



jamk

Öljynpuhtausanturien toiminnan tutkiminen ja kehittäminen SKF RecondOil-laitteistossa

Arttu Nieminen

Opinnäytetyö, AMK
Huhtikuu 2024
Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Nieminen Arttu

Öljynpuhtausanturien toiminnan tutkiminen ja kehittäminen SKF RcondOil-laitteistossa

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Huhtikuu 2024, 72, sivua

Konetekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

Tiivistelmä

Työn toimeksiantajalla oli tarve kehittää öljynpuhdistuslaitteiston toimintaa öljynpuhtausanturien avulla. Öljyn syväsuodatuksen avulla pystytään pidentämään öljyn käyttöikää merkittävästi ja ”elvyttämään” öljyä, jolloin vältetään turhat öljynvaihdot ja säästetään rahaa sekä ympäristöä. Alalla kasvava trendi onkin, että yhä useampi yritys etsii keinoja öljyn käyttöiän pidentämiseksi ympäristö- ja kustannussyistä. Anturien keräämää dataa voidaan hyödyntää tuomaan lisää automaatiota laitteistoon, sekä kertomaan hyödyllistä tietoa laitteiston toiminnasta.

Öljynpuhtausantureita käytetään yleensä puhtaan öljyn likaantumisasasteen seurantaan. Tavoitteena oli tutkia, voidaanko kyseisiä antureita käyttää suodatuslaitteistossa kertomaan, milloin suodattimien läpi ajettava likainen öljy on tarpeeksi puhdasta, jotta siitä kannattaa ottaa tarkempi pullonäyte laboratorion tekemää öljyanalyysiä varten. Työ aloitettiin perehtymällä öljynsuodatuslaitteistoon ja erilaisiin öljynkuntoantureihin, sekä aiheeseen liittyvään teoriaan. Työn seuraava vaihe oli anturien mekaanisen asennuksen suunnittelu käytössä olleeseen testilaitteistoon. Järjestelmästä tehtiin PI-kaavio asentajan tueksi, josta kävi ilmi kaikkien anturien suunnitellut asennuspaikat. Anturien mekaanisen asennuksen jälkeen rakennettiin anturien tiedonkeruujärjestelmä mittaustuloksien tallentamiseksi myöhempää tarkastelua varten. Anturien mittaustulokset tallennettiin toimeksiantajayrityksen omaan pilvipalveluun. Öljynkuntoantureilla varustetulla suodatuslaitteistolla suoritettiin öljynsuodatustesti, jonka aikana kerättiin mittaustuloksia ja havaintoja eri anturien toiminnasta kyseisessä käyttökohteessa. Lopuksi saatuja mittaustuloksia analysoitiin ja verrattiin teoriaan, sekä laboratorion tekemään öljyanalyyssiin korrelaation löytämiseksi.

Työn tuloksena saatiin kerättyä paljon anturidataa ja sen myötä uutta tietoa erilaisten öljynkuntoanturien toiminnasta kyseisessä käyttökohteessa, sekä jatkokehitysideoita. Öljyn puhdistuminen näkyi on-line hiukkaslaskurin mittaustuloksissa selkeänä hiukkasmäärän laskuna suodatuksen edetessä, ja mittaustuloksista muodostetun trendiviivan perusteella on myös mahdollista arvioida milloin öljy alkaa olla riittävän puhdasta, jotta siitä kannattaa ottaa pullonäyte. Tämän tiedon perusteella voidaan välttyä turhien pullonäytteiden ottamiselta, jolloin säästetään aikaa ja rahaa. Työn tuloksia voidaan käyttää hyödyksi öljynsuodatuslaitteiston jatkotuotekehityksessä.

Avainsanat (asiasanat)

Kunnonvalvonta, Kunnossapito, Anturit, Voitelu

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

-

Nieminen Arttu

Research and development of the operation of oil condition sensors in SKF RecondOil system

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, April 2024, 72 pages

Degree Programme in Mechanical engineering. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

The client had a need to improve the operation of the oil purification system with the help of oil condition sensors. Oil filtration can significantly extend the remaining oil life and "revitalise" the oil, reducing the need for oil changes and thus saving both money and the environment. Indeed, a growing trend in the industry is that more and more companies are looking for ways to extend oil life for environmental and cost reasons. The data collected by oil condition sensors can be used to bring more automation to the oil filtration unit, as well as to provide useful information about the operation of the system.

Oil condition sensors are generally used to monitor the degree of contamination of clean oil. The aim was to investigate whether these sensors could be used in oil filtration system to tell when the dirty oil passing through the filters is clean enough to be worth taking a more accurate bottle sample for laboratory oil analysis. The work began with a study of the oil filtration system and the different types of oil condition sensors, as well as the theory behind the subject. The next step was to design the mechanical installation of the sensors on the test equipment in use. A flow diagram of the system was made to assist the installer, showing the planned mounting locations of all sensors. After the mechanical installation of the sensors, a sensor data acquisition system was built to record the measurement results for later review. The sensor measurements were stored in the client's own cloud service. An oil filtration test was carried out with a filtration system equipped with oil condition sensors. During the filtration test sensor data and observations of the operation of the various oil condition sensors installed were collected. Finally, the sensor data was analyzed and compared with theory and laboratory oil analysis to find a correlation.

As a result of this work, a lot of sensor data was collected and with-it new information about the performance of different oil condition sensors in the application, as well as ideas for further development. The filtration of the oil was reflected in the on-line particle counter measurement data as a clear decrease in particle count as the filtration process progressed, and the trend line generated from the data also allows to estimate when the oil starts to be clean enough to be worth taking a bottle sample. With this information, unnecessary bottle sampling can be avoided, saving time and money. The results of this work can be used for further product development of oil filtration equipment.

Keywords/tags (subjects)

Condition monitoring, Maintenance, Sensors, Lubrication

Miscellaneous (Confidential information)

-

Sisältö

1	Johdanto	5
1.1	Työn lähtökohdat	5
1.2	Työn tavoitteet ja rajaus	5
2	Yritysesittely.....	6
2.1	SKF Muurame	6
2.2	Yrityksen liikeidea ja tuotteet	7
2.2.1	SKF RecondOil	8
3	Tutkimusasetelma	9
3.1	Kehittämistutkimus	9
3.2	Kvalitatiivinen tutkimus.....	10
3.3	Kvantitatiivinen tutkimus	10
3.4	Aineistonkeruu	11
3.5	Eettisyys.....	11
4	Voiteluöljy.....	12
4.1	Erityyppiset voiteluöljyt	12
4.1.1	Mineraaliöljyt.....	12
4.1.2	Synteettiset öljyt.....	13
4.2	Voiteluöljyjen lisäaineet	13
4.2.1	Hapettumisenestoaineet	14
4.2.2	Korroosionestoaineet	14
4.2.3	Kulumisenestoaineet	14
4.3	Öljyn vanhentuminen ja kuluminen	15
4.3.1	Kokonaishappoluku TAN.....	17
4.3.2	Kokonaisemäsluku TBN.....	18
4.3.3	Öljyn vanhenemisprosessin eteneminen	18
5	Öljyn kunnonvalvonta.....	20
5.1	Yleistä öljyn kunnonvalvonnasta.....	20
5.2	Offline kunnonvalvonta.....	21
5.2.1	Öljyanalysit.....	21
5.3	In-line ja On-line kunnonvalvonta	22
5.3.1	On-line öljynkuntoanturit	23
5.4	Vesipitoisuusanturit	25
5.4.1	Kapasitiiviset anturit	25
5.4.2	Absoluuttinen vesipitoisuus (PPM).....	26

5.5	Optiset hiukkaslaskurit.....	26
5.6	Viskositeettianturit.....	28
5.7	Öljyn sähköisiä ominaisuuksia mittaavat öljynkuntoanturit.....	30
5.7.1	Konduktiivisyys ja resistiivisyys.....	31
5.7.2	Dielektrisyysvakio (suhteellinen permittiivisyys)	33
5.7.3	Öljyn Dielektrisyysvakion mittaaminen	33
5.7.4	Öljyn ominaisuuksien vaikutus dielektrisyysvakioon	34
5.7.5	Öljynkuntoanturin mittaustuloksien tulkitseminen	36
6	Työn käytännön toteutus.....	38
6.1	Laitteiston anturointi	38
6.2	Anturien tiedonkeruujärjestelmä.....	41
6.2.1	Tiedonkeruujärjestelmän konfigurointi.....	42
6.3	Öljynsuodatustestin koejärjestely.....	45
6.3.1	Tynnyri 1	45
6.3.2	Tynnyri 2	45
6.3.3	Hypoteesi	46
7	Tulokset.....	46
7.1	ON-Line hiukkaslaskuri	46
7.2	Öljynkuntoanturi A	49
7.2.1	Tynnyri 1	49
7.2.2	Tynnyri 2	50
7.2.3	Tynnyri 1 lisäsuodatus	51
7.2.4	Lisätestit hapettuneella öljyllä.....	53
7.3	Öljynkuntoanturi B	54
7.4	Öljynkuntoanturi C	57
7.5	Öljynkuntoanturi D.....	59
7.6	Paine-eroanturi	59
7.7	Suodatustestin tulokset	60
7.8	Tuloksien luotettavuuden arviointi.....	62
7.9	Jatkokehitys- ja toimenpideideoita.....	63
8	Johtopäätökset ja pohdinta	64
	Lähteet	66
	Liitteet	69
	Liite 1. Anturin öljynkuntoarvon konversiotaulukko	69
	Liite 2. Öljynkuntoraportti.....	70

Kuviot

Kuvio 1 SKF:n Muuramen tehdas.....	6
Kuvio 2 Flowline kiertoöljyvoitelukeskus (SKF 2023.).....	7
Kuvio 3 SKF Minilube- rasvavoitelupumppu (SKF 2023.).....	7
Kuvio 4 RecondOil box öljynsuodatusyksikkö (SKF 2023.).....	8
Kuvio 5 Öljyn kulumismekanismit (The Lowdown on Oil Breakdown, 2003.).....	15
Kuvio 6 Yleisiä öljyn hapettumisreaktiossa syntyviä sivutuotteita (The Lowdown on Oil Breakdown, 2003.).....	16
Kuvio 7 Öljyn teoreettinen ikääntymisprosessi (Argo-Hytos Oil Condition Sensors. N.d, muokattu.).....	19
Kuvio 8 Eri öljyn kunnonvalvontatapoja (Öljyn kunnossapito 2018, 13, muokattu.).....	22
Kuvio 9 Öljyn kulumisen yhteys öljyn suorituskykyparametreihin sekä niitä mittaaviin antureihin (Zhu, He, & Bechhoefer, 2013, 2.).....	24
Kuvio 10 Optisen hiukkaslaskurin toimintaperiaate (The methods of optical particle counting – light extinction and light scattering 2020.).....	27
Kuvio 11 ISO-hiukkasluokat (Understanding ISO-Codes. 2017, Muokattu.).....	28
Kuvio 12 Voiteluöljyjen viskositeetti-indeksi (Understanding the viscosity index of a lubricant. 2020, muokattu.).....	29
Kuvio 13 Tandelta öljynkuntoanturi (OQSx-G2 Tandelta systems. N.d.).....	30
Kuvio 14 Nesteiden ja kiinteiden aineiden sähkönjohtavuuden arvoja (Mauntz, Kuipers, & Peuser 2015.).....	32
Kuvio 15 Dielektrisyysvakio lämpötilan funktiona (Carey & Hayzen 2001, Muokattu.).....	35
Kuvio 16 Öljynkuntoanturin asennuspaikka pumppulohkossa.....	39
Kuvio 17 Järjestelmän PI-kaavio.....	40
Kuvio 18 Valmis testilaitteisto.....	40
Kuvio 19 Tiedonkeruujärjestelmä.....	41
Kuvio 20 Observer ohjelmiston päänäkyvä.....	42
Kuvio 21 Anturin mittauspiste.....	43
Kuvio 22 milliampeeri - lämpötila konversio.....	44
Kuvio 23 Tavoitearvot öljylle.....	45
Kuvio 24 Tynnyri 2: Hiukkaslaskuri.....	47
Kuvio 25 Korrelaatio ON-line hiukkaslaskurin ja pullonäytteiden välillä.....	48
Kuvio 26 Öljynkuntoanturi A: Tynnyri 1.....	49
Kuvio 27 Öljynkuntoanturi A: Tynnyri 2.....	51

Kuvio 28 Anturin mittaustrendi verrattuna pullonäytteestä mitattuun TAN-arvoon	52
Kuvio 29 Anturitestin hapettuneella hydraulioöljyllä	53
Kuvio 30 Öljynkuntoanturi B: Öljyn dielektrisyysvakio	55
Kuvio 31 Öljynkuntoanturi B: öljyn johtavuus	56
Kuvio 32 Öljynkuntoanturi B: öljyn suhteellinen kosteus ja lämpötila	57
Kuvio 33 Öljynkuntoanturi C: öljyn dielektrisyysvakio.....	58
Kuvio 34 Öljynkuntoanturi C: dielektrisyysvakio ja anturin diagnostiikka.....	58
Kuvio 35 Paine-eroanturi	59
Kuvio 36 Pullonäytteet.....	60
Kuvio 37 Hiukkasmäärä ja MPC analyysi.....	61
Kuvio 38 Suodatin	61

Taulukot

Taulukko 1 Tyypillisiä materiaalien dielektrisyysvakioita (Carey & Hayzen 2001, Muokattu.) ..	35
Taulukko 2 Eri mittaus suureiden yhteys öljyn kulumiseen (Gayrard & Milpied 2020, Muokattu.)	37

1 Johdanto

1.1 Työn lähtökohdat

Opinnäytetyön toimeksiantajalla SKF-Muuramalla on tarve tutkia erilaisten öljynpuhtausanturien käyttöä SKF RecondOil öljynpuhdistuslaitteistossa. Anturien keräämää dataa voidaan hyödyntää tulevaisuudessa tuomaan lisää automaatiota laitteistoon, sekä kertomaan SKF:lle hyödyllistä tietoa laitteiston toiminnasta.

SKF:n RecondOil-öljynpuhdistuslaitteistolla pystytään pidentämään öljyn käyttöikä merkittävästi ja "elvyttämään" öljyä, mikä säästää rahaa ja ympäristöä. Alalla kasvava trendi onkin, että yhä useampi yritys etsii keinoja öljyn käyttöiän pidentämiseksi ympäristö- ja kustannussyistä.

1.2 Työn tavoitteet ja rajaus

Öljynpuhtausantureita käytetään yleensä puhtaan öljyn likaantumisasteen seurantaan. Tässä opinnäytetyössä tutkitaan, voidaanko kyseisiä antureita käyttää myös kertomaan, milloin suodattimien läpi ajettava likainen öljy on tarpeeksi puhdasta. Anturien antamia mittaustrendejä verrataan laboratorionäytteisiin korrelaation löytämiseksi.

Työn tavoitteena on luoda yhteenveto ja suositus siitä, mitkä anturit soveltuvat parhaiten kyseiseen käyttötarkoitukseen, sekä mitä kaikkea pitää huomioida niiden asennukseen ja käyttöön liittyen. Opinnäytetyön tuloksia voidaan hyödyntää myöhemmin laitteiston tuotekehityksessä. Anturien datan perusteella tuotteeseen pystytään lisäämään enemmän automaatiota ja älykkäitä toimintoja, joiden avulla asiakas voi seurata tarkemmin laitteen toimintaa ja öljyn puhtautta.

Opinnäytetyön aihe rajattiin koskemaan projektikohtaisen SKF RecondOil box öljynpuhdistuslaitteiston kokeellista anturointia. Aihealueesta rajattiin pois laitteiston mahdollinen muu jatkokehitys aiheen liian suuren laajuuden takia. Tämän opinnäytetyön aihealueeseen sisältyy testilaitteiston antureiden asennuksen suunnittelu, testilaitteiston tiedonkeruujärjestelmän konfigurointi, sekä mittaustulosten analysointi. Lopuksi syntyy yhteenveto ja suositus siitä, mitkä anturit soveltuvat parhaiten kyseiseen käyttötarkoitukseen, sekä mitä kaikkea pitää huomioida niiden asennukseen ja käyttöön liittyen.

2 Yritysesittely

SKF, eli Svenska Kullagerfabriken perustettiin Ruotsissa, Göteborgissa vuonna 1907, jossa sijaitsee edelleen yhtiön pääkonttori. Eräs SKF:n perustajajäsenistä, ja samalla yhtiön ensimmäinen toimitusjohtaja Sven Wingquist, oli kaksirivisen itseasettuvan kuulalaakerin keksijä. SKF on tullut tunnetuksi etenkin kuulalaakerien valmistajana, mutta yhtiön tuotteisiin kuuluu nykyään myös tiivisteet, kunnonvalvonta, voimansiirto ja voitelujärjestelmät. (SKF history timeline 2023.)

SKF on globaali markkinajohtaja keskusvoitelun rasva- ja öljyratkaisuissa ajoneuvopuolella, sekä teollisuudessa. SKF:n Lubrication management-yksikkö keskittyy voitelujärjestelmien maailmanlaajuiseen tutkimus- ja kehitystyöhön, valmistukseen, myyntiin ja jakeluun. Suomessa SKF:n voiteluliiketoiminnan toiminnot on keskitetty Muuramen tehtaalle. (SKF voitelujärjestelmät 2023.)

2.1 SKF Muurame

SKF:n Muuramen tehdas sijaitsee Muuramen teollisuuskylässä. Muuramen tehtaassa on valmistettu voitelujärjestelmiä ajoneuvoihin ja teollisuuteen jo vuodesta 1972 lähtien. Muuramen tehtaan historia alkaa OY Safematic Ltd:stä, jonka John Crane osti myöhemmin itselleen vuonna 1998, jolloin siitä tuli John Crane Safematic OY. SKF osti John Crane Safematic Oy:n voiteluliiketoiminnan vuonna 2006, jonka jälkeen Muuramen tehdas siirtyi nykyiseen SKF:n omistukseen. Suomen voiteluliiketoiminnan palveluksessa työskentelee nykyisin n. 100 henkilöä. (SKF 2023.)



Kuvio 1 SKF:n Muuramen tehdas

2.2 Yrityksen liikeidea ja tuotteet

SKF Muuramen liikeideana on tuottaa voiteluratkaisuja ajoneuvojen, koneiden ja teollisuuden tarpeisiin. Muuramen tehtaasta valmistamat tuotteet ovat keskusvoitelujärjestelmän osia, kuten kiertööljyvoitelukoneikkoja (ks. Kuvio 2), pumppauskeskuksia, virtausmittareja, rasvavoitelupumppuja (ks. Kuvio 3), annostimia ja ohjauskeskuksia. SKF:n keskusvoitelujärjestelmiä käytetään esimerkiksi metsä-, kaivos- ja maatalouskoneissa, kuorma-autoissa, sekä paperi ja selluteollisuudessa.



Kuvio 2 Flowline kiertööljyvoitelukeskus (SKF 2023.)



Kuvio 3 SKF Minilube- rasvavoitelupumppu (SKF 2023.)

2.2.1 SKF RecondOil

SKF RecondOil box öljynsuodatusyksiköllä (ks. Kuvio 4) pystytään pidentämään voiteluöljyn käyttöikää suodattamalla siinä olevat epäpuhtaudet pois. Suodatuksella pystytään poistamaan öljyn seassa olevia epäpuhtauksia, kuten kulumishiukkasia, hapettumistuotteita, vettä ja lakkaa, jolloin voiteluöljyn käyttöikä voidaan jatkaa öljynvaihdon sijasta.

Voiteluöljyn käyttöiän pidentäminen säästää sekä rahaa, että ympäristöä. Öljyjen vaihtaminen ja vanhan öljyjätteen kierrättäminen on yrityksille iso kuluerä. Parhaimmillaan öljyn syväsuodatuksella pysytään lähes kokonaan poistamaan tarve kokonaisille öljynvaihdolle. Alalla kasvava trendi onkin se, että yhä useampi yritys etsii keinoja öljyn käyttöiän pidentämiseksi ympäristö- ja kustannussyistä. (SKF RecondOil 2023.)



Kuvio 4 RecondOil box öljynsuodatusyksikkö (SKF 2023.)

3 Tutkimusasetelma

3.1 Kehittämistutkimus

Opinnäytetyössä esiintyviä keskeisiä tutkimuskysymyksiä ovat: ”Miten hyvin eri öljynkuntoanturien tuottama data korreloi laboratorionäytteissä esiintyvien öljyn eri kulumis- ja vanhenemismekanismien kanssa?”, sekä ”Mikä, tai mitkä anturit sopisivat parhaiten kyseiseen käyttökohteeseen, ja mitä kaikkea niiden asennuksessa ja käytössä tulee huomioida?” Näihin tutkimuskysymyksiin etsitään vastauksia kehittämistutkimuksen avulla.

Kehittämistutkimus on tutkimusmenetelmä, jonka tavoitteena on kehittää jotain tutkimuksen kohteena olevaa asiaa, kuten prosessia, toimintoa tai tuotetta, ja etsiä ratkaisuja käytännön ongelmiin. Kehittämistutkimus pyrkii yhdistämään teoreettisen tiedon, sekä teorian käytäntöön soveltamisen tehokkaaksi ongelmanratkaisutavaksi. Kehittämistyö lähtee aina muutostarpeesta, jonka tavoitteena on aina kehittää jotain asiaa paremmaksi. Kehittämistutkimuksessa kehittäminen ja tutkiminen yhdistyvät teoreettisia ja kokeellisia vaiheita sisältävässä syklisessä prosessissa. Syklisellä prosessilla tarkoitetaan ns. kehityssykliä, jossa kuvataan ongelma, laaditaan toimenpide-ehdotukset, toteutetaan ja katsotaan tulos. (Kananen 2015, 33, 39, 40.)

Kehittämistutkimusta ei pidetä omana erillisenä tutkimusmenetelmänä, sillä se on joukko eri tutkimusmenetelmiä. Kehittämistutkimus on monimenetelmäinen tutkimusote, jossa yhdistyy tarpeen mukaan elementtejä kvalitatiivisesta ja kvantitatiivisesta, eli laadullisesta ja määrällisestä tutkimusmenetelmästä. Tämä opinnäytetyö on tyypiltään kehittämistutkimus, ja se sisältää myös joitain laadullisen ja määrällisen tutkimuksen elementtejä aineistonkeruuseen, mittaustulosten analysointiin ja laboratorionäytteiden korrelaation tutkimiseen liittyen. Kehittämistutkimus soveltuu menetelmänä hyvin tähän opinnäytetyöhön, koska sen tavoitteena on ratkaista todellisia työelämästä kumpuavia ongelmia, ja siinä yhdistyy vahvasti teoria, konkreettinen kehittämistoiminta, sekä erilaisten tutkimuksellisten menetelmien soveltaminen käytännössä. (Kananen 2015, 33.)

3.2 Kvalitatiivinen tutkimus

Kvalitatiivinen tutkimus eli laadullinen tutkimus on tutkimusmenetelmä, jonka avulla pyritään ymmärtämään tutkittavaa ilmiötä syvällisemmin. Laadullisen tutkimuksen tavoitteena on saada muodostettua ymmärrys aiheesta tutkittavien asioiden ja henkilöiden avulla. Laadullisen tutkimuksen aineistoa voidaan kerätä esimerkiksi ilmiöön liittyvien olemassa olevien dokumenttien, sekä havainnoinnin ja haastattelujen avulla. Laadullinen tutkimus pyrkii rakentamaan ilmiöstä ymmärrystä yleisempään näkemykseen ja sitä kautta luomaan teorioita ja malleja, jolla ilmiötä voidaan kuvata. Laadullinen tutkimus on tärkeä osa tätä opinnäytetyötä, sillä sen avulla muodostetaan ymmärrys aiheeseen liittyvistä ilmiöistä, jolloin saatuja tuloksia voidaan tulkita oikein.

(Kananen 2015, 34, 35.)

3.3 Kvantitatiivinen tutkimus

Kvantitatiivinen, eli määrällinen tutkimus on tutkimusmenetelmä, joka perustuu määrällisten tulosten keräämiseen, analysointiin ja tulkitsemiseen. Määrällisen tutkimuksen aineisto koostuu luvuista, joita tulkitaan erilaisilla analyysimenetelmillä. Määrällisen tutkimuksen aineistoja voidaan analysoida monilla eri menetelmillä, kuten esimerkiksi korrelaatio ja regressioanalyysillä, joissa tutkitaan kahden muuttujan välistä riippuvuutta. Määrällisen tutkimuksen avulla pystytään havaitsemaan asioiden välillä olevia numeerisia eroja ja suhteita. Määrällistä tutkimusta voidaan hyödyntää numeeristen tulosten tulkitsemisessä, mutta asioiden syiden selvittämiseen se ei ole yksinään riittävä menetelmä, eikä määrällistä tutkimusta voida tehdä, mikäli ilmiötä ei tunneta riittävän hyvin. (Kananen 2015, 38, 108.)

3.4 Aineistonkeruu

Opinnäytetyn aineiston kerääminen aloitettiin etsimällä tietoa luotettavista ja relevanteista lähteistä. Toimeksiantajayrityksellä oli myös tarjottavana luotettavaa ja relevanttia aineistoa aiheeseen liittyen. Hyödynnettävänä informaationa on myös toimeksiantajayrityksen anturitoimittajien, toimihenkilöiden ja työntekijöiden tietämys aiheesta.

Opinnäytetyön lähdeaineisto koostuu aiheeseen liittyvästä kirjallisuudesta, verkkojulkaisuista, toimeksiantajayrityksen omista materiaaleista, haastatteluista, sekä mittaustuloksista. Aiheesta löytyy jonkin verran kirjallisuutta, ja opinnäytetyön lähdeaineistossa on käytetty aiheesta löytynyttä suomenkielistä kirjaa. Verkkojulkaisut pitävät sisällään yleisesti aiheesta verkosta löytyvää materiaalia, joka on suureksi osaksi englanninkielistä. Lähdeaineistossa on käytetty mm. aiheesta löytyneitä tutkimusartikkeleita, sekä eri anturivalmistajien ohjeita.

Työn toimeksiantajalta saatiin tärkeää tietoa mm. antureihin ja RecondOil laitteistoon liittyen. Työssä pyrittiin hyödyntämään yrityksestä löytyvää tietoa ja osaamista havainnoinnin ja haastattelujen avulla. Haastatteluihin sisältyi yrityksen opinnäytetyön ohjaaja, sekä työntekijöitä, jotka toimivat aiheeseen liittyvissä tehtävissä.

Mittaustulosten kerääminen testilaitteiston antureista tapahtui pilvipohjaisen palvelun kautta, jonne mittausdata tallennettiin. Mittaustuloksia analysoitiin empiirisesti erilaisten kuvaajien avulla, joita saatiin muodostettua mittausdatan perusteella eri ohjelmistoissa.

3.5 Eettisyys

Tämän opinnäytetyön kannalta oleelliset eettiset asiat liittyvät tietosuojaan ja luottamuksellisen aineiston käsittelyyn. Opinnäytetyössä haastateltuja henkilöitä ja asiakasyrityksen yhteistyökumppaneita ei mainita tietosuojan vuoksi nimeltä. Asiakasyrityksen kanssa on sovittu, että tietyt luottamukselliset asiat salataan ja jätetään pois työn julkisesta versiosta. Luottamuksellista lähdeaineistoa käsitellään asiakasyrityksen tietoturvallisuus käytäntöjen mukaisesti.

4 Voiteluöljy

Voiteluöljyn pääasiallinen tehtävä on kitkan ja siitä aiheutuvan kulumisen ja tehohäviöiden vähentäminen erottamalla toisiaan vasten liikkuvat kosketuspinnat ohuen voiteluainekalvon avulla.

Voiteluöljyllä on tämän lisäksi myös muita tärkeitä tehtäviä, kuten lämmönhallinta siirtämällä lämpöä pois pinnoilta, värähtelyn vaimentaminen, tehonsiirto hydraulijärjestelmissä, epäpuhtauksien ja kulumishiukkasten kuljettaminen pois, osien suojaaminen korroosiolta jne. Oikeanlainen voitelu on edellytys koneiden luotettavalle toiminnalle ja pitkälle käyttöiälle. Tehokas voitelu mahdollistaa pienentyneen kitkan myötä koneelle paremman hyötysuhteen ja osien alhaisemman kulumisen, mistä on myös suoraa taloudellista hyötyä. Alhainen kitka ja hyötysuhteen parantuminen näkyy suoraan energian säästönä ja osien vähentynyt kulumisen mahdollistaa koneelle pidemmän huoltovälin ja eliniän. (Kunnossapito menestystekijä, voiteluhuolto-voiteluaineet. N.d.; Lubrication basics 2017.)

4.1 Erityyppiset voiteluöljyt

Voiteluöljyt voidaan jakaa perusöljytyypiltään mineraali- ja kasviöljyihin sekä synteettisiin öljyihin. Kasviöljyjä käytetään harvoin teollisuudessa vaativissa käyttökohteissa, koska niiden kesto hapetumista vastaan on heikompi ja virtausominaisuudet kylmissä lämpötiloissa rajalliset. Teollisissa sovelluksissa käytetään usein mineraali- ja synteettisiä perusöljyjä. (Lubrication basics 2017.)

4.1.1 Mineraaliöljyt

Mineraaliöljyt valmistetaan tislaamalla ja puhdistamalla raakaöljyä. Raakaöljyjen koostumuksessa on paljon vaihtelua ja se saattaa vaihdella lähdekohtaisesti. Öljyn hiilivetykoostumus vaikuttaa öljyn ominaisuuksiin, kuten esimerkiksi viskositeettilämpötilariippuvuuteen (VI), tiheyteen ja jähmettymis- ja leimahduspisteeseen. (Kunnossapito menestystekijä, voiteluhuolto-voiteluaineet. N.d.)

Tärkeimmät öljyssä esiintyvät hiilivetytyypit ovat:

- parafiiniset hiilivedyt (tyydytetyjä ketjumaisia), (C_P)
- nafteeniset hiilivedyt (tyydytetyjä rengasrakenteisia), (C_N)
- aromaattiset hiilivedyt (tyydyttämättömiä rengasrakenteisia), (C_A).

Raakaöljyssä esiintyvien hiilivetyjen koostumuksen eroavaisuudet johtavat myös lopputuotteen kannalta erilaisiin ominaisuuksiin. Valtaosa mineraaliöljypohjaisista voiteluöljyistä on valmistetty parafiinisista perusöljyistä. Perusöljytyyppi valitaan öljyn käyttökohteen ja sille haluttujen ominaisuuksien perusteella. (Kunnossapito menestystekijä, voiteluhuolto-voiteluaineet. N.d.)

4.1.2 Synteettiset öljyt

Synteettiset öljyt pohjautuvat raaka-aineiltaan keinotekoisesti tuotettuihin ei raakaöljypohjaisiin yhdisteisiin. Synteettiset öljyt voidaan jakaa valmistusmenetelmän perusteella kolmeen eri ryhmään: synteettisiin hiilivetyihin, orgaanisiin estereihin ja polyglycoleihin. Synteettisten öljyjen etuna yleisesti mineraalipohjaisiin öljyihin verrattuna on parempi kestävyys vaativissa käyttöolosuhteissa sekä paremmat viskositeettiominaisuudet kylmissä ja kuumissa lämpötiloissa. (Kunnossapito menestystekijä, voiteluhuolto-voiteluaineet. N.d.)

4.2 Voiteluöljyjen lisäaineet

Öljyn lisäaineiden tehtävänä on parantaa perusvoiteluöljyn suorituskykyä eri osa-alueilla. Öljyn lisäaineet ovat orgaanisia tai epäorgaanisia yhdisteitä, jotka ovat liuenneina tai suspensiona öljyn seassa. Lisäaineiden osuus öljyn tilavuudesta on yleensä 0,1-30% luokkaa käyttökohteesta riippuen. (Lubricant Additives - A Practical Guide. 2015.)

Öljyn lisäaineiden tehtäviä ovat esimerkiksi:

- voiteluaineen suorituskyvyn parantaminen haastavissa olosuhteissa
- voiteluaineen eliniän jatkaminen suojaamalla sitä esimerkiksi happettumista vastaan
- voideltavien pintojen suojeleminen ympäristön kanssa tapahtuvilta reaktioilta kuten korroosiolta
- voiteluaineeseen joutuneiden epäpuhtauksien jakauttaminen

4.2.1 Hapettumisenestoaineet

Hapettumisenestolisäaineiden tehtävänä on pidentää voiteluaineen elinikää hidastamalla öljyn kemiallista vanhenemista. Öljyn hapettuminen on ilmassa olevan hapen aiheuttamaa perusöljyn heikoimpiin rakenneosiin kohdistuvaa yleistä hyökkäystä. Öljyn hapettuminen on luonnollinen prosessi ja sitä tapahtuu jatkuvasti kaikissa lämpötiloissa käytön aikana. Öljyn hapettumista kiihdyttävät kuitenkin erityisesti korkeat lämpötilat sekä öljyn seassa oleva vesi, kulumismetallit tai muut epäpuhtaudet. Öljyn hapettuminen johtaa edetessään korroosiota aiheuttavien happojen sekä pinnoille tarttuvien ja viskositeettia alentavien lietteiden muodostumiseen öljyssä. Hapettumisenestoaineet ovat uhrautuvia lisäaineita, eli ne kuluvat hiljalleen pois suojellessaan öljyä hapettumiselta. Öljyn hapettuminen kiihtyy merkittävästi sen jälkeen, kun hapettumisenestoaineet on kulutettu pois, joten lisäaineiden määrää öljyssä tulee tarkkailla. (Lubricant Additives - A Practical Guide. 2015.)

4.2.2 Korroosionestoaineet

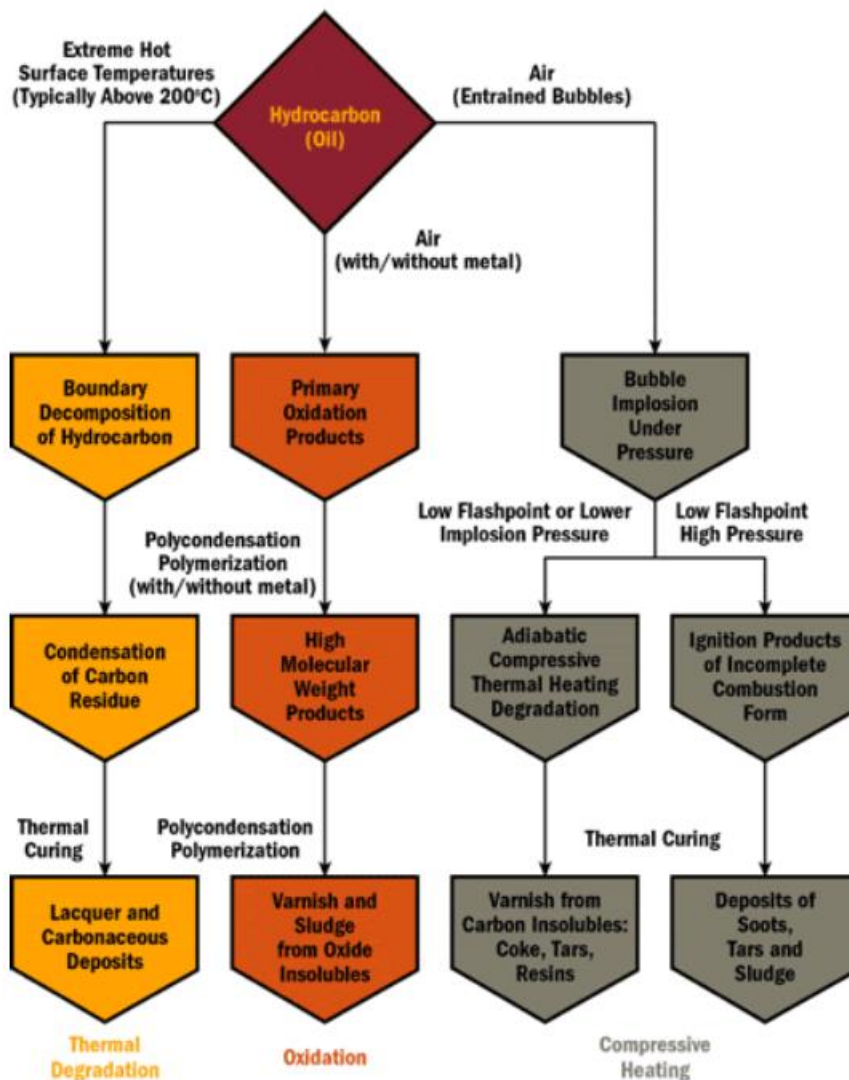
Korroosionestolisäaineiden tehtävänä on suojella voideltuja metallipintoja korroosiolta neutraloimalla happoja sekä estämällä hapen ja kosteuden pääsyn kosketuksiin metallin kanssa. Korroosionestoaineet muodostavat metallipinnalle suojaavan kalvon, jolloin vesi ja happi eivät pääse suoraan kosketuksiin metallin kanssa. (Lubricant Additives - A Practical Guide. 2015.)

4.2.3 Kulumisenestoaineet

Kulumisenestolisäaineiden tehtävänä on vähentää voideltavien kosketuspintojen kulumista suuren kuormituksen aiheuttamissa vaativissa voiteluolosuhteissa, jolloin voiteluainekalvo saattaa olla ohut. Lisäaineet reagoivat kemiallisesti metallipinnan kanssa metalli-metalli kontaktin esiintyessä muodostaen pinnoille kulumista vastaan suojaavan kerroksen. Kulumisenestoaineet ovat myös niin kutsuttuja uhrautuvia lisäaineita, eli ne ehtyvät ajan kanssa tehdessään tehtävänsä. (Lubricant Additives - A Practical Guide. 2015.)

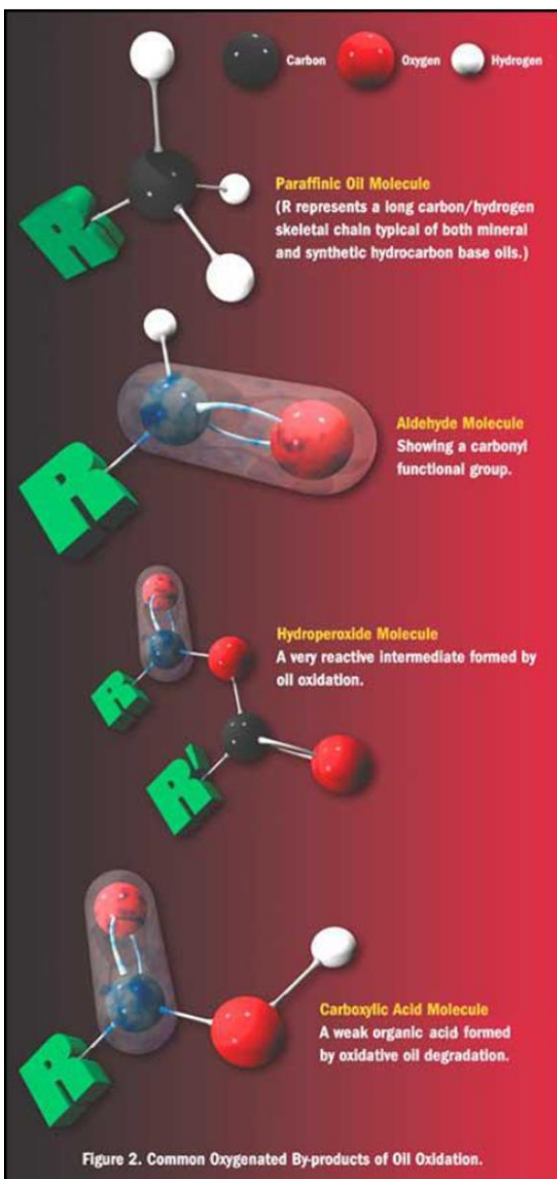
4.3 Öljyn vanhentuminen ja kuluminen

Yleisimmät syyt öljyn vanhentumiseen ja kulumiseen ovat öljyn hapettuminen, tai saastuminen kulumishiukkasilla, noella, tai muilla nesteillä kuten vedellä (Zhu, He, & Bechhoefer, 2013, 1). Öljy voi myös kulua suurten lämpötilojen vaikutuksesta. Termistä kulumista voi tapahtua käyttökohteissa, joissa öljy joutuu kosketuksiin kuumien pintojen kanssa (yleensä yli 200 °C), tai kavitaation vaikutuksesta, jolloin öljyn seassa oleville ilmakuplille tapahtuu imploosio. Imploosiossa, eli niin kutsutussa sisäänpäin räjähdyksessä öljyn seassa olevat ilmakuplat luhistuvat äkillisesti paineen alla, jolloin ilmakuplan sisällä olevan ilman lämpötila kasvaa hetkellisesti erittäin korkeaksi. Kuviossa 5 on esitetty erilaisia öljyn kulumismekanismeja sekä niiden aiheuttamia sivutuotteita. (The Lowdown on Oil Breakdown, 2003.)



Kuvio 5 Öljyn kulumismekanismit (The Lowdown on Oil Breakdown, 2003.)

Öljyn hapettuminen ja terminen kulumisen eroavat selvästi toisistaan, mutta kummatkin johtavat lopulta muutoksiin öljymolekyylien peruskemiassa, millä voi olla merkittävä vaikutus voiteluaineen toimintaan. Öljyn termisessä kulumisessa erityisesti pitkäkestoisissa kuumissa lämpötiloissa öljymolekyylit voivat pilkkoontua, jolloin niiden hiilivetyketjujen pituus muuttuu. Tämä voi johtaa viskositeetin laskuun ja sen myötä öljyn voiteluominaisuuksien huonontumiseen. Öljyn hapettumisessa tapahtuva kemiallinen reaktio johtaa hapen peräkkäiseen liittymiseen perusöljymolekyyliin, jolloin muodostuu useita eri kemikaalilajeja, kuten aldehydejä, ketoneita, hydroperoksideja ja karboksyylihappoja (ks. Kuvio 6). (The Lowdown on Oil Breakdown, 2003.)



Kuvio 6 Yleisiä öljyn hapettumisreaktiossa syntyviä sivutuotteita (The Lowdown on Oil Breakdown, 2003.)

Karboksyylihapot ovat nimensä mukaisesti luonteeltaan happamia, jolloin öljyn happopitoisuus kasvaa. Öljyn happopitoisuuden kasvu on yleensä esiaste lietteen ja lakan muodostumiselle. Kun hapettuneet reaktiotuotteet, kuten hydroperoksidit ja karboksyylihapot yhdistyvät, syntyy suurempia molekyylilajeja, ja sen myötä lopulta lietettä ja lakkoja. Tätä prosessia kutsutaan polymerisaatioksi. Polymerisaation tuloksena muodostuu molekyylipainoltaan suuria molekyyliä, mikä johtaa myös öljyn viskositeetin kasvuun, sillä öljyn viskositeetti on suoraan yhteydessä molekyylien kokoon. Jos polymerisaation annetaan edetä liian pitkälle, molekyylit kasvavat liian suuriksi pysyäkseen liuenneina, jolloin öljyn sekaan muodostuu kiinteää materiaalia kuten lietettä ja lakkaa. (The Lowdown on Oil Breakdown, 2003.)

Öljyn kuntoa tai kuluneisuusastetta voidaan tutkia mittaamalla öljyn suorituskykyparametreja. Tällaisia parametreja ovat esimerkiksi viskositeetti, vesipitoisuus, kokonaishappoluku (TAN), kokonaisemäsluku (TBN) ja hiukkaspitoisuus. (Zhu, He, & Bechhoefer, 2013, 1.)

4.3.1 Kokonaishappoluku TAN

Öljyn kokonaishappoluku (Total Acid Number, TAN) kuvaa öljyssä olevan happopitoisuuden määrää. Voiteluöljyn happopitoisuus riippuu käytetystä lisäainepaketista, sekä happamien epäpuhtauksien ja hapettumisen myötä syntyneiden sivutuotteiden esiintymisestä. Korkea happamien yhdisteiden pitoisuus voiteluaineessa voi aiheuttaa osien korroosiota ja lakan ja lietteen muodostumista. Joissain tapauksissa öljyn TAN arvo saattaa laskea aluksi lisäaineiden ehtymisen vuoksi. Tämän vuoksi onkin noudatettava varovaisuutta arvioidessa öljyn hapettumista kokonaishappoluvun perusteella, sillä monet lisäaineet, sekä uudet että hajonneet, voivat muuttaa öljyn happolukua ja peittää perusöljyn hapettumisen todelliset vaikutukset. Hapettumisen myötä syntyvien sivutuotteiden ja happamien epäpuhtauksien kertyminen öljyyn ajan mittaan johtaa kuitenkin aina TAN-arvon kasvuun. (The Lowdown on Oil Breakdown, 2003; Guide to Measuring TAN and TBN in Oil, 2017, 1.)

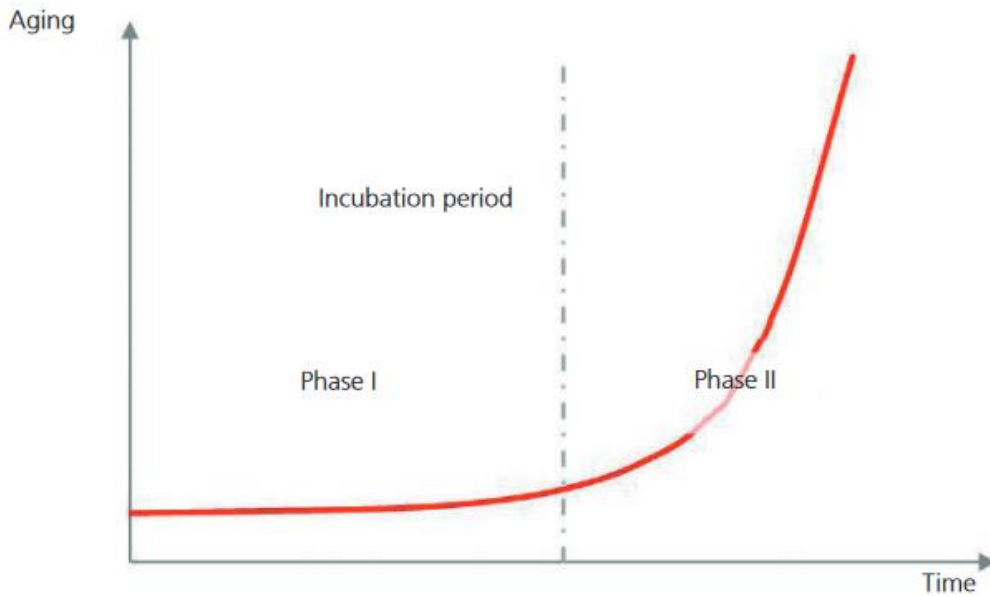
4.3.2 Kokonaisemäsluku TBN

Kokonaisemäsluku (Total Base Number, TBN) kuvaa öljyn emäksisen pitoisuuden määrää. Moottoriöljyissä käytetään emäksisiä lisäaineita, torjumaan öljyn kulumisesta johtuvien happojen muodostumista. Moottoriöljyjen TBN-taso määräytyy käyttötarkoituksen mukaan. Bensiinimoottorissa käytettyjen öljyjen TBN-arvo on korkeampi kuin dieselmoottoriöljyjen vaikeampien käyttöolosuhteiden vuoksi. Öljyn seassa olevat emäksiset lisäaineet kuluvat hiljalleen käytössä. Kun lisäaineet ovat kuluneet tietyn rajan yli, öljyn happopitoisuus kasvaa aiheuttaen lopulta moottorissa ongelmia kuten korroosiota sekä lietteen ja lakan syntymistä. (Guide to Measuring TAN and TBN in Oil, 2017, 1.)

4.3.3 Öljyn vanhenemisprosessin eteneminen

Öljyn vanhetessa sen lisäaineet alkavat ehtyä, ja sen sekaan saattaa alkaa muodostua epäpuhtauksia, kuten lietettä, hartseja ja lakkaa. Vanhentumistuotteet syntyvät öljyssä ajan myötä lämmön, hapen tai veden reagointituotteina. Öljyn vanhentumisprosessi on luonteeltaan itse itseään kiihdyttävä. Öljy pystyy sitomaan itseensä tietyn verran vanhentumistuotteita, mutta tämän sitomiskyvyn ylittymisen jälkeen lakkoja ja hartseja alkaa muodostua öljyn sekaan ja järjestelmän seinämiin yhä kiihtyvään tahtiin. (Vanhentumistuotteet öljyssä – eli ruskea pinnoite avatun koneikon pinnoilla 2017.)

Argo-Hytos kuvaa teoreettista öljyn ikääntymisprosessia Kuviossa 7. Ensimmäisessä vaiheessa öljyn vaihdon jälkeen öljyn laatu pysyy melko tasaisena pitkään. Öljyn ikääntyminen alkaa toden teolla vasta niin kutsutun inkubaatioajan jälkeen, missä tietyt lisäaineet, kuten hapettumisenestoaineet ovat ehtyneet. Tämän jälkeen vaiheessa 2 ikääntyminen kiihtyy merkittävästi, jolloin öljyn laatu ja jäljellä oleva käyttöikä vähenee nopeasti. (Argo-Hytos Oil Condition Sensors. N.d.)



Kuvio 7 Öljyn teoreettinen ikääntymisprosessi (Argo-Hytos Oil Condition Sensors. N.d, muokattu.)

Lakan ja hartsin muodostuminen öljyjärjestelmässä aiheuttaa vakavia ongelmia ja toimintahäiriöiden lisääntymistä. Lakka ja hartsi ovat luonteeltaan liimamaisia, ja ne kerääntyvät seisokkien ja käyntikatkojen aikana pintoihin jumittaen komponentteja ja aiheuttaen ongelmia käynnistyksissä ja käytön aikana esimerkiksi venttiilien toiminnassa. Öljyn kyky liuottaa hartseja ja lakkoja itseensä on riippuvainen öljyn ja järjestelmän lämpötilasta, jolloin tavanomaista kylmemmästä öljystä irtoa enemmän lakkoja ja hartseja, jotka kiinnittyvät helposti eri pintoihin jumittaen komponentteja. Vanhenemistuotteiden liimamaisen luonteen vuoksi ne keräävät myös pintoihin tarttuessaan mukaansa kovia epäpuhtauksia, jotka kuluttavat järjestelmän komponentteja entistä enemmän. (Vanhentumistuotteet öljyssä – eli ruskea pinnoite avatun koneikon pinnoilla 2017.)

5 Öljyn kunnonvalvonta

5.1 Yleistä öljyn kunnonvalvonnasta

Voiteluöljyllä on ratkaiseva merkitys teollisuuden koneiden ja laitteiden luotettavassa ja tehokkaassa toiminnassa. Voiteluöljyn kunnonvalvonnasta onkin tullut merkittävä tutkimuksen aihe teollisuudessa ja öljyn kunnonvalvontajärjestelmien kehittämiseen ja tutkimukseen panostetaan yhä enemmän. Seuraamalla öljyn vanhenemis- ja kulumisprosessia kunnonvalvontajärjestelmän avulla, voidaan tunnistaa mahdolliset ongelmat jo aikaisessa vaiheessa, ennen kuin ne johtavat suurempiin vaurioihin ja pitkiin huoltoseisokkeihin. Öljyn kunnonvalvonnan avulla voidaan myös pidentää voiteluöljyn käyttöaikaa, jolloin vältetään turhista öljynvaihdosta syntyvät kustannukset ja ympäristöhaitat. Öljynvaihdot ja niistä syntyvän jäteöljyn kierrättäminen ovat teollisuudessa yrityksille merkittävä kuluerä.

Voiteluöljy on tärkeä tietolähde koneen vikaantumisen varhaista havaitsemista varten, ja sitä voisi myös verrata ihmisen verinäytteen tutkimiseen. Voiteluöljyn kunto kuvastaa koko koneen voitelujärjestelmän ja sen osien terveydentilaa. Esimerkiksi öljynäytteestä mitattu liiallinen metallihiukasten pitoisuus kertoo usein koneen epätavallisesta kulumisesta, joka voi johtaa edetessään suurempiin vaurioihin ja kalliisiin korjaustoimenpiteisiin. Oikein toteutettuna, öljyn kunnonvalvonnan avulla voidaan myös suunnitella ja toteuttaa koneiden ennakoivaa kunnossapitostrategiaa. Ennakoivan kunnossapidon avulla voidaan optimoida koneiden huoltoaikataulut ja maksimoida luotettavuus ja käyttöaika.

Öljyn kunnonvalvontaa voidaan toteuttaa eri tavoilla, ja se voidaan jakaa yleisesti Offline, In-line ja On-line menetelmiin. Seuraavissa kappaleissa on selitetty tarkemmin näitä menetelmiä ja niiden välisiä eroja.

5.2 Offline kunnonvalvonta

Offline kunnonvalvonnassa öljyn kuntoa valvotaan ottamalla öljystä näytteitä, jotka analysoidaan joko kentällä, tai ne toimitetaan erilliseen laboratorioon analysoitavaksi. Perinteinen tapa tehdä öljyn kunnonvalvontaa, on pullonäytteen ottaminen ja niiden analysointi laboratoriossa. Puhtaan näytepulloon otetaan järjestelmästä öljyä mittausyhteen kautta, tai suoraan öljysäiliöstä pumpun avulla. Pullonäytteen ottamisen yhteydessä on kuitenkin oltava tarkkana, ettei näytteen sekaan pääse epäpuhtauksia järjestelmän ulkopuolelta. Pullonäytteen ottamisen yhteydessä on useita tapoja, miten näytteen luotettavuuden voi pilata. Näytteen ottajan tulee olla aina ammattitaitoinen henkilö ja näytteen oton yhteydessä tulee varmistaa, ettei näytepulloon joudu ylimääräistä likaa joko järjestelmän mittausyhteestä tai muualta lähiympäristöstä. Järjestelmän mittausyhdettä tulee aina huuhtoa riittävän kauan ennen varsinaisen näytteen ottoa, jotta varmistetaan, ettei mittausyhteeseen mahdollisesti aiemmin seisomaan jäänyt lika päädy näytepulloon.

Käytännössä pullonäytteisiin päätyy silti aina hieman ylimääräistä likaa näytteenoton aikana, mikä voidaan havaita verrattaessa öljystä mitattujen hiukkasten määrää pullonäytteen ja on-line partikkelilaskurin mittaustulosten välillä. Pullonäytteestä tehdyt laboratorioanalyysit voivat poiketa jopa 3 puhtausluokkaa on-line mittausten tuloksista, kun ISO-luokat ovat alle 13. Ero ei johdu niinkään on-line anturien epätarkkuudesta, vaan siitä, että näytteenoton yhteydessä näytepulloon päätyy todella helposti ylimääräistä likaa, ja etenkin öljyn absoluuttisen hiukkasmäärän ollessa pieni, vähäinenkin likaantuminen aiheuttaa suuren muutoksen hiukkasten suhteellisessa määrässä, jolloin puhtausluokka saattaa muuttua useammallakin numerolla. (Öljyn kunnossapito 2018, 13, 38.)

5.2.1 Öljyanalyysit

Offline kunnonvalvonnan etuna on, että laboratoriossa näytteestä saadaan tehtyä erittäin kattava ja monipuolinen analyysi öljyn kunnosta. Pullonäytteille voidaan tehdä laboratoriossa useita eri analyyseja, joita ovat esimerkiksi

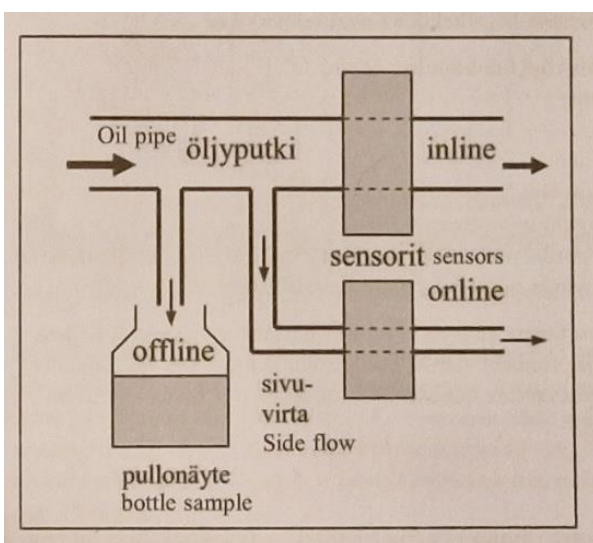
- hiukkasanalyysi
- kulumismetallit
- lisäainepitoisuus

- viskositeettianalyysi
- vesipitoisuusanalyysi
- öljyn happettuminen / ikääntyminen:
MPC (väri-indeksi)
TAN (kokonaishappoluku)
TBN (kokonaismäsluku)

Näytteestä voidaan tunnistaa mikroskoopilla kulumishiukkasten koko, muoto ja väri, jolloin voidaan päätellä mistä ne ovat peräisin, jolloin voidaan tunnistaa alkava vaurio järjestelmässä jo hyvin aikaisessa vaiheessa. Oikein tehtynä, öljyanalyysillä voidaan saada havainto esimerkiksi alkavasta laakerivauriosta, jo ennen kuin sitä pystytään havaitsemaan muilla menetelmillä, kuten värähtelymittauksilla. (Öljyn kunnossapito 2018, 41, 46.)

5.3 In-line ja On-line kunnonvalvonta

In-line ja On-line kunnonvalvonnassa öljyn kuntoa mitataan erillisillä antureilla suoraan järjestelmästä. Inline mittauksessa öljyn kuntoa mittaava anturi sijaitsee suoraan järjestelmän päävirtauksessa (ks. kuvio 6). On-line mittauksessa anturi sijaitsee päävirtauksen sijaan sivuvirtauksessa, esimerkiksi erillisessä anturitukissa, jonka läpi osa virtauksesta ohjataan mittausta varten. (Öljyn kunnossapito 2018, 13.)



Kuvio 8 Eri öljyn kunnonvalvontatapoja (Öljyn kunnossapito 2018, 13, muokattu.)

ON-line mittauksen etuina laboratorioissa analysoituun pullonäytteeseen on sen nopeus, sekä näytteenottoon liittyvien epävarmuustekijöiden pois sulkeminen. ON-line mittaus yhdistettynä analysoitaviin trendeihin on yleensä riittävän tarkka keino jatkuvaan järjestelmän tilan seurantaan, mutta OFF-line, eli laboratorioanalyysillä saadaan edelleen tarkin mahdollinen kuva öljyn ja järjestelmän kunnosta. Mikäli ON-line mittauksessa näkyy selkeitä muutoksia, on aina suositeltavaa varmistaa tulokset laboratorioanalyysillä. (Öljyn kunnossapito 2018, 34.)

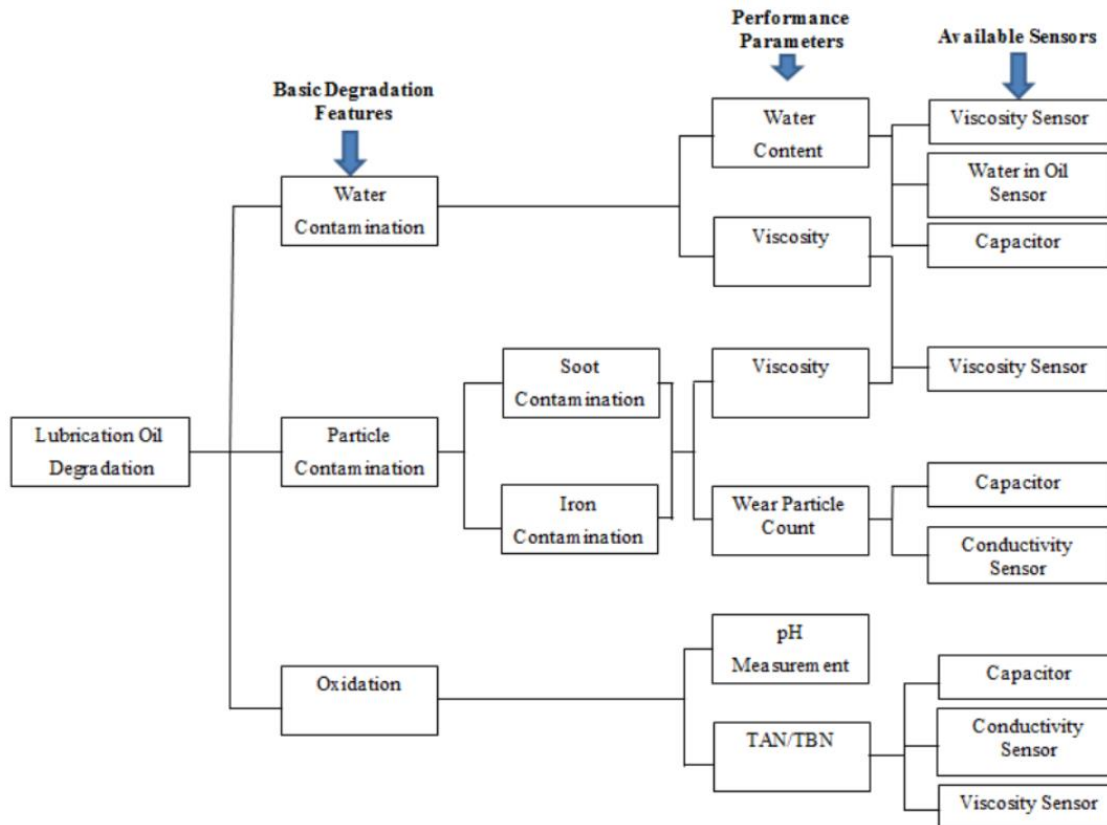
5.3.1 On-line öljynkuntoanturit

Öljyn kunnan valvontaan on nykyisin saatavilla monia erilaisia antureita, joilla voidaan seurata öljyn kuntoa reaaliaikaisesti suoraan järjestelmästä. Reaaliaikaisen öljyn kunnan valvonnan avulla voidaan esimerkiksi nähdä heti, mikäli järjestelmään tulee joku välittömiä toimenpiteitä vaativa vikatilanne, tai mikäli öljynvaihdon jälkeen on käytetty vääränlaista öljyä.

Öljynkuntoantureita käyttämällä voidaan lisäksi poistaa manuaaliseen näytteen ottoon liittyvät epävarmuustekijät, kunhan voidaan olla varmoja anturien oikeanlaisesta asennuspaikasta ja käyttöolosuhteista. Anturit tulisi aina asentaa siten, että ne ovat jatkuvassa virtauksessa, ja asennettuna siten, ettei anturin mittauspään kohdalla ole ilmakuplia, tai siihen kerry epäpuhtauksia. Anturien asennuksen suunnittelussa tulee aina huomioida anturien valmistajien ilmoittamat sallitut käyttöolosuhteet, kuten virtausnopeus, sekä muut ympäristötekijät, kuten lämpötila, värinä, öljynpaine ja magneettikenttä. Anturien kalibroinnista, sekä kytkentöjen riittävästä häiriösuojauksesta on myös huolehdittava. (Öljyn kunnossapito 2018, 14.)

Öljynkuntoantureilla pystytään arvioimaan öljyn tilaa mittaamalla öljystä esimerkiksi kulumishiukkasten määrää, öljyn suhteellista kosteutta / vesipitoisuutta, viskositeettia, tiheyttä, dielektrisyysvakiota tai johtavuutta. Usean mittaussuureen seuraaminen samanaikaisesti mahdollistaa kattavan analyysin muodostamisen öljyn, sekä järjestelmän kunnosta. Öljynkuntoanturien mittaus tulosten perusteella voidaan myös tehdä tarkempaa pitkän aikavälin seuranta trendien avulla, jolloin on mahdollista nähdä pitkän aikavälin muutokset järjestelmässä ja ennakoida öljyn laadun heikkenemistä, sekä suunnitella järjestelmän kunnossapitoa. (Öljyn kunnossapito 2018, 34.)

Kuviossa 9 on kuvattu erilaisia öljyn kulumismekanismeja ja niiden vaikutusta öljyn suorituskykyparametreihin, sekä erilaisia anturityyppejä millä kulumisen voidaan tunnistaa. Kuvion perusteella suurin osa öljyn kulumismuodoista voidaan tunnistaa öljyn sähköisiä ominaisuuksia (johtavuus, dielektrisyysvakio), ja viskositeettia mittaavilla antureilla. (Zhu, He, & Bechhoefer, 2013, 2.)



Kuvio 9 Öljyn kulumisen yhteys öljyn suorituskykyparametreihin sekä niitä mittaaviin antureihin (Zhu, He, & Bechhoefer, 2013, 2.)

5.4 Vesipitoisuusanturit

Riippuen lämpötilasta, sekä käytetyn öljyn ominaisuuksista (perusöljyn laatu, sekä lisäaineet), öljy pystyy sitomaan itseensä tietyn verran vettä, ennen kuin se alkaa näkymään pisaroina öljyn seassa. Jokaisella nesteellä on kyky pitää sisällään tietty määrä liuennutta vettä. Nesteen sekaan liuenneen veden enimmäismäärää kutsutaan nesteen kyllästymisrajaksi, tai saturaatiopisteeksi. Kun tämä piste on saavutettu, kaikki ylimääräinen vesi erottuu nesteen sekaan vapaana vetenä. (Öljyn kunnonvalvonta 2018, 25; Jiroutek, N.d.)

Vesi voi olla öljyn seassa liuenneena, emulsiona, tai vapaassa olomuodossa. Varsinkin emulsio ja vapaa vesi öljyn seassa ovat haitallisia, sillä ne aiheuttavat lisäaineiden hajoamista, öljyn hapettumista, korroosiota, sekä voitelun heikentymistä johtaen metallimetalli kosketuksiin (Guide to measuring water in oil 2017, 1; Mitä öljyssä tulee seurata? 2014.)

5.4.1 Kapasitiiviset anturit

Yleisimmät ON-line sovelluksissa käytetyt vesipitoisuusanturit perustuvat öljyn sekaan liuenneen vesipitoisuuden mittaamiseen. Yleensä käytetään suhteellista kosteutta mittaavia kapasitiivisia antureita. Kapasitiivisilla antureilla voidaan määrittää öljyssä olevan veden saturaatioprosentti, jonka avulla voidaan arvioida milloin öljyn vesipitoisuus aiheuttaa vapaan veden muodostumisen riskin. 0% saturaatio vastaa vedestä täysin vapaata öljyä, ja 100% täysin vedestä saturoitunutta sameaa öljyä, joka voi vaurioittaa hydraulikka- ja voitelujärjestelmiä. (Öljyn kunnossapito 2018, 25.)

Kapasitiiviset vesipitoisuusanturit perustuvat anturin sähköpiirin kapasitanssin muuttumiseen suhteessa öljyn vesipitoisuuden kanssa. Anturi on rakenteeltaan kondensaattori, joka koostuu kahdesta johtavasta elektrodista, joiden välillä on eristävää materiaalia (tyypillisesti metallioksidia tai polymeeria), jota kutsutaan dielektriseksi aineeksi. Dielektrinen aine sitoo itseensä vesimolekyyliä, jolloin aineen dielektrisyysvakio, ja sen myötä anturin kapasitanssi muuttuu. Kapasitiivisen kosteusanturin dielektrisyysvakion muutos on verrannollinen ympäröivän ympäristön suhteelliseen kosteuteen. (Guide to measuring water in oil 2017, 1; Jiroutek, N.d.)

5.4.2 Absoluuttinen vesipitoisuus (PPM)

Yleinen laboratoriossa käytetty menetelmä absoluuttisen vesipitoisuuden mittaamiseksi on Karl Fischer titraus. Menetelmä mittaa öljyssä olevaa absoluuttista vesimäärää, ja ilmoittaa tuloksen prosentteina, tai yksikkönä PPM (parts per million). Karl Fischer analyysillä voidaan saada erittäin tarkkoja ja luotettavia tuloksia, kun tekijänä on ammattitaitoinen henkilö, ja sitä käytetään usein vertailumenetelmänä muihin vesipitoisuuden määrittämiseen käytettäviin menetelmiin nähden. Öljyn seassa olevan veden määrä voidaan myös mitata missä tahansa tilassa, liuenneena, emulsiossa, tai vapaana, mikä ei ole mahdollista kapasitiivisilla kosteusantureilla. Menetelmä perustuu jodia sisältävän titrausliuoksen reagointiin veden kanssa. Titrauksessa tapahtuvassa kemiallisessa reaktiossa jodia kuluu sama määrä, kun näytteen seassa on vettä, joten käytetyn jodin määrän perusteella voidaan laskea myös näytteessä olevan veden määrä. PPM lukeman perusteella ei voida kuitenkaan yksinään päätellä kuinka lähellä öljyn kosteuspitoisuus on saturaatiopistettä, eli milloin syntyy vapaan veden muodostumisen riski, koska öljyn saturaatiopiste vaihtelee dynaamisessa järjestelmässä öljyn lämpötilan mukaan, sekä öljyn ikääntyessä. (Öljyn kunnossapito 2018, 25; Guide to measuring water in oil 2017, 1; Jiroutek, N.d)

5.5 Optiset hiukkaslaskurit

Hiukkaslaskureilla voidaan mitata öljyn seassa olevien kulumishiukkasten määrää. Optisessa hiukkaslaskurissa anturin läpi virtaava neste kulkee laservalon ohitse, ja valon takana oleva vastaanotin (fotodiodi) mittaa nesteen läpi tulevan valon määrää. Nesteen seassa olevat hiukkaset häiritsevät valon kulkeutumista vastaanottimelle, ja muodostavat varjoja, jonka vastaanotin pystyy havaitsemaan jännitteen muutoksena, jolloin voidaan määrittää nesteen seassa kulkevien hiukkasten koko (ks. Kuvio 10). (Öljyn kunnossapito 2018, 23; The methods of optical particle counting – light extinction and light scattering. Pamas.de. 2020.)

Hiukkaslaskuri ilmoittaa mittaustuloksen yleensä ISO 4406:99- standardin mukaisena puhtauskoodina. ISO- puhtauskoodissa hiukkaset määritellään kolmessa eri kokoluokassa, 4µm, 6µm, ja 14µm. Koodi ilmaistaan kolmella numerolla (esim. 16/11/10). Kukin numero edustaa epäpuhtauskoodia vastaavalle hiukkaskoolle (ks. Kuvio 11). Koodin numero muodostuu aina vastaavaa hiukkasluokkaa suurempien hiukkasten pitoisuudesta millilitraa kohti. Esimerkiksi ensimmäinen hiukkasluokka >4 µm pitää sisällään kaikkien tätä suurempien hiukkasten lasketun määrän millilitrassa. Jos

tämä määrä on esimerkiksi välillä 320–640, epäpuhtauskoodiksi tulee 16. On tärkeää huomata, että aina kun koodi kasvaa, hiukkasten määrä kaksinkertaistuu. (Understanding ISO-Codes 2017; Reporting fluid-cleanliness: explanation of ISO-4406:99 2014.)

Perinteisen optisen menetelmän haittapuolena on se, että kaikki öljyn seassa mahdollisesti olevat nestemäiset ja kaasumaiset epäpuhtaudet, kuten esimerkiksi ilmakuplat, vesipisarot ja ei liuenneet öljyn lisäaineet näkyvät anturille hiukkasina. Anturi tulee olla riittävässä ja mahdollisimman tasaisessa ei turbulentsissa virtauksessa ilmakuplien syntymisen estämiseksi ja luotettavien tulosten saamiseksi. (Öljyn kunnossapito 2018, 24.) Markkinoille on kuitenkin hiljattain tullut myös digitaaliseen kuvantamiseen ja konenäköön pohjautuvia antureita, jotka pystyvät erittelemään mahdollisen ilman ja veden pois mittaustuloksista ja arvioimaan kuitumaisia ja särmikkäitä kulumishiukkasia.



Kuvio 10 Optisen hiukkaslaskurin toimintaperiaate (The methods of optical particle counting – light extinction and light scattering 2020.)

ISO 4406 Chart		
Range Code	Particles per milliliter	
	More than	Up to/including
24	80000	160000
23	40000	80000
22	20000	40000
21	10000	20000
20	5000	10000
19	2500	5000
18	1300	2500
17	640	1300
16	320	640
15	160	320
14	80	160
13	40	80
12	20	40
11	10	20
10	5	10
9	2.5	5
8	1.3	2.5
7	0.64	1.3
6	0.32	0.64

Sample 1 (see photo 1)			
Particle Size	Particles per ml*	ISO 4406 Code range	ISO Code
4μ[c]	151773	80000~160000	24
6μ[c]	38363	20000~40000	22
10μ[c]	8229		
14μ[c]	3339	2500~5000	19
21μ[c]	1048		
38μ[c]	112		

Sample 2 (see photo 2)			
Particle Size	Particles per ml*	ISO 4406 Code range	ISO Code
4μ[c]	492	320 ~ 640	16
6μ[c]	149	80 ~ 160	14
10μ[c]	41		
14μ[c]	15	10 ~ 20	11
21μ[c]	5		
38μ[c]	1		

Kuvio 11 ISO-hiukkasluokat (Understanding ISO-Codes. 2017, Muokattu.)

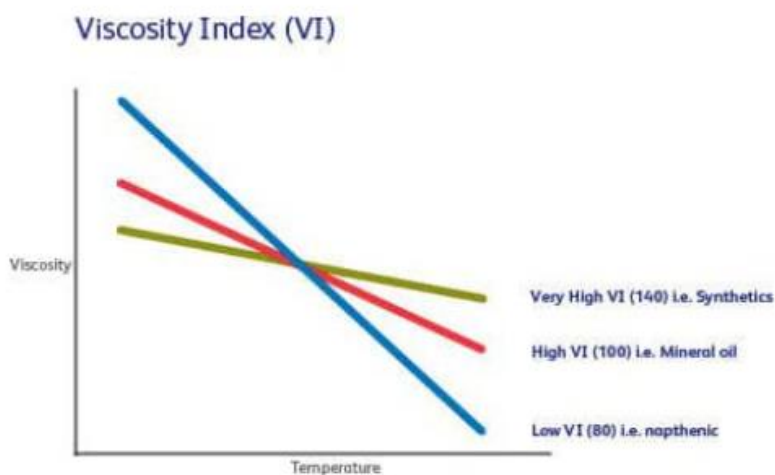
5.6 Viskositeettianturit

Viskositeetti on tärkeä parametri öljyn voitelukykyyn tai virtausvastusten ja tehohäviöiden kuvaamisessa. Öljyn viskositeetti voi muuttua veden, hiukkasten, tai muiden voiteluaineiden aiheuttaman saastumisen vuoksi. Myös öljyn ikääntyminen voi vaikuttaa viskositeettiin. Viskositeetin muutos saattaa aiheuttaa muutoksia voitelukalvon paksuudessa ja huonontaa voitelun toimivuutta.

Viskositeetti on nesteen ominaisuus, joka kuvaa nesteen kykyä vastustaa virtaamista. Viskositeetti perustuu nesteen sisäiseen kitkaan, joka tasoittaa vierekkäisten voitelupartikkeleiden nopeuseroja ja vastustaa nesteen virtausta (Argo-Hytos Oil Condition Sensors. N.d.). Suuremman viskositeetin omaavat voiteluöljyt virtaavat samassa lämpötilassa hitaammin, kuin pienemmän viskositeetin omaavat voiteluöljyt.

Kaksi eri viskositeettityyppiä ovat kinemaattinen viskositeetti ja dynaaminen viskositeetti. Dynaaminen viskositeetti kuvaa voimaa, joka tarvitaan voiteluaineen virtaamiseen, kun taas kinemaattinen viskositeetti kertoo, kuinka nopeasti voiteluaine virtaa, kun siihen kohdistetaan tietty voima. Dynaamisen viskositeetin yksikkö on millipascalsekunti (mPa-s), tai vastaava senttipois (cP), ja kinemaattisen viskositeetin yksikkö on neliömillimetriä sekunnissa (mm^2/s), tai vastaava sentistoki (cSt). Teollisuusöljyjen viskositeetti ilmoitetaan yleensä kinemaattisena viskositeettinä, ja se saadaan jakamalla dynaaminen viskositeetti aineen tiheydellä. (Understanding the viscosity index of a lubricant. 2020.)

Voiteluöljyjen viskositeetti on suuresti riippuvainen lämpötilasta. Mitä kuumempi lämpötila, sen matalampi öljyn viskositeetti on. Lämpötilan vaikutusta viskositeetin muutokseen kuvataan viskositeetti-indeksillä (VI). Lämpötilan vaikutus voiteluaineen viskositeettiin on sitä pienempi mitä suurempi viskositeetti-indeksi on. Voitelukohteissa, joissa esiintyy korkeita käyttölämpötiloja, käytetään suuremman viskositeetti-indeksin omaavia öljyjä. Voiteluaineen viskositeetti-indeksi määritellään mittaamalla kinemaattinen viskositeetti 40 ja 100 °C-asteen lämpötilassa. Mittaustuloksia verrataan kahden vertailuöljyn tuloksiin. Perinteisen mineraaliöljyn viskositeetti-indeksi on välillä 95–100, kun taas synteettisten öljyjen VI voi olla vielä korkeampi (kts. Kuvio 12). (Understanding the viscosity index of a lubricant. 2020.)



Kuvio 12 Voiteluöljyjen viskositeetti-indeksi (Understanding the viscosity index of a lubricant. 2020, muokattu.)

Myös viskositeetin mittaukseen löytyy useampia eri menetelmiä ja erityyppisiä antureita. Erilaisia viskositeettia mittaavia anturityyppejä ovat mm. pietsosähköiset anturit, QMB (Quartz, Microbalance) anturit, TSM (Thickness shear Mode Sensor) anturit, sekä SAW (Surface Acoustic Wave) anturit. (Öljyn kunnossapito 2018, 31.)

QMB- anturissa viskositeettia mitataan nesteeseen upotetun värähtelevän kvartsikiteen avulla. Kvartsikiteen taajuus laskee nesteen viskositeetin perusteella verrattuna vapaasti ilmassa värähtelevään kiteeseen, jolloin resonanssitaajuuden muutoksesta voidaan laskea nesteen viskositeetti. QMB tyyppisen anturin etuna on, että sillä pystytään myös mittaamaan nesteen tiheyttä ja lämpötilaa. (Öljyn kunnossapito 2018, 31.)

5.7 Öljyn sähköisiä ominaisuuksia mittaavat öljynkuntoanturit

Öljyn kuntoa voidaan valvoa myös mittaamalla sen sähköisiä ominaisuuksia. Yleisimmin öljystä mitattavia sähköisiä suureita ovat öljyn dielektrisyysvakio, sekä sähkönjohtavuus tai resistiivisyys. Öljyn ikääntyminen voidaan havaita muutoksena näiden sähköisten suureiden arvoissa. Yleensä tämälantyyppisin öljynkuntoantureihin (ks. Kuvio 13) on yhdistetty myös lämpötilan mittaus, sillä öljyn lämpötila vaikuttaa johtavuuden ja dielektrisyysvakion arvoihin.



Kuvio 13 Tandelta öljynkuntoanturi (OQSx-G2 Tandelta systems. N.d.)

5.7.1 Konduktiivisuus ja resistiivisyys

Konduktiivisuus σ , tai toiselta nimeltään sähkönjohtavuus on materiaalin sähkönjohtokykyä kuvaava suure. Konduktiivisuus on resistiivisyyden (ρ) käänteissuure. Sähkönjohtavuuden mittaamiseen käytetty standardiyksikkö on Siemens per metri (S/m).

Konduktiivisuus voidaan laskea kaavalla:

$$\sigma = \frac{L}{R * A}$$

Jossa:

L= Johtimen pituus (m)

R= Johtimen sähköinen resistanssi (Ω)

A= Johtimen poikkipinta-ala (m²)

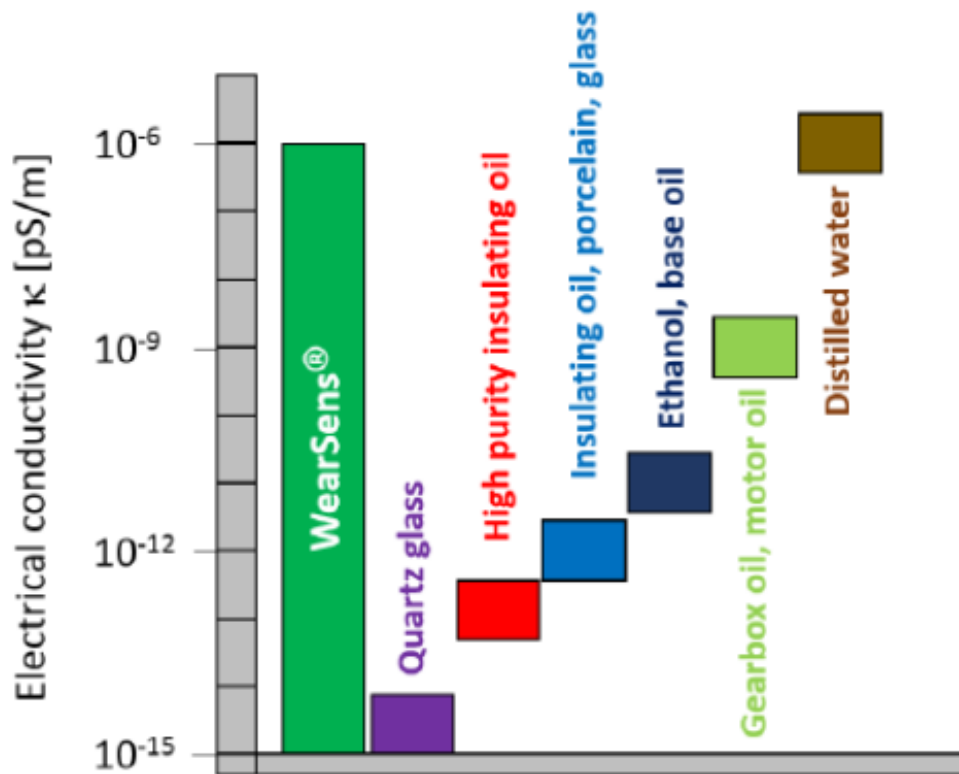
Resistiivisyys voidaan laskea kaavalla:

$$\rho = 1/\sigma$$

Puhtaat öljyt johtavat yleensä vain vähän sähköä, minkä vuoksi niitä voidaan käyttää eristeenä muuntajissa ja kytkimissä. Mauntz, Kuipers, & Peuser 2015 mukaan puhtaiden öljyjen sähkönjohtavuus on alle 1pS/m, ja esimerkiksi tislattun veden sähkönjohtavuus on arviolta kuusi kertaluokkaa suurempi (ks. Kuvio 15). Voiteluöljyn johtavuus riippuu kuitenkin useista asioista, kuten käytetystä perusöljystä, lisäaineista ja polaarisuudesta. Erityisesti metalliset lisäaineet kuten sinkkiditiofosfaatti kasvattavat öljyn johtavuutta. Mitä polaarisempi öljy on, sitä suurempi on myös sen sähkönjohtavuus. (Lindner 2013.)

Monissa uusissa öljyissä on matala sähkönjohtavuus, etenkin API ryhmän II, III ja IV öljyissä. Kun öljy vanhenee sen sähkönjohtavuus yleensä kasvaa, ja vastaavasti resistiivisyys laskee. Öljyn seassa olevat metalliset kulumishiukkaset, rikkoutuneet öljymolekyylit, hapot, sekä muut epäpuhtaudet kasvattavat öljyn johtavuutta. Öljyn viskositeetin nousu alentaa myös sähkönjohtavuutta. Mittaamalla sähkönjohtavuuden muutosta, voidaan siis myös seurata öljyn vanhenemisprosessin etene- mistä. (Öljyn Kunnossapito 2018, 32; Lindner 2013; Mauntz, Kuipers, & Peuser 2015.)

Öljyn sähkönjohtavuutta mitattaessa tulee huomioida, että tuoreen öljyn sähkönjohtavuus riippuu perusöljystä, sen lisäainepaketista, sekä lämpötilasta. Mitä korkeampi lämpötila on, sitä korkeampi on öljyn johtavuus. Öljyn lämpötilan ja johtavuuden välillä ei kuitenkaan ole lineaarista korrelaatiota, sillä jokaisella öljytyypillä on oma johtavuuden ja lämpötilan välinen suhteensa. (Öljyn Kunnossapito 2018, 32; Lindner 2013.)



Kuvio 14 Nesteiden ja kiinteiden aineiden sähkönjohtavuuden arvoja (Mauntz, Kuipers, & Peuser 2015.)

5.7.2 Dielektrisyysvakio (suhteellinen permittiivisyys)

Dielektrisyysvakio ϵ_r , tai toiselta nimeltään suhteellinen permittiivisyys on väliaineen permittiivisyyden suhde tyhjiön permittiivisyyteen. Tyhjiön suhteellinen permittiivisyys on näin ollen tasan yksi. (Gayrard & Milpied 2020.)

Permittiivisyys on suure, jota käytetään kuvaamaan sitä, miten sähkökenttä vaikuttaa väliaineeseen. Permittiivisyys ilmoitetaan faradeina metriä kohti (F/m).

Suhteellinen permittiivisyys voidaan määrittellä seuraavalla kaavalla:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

Jossa:

ϵ_r on suhteellinen permittiivisyys

ϵ on väliaineen permittiivisyys

ϵ_0 on tyhjiön permittiivisyys, $(8,854\ 187\ 8182 \pm 0,000\ 000\ 0013) \cdot 10^{-12}$ F/m)

Suhteellinen permittiivisyys kuvaa väliaineen kykyä varastoida sähköenergiaa (polarisoitua) ulkoisen sähkökentän vaikutuksesta. Gayrard ja Milpied (2020) esittävät, että konkreettisesti polarisaatio on seurausta molekyylin dipolien uudelleen orientoitumisesta voiteluaineessa. Öljyn vanhenemisen aikana molekyylien dipolimomentit voivat muuttua mikroskooppisten kemiallisten reaktioiden, kuten hapettumisen tai nitraation, vuoksi, tai polaaristen epäpuhtauksien, kuten veden tai noen lisääntymisen vuoksi. (Gayrard & Milpied 2020.)

5.7.3 Öljyn Dielektrisyysvakion mittaaminen

Öljyn dielektrisyysvakion mittaamiseen on olemassa erilaisia tekniikoita käytäviä antureita, mutta yleisemmin käytetään kapasitiivisia antureita. Dielektrisyysvakion mittauksella määritetään öljyn polaarisuus, jolloin voidaan valvoa öljyn vanhenemis- prosessin etenemistä. Öljyn vanhetessa alkaa syntyä polaarisia yhdisteitä ja varauksenkuljettajien hajoamistuotteita, jolloin öljyn polaarisuus muuttuu. Samalla emäs-lisäaineyhdisteet ehtyvät, mikä vähentää suojaa happamoitumista vastaan. Kun öljy saastuu polaarilla tai johtavilla aineilla (vesi, lika jne.), dielektrisyysvakio nousee.

Eri öljyillä, sekä niiden lisäaineilla on myös erilainen polaaraisuus, joten dielektrisyysvakion mittaamisen perusteella voidaan nähdä, mikäli öljyn koostumus muuttuu esimerkiksi öljyn vaihdon yhteydessä, jos on käytetty vääränlaista öljyä. (Öljyn Kunnossapito 2018, 32; Gayrard & Milpied. 2020).

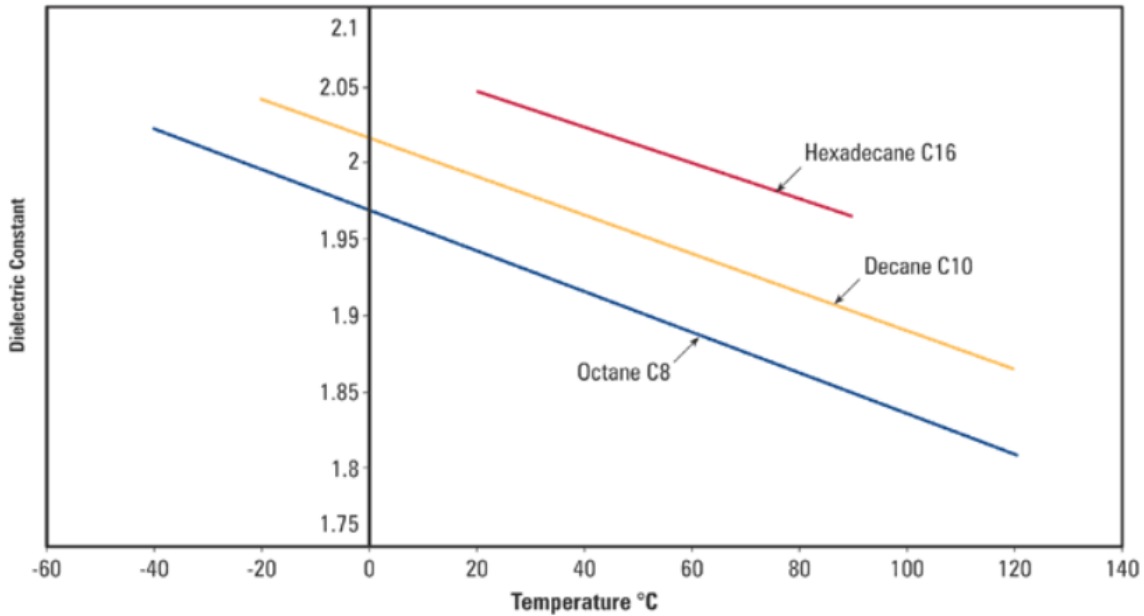
Öljyn dielektrisyysvakiota voisikin siis kutsua eräänlaiseksi öljyn sormenjäljeksi, jonka muuttuessa tulee tarkastaa öljyn tilanne. Corey & Hayzen (2020) mukaan muutokset dielektrisyysvakiossa, jotka ovat suurempia kuin 0,01, viittaavat öljyn laadun muutokseen, joka on arvioitava tavanomaisilla öljyanalyysimenetelmillä, kuten happoluvulla, emäsluvulla, Karl Fischerin kosteus- ja hiukkasanalyysillä.

5.7.4 Öljyn ominaisuuksien vaikutus dielektrisyysvakioon

Öljyn dielektrisyysvakioon vaikuttavat, öljyn viskositeetti, tiheys, sekä suhteellinen parafiini-, naptaleeni- ja aromaattisten aineiden pitoisuus, sekä öljyn lisäaineet. Hiilivetyypohjaisten voiteluöljyjen dielektrisyysvakio on tyypillisesti välillä 2,1-2,4. Muiden kuin hiilivetyypohjaisten öljyjen dielektrisyysvakio vaihtelee napaisuuden ja polarisoituvuuden mukaan. Suurempi lisäainepitoisuus yleensä nostaa uuden öljyn dielektrisyysvakiota, koska lisäaineilla on yleensä suurempi dielektrisyysvakio, kuin öljymolekyyleillä itsellään. (Carey & Hayzen 2001.) Vedellä on merkittävän suuri ja lämpötilasta riippuvainen dielektrisyysvakio (ϵ_r vesi=80), johtuen sen pysyvästä sähköisestä dipolista ja siitä johtuvista vetysidosten vaikutuksista. Näin ollen öljyn seassa oleva vesi muuttaa merkittävästi öljyn dielektrisyysvakiota, ja se voidaan havaita helposti verrattaessa mittaustuloksia hyvän öljyn perustasoon. Metallien dielektrisyysvakio on ääretön, koska ne ovat johtimia.

Lämpötilalla on myös vaikutusta materiaalin dielektrisyysvakion arvoon, vaikkakin vaikutus on hiilivetyypohjaisten voiteluöljyjen osalta melko pieni. (Carey & Hayzen. 2001.) Lämpötilan noustessa dielektrisyysvakio pienenee, (kts. kuvio 12). Hiilivetyypohjaisten öljyjen dielektrisyysvakion tyypillinen lasku on Carey ja Hayzen (2020) mukaan noin 0,0013–0,05 % celsiusastetta kohti. Öljyn tiheys vaikuttaa myös dielektrisyysvakion lämpötilariippuvuuteen - mitä vähemmän öljy on tiheää, sitä vähemmän siinä on öljymolekyylejä tilavuusyksikköä kohti. Pienempi määrä molekyylejä tilavuusyksikköä kohti tarkoittaa, että vuorovaikutus sähkökenttien kanssa on vähäisempää ja siten dielektrisyysvakio pienenee. Lämpötilan noustessa tiheys pienenee ja siten myös öljyn dielektrisyysvakio pienenee. Kuvioista 15 voidaan myös nähdä, että kun hiilivetyjen määrä kasvaa 8:sta

16:een, dielektrisyysvakio kasvaa suurempien molekyylien lisääntyneen polarisoituvuuden seurauksena. Taulukossa 1. esitetään joitakin tyypillisiä materiaalien dielektrisyysvakioita. (Carey & Hayzen 2001.)



Kuvio 15 Dielektrisyysvakio lämpötilan funktiona (Carey & Hayzen 2001, Muokattu.)

Vacuum	1.0 (by definition)	Oil Class	Dielectric Constant
Metals	Infinite	Hydrocarbon	2.1-2.4
Gases	1.00xx (at one atmosphere)	PAO	2.1-2.4
Water	87.9 (0°C) to 55.5 (100°C)	PAG	6.6-7.3
Hexane	1.8865 (20°C)	Polyol Ester PAG	4.6-4.8
Cyclohexane	2.0243 (20°C)	Diester	3.4-4.3
Benzene	2.285 (20°C)	Phosphate Ester	6.0-7.1
Hydrocarbon lubrication oils	2.1 to 2.4 (room temperature)		

Taulukko 1 Tyypillisiä materiaalien dielektrisyysvakioita (Carey & Hayzen 2001, Muokattu.)



5.7.5 Öljynkuntoanturin mittaustuloksien tulkitseminen

Öljyn sähköisiä ominaisuuksia mittaavan öljynkuntoanturin mittaustuloksia tarkasteltaessa tulee huomioida, että mitattuja dielektrisyydevakion ja johtavuuden arvoja tulee verrata vain referenssilämpötilassa saatuihin arvoihin. Osa antureista kykenee tekemään lämpökompensoinnin automaattisesti. Anturit tulee kalibroida aina valmistajan ohjeiden mukaan, koska kapasitiivinen mittaustulos ei sisälly mihinkään yleiseen standardiin. (Öljyn Kunnossapito 2018, 32.)

Gayraud & Milpied 2020 ovat kuvanneet taulukossa erään öljynkuntoanturin mittaamien eri suureiden yhteyttä öljyn kulumisen kanssa (ks. Taulukko 2). Taulukossa on esitetty erilaisia öljyn kulumistapoja sekä niiden vaikutusta mitattavaan suureeseen. Taulukosta nähdään, että esimerkiksi öljyn hapettuminen kasvattaa suuresti viskositeetin arvoa, mutta vaikutus resistiivisyyteen on täysin päinvastainen. Dielektrisyyden ja tiheyden arvot kasvavat myös hieman. Vastaavasti voidaan nähdä, että vesipitoisuuden kasvu näkyy mittauksissa dielektrisyyden kasvuna ja resistiivisyyden pienenemisenä. Öljyn seassa oleva noki, tai metallihiukkaset näkyvät dielektrisyyden kasvuna.

Pelkästään öljyn dielektrisyydevakion muutoksen perusteella on mahdotonta arvioida kulumisen syytä, koska dielektrisyydevakio on yhteydessä useisiin kulumista aiheuttaviin asioihin. Mikäli anturista löytyy useita mittaussuureita, kuten viskositeetti, tiheys, resistiivisyys, voidaan sulkea eri vaihtoehtoja pois, ja saadaan tarkempi kuva öljyn kulumisen syystä. Käytännössä öljyn kunto on silti usein selvitettävä laboratorioanalyysillä täyden varmuuden saamiseksi kulumisen aiheuttajasta. (Öljyn kunnossapito 2018, 34.)

	Impact on Viscosity	Impact on Density	Impact on Dielectric	Impact on Resistivity
Oxidation	+++ $\eta_v \cdot (1 + 21 \cdot 10^{-1} \cdot Ox)$	+ $\rho_v \cdot (1 + 0.5 \cdot 10^{-1} \cdot Ox)$	+ $\epsilon_v \cdot (1 + 1.5 \cdot 10^{-1} \cdot Ox)$	--- $Rp_v \cdot (1 - 12 \cdot 10^{-1} \cdot Ox)$
Water Contamination	O η_v	O ρ_v	++ $\epsilon_v \cdot (1 + 20 \cdot 10^{-4} \cdot Wa_{(ppm)})$	-- $Rp_v \cdot (1 - 6 \cdot 10^{-4} \cdot Wa_{(ppm)})$
Coolant Contamination	O η_v	O ρ_v	+ $\epsilon_v \cdot (1 + 10 \cdot 10^{-4} \cdot Co_{(ppm)})$	- $Rp_v \cdot (1 - 3 \cdot 10^{-4} \cdot Co_{(ppm)})$
Fuel Contamination	--- Function of fuel type	+ / - Function of fuel type	+ / - Function of fuel type	+ / - Function of fuel type
Soot Contamination	++ $\eta_v \cdot (1 + 6 \cdot 10^{-1} \cdot Soot_{(ppm)})$	+ $\rho_v \cdot (1 + 0.5 \cdot 10^{-1} \cdot Soot_{(ppm)})$	+++ $\epsilon_v \cdot (1 + 12 \cdot 10^{-2} \cdot Soot_{(ppm)})$	- $Rp_v \cdot (1 - 2 \cdot 10^{-2} \cdot Soot_{(ppm)})$
Metal Contamination	+ $\eta_v \cdot (1 + 2 \cdot 10^{-6} \cdot Fe_{(ppm)})$	+ $\rho_v \cdot (1 + 0.4 \cdot 10^{-6} \cdot Fe_{(ppm)})$	+ $\epsilon_v \cdot (1 + 0.8 \cdot 10^{-6} \cdot Fe_{(ppm)})$	O $Rp_v \cdot (1 - 0.1 \cdot 10^{-7} \cdot Fe_{(ppm)})$
TBN / TAN	O N/A	O N/A	O N/A	+++ / --- $ TBN - TAN =$ $1.224 \cdot 10^{-7} \cdot x_v + 25.6778$
Wrong Fluid Detection	++ / -- Function of fluid type	++ / -- Function of fluid type	+ / - Function of fluid type	+ / - Function of fluid type

Legend: +++: Strong Increase ---: Strong Decrease
 ++: Moderate Increase --: Moderate Decrease
 +: Slight Increase -: Slight Decrease
 O: No impact +/-: Increase or Decrease
: High Evolution Speed : Slow Evolution Speed

Note: Water and coolant contamination cannot be differentiated.

Taulukko 2 Eri mittaus suureiden yhteys öljyn kulumiseen (Gayard & Milpied 2020, Muokattu.)

6 Työn käytännön toteutus

Työn käytännön toteutus alkoi anturien asennuksen suunnittelulla. Opinnäytetyön toimeksiantajan pyynnöstä anturien valmistajaa ei mainita nimeltä, ja osaan käytetyistä öljynkuntoantureista viitataan työssä kirjaimilla A, B, C, D

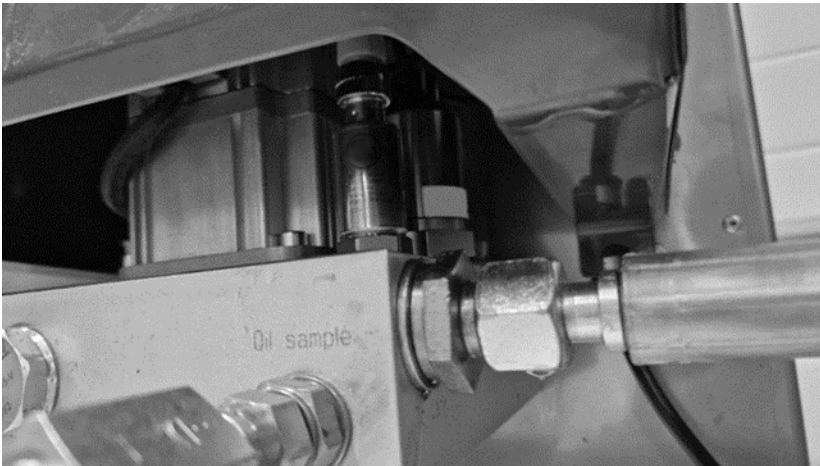
6.1 Laitteiston anturointi

Testissä käytettyjä antureita olivat öljyn sähköisiä ominaisuuksia mittaavat öljynkuntoanturit A, B, C, D, sekä on-line partikkelilaskuri öljyn hiukkaspitoisuuden mittaamiseen. Lisäksi järjestelmään asennettiin paine-eroanturi suodattimen tilan valvomiseksi. Osasta testiin valituista antureista oli jo jonkin verran aikaisempaa kokemusta yrityksessä, sillä niitä oli käytetty aikaisemmissa projekteissa. Kaikki laitteistoon asennettavat anturit olivat valmiiksi kalibroitu, eikä niille tarvinnut suorittaa erillistä manuaalista kalibrointia, mutta yhden anturin kohdalla asetuksista tuli määrittää erikseen käytetyn öljyn tyyppi.

Antureiden mekaanisen asennuksen suunnittelu alkoi tutustumalla eri anturivalmistajien antamiin asennusohjeisiin ja aiheeseen liittyvään teoriaan, SKF Recond Oil suodatuslaitteistoon, sekä kyselemällä yrityksen sisältä neuvoja ja mahdollisia huomioita asennukseen liittyen. Alkukartoituksen perusteella anturit haluttiin asentaa laitteistoon ennen suodattimia, jotta saadaan paras mahdollinen kokonaiskuva koko järjestelmän öljyn puhtaudesta. Anturien aiheuttama painehäviö katsottiin pieneksi laitteiston melko pienen virtausnopeuden takia, (alle 1 l/min.), joten anturoinnilla ei pitäisi olla suurta vaikutusta suodatuslaitteiston toimintaan.

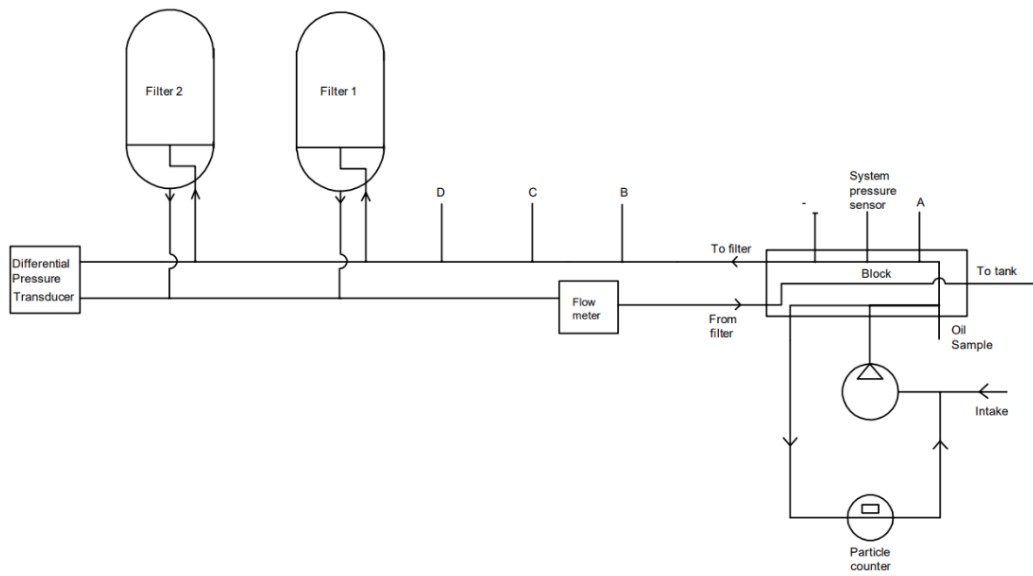
Suodatuslaitteiston pumppulohkoon oli tehty jo valmiiksi poraus yhdelle anturille. Anturin asennuskulma lohossa oli kuitenkin käyttöohjeiden mukaan väärä kyseiselle anturille. Anturivalmistajan mukaan anturi tulisi asentaa mielellään vaakatasoon, ja maksimissaan 45-asteen kulmaan vaakatasosta. Lohkoon tehdyssä asennuspaikassa anturi tulisi pystyasentoon, mittauspää alaspäin. Täyden varmuuden saamiseksi tästä lähetettiin kysely anturin valmistajalle. Valmistajan vastauksen mukaan pystyasennusta ei suositella, koska mikäli anturi asennetaan suuren virtauskanavan yläosaan, silloin siellä saattaa olla paljon ilmakuplia, ja toisaalta mikäli anturi asennetaan kanavan alaosaan silloin anturin mittauspäähän saattaa kertyä likaa. Vastaavia yleisohjeita löytyi myös mui-

den vastaavien anturien käyttöohjeista. Tässä tapauksessa pystyasennus ei kuitenkaan ollut ongelma, koska lohkoissa sijaitseva virtauskanava on melko pieni ja anturin mittauspää tulee riittävän syväälle kanavaan ilmakuplaongelman ehkäisemiseksi. Lisäksi laitteiston virtausnopeus on melko pieni, jolloin ilmakuplia ei pitäisi syntyä myöskään pyönteilyn vaikutuksesta. Anturi voitiin siis asentaa sille suunniteltuun alkuperäiseen paikkaan (ks. kuvio 16). Muiden anturien kohdalla asennus pystyttiin toteuttamaan suoraan anturivalmistajien käyttöohjeiden mukaisesti.

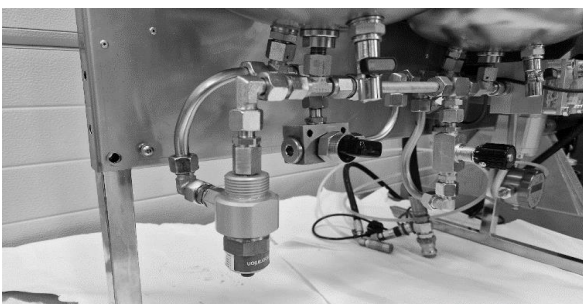
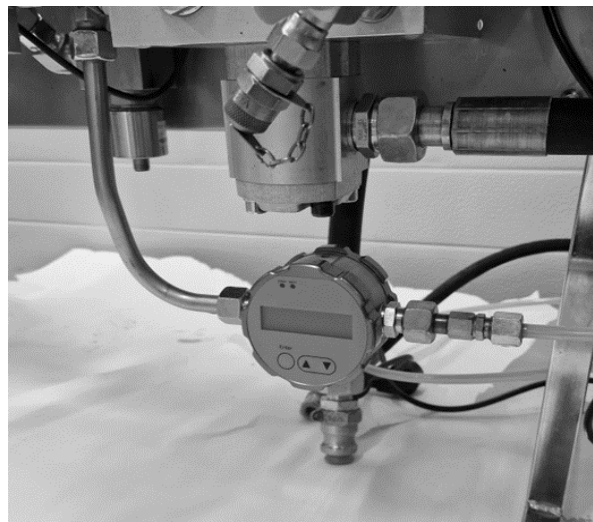


Kuvio 16 Öljynkuntoanturin asennuspaikka pumppulohkossa

Anturien mekaanisessa asennuksessa pyrittiin hyödyntämään mahdollisimman paljon hyllystä löytyviä käyttötarkoitukseen soveltuvia komponentteja. Suunnitteluvaiheen aikana laitteistosta tehtiin PI-kaavio asentajan tueksi (ks. kuvio 17), josta kävi ilmi lohkon kanavat ja kaikkien anturien suunnitellut asennuspaikat järjestelmässä. Lopputulos täytti kaikkien eri anturien ohjeiden mukaiset asennusvaatimukset, ja kokenut asentaja sai rakennettua sen hyllystä löytyneistä materiaaleista (ks. kuvio 18).



Kuvio 17 Järjestelmän PI-kaavio



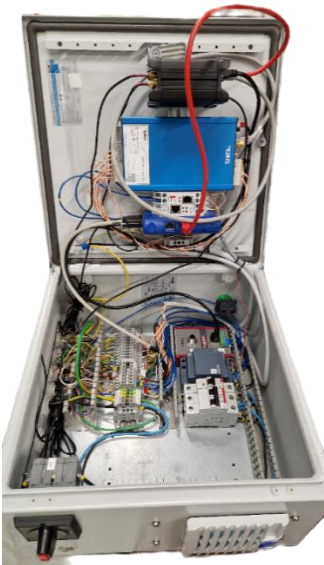
Kuvio 18 Valmis testilaitteisto

6.2 Anturien tiedonkeruujärjestelmä

Tiedonkeruujärjestelmän tehtävänä on tallentaa anturien lähettämä data SKF:n @ptitude Observer pilvipalveluun, jossa sitä voidaan analysoida tarkemmin, ja siitä voidaan muodostaa trendejä.

Opinnäytetyöprojektissa pystyttiin käyttämään aikaisemmassa testilaitteessa kiinni ollutta tiedonkeruujärjestelmää, johon oli kytketty jo valmiiksi osa uudessa testilaitteistossa käytettävistä antureista. Tiedonkeruujärjestelmään piti siis kytkeä vielä loput anturit, sekä konfiguroida ne toimimaan tiedonkeruuyksikön kanssa. Tässä vaiheessa opinnäytetyöprojektia aikaisemmasta automaatioasentajan kokemuksesta oli suuri hyöty, ja pystyin tekemään anturien kytkennät itse olemassa olevien sähkökuvien pohjalta. Lisää apuja tiedonkeruuyksikön, sekä Modbus -ja CAN väyläteknikan kanssa sain kyselemällä yrityksen sisältä, sekä anturivalmistajilta.

Anturien tiedonkeruujärjestelmä koostuu SKF:n IMX8+ tiedonkeruuyksiköstä, LAN reititimestä, sekä CAN-Modbus TCP muuntimesta (ks. kuvio 19). Anturien lähettämää dataa voidaan tuoda tiedonkeruuyksille suoraan analogituloihin milliampeeriviestinä, sekä LAN porttiin Modbus TCP väylän kautta. Koska osa antureista käytti ainoastaan CAN-väylää, tarvittiin järjestelmään CAN-Modbus TCP muunnin, jonka kautta anturin data saatiin lähetettyä oikeassa muodossa tiedonkeruuyksikölle.

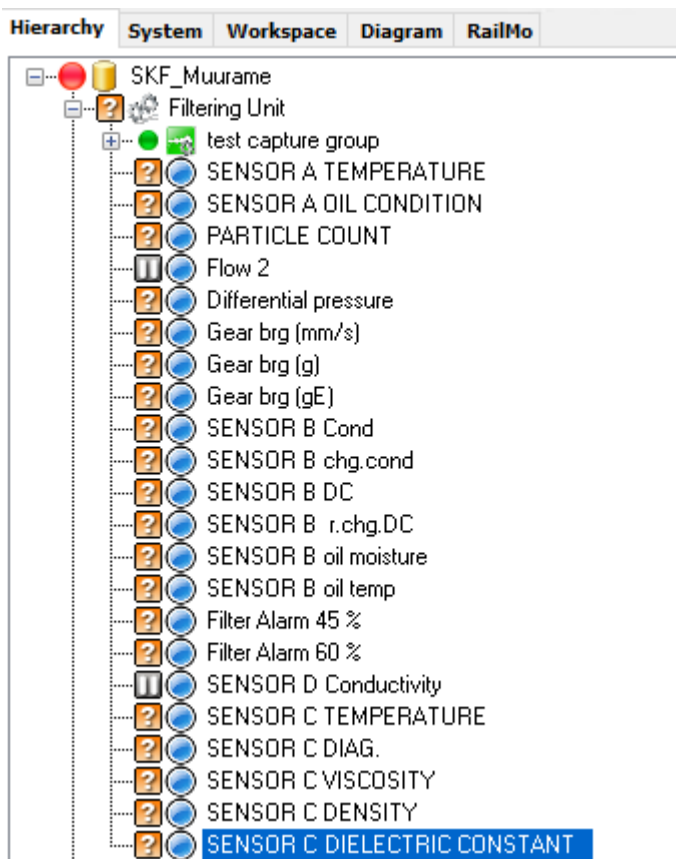


Kuvio 19 Tiedonkeruujärjestelmä

6.2.1 Tiedonkeruujärjestelmän konfigurointi

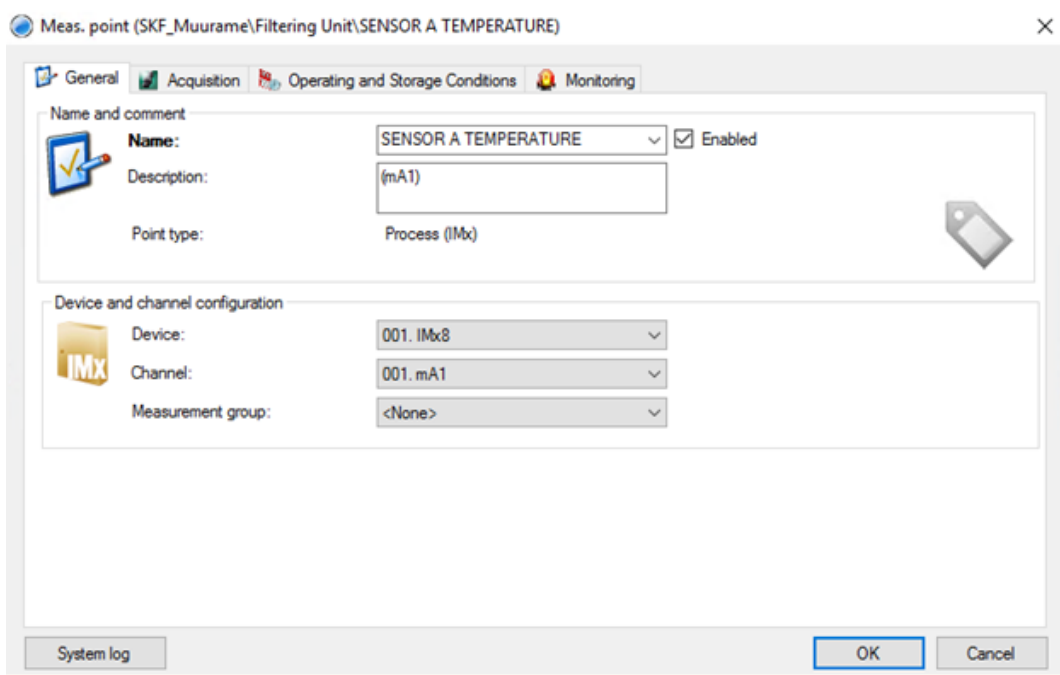
@ptitude Observer on SKF:n kehittämä on-line kunnonvalvontaohjelmisto, jossa pystytään analysoimaan anturien tuottamaa dataa ja muodostamaan siitä mittaustrendejä. Ohjelmisto mahdollistaa myös erilaisten hälytysten asettamisen.

Mittaustiedon lukemiseksi, anturit tuli ensin konfiguroida ohjelmistossa. Ohjelmiston päänäkymään lisättiin ensin uusi mittauspiste jokaiselle järjestelmässä olevalle anturille. (Ks. Kuvio 20.) Osa antureista lähetti useampaa kuin yhtä mittaustietoa, esimerkiksi lämpötilaa ja öljynkuntoa, joten silloin yhdelle anturille konfiguroitiin kaksi erillistä mittauspistettä ohjelmistoon.



Kuvio 20 Observer ohjelmiston päänäkymä

Mittauspisteen asetuksista valittiin jokaiselle anturille sen kytkentää vastaava kanava IMX8+ tiedonkeruuyksiköltä, jotta ohjelmisto osaa lukea anturitiedon oikeasta paikasta. Esimerkiksi anturin lämpötilatieto oli kytketty milliampeeriviestinä tiedonkeruuyksikön ensimmäiseen kanavaan, joten ohjelmistossa piti valita anturin lämpötilan mittauspisteelle sitä vastaava kanava mA1. (Ks. Kuvio 21.)



Kuvio 21 Anturin mittauspiste

Koska anturi lähetti lämpötilatiedon analogisesti milliampeeriviestinä 4-20 mA, piti ohjelmistossa lisäksi asettaa anturin lämpötilarajat, jotta ohjelmisto osaa muuntaa lämpötilan oikein mitatusta virtaviestistä. Milliampeeri- lämpötila konversiotaulukko löytyi anturivalmistajan käyttöohjeesta, ja sitä vastaavat arvot syötettiin Observer-ohjelmistoon (ks. Kuvio 22). Tässä tapauksessa 4 mA signaali vastaa siis anturin mittaamaa alinta mahdollista -30 °C lämpötilaa, ja 20 mA ylintä 130°C lämpötilaa. Ohjelmisto osaa laskea mA/°C suhteen, sekä nollapisteen automaattisesti lämpötilarajojen perusteella. Anturi lähetti lämpötilan lisäksi myös öljynkunnon arvon milliampeeriviestinä, ja se konfiguroitiin myös konversiotaulukon mukaan (ks. Liite 1.), uutena mittauspisteenä ohjelmistoon.

6.3 Öljynsuodatustestin koejärjestely

Testin tavoitteena oli suodattaa kahdessa 250 litran tynnyreissä ollut likainen Teboil Sypress 220 vaihteistoöljy SKF Recond Oil box öljynsuodatuslaitteistolla vastaamaan asetettuja tavoitearvoja (ks. Kuvio 23), sekä tutkia anturien mittaustuloksien perusteella öljyn laadussa tapahtuvaa muutosta suodatusprosessin aikana. Suodatettavasta öljystä otettiin pullonäytteitä eri vaiheissa suodatusprosessia, jotka lähetettiin analysoitavaksi laboratorioon. Laboratorion tekemän öljyanalyysin tuloksia verrattiin laitteiston öljynkuntoanturien mittaustuloksiin korrelaation löytämiseksi.

Tavoitearvot Teboil Sypress 220 öljylle:

Analyysi	Tavoitearvo
MPC	< 20
Gravimetric	< 50
ISO 4406	17/14/11 (PSK Standardi 7201)

Kuvio 23 Tavoitearvot öljylle

6.3.1 Tynnyri 1

Ensimmäisen suodatettavan tynnyrin öljy lämmitettiin hiljalleen 50°C-asteen lämpötilaan tynnyri-lämmittimellä ennen suodatuksen aloittamista, jotta paksu öljy virtaisi paremmin suodattimien läpi. Tynnyriä sekoitettiin testin alussa, jotta öljyn seassa oleva lika ei jäisi tynnyrin pohjalle seisomaan, vaan jäisi paremmin kiinni suodattimiin.

6.3.2 Tynnyri 2

Tynnyri 2:n öljy suodatettiin kylmänä vertailukohdan saamiseksi ensimmäiseen tynnyriin. Suodattimilta ensimmäisen kierroksen jälkeen tuleva öljy päätettiin ohjata uuteen puhtaaseen tynnyriin, jotta tynnyrin pohjalla oleva suurin likakerros jäisi alkuperäiseen tynnyriin. Näin pystyttäisiin mahdollisesti pidentämään suodattimien käyttöikä, sekä voitaisiin varmistua siitä, että tynnyrin pohjalla olevasta likakerroksesta päästään varmasti eroon.

6.3.3 Hypoteesi

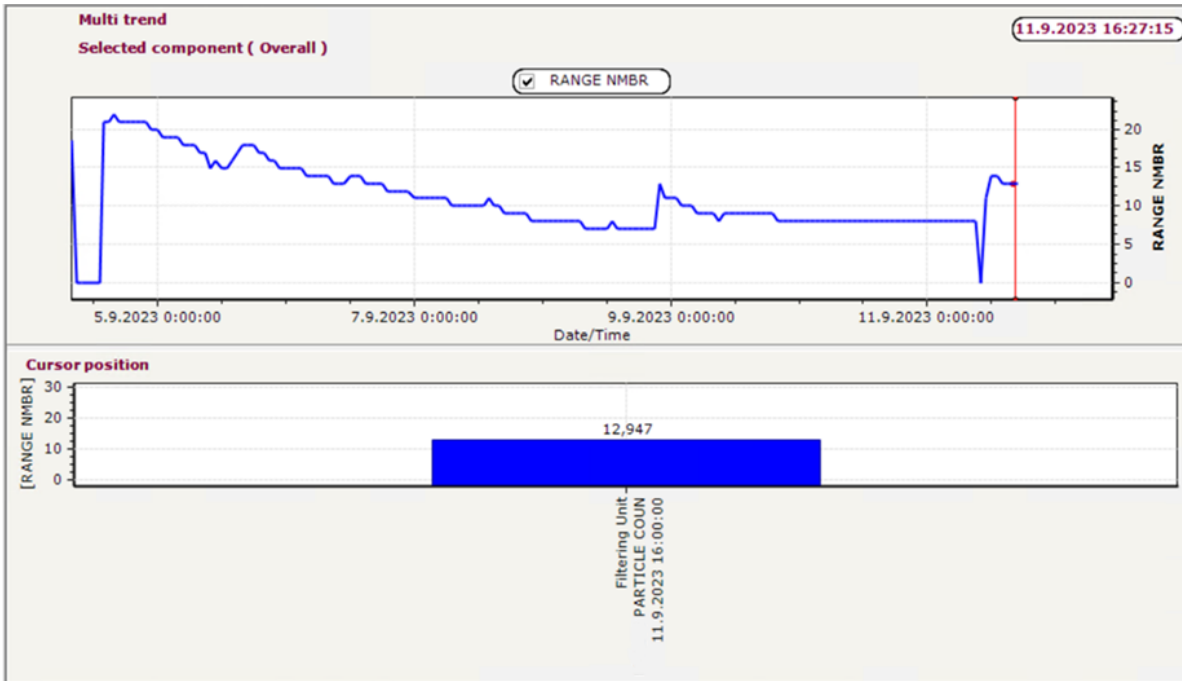
Teorian perusteella laadittiin hypoteesi, johon saatuja tuloksia verrataan. Öljyn tulisi puhdistua sen seassa olevista kulumishiukkasista ja ikääntymistuotteista suodatusprosessin aikana. Öljyn puhdistuminen tulisi näkyä testin aikana järjestelmästä otetuissa pullonäytteissä, sekä järjestelmän anturien mittaustuloksissa. Öljynkuntoanturin ilmoittama öljynkuntoarvo pitäisi parantua suodatuksen aikana. Teorian mukaan öljyn sähköisiä ominaisuuksia mittaavien antureiden dielektrisyysvakion ja johtavuuden mittaustuloksien arvoissa tulisi näkyä muutos pienempään suuntaan öljyn puhdistuessa järjestelmässä suodatuksen aikana. Tämä pitäisi näkyä mittaustuloksista muodostetulla trendiviivalla laskusuuntaisena trendinä. Öljyn seassa olevien hiukkasten määrä pitäisi laskea merkittävästi suodatuksen aikana ja tämä pitäisi näkyä hiukkaslaskurin mittaustuloksissa myös laskusuuntaisena trendinä.

7 Tulokset

7.1 ON-Line hiukkaslaskuri

Järjestelmän ON-Line hiukkaslaskurin mittaamaa hiukaspitoisuutta haluttiin verrata laboratorioon lähetettyjen pullonäytteiden hiukaspitoisuuden kanssa korrelaation selvittämiseksi. Hiukkaslaskurin näytöstä otettiin aina kuva juuri ennen pullonäytteen ottamista, jotta hiukkaslaskurin ilmoittama hiukaspitoisuutta voitiin verrata suoraan senhetkisistä pullonäytteistä mitattuihin hiukaspitoisuuksiin. Tämän lisäksi hiukkaslaskurin mittaustulokset tallennettiin Observer pilvipalveluun trendien muodostamista varten. Hiukkaslaskurin mittausdatan tallentamisen kanssa oli kuitenkin hieman ongelmia testin alussa. Hiukkaslaskuri lähetti dataa niin tiheästi, että se täytti melko nopeasti Observer palvelun muistin, jolloin osa mittaustuloksista hävisi muistista ja jäljellä olevasta datasta tuli vaikeaa tulkita. Ensimmäisen tynnyrin kohdalla ei saatu tämän vuoksi trendiviivaa hiukaspitoisuuden muutoksesta. Toisen tynnyrin kohdalla anturin asetuksia muutettiin siten, että anturi lähetti Observeriin vain pienimmän hiukkasluokan mittaustulokset pidemmällä mittausväliällä, jolloin muisti ei täyttynyt yhtä nopeasti.

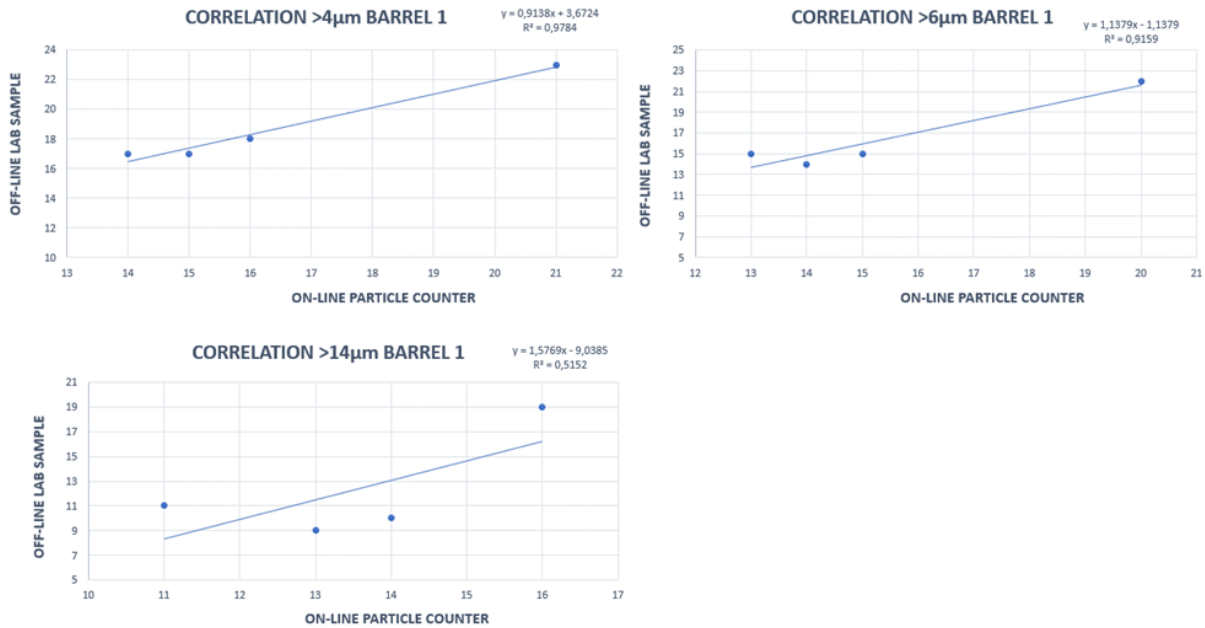
Kuviossa 24 on näkyvissä hiukkaslaskurin mittaustuloksista muodostettu trendiviiva, josta nähdään hiukaspitoisuuden selkeä lasku suodatusjakson aikana. Hiukaspitoisuus laskee tasaiseen tahtiin suodatuksen edetessä, kunnes se asettuu tietylle tasolle. Välillä trendiviivassa on kuitenkin nähtävissä selkeitä piikkejä, jolloin hiukaspitoisuus kasvaa.



Kuvio 24 Tynnyri 2: Hiukkaslaskuri

Suodatuksen aikana havaittiin, että hiukkaslaskurin näyttämä hiukaspitoisuus lähtee nousuun, kun järjestelmä sammutetaan ja käynnistetään uudelleen. Tämä saattaisi viitata siihen, että jostain kohtaa järjestelmää irtoaa likaa paineen noustessa hetkellisesti järjestelmässä, tai siitä että öljyn seassa on ilmakuplia. Ilmakuplien mahdollisuus virtauksessa pyrittiin sulkemaan pois käyttämällä anturivalmistajan suosittelemaa virtausnopeutta anturin läpi, sekä asentamalla hiukkasmittarin paluupuolelle läpinäkyvä letku, josta mahdolliset ilmakuplat saattaisivat näkyä. Virtauksessa ei kuitenkaan havaittu silmämääräisesti lainkaan ilmakuplia. Tämä ei kuitenkaan poissulje ilmakuplien mahdollisuutta, koska ne saattavat olla liian pieniä erottuakseen silmämääräisesti.

ON-Line hiukkaslaskurin suoraan järjestelmästä mittaaman hiukaspitoisuuden ja laboratoriossa analysoitujen pullonäytteiden välistä korrelaatiota pyrittiin selvittämään Excelissä korrelaatioanalyysin avulla. Kuviossa 25 on esitetty korrelaatio hiukkaslaskurin ja pullonäytteiden välillä eri kokoisissa hiukkasluokissa. Kuvaajassa pystyakselilla on pullonäytteistä mitattu hiukaspitoisuus ja vaaka-akselilla taas hiukkaslaskurin mittaama hiukaspitoisuus. Kuvan keskellä näkyvä trendiviiva kuvastaa täydellistä korrelaatiota (korrelaatiokerroin 1). Mitä lähemmäksi kuvaajan pisteet osuvat kuvassa näkyvälle trendiviivalle, sen parempi korrelaatio tulosten välillä on.



Kuvio 25 Korrelaatio ON-line hiukkaslaskurin ja pullonäytteiden välillä

Verrattaessa korrelaatiota pullonäytteiden ja hiukkaslaskurin mittaustulosten välillä, voidaan havaita, että hiukkaslaskurin mittaustulokset korreloivat pullonäytteiden kanssa melko hyvin $>4 \mu\text{m}$ ja $>6 \mu\text{m}$ hiukkaskokojen kohdalla, mutta suurimmassa $>14 \mu\text{m}$ hiukkaskoossa on selkeästi enemmän hajontaa tulosten välillä ja heikompi korrelaatio.

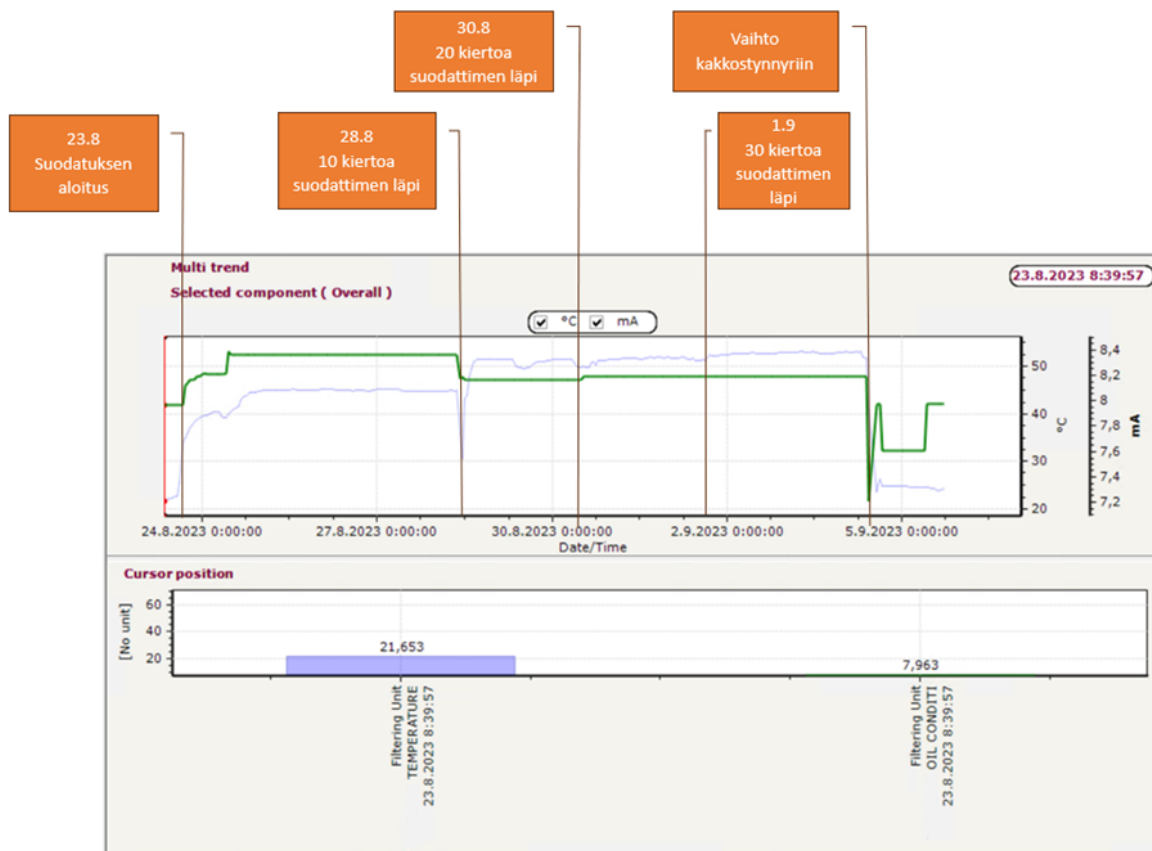
On-line hiukkaslaskurin mittaama hiukkaspitoisuus on $>4 \mu\text{m}$ ja $>6 \mu\text{m}$ hiukkasluokkien kohdalla yleisesti muutaman puhtausluokan pienempi, kuin pullonäytteistä mitattu hiukkaspitoisuus. Tulos on linjassa teorian ja odotuksien kanssa, koska näytteenoton yhteydessä näytepulloon siirtyy yleensä aina hieman ylimääräistä likaa ulkopuolelta, joka näkyy muutaman puhtausluokan erona. Suurimmassa $>14 \mu\text{m}$ puhtausluokassa on kuitenkin nähtävissä selvästi enemmän hajontaa tulosten välillä. Tässä tapauksessa hiukkaslaskurin mittaama hiukkaspitoisuus on suurimmassa osassa mittaustuloksia suurempi kuin pullonäytteistä mitattu pitoisuus. Erään haastatteleman anturivalmistajan asiantuntijan mukaan tämä poikkeama saattaisi viitata öljyn seassa oleviin ilmakupliin, jotka On-line hiukkaslaskuri rekisteröi hiukkasiksi. Öljyn seassa olevat ilmakuplat ovat yleensä selkeästi suurempia kuin tavalliset kulumispartikkelit, joten tämä selittäisi eron mittaustulosten välillä suurimmassa hiukkasluokassa.

7.2 Öljynkuntoanturi A

Öljynkuntoanturi A mittaa öljyn kuntoa dielektrisyysvakion ja johtavuuden perusteella. Anturi mittaa samalla myös öljyn lämpötilaa. Anturi ilmoittaa öljyn kunnan arvon yksinkertaisena numerona valmistajan omalla öljynkuntoasteikolla.

7.2.1 Tynnyri 1

Kuviosta 26 nähdään anturi A:n mitaamat öljynkunnan ja öljynlämpötilan arvot trendiviivana. Kuviin on merkitty suodatuksen eteneminen kiertojen määränä suodattimen läpi. Kuviossa vihreä viiva edustaa anturin mitaamaa öljynkunnan arvoa ja sininen taas lämpötilaa. Anturi A ilmoittaa öljynkunnan milliampeeriviestinä, jota pitää tulkita valmistajan käyttöohjeesta löytyvän taulukon mukaan. (ks. Liite 1.) Kyseisen anturin tapauksessa suurempi mittaustuloksen arvo tarkoittaa huonompaa öljynkunnan arvoa. Öljyn puhdistuessa trendiviiva pitäisi siis teoriassa lähteä laskuun.



Kuvio 26 Öljynkuntoanturi A: Tynnyri 1

Anturin mittaustulosten ja anturivalmistajan öljynkuntoasteikon mukaan öljyn lähtötaso testin alussa vastaa hyväkuntoisen öljyn tasoa. Suodatuksen alussa öljynkuntoarvon ja lämpötilan trendiviivat liikkuvat hieman ylöspäin, kunnes ne tasaantuvat usean päivän ajaksi. 10 suodatinkierron kohdalla molemmissa trendiviivoissa on näkyvässä selkeä pudotus. Tässä kohtaa järjestelmä on sammutettu hetkellisesti, jolloin virtausnopeus ja lämpötila ovat laskeneet. Tämä selittää myös kuvaajassa näkyvän pudotuksen. 10 suodatinkierron kohdalla järjestelmän virtausnopeutta kasvatettiin, mikä näkyy myös anturin mittaaman lämpötilan nousuna, sillä öljy ehtii jäähtyä vähemmän aikaa putkistossa ennen kuin se saavuttaa anturin mittauspisteen. Tästä eteenpäin lämpötilan ja öljynkunnan trendiviivat pysyvät hyvin tasaisena suodatusjakson loppuun saakka. Kuvaajan lopussa on nähtävissä järjestelmän sammutus tynnyrinvaihdon ajaksi, sekä uudelleenkäynnistyksestä johtuva piikki trendiviivassa.

Anturi A:n mittaama öljynkuntoarvo on ensimmäisen suodatusjakson lopussa hiukan parempi kuin alussa, eli öljy on anturin mukaan suodatuksen jälkeen hivenen parempilaatuista. Muutos ei kuitenkaan näy trendiviivalla tasaisena laskusuuntaisena trendinä, vaan nähtävissä olevat muutokset tapahtuvat portaittain ja ne selittyvät myös muilla tekijöillä, kuin öljyn laadun selkeällä parantumisella. Tämän vuoksi anturin mittaustulosten perusteella ei voida luotettavasti arvioida öljyn puhdistumista suodatuksen aikana.

7.2.2 Tynnyri 2

Kuviossa 27 vihreä trendiviiva edustaa anturi A:n mittaamaa öljynkunnan arvoa, ja sininen viiva partikkelilaskurin mittaamaa hiukkaspitoisuutta öljyssä kakkostynnyrin suodatuksen aikana. Vertaattaessa näitä kahta trendiviivaa keskenään nähdään, että öljyn hiukkaspitoisuuden trendi on vahvasti laskusuuntainen suodatuksen edetessä, mutta öljynkuntoanturin trendiviivassa ei tapahdu pitkällä aikavälillä juuri minkäänlaista muutosta. Vaikuttaa siltä, että öljyn puhdistuminen hiukkasista ei vaikuta öljyn sähkökemialliseen sormenjälkeen riittävästi, jotta öljynkuntoanturi pystyisi havaitsemaan siinä selkeää muutosta.

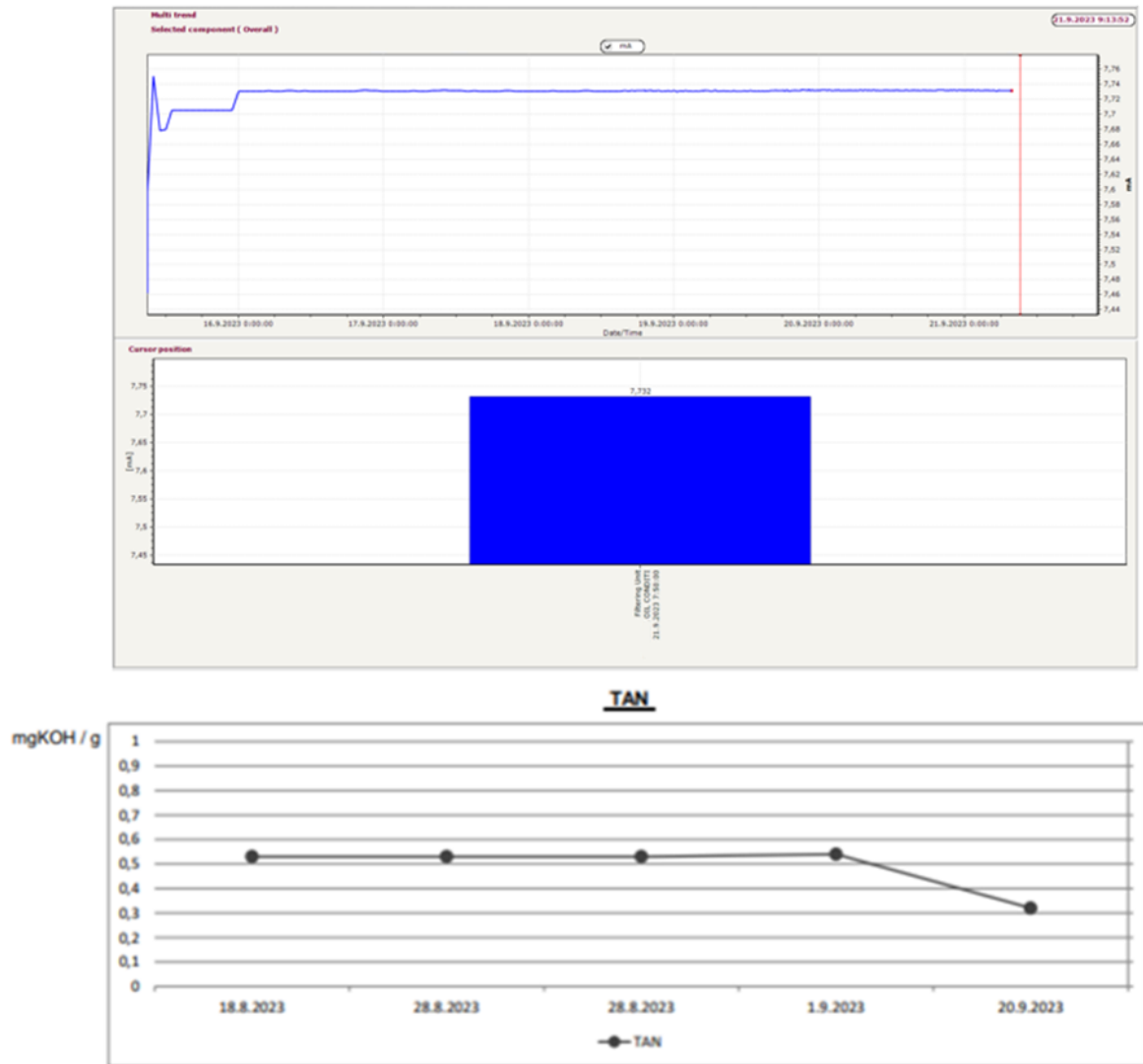


Kuvio 27 Öljynkuntoanturi A: Tynnyri 2

7.2.3 Tynnyri 1 lisäsuodatus

Ensimmäisen tynnyrin öljyn suodattamista jatkettiin vielä kakkostynnyrin suodatuksen jälkeen, koska laboratoriossa pullonäytteestä mitattu hiukaspitoisuus oli vielä hieman liian korkea. Toisella kerralla öljy kuitenkin päätettiin suodattaa kakkostynnyrin tapaan kylmänä ja pienemmällä virtausnopeudella, koska epäiltiin että tämä saattaisi olla tehokkaampi tapa pienten hiukkasten suodattamiseksi öljystä.

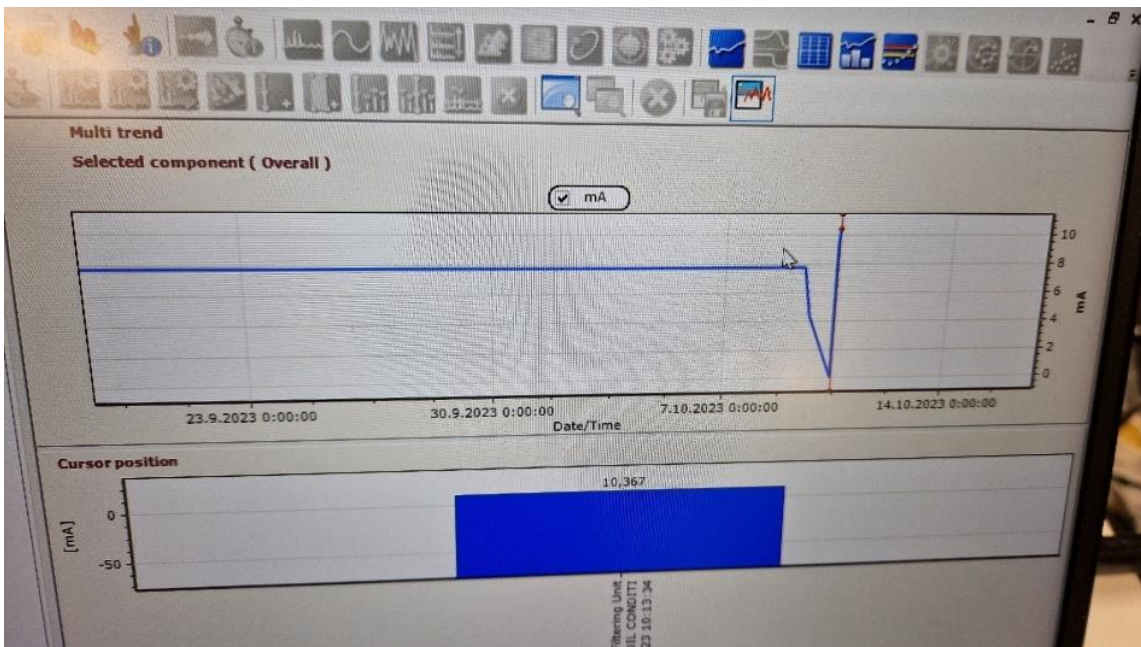
Toisella suodatuskerralla päästiin asetettuihin tavoitearvoihin, ja laboratorionäytteissä oli myös havaittavissa pieni muutos öljyn TAN-arvossa suodatuksen loppua kohden. Anturin pitäisi teoriassa reagoida herkästi öljyn TAN-arvon muuttumiseen, mutta trendiviiva suodatusjakson ajalta on kuitenkin koko ajan hyvin tasainen, eikä sen perusteella voi nähdä minkäänlaista muutosta öljyn kunnossa. (ks. Kuvio 28.) Tämä luultavasti johtuu kuitenkin siitä, että muutos öljyn TAN-arvossa on vielä niin pieni, ettei anturi pysty havaitsemaan sitä.



Kuvio 28 Anturin mittaustrendi verrattuna pullonäytteestä mitattuun TAN-arvoon

7.2.4 Lisätestit hapettuneella öljyllä

Anturin tuloksia tarkasteltaessa heräsi epäily siitä, että testissä suodatettu öljy saattoi olla lähtötasoltaan kemiallisesti vielä niin hyväkuntoista, ettei anturi pysty vielä havaitsemaan siinä riittävän suurta muutosta suodatuksen jälkeen. Tämän vuoksi anturia päätettiin testata vielä erillisessä testipenkissä, jossa anturin ohi ajettiin hapettunutta hydraulioöljyä. Testissä anturin ohi ajettiin ensin uutta vastaavaa hydraulioöljyä perustason selvittämiseksi ja mukaan sekoitettiin hiljalleen vanhaa hapettunutta öljyä. Anturi havaitsi muutoksen öljyssä lähes välittömästi ja trendiviiva lähti nousuun osoittaen öljyn kunnan huonontumista. (Ks. kuvio 29). Näin voitiin varmistua siitä, että kyseinen anturi toimii oikein, mikäli öljyn sähkökemiallinen sormenjälki muuttuu riittävästi esimerkiksi öljyn hapettumisen vuoksi.

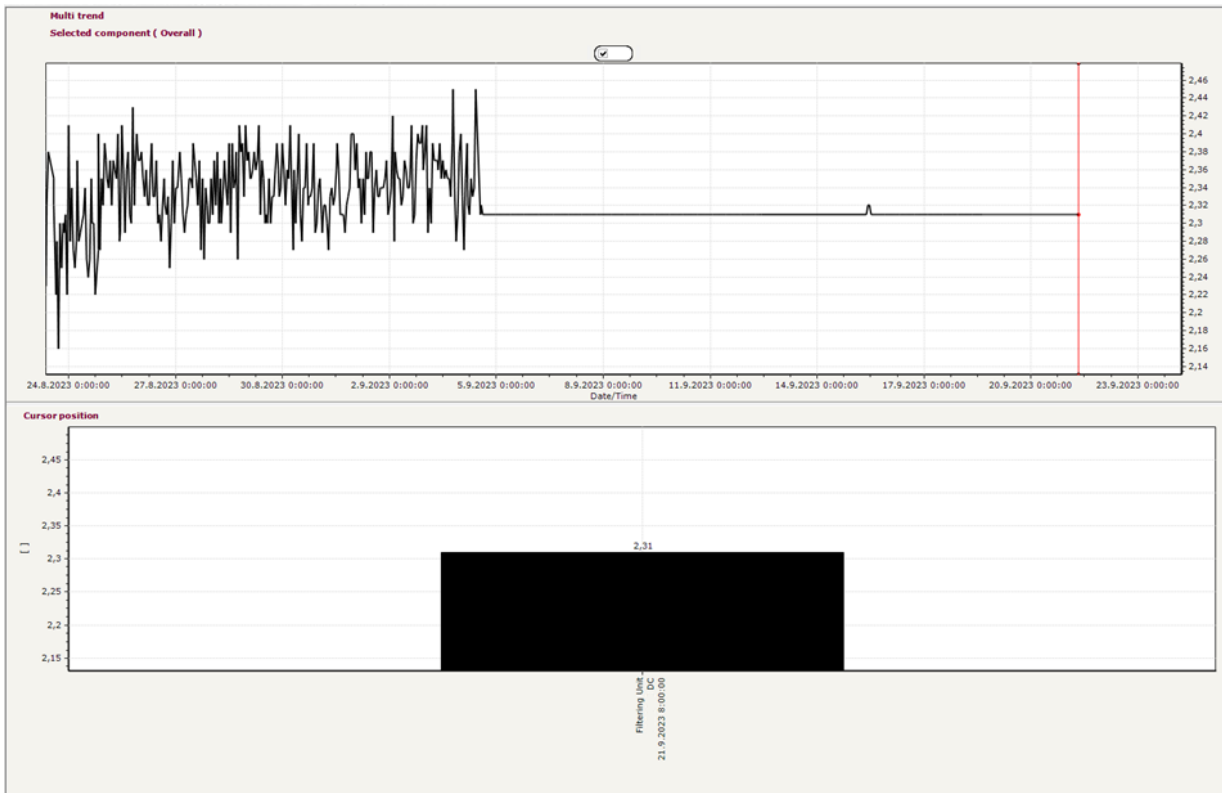


Kuvio 29 Anturitestit hapettuneella hydraulioöljyllä

7.3 Öljynkuntoanturi B

Anturi B mittaa öljyn kuntoa öljyn dielektrisyysvakion ja johtavuuden perusteella. Anturi pystyy mittaamaan samalla myös öljyn lämpötilaa, sekä suhteellista kosteutta. Anturista löytyy myös toiminto mittaustulosten automaattiselle lämpötilakompensoinnille asetetun opettelujakson jälkeen. Opettelujakson aikana anturi käy läpi käytön aikana esiintyvät lämpötilat ja tallentaa ne sisäiseen muistiin. Opettelujakson jälkeen anturi antaa mittaustuloksen valmiiksi lämpökompensoituna, jolloin tuloksia voi tulkita suoraan lämpötilasta riippumatta. Toiminto on hyödyllinen, mikäli käyttökohteen käyttölämpötila vaihtelee paljon, koska öljyn dielektrisyysvakio ja johtavuus ovat riippuvaisia lämpötilasta. Testissä lämpötila kuitenkin pysyi niin tasaisena opettelujakson aikana, ettei anturi pystynyt käymään läpi sille asetettuja lämpötilarajoja, jolloin anturin opetusjakso jäi kesken. Anturi kuitenkin lähettää mittaustulokset myös ilman tätä automaattista lämpökompensointia. Tuloksia voidaan pitää luotettavana, kunhan varmistutaan siitä, että lämpötilassa ei näy suurta heitelyä lähekkäisten mittaustulosten välillä. Testin aikana lämpötilan vaihteluväli oli alle 5°C-astetta suodatusjakson aikana, joten lämpötilan vaihtelu ei vaikuta tässä tapauksessa merkittävästi saatuihin mittaustuloksiin.

Kuviossa 30 on nähtävissä öljyn dielektrisyysvakion mittaustuloksista muodostettu trendiviiva koko suodatustestin ajalta. Trendiviivalla näkyy alussa paljon vaihtelua ja kohinaa mittaustuloksissa ensimmäisen tynnyrin suodatusjakson aikana. Mittaustulokset tasaantuvat testin edetessä ensimmäisen tynnyrin vaihdon jälkeen. Mittaustulosten trendiviivan perusteella on vaikea nähdä mitään selkeää muutosta mihinkään tiettyyn suuntaan öljyn dielektrisyysvakion arvossa.

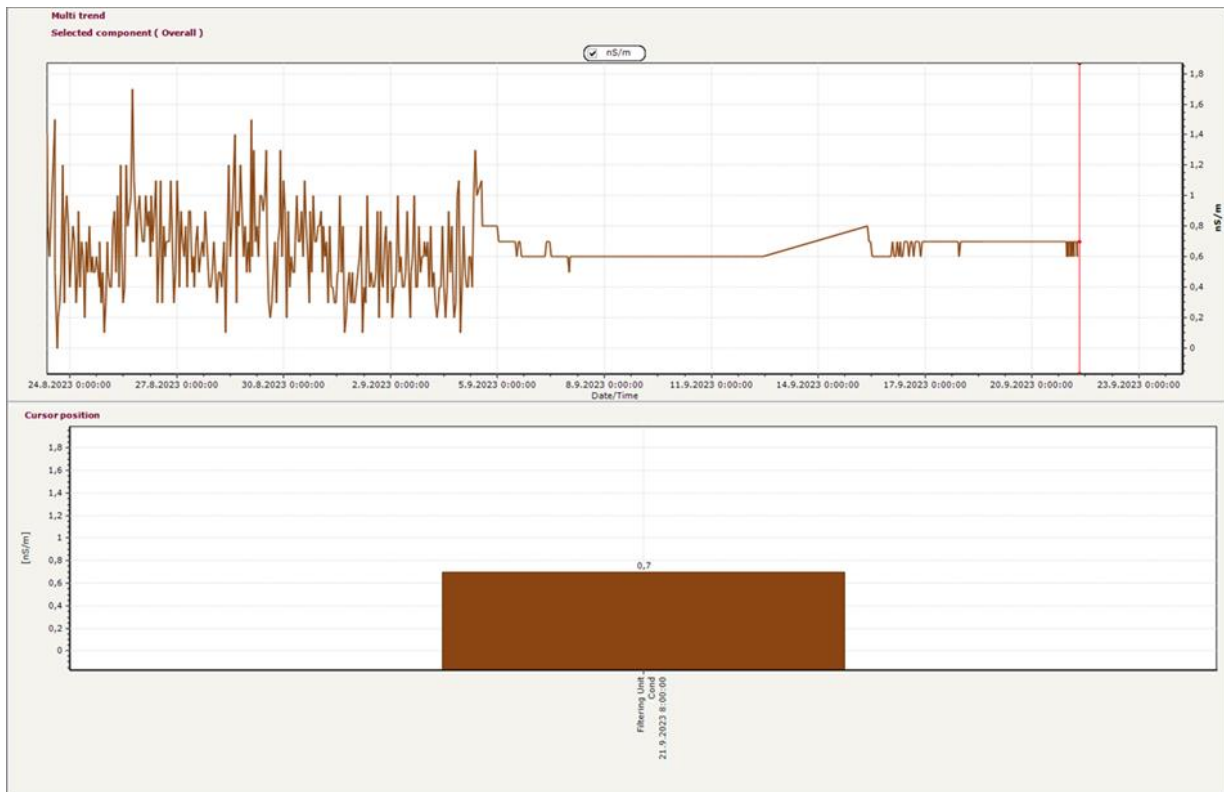


Kuvio 30 Öljynkuntoanturi B: Öljyn dielektrisyysvakio

Kuviossa 31 on nähtävissä öljyn sähkönjohtavuuden mittaustulosten trendiviiva samalta ajalta.

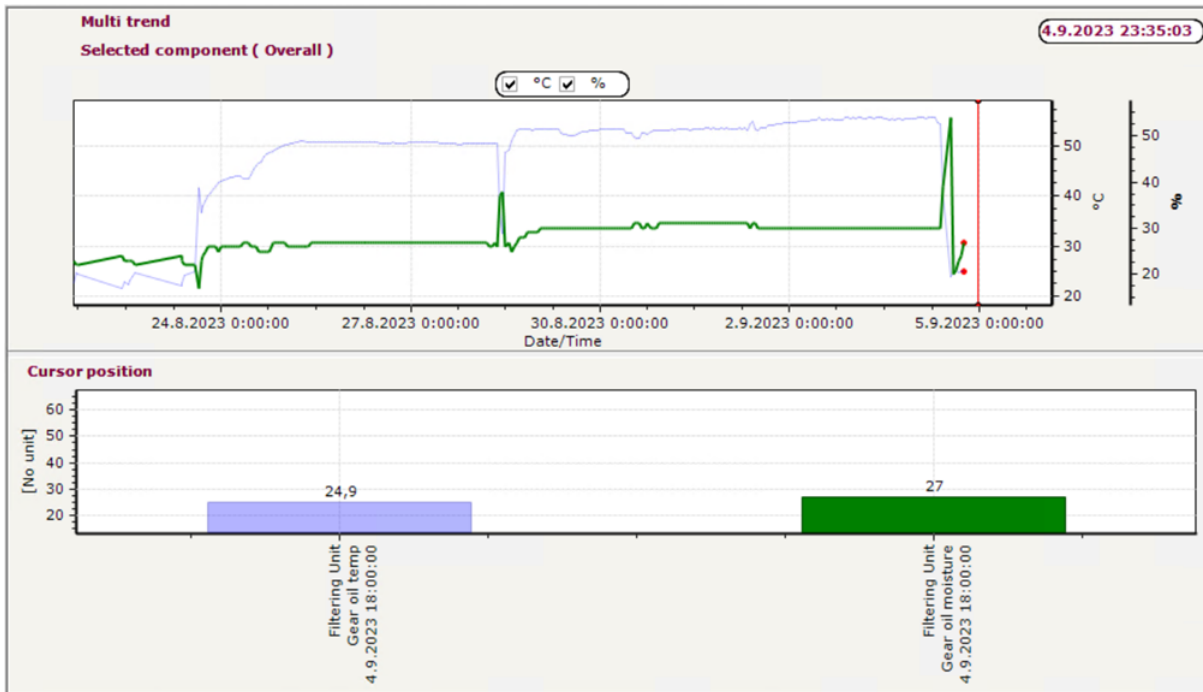
Trendiviivalla on myös nähtävissä paljon kohinaa alussa, joka tasaantuu testin edetessä tynnyrinvaihdon jälkeen. Trendiviivalla näkyy välillä muutoksia molempiin suuntiin, mutta muutokset mittaustuloksien välillä ovat pieniä ja ne vaikuttavat satunnaisilta. Mittaustrendin perusteella on vaikea nähdä mitään selkeää muutosta mihinkään tiettyyn suuntaan suodatusjakson aikana.

Trendiviivalla ajoittain näkyvät muutokset öljyn johtavuudessa selittyvät luultavasti muilla tekijöillä kuin öljyn laadun muuttumisella, kuten anturin mittauserävarmuudella.



Kuvio 31 Öljynkuntoanturi B: öljyn johtavuus

Kuviossa 32 on näkyvissä öljyn suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mittaustuloksista muodostetut trendiviivat. Kuvaajassa sininen trendiviiva kuvaa öljyn lämpötilaa ja vihreä trendiviiva taas suhteellista kosteutta. Kuvioista on nähtävissä lämpötilan vaikutus suhteellisen kosteuteen. Järjestelmä on sammutettu hetkellisesti testin aikana, jolloin lämpötila on pudonnut, ja tämä näkyy myös hetkellisenä piikkinä suhteellisessa kosteudessa. Öljyn suhteellinen kosteus pysyi hyvällä tasolla koko testin aikana, eikä öljyn seassa ollut liikaa kosteutta, jotta se aiheuttaisi ongelmia, kuten vapaan veden muodostumisen riskin.



Kuvio 32 Öljynkuntoanturi B: öljyn suhteellinen kosteus ja lämpötila

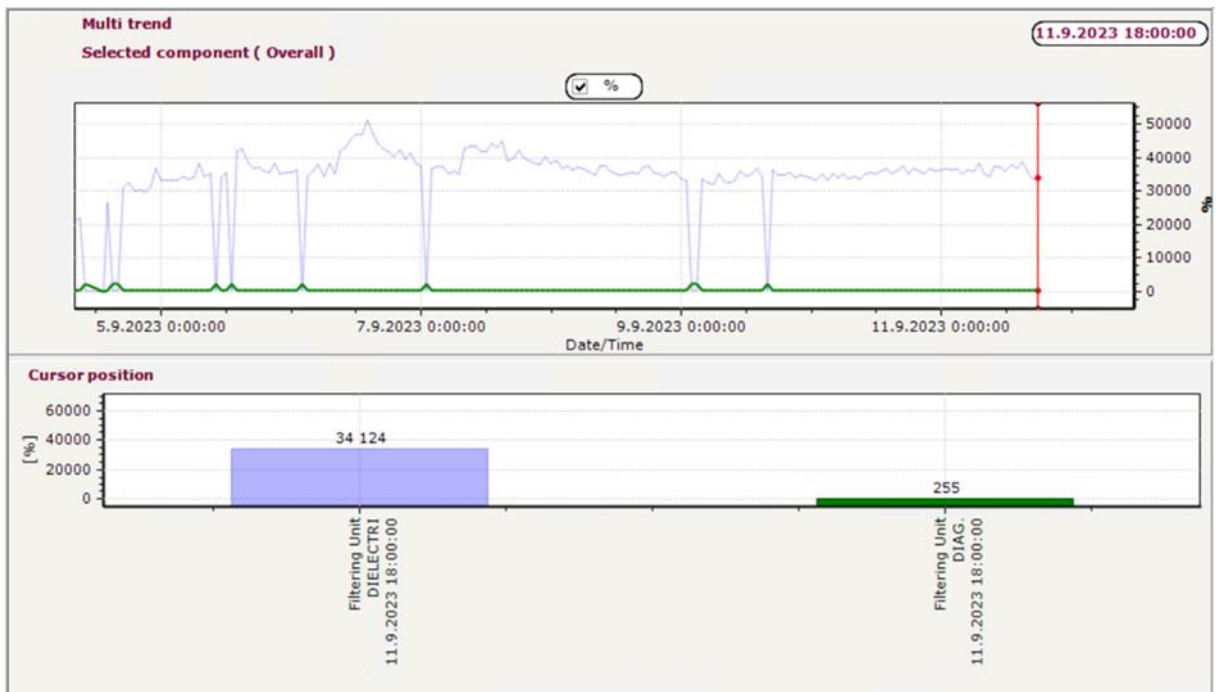
7.4 Öljynkuntoanturi C

Anturi C mittaa öljystä dielektrisyysvakiota, lämpötilaa, viskositeettia ja tiheyttä. Anturin kanssa oli ongelmia testin aikana, sillä se meni välillä vikatilaan ja lopetti mittaamisen. Kuviossa 33 näkyy anturin dielektrisyysvakion mittauksen trendiviiva. Trendiviivalla on nähtävissä paljon äkillisiä piikkejä, jotka johtuvat anturin menemisestä hetkelliseen vikatilaan.

Kuviossa 34 näkyy anturin vikatilojen diagnostiikkatieto, sekä öljyn dielektrisyysvakio. Kuviossa sininen trendiviiva edustaa dielektrisyysvakiota ja vihreä viiva anturin vikatilojen diagnostiikkaa. Aina kun anturi menee vikatilaan, se näkyy myös äkillisenä muutoksena dielektrisyysvakion arvossa. Anturin vikatilaan menemisen syy löytyy luultavasti testissä käytetyn öljyn liian suuresta viskositeetista. Öljyä ei saatu myöskään lämmitettyä testin aikana tynnyrilämmittimellä riittävän kuumaksi, jotta se olisi ollut viskositeetiltaan anturin mitta-alueen sisällä. Tämän vuoksi anturin mittaustuloksia ei voida pitää luotettavana.



Kuvio 33 Öllynkuntoanturi C: öljyn dielektrisyysvakio



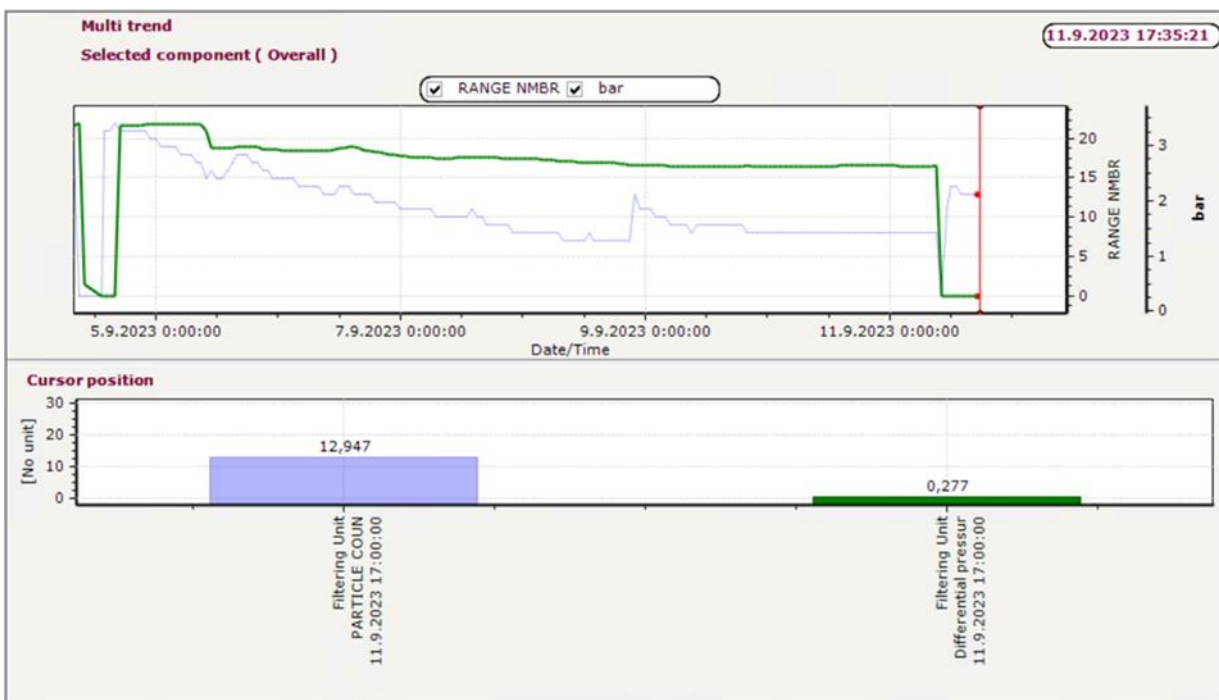
Kuvio 34 Öllynkuntoanturi C: dielektrisyysvakio ja anturin diagnostiikka

7.5 Öljynkuntoanturi D

Anturi D mittaa anturi B:n tapaan johtavuutta ja lämpötilaa, ja sen oli tarkoitus olla sille vertailukohtana. Anturin öljynjohtavuuden mittausta ei kuitenkaan saatu toimimaan testissä käytetyn öljyn kanssa, koska se oli johtavuudeltaan kyseisen anturin mittausalueen ulkopuolella. Tämän vuoksi tästä anturista ei saatu lämpötilan lisäksi mitään käyttökelpoisia tuloksia, joten se otettiin pois käytöstä testin alussa.

7.6 Paine-eroanturi

Suodattimien tilaa tarkkailtiin paine-eroanturin mittaaman vastapaineen perusteella. Suodattimen tukkeutuessa partikkeleista anturin mittaama vastapaine pitäisi kasvaa. Kuviossa 35 näkyy anturin mittaama vastapaine vihreällä trendiviivalla ja hiukkalaskurin hiukkaspitoisuus sinisellä trendiviivalla. Anturin mittaustiedon perusteella vastapaine kuitenkin näyttää ennemminkin laskevan suodatuksen aikana, mikä saattaisi viitata suodattimen vaurioitumiseen ja ohivuodon lisääntymiseen. Suodattimien kunto tarkastettiin tästä syystä kertaalleen testin aikana, mutta ne olivat ainakin silmämääräisen tarkastuksen perusteella täysin kunnossa. Tämä ilmiö saattaa myös johtua suodattimen mukautumisesta ja ”elämisestä” testin aikana, ja olla vain kyseisen suodattimen ominaisuus.

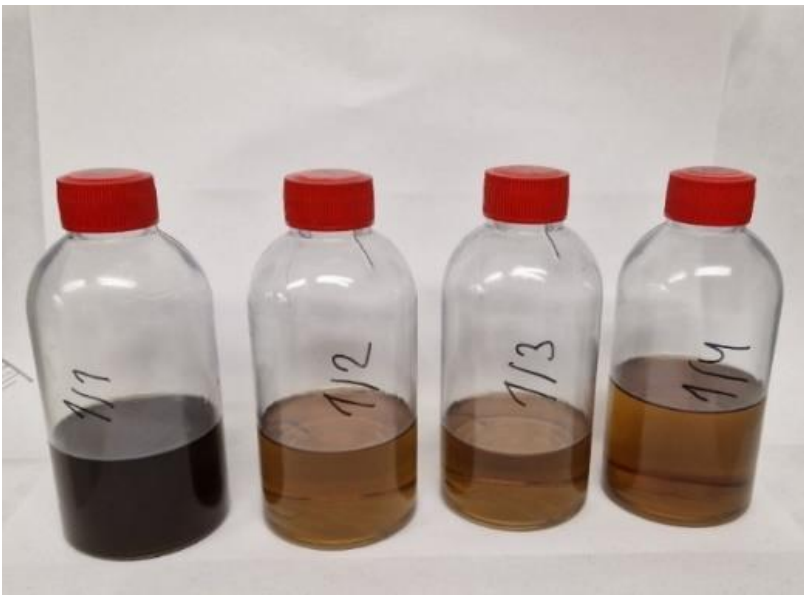


Kuvio 35 Paine-eroanturi

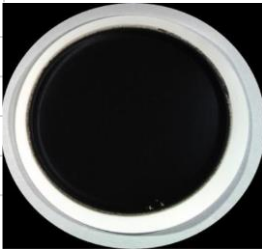


7.7 Suodatustestin tulokset

Ennen suodatustestin aloittamista otetussa lähtötasonäytteessä öljy oli väriltään tumman ruskeaa ja sen seassa näkyi paljon irtonaista likaa, joka painui ajan kanssa näytepullon pohjaan paksuksi kerrokseksi. Likakerroksen painuessa näytepullon pohjaan, jäljellä oleva öljy oli kuitenkin kirkasta ja puhtaan näköistä. Ensimmäisestä tynnyristä otetussa pullonäytteessä oli laboratorioanalyysin mukaan öljyn seassa paljon kulumishiukkasia, pääasiassa rautaa, samalla kun öljyn sinkkipitoisuus oli hiukan kohonnut. Muut öljystä mitatut arvot olivat normaalin tasolla, ja öljy oli kemiallisesti vielä kunnossa (ks. Liite 2 Öljynkuntoraportti).

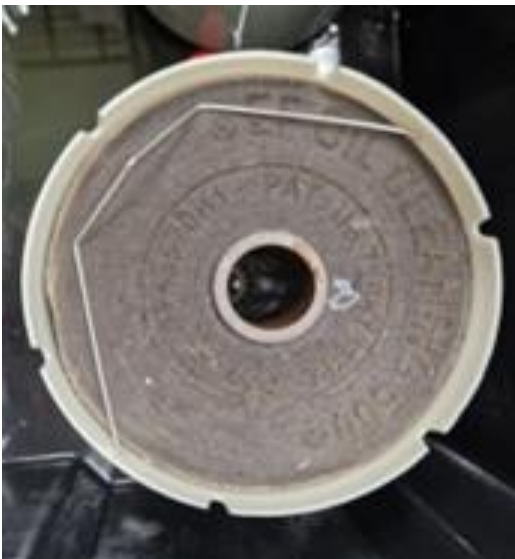
Öljyn puhdistuminen suodatustestin aikana näkyi selkeänä värin muutoksena pullonäytteissä (ks. Kuvio 36), sekä laboratorion tekemissä hiukkaspitoisuus ja MPC analyyseissä (ks. Kuvio 37). Järjestelmän suodattimet tarkastettiin ja vaihdettiin ensimmäisen tynnyrin suodatuksen jälkeen ja niihin oli jäänyt kiinni paljon likaa. (ks. Kuvio 38).



Kuvio 36 Pullonäytteet

Value	Tavoitearvo	Lähtötilanne	10 kierrosta	50 kierrosta
Viscosity		203,8	203,7	203,2
viscosity		23,3	23,5	23,5
ISO 4406	17/14/11	23/22/19	17/15/10	16/13/9
TAN		0,53	0,53	0,32
MPC	20	85,3	37	11
Sinkki		45	45	45
				

Kuvio 37 Hiukkasmäärä ja MPC analyysi



Kuvio 38 Suodatin

Suodatustestien aikana molempien tynnyrien öljy saatiin suodatettua hiukkaspitoisuudeltaan tavoitearvojen mukaiseksi. Ensimmäisessä tynnyrissä ollut öljy jouduttiin kuitenkin suodattamaan kertaalleen uudelleen, koska hiukkaspitoisuus oli ensimmäisen suodatuskerran jälkeen vielä hie- man tavoitearvoja suurempi. Toisella kerralla öljy kuitenkin päätettiin suodattaa kakkostynnyrin tapaan kylmänä ja pienemmällä virtausnopeudella, koska epäiltiin että tämä saattaisi olla tehok- kaampi tapa pienten hiukkasten suodattamiseksi öljystä. Lisäsuodatuksen jälkeen ykköstynnyrin

öljy saatiin vastaamaan tavoitearvoja ja se voitiin uusiokäyttää. Suodatustestien perusteella vaikuttaisi siltä, että öljyn suodattaminen kylmänä ja pienemmällä virtausnopeudella on pienten hiukkasten suodattamiseen tehokkaampi tapa, mutta tätä on kuitenkin hankala todistaa pelkästään testin aikana saatujen mittaustulosten perusteella, vaan se vaatii lisätestausta. Kakkostynnyrin öljyn hiukkaspitoisuus saatiin hyvälle tasolle jo ensimmäisen suodatuskerran jälkeen, mutta öljyn viskositeetti oli uuteen öljyyn verrattuna alhaisempi, joten öljyä ei voitu käyttää uudelleen. Viskositeetin muutos oli kuitenkin nähtävissä jo tynnyristä otetussa lähtötasonäytteestä, eikä sillä ollut mitään tekemistä itse suodatusprosessin kanssa. Todennäköisesti tynnyriin laitetun vaihteistoöljyn joukkoon oli sekoittunut jotain muuta öljyä, kuten ohuempaa hydraulioöljyä.

7.8 Tuloksien luotettavuuden arviointi

Tuloksien luotettavuutta voidaan arvioida vertailemalla anturien mittaustuloksia laboratoriossa pullonäytteistä tehdyn öljynkuntoanalyysin tuloksiin. Laboratorioon lähetettyjen pullonäytteiden luotettavuus varmistettiin sillä, että näytteen ottajana toimi asiaan perehtynyt ammattitaitoinen henkilö. Osa käytössä olleista antureista mittasi myös samoja asioita, jolloin näitä tuloksia voitiin verrata keskenään suurten poikkeamien varalta.

Kaikki testissä käytetyt anturit asennettiin valmistajien ohjeiden mukaan, eikä niille tarvinnut käyttöohjeiden mukaan suorittaa erillistä kalibrointia. Yhden anturin kohdalla tuli kuitenkin valita käytetyn öljyn tyyppi, joka löytyi anturin asetuksista. Öljyn kunnonvalvonnan kannalta oleellista on tunnistaa pitkällä aikavälillä tapahtuvat muutokset öljyn kunnossa, joten mittaustuloksia tarkasteltaessa ei tule kiinnittää pelkästään huomiota anturien antamiin absoluuttisiin arvoihin vaan mittaustrendeissä ajan kanssa tapahtuviin muutoksiin. Näin ollen anturien kalibroinnista ja mittausedävarmuudesta johtuvat erot yksittäisissä mittaustuloksissa eivät vaikuta merkittävästi lopputuloksiin.

Öljynkuntoanturit A ja B näyttivät keskenään melko samanlaisia tuloksia, eikä kumpikaan anturi havainnut selkeää muutosta öljyn kunnossa testin aikana. Mielestäni näiden anturien tuloksia voidaan pitää luotettavana tuloksien samankaltaisuuden vuoksi. Öljynkuntoantureita C ja D ei saatu toimimaan kunnolla, ja ne näyttivät täysin erilaisia ja satunnaisia tuloksia, joten niitä ei voi pitää luotettavina.

Hiukkaslaskurin tuloksia pystyttiin vertaamaan suoraan pullonäytteistä mitattuihin hiukkaspitoisuuksiin. Vertailu pullonäytteisiin paljasti eroja mitatuissa hiukkaspitoisuuksissa, etenkin suurimassa 14 μm hiukkasluokassa. Ero suurimassa hiukkasluokassa johtuu todennäköisesti ilmakuplista öljyn seassa. Erot hiukkaspitoisuuksissa $>4 \mu\text{m}$ ja $>6 \mu\text{m}$ hiukkasluokissa olivat pienempiä ja ne selittyvät näytteenottoon liittyvillä tekijöillä. Mielestäni hiukkaslaskurin tuloksia voidaan pitää luotettavana $>4 \mu\text{m}$ ja $>6 \mu\text{m}$ hiukkasluokissa, mutta mahdollisten ilmakuplien syytä tulisi tutkia lisää, jotta voidaan varmistua tulosten luotettavuudesta kaikissa hiukkasluokissa.

7.9 Jatkokehitys- ja toimenpideideoita

Recond oil box laitteiston anturoinnin jatkokehityksen kannalta testissä parhaiten toimineita öljynkuntoantureita A & B voisi testata lisää erityisesti lähtötasoltaan kemiallisesti huonompikuntoisilla öljyillä, sillä opinnäytetyön aikana opittiin, että öljyn pitää olla kemiallisesti huonompaa (hapettunutta), jotta anturien mittaamissa öljyn sähköisissä suureissa (dielektrisyysvakio, johtavuus) tapahtuu merkittäviä muutoksia. Mikäli hapettuneen öljyn kunto paranee merkittävästi suodatuksen aikana, anturit pystyvät todennäköisesti havaitsemaan sen.

Opinnäytetyön aikana saatujen kokemusten perusteella Recond Oil Box laitteiston kannalta paras öljynkuntoanturi pystyy mittaamaan öljystä mahdollisimman montaa asiaa, jolloin jo yhden anturin antaman tietojen perusteella voidaan saada kattava kuva öljyn kunnosta. Sähköisten mittausten lisäksi viskositeetin mittaustoiminto on hyödyllinen, sillä viskositeetin muutos korreloi teorian mukaan usean öljyn kulumismekanismin kanssa. Anturissa tulee olla myös hieman sisäistä älyä tuloksien suodattamisessa, jotta se voi antaa tuloksen yksinkertaisessa muodossa, kuten öljynkuntoasteikkona. Kommunikaatioväylänä suosittelen Modbus-väylää CAN- väylän sijaan sen paremman yhteensopivuuden vuoksi, jolloin ei tarvita erillistä CAN-Modbus muunninta. Hiukkaslaskuri on hyvä olla toisen öljynkuntoanturin rinnalla, erityisesti silloin kun suodatettavan öljyn seassa on paljon kulumishiukkasia, sillä sen perusteella nähdään hyvin öljyn puhdistuminen hiukkasista välttämättä turhien pullonäytteiden ottaminen. Hiukkaslaskurin kanssa havaittua mahdollista ilmakuplaongelmaa tulee kuitenkin tutkia lisää, jotta voidaan varmistua tulosten luotettavuudesta kaikissa hiukkasluokissa. Markkinoille on myös tullut uudenlaisia konenäköön pohjautuvia hiukkaslaskureita, jotka pystyvät erottelemaan automaattisesti öljyn seassa olevat ilmakuplat tuloksista, sekä tunnistamaan myös kulumispartikkelien muodon, mikä saattaisi olla hyödyllinen ominaisuus.

Opinnäytetyön aikana kävi ilmi, että etenkin suodatettavan öljyn viskositeetti asettaa rajoitteita joidenkin öljynkuntoanturien toimintaan. Opinnäytetyössä suodatettavana olleen vaihteistoöljyn kinemaattinen viskositeetti on valmistajan datalehden mukaan 40 °C-asteen lämpötilassa 220 mm²/s, mikä aiheutti ongelmia yhden testissä olleen anturin kanssa. Laitteiston jatkokehityksen kannalta on hyödyllistä kartoittaa sellaisia öljynkuntoantureita, joilla on suurempi viskositeetin mittausalue. Toinen vaihtoehto on öljyn lämmittäminen riittävän kuumaksi ennen anturia, jotta öljyn viskositeetti saadaan anturille riittävän alhaiseksi. Tämä saattaisi onnistua esimerkiksi sivukiertoan asennetun sähkövastuksen avulla, joka lämmittää öljyn haluttuun lämpötilaan juuri ennen anturia.

8 Johtopäätökset ja pohdinta

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää SKF Recond Oil Box öljynsuodatuslaitteiston toimintaa tutkimalla öljynkuntoanturien käyttöä laitteistossa. Tehtävänä oli suunnitella ja toteuttaa laitteiston kokeellinen anturointi erilaisilla öljynkuntoantureilla, sekä kerätä talteen anturidataa öljyn puhdistumisesta suodatustestin aikana. Vaikka kaikista laitteistoon asennetuista antureista ei saatuakaan luotettavia tuloksia, työn tuloksena saatiin silti kerättyä paljon anturidataa ja sen myötä uutta tietoa erilaisten öljynkuntoanturien toiminnasta kyseisessä käyttökohteessa sekä jatkokehitysideoita, joten työ on mielestäni kokonaisuudessaan onnistunut.

Opinnäytetyön aihealue oli minulle suurelta osin aikaisemmin tuntematon ja siksi haastava. Opinnäytetyön aikana aikaa kului paljon erilaisten anturien kommunikaatiöväylien, mittaustekniikoiden ja tuloksien ymmärtämiseen. Työn aihealueen laajuus tuotti minulle haasteita, jonka takia työ ei valmistunut suunnitellussa aikataulussa. Työn viivästymiseen vaikutti lisäksi myös muut samanaikaisesti suoritettavat opinnot, sekä palkkatöissä käyminen. Jälkikäteen ajateltuna työn aihealuetta olisi voinut rajata tarkemmin esimerkiksi koskemaan vain anturien mittaustulosten analysointia. Aihe oli mielestäni kuitenkin kokonaisuudessaan erittäin mielenkiintoinen ja opettavainen. Aikaisemmasta automaatioasentajan kokemuksestani oli myös paljon hyötyä anturien tiedonkeruujärjestelmän rakentamisessa. Lisäksi sain yrityksen sisältä ja yhteistyökumppaneilta paljon hyödyllistä tietoa ja apua etenkin anturien konfigurointiin ja kenttäväyläteknikkaan liittyen, mistä suuret kiitokset kaikille työssä auttaneille henkilöille.

Työssä saatuja mittaustuloksia tarkasteltaessa kävi ilmi, ettei yksikään öljyn sähköisiä ominaisuuksia mittaavista öljynkuntoantureista pystynyt havaitsemaan öljyn kunnossa mitään selkeää muutosta suodatustestien aikana, vaikka öljyn väri ja hiukkaspitoisuus muuttuivat merkittävästi suodatuksen jälkeen. Tämä luultavasti kuitenkin johtuu siitä, että suodatettavana ollut öljy oli lähtötasoltaan kemiallisesti vielä hyvässä kunnossa, eikä se ollut esimerkiksi hapettunutta, jolloin öljyn kunto ei muuttunut tältä osin merkittävästi suodatuksen aikana. Laboratorion pullonäytteille tekemä öljynkuntoanalyysi tukee myös tätä teoriaa. Laboratorion mittaamassa öljyn TAN-arvossa tapahtui pieni muutos aivan suodatuksen loppuvaiheilla, mutta muutos on todennäköisesti vielä niin pieni, ettei öljynkuntoanturi pystynyt havaitsemaan sitä. Öljynkuntoanturille tehty lisätesti vahvisti, että anturi toimii oikein, mikäli esimerkiksi puhtaan öljyn sekaan sekoitetaan hapettunutta öljyä. Testissä olleita öljynkuntoantureita tulisikin siksi mielestäni testata lisää lähtötasoltaan kemiallisesti huonompikuntoisilla öljyillä, jolloin suodatuksen aikana nähtäisiin todennäköisesti suurempi muutos anturien ilmoittamassa öljyn kunnan arvossa.

Öljyn puhdistuminen näkyi on-line hiukkaslaskurin mittaustuloksissa selkeänä hiukasmäärän laskuna suodatuksen edetessä, ja mittaustuloksista muodostetun trendiviivan perusteella on myös mahdollista arvioida milloin öljy alkaa olla riittävän puhdasta, jotta siitä kannattaa ottaa pullo-näyte. Tämän tiedon perusteella voidaan välttyä turhien pullonäytteiden ottamiselta, jolloin säästetään aikaa ja rahaa. Saatujen tulosten perusteella voisi päätellä, että mikäli suodatettava öljy on likaantunut kulumishiukkasista, mutta kemiallisesti vielä hyvässä kunnossa (ei hapettunutta), niin öljyn laadun paranemista ei voida havaita pelkästään sähköisten mittausten, kuten dielektrisyysvakion tai johtavuuden perusteella, vaan järjestelmässä tulisi olla myös hiukkaslaskuri. Aihe vaatii kuitenkin lisää tutkimista erilaisilla öljyillä ja antureilla, jotta voidaan pois sulkea käytetyn öljyn vaikutus eri anturien tuloksiin.

Lähteet

Argo-Hytos Oil Condition Sensors. N.d. Anturin käyttöohje Argo-Hytos sivustolla. Viitattu 14.1.2024. https://www.argo-hytos.com/fileadmin/user_upload/Manual_V1.07.16_Lub-Cos_Vis_EN.pdf

Carey, A. & Hayzen, A. 2001. Dielectric Constant and Oil Analysis. Artikkele Machinery Lubrication sivustolla. Viitattu 19.11.2023. <https://www.machinerylubrication.com/Read/226/dielectric-constant-oil-analysis>

Gayraud, F. & Milpied, J. 2020. Engine oil condition monitoring with FPS2800 oil property sensor. White paper julkaisu TE Connectivity sivustolla. Viitattu 10.10.2023. <https://www.te.com/content/dam/te-com/documents/sensors/global/fps2800-white-paper.pdf>

History timeline. N.d. Yritysesittely SKF.com sivustolla. Viitattu 10.10.2023. <https://www.skf.com/fi/organisation/about-skf/history-timeline>

Kananen, J. 2015. Kehittämistutkimuksen kirjoittamisen käytännön opas. Miten kirjoitan kehittämistutkimuksen vaihe vaiheelta. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Jyväskylän ammattikorkeakoulun julkaisuja -sarja. Viitattu 24.11.2023.

Kunnossapito menestystekijä, Voiteluhuolto-voiteluaineet. N.d. Opetushallituksen oppimateriaalit. Viitattu 19.3.2024. http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_e01_voiteluaineet_perusteet.html

Lubrication basics 2017. Artikkele Machinery lubrication sivustolla. Viitattu 19.3.2024. <https://www.machinerylubrication.com/Read/24100/lubrication-basics>

Lubricant Additives - A Practical Guide 2015. Artikkele Machinery lubrication sivustolla. Viitattu 19.3.2024. <https://www.machinerylubrication.com/Read/31107/oil-lubricant-additives>

Mitä öljyssä tulee seurata. 2014. Artikkele Promaintlehden sivustolla. Viitattu 27.10.2023. <https://promaintlehti.fi/Kunnonvalvonta-ja-kayttovarmuus/Mita-oljyssa-tulee-seurata>

Michael Lindner. Oil Condition Monitoring Using Electrical Conductivity 2013. Artikkele Machinery lubrication sivustolla. Viitattu 19.3.2024. <https://www.machinerylubrication.com/Read/29407/oil-condition-monitoring>

Mauntz, M., Kuipers, U., & Peuser, J. 2015. Advances in oil condition monitoring permits preventive maintenance before damage occurs assuring asset protection and achieving theoretical component lifetimes. EDP Sciences. Viitattu 19.3.2024. https://www.researchgate.net/publication/301450573_Advances_in_oil_condition_monitoring_permits_preventive_maintenance_before_damage_occurs_assuring_asset_protection_and_achieving_theoretical_component_lifetimes

OQsx-G2. N.d. Tuote-esittely Tandeltasystems.com sivustolla. Viitattu 20.10.2023. <https://www.tandeltasystems.com/products/oqsx-g2/>

Reporting fluid-cleanliness: explanation of ISO-4406:99. 2014. Artikkele High Purity Northwest INC sivustolla. Viitattu 20.10.2023. <https://highpuritynorthwest.com/reporting-fluid-cleanliness-explanation-iso-440699/>

SKF RecondOil. N.d. Tuote-esittely SKF.com sivustolla. Viitattu 10.10.2023. <https://www.skf.com/group/services/recondoil>

The methods of optical particle counting – light extinction and light scattering. 2020. Artikkele Pamas.de sivustolla. Viitattu 20.10.2023. <https://blog.pamas.de/en/the-methods-of-optical-particle-counting-light-extinction-and-light-scattering/>

The Lowdown on Oil Breakdown 2003. Artikkele Machinery lubrication sivustolla. Viitattu 19.3.2024. <https://www.machinerylubrication.com/Read/475/oil-breakdown>

Guide to Measuring TAN and TBN in Oil 2017. White paper julkaisu Spectro Scientific sivustolla. Viitattu 19.3.2024. <https://www.spectrosci.com/knowledge-center/resource-library/lubrication-analysis>

Guide to Measuring Water in Oil 2017. White paper julkaisu Spectro Scientific sivustolla. Viitattu 10.4.2024. <https://www.spectrosci.com/knowledge-center/resource-library/lubrication-analysis>

Understanding oil dielectricity. N.d. Artikkele Machinery Lubrication sivustolla. Viitattu 20.10.2023. <https://www.machinerylubrication.com/Read/31408/understanding-oil-dielectricity>

Understanding ISO-Codes. 2017. Artikkele Precision Filtration Products sivustolla. Viitattu 20.10.2023. <https://www.precisionfiltration.com/product/iso-4406-cleanliness-codes/understanding-iso-codes/>

Understanding the viscosity index of a lubricant. 2020. Artikkele Q8 Oils sivustolla. Viitattu 14.1.2024. <https://www.q8oils.com/energy/viscosity-index/>

Jiroutek, S. N.d. Understanding water activity (aw). Artikkele Väisälän sivustolla. Viitattu 10.4.2024 <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/UnderstandingWaterActivity.pdf>

Vanhentumistuotteet öljyssä – eli ruskea pinnoite avatun koneikon pinnoilla. 2017. Artikkele Fluidintelligence sivustolla. Viitattu 14.1.2024. <https://fi.fluidintelligence.fi/news/2017/11/6/lijyn-vanhentuminen>

Voitelujärjestelmät. N.d. Tuote-esittely SKF.com sivustolla. Viitattu 10.10.2023. <https://www.skf.com/fi/products/lubrication-management/voitelujarjestelmat>

Zhu, J., He, D., & Bechhoefer, E. 2013. Survey of Lubrication Oil Condition Monitoring, Diagnostics, and Prognostics Techniques and Systems. Illinois, Chicago, USA: Journal of Chemical Science and Technology. Viitattu 19.3.2024. https://www.researchgate.net/publication/273945596_Survey_of_lubrication_oil_condition_monitoring_diagnostics_prognostics_techniques_and_systems

Öljyn kunnossapito. Öljyn kunnossapidon uudet menetelmät ja haasteet sekä koneiden ja laitteiden ennakoiva kunnossapito öljyn avulla. Kunnossapidon julkaisusarja n:o 18. Helsinki. Promaint Oy. Viitattu 27.10.2023.

Öljyanalyysi ja öljyn kunnonvalvonta. N.d. Artikkele YTM sivustolla. Viitattu 27.10.2023. <https://www.ytm.fi/oljyanalyysi-ja-oljyn-kunnonvalvonta/>

Liitteet

Liite 1. Anturin öljynkuntoarvon konversiotaulukko

Oil Condition Conversion Chart

Oil condition is output as a Loss Factor Percentage and the output is linearly scaled between -20% (4mA) and +60% (20mA). The Loss Factor Percentage can easily be converted to the OQI scale using the following table.

4-20mA	Loss Factor	TDN	Alarm Setting
<4			
4 mA	-20.0 %	1200 TDN	
	-19.0 %	1200 TDN	
	-18.0 %	1200 TDN	
	-17.0 %	1200 TDN	
	-16.0 %	1200 TDN	
5 mA	-15.0 %	1200 TDN	
	-14.0 %	1180 TDN	
	-13.0 %	1160 TDN	
	-12.0 %	1140 TDN	High Alarm
	-11.0 %	1120 TDN	
6 mA	-10.0 %	1100 TDN	
	-09.0 %	1080 TDN	
	-08.0 %	1060 TDN	High Warning
7 mA	-07.0 %	1040 TDN	
	-06.0 %	1020 TDN	
	-05.0 %	1000 TDN	
	-04.0 %	0980 TDN	
	-03.0 %	0960 TDN	
8 mA	-02.0 %	0940 TDN	
	-01.0 %	0920 TDN	
	000.0 %	0900 TDN	
	001.0 %	0880 TDN	
	002.0 %	0860 TDN	
9 mA	003.0 %	0840 TDN	
	004.0 %	0820 TDN	
	005.0 %	0800 TDN	
	006.0 %	0780 TDN	
	007.0 %	0760 TDN	
10 mA	008.0 %	0740 TDN	
	009.0 %	0720 TDN	
	010.0 %	0700 TDN	
	011.0 %	0680 TDN	
	012.0 %	0660 TDN	
11 mA	013.0 %	0640 TDN	
	014.0 %	0620 TDN	
	015.0 %	0600 TDN	
	016.0 %	0580 TDN	
	017.0 %	0560 TDN	
11 mA	018.0 %	0540 TDN	
	019.0 %	0520 TDN	

4-20mA	Loss Factor	TDN	Alarm Setting
12 mA	020.0 %	0500 TDN	
	021.0 %	0480 TDN	
	022.0 %	0460 TDN	
	023.0 %	0440 TDN	
	024.0 %	0420 TDN	Low Alarm
13 mA	025.0 %	0400 TDN	
	026.0 %	0380 TDN	
	027.0 %	0360 TDN	
	028.0 %	0340 TDN	
	029.0 %	0320 TDN	Low Warning
14 mA	030.0 %	0300 TDN	
	031.0 %	0280 TDN	
	032.0 %	0260 TDN	
15 mA	033.0 %	0240 TDN	
	034.0 %	0220 TDN	
	035.0 %	0200 TDN	
	036.0 %	0180 TDN	
	037.0 %	0160 TDN	
16 mA	038.0 %	0140 TDN	
	039.0 %	0120 TDN	
	040.0 %	0100 TDN	
	041.0 %	0080 TDN	
	042.0 %	0060 TDN	
17 mA	043.0 %	0040 TDN	
	044.0 %	0020 TDN	
	045.0 %	0000 TDN	
	046.0 %	0000 TDN	
	047.0 %	0000 TDN	
18 mA	048.0 %	0000 TDN	
	049.0 %	0000 TDN	
	050.0 %	0000 TDN	
	051.0 %	0000 TDN	
	052.0 %	0000 TDN	
19 mA	053.0 %	0000 TDN	
	054.0 %	0000 TDN	
	055.0 %	0000 TDN	
	056.0 %	0000 TDN	
	057.0 %	0000 TDN	
19 mA	058.0 %	0000 TDN	
	059.0 %	0000 TDN	
	060.0 %	0000 TDN	

Number Ranges	Upper	Lower	Granularity
Loss Factor	060.0	-20.0	0.1
TDN	1200	0000	10

Number Format

Loss Factor = Always 4 characters (including -) to 1

TDN = Always 4 digits

Conversion

4-20mA to Loss Factor = $(\text{mA} - 4) * 5 - 20$

4-20mA to TDN = $(\text{mA} - 17) * -100$

Liite 2. Öljynkuntoraportti



REPORT

1(3)

SAMPLE

Department / Project:
 System ID: Sample 1
 System (machine): Industrial transmission - starting point
 Sampling method: From ROBX sampling point
 Sampling date: 18.8.2023
 Sampled by:
 Oil: Teboil Sypres 220
 Usage time of oil:
 Usage time of system:
 Filters:

Oil condition

System wear

Cleanliness

COMMENTS AND DIAGNOSES

Oil condition: Oil zinc content is elevated, other measured values were normal. MPC-value was very high, which indicates highly increased risk of deposit formation. Sample left high amount of insoluble substance on the filtering membrane, which prevented particle counting with optical microscope.

Wear: Iron content slightly elevated, other wear metal levels are low and there were no signs of accelerated or abnormal wear.

Cleanliness: Oil water content is at good low level. Oil particle cleanliness is very poor. Reported automatic particle counter result is only indicative and most likely too low due to coincidence error (particle counter resolution is too low for high particle count samples).

RESULTS

Sampling date 18.8.2023

Laboratory number

OIL CONDITION

Appearance of oil - clear, brown

Color index -

Viscosity +40 °C cSt 203,83

+100 °C cSt 23,56

Viscosity index - 143

Oxidation of oil Memb. color - dark brown

IR A / cm 1

Acid number TAN mgKOH / g 0,53

Additives ppm

Calcium 5

Magnesium 2

Boron 7

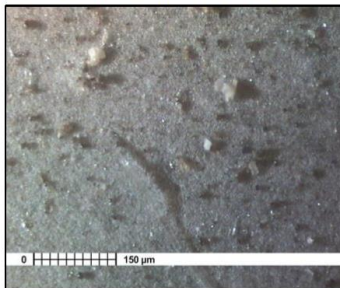
Zinc 45

Phosphorus 347

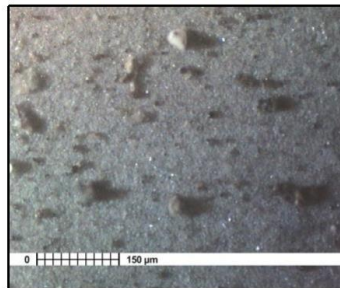
Barium 0

Sulfur 4424

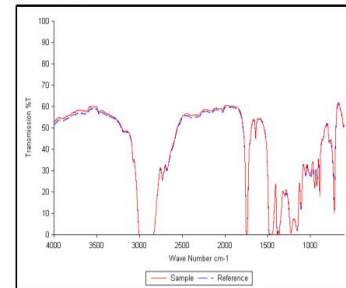
Microscope photo 1: (filtered 50 mL)



Microscope photo 2: (filtered 50 mL)



FTIR-spectrum:





REPORT

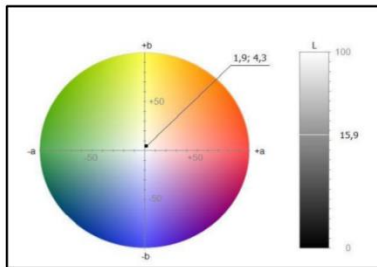
8.9.2023

2(3)

RESULTS			
Sampling date		18.8.2023	
Laboratory number			
WEAR METALS AND OIL CLEANLINESS			
Wear metals	ppm		
Iron		39	
Chrome		0	
Tin		0	
Aluminum		0	
Nickel		0	
Copper		1	
Lead		0	
Molybdenum		0	
Manganese		0	
Titanium			
Antimony			
Vanadium			
Tungsten			
PQ index	-	OK	
Contaminants	ppm		
Silicon		3	
Potassium		0	
Sodium		1	
Lithium		2	
Cadmium			
Chlorine			
Water content	ppm	10	
Cleanliness class	ISO4406 NAS1638	23/22/19	
Particle counting (A=autom., M=microsc.)		A	
ISO4406:1999	ISO4406 kpl / 100mL		
> 4 µm	(> 2 µm)	5117080	
> 6 µm	(> 5 µm)	2521335	
> 10 µm	(> 10 µm)	766205	
> 14 µm	(> 15 µm)	313885	
> 21 µm	(> 20 µm)	78170	
> 25 µm	(> 25 µm)	34365	
> 38 µm	(> 50 µm)	3285	
> 70 µm	(> 100 µm)	180	
Visual particle identification (> 5 µm) %			
Bright metal			
Yellow metal			
Black metal			
Rust			
Silica and other dust			
Polymers			
Fibers			
Rest			
OIL PERFORMANCE			
Air release time,	+50 °C	min	
Foaming tendency I,	+24 °C	mL / mL	
Foaming tendency II,	+93,5 °C	mL / mL	
Foaming tendency III,	+24 °C	mL / mL	
Water separability (steam)		s	
Oxidation stability test		min	

TULOKSET						
Näytteenottopäivä		18.8.2023				
Laboratorionumero						
MPC-test	-	85,30				
- Luminance	L	15,90				
- Redness index	a	1,90				
- Yellowness index	b	4,30				
- Gravimetric analysis	mg/kg	392,1				

MPC-test graph



MPC-test membrane

