisten kokoluokkien kohdalla. Lisäksi kokoluokat ovat nimetty A:sta F:ään alkaen pienimmästä kokoluokasta ($> 1 \mu\text{m}$ tai $> 4 \mu\text{m(c)}$). Kumulaatiivisesti määritellyillä kokoluokilla tiettyyn kokoluokkaan sisältyvät aina kaikki sitä suurempien kokoluokkien hiukkaset. Tästä syystä pienten kokoluokkien puhtausluokille sallitut hiukkasmäärät ovat isommat ja lisäksi puhtausluokkiin on lisätty vielä 000-luokka. Myös kumulaatiivisesti määritellyt puhtausastot ilmoitetaan 100 ml öljytilavuutta kohti.

Taulukko 11. SAE AS4059E puhtausluokkien määrittely hiukkasten lukumäärään perustuen kumulaatiivisille kokoluokille 100 ml öljytilavuutta kohti. [16]

Luokka	(1)	$> 1 \mu\text{m}$	$> 5 \mu\text{m}$	$> 15 \mu\text{m}$	$> 25 \mu\text{m}$	$> 50 \mu\text{m}$	$> 100 \mu\text{m}$
	(2)	$> 4 \mu\text{m(c)}$	$> 6 \mu\text{m(c)}$	$> 14 \mu\text{m(c)}$	$> 21 \mu\text{m(c)}$	$> 38 \mu\text{m(c)}$	$> 70 \mu\text{m(c)}$
		A	B	C	D	E	F
000		195	76	14	3	1	0
00		390	152	27	5	1	0
0		780	304	54	10	2	0
1		1 560	609	109	20	4	1
2		3 120	1 217	217	39	7	1
3		6 250	2 432	432	76	13	2
4		12 500	4 864	864	152	26	4
5		25 000	9 731	1 731	306	53	8
6		50 000	19 462	3 462	612	106	16
7		100 000	38 924	6 924	1 224	212	32
8		200 000	77 849	13 849	2 449	424	64
9		400 000	155 698	27 698	4 898	848	128
10		800 000	311 396	55 396	9 796	1 696	256
11		1 600 000	622 792	110 792	19 592	3 392	512
12		3 200 000	1 245 584	221 584	39 184	6 784	1 024

(1) Kokoluokat mitattuna ISO 4402:1991 mukaan kalibroidulla APC:llä tai optisella mikroskoopilla ARP598 mukaan

(2) Kokoluokat mitattuna ISO 11171 mukaan kalibroidulla APC:llä tai elektronimikroskoopilla, jonka mittaus perustuu projektiopinta-alaa vastaavaan ympyrähalkaisijaan

Mittauksen tulos tai vastaavasti öljyn puhtaudelle asetettu vaatimus voidaan ilmoittaa kolmella eri tavalla. Puhtausastoksi voidaan määrätä suurimman eli likaisimman puhtausastason arvo, joka koskee useaa kokoluokkaa (esim. AS4059 Class 6B-F). Merkinnällä tarkoitetaan, että kokoluokissa B:stä F:ään yksikään puhtausluokka ei saa ylittää arvoa 6. Toinen tapa ilmoittaa puhtausasto on määrätä tiettyä kokoluokkaa suurempien hiukkasten puhtausluokka (esim. AS4059 Class 5B). Merkintä tarkoittaa, että 100 ml:ssa saa olla maksimissaan 9731 kappaletta B-luokkaa suurempia hiukkasia. Kolmas tapa on ilmoittaa jokaisen mitatun kokoluokan puhtausastot erikseen (esim. 7B/6C/5D).

3. KOMPONENTTIPUHTAUDEN MITTAUS

Tässä luvussa esitellään Tampereen teknillisen yliopiston hydrauliiikan ja automatiikan laitoksen (IHA) komponenttipuhtauslaboratoriota sekä sen laitteistoa ja käydään läpi painehuuhteluprosessin työskentelyrutiinit. Tutkimukset suoritetaan laboratoriossa ISO 16232 -standardin mukaisesti. Laboratoriossa voidaan käyttää mitä tahansa standardin määrittelemistä neljästä epäpuhtauksien irrotusmenetelmästä: ravistelu, painehuuhtelu, ultraäänipesu sekä loppukäytönsimulointi. Ainoastaan koneellinen ravistelu ei toistaiseksi onnistu laboratoriossa. Käytettävä irrotusmenetelmä määräytyy komponentin ominaisuuksien mukaan.

Luvussa 3.2 on kuvattu painehuuhteluprosessin työskentelyrutiinit mahdollisimman tarkasti käytännön tasolla. Tämä kuvaus toimii lähtötasona mittausprosessin kehittämiseksi luvussa 4. Työskentelyrutiinien kehittämiseksi pyritään parantamaan mittaustarkkuutta, tunnistamaan ja minimoimaan virhelähteitä ja tehostamaan mittaustyöskentelyä.

3.1 TTY/IHA Komponenttipuhtauslaboratorio ja sen välineistö

Komponenttipuhtauslaboratorio perustettiin vuonna 2011 osana KompuNw-projektia hydrauliiikan komponenttien puhtaustutkimuksia varten. Projektin tarkoituksena oli kehittää menetelmät Suomessa valmistettavien hydraulikomponenttien teknisen puhtauden mittaamiselle ISO 16232 mukaan sekä parantaa näiden puhtaustasoa hydraulikkavalmistajien globaalin kilpailukykyyn parantamiseksi. Laboratorion varustelu sekä koemittaukset tehtiin diplomityönä hydrauliiikan laitokselle. [3]

Komponenttipuhtauslaboratorio sijaitsee nykyisellään Tampereen teknillisen yliopiston kampuksella Konetalossa. Tilat ovat välittömästi lastauslaiturin takana mikä helpottaa tutkittavien komponenttien laboratorioon kuljettamista. Laboratoriotila on jaettu kahteen huoneeseen, varsinaiseen tutkimustilaan sekä varastohuoneeseen. Tutkimustila on ylipaineistettu, puolipuhdas tila, jonka tuloilma suodatetaan. Ratkaisu on riittävä minimoimaan tutkimustilan ilman vaikutukset tehtävään komponenttitutkimukseen. Tutkimustila on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. TTY/IHA Komponenttipuhtauslaboratorion tutkimustila.

Tutkimustilan tärkeimmät varusteet ovat kaksi puhtaustestikaappia, ultraäänipesukone, näyteuuni sekä mikroskooppilaitteisto. Loppukäytön simulointiin rakennettu testipenkki on sijoitettu varastohuoneeseen. Testipenkkijärjestelmä on täysin suljettu, joten se ei vaadi erityisen puhdasta tilaa ympärilleen. Testipenkin kalvosuodattimet analysoidaan tutkimustilan puolella.

3.1.1 Puhtaustestikaapit

Puhtaustestikaappeja käytetään hiukkasten irrottamiseen ISO 16232 standardin [6] mukaisella painehuuhtelumenetelmällä. Menetelmässä epäpuhtaushiukkaset irrotetaan tutkittavan komponentin kontrollipinnoilta huuhtelemalla niitä paineistetulla testinestesuihkulla. Testinesteeseen irronneet hiukkaset suodatetaan kalvosuodattimelle, joka kuivaamisen jälkeen analysoidaan joko gravimetrisesti tai mikroskoopilla. Menetelmä sopii komponenteille, joiden tutkittavia kontrollipintoja päästään testinestesuihkulla helposti pesemään.

Komponenttipuhtauslaboratoriossa on kaksi kaupallista puhtaustestikaappia: Pall PCC-41 sekä Hydac CTU-1230. Pall Ltd ja Hydac GmbH lainasivat kaapit KompuNw-projektille [17], jotka sittemmin projektin päätyttyä hankittiin pysyvästi hydraulikan laitokselle. Hydacin puhtaustestikaapissa on painehuuhtelun lisäksi ultraäänipesumahdollisuus. Molemmat puhtaustestikaapit on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. TTY/IHA Komponenttipuhtauslaboratorion puhtaustestikaapit. Vasemmal-
la Pall PCC-41 ja oikealla Hydac CTU-1230.

Molemmat kaapit toimivat peruseriaatteeltaan samalla tavalla. Kaapeissa on omat puhdistilansa, jossa komponentin painehuuhtelu suoritetaan. Näin saadaan mahdolliset, tutkimustilan ilman epäpuhtauksista johtuvat, virheelliset hiukkaset eristettyä tutkimuksen tuloksista. CTU-1230:n puhdistila on kannella suljettu ja PCC-41:n toteutettu tehokkaalla ilmastoinnilla. PCC-41 ottaa puhdistilassa käytettävän ilman ympäristöstään ja suodattaa sen tehokkaasti. Puhdistilaan puhalletaan suodatettua ilmaa ja sitä imetään poistotuulettimella puhdistilan etuosassa sijaitsevan ritilän läpi. Kun PCC-41:tä ei käytetä, puhdistila suljetaan muovisella kannella. Tehokas ilmastointi ja eristetty pesutila ovat tarpeen myös työturvallisuuden kannalta. Testinesteenä käytetään liuottimia, jotka höyrystyessään ovat haitallisia terveydelle.

Kaappien suurimmat erot ovat puhdistilojen koossa ja konstruktiossa sekä testinesteen kierron toteutuksessa. Taulukossa 12 on lueteltu puhtaustestikaappien tärkeimmät eroavat ominaisuudet.

Taulukko 12. Puhtaustestikaappien tärkeimmät eroavat ominaisuudet. [3; 18; 19]

Testikaappi	Pall PCC-41	Hydac CTU-1230
Irrotusmenetelmät	Painehuuhtelu	Painehuuhtelu, ultraäänipesu
Puhdastilan mitat (LxSxK) [mm]	1000 x 570 x 680 ($V \approx 387 \text{ dm}^3$)	800 x 650 x 550 ($V \approx 286 \text{ dm}^3$)
Käyttöpaine [bar]	-0,5 – 6,5	-0,8 – 6,0
Testinesteen kiertotestikaapissa	Toteutettu hydraulikoneikolla	Toteutettu paineilmalla
Käyttöliittymä	Kosketusnäyttölinen ohjauspaneeli	PC
Testinestetankin tilavuus [dm³]	30	20

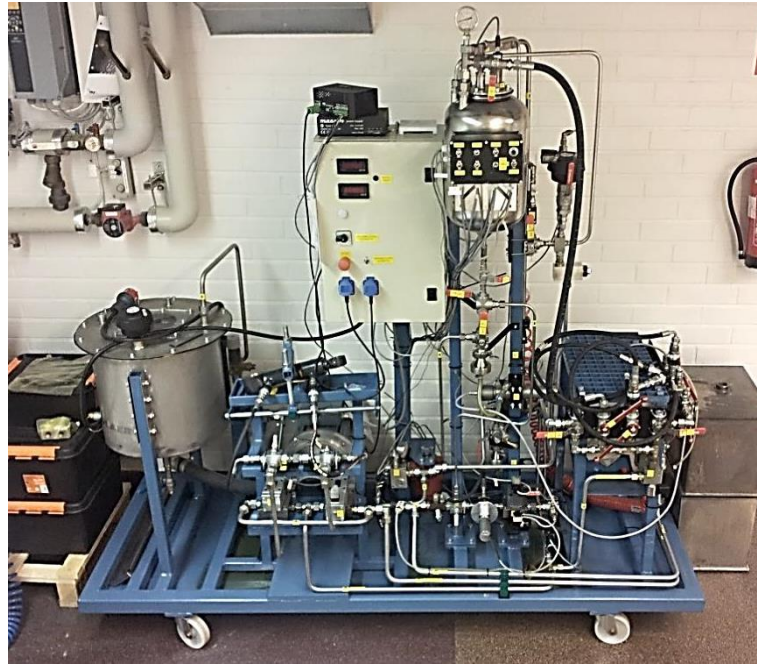
PCC-41:n puhdastila on tilavuudeltaan noin kolmanneksen suurempi kuin CTU-1230:n ja sen puhdastilaan päästään käsiksi suoraan kaapin edestä. Näin ollen se sopii suuremmille ja painavammille komponenteille.

Komponenttien painehuuhtelu suoritetaan käsin. Molempiin kaappeihin on tarjolla useita erilaisia suuttimia testinesteen ruiskuttamiselle. Painesuihkua voidaan ohjailta jalkapolkimella, liipaisimella tai automaattisesti kaapin ohjausjärjestelmällä. Ruiskutettu testineste kerätään kaapin pohjalle suppilomaiseen keräysastiaan, josta se valutetaan edelleen kalvosuodattimelle.

Testikaappeja käytettäessä on ensiarvoisen tärkeää, ettei kaapin oma puhtaus vaikuta merkittävästi testituloksiin. Kaapin riittävä puhtaustaso todetaan nollapuhtausnäytteestä. Ennen nollapuhtausnäytteen ottamista, kaappi pestään huolellisesti. Molemmissa kaappeissa on kaapin puhdastilan pesemiseen tarkoitettut pesuohjelmat ja suuttimet, jotka huuhtelevat automaattisesti kaapin sisäpintoja. Mikäli kaapilla on pesty erityisen likaisia komponentteja ja kaappi on näin päässyt likaantumaan normaalia enemmän, voidaan kaappia joutua pesemään myös käsin riittävän puhtaustason saavuttamiseksi. Pesemiseen käytetään kaapin omia ruiskusuuttimia ja testinestettä.

3.1.2 Testipenkki

Puhtaustestikaapeissa suoritettava painehuuhtelu sopii hyvin komponenteille, joiden tutkittavia kontrollipintoja päästään testinestesuihkulla helposti pesemään. Kokoonpan-
tujen komponenttien testaamiseen painehuuhtelua ei voida käyttää. Tästä syystä kom-
ponenttipuhtauslaboratorioon suunniteltiin ja rakennettiin testipenkki, jolla voidaan si-
muloida komponentin loppukäyttöä. Testipenkin suunnittelu ja toteutus teetettiin diplo-
mityönä vuonna 2012. Testipenkki on esitetty kuvassa 6. [14]



Kuva 6. TTY/IHA Komponenttipuhtauslaboratorion loppukäytön simuloinnin puhtaustamittauslaitteisto eli testipenkki.

Testipenkki on suunniteltu ISO 16232 -standardin viidennen osan (ISO 16232-5: Hiukkasten irrotus testipenkin avulla) mukaisesti. Sillä jäljitellään tutkittavien komponenttien todellisia käyttöolosuhteita.

Testipenkkimenetelmä perustuu väliaineen voimakkaaseen virtaukseen, joka aikaansaa epäpuhtaushiukkasten irtoamisen komponentin kontrollipinnoilta. Virtaus tuotetaan penkin omalla hydraulipumpulla. Poiketen puhtaustestikaapeista, testipenkissä ei käytetä väliaineena liuottimia vaan matalaviskositeetistä VG10 hydraulioöljyä. Ratkaisuun päädyttiin, koska tutkittujen komponenttien piti olla tutkimuksen jälkeen käyttökuntoisia ja toimitusvalmiita suoraan asiakkaalle. Hydraulioöljy sopi lisäksi paremmin myös järjestelmän pumpulle. Testipenkin suorituskyvyn ominaisarvot on kerätty taulukkoon 13. [20]

Taulukko 13. Testipenkin suorituskyvyn ominaisarvot. [20]

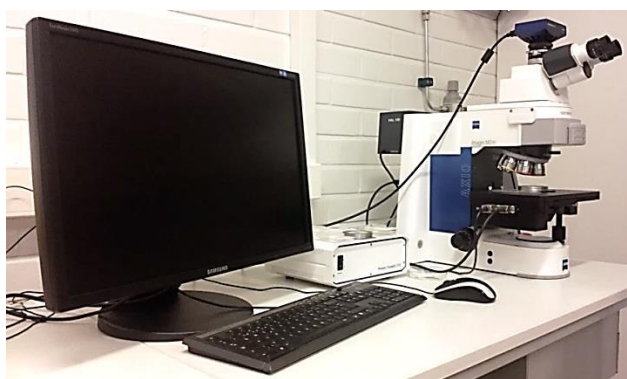
Parametri	Ominaisarvo
Paine	50 bar
Virtaus	60 l/min
Maksimi käyttölämpötila	30 °C
Öljyn viskositeetti maksimi käyttölämpötilassa	12 cSt
Testinesteen suodatus	3 µm

Testipenkki soveltuu suoritusarvojensa puolesta ainakin seuraaville komponenteille: pumput, sylinterit, moottorit, paineakut, venttiilit, venttiililohkot, putket ja letkut.

Testipenkillä irrotetut hiukkaset voidaan analysoida kolmella tavalla. Penkissä on automaattinen hiukkaslaskuri (APC) sekä puhtaustestikaapeissakin käytetty kalvosuodatin. Kalvosuodattimelle suodatetut hiukkaset voidaan analysoida mikroskoopilla samoin kuin puhtaustestikaappien tapauksessa tai gravimetrisesti.

3.1.3 Mikroskooppilaitteisto

Kalvosuodattimien analysointia varten laboratorioon on hankittu Carl Zeiss Axio Imager M2 -automaattimikroskooppi (Kuva 7). Mikroskoopilla saadaan kuvattua automaattisesti koko kalvosuodattimen tehollinen pinta-ala. Kalvosuodattimesta otetaan monta perättäistä kuvaa niin, että motorisoitu näytealusta siirtää kalvosuodattimen aina seuraavaan asemaan. Mikroskoopilla otetut kuvat analysoidaan kuva-analyysiohjelmistolla, joka mittaa jokaisen kalvosuodattimelta löydetyn hiukkasen ja jaottelee ne ISO 16232 -standardin mukaisiin kokoluokkiin.



Kuva 7. Carl Zeiss Axio Imager M2 -mikroskooppi.

ISO 16232 -standardi määrää, että jokainen hiukkanen analysoidaan erikseen, eikä laskennassa saa käyttää esimerkiksi ekstrapolointia [17]. Tästä syystä automaattinen mikroskooppilaitteisto on ensiarvoisen tärkeä. Sillä saadaan suoritettua työläs laskentatyö verrattain lyhyessä ajassa.

3.1.4 Muu välineistö

Puhtaustestikaappien sekä testipenkin lisäksi epäpuhtaushiukkaset voidaan laboratoriossa irrottaa ultraäänipesukoneella. Pesukone täytetään testinesteellä ja tutkittava komponentti upotetaan kauttaaltaan testinesteeseen. Pesukone johtaa ultraäänitaajuista värähtelyä testinesteeseen sekä tutkittavaan komponenttiin.

Ultraäänimenetelmä perustuu värähtelyn aikaansaamaan testinesteen kavitaatioon, jossa kavitointi muodostaa komponentin pinnoille ja epäpuhtaushiukkasten ympärille pieniä kuplia, jotka luhistuvat voimakkaasti. Kuplien luhistuminen saa aikaan hiukkasten irtoamisen testinesteeseen. Menetelmä sopii erityisesti pienille ja keskikokoisille komponenteille, joissa on vaikeita ja monimutkaisia muotoja. [7]

Ultraäänipesun jälkeen testineste suodatetaan kalvosuodattimelle joka analysoidaan gravimetrisesti tai mikroskoopilla. Kuvassa 8 näkyy keskellä laboratorion FinnSonic-ultraäänipesukone. Taustalla näkyy testinesteen suodattamiseen käytettäviä vakuumpulloja ja muuta suodattamisen tarpeistoa.



Kuva 8. FinnSonic-ultraäänipesukone sekä taustalla suodatustarpeistoa.

Riippumatta irrotusmenetelmästä, kalvosuodattimien analysointi vaatii niiden huolellisen kuivaamisen. Kalvosuodattimiin sitoutunut testineste höyrystetään pois näyteuunissa 80 °C asteessa. Näytteiden annetaan olla uunissa 30 minuuttia, jonka jälkeen niitä jäähdytetään vielä 30 minuuttia. Näyteuuni on esitetty kuvassa 9.



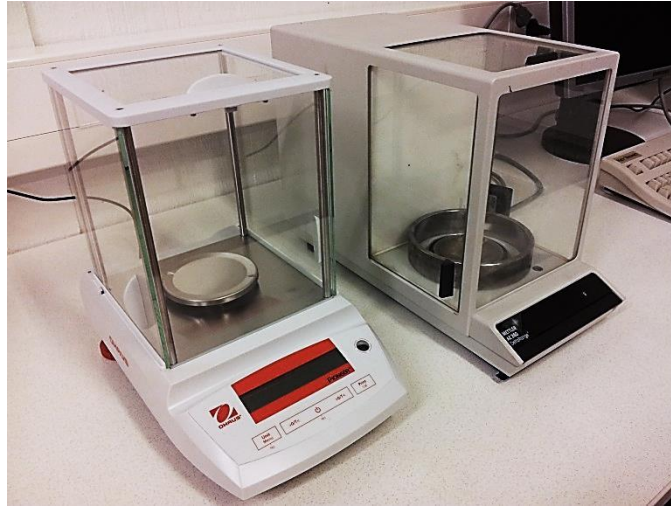
Kuva 9. Komponenttipuhtauslaboratorion näyteuuni.

Kalvosuodattimien käsittelyyn käytetään magnetoitumattomia pihtejä, joiden kärjet puhdistetaan pyyhkimällä aina ennen kalvosuodattimeen koskemista. Kalvosuodattimet pidetään aina vaakatasossa, jotteivät sille suodatetut hiukkaset pääsisi varisemaan pois. Kalvosuodattimien siirtely sekä kuivaaminen suoritetaan kannellisissa petrialjoissa. Kuivaamisen ajaksi petrialjan kantta raotetaan hieman. Kuvassa 10 on esitetty kalvosuodattimia sekä niiden siirtelyyn tarvittavat petrialja sekä pihdit.



Kuva 10. Petrialja, kalvosuodattimia ja pihdit.

Gravimetrinen eli hiukkasten massalla esitettävien tulosten selvittämiseksi laboratorios-
ta löytyy kaksi tarkkuusvaakaa (Kuva 11). Useimmiten komponentin puhtaustasot pyri-
tään ilmoittamaan mikroskooppianalyysillä. Suurten ja erittäin likaisten komponenttien
kohdalla mikroskooppianalyysin suorittaminen ei ole mahdollista ja tällöin ainoaksi
vaihtoehdoksi jää tulosten esittäminen hiukkasten massan avulla. Uudemman vaa'an
(kuvassa 11 lähempänä) tarkkuus on 0,1 mg ja suurin punnittava massa 110 g. Van-
hemmalla vaa'alla voidaan punnita 205 g saakka mutta vain 1 mg tarkkuudella.



Kuva 11. Komponenttipuhtauslaboratorion tarkkuusvaa'at.

Laboratoriossa käytettävät pyyhkeet ja liinat ovat nukkaamatonta materiaalia ja työtakit ovat väriltään valkoisia. Valkoiset kuidut erottuvat huonoiten valkoisia kalvosuodattimia vasten. Näin kankaisista materiaaleista mahdollisesti irtoavat kuidut vaikuttavat mahdollisimman vähän tutkimuksien tuloksiin.

3.2 Painehuuhtelun mittausprosessi

Tässä luvussa käydään läpi painehuuhtelun mittausprosessi komponenttien saapumisesta laboratorioon aina tulosten ilmoittamiseen saakka. Työvaiheet on pyritty esittämään mahdollisimman tarkasti todellisen työn suorittamisen mukaan. Tässä esitetyt työtavat ja menettelyt toimivat lähtötasona luvussa 4 esitetylle laboratoriotyöskentelyn tehokkuuden kehittämiseksi.

Työskentelyrutiinien lähtötason selvittämiseksi tutkittiin viiden erilaisen komponentin puhtaus. Puhtaustutkimukset tehtiin CTU-1230 puhtaustestikaapilla ja tulokset analysoitiin mikroskoopilla. CTU-1230 testikaapissa puhdistila on erotettu kannella laboratorioympäristöstä, toisin kuin PCC-41:n ilmastoinnilla toteutettu ratkaisu. CTU-1230:lla oli havaittu ajoittain ongelmia nollapuhtausnäytteiden kanssa ja tästä syystä se valittiin työskentelyrutiinien ja koko prosessin tehokkuuden tarkasteluun.

3.2.1 Alkuvalmistelut

Aivan ensimmäiseksi puhtaustestikaappi puhdistettiin nollapuhtauden vaatimalle tasolle. Kaappia pestiin useita kertoja automaattipesulla sekä manuaalisesti kaapin lattasuuttimella. Pesemisen jälkeen kaapista otettiin nollapuhtausnäyte. Nollapuhtausnäytteen ottamiseen kaapille oli määritelty vakioitu nollapuhtausnäytteen ottamistapa, jossa käytettiin seitsemän litraa testinestettä seuraavasti:

- Hansikkaat 0,5 l
- Ritiä 1,5 l
- Lasi 0,5 l
- Seinät 0,5 l / seinä (4 kpl)
- Pohja 0,5 l
- Automaatti 2,0 l

Kaapin käytössä oli ennen työskentelyn aloittamista ollut hieman pidempi käyttökato, joka näkyi kaapin puhtaudessa. Ensimmäinen ja toinen nollapuhtausnäyte olivat liian likaisia. Kaappia pestiin hylättyjen nollapuhtausnäytteiden jälkeen aina lisää ennen seuraavan nollapuhtausnäytteen ottamista. Hyväksyttävä puhtaustaso saavutettiin vasta kolmannella nollapuhtausnäytteellä.

Tutkittavat komponentit saapuivat laboratorioon postitse komponenttivalmistajan pakkaamina ja lähettäminä. Komponentit olivat lähinnä pieniä liittimiä ja jokaista viittä erilaista komponenttia oli viisi kappaletta. Vaikka komponentit olivat verrattain pieniä, soveltuivat ne kuitenkin hyvin tutkittaviksi painehuuhtelumenetelmällä.

Komponenttivalmistajalle oli painotettu komponenttien keräämistä koskevien toimintatapojen sekä oikeanlaisen pakkaamisen tärkeyttä. Komponenttien käsittely, varastointi ja liikuttelu eivät saa aiheuttaa muutoksia komponenttien kontrollipintojen puhtaustasoihin ennen irrotusprosessin aloittamista. Tästä huolimatta kaikki komponentit olivat kerätty sekaisin yhteen isoon tavalliseen muovipussiin, joka oli postitettu pahvilaatikossa (Kuva 12). Standardin mukaan komponentit olisi pitänyt toimittaa niille tarkoitettussa, nollapuhtausvaatimukset täyttävässä ja suljettavassa kuljetuslaatikossa, joka on komponenttien kanssa samaa kokoluokkaa ja myötäilee komponenttien muotoja [6]. Tällaisia pieniä komponentteja varten löytyy suljettavia, puhtaita komponenttipusseja. Oletettavasti komponentit oli kerätty suuremmista laatikoista, joten samanlaiset komponentit olisivat voineet olla samassa pakkauksessa. Toimitustavasta johtuen oletettiin, että erilaisten komponenttien puhtaustasot ovat hyvin lähellä toisiaan.



Kuva 12. Väärin toimitetut tutkittavat komponentit.

Komponentille määriteltiin tutkittavat kontrollipinnat, huuhtelun parametrit ja suunniteltiin pesutapahtuman kulku eli käytännössä kuinka paljon liuotinta käytetään kullekin huuhdeltavalle pinnalle ja kuinka suurella paineella huuhtelu suoritetaan. Jokaisen komponentin huuhtelu piti tapahtua samalla tavalla jokaisella huuhtelukerralla.

ISO 16232 -standardin mukaan komponentille pitää suorittaa vähintään kolme ja maksimissaan kuusi huuhtelua [6]. Laboratorion vakiintuneiden menettelyiden mukaan jokaisessa uudessa verifioimattomassa tutkimuksessa tehdään suoraan kuusi painehuuhtelua. Tämä johtuu siitä, että kalvosuodattimet pitää kuivata näyteuunissa, ennen kuin niitä voidaan analysoida mikroskoopilla. Mikäli kolmen viimeisen näytteen tulokset analysoidaisiin standardin mukaan ottamalla yksi näyte kerrallaan, tutkimukseen kuluva aika saattaisi moninkertaistua.

Kaikki tehdyt määrittelyt kirjattiin muistiin valmiiseen mittausraporttipohjaan. Mittausraportti on esitetty liitteessä B: Mittausraportti Hydac CTU-1230. Mittausraportista on mustattu tutkimuksen yksityiskohtaiset osapuoli- sekä päivämäärätiedot. Painehuuhtelulle määritellyt parametrit talletettiin valmiiksi myös testikaapin ohjelmistolle.

Puhtaustestikaapin valmistelun sekä hiukkasten irrotusprosessin suunnittelemisen jälkeen valmisteltiin vielä kaikki muut prosessiin tarvittavat välineet. Kalvosuodattimien siirtelyyn käytettävät pihdit puhdistettiin ja jokaista käytettävää kalvosuodatinta varten puhdistettiin petrimalja. Kuhunkin petrimaljaan merkittiin valmiiksi testisarjan nimi ja näytteen numero, jotta ne eivät menisi sekaisin ja pysyisivät järjestyksessä.

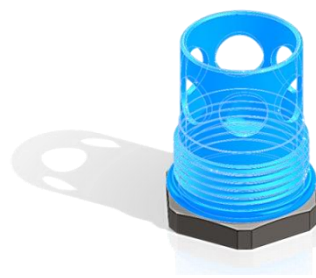
Viimeiseksi valmisteltiin tutkittavat komponentit. Komponenttien pakkaus avattiin ensimmäisen kerran vasta tässä vaiheessa. Komponenttien ulkopinnat (muut kuin kontrollipinnat) puhdistettiin mahdollisimman huolellisesti pyyhkimällä ne nukkaamattomilla liinoilla. Kontrollipintoihin varottiin vaikuttamasta mahdollisuuksien mukaan. Mikäli komponentit olisivat olleet hieman suurempia, olisi ulkopinnat voitu mahdollisesti puhdistaa huuhtelemalla ne laboratorion toisessa puhtaustestikaapissa. Tällöin pitää kuitenkin

kin varmistua siitä, ettei painehuuhtelu pääse vaikuttamaan kontrollipintoihin. Ulkopintoja ei saa pestä samalla testikaapilla, jolla komponentin puhtaustutkimus suoritetaan.

3.2.2 Kontrollipinta-alan ja -tilavuuden määrittäminen

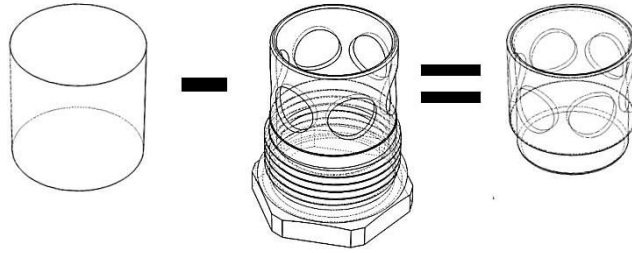
Kontrollipinnoiksi määriteltiin komponentista ne pinnat, jotka ovat suoraan kosketuksessa hydraulinesteen kanssa komponentin lopullisessa asennuksessa sekä pinnat, joilta todennäköisesti kulkeutuu hiukkasia lopulliseen järjestelmään. Tällaisilla määrittelyillä esimerkiksi komponenttien kierteet sisällytettiin kontrollipintoihin, mutta lohkoasennettävien komponenttien lohkoista kokonaan ulkopuolelle jääviä pintoja ei. Kontrollipintojen määrittämisen yhteydessä arvioitiin sopiva kappalemäärä yhteen tutkimukseen sisällytettäviä komponentteja. Komponenteista pitää saada irrotettua tarpeeksi suuri määrä hiukkasia, jotta nollapuhtausnäytteelle asetut vaatimukset täyttyvät. Toisaalta näytteet eivät saa olla liian likaisia, jotta ne pystytään analysoimaan mikroskoopilla.

Tutkittavat komponentit saattavat olla muodoiltaan hyvinkin monimutkaisia joka vaikeuttaa kontrollipinta-alojen ja -tilavuuksien laskemista. Tällaisten komponenttien kohdalla CAD-mallintaminen on usein nopein, helpoin ja tarkin tapa määrittää arvot. Kuvassa 13 on esitetty mallinnetun komponentin kokoonpano (komponentti ja O-rengas). Kuvassa näkyy sinisellä värillä komponentin kontrollipinnoiksi määritellyt osat. Kontrollipintoihin sisällytettiin lohkon sisälle jäävien osien ja kierteiden lisäksi myös O-rengas. Komponentin huuhtelu suoritettiin niin ikään O-renkaan ollessa komponentissa paikoillaan. O-renkaan poistaminen komponentista olisi saattanut vaikuttaa komponentin puhtaustasoon kumpaan suuntaan tahansa. O-renkaan poistamisen olisi saattanut puhdistaa kontrollipintoja tai O-renkaan vetäminen kierteiden yli olisi saattanut synnyttää O-renkaasta hiertyneitä hiukkasia.



Kuva 13. Esimerkki komponentin kontrollipinta-alan määrittämisestä CAD-mallinnuksen avulla.

Kuvassa 14 on havainnollistettu komponentin kontrollitilavuuden määrittämistä. Komponentin vaatimasta tilavuudesta lohkoasennuksessa vähennettiin komponentin viemä tilavuus. Kuvassa vasemmalla on komponentin vaatima kokonaistilavuus asennuslohkosta, keskellä on komponentti ja oikealla jäljelle jäävä tilavuus, kun komponentin viemä tilavuus on vähennetty.



Kuva 14. Havainnollistava esimerkki komponentin kontrollitilavuuden määrittämisestä.

Kaikki viisi tutkittavaa komponenttia mallinnettiin SolidWorks CAD-ohjelmalla kontrollipinta-alojen ja -tilavuuksien selvittämiseksi. Komponenttien kontrollipinta-alat, -tilavuudet ja yhteen tutkimukseen sisällytettävien komponenttien lukumäärät ovat listatut taulukkoon 14.

Taulukko 14. Viiden mitatun komponentin kontrollipinta-alat sekä -tilavuudet.

Komponentti	Kontrollipinta-ala [cm ²]	Kontrollitilavuus [cm ³]	lkm
A	34,4489	4,4549	2
B	59,3686	19,0448	1
C	71,6539	18,6805	1
D	20,7329	1,5065	3
E	12,763	-	5

Suurimman komponentin (komponentti C) puhtaus tutkittiin ensimmäisenä. Tutkimus päätettiin tehdä vain yhdellä komponentilla, joka osoittautui likaisimman kalvosuodatimen (S_1) analysointivaiheessa sopivaksi määräksi. Koska oletuksena oli, että komponenttien puhtaustasot ovat lähellä toisiaan, testattiin pienempiä komponentteja useampia kappaleita. Kappalemäärää kasvattamalla pyrittiin huuhdeltava kontrollipintojen kokonaispinta-ala saamaan mahdollisimman lähelle suurimman komponentin kontrollipinta-alaa.

3.2.3 Hiukkasten irrottaminen

Alkuvalmisteluiden jälkeen tutkittavat komponentit siirrettiin puhtaustestikaappiin. Testikaapin puhdistilan ovi avattiin ja komponentit laskettiin kaapin ritilälle. Testikaapin luukun reuna on melko korkealla ja toisaalta puhdistilan pohja melko alhaalla. Komponenttien siirtäminen tehtiin varoen, ettei kaapin haastava ergonomia saisi aikaan virheellisiä hiukkasia testikaappiin, jotka mahdollisesti syntyvät testaajan liikkeistä sekä työvaatteiden hankautumisesta. Testikaapin ovea pyrittiin pitämään auki mahdollisimman vähän aikaa. Komponentit pidettiin testikaapissa koko tutkimuksen ajan ja otettiin pois vasta ennen toisen nollapuhtausnäytteen ottamista.

Komponenttien kontrollipinnat huuhdeltiin ennalta suunnitellulla tavalla ja testikaapin ohjelmistoon tallennetuilla parametreilla. Testinestesuihkua pyrittiin kuljettamaan samalla tavalla jokaisen komponentin kohdalla. Painehuuhtelua suoritettaessa testinestettä roiskui komponentista kaapin pinnoille. Komponentin asento sekä testinestesuihkun suunta pyrittiin pitämään sellaisina, että suurimmat roiskeet suuntautuisivat suoraan testikaapin pohjaa kohden. Seinille sekä testikaapin lasiin (oveen) suuntautuvat roiskeet pyrittiin pitämään mahdollisimman vähäisinä.

Komponentin huuhtelun jälkeen pitää jokaisella huuhtelukerralla huuhdella vielä testilaitteistosta roiskealueet. Roiskealueiden huuhtelusta ei ollut tarkempia määritelmiä, kuin että alueet, joihin roiskeet osuvat, pitää huuhdella huolellisesti. Roiskealueiden pesuun käytetty testineste sisällytettiin standardin [6] mukaisesti komponentin pesuun ja sille varattiin erikseen tietty litramäärä testinestettä. Huuhtelu päädyttiin suorittamaan samalla protokollalla kuin nollapuhtausnäytteen ottaminen, lukuun ottamatta kahden litran automaattipesua. Näin voitiin varmistua siitä, että roiskealueet tulisi huudelluksi kunnolla.

Huuhteluun käytetyn testinesteen annettiin valua puhdistilan pohjalle ja siitä eteenpäin kalvosuodattimen kautta testikaapin tankkiin. Testikaappi nopeuttaa suodatustapahtumaa tankin alipaineistuksella. Kun kaikki käytetty testineste oli virrannut tankkiin, vaihdettiin testipenkkiin uusi kalvosuodatin. Kalvosuodattimen pidike ruuvattiin auki, ensimmäisen pesun kalvosuodatin siirrettiin pihdeillä sille varattuun petrimaljaan kannen alle, uusi puhdas kalvosuodatin vaihdettiin käytetyn tilalle pidikkeeseen ja lopulta pidike kiinnitettiin takaisin paikoilleen. Ensimmäisen huuhtelun petrimalja nimettiin mittaussarjan nimellä sekä huuhtelun numerolla S_1 ja siirrettiin näyteuuniin kuivumaan. Näyteuunissa petrimaljan kansi asetettiin hieman raolleen, jotta kosteus pääsisi haihtumaan.

Edellä kuvatulla tavalla komponentille suoritettiin kuusi huuhtelua, joiden jälkeen testikaapista otettiin vielä lopun nollapuhtausnäyte B_2 . Tämä nollapuhtausnäyte otettiin samalla tavalla kuin ensimmäinen nollapuhtausnäyte.

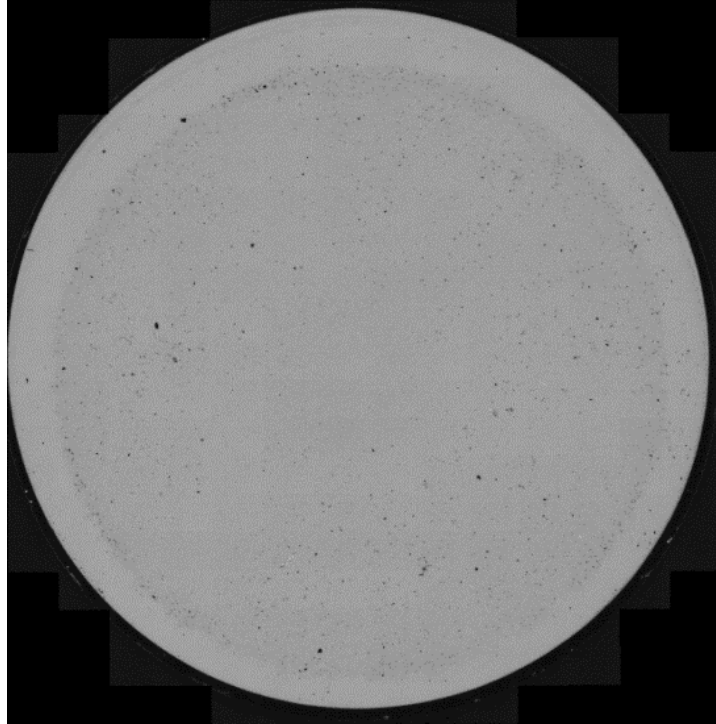
3.2.4 Mikroskooppianalyysi

Näytteet pidettiin painehuuhtelun jälkeen näyteuunissa vähintään puolen tunnin ajan. Kuivuneiden näytteiden petrimaljojen kannet suljettiin ja näytteet siirrettiin varoen pois uunista laboratorion pöydälle jäähtymään. Petrimaljoja varottiin kolistelemasta ja ne pidettiin vakaasti pystyasennossa, jotta irrotetut hiukkaset eivät pääsisi varisemaan kalvosuodattimilta. Jäähtyneet näytteet kuvattiin laboratorion automaattisella mikroskooppilla sekä analysoitiin mikroskoopin kuva-analyysiohjelmistolla. Kalvosuodattimet siirrettiin yksitellen puhdistetuilla pihdeillä pestylle mikroskoopin näytealustalle, joka asetettiin mikroskoopin näytepöydälle. Tämän jälkeen siirryttiin käyttämään mikroskooppia tietokoneen ohjelmistolla.

Jokaiselle analysoitavalle kalvosuodattimelle luotiin ohjelmistoon oma projektinsa, joka nimettiin komponentin nimellä ja testisarjan- sekä näytteen numerolla (esim. Valmistaja Liitin 1 S3). Projektille tallennettiin kaikki sitä koskevat tiedot kuten mittaja, mittauksen tilaaja, komponentin tiedot sekä kuvien valotusaika ja harmaasävyn raja-arvo. Ennen analyysin aloittamista valittiin analyysille sopiva objektiivilinssi.

Mitä suuremmalla suurennoksella kuvia otetaan, sitä pienempiä hiukkasia kalvosuodattimelta voidaan laskea. Suurennoksen kasvaessa pienenee kuitenkin yhteen kuvaan mahtuva reaalin kalvosuodattimen pinta-ala. Kasvattamalla suurennosta, kasvaa siis myös otettavien kuvien lukumäärä, joka pidentää analyysiin kuluva aikaa. D - K kokoluokkien hiukkasten analysoimiseen riitti mikroskoopin pienimmän suurennoksen 5x POL -objektiivilinssi. POL tarkoittaa polarisoivaa kontrastitekniikkaa, jolla saadaan mustavalkoisia kuvia kalvosuodattimesta. Valittu objektiivi on myös ISO 16232 -standardin ohjeistuksen mukainen (Taulukko 6) [10]. Mustavalkoisille kuville määriteltiin harmaasävyn raja-arvo, jonka mukaan kalvosuodattimella olevat hiukkaset saadaan tunnistettua. Laboratorion lähes muuttumattomissa olosuhteissa kalvosuodattimien analysointiin on löydetty valotusajalle sekä harmaasävyn raja-arvolle lähes muuttumattomina pysyvät sopivat arvot.

Tietojen syöttämisen jälkeen mikroskooppi tarkensi kuvausalueelta muutamia pisteitä, joiden mukaan kaikkien otettavien kuvien tarkennus säädettiin. Onnistuneen pisteiden tarkentamisen jälkeen aloitettiin kalvosuodattimen kuvaaminen. Automaattinen mikroskooppi kuvasi koko kalvosuodattimen alueen niin, että aina jokaisen otetun kuvan jälkeen motorisoitu näytepöytä siirsi näytealustan seuraavaan asemaan kunnes koko kalvosuodattimen ala oli kuvattu. Kuva-analyysiohjelmisto liitti otetut kuvat yhteen ja muodosti kuvan koko kalvosuodattimesta (Kuva 15).

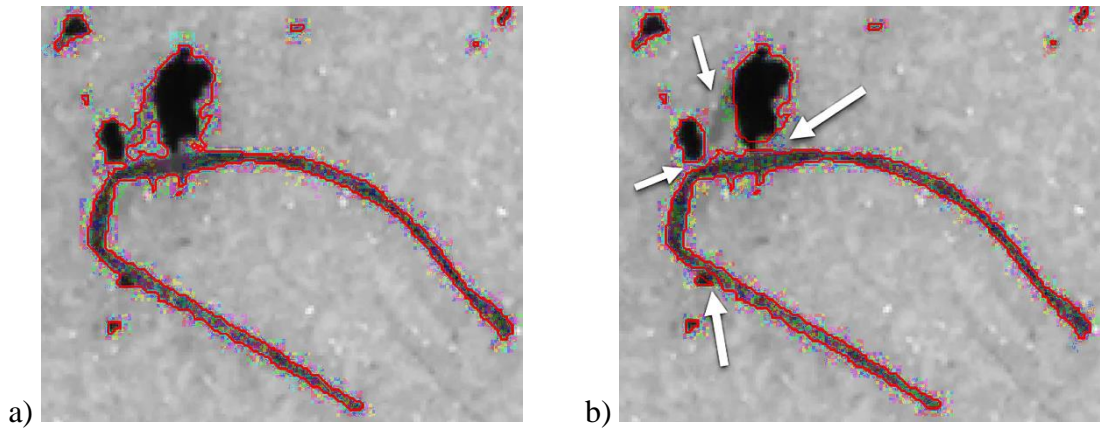


Kuva 15. Esimerkki kuva-analyysiohjelmiston kokoamasta kuvasta koko kalvosuodattimen alalta.

Kuvan muodostamisen jälkeen päästiin vielä uudestaan säätämään harmaasävyn raja-arvoa sopivaksi ja määriteltiin ohjelmalle, miltä alueelta hiukkaset mitataan ja lasketaan. Tämän jälkeen ohjelmisto mittasi kaikki havainnoidut hiukkaset ja jaotteli ne ISO 16232 -standardin mukaisiin kokoluokkiin.

Kuva-analyysiohjelmisto tunnisti hyvin yksittäiset hiukkaset vasten valkoista kalvosuodatinta. Virhettä syntyi kuitenkin silloin, kun hiukkasia oli kalvosuodattimella paljon ja ne olivat lähellä toisiaan. Tämän takia analyysin tulokset tarkistettiin suurimmasta tunnistetusta hiukkasesta aina n. 100 μm hiukkasiin saakka.

Virheiden korjaus suoritettiin manuaalisesti, joka osoittautui mikroskooppianalyysin työläimmäksi ja pitkäkestoisimmaksi työvaiheeksi. Kuvassa 16 on esitetty vasemmalla kuva-analyysiohjelmiston virheellisesti tunnistamat hiukkaset ja oikealla manuaalisesti tehdyt korjaukset hiukkasten havainnointiin. Kuvissa yhtenäisellä punaisella viivalla rajattu alue tulkitaan yhdeksi hiukkaseksi.



Kuva 16. Kuva-analyysiohjelmistolle manuaalisesti tehtäviä korjauksia hiukkasten laskentaan ja havainnointiin, vasen kuva 16a on korjaamaton ja oikea kuva 16b on korjattu.

Korjaamattomasta kuvasta 16a nähdään, että kuva-analyysiohjelmisto on tulkinut kuvasta kolme lähekkäin sijaitsevaa hiukkasta sekä yhden pitkän malliset kuidun yhdeksi hiukkaseksi. Oikean puoleisessa kuvassa 16b on osoitettu valkoisilla nuolilla paikat, joihin korjauksia tehtiin.

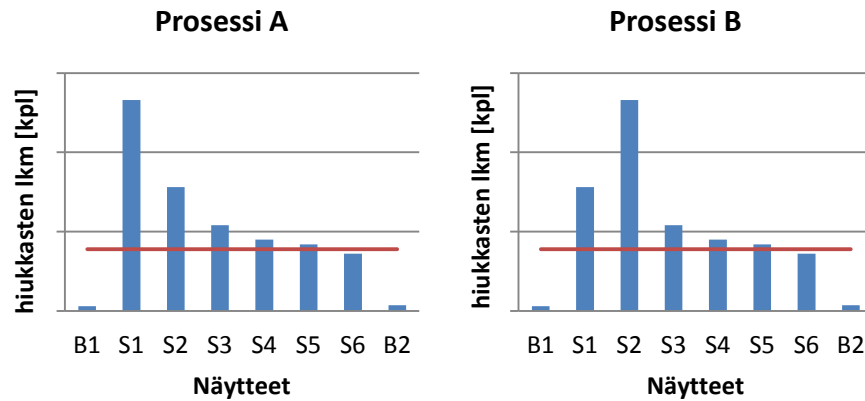
Mikroskooppianalyysin suorittamiseen kuluva aika riippuu suoraan näytteiden likaisuuden tasosta. Mitä enemmän kalvosuodattimella on hiukkasia, sitä lähempänä ne ovat toisiaan ja sitä enemmän analyysiin tulee virheellisesti havainnoituja hiukkasia. Erittäin likaisten näytteiden kohdalla mikroskooppianalyysia ei pystytä enää suorittamaan. Tällöin hiukkaset ovat suurimmaksi osaksi jo toistensa päällä eikä yksittäisten hiukkasten havainnointi ole enää mahdollista.

Hiukkasten havainnoinnille tehtyjen korjausten jälkeen suurimmista ja merkityksellisimmistä hiukkasista otettiin vielä manuaalisesti värikuvat mikroskoopilla. Kuvat sekä analyysin tulokset tallennettiin projektin kansioon ja edettiin seuraavan näytteen analysointiin.

3.2.5 Irrotuskäyrä ja prosessin päätepiste

Irrotusprosessi todetaan tehokkaaksi, mikäli viimeisimmässä otetussa näytteessä on hiukkasia enintään 10 % irrotettujen hiukkasten kokonaismäärästä ja näytteitä on otettu maksimissaan kuusi kappaletta (kaava (1)) [6]. Tällöin sanotaan, että prosessi on saavuttanut päätepisteensä. Analysoiduista hiukkasmääristä piirretään pylväsdiagrammi, jota kutsutaan irrotuskäyräksi. ISO 16232 -standardissa irrotuskäyrän piirtämistä ei ole ohjeistettu täysin yksiselitteisesti. Standardin esimerkin irrotuskäyrässä pystyakselille on merkitty näytteen puhtaustaso. Puhtaustaso voidaan ilmaista monella eri tavalla. Seuraavassa käydään läpi kolme tapaa muodostaa painehuuhteluprosessille irrotuskäyrä.

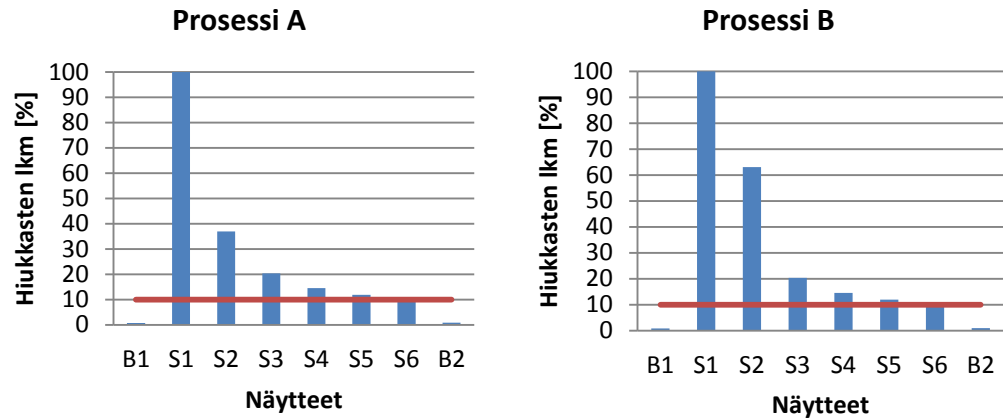
Kuvissa 17 - 19 on esitetty vierekkäin esimerkkiprosessin A ja B irrotuskäyrät. Huuhtelun A irrotuskäyrä mukailee standardissa esitettyä esimerkkiä. Ensimmäisessä huuhtelussa (S_1) hiukkasia on irronnut selvästi eniten. Irrotettujen hiukkasten määrä pienenee jokaisella huuhtelulla ja lopulta kuudennella huuhtelulla (S_6) saavutetaan 10 % prosessin päätepisteen raja. Prosessissa B on käyrien piirtämisen erojen esiintuomiseksi vaihdettu prosessin A ensimmäisen ja toisen huuhtelun irrotettujen hiukkasten lukumäärät. Jokaisessa kuvaajassa on merkitty punaisella vaakaviivalla 10 %:n rajaa. Kuvassa 17 pystyakselille on merkitty irrotettujen hiukkasten lukumäärät.



Kuva 17. Esimerkkiprosessien irrotuskäyrät hiukkasten lukumäärällä ilmoitettuna.

Irrotuskäyrästä nähdään selkeästi, miten irrotusprosessi on edennyt. Kun pylväät merkitään suoraan hiukkasten lukumäärillä, elää 10 %:n raja hiukkaslukumäärien mukaan. Tällöin esimerkiksi eri komponenttien irrotuskäyrien vertailu on vaikeaa.

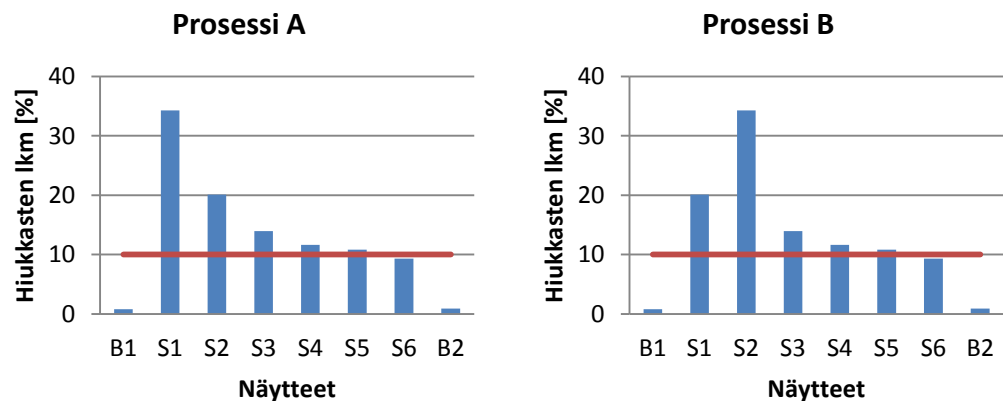
Kuvassa 18 puhtaustasot on merkitty prosentteina jokaisen näytteen kohdalle suhteessa kulloiseenkin ajanhetkeen mennessä irrotettuihin hiukkasiin. Näin siis ensimmäinen näyte sisältää 100 % irrotetuista hiukkasista, kun nollapuhtaustasot sisältämiä hiukkasia ei lasketa prosessiin kuuluviksi. Tällainen merkitsemistapa muistuttaa eniten standardin esimerkin irrotuskäyrää.



Kuva 18. Irrotuskäyrä prosentteina suhteessa ko. ajanhetkeen mennessä irrotettuihin hiukkasiin.

Tässä merkintätavassa prosessin kulun yksityiskohdat häviävät. Prosessin B kahden ensimmäisen näytteen suhteet toisiinsa eivät enää näy suoraan irrotuskäyrästä. Toisaalta merkintätavalla saadaan 10 % raja pysymään paikallaan, joka helpottaa erilaisten irrotuskäyrien vertailua.

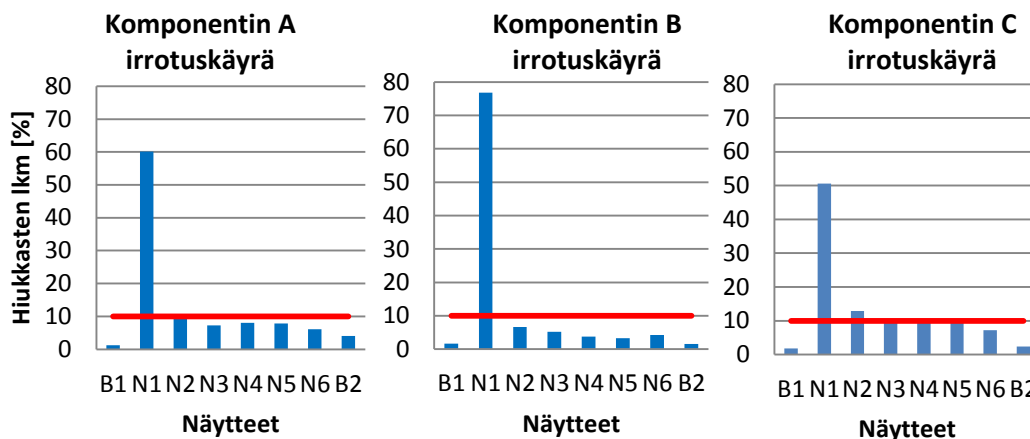
Kuvassa 19 on esitetty TTY/IHA komponenttipuhtauslaboratoriossa käytetty tapa muodostaa irrotuskäyrä. Näytteiden puhtaustasot on merkitty kuvaajaan prosentteina koko prosessin aikana irrotettujen hiukkasten kokonaismäärästä.



Kuva 19. Irrotuskäyrä prosentteina koko prosessin aikana irrotettujen hiukkasten kokonaismäärästä.

Tällaisella merkintätavalla saadaan yhdistettyä kahden edellä esitetyn merkintätavan hyvät puolet. Prosessin eteneminen käy selvästi ilmi irrotuskäyrästä ja eri komponenttien irrotusprosesseja on helppo vertailla toisiinsa. Erona standardin esimerkin irrotuskäyrään on se, että käyrän kehitys ei ole yhtä jyrkkä.

Kuvassa 20 on esitetty tutkittujen komponenttien A – C irrotuskäyrät laboratorion omaksumalla merkintätavalla.



Kuva 20. Komponenttien A - C irrotuskäyrät.

Jokainen esitetty irrotusprosessi on saavuttanut päätepiteensä (<10 %) jo kolmen ensimmäisen näytteen kohdalla. Näin ollen jokaisen kohdalla oli tehty ylimääräistä työtä kolmen viimeisen näytteen analysoinnin verran. Tämän huomion myötä jäljelle jääneiden komponenttien D ja E kohdalla siirryttiin testaamaan ideaa ylimääräisestä nollapuhtausnäytteestä prosessin puolella välissä, näytteiden S_3 ja S_4 välissä. Nollapuhtausnäytteen ottamista varten komponentit otettiin pois testikaapista kesken prosessin. Tämän myötä prosessiin tuli lisäksi kaksi ylimääräistä testikaapin oven avausta. Testikaapin oven avaamisen vaikutusta on tutkittu luvussa 4.2 ja prosessin päätepiteen määrittämistä luvussa 4.3.

3.2.6 Tulosten laskenta ja raportointi

Mikroskoopin kuva-analyysiohjelmistolta saatiin näytekohtaiset tulokset hiukkaslukumääristä ISO 16232 -standardin kokoluokkiin jaoteltuina. Komponentin puhtaustason ilmoittamista varten jokaisen komponentista otetun näytteen tulokset summattiin yhteen ja komponentista riippuen, tulokset suhteutettiin joko kontrollipinta-alaa, -tilavuutta tai molempia kohden.

Erillisten tulosten kerääminen ja kokoaminen yhteen sekä irrotuskäyrien ja lopullisten tulosten laskeminen on hyvin mekaaninen toimenpide ja vie käsin suoritettuna paljon aikaa. Tehtävä toistuu täsmälleen samanlaisena jokaisen laboratoriossa tutkittavan komponentin kohdalla. Työn suorittamisen helpottamiseksi on muodostettu Excel-makro. Makroa varten kuva-analyysiohjelmistolta saadut näytekohtaiset tulokset tallennettiin Excelin ymmärtämään muotoon projektin omaan kansioon. Makrolle syötettiin testisarjan nimi, yhden komponentin kontrollipinta-ala ja -tilavuus sekä komponenttien ja otettujen näytteiden lukumäärä. Tämän jälkeen makro suoritettiin ja komponentin puhtaustasot voitiin lukea ruudulta. Mitattujen viiden komponentin puhtaustasot on ilmoitettu taulukossa 15 ja 16.

Taulukko 15. Viiden mitatun komponentin puhtaustasot CCC-koodina 1000 cm²:n kontrollipinta-alaa kohti.

Komponentti	CCC-Koodi / 1000 cm ²
A	CCC A (D18 / E16 / F13 / G12 / H11 / I9 / J7 / K6)
B	CCC A (D20 / E18 / F15 / G13 / H13 / I9 / J7 / K8)
C	CCC A (D17 / E15 / F12 / G11 / H11 / I7 / J7 / K4)
D	CCC A (D19 / E16 / F13 / G11 / H11 / I8 / J8 / K8)
E	CCC A (D19 / E17 / F15 / G13 / H13 / I10 / J9 / K7)

Taulukko 16. Viiden mitatun komponentin puhtaustasot CCC-koodina 100 cm³:n kontrollitilavuutta kohti.

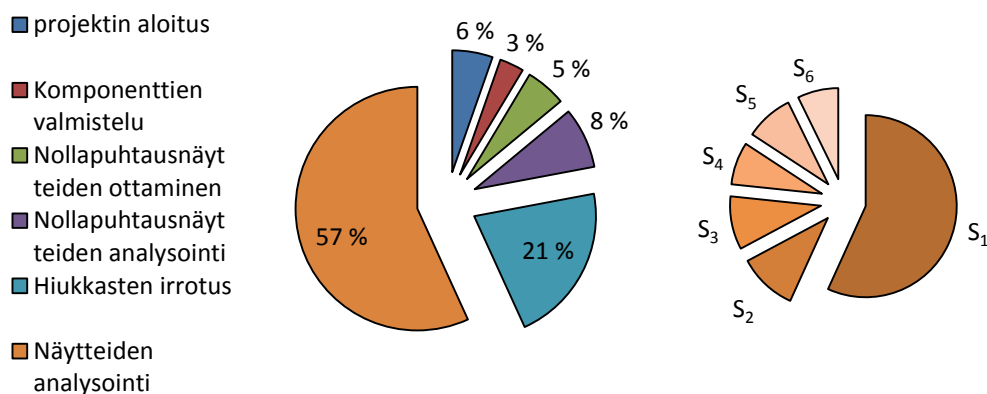
Komponentti	CCC-Koodi / 100 cm ³
A	CCC V (D18 / E16 / F13 / G11 / H11 / I8 / J7 / K6)
B	CCC V (D18 / E16 / F14 / G11 / H11 / I8 / J6 / K6)
C	CCC V (D16 / E14 / F11 / G9 / H9 / I6 / J6 / K3)
D	CCC V (D19 / E17 / F14 / G11 / H11 / I9 / J8 / K9)
E	-

Taulukossa 15 tulokset on ilmoitettu 1000 cm² kontrollipinta-alaa ja taulukossa 16 100 cm³ kontrollitilavuutta kohti. Komponentille E ei ollut komponentin luonteesta johtuen mahdollista määrittää kontrollitilavuutta. Tuloksissa oli yllättävän suuria eroja eri komponenttien välillä vaikka kaikki komponentit toimitettiin samassa pussissa.

3.3 Painehuhteluprosessiin kuluva aika

Komponenttien puhtaustasojen lisäksi tutkittiin laboratoriotyöskentelyyn kuluva aikaa ja ajankäytön jakautumista. Tavoitteena oli saada käsitys painehuuhteluprosessin työtunneiksi muutetusta työmäärästä. Painehuhteluprosessi jaettiin kuuteen työvaiheeseen, joiden kestot kelloitettiin. Prosessin työvaiheet jaettiin prosessin suunnitteluun, komponenttien valmisteluun, nollapuhtausnäytteiden ottamiseen, nollapuhtausnäytteiden analysointiin, hiukkasten irrotukseen ja näytteiden analysointiin. Laskelmista jätettiin pois voimakkaasti vaihtelevien työsuoritteiden kellotukset, kuten testikaapin puhdistaminen ja komponentin kontrollipinta-alan ja -tilavuuden laskeminen. Pois jätettiin myös hyvin lyhytkestoinen tulosten laskeminen sekä näytteiden kuivumiseen kuluva aika. Usein ensimmäinen näyte ehtii kuivua loppujen näytteiden irrotusprosessien aikana ja sen analysointiin päästään suoraan hiukkasten irrottamisen jälkeen.

Komponentit olivat tutkittavana ensimmäistä kertaa, joten niiden tutkiminen suoritettiin painehuuhteluprosessin verifiointikaavion mukaan (Liite A). Kellotuksissa on siis mukana kahden nollapuhtausnäytteen ottaminen ja analysointi sekä prosessin suunnittelu. Hiukkasten irrotukseen on kelloitettu kuuden näytteen ottaminen ja näytteiden analysointiin on sisällytetty jokaisen kuuden otetun näytteen analysointi. Ajankäytön jakautumista on havainnollistettu kuvassa 21. Vasemmanpuoleisessa kaaviossa on koko prosessin ajankäytön jakautuminen eri työvaiheisiin ja oikeanpuoleisessa kaaviossa on pitkäkestoisimman vaiheen, näytteiden analysoinnin, jakautuminen eri näytteiden kesken.



Kuva 21. Ajankäytön jakautuminen eri työvaiheisiin painehuuhteluprosessissa. Vasemmassa kaaviossa on koko prosessin ajankäytön jakautuminen ja oikeassa näytteiden analysointiin kuluneen ajan jakautuminen.

Kuvaajasta nähdään, että näytteiden analysointiin kului yli puolet koko prosessin suoritusaikasta. Näytteiden ottaminen testikaapilla eli painehuuhtelut muodostivat koko prosessista vain neljänneksen (hiukkasten irrotus ja nollapuhtausnäytteiden ottaminen). Kaikkein pitkäkestoisin yksittäinen työsuorite oli näytteen S₁ analysointi. Se muodosti koko prosessista noin kolmanneksen (32 %).

Prosessin suunnitteluun käytettiin keskimäärin puoli tuntia ja komponenttien valmisteluun 18 minuuttia. Suunnitteluun kuluneeseen aikaan ei otettu huomioon kontrollipinta-alan tai -tilavuuden laskemista, koska kyseiset arvot voidaan määrittää monilla eri tavoilla tai ne voidaan saada jopa suoraan komponentin valmistajalta. Testattavien komponenttien valmisteluun kulunut aika käytettiin komponenttien kontrolloimattomien pintojen puhdistamiseen nukkaamattomalla liinalla.

Nollapuhtausnäytteiden ottamiseen sekä nollapuhtausnäytteiden analysointiin kulu-
neet ajat yhdistettiin omiksi työvaiheikseen. Usein puhtaustestikaappia joudutaan puh-
distamaan useita kertoja ennen kuin ensimmäinen nollapuhtausnäyte saadaan hyväksyt-
tävälle tasolle. Kaapin puhdistamiseen kuluu aikaa ei otettu ajankäytön laskemissa
huomioon, vaan kuvaajissa näkyvät kellotukset ainoastaan ensimmäisestä hyväksytystä
nollapuhtausnäytteestä eteenpäin. Myöskään ensimmäisen nollapuhtausnäytteen kuivu-
misaikaa ei huomioitu. Kahden nollapuhtausnäytteen ottamiseen kului keskimäärin puo-
li tuntia ja niiden analysointiin 45 minuuttia.

Kaikki testatut komponentit olivat pienehköjä ja niiden puhtaustasojen oletettiin olevan
samalla tasolla. Näin ollen myös niiden huuhteluprosessit olivat suoritukseltaan hyvin
samanlaisia. Keskimäärin kuuden näytteen ottamiseen käytettiin 118 minuuttia eli hie-
man alle 20 minuuttia yhtä näytettä kohti.

Näytteiden (S_1 - S_6) analysointi oli koko prosessin pitkäkestoisin työvaihe. Analysointi
muodosti koko prosessin suorittamiseen kuluvasta ajasta 57 prosenttia. Ensimmäisen
näytteen (S_1) analysointiin kului keskimäärin peräti kolme tuntia. Ensimmäinen näyte
on yleensä likaisin kaikista näytteistä, minkä takia manuaalisesti tehtäviin korjauksiin
kuluu paljon aikaa. Loppujen näytteiden (S_2 - S_6) analysointi vei keskimäärin ainoastaan
hieman yli 27 minuuttia per näyte. Yhteensä analysointiin kului keskimäärin viisi
tuntia ja 17 minuuttia.

Kaiken kaikkiaan painehuuhteluprosessin kestoksi pienehköille komponenteille kello-
tettiin keskimäärin 9 tuntia ja 18 minuuttia, joka työpäiviksi muutettuna vastaa noin
puoltatoista työpäivää. Kellotuksilla saatiin käsitys pienten komponenttien tutkimiseen
kuluvasta ajasta ja ajankäytön jakautumisesta. Kellotetut vaiheet ovat sellaisia, ettei
niiden kestoon ei voida juurikaan vaikuttaa työtapoja tehostamalla. Kellotuksia voidaan
käyttää hyväksi laboratorion mittauspalveluiden hinnoittelussa.

4. PAINEHUUHTELUPROSESSIN TYÖSKENTELYRUTIINIEN KEHITTÄMINEN

ISO 16232 -standardin määritelmien sekä laboratorion työskentelyrutiinien yhteensovittaminen ei toteutunut yksiselitteisesti jokaisessa painehuuhteluprosessin vaiheessa. Laboratoriolaitteiden ominaisuudet sekä tutkimuksiin käytettävän ajan rajallisuus pakottivat muutamissa prosessin kohdissa toimimaan hieman standardista poikkeavalla tavalla. Laboratoriotyöskentelyssä tuli vastaan myös joitain kysymyksiä, joihin standardista ei löytynyt suoraan vastausta.

Tässä luvussa kehitetään laboratorion työskentelyrutiineja noudattamaan tarkemmin ISO 16232 -standardin määritelmiä. Ongelmakohtiin haetaan ratkaisuvaihtoehtoja, jotka toteuttavat standardin vaatimukset pienillä lisäyksillä tai tarkennuksilla. Pyrkimyksenä on aikaansaada sellaiset työskentelyrutiinit, jotka tuottavat todenmukaisia sekä standardin mukaisia tuloksia, ajan ja resurssien käytön suhteen tehokkaasti.

4.1 Testinesteen määrän vaikutus nollapuhtauteen

Standardin mukaan nollapuhtausnäyte tulisi ottaa samalla määrällä testinestettä kuin mitä komponentin painehuuhteluun käytetään [6]. TTY/IHA Laboratoriossa oli määriteltä vakioitu nollapuhtausnäytteen ottamistapa, riippumatta tutkittavasta komponentista tai komponentille tehtävästä huuhtelusta. Vakioidussa nollapuhtausnäytteen ottamisrutiinissa käytettiin seitsemän litraa testinestettä kahden baarin paineella testikaapin latusuutinta käyttäen seuraavasti:

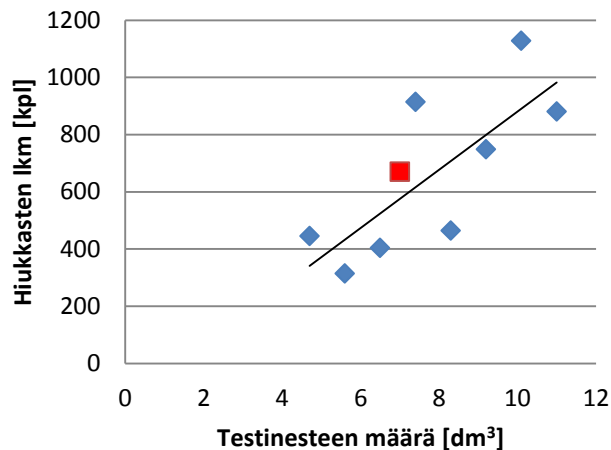
- Hansikkaat 0,5 l
- Ritilä 1,5 l
- Lasi 0,5 l
- Seinät 0,5 l / seinä (4 kpl)
- Pohja 0,5 l
- Automaatti 2,0 l

Lisäksi loppupuhtausnäytteessä kehoitettiin välttämään hansikkaiden huuhtelua, mikäli niillä oli pidetty komponentin pintoja, jotka eivät sisälly tutkimukseen (muut kuin kontrollipinnat). Mittauspöytäkirjassa (Liite B) opastettiin huuhtelemaan toisessa nollapuhtausnäytteessä ainoastaan pintoja, joille testinestettä oli roiskunut. Menettelyt olivat osittain vastoin standardin [6] määritelmiä ja tästä syystä tutkittiin nollapuhtausnäytteen käytettävän testinesteen määrän vaikutuksia nollapuhtausnäytteen puhtaustasoon.

Ennen testisarjan ottamista testikaappi pestiin huolellisesti. Testisarjassa otettiin testikaapista 10 nollapuhtausnäytettä eri määrillä testinestettä. Testikaappi jaettiin yhdeksään erilliseen manuaalisesti huuhdeltavaan osa-alueeseen, joille kaikille käytettiin yhdessä näytteessä sama määrä testinestettä. Osa-alueet olivat: käsineet (2 kpl), seinät (4 kpl), testikaapin lasi, pohja sekä ritilä. Vanhasta menettelytavasta kopioitiin vielä hyväksi koettu tapa huuhdella kaappia kahden litran automaattipesulla aivan viimeiseksi.

Näytteiden ottaminen aloitettiin käyttämällä jokaiselle huuhdeltavalle pinnalle yksi litra testinestettä ja lisäksi loppuun kahden litran automaattipesu. Ensimmäisessä näytteessä käytettiin siis yhteensä 11 litraa testinestettä. Seuraavissa näytteissä yhdelle pinnalle käytettävää testinestemäärää vähennettiin aina 0,1 litraa per kierros. Viimeisessä näytteessä testinestettä käytettiin 0,3 litraa per huuhdeltava pinta eli 4,7 litraa kokonaisuudessaan. Myös vakioitun nollapuhtausnäytteen ottotavan mukainen näyte otettiin testisarjassa omalla paikallaan testinesteen käytön mukaan (7 l). Näytteiden ottaminen lopetettiin 0,3 litran kohdalla, koska kyseisellä määrällä testinestettä ehti juuri ja juuri huuhtelemaan jokaisen yksittäisen pinnan kertaalleen.

Kuvassa 22 on esitetty kuvaaja testinesteen määrän vaikutuksesta nollapuhtausnäytteen puhtaustasoon. Uudella menettelytavalla otetut näytteet näkyvät kuvaajassa sinisillä vinoneliöillä ja vanhan testaustavan näyte punaisella neliöllä. Kuvaajan pisteiden välille on vedetty lineaarinen trendiviiva.



Kuva 22. Testinesteen määrän vaikutus nollapuhtausnäytteen puhtaustasoon.

Kuvaajasta nähdään selkeästi, että nollapuhtausnäytteen puhtaustaso on suoraan verrannollinen nollapuhtausnäytteen ottamisessa käytetyn testinesteen määrään. Nollapuhtausnäyte ja tutkittavasta komponentista otettava näyte ovat vertailukelpoisia, kun niihin on käytetty sama määrä testinestettä. Vakioitun nollapuhtausnäytteen ottotapaan käytettiin useimmiten enemmän testinestettä, kuin komponentin testaamiseen, joten standardin nollapuhtaudelle asettamat vaatimukset toteutuivat laboratorioissa vaadittua tiu-

kempina. Tehtyjen testien perusteella esitetään, että vakioidusta nollapuhtausnäytteen ottotavasta luovutaan ja siirrytään standardin mukaiseen näytteenottotapaan.

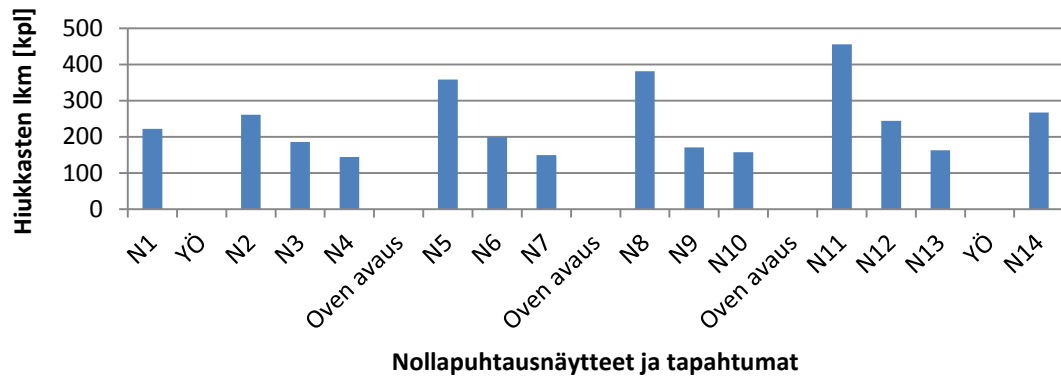
4.2 Lyhyen käyttökaton ja puhdastilan avaamisen vaikutus nollapuhauteen

Jokainen puhtaustutkimus aloitetaan puhdistamalla puhtaustestikaappi. Kaapin puhtaustaso todetaan ensimmäisestä nollapuhtausnäytteestä. Testikaapin alkupuhdistus tarvittavalle tasolle on työlästä ja vie paljon aikaa. Varsinaiseen komponentin testaamiseen päästään vasta kun nollapuhtausnäytteen on todettu olevan tarpeeksi puhdas. Nollapuhtausnäytteen analysointi taas edellyttää näytteen kuivaamista näyteuunissa ja uunin jälkeistä jäähtymistä. Testikaapin puhtaustason tiedetään huonontuvan (likaantuvan) ajan myötä, joten komponentista otettavat näytteet pitäisi ottaa välittömästi hyväksytyyn nollapuhtausnäytteen jälkeen. Iltapäivällä otettu ja seuraavana aamupäivänä analysoitu nollapuhtausnäyte ei välttämättä antaisi kaapin aamuisestä puhtaustasosta oikeaa kuvaa. Jotta testaaja saisi käytettyä työpäivän rajallisen työtuntimäärän maksimaalisesti hyväksyäkseen, pitäisi testikaappi puhdistaa edellisenä iltapäivänä ja ottaa nollapuhtausnäyte heti ensimmäiseksi seuraavana aamuna. Mikäli nollapuhtausnäyte olisi hyväksyttävällä tasolla, päästäisiin varsinaisen komponentin tutkimusta suorittamaan parhaimmillaan toisena päivänä keskipäivän aikoihin.

Komponenttien testaamiseen kuluva kokonaisaika saataisiin merkittävästi pienennettyä, mikäli komponenttien testaamista ei tarvitsisi aloittaa välittömästi hyväksytyyn nollapuhtausnäytteen jälkeen. Yön yli kestävän käyttökaton vaikutuksia ei oltu tutkittu vielä aikaisemmin. Yöllä tarkoitetaan tässä yhteydessä normaalien työpäivien välistä, iltapäivän ja seuraavan aamun välistä aikaa. Myöskään testikaapin puhdastilan oven avaamisen vaikutuksia ei oltu aikaisemmin tutkittu.

Yön mittaisen käyttökaton ja oven avaamisen vaikutuksien tutkimiseksi suoritettiin testisarja, johon sisällytettiin kaksi yön yli kestävää käyttökatoa ja kolme puhdastilan oven avausta. Testisarja aloitettiin ensimmäisen päivän iltapäivällä, jolloin huolellisesti pestystä testikaapista otettiin nollapuhtausnäyte. Toisen päivän aamuna kaapista otettiin kolme peräkkäistä nollapuhtausnäytettä, jonka jälkeen puhdastilan ovi avattiin. Oven avaamisella haluttiin simuloida komponenttien siirtämisen vaikutuksia testikaappiin. Simulointi toteutettiin kurottamalla testikaapin sisälle kuvitteellisia komponentteja. Tämän jälkeen testikaappi suljettiin ja kaapista otettiin jälleen kolme nollapuhtausnäytettä. Oven avaaminen ja komponenttien siirtämisen simulointi toteutettiin kaikkiaan kolme kertaa. Kolmannen oven avauskerran jälkeen testikaapista otettiin vielä kolme nollapuhtausnäytettä, jonka jälkeen kaapin käyttöön tuli taas yön mittainen käyttökato. Testisarjan kolmannen päivän aamuna otettiin vielä viimeinen nollapuhtausnäyte. Kaikki nollapuhtausnäytteet otettiin samalla määrällä testinestettä ja samalla pesutavalla. Testi-

sarjan tuloksista saatiin käsitys testikaapin puhtauden kehityksestä ajanjaksolta, joka ulottui kolmelle eri vuorokaudelle. Testisarjan tulokset on esitetty kuvassa 23.



Kuva 23. Lyhyen käyttökatkon ja testikaapin luukun avaamisen vaikutukset nollapuhtauden kehitykseen.

Kuvaajaan on merkitty kronologisessa järjestyksessä otetut nollapuhtausnäytteet (N1 - N14). Pylväät kuvastavat näytteistä analysoitujen hiukkasten kokonaislukumääriä sisältäen luokat D - K.

Käyttökatkon aikana testikaapin puhtaustaso todella laski (huonontui). Käyttökatkoissa hiukkaslukumäärät kasvoivat ensimmäisenä yönä 39:llä ja seuraavana yönä 104 hiukkasella. Käyttökatkoa suurempi vaikutus oli testikaapin puhdistilan avaamisella. Testisarjassa suoritetuissa kannen avauksissa nollapuhtausnäytteen hiukkasten kokonaislukumäärän keskimääräinen kasvu oli 248 hiukkasta. Nollapuhtausnäytteiden puhtaustasojen heilahteluista huolimatta jokainen testisarjan nollapuhtausnäyte oli hiukkasten kokonaislukumäärän suhteen hyväksyttävällä tasolla.

Suuria K- tai J-luokan hiukkasia esiintyi seitsemässä näytteessä 14:sta. Näistä hiukkasia löytyi kuitenkin vain 1-2 kappaletta. Suuret hiukkaset esiintyivät näytteissä satunnaisesti eikä käyttökatkoilla tai puhdistilan kannen avauksilla näyttänyt olevan vaikutusta niihin.

4.3 Prosessin päätepisteen määrittäminen ja tulosten laskenta

Standardin määritelmien [6] ja puhtaustestikaapin sekä mikroskoopin käytön ominaisuuksien yhteensovittaminen prosessin päätepisteen määrittämisen ja tulosten laskemisen suhteen ei onnistu täysin aukottomasti. Standardin mukaan komponentista otetaan ensin kolme näytettä (S₁-S₃) jotka analysoidaan. Mikäli viimeisessä näytteessä (S₃) on 10 % tai vähemmän hiukkasia kaikkien kolmen näytteen hiukkasten kokonaislukumäärästä (yhtälön (1) mukaan luvussa 2.2.3), on prosessi saavuttanut päätepisteensä. Mikäli päätepistettä ei ole vielä saavutettu, otetaan komponentista näytteitä lisää yksi kerrallaan,

kunnes 10 % raja saavutetaan. Päätepisteen saavuttamisen jälkeen testilaitteistosta otetaan vielä prosessin lopun nollapuhtausnäyte.

Mikroskooppianalyysi vaatii näytteiden kuivaamisen näyteuunissa ja uunin jälkeen jäähdyttämisen huoneen lämpöiseksi ennen analyysia. Analysointi ottaa myös oman aikansa, joten mahdollisesti tarvittavien prosessin loppupään näytteiden (S_4 - S_6) näytteidenottoväli kasvaa suureksi. Mitä pidempään varsinainen irrotusprosessi kestää, sitä todennäköisemmin kasvaa virheellisten hiukkasten määrä näytteissä ja testikalustossa. Prosessiin kuluvan ajan ja virheellisten hiukkasten lukumäärän minimoimiseksi laboratoriossa oli päädytty ottamaan komponenteista suoraan kuusi kappaletta näytteitä ja heti näytteiden ottamisen jälkeen lopun nollapuhtausnäyte.

Standardin määrittelyiden ja laboratorion menetelmien yhdistämisessä jää tulkinnan varaiseksi, mitä pitää tehdä, kun prosessi saavuttaa päätepistensä ennen viimeistä näytettä (S_6). Standardin mukaista nollapuhtausnäytettä ei tällöin ole saatavilla koska päätepisteen ja nollapuhtausnäytteen välillä on ylimääräisiä komponentista otettuja näytteitä. Vaihtoehdoiksi jää tällöin joko analysoida ja sisällyttää tutkimukseen kaikki komponentista otetut kuusi näytettä tai hylätä päätepisteen saavuttamisen jälkeen komponentista otetut ylimääräiset näytteet ja siirtyä suoraan lopun nollapuhtausnäytteen analysointiin. Laboratorioon ei oltu tehty selkeää toimintatapaohjeistusta, miten tilanteessa tulisi menetellä. Absoluuttisesti tarkin ja samalla myös parhaiten standardin ohjeistusta noudatteleva menettelytapa olisi analysoida kaikki kuusi otettua näytettä. Toisaalta näin tutkimukseen kuluisi myös eniten aikaa.

Luvussa 3.2 tutkituista viidestä komponentista oli työn tässä vaiheessa ehditty tutkia kolme komponenttia. Tutkimuksissa oli päädytty analysoimaan kaikki kuusi komponentista otettua näytettä. Irrotuskäyrän muodostamisen jälkeen todettiin, että jokainen näistä kolmesta irrotusprosessista oli saavuttanut päätepistensä jo kolmannen näytteen (S_3) kohdalla. Tämä herätti idean vielä kolmannelle mahdollisesta menettelytavasta. Ideaa testattiin kahden viimeisen komponentin (komponentit D ja E) testauksessa.

Komponenttien testeissä otettiin ylimääräinen nollapuhtausnäyte kolmannen ja neljännen näytteen välissä. Komponentit otettiin pois testikaapista nollapuhtausnäytteen ottamisen ajaksi. Mikäli prosessi saavuttaisi päätepistensä kolmen ensimmäisen näytteen jälkeen, voitaisiin seuraavaksi analysoida nollapuhtausnäyte niin kuin standardi edellyttää.

Kummankin komponentin kohdalla kaikki otetut nollapuhtausnäytteet olivat hiukkasten lukumäärän puolesta hyväksyttävällä tasolla. Komponentin D irrotusprosessi ei ollut saavuttanut päätepistettään kolmannen näytteen jälkeen, joten ylimääräinen nollapuhtausnäyte osoittautui täysin turhaksi. Päätepiste saavutettiin neljännen näytteen (S_4) kohdalla. Komponentin E irrotusprosessi saavutti päätepistensä kolmannella näytteellä. Kummankin komponentin irrotusprosessissa kolmen viimeisen näytteen (S_4 - S_6) hiuk-

kasten lukumäärät kasvoivat asteittain hieman jostain syystä. Taulukossa 17 on esitetty komponenttien D ja E CCC-koodeiksi muutetut tulokset 1000 cm²:n kontrollipinta-alaa kohti prosessin päätepisteen sekä kaikkien kuuden näytteen tuloksilla.

Taulukko 17. Komponenttien D ja E CCC-koodit prosessin päätepisteen ja kaikkien kuuden näytteen tuloksilla laskettuna 1000 cm²:n kontrollipinta-alaa kohti.

Komponentti	Näytteiden lkm	CCC-koodi / 1000 cm ²
D	4	CCC A (D19 / E16 / F13 / G11 / H11 / I8 / J8 / K8)
D	6	CCC A (D19 / E16 / F13 / G11 / H11 / I8 / J8 / K8)
E	3	CCC A (D19 / E17 / F15 / G13 / H13 / I10 / J9 / K7)
E	6	CCC A (D19 / E17 / F15 / G13 / H13 / I11 / J10 / K8)

Taulukosta 17 nähdään, että prosessille määritetyn päätepisteen jälkeen tuloksiin sisällytetyt näytteet eivät ole muuttaneet CCC-koodiksi muunnettua tulosta ollenkaan komponentin D kohdalla. Komponentin E kohdalla irrotusprosessin kolmen viimeisen näytteen sisällyttäminen tuloksiin nosti kolmen suurimman hiukkaskoon puhtaustasoa yhdellä pykälällä.

Ylimääräisen nollapuhtausnäytteen ottaminen keskellä prosessia ei käytännössä osoittautunut tehokkaaksi tavaksi menetellä. Toimenpiteeseen kului aikaisempaa käytäntöä enemmän aikaa, eikä tulosten tarkkuutta saatu parannettua. Koska nollapuhtausnäytteet olivat hyväksyttävällä tasolla jopa keskellä irrotusprosessia, ei prosessin päätepisteen ja nollapuhtausnäytteen välistä huomiotta jätettävien näytteiden koettu vaikuttavan merkittävästi nollapuhtausnäytteen puhtaustasoon.

Ensimmäisten kolmen komponentin kohdalla irrotusprosessin päätepiste oli saavutettu kolmen ensimmäisen irrotuskerran jälkeen. Taulukossa 18 on esitetty komponenttien A, B ja C CCC-koodeiksi muutetut tulokset 1000 cm²:n kontrollipinta-alaa kohti prosessin päätepisteen sekä kaikkien kuuden näytteen tuloksilla.

Taulukko 18. Komponenttien A, B ja C CCC-koodit prosessin päätepisteen ja kaikkien kuuden näytteen tuloksilla laskettuna 1000 cm²:n kontrollipinta-alaa kohti.

Komponentti	Näytteiden lkm	CCC-koodi / 1000 cm ²
A	3	CCC A (D18 / E16 / F13 / G12 / H11 / I9 / J7 / K6)
A	6	CCC A (D19 / E16 / F14 / G12 / H12 / I9 / J8 / K7)
B	3	CCC A (D20 / E18 / F15 / G13 / H13 / I9 / J7 / K8)
B	6	CCC A (D20 / E18 / F15 / G13 / H13 / I10 / J8 / K8)
C	3	CCC A (D17 / E15 / F12 / G11 / H11 / I7 / J7 / K4)
C	6	CCC A (D17 / E15 / F13 / G11 / H11 / I8 / J7 / K4)

Taulukosta 18 nähdään, että irrotusprosessin päätepisteen jälkeen tuloksiin huomioidut näytteet vaikuttivat maksimissaan yhden puhtausluokan verran. Pääosin tulokset pysyivät muuttumattomina.

Komponentista otettujen ylimääräisten näytteiden huomiotta jättämisestä kysyttiin myös Pall Ltd:n kouluttajalta, Gilles Touchardilta. Hän suositteli analysoimaan vielä yhden näytteen prosessin päätepisteen jälkeen eli varmistamaan yhdellä ylimääräisellä näytteellä, että prosessin päätepiste on todella saavutettu [21].

Irrotusprosessin päätepisteen jälkeen tehtävien ylimääräisten analyysien tekeminen havaittiin tulosten valossa turhiksi. Ylimääräisten näytteiden sisällyttäminen tuloksiin ei tuonut merkittävää muutosta komponentin puhtaustutkimuksen tuloksiin. Ylimääräisten näytteiden huomiotta jättämisen ei todettu vaikuttavan nollapuhtausnäytteen informaatioarvoon. Nollapuhtausnäytteen tarkoitus on kertoa testikaluston puhtaustaso tutkittavaan komponenttiin nähden. Prosessin tehokkuutta ajatellen ylimääräisten näytteiden analysoimatta jättäminen tuo merkittävää säästöä ajan käytössä. Näistä syistä TTY/IHA laboratoriossa päädyttiin määrittelemään irrotusprosessin päätepiste täysin standardin mukaisesti, ylimääräisten näytteiden analyysit jätetään tekemättä ja päätepiesteestä siirrytään suoraan jälkimmäisen nollapuhtausnäytteen analysointiin.

4.4 Suuret kuidut irrotusprosessin lopun nollapuhtausnäytteessä

ISO 16232 -standardi asettaa nollapuhtausnäytteen hyväksymiselle rajoitukset hiukkasten lukumäärälle sekä suurimmalle sallittavalle hiukkaselle [6]. Puhtaustestikaapeilla tehtävien komponenttipuhtaustutkimusten nollapuhtausastot pysyvät pääosin hyväksyttävällä tasolla nollapuhtausnäytteistä analysoitujen hiukkasten lukumäärien osalta. Ongelmia aiheutti nollapuhtausnäytteiden ajoittaiset muutamat liian suuret pitkänmalliset hiukkaset eli kuidut. Erityisesti ongelma painottui toiseen nollapuhtausnäytteeseen. Ensimmäinen nollapuhtausnäyte voidaan ottaa uusiksi useita kertoja ennen komponentin testaamisen aloittamista, mutta toisen nollapuhtausnäytteen ottamiseen tarjoutuu vain yksi mahdollisuus. Ongelmallisia kuituja esiintyi silloin tällöin kolmessa suurimmassa hiukkaskokoluokassa ja lukumäärällisesti vain muutamia, yhdestä viiteen kappaletta yhteensä. Toisesta nollapuhtausnäytteestä löytyvät liian suuret hiukkaset pakottavat kirjoittamaan komponentin tuloksiin merkinnän liian suurista hiukkasista nollapuhtausnäytteessä vaikka hiukkasia löytyisikin vain yksi kappale.

Vain muutaman suuren hiukkasen aiheuttamalle toisen nollapuhtausnäytteen osittaiselle hylkäämiselle haluttiin löytää vaihtoehtoinen käsittelytapa, joka olisi standardin hengen mukainen ja jonka avulla tutkimuksen tilanneelle asiakkaalle voitaisiin antaa tutkimuksen tulokset ilman kysymyksiä herättäviä merkintöjä. Ongelmallisten kuitujen alkupe-
räästä ei ollut tietoa, joten niitä ei voitu vain hylätä analyysin tuloksista.

Ongelman poistamiseksi kehitettiin menettelytapa, jossa prosessin päätteeksi otettiin yhden nollapuhtausnäytteen sijasta kaksi nollapuhtausnäytettä. Menetelmä perustui olettamukselle, että prosessissa esiintyvät suuret hiukkaset ovat peräisin ainoastaan tutkittavasta komponentista. Tällöin toisen nollapuhtausnäytteen muutamia suuria hiukkaset johtuisivat vain riittämättömästä roiskealueiden huuhtelemisesta prosessin aikana. Mahdolliset prosessin aikaiset hiukkaset hukkuisivat aina seuraavaan näytteeseen ja muodostuisivat ongelmaksi vasta nollapuhtausnäytteessä, jossa suuria hiukkasia ei sallita. Koska ongelman ytimeksi oletettiin riittämätön roiskealueiden huuhtelu ja hiukkasten lähteeksi tutkittava komponentti, prosessin lopun ensimmäisen nollapuhtausnäytteen tulos lisättäisiin tutkittavan komponentin hiukkasiin. Prosessin lopun jälkimmäistä nollapuhtausnäytettä käsiteltäisiin normaalina lopun nollapuhtausnäytteenä.

Menetelmää kokeiltiin komponenttien A ja D testauksessa. Komponentin A testissä tutkittiin nollapuhtauden kehitystä irrotusprosessin jälkeen viidellä nollapuhtausnäytteellä ja komponentin D testissä kokeiltiin suoraan kehitettyä menetelmää, jossa lopuksi nollapuhtausnäytteitä otettiin kaksi kappaletta. Taulukossa 19 on esitetty komponenttien A ja D irrotusprosessien lopuksi otettujen nollapuhtausnäytteiden tulokset. Näytteiden alaindeksit on aloitettu numerosta ”2”, korostamaan, että kyseessä on irrotusprosessin lopun nollapuhtausnäytteet.

Taulukko 19. Irrotusprosessin lopuksi otettujen nollapuhtausnäytteiden kehitys.

Kokoluokka	Hiukkasen koko x [μm]	A					D	
		B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₂	B ₃
D	$25 \leq x < 50$	889	232	186	202	156	494	211
E	$50 \leq x < 100$	159	44	20	25	30	113	46
F	$100 \leq x < 150$	15	4	2	4	3	19	10
G	$150 \leq x < 200$	5	3	3	0	3	7	3
H	$200 \leq x < 400$	5	5	2	2	0	4	2
I	$400 \leq x < 600$	2	1	0	0	0	1	0
J	$600 \leq x < 1000$	1	1	1	0	0	0	1
K	$1000 \leq x$	1	1	1	0	0	0	1
YHT		1077	291	215	233	192	638	274

Molempien komponenttien kohdalla testituloksista nähdään, että hiukkasten kokonaislukumäärä laskee radikaalisti toisessa näytteessä (B₃). Lisäksi komponentin A kohdalla otetuista useista näytteistä nähdään, että hiukkasten lukumäärän taso on melko lailla vakiintunut toisesta näytteestä eteenpäin. Hiukkasten kokonaislukumäärä ei kuitenkaan ollut ongelman ydin vaan muutamia liian suuria hiukkaset. Komponentin A kohdalla suuria hiukkasia esiintyy peräkkäisten näytteiden myötä vähemmän. Näytteitä on tosin tarvittu viisi kappaletta, ennen kuin kolmen suurimman kokoluokan hiukkasia ei enää ole löydetty. Komponentin D kohdalla suuria H – K -luokan hiukkasia löytyi B₃ näytteestä vähemmän kuin näytteestä B₂, mutta suurimpien löydettyjen hiukkasten koko kasvoi.

Ennen testien tekemistä menetelmästä kysyttiin mielipidettä Pall Ltd:n kouluttajalta, Gilles Touchardilta. Vastauksen saaminen venyi usealla kuukaudella, joten menetelmän testaus oli ehditty jo suorittamaan, kun vastaukset lopulta saapuivat. Vastauksessaan Touchard toteaa, että jälkimmäisen nollapuhkausnäytteen suurten hiukkasten alkuperästä ei voida olla varmoja. Tästä syystä nollapuhkausnäytteistä löytyneitä hiukkasia ei voida lisätä komponentista otettujen näytteiden testituloksiin [21]. Vastaus tuki testien tuloksia ainakin suurten hiukkasten osalta. Suurten hiukkasten esiintyminen vaikutti satunnaiselta jo pelkästään näiden kahden testisarjan perusteella. Havainto suurten hiukkasten esiintymisen satunnaisuudesta vahvistui, kun erilaisten nollapuhkausnäytteiden tuloksia oli tutkittu laajemmin (luvut 4.1 ja 4.2).

Kahden nollapuhkausnäytteen ottamisen menetelmästä irrotusprosessin lopussa päätettiin luopua kokonaan. Menetelmä todettiin toimimattomaksi ja standardin vastaiseksi. Seuraavaksi suurten hiukkasten ongelmaa ryhdyttiin selvittämään mittausprosessin epäpuhtauslähteiden kautta. Mikäli mittausprosessista voitaisiin paikallistaa kuitujen lähde, voitaisiin se pyrkiä eliminoimaan prosessista pois tai vähintäänkin tunnistetut virheelliset hiukkaset voitaisiin jättää huomiotta kalvosuodattimien analyysien tuloksista.

4.4.1 Mittausprosessin epäpuhtauslähteet

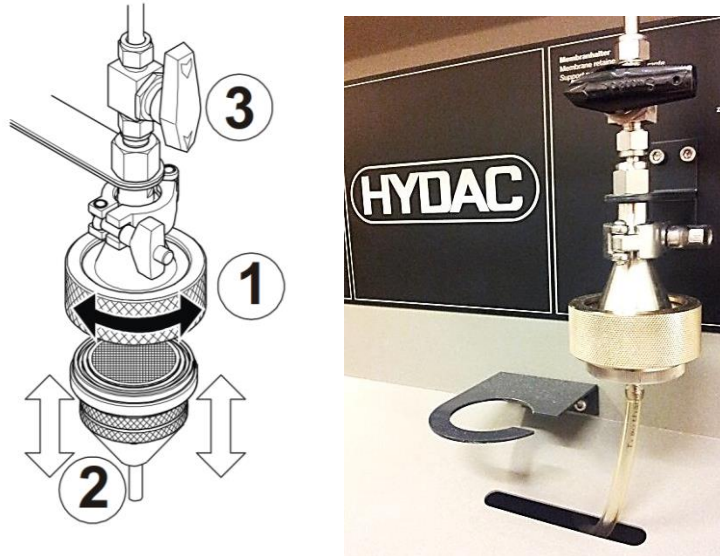
Painehuuhtelun mittausprosessin lopullisissa tuloksissa näkyvät kaikki kalvosuodattimen kohtaamat hiukkaset matkallaan suodattimien paketista mikroskoopin näytealustalle. Ideaalitapauksessa kalvosuodattimelle päätyisi ainoastaan tutkittavasta komponentista irronneet hiukkaset. Mittausprosessin epäpuhtaus- eli virhelähteiden selvittämisessä purettiin nollapuhkausnäytteen ottaminen osiin ja selvitettiin kuinka paljon, minkä ko-koisia ja mistä prosessin vaiheesta hiukkasia kalvosuodattimelle päätyy.

Puhtaustestikaapin puhtastilasta peräisin olevien hiukkasten lukumäärä riippuu nollapuhkausnäytteen ottamiseen käytetystä testinesteen määrästä sekä testikaapin sen hetkestä puhtaustasosta. Testikaapin puhtaus voi vaihdella suurestikin, riippuen siitä, mitä testikaapilla on viimeksi tehty ja kuinka hyvin se on käytön jälkeen puhdistettu. Prosessin muista osa-alueista peräisin olevien hiukkasten lukumäärissä oletettiin tapahtuvan vain vähän muutoksia eri ajankohtina. Muiden osa-alueiden oletettiin myös tuovan vain murto-osan nollapuhkausnäytteen hiukkasten kokonaislukumäärästä. Suurimpien hiukkasten alkuperästä osattiin esittää vain arvailuja. Tavoitteena oli löytää, eristää ja eliminoida prosessista virhettä aiheuttavien vaiheiden vaikutuksia. Erityisesti haluttiin löytää nollapuhkausnäytteissä ajoittain esiintyvien muutamien suurten hiukkasten lähde.

Kalvosuodattimen pidike

Kalvosuodatin kiinnitetään puhtaustestikaapissa kalvosuodattimen pidikkeeseen (kuvassa 24). Pidikkeestä oletettiin irtoavan hiukkasia kalvosuodattimelle aina suodattimen vaihdon yhteydessä. Ensimmäiseksi suljetaan pidikkeen sulkuventtiili (kuvassa 24 osa 3). Kalvosuodatin vaihdetaan kiertämällä pidikkeen kiinni kiristävä osa (osa 1) auki.

Tämän jälkeen pidikkeen alaosa (osa 2) lasketaan alas, jonka päällä myös kalvosuodatin lepää. Alaosa asetetaan omaan telineeseensä roikkumaan pystyasentoon, jonka jälkeen kalvosuodattimet vaihdetaan. Vaihdon jälkeen alaosa siirretään jälleen vasten pidikkeen yläosaa ja kiinnitetään kiristävällä osalla taas paikoilleen. Pidikkeen sulkuventtiili (osa 3) pidetään kuvasta poiketen suljettuna koko vaihdon ajan.



Kuva 24. Hydac CTU-1230 puhtaustestikaapin kalvosuodattimen pidike.

Laboratorion molempien puhtaustestikaappien kalvosuodattimen pidikkeet ovat hyvin samanlaiset. Ainoa merkittävä ero on, että CTU-1230:n pidikkeen kiinni kiristävässä osassa on kierteet, kun taas PCC-41:n vastaavassa on pikalukitus. Pikalukituksen kiristämiseen osaa joutuu kiertämään vain noin neljänneskierroksen, kun kiertetyt pidikkeen kiristäminen vaatii useamman kierroksen. Molemmissa kaapeissa kiristävä osa sijaitsee kalvosuodattimen vaihdon aikana suodattimen yläpuolella. Kiristävä osa on pidikkeen ainoa liikkuva osa ja todennäköisin hiukkasten aiheuttaja. Suodattimen vaihdon aikana kiristävää osaa joutuu pitämään käsin paikoillaan ja se voi päästä kolisemaan pidikkeen muihin osiin. Yläpuolinen sijainti kalvosuodattimeen nähden mahdollistaa hiukkasten pääsyn kalvosuodattimelle pidikkeestä.

Kalvosuodattimen vaihto CTU-1230:een kestää ajallisesti pidempään kuin PCC-41:een ja aiheuttaa näin myös enemmän liikettä, kolinaa ja hankaamista kalvosuodattimen pidikkeelle. Myös pidikkeessä olevan kierteytyksen oletettiin aiheuttavan hiukkasia todennäköisemmin kuin pikalukituksen. Näistä syistä pidikkeen osuutta epäpuhtauslähteenä tutkittiin CTU-1230:n pidikkeellä.

Pidikettä tutkiva testisarja otettiin välittömästi testinesteen määrän vaikutuksia nollapuhtauteen tutkineen testisarjan (luku 4.1) jälkeen. Nollapuhtausnäyte olisi siis ollut hyväksyttävällä tasolla pidikkeen testisarjan aikana ja näin myös kalvosuodattimen pidike oli varmasti puhdas. Pidikkeen sulkuventtiili pidettiin kiinni koko pidikettä tutkivan testisarjan ottamisen ajan.

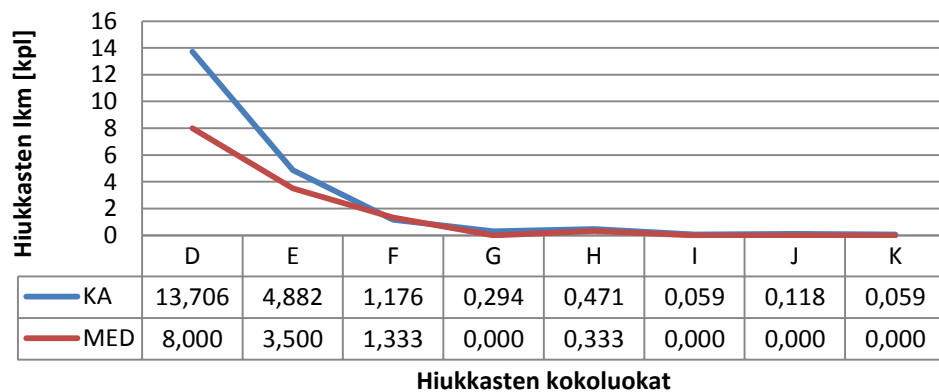
Testisarjassa kalvosuodattimen pidikkeeseen vaihdettiin puhdas kalvosuodatin paikoilleen 1 – 3 kertaa. Kalvosuodattimia käytettiin 10 kappaletta ja ne kävivät pidikkeessä seuraavasti:

- suodattimet 1 – 5 yhden kerran
- suodattimet 6 – 8 kaksi kertaa
- suodattimet 9 – 10 kolme kertaa

Kalvosuodattimet analysoitiin mikroskoopilla ja tulokset jaettiin suodattimelle tehtyjen vaihtojen määrällä. Hiukkasia tarkasteltiin kokoluokissa D – K. Yhdelle vaihdolle laskettu hiukkasten lukumäärä vaihteli suuresti testisarjassa. Koko sarjasta laskettu hiukkasten lukumäärän keskiarvo oli 21,67 ja mediaani 16,75 hiukkasta yhtä vaihtoa kohden. Suurin määrä yhdelle vaihdolle laskettuja hiukkasia oli 52 kappaletta ja pienin määrä vain kuusi kappaletta.

Suodattimen vaihtokertojen määrä ei näkynyt yksittäisten kalvosuodattimien analyysien tuloksista. Tämä oli kuitenkin odotettu tulos. Suodattimen vaihto tehdään käsin ja pidike sijaitsee testikaapin alaosassa. Testaaja joutuu suorittamaan vaihdon melko epäergonomisessa asennossa ja huolellisesta työtavasta huolimatta, ajoittain pidikkeen osat pääsevät hieman kolahtamaan toisiinsa.

Kuvassa 25 on esitetty yhdelle vaihdolle laskettujen tulosten keskiarvo sekä mediaani. Testisarjassa tehtiin yhteensä 17 kalvosuodattimen vaihtoa jaettuna kymmenelle kalvosuodattimelle edellä mainitulla tavalla.



Kuva 25. Kalvosuodattimen pidikkeestä yhtä suodattimen vaihtoa kohti laskettujen hiukkasten keskiarvo ja mediaani kokoluokittain.

Tulokset osoittavat että suodattimen pidikkeestä aiheutuu ajoittain suuria hiukkasia. Suurten hiukkasten läsnäolo muuttuu merkitykselliseksi puhtaiden komponenttien ja erityisesti nollapuhtausnäytteiden yhteydessä. Pienten hiukkasten määrät ovat hyvin vähäisiä verrattuna esimerkiksi hyväksyttävällä tasolla olevaan nollapuhtausnäytteeseen, jossa D-kokoluokan hiukkasia voidaan sallia muutamia satoja.

Kalvosuodatin ja mikroskoopin näytealusta

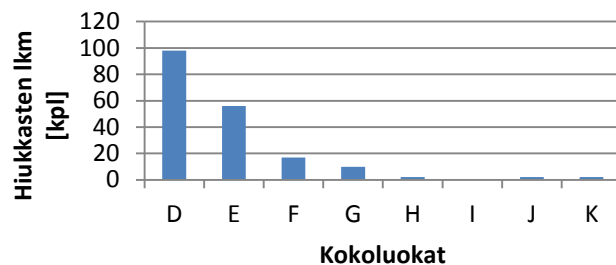
Uuden kalvosuodattimen oletettiin olevan täysin puhdas mutta tätä ei ollut laboratoriossa testattu aikaisemmin. Mikroskoopin näytealusta puhdistetaan ennen jokaista analyysiä, mutta siihen oletettiin jäävän joitain hiukkasia. Tätäkään ei ollut aikaisemmin todennettu.

Uusien kalvosuodattimien puhtautta ei voitu erikseen tutkia, koska kalvosuodatin on asetettava mikroskoopin näytealustalle analyysiä varten. Myöskään näytealustaa ei voitu tutkia erikseen, sillä se tarvitsee valkoisen puhtaan pohjan, jota vasten hiukkasia etsitään (koskee lähinnä näytealustan lasia). Molemmat tutkittiin siis samalla kertaa. Mikroskoopin näytealustalle asetettiin paketista otettu uusi kalvosuodatin, joka analysoitiin. Testejä tehtiin kolme kappaletta.

Kolmesta tehdystä analyysistä löydettiin yksi F-luokan hiukkanen, E-luokan hiukkasia yhteensä kolme kappaletta (2 kpl, 1 kpl, 0 kpl) ja D-luokan hiukkasia keskimäärin kuusi kappaletta (6 kpl, 7 kpl, 6 kpl). Testi osoitti, että kalvosuodattimien ja mikroskoopin näytealustan osuus nollapuhtausnäytteen hiukkasten kokonaislukumäärästä on häviävän pieni.

Mittaaja, petrimalja sekä huoneilma

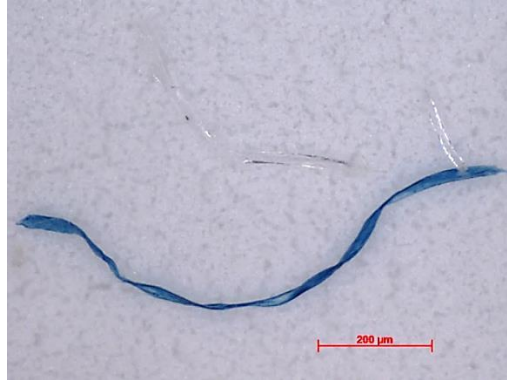
Mittaajan toiminnan vaikutuksien tutkiminen on hyvin haastavaa. Jokaisella mittaajalla on omat tapansa työskennellä ja huolellisuus on hyvin suhteellinen käsite. Mittaajan vaikutuksia näytteiden puhtauteen tutkittiin laboratoriossa käytettävän työtakin kautta. Laboratoriossa käytetään valkoista työtakkia, jotta takista mahdollisesti irtoavat hiukkaset erottuisivat mahdollisimman huonosti mikroskooppianalyysissä. Valkoinen hiukkanen vasten valkoista kalvosuodatinta ei pitäisi näkyä hiukkasena kuva-analyysohjelmistolle. Takin vaikutuksen testissä työtakin hihaa hangattiin muutaman kerran itseään vasten sormien välissä puhtaan kalvosuodattimen päällä. Tämän jälkeen suodatin analysoitiin mikroskoopilla. Suodattimelle tehdyn analyysin tulokset on esitetty kuvassa 26.



Kuva 26. Työtakin hihasta irronneet hiukkaset kokoluokittain.

Kalvosuodattimelta löytyi 187 hiukkasta. Neljän suurimman kokoluokan hiukkasia löytyi kutakin kaksi kappaletta, lukuun ottamatta I-luokan hiukkasia, joita ei löytynyt

ollenkaan. Kaikki suurimmat hiukkaset olivat pitkänmallisia kankaan kuituja. Kuvassa 27 on esitetty esimerkkejä työtakista löydetystä isoista hiukkasista.



Kuva 27. Valkoisesta työtakista löytyneitä hiukkasia. Kuvan punainen vertailumitta on 200 μm .

Kuvassa näkyy alapuolella sininen pitkänmallinen kuitu ja sen yläpuolella näkyy vai-voin valkoinen tai läpinäkyvä kuitu. Molemmat ovat peräisin valkoisesta työtakista. Valkoisesta kuidusta kuva-analyysiohjelmisto tulkitse vain osan (tummat reunat) hiukkasiksi. Kaikki suuret tunnistetut hiukkaset olivat värillisiä. Testi osoittaa, että valkeat kuitumaiset hiukkaset erottuvat kalvosuodattimelta huonosti eikä kuva-analyysiohjelmisto juurikaan havaitse niitä. Toisaalta vain muutamalla työtakin hankaisulla kalvosuodattimen yllä saatiin aikaiseksi miltei 200 hiukkasta suodattimelle. Lisäksi työtakista irtoaa kaiken värisiä hiukkasia, muitakin kuin valkoisia.

Laboratorion huoneilman, petrimaljan sekä näyteuunin testaus tiivistettiin yhteen testiin, jossa kalvosuodatin asetettiin petrimaljassa 90 minuutiksi avoimena laboratorion pöydälle keskeiselle paikalle. Samanaikaisesti laboratoriossa suoritettiin muita testitoimenpiteitä, jotta ilmanliikkeet laboratorion sisällä vastaisivat normaalia laboratoriotyöskentelyä. Petrimalja siirrettiin 90 minuutin jälkeen muiden näytteiden kanssa näyteuuniin puoleksi tunniksi. Näyte analysoitiin mikroskoopilla jäähtymisen jälkeen.

Näytteestä löydettiin kahdeksan hiukkasta, neljä D-luokan, kolme E-luokan ja yksi suurimman K-luokan hiukkanen. Suurin hiukkanen oli musta pitkä kuitu. Samanlaisia kuituja oli löydetty työtakin hihan testissä. Hiukkasten alkuperää ei testien tuloksilla voida päätellä, mutta on todennäköistä että ne eivät ole peräisin laboratorion ilmastoinnista vaan ovat saapuneet laboratorioon henkilöiden mukana. Kun otetaan huomioon, että kalvosuodatin oli laboratorion huoneilmassa hyvin pitkään verrattuna normaalissa testauksessa kuluvaan aikaan, voidaan todeta, ettei laboratorion ilmanlaatu, näyteuuni eikä petrimalja vaikuta merkittävästi testituloksiin.

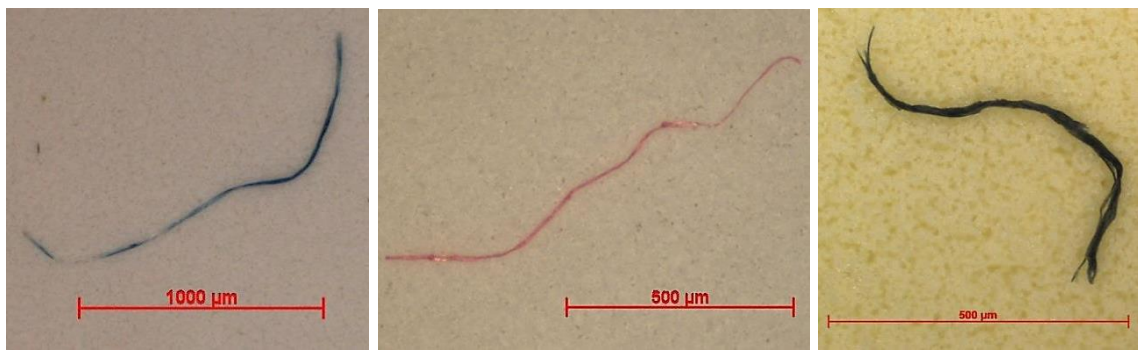
Nollapuhtausnäytteen ottamisen vaiheista merkittävin määrä hiukkasia löydettiin kalvosuodattimen pidikkeen näytteistä. Tämä työvaihe altistaa kalvosuodattimen eniten testiaan läsnäololle ja liikkeille. Suurten kuitujen lähde ei pystytty näytteistä aukot-

tomasti tunnistamaan, mutta todennäköisesti ne ovat peräisin testaaajasta itsestään ja tarkemmin testaaajan vaatetuksesta. Varmuudella voitiin sanoa, että tutkimuksessa löytyneet hiukkaset eivät olleet peräisin puhtaustestikaapin puhdastilasta.

4.4.2 Suurten kuitujen mitätöinti

Tutkimuksen alussa nollapuhtausnäytteissä ajoittain esiintyneitä suuria kuituja ei voitu hylätä mikroskooppianalyysin tuloksista, koska kuitujen alkuperästä ei voitu esittää kuin arvauksia. Epäpuhtauslähteitä tutkimalla onnistuttiin paikantamaan todennäköisin suurten kuitujen aiheuttaja testaaajan vaatetukseksi sekä kalvosuodattimen pidikkeen opeointi työvaiheeksi, jossa kuituja todennäköisimmin syntyy.

Kuvassa 28 on esitetty kolme tyypillistä nollapuhtausnäytteistä löytynyttä suurta kuitua. Mittakaava on merkitty kuviin punaisella janalla. Ensimmäisen kuvan mittakaava on 1000 μm ja kahden jälkimmäisen 500 μm . Kuidut ovan vastaavanlaisia kuin työtakista löytyneet.



Kuva 28. Esimerkkejä nollapuhtausnäytteistä löytyneistä suurista kuiduista.

Tyypillisten virhekuitujen tunnistaminen kalvosuodattimien analyysien tuloksista ja paikallistaminen irrotusprosessista antaa perusteet tuloksia vääristävien kuitujen hylkäämiselle. Virhekuidut ovat melko helposti tunnistettavissa niin nollapuhtausnäytteistä kuin varsinaisista komponenttien puhtausnäytteistä, kun esiintymistiheys on satunnaisesti vain muutamia kuituja yhtä kalvosuodatinta kohti. Mikäli tutkittavasta komponentista löydetään vastaavanlaisia kuituja, löytyy niitä tavallisesti merkittävästi enemmän.

Mikroskooppianalyysin tulosten tulkinnassa huomioon otettavista tai huomiotta jätettävistä kuiduista kysyttiin myös Pall Ltd:n kouluttaja Gilles Touchardilta [21]. Vastauksessaan Touchard toteaa, että ei-metalliset kuidut voivat suurissa määrin olla aivan yhtä haitallisia järjestelmälle, kuin suuret yksittäiset metalliset hiukkaset. Kuidut voivat kasautua yhteen ja aiheuttaa järjestelmän vikaantumista ja tukkeutumista. Kuiduksi määritellään Touchardin mukaan hiukkaset, jotka ovat kooltaan yli 100 μm ja joiden pituus on vähintään kymmenkertainen hiukkasen halkaisijaan nähden. Määritelmään sopivia metallisia hiukkasia ei tule kuitenkaan koskaan käsitellä kuituina.

Nollapuhtausnäytteeseen Touchard kertoo hyväksyvänsä maksimissaan viisi kappaletta yli 150 µm kuituja.

Vastaus tuki tutkimuksissa tehtyjä huomioita ja päätelmiä. Tutkimusten perusteella esitetään, että irrotusprosessi pidetään täysin ennallaan, mutta kalvosuodatinten analysointivaiheessa kiinnitetään erityishuomiota suurten kuitujen esiintymiseen. Selkeästi virheellisinä kuituina näyttäytyviä hiukkasia ei sisällytetä tutkitun komponentin tai nollapuhtausnäytteen tuloksiin. Sallittavaksi suurten kuitujen lukumääräksi esitetään viittä kappaletta. Mikäli suuria kuituja löytyy enemmän, toimitaan normaalisti ISO 16232 -standardin mukaan.

4.5 Nollapuhtausnäytteet rutiinitestauksessa

Laboratoriolle uusien komponenttien puhtaustutkimus suoritetaan aina ensimmäiseksi painehuuhteluprosessin verifiointikaavion mukaisesti (Liite A). Irrotusprosessi todetaan tehokkaaksi eli verifioiduksi, mikäli prosessi saavuttaa päätepisteensä ennen kuudetta näytettä ja lopuksi otettava nollapuhtausnäyte on hyväksyttävällä tasolla. Verifioitua prosessia voidaan myöhemmin käyttää samanlaisten komponenttien rutiinitestaukseen.

ISO 16232-3 -standardissa ei ole mainintaa prosessin päätteeksi tehtävästä nollapuhtausnäytteestä rutiinitestauksen yhteydessä. Rutiinitestausprosessin kaaviossa (kuvassa 2) on prosessin aloittava nollapuhtausnäyte merkitty selkeästi, mutta irrotusten jälkeen kaaviosta ei löydy nollapuhtausnäytettä. Standardin tekstiosassakaan ei puhuta rutiinitestauksen yhteydessä prosessin päättävästä nollapuhtausnäytteestä. [6] Standardi ei siis suoranaisesti kiellä toisen nollapuhtausnäytteen ottamista rutiinitestauksen yhteydessä, mutta standardista on selkeästi tulkittavissa, että se ei kuulu rutiinitestaukseen.

TTY/IHA laboratorioon oli vakiintunut käytäntö, jossa jokainen puhtaustutkimus lopetettiin nollapuhtausnäytteeseen. Nollapuhtausnäyte otettiin riippumatta siitä, oliko kyseessä komponentin irrotusprosessin verifiointi tai komponentin rutiinitestaus. Ylimääräisten nollapuhtausnäytteiden ottaminen ei ole vaikuttanut negatiivisesti komponenteille tehtyjen rutiinitestauksen tuloksiin, vaan ne ovat toimineet pikemminkin moninkertaisena varmistuksena tehtyjen testien verifiointeille.

Laboratorion tehokkuutta arvioitaessa ylimääräiset nollapuhtausnäytteet aiheuttavat huomattavan paljon lisää työtä. Lisäksi ylimääräiset näytteet ovat tulkittavissa jopa standardin [6] vastaisiksi. Pall Ltd:n kouluttaja Gilles Touchardin mielipide rutiinitestin lopuksi tehtävistä nollapuhtausnäytteistä oli selkeä. ISO-16232 -standardiin ei ole kirjoitettu ko. näytteistä mitään, joten niitä ei pidä myöskään ottaa [21]. Tehtyjen huomioiden perusteella ylimääräisen nollapuhtausnäytteen ottamisesta rutiinitestauksen yhteydessä luovuttiin.

5. METALLISENSORI KOMPONENTTIPUHTAUDEN SEURANTAAN

Komponenttipuhtautta voidaan tutkia ja kehittää laboratoriossa tehtävillä puhtaustutkimuksilla. Laboratoriotutkimuksilla saadaan hyvin tarkkoja tuloksia komponenttien puhtaustasoista, mutta tutkimusten tekeminen on aikaa vievää eikä seuranta ole jatkuvaa. Laboratoriossa tehtävien puhtaustutkimusten rinnalle halutaan kehittää menetelmiä komponenttipuhtauden seurantaan ja parantamiseen.

Komponenttipuhtaustutkimusten tekeminen ISO 16232 -standardin mukaisesti pienessä mittakaavassa komponentteja ja koneita valmistavissa yksiköissä ei tarvittavien laitteiden kustannusten vuoksi ole kannattavaa tai edes järkevää. Standardin menetelmät perustuvat epäpuhtauksien irrottamiseen tutkittavasta komponentista ja irrotettujen epäpuhtauksien analysointiin. Komponenttipuhtauden seurannassa voitaisiin soveltaen käyttää hyväksi komponenttivalmistajilta jo valmiiksi löytyviä laitteita. Komponenttipesukoneessa komponenteista irtoavien hiukkasten määrää voitaisiin havainnoida sopivanlaisella sensorilla pesunesteen välityksellä. Havainnointi pitäisi tehdä pesutapahtuman ja pesukoneen suodattimien välistä. Tällöin ei oltaisi kiinnostuneita irrotettujen hiukkasten määrästä kuten standardissa, vaan hiukkaslukumäärien kehityksestä pesuprosessin aikana. Tehokkaan pesuprosessin päätteeksi havaittaisiin vain vähän tai ei ollenkaan hiukkasia. Markkinoilta etsittiin sopivanlaista sensoria hankittavaksi TTY/IHA komponenttipuhtauslaboratoriolle testausta varten.

Pesunesteistä tapahtuva hiukkasten havainnointi asettaa sensorille kovat vaatimukset. Sensorin tulee kyetä havaitsemaan hiukkasia hyvin laajalta kokoalueelta, pienistä noin 25 µm hiukkasista aina yli 1000 µm hiukkasiin asti eivätkä pesunesteissä usein läsnä olevat ilmakuplat saa vaikuttaa sensorin mittaustuloksiin. Sensorin pitää olla myös yhteensopiva pesukoneissa käytettävien pesunesteiden kanssa. Ilmakuplien todennäköinen runsas läsnäolo rajasi valonpeittoon perustuvalla tekniikalla toteutetut sensorit kokonaan pois mahdollisuuksien joukosta, koska valonpeittoon perustuvat sensorit havaitsevat ilmakuplat hiukkasina. Sopivaa sensoria etsittiin sähkömagneettiseen induktioon perustuvista sensoreista.

Sähkömagneettiseen induktioon perustuvalla sensoritekniikalla havainnoidaan hiukkasten aiheuttamia magneettikentän muutoksia. Tyypillisesti induktiivinen kela on asetettu putken ympärille, jonka läpi nestevirtaus johdetaan. Nesteen mukana virtaavat hiukkaset aiheuttavat magneettikenttään muutoksia, jotka havainnoidaan sensorin elektroniikalla. Induktiotekniikka mahdollistaa nestevirtauksessa esiintyvien ilmakuplien eristämisen

tuloksista. Induktiosensorit pystyvät myös erittelemään havaitut hiukkaset rautametal-
leihin (Fe) ja ei-rautametalleihin (nFe). [22]

Metallisensoreita vertailtiin neljältä eri valmistajalta: Parker Kittiwake, Hydac, Internormen sekä Gastops. Vertailussa oltiin erityisesti kiinnostuneita sensoreiden mittaus-
alueesta sekä nesteiden yhteensopivuudesta. Vertailua varten kootut tiedot on kerätty
taulukoon 20.

Taulukko 20. Eri valmistajien metallihiukkassensoreiden vertailu. [23-27]

	Parker Kitti- wake MWDS	Hydac MCS 1310	Internormen MPS 01.2	Gastops MS3202
Ympäristön lämpötila:	-20°C – +70°C	-40°C – +70°C	-40°C – +70°C	-40°C – +70°C
Tiedonsiir- to:	RS485, TCP / IP	RS485, HSI	M12	-
Liitännät:	½" BSPP	SAE ½ - ISO 6263-1	DIN 2635 / ½" BSPP / lohkoasennus	G3/8" ISO 228-1 BS5200 Male
Havainnoin- tikyky:	> 40 µm Fe > 135 µm nFe	> 70 µm Fe > 200 µm nFe	> 200 µm Fe	> 70 µm Fe > 270 µm nFe
Nesteiden yhteenso- pivuus:	petroli, synteettiset öljyt, vesi, vesi/öljy emulsiot	mineraali- sekä synteetti- set öljyt	mineraaliöljyt	hydrauli- ja voite- luöljyt, mineraali- ja synteettiset öljyt, liuottimet ja pesuaineet
Nesteen lämpötila:	-20°C to 85°C	-40°C – +85°C	-30°C – +85°C	-40°C – +85°C
Tilavuusvir- ta:	1.4 – 9.0 l/min	0.4 – 8 l/min	10 – 50 l/min	0.5 – 12 l/min
Max. paine:	20 bar	20 bar	20 bar	20 bar
Virtalähde	24 V DC (18 – 30 V DC)	24 V DC (9 – 36 V DC)	24 V DC	24 V DC (18 – 30 V DC)
Suojaus	IP 67	-	IP 67	-
Paino	3 kg	-	-	1.6 kg

Jokainen vertailun sensori on alun perin tarkoitettu kulumishiukkasten havainnointiin. Hydacin ja Internormenin sensoreille ilmoitettiin yhteensopiviksi nesteiksi ainoastaan öljyjä, kun Gastopsille ilmoitettiin yhteensopivaksi jopa liuottimet ja pesuaineet. Internormenin sensori oli selkeästi tarkoitettu hieman suuremmille tilavuusvirroille ja havainnointikyky rajoittui 200 µm ja sitä suurempiin Fe-hiukkasiin. Hydac ja Gastops olivat tasoissa Fe-hiukkasten havainnoinnissa (>70 µm) ja nFe-hiukkasissa Hydac ylsi hieman pienempiin hiukkasiin (>200 µm). Ylivoimaisesti paras havainnointikyky oli Parker Kittiwaken sensorissa, jonka suoritusravoksi ilmoitettiin >40 µm Fe ja >135 µm nFe-hiukkasissa.

Vertailun ykköseksi kohosi Parker Kittiwaken MWDS sensori (kuvassa 29). Se ylsi selkeästi lähimmäksi tavoiteltua hiukkasten havainnointialuetta. Ominaisuuksiltaan sensori hävisi ainoastaan Gastopsin vastaavalle nesteiden yhteensopivuuksissa. Parker Kittiwakelta tiedusteltiin lisää nesteiden yhteensopivuuksien rajoitteista ja vastaukseksi saatiin, että ainoa rajoittava tekijä on sensorin liitännöissä käytettävät tiivistimet [28]. Vertailun lopputuloksena päätettiin laboratorioille hankkia Parker Kittiwaken MWDS sensori.



Kuva 29. Parker Kittiwake Metallic Wear Debris Sensor. [25]

Sensorin toimitukseen sisältyi itse sensori, DebrisSCAN -ohjelmisto, tärinävaimennetut tassut sensorin asennukseen sekä sensorin ja ohjelmiston käyttöohjeet. Tiedonsiirtomahdollisuuksia sensorissa oli useita: ModBus RS485:n tai TCP/IP:n kautta, ASCII -pohjainen RS485 tai CANOpen [28]. Toimitetulla ohjelmistolla päästään hallinnoimaan sensoria ja lukemaan sensorin mittausdataa. Sensori jakaa molempien hiukkastyypin (Fe ja nFe) hiukkaset kymmeneen kokoluokkaan. Kokoluokkien jako ja vertailu ISO 16232 -standardin kokoluokkiin on esitetty taulukossa 21.

Taulukko 21. MWDS:n hiukkaskokoluokkajako Fe- ja nFe-hiukkasille ja vertailu ISO 16232 kokoluokkajakoon.

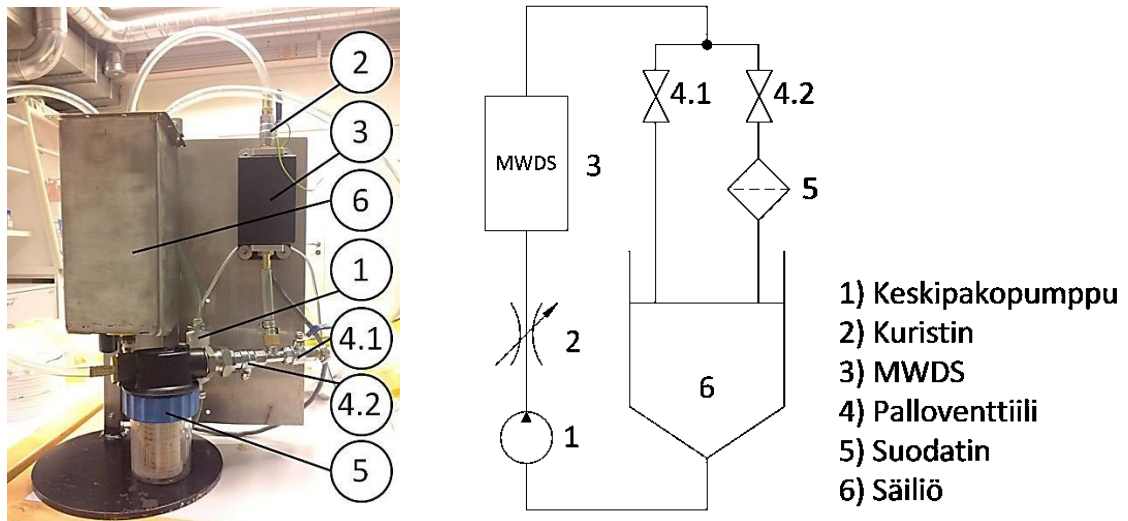
MWDS Fe-hiukkaset	MWDS nFe-hiukkaset	ISO 16232	Hiukkasen koko x [μm]
40 - 70 μm (D,E)	135 - 200 μm (F,G)	B	$5 \leq x < 15$
70 - 100 μm (E)	200 - 300 μm (H)	C	$15 \leq x < 25$
100 - 150 μm (F)	300 - 400 μm (H)	D	$25 \leq x < 50$
150 - 200 μm (G)	400 - 500 μm (I)	E	$50 \leq x < 100$
200 - 300 μm (H)	500 - 600 μm (I)	F	$100 \leq x < 150$
300 - 400 μm (H)	600 - 700 μm (J)	G	$150 \leq x < 200$
400 - 600 μm (I)	700 - 800 μm (J)	H	$200 \leq x < 400$
600 - 800 μm (J)	800 - 900 μm (J)	I	$400 \leq x < 600$
800 - 1000 μm (J)	900 - 1000 μm (J)	J	$600 \leq x < 1000$
>1000 μm (K)	>1000 μm (K)	K	$1000 \leq x$

Taulukkoon on merkitty kokoluokkien perään sulkeisiin ISO 16232 -standardin vastaava kokoluokka. MWDS:n ja standardin kokoluokat ovat melko hyvin yhteneväiset kun otetaan huomioon eroavaisuudet arvoalueen pienemmässä päässä.

Tarjolla olleista tiedonsiirtomenetelmistä päädyttiin käyttämään ModBusia TCP/IP:n välityksellä. Liikennöintiin käytettiin kahta parikaapelia, jotka kytkettiin suoraan RJ45-liittimellä tietokoneen LAN-porttiin. Sensorin käyttöönotto oli helppoa eikä asennuksessa kohdattu ongelmia. Sensori tunnistettiin sen IP-osoitteella aliverkosta ja sitä päästiin ohjailemaan DebrisSCAN-ohjelmalla. Sensorista haluttiin kerätä käyttökokemusta ja testata sen soveltuvuutta laboratoriossa pienessä mittakaavassa ennen sen kytkemistä kaavailtuun käyttökohteeseen komponenttipesukoneeseen. Tässä työssä sensorille ehdittiin toteuttaa vain alustavat testit.

5.1 Sensorin testijärjestelmä

Sensorin testijärjestelmän suunnitteluun ja rakentamiseen sekä testauksen suorittamiseen oli aikaa vain vajaa kuukausi. Sensorin testaamiseksi rakennettiin pieni ja yksinkertainen testilaitteisto, jolla pystyttiin kuljettamaan testihiukkasia väliaineen välityksellä sensorin läpi. Laitteistolla pystyttiin auttavasti simuloimaan lopullisen suunnitellun käyttötarkoituksen olosuhteita hiukkasmäärien kehityksen kannalta. Testijärjestelmän kuva, hydraulikaavio sekä osaluettelo on esitetty kuvassa 30.



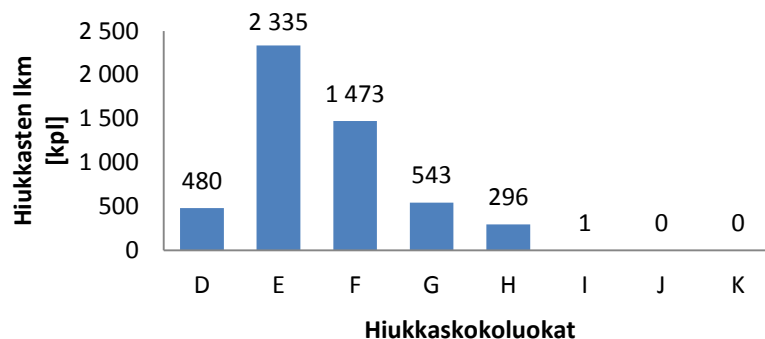
Kuva 30. Metallisen sensorin testaamiseen rakennettu testijärjestelmä, hydraulikaavio ja osaluettelo.

Järjestelmään tuotettiin tilavuusvirtaa pienellä keskipakopumpulla ja virtaus kuristettiin pumpun jälkeen sensorille sopivaksi. Kuristimena käytettiin tavallista palloventtiiliä. Sensori oli asennettu järjestelmään in-line -sensoriksi, eli kaikki tuotettu tilavuusvirta

kulki suoraan sensorin lävitse. Sensorilta virtaus palautettiin säiliöön. Järjestelmään rakennettiin kaksi paluulinjaa, toinen linja suoraan säiliöön ja toinen suodattimen kautta. Paluulinjan kahdella palloventtiilillä voitiin säädellä suodatettavan virtauksen osuutta portaattomasti. Järjestelmässä käytettiin väliaineena vettä, joten säiliön materiaaliksi valittiin ruostumaton teräs. Säiliön pohja tehtiin kartiomaiseksi, jotta järjestelmään testin aikana lisäävät testihiukkaset kulkeutuisivat mahdollisimman hyvin säiliöstä eteenpäin ja pysyisivät tehokkaasti kierrossa. Säiliön pohjan rakennetta korostettiin säiliön piirrosmerkissä hydraulikaaviossa. Painetaso järjestelmässä pysyi reilusti alle yhdessä baarissa, joten letkuina käytettiin tavallista läpinäkyvää muovilettoa.

5.2 Testissä käytetyt hiukkaset

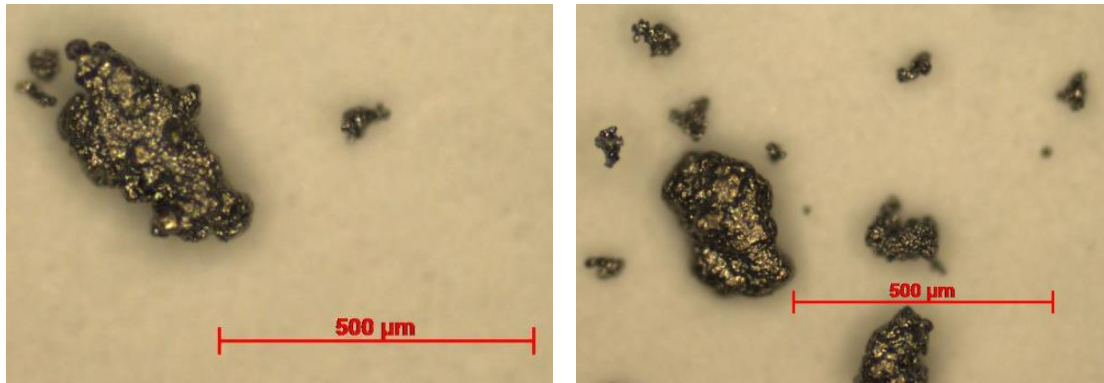
Sensorin testaukseen tarvittiin sopivanlaista testiliikaa eli metallihiukkasia. Testilian kokojakauman piti osua mahdollisimman lähelle sensorin havainnointialuetta ja olla mieluiten rautaa. Laboratoriosta löydettiin purkillinen tummaa jauhetta, jossa oli nimi-lappu: ”Iron Powder Somaloy 500”. Rautajauheen alkuperästä tai käyttötarkoituksesta ei ollut tietoa, mutta koska jauhe oli hyvin hienojakoista ja mitä ilmeisimmin rautaa, sen kokojakauma päätettiin tutkia mikroskoopilla. Rautajauhetta siroteltiin puhtaalle kalvosuodattimelle, joka analysoitiin laboratorion automaattisella mikroskoopilla. Kuvassa 31 on esitetty mikroskoopilla selvitetty rautajauheen kokojakauma. Kokoluokat on ilmoitettu ISO 16232 -standardin kokoluokilla.



Kuva 31. Somaloy 500 rautajauheen hiukkasjakauma ISO 16232 -standardin hiukkaskokoluokissa.

Analyysi osoitti, että testiliika koostui pääosin D – H luokan hiukkasista. Näytteestä löytyi vain yksi kappale I-luokan (400 – 600 µm) hiukkasia, joten rautajauheen nimen perässä ollut numero tulkittiin maksimiraekooksi. Testijärjestelmän 100 µm suodattimeen pitäisi jäädä F-luokan ja sitä suuremmat hiukkaset. Tämä tarkoittaisi, että kierrossa olevien hiukkasten lukumäärästä pitäisi jäädä karkeasti ottaen noin puolet suodattimeen. Hiukkasjakauma vaikutti olevan ideaalinen sensorin testaukselle, joten rautajauheen alkuperän tai käyttötarkoituksen selvittämiseen ei testauksen tässä vaiheessa käytetty enempää aikaa.

Kokojakauman tulkinnessa pitää ottaa huomioon, että mikroskooppi ja sensori ilmoittavat hiukkasten koot eri periaatteilla. Mikroskooppi tulkitsee kalvosuodattimelta havaitun hiukkasen kaksikulotteisesti ja mittaa hiukkasesta pisimmän mahdollisen mitan. Sensori puolestaan mittaa ohi kulkevan hiukkasen tilavuuden ja ilmoittaa hiukkasen kooksi vastaavan tilavuuksisen pallon halkaisijan [29]. Kuvassa 32 on esitetty Somaloy 500 rautajauheen hiukkasia.



Kuva 32. Somaloy 500 rautajauheen hiukkasia.

Kuvista nähdään, että hiukkaset ovat suhteellisen pyöreän muotoisia, mikä tarkoittaa, että sensorilla ja mikroskoopilla havaittujen hiukkasten koissa pitäisi olla vain pieni ero. Mittaustapaerosta johtuen mikroskoopilla mitatut hiukkaset näyttäytyvät tulosten vertailussa hieman suurempina.

Diplomityön kirjoitusvaiheessa selvitettiin Somaloy 500 hiukkasten oikea käyttötarkoitus. Nimessä olevan numeron luultiin viittaavan rautajauheen raekoon kokojakaumaan, mutta se viittaakin rautajauheen permeabiliteettiin [30]. Somaloy materiaalit ovat magneettisesti pehmeää metalliseosta (Soft Magnetic Alloy), jota käytetään esimerkiksi sähkömoottorien rautasydämien valmistuksessa. Hiukkaset ovat hyvin puhdasta rautaa ja niiden pinta on kauttaaltaan eristävän oksidikerroksen peitossa. Hiukkasista puristetaan voitelu- ja sideaineiden kanssa kovalla paineella valmiita kappaleita. Hiukkasten oksidikerros ja prosessin sideaineet toimivat perinteisen rautasydämen muuntajalevyjen välissä käytettyjen eristeiden tapaan. [31] Hiukkasten päällä olevalla eristekerroksella saattaa olla vaikutusta sensorin havainnointiin tai havainnoinnin herkkyyteen. Testituloksista mahdollisia vaikutuksia ei kuitenkaan huomattu. Testeissä oltiin kiinnostuneita lähinnä hiukkasmäärien kehityksestä eikä niinkään sensorin absoluuttisesta havainnointitarkkuudesta.

5.3 Pesutapahtuman simulointi

Lopullisessa käyttökohteessa sensorilla halutaan havaita normaalissa komponentti-pesukoneen pesuprosessissa komponenteista irtoavien hiukkasten esiintymistiheyttä ja kokojakaumaa. Pesuprosessin alkuvaiheessa kaiken kokoisia hiukkasia pitäisi irrota paljon ja prosessin edetessä kohti loppua, hiukkasten esiintymistiheyden ja koon pitäisi

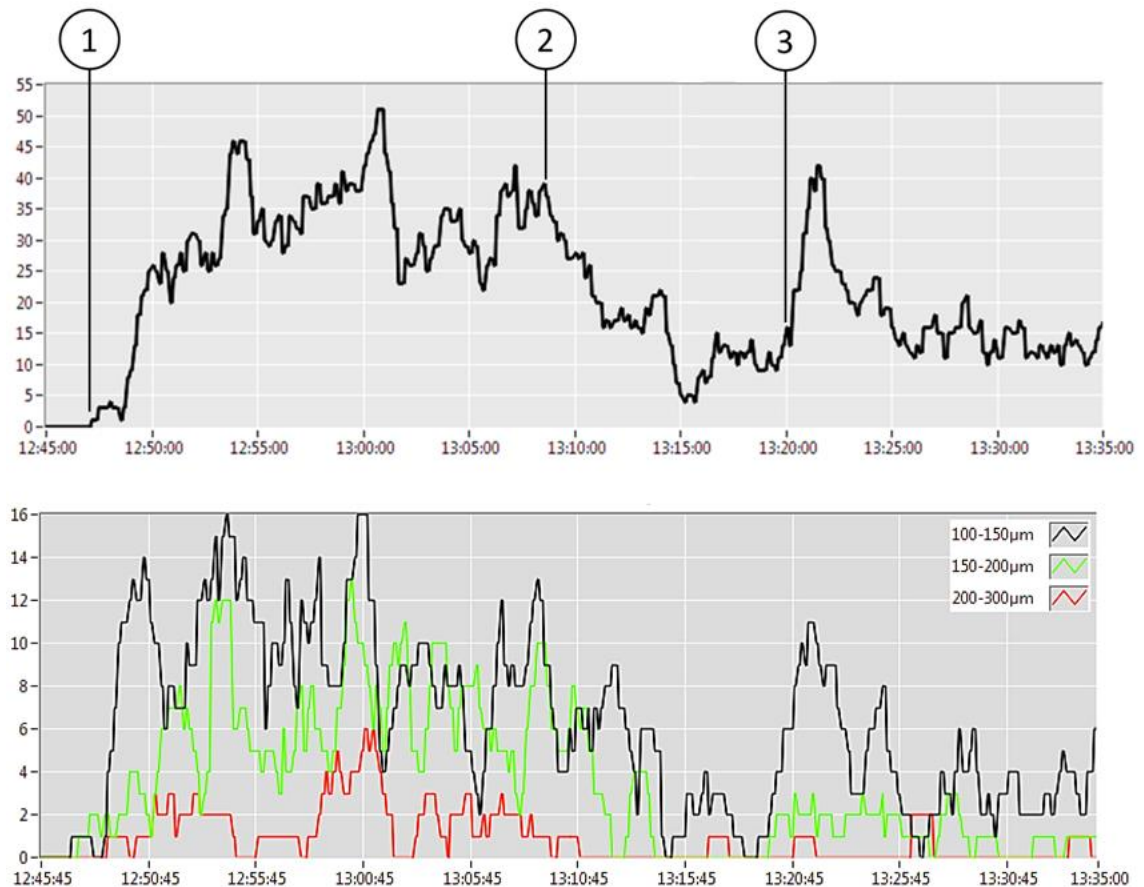
pienentyä. Testijärjestelmällä pyrittiin simuloimaan sensorin kaavaillun käyttökohteen olosuhteita hiukkaslukumäärien ja kokojakauman kehityksen kannalta.

Testaus aloitettiin pumpaamalla puhdasta vettä järjestelmässä suodattimen ohi. Tilavuusvirta määritettiin laskemalla paluuvirtausta mittakuppiin ja mittaamalla täyttymiseen kuluva aika. Kuristusta säätämällä tilavuusvirran arvoksi asetettiin 3,6 l/min. Järjestelmässä oli nestettä 2,4 litraa, joten kiertoajaksi tuli 40 sekuntia. Tilavuusvirran asettamisen jälkeen järjestelmään lisättiin testihiukkasia. Pienimmät hiukkaset jäivät kellumaan säiliöön nesteen pinnalle. Nesteen pintajännitys rikottiin pienellä tipalla tavallista astianpesuainetta, jotta kaikki hiukkaset saataisiin kiertoon.

Sensorin hiukcashavaintojen kehitystä seurattiin DebrisSCAN-ohjelmalla, jolla saatiin luettua sensorin tuottamaa dataa lähes reaaliaikaisesti. Sensorin päivitysväli asetettiin viiteen sekuntiin, joka oli päivitysvälin minimiarvo. Lähinnä seurattiin sensorin ilmoittamaa ”hiukkasta minuutissa” -arvoa, jonka kehitys kertoi suoraan hiukkasten jakautumisesta järjestelmään. Tavoitteena oli saada hiukcashavainnot tasaantumaan johonkin arvoon ennen suodatuksen aloittamista. Tällöin hiukkaset olisivat tasaisesti jakautuneena koko järjestelmään ja suodatuksen aloittaminen näkyisi sensorin piirtämissä hiukcashavaintokäyrissä mahdollisimman siististi.

Suodatus aloitettiin aluksi vain osittain. Paluupuolen palloventtiileillä ohjattiin noin puolet virtauksesta kulkemaan suodattimen läpi. Menettelyllä simuloitiin pesukoneessa vähitellen puhdistuvaa komponenttia. Suodatuksen annettiin olla puoliteholla jonkin aikaa, kunnes virtaus ohjattiin lopulta kokonaan kulkemaan suodattimen kautta.

Kuvassa 33 on esitetty kaksi kuvaajaa sensorin yhdestä testiajosta. Ylempään kuvaajaan on piirretty kaikkien sensorin havaitsemien hiukkasten summa ja alemmassa kuvaajassa summakäyrästä on erotettu kolme suurinta havaittua hiukkaskokoa omiksi käyriksien. Erotetut kokoluokat ovat 100 – 150 μm (musta), 150 – 200 μm (vihreä) ja 200 – 300 μm (punainen). Kokoluokat vastaavat ISO 16232 -standardin F-, G- ja H-kokoluokkia. Kuvaajien vaaka-akselilla kulkee aika ja kuvaajien pystyakselin yksikkö on hiukkasta minuutissa, jonka sensori laski viiden sekunnin välein.



Kuva 33. Sensorin havaitsemat Fe-hiukkaset minuuttia kohden kolmessa eri hiukkaskokoluokassa.

Kuvaan 33 merkityssä kohdassa 1 lisättiin hiukkaset järjestelmään. Hiukkasten lisääminen näkyy molemmista kuvaajista selkeästi. Ylemmän kuvaajan arvot nousevat parissa minuutissa yli 25 hiukkaseen minuutissa. Ennen suodatuksen aloittamista hiukkasia havaitaan suurimmillaan yli 50 kappaletta minuutissa ja koko ajan pysytään yli 20 hiukkasen arvoissa. Arvoissa on paljon heittelyä mutta keskimäärin pysytään noin 30 – 35 välillä. Alemmasta kuvaajasta nähdään että järjestelmässä kiertää suuria hiukkasia kokojakauman mukaisesti.

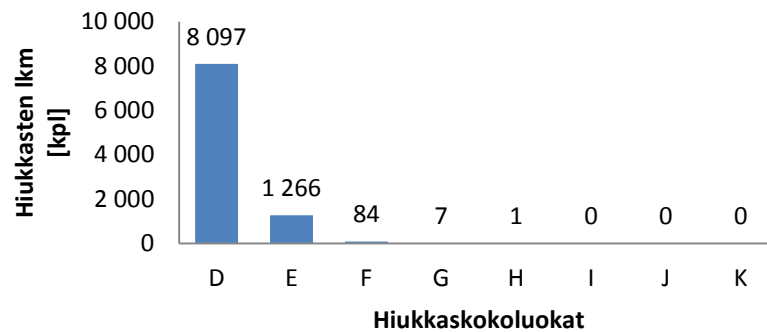
Kohdassa 2 aloitettiin paluuvirtauksen osittainen suodattaminen. Havaittujen hiukkasten lukumäärät alkoivat välittömästi laskea, mutta huomattavasti maltillisemmin, kuin hiukkasmäärien nousu hiukkasten lisäämisen yhteydessä. Noin seitsemässä minuutissa havainnot tippuivat yli 35 hiukkasesta jopa alle viiteen hiukkaseen minuutissa. Lopulta havainnot tasaantuivat 10 – 15 hiukkaseen minuutissa.

Kohdassa 3 suodattimen ohittava linja suljettiin ja virtaus ohjattiin kokonaisuudessaan kulkemaan suodattimen kautta. Muutos aiheutti sensorin piirtämiin kuvaajiin melkoiset piikit. Suuria yli 150 μm:n hiukkasia havaittiin kuitenkin vain vähän. Kuvaajien piikit selittyvät säiliön virtausolosuhteiden muutoksella. Takaisin säiliöön vievät paluulinjat kulkivat eri puolille säiliötä ja virtauksen siirtyminen kokonaisuudessaan toiselle paluu-

linjalle sai aikaan säiliön pohjalle jumiutuneiden hiukkasten liikkeellelähdon. Piikit taantuivat nopeasti muutosta edeltäneelle tasolle.

Suuret heilahtelut tuloksissa kertovat lähinnä testilaitteiston kiireellisestä kokoonpanosta ja karkeasta toteutuksesta. Hiukkaset jäivät silmin nähden jumiin muun muassa säiliön pohjalle ja letkuliitoskohtiin. Järjestelmässä tapahtuneet muutokset kuvautuivat hyvin sensorin piirtämiin kuvaajiin.

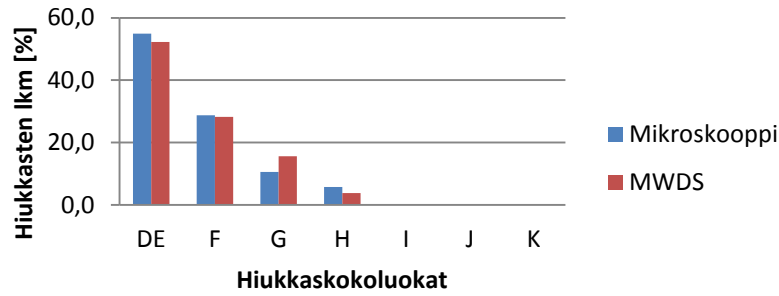
Testiajon lopuksi järjestelmän paluulinjasta kerättiin näytepulloon 300 ml näyte samoin kuin tilavuusvirran määrittämisen yhteydessä. Samalla tarkistettiin, että tilavuusvirta oli pysynyt järjestelmässä muuttumattomana. Kerätty neste suodatettiin kalvosuodattimen läpi ja näyte analysoitiin laboratorion mikroskoopilla. Näytteessä oli paljon muutakin likaa kuin järjestelmään lisättyjä rautahiukkasia. Muut epäpuhtaudet jätettiin tuloksista huomiotta ja kalvosuodattimelta laskettiin ainoastaan metallihiukkaset. Analyysin tulokset on esitetty kuvassa 34.



Kuva 34. Kalvosuodattimelle suodatetun näytteen hiukkaset testiajon päätteeksi.

Tuloksista nähdään, että valtaosa F-, G- ja H-luokan hiukkasista on jäänyt järjestelmän suodattimeen. Myös merkittävä määrä E-luokan hiukkasia on jäänyt joko suodattimeen tai muualle järjestelmään, koska D-luokan hiukkasten määrä suhteessa E-luokan hiukkasiin on moninkertaistunut rautajauheen alkuperäiseen kokojakaumaan nähden. Mikroskooppianalyysin tulokset mukailevat sensorin tuloksia testiajon loppupäässä. Suuria hiukkasia havaittiin testiajon lopussa vain satunnaisesti.

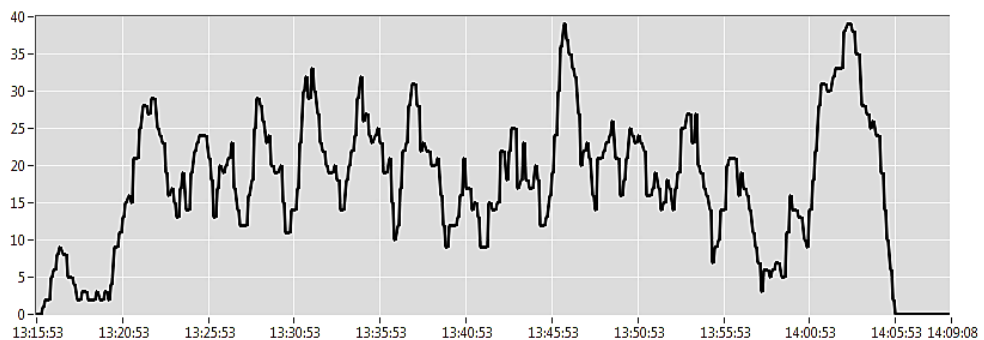
Sensorin testauksessa ei pyritty selvittämään sensorin absoluuttista havainnointitarkkuutta eli kuinka monta prosenttia läpimenevistä hiukkasista havaitaan. Testauksessa oltiin kiinnostuneita sensorin kyvystä havaita muutoksia hiukkaslukumäärissä eri kokoluokissa olosuhteiden muuttuessa. Kuvassa 35 on esitetty testihiukkasten prosentuaalinen kokojakauma laskettuna mikroskooppianalyysistä sekä metallisensorin havaitsemista hiukkasista.



Kuva 35. Mikroskoopin sekä metallisensorin tuloksista lasketut hiukkaslukumäärien prosentuaaliset kokojakaumat.

Sensorilla havaittujen hiukkasten kokojakauma noudattelee hyvin mikroskoopilla tutkittua testilian kokojakaumaa. Kokoluokat D ja E yhdistettiin, jotta sensorin ja mikroskoopin lukemat saatiin yhteneviksi.

Sensorille tehtiin vielä toisenlainen testiajo, jolla pyrittiin selvittämään sensorin maksimiarvoa hiukkasten havaitsemiselle minuutissa. Alkuvalmistelut suoritettiin samalla tavalla kuin ensimmäisessä testissä aina hiukkasten lisäämiseen saakka. Virtauksen annettiin ohittaa suodatin koko testin ajan. Järjestelmään lisättiin hiukkasia kolmen minuutin välein. Testiajon kuvaaja on esitetty kuvassa 36.



Kuva 36. Sensorin havaitsemat Fe-hiukkaset minuuttia kohden testissä, jossa lisättiin metallihiukkasia järjestelmään tasaisin väliajoin.

Noin kolmen minuutin välein lisätyt hiukkaset näkyivät selvinä piikkeinä kuvaajassa. Hiukkasmäärät eivät kuitenkaan kasvaneet lisättyjen hiukkasten myötä vaan havainnot vain sahasivat paikoillaan. Testi osoitti lähinnä sen, miten huonosti rakennetulla järjestelmällä onnistuttiin likaa järjestelmässä liikuttamaan. Lika jumittui tankin pohjalle sekä letkuihin ja vain murto-osa siitä oli todella kierrossa. Testin loppupuoliskolla rautahiukkaset olivat jo silmin nähden kerääntyneet järjestelmän eri osiin. Kun jumiin jääneet hiukkaset heräteltiin liikkeelle, nousi mittarin näyttämä ensin reilusti, jonka jälkeen se tipahti nolllaan. Sensori ei kuitenkaan jumittunut suuresta hiukkaslukumäärästä, vaan se toipui virtausta suodattamalla ja alkoi näyttää taas nolllasta poikkeavaa lukemaa (ei näy kuvasta 36). Sensorin ominaisuus näyttää nolllaa liian suurilla hiukkaslukumäärillä oli yllättävä tulos.

6. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Työssä tuotettiin tuloksia kolmelle eri osa-alueelle. Olemassa olevia menetelmiä käyttäen tutkittiin viiden erilaisen komponentin puhtaustasot. Tämän jälkeen käytettyjä menetelmiä kehitettiin ja tarkistettiin noudattamaan tarkemmin ISO 16232 -standardia. Lopuksi tutkittiin komponenttipuhtauden seurantaan kaavaillun metallisensorin ominaisuuksia ja suoritettiin sensorille ensimmäiset testit. Näiden pääkohtien lisäksi kelloitettiin painehuuhteluprosessin vakiona pysyvien työvaiheiden kestot.

6.1 Komponenttien puhtaustaukset

Työssä mitattiin viiden erilaisen komponentin puhtaustasot. Komponentit olivat pienehköjä liittimiä ja niitä toimitettiin tutkittavaksi viisi kappaletta kutakin. Puhtaustutkimukset tehtiin ISO 16232 -standardin mukaisesti TTY/IHA komponenttipuhtauslaboratoriossa. Epäpuhtaudet irrotettiin komponenttien kontrollipinnoilta testinesteeseen painehuuhtelumenetelmällä ja suodatettiin testinesteestä kalvosuodattimelle. Näyteuunissa kuivatut kalvosuodattimet analysoitiin automaattisella mikroskoopilla ja tulokseksi saatiin suodattimille jääneiden hiukkasten lukumäärä sekä kokojakauma.

Komponentit saapuivat laboratoriolle postitse valmistajan lähettäminä. Kaikki komponentit olivat sekaisin yhdessä tavallisessa muovipussissa, joka oli pakattu pahvilaitikkoon. Toimitustapa oli standardin ja annetun ohjeistuksen vastainen. Huolimattomasta lähetyksestä johtuen oletettiin että komponenttien puhtaustasot olisivat hyvin lähellä toisiaan.

Kolme ensimmäistä komponenttia mitattiin normaaleiden laboratoriomenettelyiden mukaan. Kahden viimeisen komponentin kohdalla testattiin uusien laboratoriorutiinien toimivuutta. Vaikka komponentit olivat verrattain pieniä, soveltuivat ne hyvin tutkittaviksi painehuuhtelumenetelmällä. Jokaiselle erilaiselle komponentille saatiin suoritettua yksi onnistunut puhtaustutkimus.

Ennako-oletuksesta poiketen komponenttien puhtaustasoissa oli suuria eroja. Tulokset annettiin standardin määrittämällä CCC-koodilla ja ne ilmoitettiin sekä 1000 cm^2 :n kontrollipinta-alaa että 100 cm^3 :n kontrollitilavuutta kohti. Poikkeuksena tähän oli viimeinen komponentti, jolle ei komponentin luonteesta johtuen ollut mahdollista määrittää kontrollitilavuutta. Komponenttien välillä oli pienemmissä hiukkaskokoluokissa suurimmillaan kolmen puhtausluokan eroja, joka tarkoittaa kahdeksankertaista eroa hiukkasten lukumäärissä. Suuremmissa kokoluokissa oli jopa kuuden puhtausluokan ero, joka tarkoittaa 64-kertaista määrää hiukkasia.

6.2 Painehuuhtelun työskentelyrutiinien kehittäminen

Työskentelyrutiinien kehittämisessä käytettiin hyväksi viiden tutkitun komponentin puhtaustutkimuksista kerättyä kokemusta. Laboratorion vanhat menettelytavat toimivat lähtötasona rutiinien kehittämiseksi. Työskentelyrutiineja kehitettiin CTU-1230 -testikaapin käytön näkökulmasta, koska kaapilla oli havaittu ajoittain ongelmia nollapuhtausnäytteiden kanssa. Standardin tulkintoihin tehdyt tarkennukset pätevät myös PCC-41 -testikaapin käyttöön. Pyrkimyksenä oli jalostaa painehuuhtelun työskentelyrutiineja tuottamaan entistä tarkempia ja huolellisemmin standardin määritelmien mukaisia tuloksia. Samalla pyrittiin tehostamaan laboratorion ajan ja resurssien käyttöä.

Painehuuhteluprosessissa tutkittiin testinesteen määrän vaikutusta nollapuhtausnäytteen puhtaustasoon, lyhyen käyttökätkon ja puhdastilan avaamisen vaikutusta nollapuhtausnäytteen sekä suurten kuitujen esiintymistä nollapuhtausnäytteissä ja niiden alkuperää. Standardin tulkintoja tarkennettiin prosessin päätepisteen määrittämisessä sekä rutiinitestauksen toteuttamisessa.

Nollapuhtausnäytteen puhtaustason todettiin olevan suoraan verrannollinen nollapuhtausnäytteen ottamisessa käytettyyn testinestemäärään. Nollapuhtausnäytteiden ottamisessa siirryttiin määrittelemään käytettävä testinestemäärä komponentin huuhteluun käytettävän testinestemäärän mukaan. Aiemmin laboratoriossa käytettiin jokaiselle tutkimukselle vakioitua nollapuhtausnäytteen ottotapaa. Uusi menettely on täysin ISO 16232 -standardin mukainen.

Puhtaustestikaapin tiedettiin likaantuvan käyttökätköjen aikana sekä puhdastilan avaamisen seurauksena. Likaantumisen suuruusluokkaa ja vaikutuksia ei ollut aiemmin tutkittu. Työpäivien välisen käyttökätkon sekä puhdastilan avaamisen vaikutukset nollapuhtausnäytteen puhtaustasoon tutkittiin. Puhdastilan kannen avaamisen yhteydessä simuloitiin normaalia komponenttien siirtämistä testikaappiin. Työpäivien välisellä käyttökätköllä ja puhdastilan kannen avaamisella ei todettu olevan merkittävää vaikutusta nollapuhtausnäytteen puhtaustasoon. Näistä suuremman muutoksen puhtaustasoihin aiheutti odotetusti puhdastilan kannen avaaminen. Testijaksossa, joka ulottui kolmannen vuorokauden puolelle, otettiin kaiken kaikkiaan 14 nollapuhtausnäytettä, jotka kaikki olivat hiukkaslukumääriltään hyväksyttävällä tasolla.

ISO 16232 -standardi määrittää nollapuhtausnäytteen hyväksymiselle rajat hiukkasten kokonaislukumäärälle sekä suurimmalle sallittavalle hiukkaselle. Nollapuhtausnäytteissä esiintyi ajoittain suuria pitkänmallisia hiukkasia eli kuituja. Hiukkasten kokonaislukumäärien puolesta nollapuhtausnäytteet pysyivät pääosin hyväksyttävällä tasolla. Suuria kuituja ei voitu vain hylätä mikroskooppianalyysin tuloksista, koska kuitujen alkupe-
räästä ei voitu esittää kuin arvauksia. Epäpuhtauslähteitä tutkimalla onnistuttiin paikantamaan todennäköisin suurten kuitujen aiheuttaja testaajan vaatetukseksi sekä kalvosuodattimen pidikkeen operointi työvaiheeksi, jossa virheellisiä kuituja todennäköi-

simmin syntyy. Tyypillisten virhekuitujen tunnistaminen antoi perusteet tuloksia vääristävien kuitujen hylkäämiselle. Virhekuidut ovat melko helposti tunnistettavissa niin nollapuhtausnäytteistä kuin varsinaisista komponenttien puhtausnäytteistä. Tutkimusten perusteella esitetään, ettei selkeästi virheellisinä kuituina näyttäytyviä hiukkasia enää jatkossa sisällytetä tutkitun komponentin tai nollapuhtausnäytteen tuloksiin. Sallittavaksi suurten kuitujen lukumääräksi esitetään viittä kappaletta. Mikäli suuria kuituja löytyy enemmän, toimitaan normaalisti ISO 16232 -standardin mukaan.

Prosessin päätepisteen määrittämisessä tarkennettiin laboratorion soveltamia käytäntöjä. Prosessiin kuluvan ajan ja virheellisten hiukkasten lukumäärän minimoimiseksi laboratoriossa oli päädytty ottamaan komponenteista suoraan kuusi kappaletta näytteitä ja lopuksi nollapuhtausnäyte. ISO 16232 -standardin mukaan näytteet $S_1 - S_3$ otetaan suoraan ja näytteitä S_4 :stä S_6 :een vain tarvittaessa. Standardin määrittelyiden ja laboratorion menetelmien yhdistämisessä jäi tulkinnan varaiseksi, mitä pitää tehdä, kun prosessi saavuttaa päätepisteensä ennen viimeistä näytettä. Standardin mukaista nollapuhtausnäytettä ei tällöin ole saatavilla koska päätepisteen ja nollapuhtausnäytteen välillä on ylimääräisiä komponentista otettuja näytteitä. Laboratorioon ei oltu tehty selkeää toimintapaohjeistusta, miten tilanteessa tulisi menetellä. Päätepisteen määrittämisessä tutkittiin erilaisten toimenpiteiden vaikutuksia lopputuloksiin. Aiheesta konsultoitiin myös Pall Ltd:n kouluttaja Gilles Touchardia. Irrotusprosessin päätepisteen jälkeen tehtävien ylimääräisten analyysien tekeminen todettiin testaustulosten valossa turhiksi. Ylimääräisten näytteiden sisällyttäminen tuloksiin ei tuonut merkittävää muutosta komponentin puhtaus tutkimuksen tuloksiin eikä ylimääräisten näytteiden huomiotta jättämisen todettu vaikuttavan nollapuhtausnäytteen informaatioarvoon. Nollapuhtausnäytteen tarkoitus on kertoa testikaluston puhtaus tase tutkittavaan komponenttiin nähden. Prosessin tehokkuutta ajatellen ylimääräisten näytteiden analysoimatta jättäminen tuo kuitenkin merkittävää säästöä ajankäyttöön. Prosessin päätepiste esitetään määriteltäväksi täysin standardin mukaisesti eli ylimääräisten näytteiden analyysit jätetään tekemättä ja päätepisteestä siirytään suoraan jälkimmäisen nollapuhtausnäytteen analysointiin.

Verifioitua irrotusprosessia voidaan käyttää komponentin rutiinitestaukseen. ISO 16232 -standardin mukaan rutiinitestausprosessi eroaa normaalista verifiointiprosessista muun muassa siinä, että prosessin lopuksi ei tarvitse ottaa toista nollapuhtausnäytettä. Laboratorioon oli vakiintunut käytäntö, jossa jokainen puhtaus tutkimus lopetettiin nollapuhtausnäytteeseen. Laboratorion tehokkuutta arvioitaessa ylimääräiset nollapuhtausnäytteet aiheuttivat paljon lisää työtä, jolla ei kuitenkaan saavutettu minkäänlaista lisäarvoa komponentin tutkimukseen. Lisäksi ylimääräiset näytteet ovat tulkittavissa jopa standardin vastaisiksi. Ylimääräisen nollapuhtausnäytteen ottamista esitetään jätettäväksi pois rutiinitestauksen yhteydessä.

6.3 Metallisensorin alustava testaus

TTY/IHA komponenttipuhtauslaboratoriolle hankittiin Parker Kittiwaken valmistama MWDS-metallisensori. Metallisensoria suunnitellaan käytettäväksi komponenttipuhtauden seurannassa aikaa vievien ja hitaiden laboratoriotutkimusten rinnalla. Sensorilla olisi tarkoitus havainnoida pesukoneessa komponenteista irtoavien hiukkasmäärien kehitystä, josta voitaisiin arvioida pesutapahtuman tehokkuutta. Toimiessaan ratkaisu tarjoaisi komponenttivalmistajille mahdollisuuden valvoa itse pesuprosessejaan sekä epäsuorasti komponenttipuhtautta.

Idean testaamiseksi sensorille rakennettiin yksinkertainen testijärjestelmä, jolla saatiin simuloitua hiljalleen puhdistuvaa pesutapahtumaa. Järjestelmässä pumpattiin vettä sensorin läpi ja virtaus johdettiin takaisin säiliöön joko suodattimen kautta tai ohittamalla suodatin. Testiliaksi järjestelmään lisättiin metallihiukkasia ja hiljalleen tapahtuva puhdistuminen saatiin aikaan suodattamalla vain osa paluuvirtauksesta.

Testauksessa pyrittiin havaitsemaan muutokset hiukkaslukumäärien kehityksessä. Sensorin absoluuttista tarkkuutta, eli kuinka monta prosenttia sensori havaitsee ohi virranneista hiukkasista, ei työssä tutkittu. Absoluuttisella tarkkuudella ei ole merkitystä sensorin suunnitellussa käyttökohteessa, kunhan se vain pystyy näyttämään järjestelmässä tapahtuvat muutokset.

Sensori toimi testeissä hyvin ja sen käyttöönotto oli vaivatonta. Mukana tulleella ohjelmalla saatiin luettua sensorin tuottamaa dataa lähes reaaliaikaisesti. Testijärjestelmällä luoduista pesutapahtuman simuloinneista saatiin sensorilla havaittua järjestelmän olosuhteille aiheutetut muutokset. Sensorin suunnitellussa käytössä saattaa muodostua ongelmaksi sensorin havainnointikyky, kun hiukkasten lukumäärät kasvavat liian suuriksi. Testeissä huomattiin, että kun havainnointikyky ylitetään, sensori näyttää nolaa. Ongelma voidaan mahdollisesti kiertää havainnoimalla vain osaa pesukoneesta tulevasta virtauksesta. Testien perusteella sensoria kannattaa testata suoraan komponenttipesukoneessa.

7. YHTEENVETO

Hiukkasmaiset epäpuhtaudet vaikuttavat merkittävästi hydraulijärjestelmien käyttöikään ja luotettavuuteen. Ne aiheuttavat huomattavaa ennenaikaista kulumista ensimmäisen käynnistyksen yhteydessä, käyttöiän alkuvaiheessa ja voivat pahimmillaan aiheuttaa jopa järjestelmän totaalisen vikaantumisen. Komponenttipuhtautta tutkimalla pyritään kehittämään ja parantamaan komponenttivalmistajien valmistus- ja pesuprosesseja sekä työskentelytapoja tuottamaan puhtaampia komponentteja. Puhtaille komponenteille saadaan pienennettyä epäpuhtauksien aiheuttamien laiterikkojen kustannuksia ja pidennettyä laitteiden käyttöikää.

Tässä diplomityössä kehitettiin Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) hydraulikan ja automatiikan laitoksen (IHA) komponenttipuhtauslaboratorion tarjoamia komponenttipuhtauden mittaupalveluita. Hydraulikomponenttien puhtaustutkimukset suoritetaan TTY/IHA laboratorioissa ISO 18413 ja ISO 16232 -standardien mukaisesti. Tutkimuksissa mitataan tutkittavan komponentin pinnoilta irrotettujen epäpuhtauksien massa, lukumäärä tai kokojakauma. Diplomityö tehtiin osana Pirkanmaan ELY-keskuksen rahoittamaa ELY-Kompu -projektia, jonka tavoitteena on kehittää komponenttipuhtauden mittaupalveluita teollisuuden käytettäväksi ja näin parantaa suomalaisten alihankkijoiden ja koneenrakentajien kilpailukykyä.

Diplomityössä mitattiin viiden pienehkön komponentin puhtaustasot ja selvitettiin työskentelyyn kuluneen ajan jakautuminen eri työvaiheisiin. Komponentit toimitettiin laboratorioon standardin vastaisesti sekaisin tavallisissa muovipussissa, josta syystä niiden puhtaustasojen selvittämisestä ei saatu täyttä hyötyä komponenttien valmistajalle. Taapahtuneesta virheestä opittiin, että jatkossa kannattaa lähettää laboratoriohenkilökuntaa keräämään komponentit tutkimuksia varten. Puhtaustasojen ohella selvitettyä ajankäyttöä ja ajankäytön jakautumista työvaiheisiin voidaan käyttää laboratorion mittaupalveluiden hinnoittelussa sekä laboratorion ajankäytön suunnittelussa.

TTY/IHA laboratorion puhtaustutkimuksissa käytetyin epäpuhtauksien irrotusmenetelmä on painehuuhtelu. Siksi painehuuhtelun työskentelyrutiineja kehitettiin noudattamaan tarkemmin standardien määritelmiä. Painehuuhtelun suorittamista varten laboratoriosta löytyy kaksi kaupallista puhtaustestikaappia. Diplomityössä saatiin tarkennettua laboratoriolaitteiston sekä standardien tulkintojen yhteensovittamisessa esiin tulleita ongelma-kohtia ja laadittua yksiselitteiset toimintaohjeet tutkimusten suorittamiselle. Laboratorion omia virhelähteitä tutkimalla onnistuttiin tunnistamaan painehuuhteluprosessin heikot kohdat, jotka nyt osataan ottaa paremmin huomioon. Tehdyillä toimintatapojen ja

standarditulkintojen tarkennuksilla onnistuttiin myös tehostamaan laboratoriotyöskentelyä.

Laboratorion mittauspalveluiden kehittämisen lisäksi tutkittiin metallisensorin soveltuvuutta käytettäväksi komponenttipuhtauden seurannassa. Laboratoriolle hankittiin Parker Kittiwaken valmistama MWDS-metallisen­ sori, jolla on tarkoitus havainnoida komponenttipesukoneessa komponenteista irtoavien hiukkasmäärien kehitystä. Sensorilla voitaisiin arvioida pesutapahtuman tehokkuutta ja toimiessaan ratkaisu tarjoaisi komponenttivalmistajille mahdollisuuden valvoa itse pesuprosessejaan sekä epäsuorasti komponenttipuhtautta. Samaa ideaa voitaisiin käyttää myös kokoonpantujen komponenttien testauksessa seuraamalla komponentista poistuvaa virtausta. Esimerkiksi venttiilistön huuhtelun tehokkuus voitaisiin todentaa ennen herkästi vikaantuvien komponenttien testiä.

Sensorin soveltuvuuden testaamiseksi rakennettiin laboratorioon pieni ja yksinkertainen testilaitteisto. Järjestelmän väliaineena käytettiin vettä, jota pumpattiin sensorin lävitse ja palautettiin joko suoraan säiliöön tai suodattimen kautta. Järjestelmään lisätyn testiliinan avulla ja osittaista suodattamista käyttämällä saatiin auttavasti simuloitua komponenttipesukoneessa pesuprosessin edetessä hiljalleen puhdistuvia olosuhteita.

Sensorin käyttöönotto sujui vaivattomasti ja se saatiin nopeasti käyttökuntoon. Sensorin omalla ohjelmistolla saatiin luettua sensorin tuottamaa dataa lähes reaaliaikaisesti. Testeissä sensori toimi hyvin ja sillä saatiin havaittua järjestelmän hiukkaskonsentraatioille aiheutetut muutokset. Sensorille kaavaillussa käyttökohteessa saattaa muodostua ongelmaksi testeissä havaittu sensorin ominaisuus näyttää nol­ laa, kun hiukkas­ lukumäärät kasvavat sensorille liian suuriksi. Mahdollinen ongelma voitaisiin ratkaista esimerkiksi asentamalla sensori havainnoimaan vain osaa virtauksesta.

Sensorille tehtyjen laboratoriotestien tulokset olivat lupaavia ja seuraavaksi kannattaa siirtyä testaamaan sensoria suoraan komponenttipesukoneessa. Tarkkoja laboratoriotutkimuksia ei sensorilla pystyttäisi korvaamaan, eikä selvittämään komponenttien puhtaustasoja CCC-koodauksen kaltaisesti, mutta siitä saataisiin komponenttipuhtautta seuraava laadun hallinnan työkalu laboratoriotutkimusten rinnalle.

LÄHTEET

[1] ISO 18413. Hydraulic fluid power - Cleanliness of parts and components - Inspection document and principles related to contaminant collection, analysis and data reporting. Switzerland 2002, International Organization of Standardization. 28 p.

[2] ISO 16232 - 1. Road vehicles - Cleanliness of components of fluid circuits - Part 1: Vocabulary. Switzerland 2007, International Organization of Standardization. 15 p.

[3] Kuosku, M. Hydrauliiikan komponenttipuhtauslaboratorion varustelu ja koemittaukset. Diplomityö. Tampere 2011. Tampereen teknillinen yliopisto, Hydrauliiikan ja automatiikan laitos. 114 p.

[4] ISO 16232 - 2. Road vehicles - Cleanliness of components of fluid circuits - Part 2: Method of extraction of contaminants by agitation. Switzerland 2007, International Organization of Standardization. 15 p.

[5] Kuosku, M. Hydraulikomponenttien puhtaustason määrittäminen. Kandidaatintyö. Tampere 2010. Tampereen teknillinen yliopisto, Hydrauliiikan ja automatiikan laitos. 44 p.

[6] ISO 16232 - 3. Road vehicles - Cleanliness of components of fluid circuits - Part 3: Method of extraction of contaminants by pressure rinsing. Switzerland 2007, International Organization of Standardization. 15 p.

[7] ISO 16232 - 4. Road vehicles - Cleanliness of components of fluid circuits - Part 4: Method of extraction of contaminants by ultrasonic techniques. Switzerland 2007, International Organization of Standardization. 18 p.

[8] ISO 16232 - 5. Road vehicles - Cleanliness of components of fluid circuits - Part 5: Method of extraction of contaminants on functional test bench. Switzerland 2007, International Organization of Standardization. 18 p.

[9] ISO 16232 - 6. Road vehicles - Cleanliness of components of fluid circuits - Part 6: Particle mass determination by gravimetric analysis. Switzerland 2007, International Organization of Standardization. 10 p.

[10] ISO 16232 - 7. Road vehicles - Cleanliness of components of fluid circuits - Part 7: Particle sizing and counting by microscopic analysis. Switzerland 2007, International Organization of Standardization. 22 p.

[11] ISO 16232 - 8. Road vehicles - Cleanliness of components of fluid circuits - Part 8: Particle nature determination by microscopic analysis. Switzerland 2007, International Organization of Standardization. 7 p.

[12] ISO 16232 - 9. Road vehicles - Cleanliness of components of fluid circuits - Part 9: Particle sizing and counting by automatic light extinction particle counter. Switzerland 2007, International Organization of Standardization. 18 p.

- [13] ISO 16232 - 10. Road vehicles - Cleanliness of components of fluid circuits - Part 10: Expression of results. Switzerland 2007, International Organization of Standardization. 19 p.
- [14] Pekkonen, J. Hydraulikomponenttien puhtausmittauslaitteiston suunnittelu. Diplomityö. Tampere 2012. Tampereen teknillinen yliopisto, Hydrauliiikan ja automatiikan laitos. 134 p.
- [15] ISO 4406. Hydraulic fluid power - Fluids - Method for coding the level of contamination by solid particle. Switzerland 1999, International Organization of Standardization. 7 p.
- [16] SAE AS4059E. Aerospace Fluid Power - Cleanliness Classification for Hydraulic Fluids. Warrendale, PA, USA 2005, SAE International. 10-4 p.
- [17] Kuosku, M. & Rinkinen, J. Hiukkasen puhtaammaksi -laboratorio hydraulikomponenttien puhtaustutkimuksiin. Promaint 25(2011)5, pp. 42-45.
- [18] Installation, operating and routine maintenance manual, Mechanical contamination extraction bench PCC-41-R0220NG2-V3. France 2009, Pall Ltd. 34 p.
- [19] CTU 1000 Series Contamination Test Unit, Operating and Maintenance Instructions. Sulzbach/Saar, Germany 2012, Hydac Filter Systems GmbH. 84 p.
- [20] Pekkonen, J., Elo, L., Kuosku, M. & Rinkinen, J. Test bench for measuring technical cleanliness of assembled fluid power components. International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies (2013) pp. 1-13.
- [21] Touchard, Gilles. Technical Support Engineer, Pall France - Industrial Manufacturing, Component Cleanliness Measurement. Sähköpostikeskustelu 17.12.2014. Ei saatavissa.
- [22] Hunt, T.M. Condition Monitoring of Mechanical and Hydraulic Plant: A concise introduction and guide. Boundary Row, London, UK 1996, Chapman & Hall. 270 p.
- [23] CMSS-ONL-1000-2 Metal particle sensor [PDF]. SKF Group. Helmikuu 2014, [viitattu 20.10.2014]. Saatavissa: <http://www.skf.com/binary/21-118522/CM-P8-13423-1-EN-Metal-Particle-Sensor-CMSS-ONL-1000-2.pdf>.
- [24] Metal SCAN On-Line Oil Debris Monitor MS3202 Sensor [PDF]. SKF Group. 2014, [viitattu 21.10.2014]. Saatavissa: <http://www.gastops.com/pdf/MS3202-Sensor-Product-Sheet.pdf>.
- [25] Metallic Wear Debris Sensor - Real time indication of condition [PDF]. Parker Hannifin Corporation. 2013, [viitattu 20.10.2014]. Saatavissa: http://www.kittiwake.com/sites/default/files/MAK19755PA_MWDS.pdf.

[26] Metallic Contamination Sensor MCS 1000 Series [PDF]. HYDAC FILTER SYSTEMS GMBH. Heinäkuu 2014, [viitattu 20.10.2014]. Saatavissa: <http://www.hydac.com/fileadmin/pdb/pdf/PRO00000000000000000000000007619020011.pdf>.

[27] MPS 01.2 Metal Particle Sensor - Instruction manual Version 2.1 [PDF]. Eaton Corporation. 2012, [viitattu 20.10.2014]. Saatavissa: http://www.eaton.eu/ecm/idcplg?IdcService=GET_FILE&allowInterrupt=1&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&noSaveAs=0&Rendition=Primary&dDocName=PCT_372391.

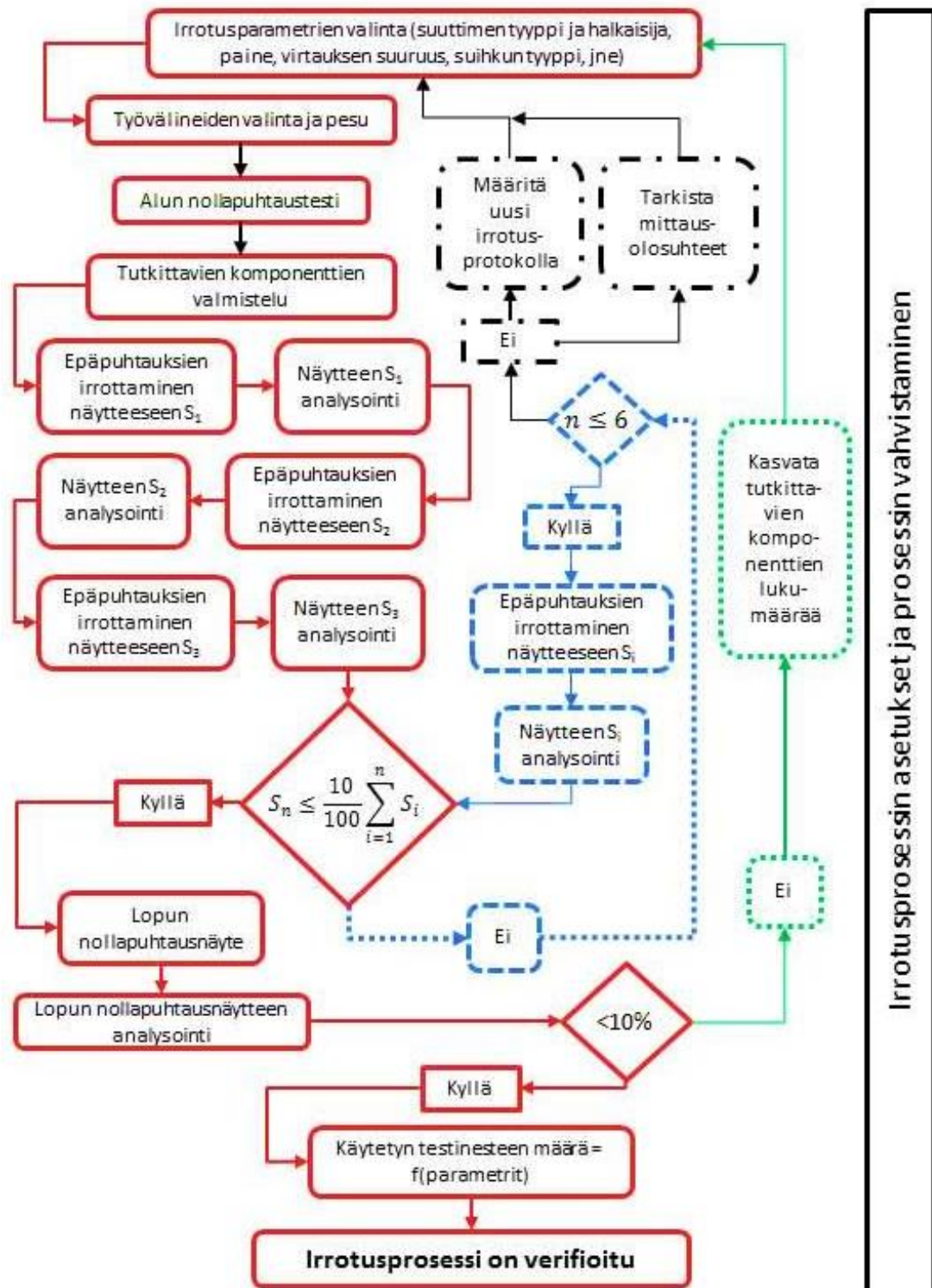
[28] Jordan, Avril. Sales Support, Kittiwake Developments Ltd, United Kingdom. Sähköpostikeskustelu 17.10.2014. Ei saatavissa.

[29] Metallic Wear Debris Sensor Instruction Manual, MA-K 19578-KW Issue 9. West Sussex, United Kingdom 2013, Parker Kittiwake, Hydraulic Filter Division Europe. 74-6 p.

[30] Iron core Material-Somaloy. Magnetworld AG. [viitattu 26.1.2015]. Saatavissa: http://www.magnet-world.de/files/smc_iron_core.pdf.

[31] Skarrie, H. Design of Powder Core Inductors. Licentiate Thesis. Lund 2001. Lund University, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation. 153 p.

LIITE A: PAINEHUUHTELUPROSESSIN VERIFIOINTIKAAVIO [6]



LIITE B:

Mittausraportti Hydac CTU 1200

Mittaaaja	<input type="text" value="Hannu Virtanen"/>	Pvm.	<input type="text" value=""/>
Valmistaja	<input type="text" value=""/>	Toim. Pvm.	<input type="text" value=""/>
Tutkittava komponentti	<input type="text" value="Moista liitin"/>	Mittaussarja	<input type="text" value=""/>
Komponentin alkuperä ja tila	<input type="text" value="Toimitettu sekaisin pussissa"/>		
Märkäpinta-ala	<input type="text" value="71,6539 cm<sup>2</sup>"/>	Märkätilavuus	<input type="text" value="18,6805 cm<sup>3</sup>"/>
		Lukumäärä	<input type="text" value="1"/>

Komponentin alkuvalmistelut

Ulkopintojen pyyhkiminen	<input type="text" value="Kyllä"/> / <input type="text" value="Ei"/>
Ulkopintojen pesu	<input type="text" value="—"/> L / <input type="text" value="—"/> bar (Liutinmäärä / Paine)
Muut valmistelut	<input type="text" value=""/>

Alku- ja loppupuhtausnäytteet

Esihuuhtelu	5 L (automaatti)	Hanskat ja ritillä	2 L
Lasi, selnät ja pohja	n. 0,5 L per pinta	Loppuhuuhdeltu	2 L (automaatti)
Paine	2 bar		
Muuta	Loppupuhtausnäytteessä pestään vain ne alueet, joihin liuotinta on roiskunut		

Komponentin puhtausnäytteet

Lukumäärä	<input type="text" value="6"/> kpl	Liutinmäärä	<input type="text" value="2,0"/> L
Miten liuotinmäärä käytettiin	<input type="text" value="Kierte + O-rengas 0,5 L
s. sämpölli 1,5 L"/>		
CTU:n roiskealueiden huuhtelu	<input type="text" value="5"/> L	Paine	<input type="text" value="2"/> bar

Näytteiden kuivaus

Uunin lämpötila	80 °C	Höyrystysaika	30 min	Jäähdytysaika	30 min
-----------------	-------	---------------	--------	---------------	--------

Kommentteja

Gravimetriset tulokset

Näyte	Ennen [mg]	Jälkeen [mg]	Hiukkasten massa [mg]
Alku			
1			
2			
3			
4			
5			
6			
Loppu			