

HYDRAULIIKKAÖLJYN PARTIKKELIANALYYSINÄYT- TEEN ESIKÄSITTELY

Tenhomaa Joni

Konetekniikka
Insinööri (AMK)

2023

Konetekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Joni Tenhomaa	Vuosi	2023
Ohjaaja(t)	DI Petri Kesälahti		
Toimeksiantaja	Lapin AMK		
Työn nimi	Hydrauliikkaöljyn partikkelianalyysinäytteen esikäsittely		
Sivumäärä	52		

Opinnäytetyön aiheena oli selvittää, kuinka paljon hydrauliikkaöljyn partikkelianalyysinäytteen esikäsittelyllä on vaikutusta analyysinäytteen tarkkuuteen. Tavoitteena oli tutkia, kuinka paljon näytteen sekoittamisella, lämmittämällä sekä ultraäänikäsittelyllä on vaikutusta analyysin lopputuloksen tarkkuuteen.

Työ suoritettiin toimeksiantajan laboratoriotiloissa. Toimeksiantajalla oli valmiiksi laitteistot, jolla esikäsittelyt sekä analyysit saatiin suoritettua. Partikkelianalyysit suoritettiin PAMAS SBSS-laitteistolla ja tulokset esitettiin standardin ISO 4406:1999 mukaisesti.

Työ rajattiin siten, että esikäsittelyt ja mittaukset suoritettiin ainoastaan yhdelle hydrauliikkaöljy laadulle, mutta tuloksia voi soveltaa muillekin laaduille. Mittauksissa käytetty öljy oli puhdasta, suodattamatonta hydrauliikkaöljyä.

Tulokseksi saatiin kahdeksan eri näytteen analyysit ja niiden pohjalta tehty yhteenveto, josta selviää, että esikäsittelyllä on merkitystä partikkelianalyysinäytteen tarkkuuteen. Isoin merkitys oli näytteen sekoittamisella, jolla saatiin jopa kolminkertaistettua tietyn kokoisten epäpuhtauksien lukumäärä. Myös lämmittäminen sekä ultraäänikäsittely paransivat tuloksen tarkkuutta ja näin tietoa öljyn kunnosta.

Avainsanat hydrauliikka, hiukkaslaskenta, kunnonvalvonta, hydrauliikkaöljy, voiteluöljy

Mechanical Engineering
Bachelor of Engineering

Author	Joni Tenhoma	Year	2023
Supervisor(s)	Petri Kesälähti, M.Sc. (Tech.)		
Commissioned by	Lapland UAS		
Title	Pretreatment of hydraulic oil particle analysis sample		
Number of pages	52		

The topic of the thesis was to find out, how much the pretreatment of hydraulic oil particle analysis sample, affects the accuracy of the analysis sample. The goal was to find out how big an effect mixing, heating and ultrasonic treatment of the sample have.

The work was done in the customer's laboratory premises, where the necessary equipment to perform it was also found. Particle analyses were performed with PAMAS SBSS equipment, and the results were presented according to ISO 4406.

The pretreatments and analyses of the work were done for only one hydraulic oil quality, but the results can be applied to other qualities as well. Analyses were performed with pure, unfiltered hydraulic oil.

The result of the work is the analyses of eight different samples and a summary based on the results. Mixing the sample had the greatest significance, which even tripled the amount of an impurities of a given size. Heating and ultrasound also gave good results.

Key words

hydraulics, particle counting, condition monitoring, hydraulic oil, lubricating oil

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
2	HYDRAULIIKKA	9
2.1	Hydrostatiikka	10
2.2	Hydrodynamiikka	11
2.3	Viskositeetti.....	12
2.4	Virtaustyypit	13
3	HYDRAULINESTE.....	16
3.1	Nestelajit	16
3.2	Mineraaliöljyt.....	17
3.3	Vesi & elintarviketeollisuuden nesteet	19
3.4	Vaikeasti syttyvät nesteet	19
3.5	Biologisesti nopeasti hajoavat nesteet.....	20
4	ÖLJYJEN PUHTAUS JA KUNNONVALVONTA	22
4.1	Öljyn kunnonvalvonta.....	22
4.2	Kiinteät epäpuhtaudet.....	23
4.3	Epäpuhtauksien mittaaminen.....	24
4.4	Hiukkaslaskenta.....	25
4.5	Näytteenotto	27
5	PUHTAUSLUOKAT	29
5.1	Hiukkasmäärät.....	30
5.2	ISO 4406:1999.....	31
5.3	NAS 1638	33
5.4	SAE AS 4059.....	34
6	ÖLJYN ESIKÄSITTELY	35
6.1	Ultraääni	35
6.2	Lämmitys	36
6.3	Sekoitus.....	37
7	KÄYTETTÄVÄT LAITTEET.....	38
7.1	PAMAS SBSS.....	38
7.1.1	PAMAS PMA.....	39

7.1.2	PAMAS CMDM.....	41
7.2	Memmert un30m.....	42
7.3	GT Sonic.....	42
8	PARTIKKELIANALYYSIT	43
8.1	Näytteet 1–3	44
8.2	Näytteet 4–6	46
8.3	Näyte 7	47
8.4	Näyte 8	47
8.5	Yhteenveto.....	48
9	POHDINTA	50
	LÄHTEET.....	51

ALKUSANAT

Haluaisin kiittää Lapin ammattikorkeakoulua opinnäytetyön aiheesta sekä sen suoritukseen käytettävistä tiloista ja laitteista. Lisäksi haluaisin kiittää ohjaajaani lehtori Petri Kesälahtea tuesta ja avusta pitkin opinnäytetyöprosessia.

Kemissä 3.4.2023

Joni Tenhomaa

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

p	Paine [pa]
Q	Tilavuusvirta [m^3/s]
A	pinta-ala [m^2]
F	voima[N]
Re	Reynoldsin luku
ν	Kinemaattinen viskositeetti [m^2/s]
η	dynaaminen viskositeetti [$Pa*s$]
Re_{kr}	Kriittinen Reynoldsin luku
μm	mikrometri
Hz	Hertsi

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena on hydraulikkaöljyn partikkelianalyysinäytteen esikäsittelytapojen vaikutus analyysin tarkkuuteen. Työn tilaaja on Lapin AMK ja mittaukset suoritetaan Lapin AMKn tiloissa ja laitteistolla. Aiempaa tutkittua tietoa ei Lapin AMK:lla aiheesta ollut, joten tiedolle oli tarvetta. Opinnäytetyön myötä saatua tietoa voidaan käyttää hyödyksi esimerkiksi opetuksessa.

Partikkelianalyysit suoritetaan ainoastaan yhdelle hydraulikkaöljytyypille, mutta tuloksia voi soveltaa muihinkin öljyihin. Esikäsittelyt rajataan käytössä olevan laitteiston mukaan.

Työssä selvitetään, mikä olisi paras tapa esikäsittää partikkelianalyysinäytteitä, eli millä esikäsittelyllä saadaan öljyn kunnosta totuudenmukaisin kuva. Käytettäviä menetelmiä ovat sekoitus, lämmitys, ultraääni ja näiden yhdistelmät.

Partikkelianalyysillä selvitetään, kuinka paljon ja minkä kokoisia epäpuhtauksia tutkittavassa öljyssä on. Analyysejä käytetään öljyjen ja mekaanisten laitteiden kunnonvalvonnassa.

Öljyn kunnonvalvonnalla on suuri merkitys hydraulikassa. On arvioitu että 70–80 % kaikista hydraulijärjestelmien häiriöistä, johtuu nesteen epäpuhtauksista. Öljyille on standardein määrätyt puhtausluokat, jotka vaihtelevat riippuen järjestelmän tyypistä ja komponenteista.

2 HYDRAULIIKKA

Hydraulijärjestelmässä toimintaperiaatteena on, että mekaaninen energia muutetaan hydrauliseksi tehoksi ja tämän jälkeen halutussa hydraulisessa toimilaitteessa takaisin mekaaniseksi energiaksi. Tehon siirto voi tapahtua joko hydrostaattisten tai hydrodynaamisten mekanismien avulla. Tehon välitykseen käytetään nestettä, johon teho sidotaan paineena ja tilavuusvirtana. (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 1.)

Paine [p] ja tilavuusvirta [Q] ovat tärkeitä järjestelmäsuureita hydrauliiikassa ja ne riippuvat paljolti sovelluskohteesta, lisäksi toimintaympäristön lämpötila vaikuttaa komponentteihin, materiaaleihin sekä väliaineen valintaan (Taulukko 1). Taulukossa 1 on lista erilaisista kohteista ja niihin tyypillisistä paineista ja lämpötiloista.

Taulukko 1. Tyypillisiä painetasoja ja toimintaympäristön lämpötiloja (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 3).

Sovellusala	p _{max} [bar]	Q _{am} [°C]
Teatterit	160	+18 -> +30
Työstökoneet	200	+18 -> +40
Terästehtaat	220	-40 -> +60
Autot	250	-40 -> +60
Voimalaitokset	250	-10 -> +60
Maa- ja metsätalouskalusto	250	-40 -> +50
Lentokoneet	280	-65 -> +60
Maansiirtokalusto	315	-40 -> +60
Laivat	315	-60 -> +60
Valssaamot ja valimot	315	+10 -> +150
Puristimet	630	+18 -> +40
Kaivosteollisuus	1000	-40 -> +60
Simulointi- ja koestuslaitteet	1000	+18 -> +150

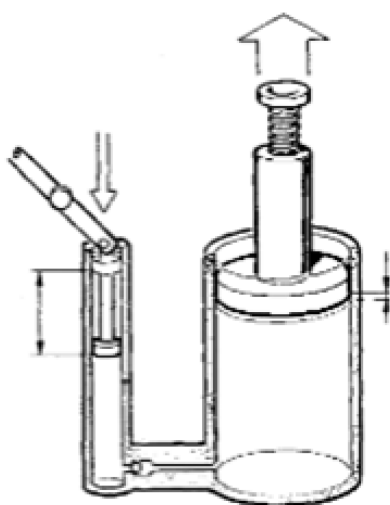
Hydrauliset järjestelmät ovat yleisesti etenkin teollisuudessa käytössä, koska niiden avulla on helppo toteuttaa niin suoraviivainen kuin pyörivä liike. Liikenopeudet, voimat ja momentit ovat helposti ja portaattomasti säädettävissä. Huonojakin puoliakin löytyy, esimerkiksi kohtalainen hyötysuhde sekä tehonsiirrossa käytetystä väliaineesta eli hydraulinesteestä riippuvat huonot ominaisuudet.

Hydraulinesteet ovat ominaisuuksiltaan lämpötilasta riippuvaisia, lievästi kokoonpuristuvia ja likaavia, lisäksi valtaosa nesteistä on palavia. Hydraulinesteellä onkin suuri merkitys hydraulikassa ja järjestelmän toiminnan kannalta, nesteen olisi syytä olla mahdollisimman puhdasta ja ominaisuuksiltaan stabiili. (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 2–3.)

Hydrauliikka on tärkeä osa nykypäivän teollisuuden sekä laitteiden mekanisointia ja automatisointia. Järjestelmiä käytetään monilla toimialoilla, kuten maatalouden työkoneissa, raskaassa liikenteessä, teollisuuden koneissa, tuotantolinjoissa sekä jokapäiväisissä arkielämän laitteissa kuten pahvipuristimessa. (Foselius 1993, 1.)

2.1 Hydrostatiikka

Hydrostatiikan perusidea on, että energia siirtyy nesteen paine- ja potentiaalienergian välityksellä. Oletuksena pidetään, että neste on kitkatonta, kokoonpuristumatonta sekä massatonta. Tällaisella ideaali nesteellä ei siis ole sisäistä kitkaa eli viskositeettia. Neste käyttäytyy kuin kiinteä aine, jolloin ainut siihen suuntautuva voima on puristavaa kuormitusta (Kuvio 1), jota hydraulikassa kutsutaan paineeksi (p). Paine vaikuttaa aina kohtisuorasti pintaelementtiä vastaan, ja näin ollen se vaikuttaa yhtä suurena kaikkiin suuntiin riippumatta kohteen muodosta. (Keinänen & Kärkkäinen 1997, 100–101.)



Kuvio 1. Hydrostaattinen tehonsiirto (Keinänen & Kärkkäinen 1997, 100)

Hydrostaatiikan peruslaki on Pascalin määritelmä: "Voiman vaikutus levossa olevaan nesteeseen leviää tasaisesti kaikkiin suuntiin nesteen sisällä. Vallitsevan paineen suuruus nesteessä riippuu vaikuttavasta voimasta ja sen vaikutuspinta-alasta. Paine vaikuttaa kohtisuoraan säiliön seinämiä vasten". (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 13.)

$$p = \frac{F}{A} \quad (1)$$

missä

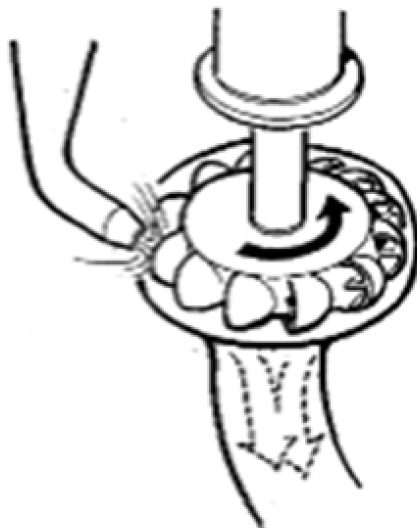
p on paine [N/m^2]

F on voima [N]

A on pinta-ala [m^2]

2.2 Hydrodynamiikka

Hydrodynamiikassa tarkastellaan nesteen liikettä eli virtausta (Kuvio 2) ja tällöin otetaan huomioon massa, kitka ja kokoonpuristuvuus. Virtauksessa kokonaispaine muuttuu järjestelmän eri osissa, vaikka paine leviää kuten levossa olevassa nesteessä. Tämän saavat aikaan nesteen liike, kitka ja tiheys. (Keinänen & Kärkkäinen 1997, 100.)



Kuvio 2. Hydrodynaaminen tehonsiirto (Keinänen & Kärkkäinen 1997, 100)

Tilavuusvirta Q on hyvin keskeinen asia hydrodynamiikassa. Tilavuusvirta tarkoittaa virranneen nestemäärän tilavuutta ja sen SI-järjestelmän yksikkö on kuutiometriä sekunnissa (m^3/s).

$$Q = A * v \quad (2)$$

Missä,

Q on tilavuusvirta [m^3/s]

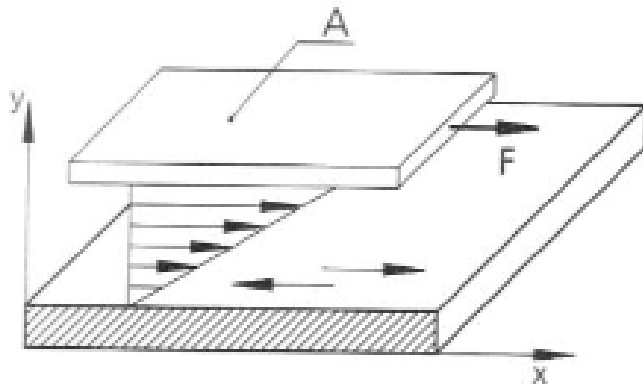
A on Putken poikkipinta-ala [m^2]

v on virtausnopeus [m/s]. (Keinänen & Kärkkäinen 1997, 103.)

2.3 Viskositeetti

Nesteen sisäinen kitka eli viskositeetti syntyy, kun neste virtaa ja nestepartikkelien väliset kitkat vastustavat virtauksesta aiheutuvaa nesteen muodonmuutosta. Viskositeetin arvoon vaikuttavat nesteen ominaisuudet paine ja lämpötila. Paineen kasvaessa nesteen viskositeetti suurenee ja lämpötilan noustessa se pienenee, lämpötilalla on suurempi vaikutus viskositeettiin kuin paineella. (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 23–25.)

Nesteen virratessa kiinteiden kappaleiden ohi syntyy rajapintaa ulkoista kitkaa. Tämä aiheuttaa adheesiovoimia, joiden vaikutuksesta virtaus kiinnittyy kappaleen seinämään. Jonka seurauksena seinämän viereisen nestekerroksen ja seinämän nopeus ovat sama. Tästä seuraa nesteen nopeusjakauma, jonka viskositeetti aiheuttaa (Kuvio 3). (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 23.)



Kuvio 3. (Nesteen nopeusero liikkuvien pintojen välissä (Keinänen & Kärkkäinen 1997, 106)

Kuviossa 3 nestekerrosten välinen sisäinen kitka aiheuttaa leikkausvoiman, jonka johdosta tarvitaan yhtä suuri voima [F], jotta levy liikkuisi.

$$F = \eta * A \frac{v}{y} \quad (3)$$

missä

F on Voima [N]

η on dynaaminen viskositeetti [Pa*s]

A on kosketus pinta-ala [m²]

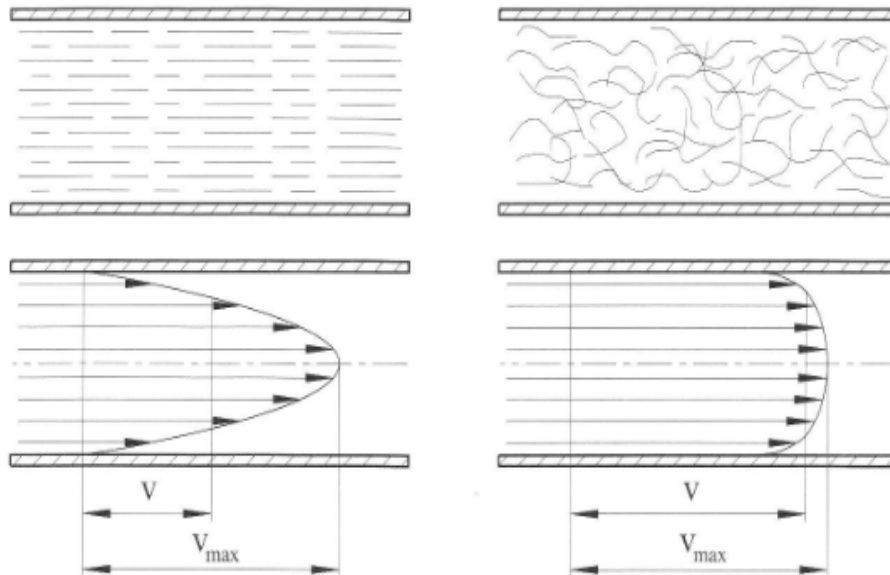
v on Levyn nopeus [m/s]

y on nestekerroksen paksuus [m]. (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 23–24.)

2.4 Virtaustyytit

Nesteen virtaus voi olla laminaarista tai turbulanttista (Kuvio 4). Kuviossa vasemalla näkyy laminaarinen virtaus, jossa neste virtaa yhdensuuntaisesti. Oikealla

kuviassa on turbulenttinen virtaus, jossa näkyy pyörteilyilmiö eli nesteosaset liikkuvat vapaasti noudattamatta tarkkoja ratoja. (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 28–29.)



Kuvio 4. Laminaarinen ja turbulenttinen virtaus (Keinänen & Kärkkäinen 1997, 108)

Virtaustyyppillä on virtaushäviöiden takia suuri merkitys, sillä virtaushäviöt kasvavat lineaarisesti virtausnopeuden funktiona, kun virtaus on laminaarista. Turbulenttisessa virtauksessa virtaushäviöt kasvavat eksponentiaalisesti, eli nopeammin kuin laminaarisessa. Virtaustyyppi voidaan selvittää laskennallisesti käyttäen Reynoldsin lukua [Re] joka on laaduton.

$$Re = \frac{v \cdot Dh}{\nu} \quad (4)$$

missä

Re on Reynoldsin luku

v on virtausnopeus [m/s]

Dh on hydraulinen halkaisija [m]

ν on kinemaattinen viskositeetti [m²/s].

Laskennallista saatua Re – lukua verrataan kokeellisesti saatuun kriittiseen Reynoldsin lukuun Re_{kr} . Vertaamalla näitä lukuja keskenään saadaan kuva, onko virtaus laminaarista vai turbulenttista.

Kun $Re < Re_{kr}$ on virtaus laminaarista ja jos $Re > Re_{kr}$ on virtaus turbulenttinen. Kriittisen Reynoldsin luvun arvo riippuu paljolti virtauskanavan ja -aukon ominaisuuksista (Taulukko 2). Taulukossa näkyy esimerkki ohjearvoja kriittisestä Reynoldsin luvusta. (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 28.)

Taulukko 2. Kriittisen Reynoldsin luvun ohjearvoja (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 29)

<i>Virtauskanava</i>	<i>Re Kriittinen</i>
Pyöreät sileäpintaiset putket	2000-2300
Keskiset sileäpintaiset raot	1100-1200
Epäkeskiset sileäpintaiset raot	1000-1050
Keskiset uurteitetut raot	700
Epäkeskiset uurteitetut raot	400
Karaventtiilien ohjausurat	250-275
Läppä- ja kartioistukkaventtiilit	25-100

Virtauksen tyyppi ei muutu nopeasti, vaan muutos vaatii siirtymäaluetta. Tällä alueella esiintyy molempia virtauksia ja laskennassa tämä alue oletetaan turbulenttiseksi. Virtauksen muutokseen vaikuttaa mm. virtausnopeus, halkaisijat ja aineen viskositeetti. Tärkein tekijä näistä on virtausnopeus. (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 29–30.)

3 HYDRAULINESTE

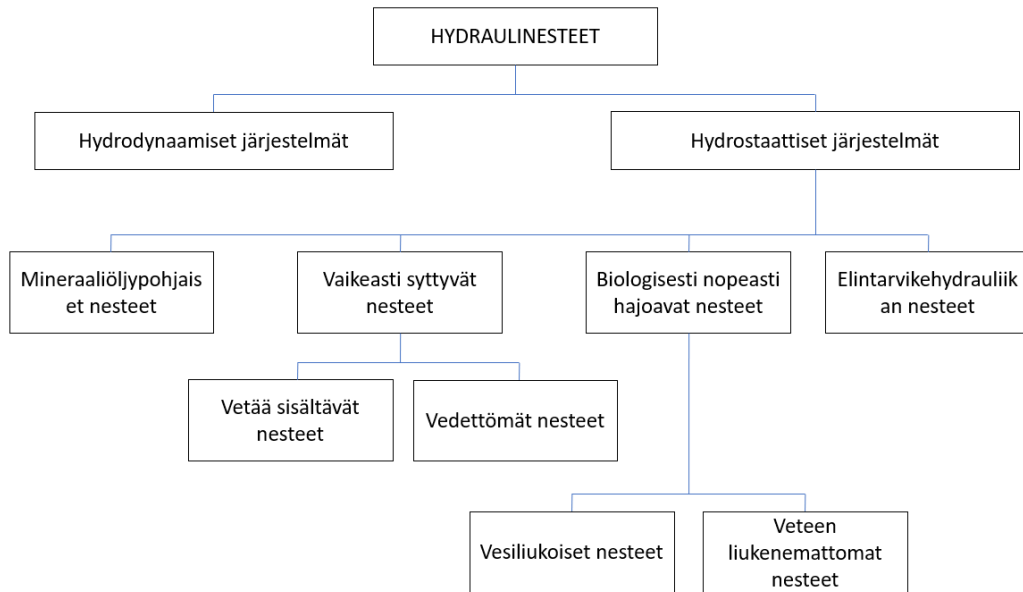
Nesteen tehtävä hydraulijärjestelmässä on ensisijaisesti välittää tehoa, tämän lisäksi neste voitelee ja jäähdyttää järjestelmää, suojaten samalla komponentteja ruostumiselta. Nestettä valittaessa on oltava tarkkana, ja yksi nesteen tärkeimmistä valintaan vaikuttavista ominaisuuksista on viskositeetti. Jotta saadaan mahdollisimman optimaalinen hyötysuhde, on viskositeetin oltava sopiva järjestelmään.

Liian suuri viskositeetti voi aiheuttaa esimerkiksi suuria kitkahäviöitä ja kavitaatiovaaran pumpun imupuolella, lisäksi tämä voi vaikuttaa negatiivisesti komponenttien voiteluun. Jos taas viskositeetti on liian pieni, voivat vuotohäviöt kasvaa, järjestelmä kulua tai järjestelmän lämpötila nousta liikaa. (Keinänen & Kärkkäinen 2000, 232.)

3.1 Nestelajit

Hydraulinesteet voidaan käyttökohteen mukaan jakaa hydrostaattisissa- ja hydrodynaamisissa järjestelmissä käytettäviin nesteisiin (Kuvio 5). Hydrodynaamisten järjestelmien osalta nesteet voidaan vielä jakaa kytkimissä, automaattivaihteistoissa sekä muuntimissa käytettäviin nesteisiin.

Hydrostaattisten järjestelmien osalta nesteet jaetaan vaikeasti syttyviin, mineraaliöljypohjaisiin, biologisesti hajoaviin ja elintarvikehydrauliikan nesteisiin. Jokaisella nesteellä on omat vahvuutensa ja käyttökohteensa. (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 114.)

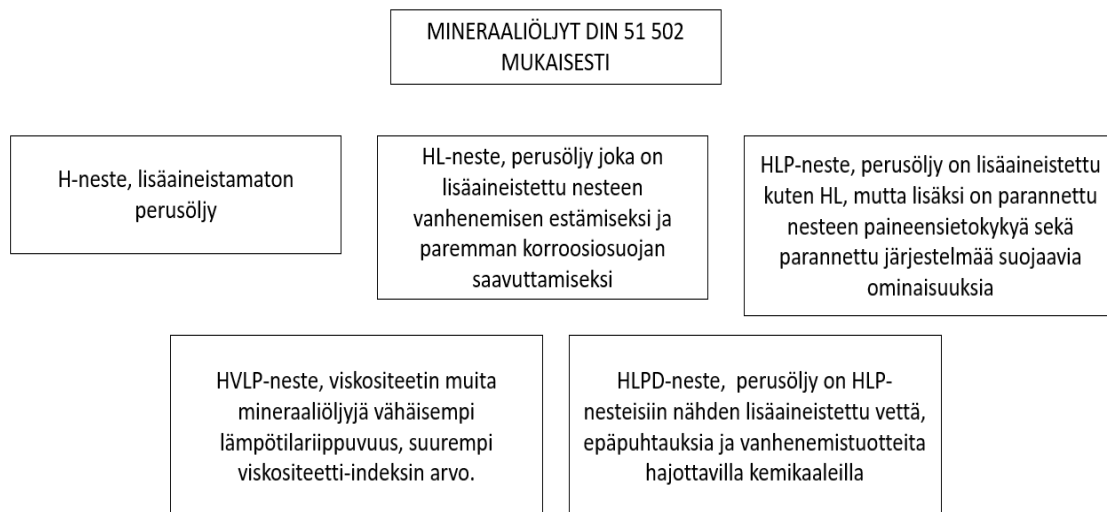


Kuvio 5. Hydraulinesteiden jako (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 115)

3.2 Mineraaliöljyt

Mineraaliöljy on yleisimmin käytetty neste hydraulijärjestelmissä. Mineraaliöljyt ovat raakaöljypohjaisia öljyjä, joiden jalostusaste ja kemiallinen rakenne vaihtelevat. Usein mineraaliöljyjä voidaan käyttää järjestelmissä sellaisenaan. Mutta tietyissä tilanteissa kun vaatimustasot kasvavat, on öljyn ominaisuuksia tehostettava lisäaineella. (Keinänen & Kärkkäinen 2000, 232–233.)

Mineraaliöljyn käyttö helpottaa järjestelmässä käytettävien materiaalien valintaa. Mineraaliöljyt eivät vahingoita yleisesti käytettyjä tiivisteitä tai metalleja. Öljyt luokitellaan DIN 51 502 (Kuvio 6) ja ISO 6743/4 standardien mukaisesti luokkiinsa. (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 115.)



Kuvio 6. Mineraaliöljyt DIN 51 502 mukaisesti (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 115–116)

H-nesteet ovat lisäaineettomia perusöljyjä, joita käytetään vain harvoin. HL-nesteitä suositellaan käytettävän järjestelmissä, joiden käyttöpaine on alle 20Mpa ja joissa järjestelmään voi päästä vettä ulkopuolelta, eikä öljyltä vaadita erityistä suojaa kulumista vastaan.

HLP-nesteet ovat HL ryhmään nähden enemmän lisäaineistetut, lisäaineella on parannettu nesteen paineenkestoa sekä järjestelmän voitelua. Yleisimmin käytössä olevat mineraaliöljypohjaiset nesteet kuuluva tähän ryhmään juuri hyvien ominaisuuksien takia. Käyttökohteita ovat esimerkiksi terästehtaat, ruiskuvalukoneet ja puristimet.

HVLP-nesteiden tärkein ominaisuus on viskositeetin vähäinen lämpötilariippuvuus, josta seuraa muita öljyjä suurempi viskositeetti-indeksin arvo. Vähäinen lämpötilariippuvuus saavutetaan joko lisäaineella tai laadukkaalla perusnesteellä. Muilta ominaisuuksilta HVLP-nesteet vastaavat HLP-nesteitä.

HLPD-nesteissä perusöljy on lisäaineistettu vettä, epäpuhtauksia ja nesteen vanhenemistuotteita hajottavilla kemikaaleilla. Tarkoituksena on estää epäpuhtauksien kertyminen komponentteihin, mikä voisi johtaa toimintahäiriöön tai vaurioitumiseen. Muilta ominaisuuksilta HLPD-nesteet vastaavat HLP-nesteitä. (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 115–116.)

3.3 Vesi & elintarviketeollisuuden nesteet

Vesi on kaikista hydraulinesteistä yksinkertaisin ja halvin, sen hyviä puolia ovat pieni lämpötilariippuvuus, paloturvallisuus ja ympäristöystävällisyys. Vesi on kuitenkin ongelmallinen, kun se pääsee kosketuksiin metalliosien kanssa koska vedellä on taipumusta aiheuttaa hapettumista, korroosiota ja ruostumista. Tästä syystä vesihydrauliikassa komponenttien materiaalina suositaan ruostumatonta tai haponkestävää terästä, messinkiä, keramiikkaa tai muovia.

Pienen viskositeetin ansiosta vesi aiheuttaa vuotamisongelmia eikä se voitele järjestelmää. Vesihydrauliikassa on käytettävä pienempiä välyksiä komponenteissa kuin esimerkiksi mineraaliöljyjen kanssa. Käyttökohteita vesihydrauliikalle on esimerkiksi elintarviketeollisuudessa juuri sen puhtauden vuoksi. (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 119.)

Elintarviketeollisuudessa käytettävät hydraulinesteet jaetaan niiden perusnesteiden sekä käytettävien lisäaineiden perusteella ryhmiin H1 ja H2. Perusnesteinä käytetään yleensä valkoöljy-, polyglykoli- ja polyalfaolefiinilajeja. H1-nesteitä käytetään yleisesti järjestelmissä, joissa nesteen ja elintarvikkeiden kosketusta ei voida täysin välttää.

H2-nesteitä puolestaan käytetään järjestelmissä, joissa nesteen ja elintarvikkeiden kosketus on voitu täysin estää, näissä järjestelmissä voidaan käyttää tietyin rajoituksin myös normaaleja hydraulinesteitä. (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 119.)

3.4 Vaikeasti syttyvät nesteet

Vaikeasti syttyvät nesteet ovat yleensä veden ja muiden nesteiden muodostamia emulsioita. Nimensä mukaan ne ovat joko vaikeasti syttyviä tai täysin palamattomia. Yleisiä käyttökohteita ovat palo- ja räjähdysvaaralliset tilat.

Vaikeasti syttyvät nesteet luokitellaan standardeissa ISO 6743/4 ja DIN 51 502 ryhmiin HFA, HFB ja HFD. HFD-nesteet jaotellaan vielä alaryhmiin HFDU ja HFDR Nesteisiin. HFA-nesteet jaotellaan HFAE- sekä HFAS nesteisiin. (Kauranne, Kajaste ja Vilenius 2013, 116.)

3.5 Biologisesti nopeasti hajoavat nesteet

Biologisesti hajoavat nesteet ovat mineraaliöljyihin ja vaikeasti syttyviin nesteisiin verrattuna huomattavasti ympäristöystävällisempiä, suurimpana etuna näillä nesteillä onkin luonnollinen myrkyttömyys.

Tästä edusta hieman menetetään, koska nesteitä joudutaan välillä lisääineistämään, jotta saadaan parannettua heikkoja ominaisuuksia kuten esimerkiksi nesteen kylmäominaisuuksia. Lisäaineistus näillä nesteillä, on kuitenkin hyvin vähäistä verrattuna esimerkiksi mineraaliöljyihin.

Tribologisilta ominaisuuksilta biologisesti nopeasti hajoavat nesteet ovat usein hyvin lähellä mineraaliöljyjä. Erityisesti luonnollisiin kasviöljyihin perustuvien nesteiden viskositeetti riippuu mineraaliöljyä vähemmän paineesta tai lämpötilasta. Kasvipohjaisilla öljyillä on myös hyvät voiteluominaisuudet. Biologisesti nopeasti hajoavat nesteet luokitellaan ISO 15380 mukaisesti ryhmiin (Kuvio 7) HETG, HEES, HEPG ja HEPR. (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 118.)



Kuvio 7. Biologisesti nopeasti hajoavat nesteet ISO 15380 mukaisesti (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 118)

HETG-nesteet ovat luonnollisia veteen liukenemattomia kasviperäisiä estereitä, yleisemmin triglyseridejä, joiden lähteenä on yleensä rapsi, rypsi, nauris, aurin-gonkukka tai soija. Tyypillinen käyttölämpötila $-20\text{--}+70^{\circ}\text{C}$. Nesteen käyttöä korkeissa lämpötiloissa rajoittaa heikko terminen kestävyys sekä hapettumistaipumus. Käyttökohteita ovat esimerkiksi mobilehydrauliikka sekä hydrostaattiset järjestelmät yleisesti.

HEES-nesteet ovat synteettisiä veteen liukenemattomia estereitä, joista yleisimpiä ovat polyolefiiniesterit, dikarbonihappoesterit sekä kompleksiset esterit. Nesteillä on hyvä hapettumiskestävyys eivätkä ne yleensä reagoi hydrauliikassa käytettävien yleisempien materiaalien kanssa. Nesteillä on laaja käyttölämpötila-alue, $-35\text{--}+90^{\circ}\text{C}$ sekä niitä voidaan käyttää korkeissa paineissa. Käyttökohteita ovat esimerkiksi mobilehydrauliikka sekä hydrostaattiset järjestelmät.

HEPG-nesteet ovat veteen liukenevia polyglykolinesteitä. Vesiliukoisuuden hyöty tulee siitä, että ulkopuolelta tuleva vesi voi kasvattaa hydraulinesteen vesipitoisuuden suureksi, ilman että siitä on merkittävää haittaa. Käyttölämpötila-alue $-30\text{--}+90^{\circ}\text{C}$. Mahdollisia sovelluskohteita ovat esimerkiksi vesitalouden järjestelmät, patojen ja kanavien sulut sekä off-shore järjestelmät.

HEPR-nesteet ovat synteettisiä veteen liukenemattomia polyalfaolefiini- sekä hiilivetynesteitä, joiden käyttölämpötila-alue $-30\text{--}+80^{\circ}\text{C}$. Yleisempiä käyttökohteita ovat hydrostaattiset järjestelmät. (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 118.)

4 ÖLJYJEN PUHTAUS JA KUNNONVALVONTA

Voiteluaineen tehtävä on luoda voideltavan kohteen pintaan ohut kalvo, tyypillisesti 0,3–2 µm. Näin ohut kalvo on todella herkkä epäpuhtauksille, ja pienikin määrä epäpuhtauksia voi rikkoa kalvon ja alentaa näin kohteen elinikää ja käytövarmuutta.

Merkittävä tekijä voiteluaineen puhtauteen on ympäristö, jonka siisteyttä arvioimalla voi päätellä paljon aineen puhtaudesta. Kaikki epäpuhtaudet voiteluaineissa ovat haitallisia. Epäpuhtauksia voi olla kiinteitä, nestemäisiä tai kaasumaisia. (Malinen, Pulkkinen, Räty, Suontama, & Vuolle 2006, 114–115.)

4.1 Öljyn kunnonvalvonta

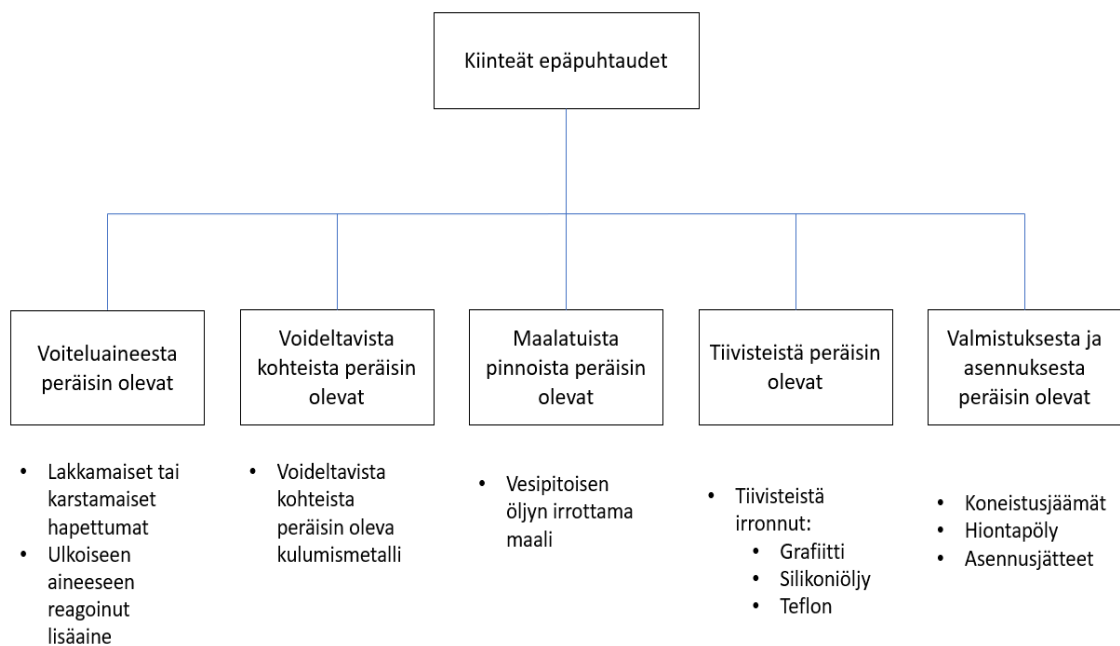
Öljyn kunnonvalvonnalla ja kunnossapidolla on iso merkitys tuotantolaitteiden käynnissäpidon ja tehokkaan toiminnan varmistamisessa. Öljyn kunnonvalvontaa voisi verrata ihmiselle suoritettavaan verikokeeseen, mutta veren sijaan analysoidaan öljyn puhtautta (Korpi, Manninen, Rinkinen & Suontama 2006, 164).

On arvioitu että 70–80 % kaikista hydraulijärjestelmien häiriöistä johtuu nesteen epäpuhtauksista (Kauranne, Kajaste ja Vilenius 2013). Tutkimuksissa voidaan käyttää nykyaikaisia suoraan järjestelmään liitettäviä on-line- tai laboratoriossa käytettäviä off-line-laitteistoja.

Onnistuneella kunnonvalvonnalla ehkäistään kitkan ja kulumisen aiheuttamia haittoja, sekä optimoidaan tehonsiirto. On kuitenkin tärkeää pitää mielessä mikä on tarpeellinen kunnonvalvonnan aste. Tarve kunnonvalvonnalle riippuu paljon teollisuudenalasta ja laitekannasta. (Korpi, Manninen, Rinkinen, Suontama & Vuolle 2006, 114–115.)

4.2 Kiinteät epäpuhtaudet

Öljyn kiinteät epäpuhtaudet voi jakaa viiteen kategoriaan: voiteluaineesta peräisin olevat, voideltavista kohteista peräisin olevat, maalatuista pinnoista peräisin olevat, tiivistimistä erottuvat, valmistuksesta ja asennuksesta jääneet, ja ulkopuolelta tulevat epäpuhtaudet (Kuvio 8). (Malinen, Pulkkinen, Rätty, Suontama & Vuolle 2006, 115–116.)



Kuvio 8. Kiinteät epäpuhtaudet (Malinen, Pulkkinen, Rätty, Suontama & Vuolle 2006, 117–118)

Kun öljy hapettuu voi öljyyn syntyä epäpuhtauksia, jotka ovat koostumukseltaan lakkamaisia tai karstamaisia. Myös öljyyn lisätty lisäaine voi muodostaa epäpuhtauksia, jotka johtuvat jonkun ulkoisen aineen ja lisäaineen reaktiosta. Yksi iso öljyn epäpuhtauksien syy on järjestelmä itse.

Öljyn seasta löytyvä kulumismetalli on peräisin voideltavista kohteista. Tutkimalla näiden epäpuhtauksien alkuaineiden laatua ja määrää on mahdollista selvittää, missä kohtaa järjestelmää kulumista tapahtuu.

Järjestelmän omista tiivisteistä voi ajan tai kulumisen seurauksena irrota erilaisia aineita öljyn sekaan. Esimerkiksi punostiivisteistä voi irrota öljyn sekaan teflonia,

grafiittia ja silikoniöljyä, näistä ongelmallisimmin on silikoniöljy koska se sekoittuu voiteluaineeseen eikä sitä voida poistaa suodattamalla.

Valmistuksessa komponentteihin on voinut jäädä koneistujäämiä, asennusjätteitä ja hiontapölyä. Tällaiset epäpuhtaudet ovat yleensä niin painavia, että ne on vaikea poistaa järjestelmästä huuhtelemalla.

Epäpuhtauksia voi tulla myös järjestelmän ulkopuolelta yleisimpiä ovat hiekka ja metallipöly. Syitä ulkoisiin epäpuhtauksiin ovat puutteelliset ilmansuodattimet, suodattimien ja säiliöiden väliset liitokset, öljysäiliöiden huoltoluukut ja akseleiden tiivistykset. (Malinen, Pulkkinen, Rätty, Suontama & Vuolle 2006, 114–117.)

4.3 Epäpuhtauksien mittaaminen

Yksi tapa määrittää kiinteitä epäpuhtauksia on silmämääräinen tarkastelu, tämä ei kuitenkaan nykyään enää riitä. Ihmissilmä ei pysty enää havaitsemaan alle 30 μ m halkaisijan omaavia epäpuhtauksia. (Malinen, Pulkkinen, Rätty, Suontama & Vuolle 2006, 117).

Välyksiin nähden suurikokoiset kovat hiukkaset voivat aiheuttaa vakavia äkillisiä vaurioita ja esimerkiksi servoventtiilin luistin, ja rungon väliset välykset ovat yleensä 2–8 μ m (Taulukko 3). Taulukossa on listattu välyksiä eri komponenteille, välyksien koot antavat hyvän kuvan siitä, milloin hydraulikkaöljyä on syytä tutkia muutenkin kuin silmämääräisesti. (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 379–380.)

Taulukko 3. Hydraulikomponenttien dynaamisia välyksiä (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 380)

Komponentti/vällys	Vällys [μm]
<u>Hammaspyöräpumppu</u>	
hampaan kärki - kammion seinä	0,5-5
hammaspyörä - sivulevy	0,5-5
<u>Siipipumppu</u>	
siiven kärki - kammion seinä	0,5-5
siipi - siipilevy	5-25
<u>Mäntäpumppu</u>	
mäntä - sylinteriseinä	5-40
venttiililevy - sylinteriryhmä	0,5-10
<u>Luistinventtiili</u>	
luisti - runko	5-25
<u>Servoventtiili</u>	
luisti - runko	2-8
suutin - läppä	20-70
suutin (halkaisija)	100-400
<u>Hydrostaattinen laakeri</u>	
	1-30

Öljyä on siis tarkasteltava muilla keinoilla. Yksi tapa on mikroskooppilaskenta, jossa pulloon otetusta näytteestä voidaan selvittää viitteitä hiukkasten laadusta ja muodosta. Toinen tapa on tehdä näytteelle hiukkasanalyysi, joka suoritetaan hiukkaslaskimella. (Malinen, Pulkinen, Räty, Suontama & Vuolle 2006, 117–118.)

4.4 Hiukkaslaskenta

Hiukkaslaskennassa eli partikkelianalyysissä, öljynäytteestä saadaan tietona partikkelien koko ja määrä. Partikkelimäärän perusteella saadaan öljylle puhtausluokka käyttäen apuna aiheeseen liittyvää standardia esimerkiksi ISO 4066, NAS 1638 tai SAE AS 4059. Tätä tietoa käytetään apuna öljyn ja laitteiden kunnonvalvonnassa. (Korpi, Manninen, Rinkinen & Suontama 2006, 174.)

Laskenta suoritetaan joko on-line- tai off-line-mittauksella. On-line-mittauksessa mittaus tapahtuu suoraan öljyjärjestelmästä. Tällainen mittaus voidaan suorittaa esimerkiksi PAMAS S40 kannettavalla hiukkaslaskimella (Kuvio 9). Järjestel-

mään on mahdollista asentaa myös oma kiinteä laitteistonsa. Yksi on-line-mittauksen haasteista on öljyssä oleva ilma, joka häiritsee hiukkaslaskentaa. Tällöin järjestelmään lisätään erillinen ilmanerotin. (Niiranen 2011, 56.)



Kuvio 9. PAMAS S40 (PAMAS 2023a)

Off-line-mittauksessa öljynäyte otetaan järjestelmästä esimerkiksi pulloon (Kuvio 20) ja mittaus suoritetaan muualla yleisimmin laboratoriossa. Tällaiseen mittaukseen käy esimerkiksi PAMAS SBSS-laitteisto (Kuvio 10). Tämä laite poistaa näytteestä ilman, joten tällä menetelmällä ei ole ilman kanssa ongelmaa. (Niiranen 2011, 56.)

PAMAS SBSS-laitteella suoritetusta analyysistä selviää epäpuhtauskokojen 4–70 µm lukumäärä, joiden avulla saadaan öljylle puhtausluokka käyttäen jotain aiheeseen liittyvää standardia esimerkiksi ISO 4406 (Taulukko 7). Standardissa ISO 4406 keskitytään hiukaskokoalueisiin $\geq 4 \mu\text{m}$, $\geq 6 \mu\text{m}$ ja $\geq 14 \mu\text{m}$, mutta kunnonvalvonnan kannalta analyyseissä olisi syytä keskittyä myös isompiin partikkeleihin.

Suurikokoisten yli 30 µm hiukkasten lukumäärä hyvin suodatetussa ja toimivassa järjestelmässä on yleensä matala lähes nolla. Näin ollen suurten partikkelien löytyminen järjestelmästä voi kertoa kulumisvauriosta sekä edesauttaa ennakoivaa kunnossapitoa. (Niiranen 2011, 55.)



Kuvio 10 PAMAS SBSS (PAMAS 2023b)

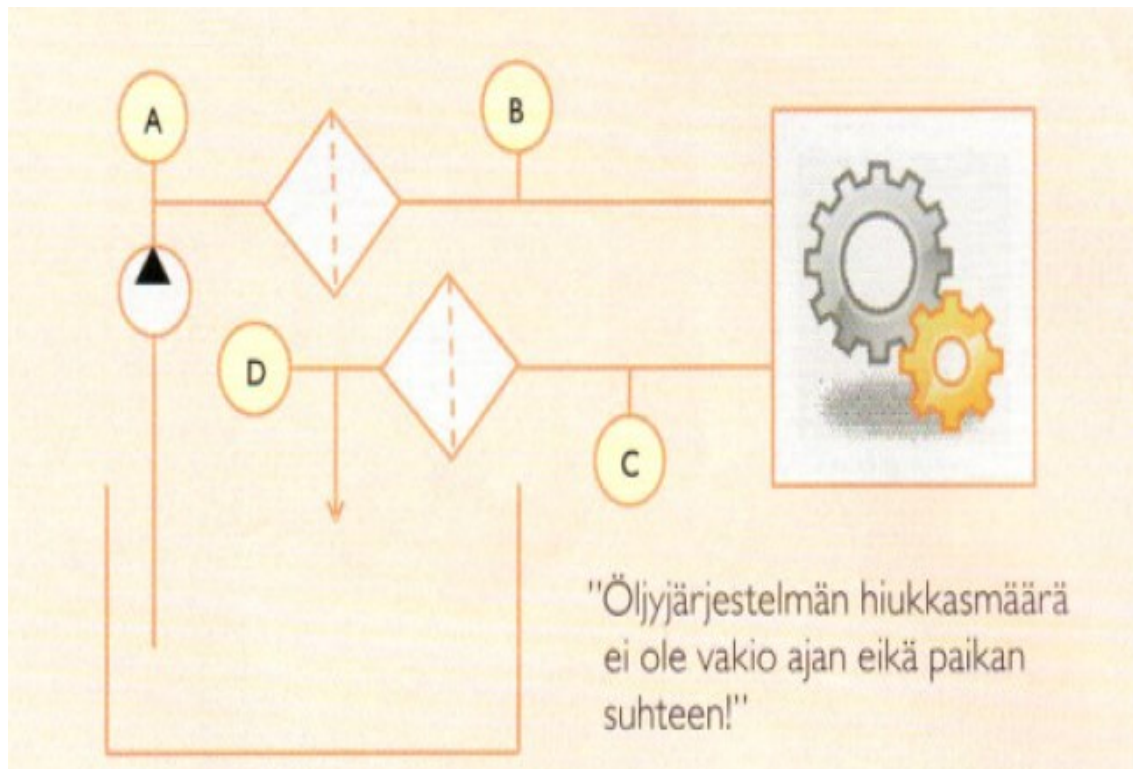
4.5 Näytteenotto

Näytteenotto on öljyn kunnonvalvonnan kannalta tarkimpia toimenpiteitä. Väärin otetusta näytteestä voi olla enempi haittaa kuin hyötyä. Tämä johtuu siitä, että väärän näytteen pohjalta tehdyt toimenpiteet ovat turhia eikä näyte kerro totuutta laitteiston tilasta. Näytteenottoa helpottaa hyvin suunniteltu järjestelmä, oikeat välineet ja oikeanlainen valmistautuminen. On myös tärkeää käyttää puhtaita ja tarkoituksenmukaisia laitteistoja sekä välineitä.

On tärkeää kiinnittää huomiota, kuinka usein näytteitä otetaan. Turhan harvoin otetuista näytteistä saatua tulosta on vaikea käyttää apuna ennakoivassa kunnossapidossa, tämä myös lisää vaurioriskejä järjestelemässä.

Liian useinkaan ei näytteitä kannata ottaa, ylimääräisen työn ja lisäkustannuksien takia. Näytteenotto tiheys tulisikin harkita järjestelmäkohtaisesti tarpeen mukaan. (Korpi, Manninen, Rinkinen & Suontama 2006, 178–179.)

Öljynäytteen ottopaikalla on suuri merkitys. Paikan määrää tieto mitä öljystä haetaan (Kuvio 11). Kuviossa näkyy pisteet A – C, joista jokaisesta selviää eri tietoja.



Kuvio 11. Järjestelmän mittauspisteet (Niiranen 2011, 56)

Mitattaessa pisteestä:

- A selviää pumpusta irtoavien epäpuhtauksien määrä
- B saadaan tietoa pääsuodattimen kunnosta ja samalla syötettävän öljyn puhtaudesta.
- C selviää vaihdelaatikon hammaspyörin ja akselien laakeroinnin kunto.
- D voidaan näytteestä päätellä paluusuodattimen kuntoa, jos suuria hiukasia on näytteessä paljon, on suodattimessa vikaa. (Niiranen 2011, 56.)

5 PUHTAUSLUOKAT

Hydrauliikkajärjestelmässä sallittavat epäpuhtausmäärät ja hiukkaskoot riippuvat järjestelmän painetasosta (Taulukko 5) sekä komponenttien herkkyydestä epäpuhtauksille (Taulukko 4). Koska järjestelmässä voi olla eri kokoisia epäpuhtauksia on yleistä kuvata nesteessä olevia epäpuhtauksia hiukkaskokojakaumalla, kokonaismäärän sijaan.

Taulukko 4. Komponenttien puhtausluokkasuosituksia (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 388)

Komponentti	Puhtausluokkasuositus		
	ISO 4406	NAS 1638	SAE AS 4059*
Suuntaventtiili	21/18/15	10	11A/9B/9C
Virtaventtiili	21/18/15	10	11A/9B/9C
Paineventtiili,säätäv	21/18/15	10	11A/9B/9C
Sylinteri	21/18/15	10	11A/9B/9C
Hammaspyöräkoneet	21/18/15	10	11A/9B/9C
Mäntäkoneet	20/18/15	9	10A/9B/9C
Siipikoneet	18/17/14	9	10A/8B/8C
Proportioventtiilit	20/16/13	9	10A/7B/7C
Servoproportioventtiilit	18/16/13	8	8A/7B/7C
Servoventtiilit	17/14/11	7	7A/5B/5C
Servosylinterit	17/14/11	7	7A/5B/5C

Hiukkaskokojakauman perusteella määritetään järjestelmälle puhtausluokitus. Eri puhtausluokkien vertailun helpottamiseksi luokat määritetään standardeihin perustuen. Yleisimmin käytetyt standardit koskien hydrauliikkajärjestelmien puhtautta ovat, NAS 1638 (Taulukko 8), ISO 4066 (Taulukko 7) JA SAE AS 4059 (Taulukko 9). (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 384–385.)

Taulukko 5. Järjestelmien puhtausluokkasuosituksia (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 389)

Järjestelmä	Puhtausluokkasuositus		
	ISO 4406	NAS 1638	SAE AS 4059*
Matalapainejärjestelmät perinteisin venttilein	24/17/14	9 → 11	-/8B/7C
Korkeapainejärjestelmät perinteisin venttiilein	21/16/13	7 → 9	11A/11B/7C
Proportionaaliventtiilijärjestelmät	20/15/12	6 → 7	10A/6B/6C
Servoproportionaaliventtiilijärjestelmät	18/14/11	5 → 6	8A/5B/5C
Servoventtiilijärjestelmät	18/13/10	4 → 5	8A/4B/4C
Erittäin herkät suurtehojärjestelmät	16/11/9	3 → 4	6A/2B/3C

5.1 Hiukkasmäärät

Partikkelianalysissä hiukkaslaskin luokittelee öljynäytteestä mitatut hiukkaset valittuihin kokoluokkiin. Hiukkasmäärät (Taulukko 6) voidaan esittää sekä differentiaalisena että kumulatiivisena.

Differentiaalinen (Taulukko 8) tulos ilmoittaa valittujen kokoluokkien erotuksen eli niiden väliin jäävät hiukkasmäärät. Kumulatiivinen (Taulukko 7) tulos taas kertoo kuinka monta esimerkiksi 4µm kokoista ja suurempaa hiukkasta on. (Niiranen 2013, 16.)

Taulukko 6. Kumulatiivinen ja differentiaalinen hiukkasmäärä (Niiranen 2013, 16)

Hiukkaskoko µm(c) kum.	Määrä kpl		Hiukkaskoko µm(c) diff.	Määrä kpl
≥ 4	1864		4 – 6	919
≥ 6	945		6 – 10	609
≥ 10	336		10 – 14	144
≥ 14	192		14 – 21	86
≥ 21	106		21 – 30	28
≥ 30	78		30 – 38	56
≥ 38	22		38 – 70	20
≥ 70	2		≥70	2

5.2 ISO 4406:1999

ISO 4406:1999 on kansainvälinen standardi ja luokitusjärjestelmä, jolla määritellään kiinteiden hiukkasten määrä hydraulineesteessä. Se on yleisesti käytössä muidenkin öljyjen puhtauden määrittämiseen. Ideana on yksinkertaistaa hiukkasten lukumäärän ilmoittamista ja ilmoittaa laajemmat lukumäärät koodien avulla. Hiukkasten lukumäärä kaksinkertaistuu, kun puhtausluokka kasvaa yhdellä luokalla.

Standardissa ISO 4406:1999 (Taulukko 7) käytetään kolmea hiukkaskokoaluetta, $\geq 4 \mu\text{m}(c)$, $\geq 6 \mu\text{m}(c)$ ja $\geq 14 \mu\text{m}(c)$ ja standardin puhtausluokitus perustuu kumulatiivisiin hiukkasmääriin edellä mainituissa kokoluokissa 4, 6 & 14 (Niiranen 2013,17).

Standardissa käytetään kokoluokituksen yhteydessä $\mu\text{m}(c)$ c kirjainta sulkujen sisällä, osoittamaan että mittaukset on suoritettu automaattisella hiukkaslaskimella ISO 11500-standardin mukaisesti (tai muulla tunnetulla menetelmällä). Muu menetelmä on kalibroitava ISO 11171:m mukaisesti. (Malinen, Pulkkinen, Räty, Suontama & Vuolle 2006, 120–121.)

Taulukossa näkyy ISO 4406:1999 mukaiset hiukkasmäärät ja niitä vastaavat koodit. Hiukkaslaskennan tulosta verrataan taulukkoon ja sen avulla saadaan näytteelle standardin mukainen puhtausluokitus.

Taulukko 7. ISO 4406 - standardin mukaiset hiukkasmäärät ja niitä vastaavat koodit (Malinen, Pulkkinen, Rätty, Suontama & Vuolle 2006, 124)

ISO-koodi (ISO-4406:1999)	Hiukkastenlukumäärä/100ml	
	min.	max.
0	0,50	1,00
1	1,00	2,00
2	2,00	4,00
3	4,00	8,00
4	8,00	16,00
5	16,00	32,00
6	32,00	64,00
7	64,00	130,00
8	130,00	250,00
9	250,00	500,00
10	500,00	1000,00
11	1000,00	2000,00
12	2000,00	4000,00
13	4000,00	8000,00
14	8000,00	16000,00
15	16000,00	32000,00
16	32000,00	64000,00
17	64000,00	130000,00
18	130000,00	260000,00
19	260000,00	500000,00
20	500000,00	1000000,00
21	1000000,00	2000000,00
22	2000000,00	4000000,00
23	4000000,00	8000000,00
24	8000000,00	16000000,00
25	16000000,00	32000000,00
26	32000000,00	64000000,00
27	64000000,00	130000000,00
28	130000000,00	250000000,00

Olگون puhtausluokka esimerkiksi 15/13/10, tämä tarkoittaa että:

- $\geq\mu\text{m}4(\text{c})$ hiukkasia on luokkaa 15 vastaava määrä (16000–32000 kpl/ 100 ml)
- $\geq\mu\text{m}6(\text{c})$ hiukkasia on luokkaa 13 vastaava määrä (4000–8000 kpl/ 100 ml)
- $\geq\mu\text{m}14(\text{c})$ hiukkasia on luokkaa 10 vastaava määrä (500–1000 kpl/ 100 ml). (Malinen, Pulkkinen, Rätty, Suontama & Vuolle 2006, 122–124.)

5.3 NAS 1638

NAS 1638 – standardin luokitus perustuu hiukkasten määrään viidessä eri kokoluokassa (Taulukko 8). Standardissa käytetään differentiaalista laskutapaa, jossa määritetään kappaleet per kokoluokka-alue (Niiranen 2013, 19).

Hiukkasten määrä lasketaan järjestelmästä otetusta 100 ml näytteestä. Koodeja on käytössä 14 välillä 00–12. Standardi ilmoittaa hiukkasten lukumäärät jokaiselle kokoalueelle erikseen. Puhtausluokka ilmoitetaan yleensä yhdellä numerolla, tällöin ilmoitetaan huonoin puhtausluokka.

Taulukko 8. Standardin NAS 1638 mukainen puhtausluokitus (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 384)

NAS KOODI (NAS-1638)	Hiukkasten lukumäärä / 100 ml				
	Kokoalueet				
	5-15 μm	15-25 μm	25-50 μm	50-100 μm	>100 μm
00	125	22	4	1	0
0	250	44	8	2	0
1	500	89	16	3	1
2	1000	178	32	6	1
3	2000	356	63	11	2
4	4000	712	126	22	4
5	8000	1425	253	45	8
6	16000	2850	506	90	16
7	32000	5700	1012	180	32
8	64000	11400	2025	360	64
9	128000	22800	4050	720	128
10	256000	45600	8100	1440	256
11	512000	91000	16200	2880	512
12	1024000	182400	32400	5760	1024

Standardia NAS 1638 käytetään enää vain harvoin, ja sen on korvannut standardi SAE AS 4059 jonka myötä hiukkasjakaumasta saadaan entistä tarkempi kuva. (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 384–385.)

5.4 SAE AS 4059

SAE AS 4059D käyttää kumulatiivista laskutapaa hiukkasmäärien vertailuun (Niiranen 2013, 20). Standardissa on kuusi eri hiukkaskokoluokkaa (Taulukko 9) A – F ja näyte lasketaan 100 ml näytteestä. Se että mihin luokkiin tulos kuuluu, riippuu käytettävästä laitteistosta, jolla hiukkaslaskenta on suoritettu.

Jos mittaus on suoritettu standardin 4402 mukaisesti kalibroidulla automaattisella hiukkaslaskurilla tai vaihtoehtoisesti mikroskoopilla käytetään ”vanhaa” laskentatapaa. Vaihtoehtoisesti jos käytetään standardin ISO 11171 mukaisesti kalibroitua automaattista hiukkaslaskuria tai elektronimikroskooppia on käytettävä ”uutta” laskentatapaa

Taulukko 9. SAE AS4059D-standardin puhtausluokat (Niiranen 2013, 20)

SAE AS4059D		Maksimi hiukkasmäärät, kpl / 100 ml näytettä (kumulatiivinen määrä)					
”Vanha” hiukkaskoko*		≥ 1µm	≥ 5µm	≥ 15 µm	≥ 25 µm	≥ 50 µm	≥ 100 µm
”Uusi” hiukkaskoko**		≥ 4 µm(c)	≥ 6 µm(c)	≥ 14 µm(c)	≥ 21 µm(c)	≥ 38 µm(c)	≥ 70µm(c)
Kokoluokka		A	B	C	D	E	F
P U H T A U S L U O K A T	000	195	76	14	3	1	0
	00	390	152	27	5	1	0
	0	780	304	54	10	2	0
	1	1560	609	109	20	4	1
	2	3120	1220	217	39	7	1
	3	6250	2430	432	76	13	2
	4	12500	4860	864	152	26	4
	5	25000	9730	1730	306	53	8
	6	50000	19500	3460	612	106	16
	7	100000	38900	6920	1220	212	32
	8	200000	77900	13900	2450	424	64
	9	400000	156000	27700	4900	848	128
	10	800000	311000	55400	9800	1700	256
11	1600000	623000	111000	19600	3390	512	
12	3200000	1250000	222000	39200	6780	1020	

SAE 4059 mukaisesti puhtausluokka voidaan ilmoittaa kolmella eri tavalla:

- Ilmoitetaan puhtausluokka jonkun tietyn hiukkaskoon ja sitä suurempien partikkelien perusteella esimerkiksi 5B
- Useamman puhtausluokan perusteella esimerkiksi 11A/7B/7C
- Laajimman hiukkaskokoalueen, suurimman puhtausluokan mukaan esimerkiksi 7B-F. (Kauranne, Kajaste ja Vilenius 2013, 385–386.)

6 ÖLJYN ESIKÄSITTELY

Esikäsitteilyn avulla pyritään parantamaan näytteen tarkkuutta ja toistettavuutta. Esikäsitteily voi olla myös vaatimuksena esimerkiksi koko näytteen analysoinnin onnistumisen kannalta. (Suomi 2009, 10).

Tässä opinnäytetyössä esikäsitteilyllä pyritään parantamaan hydraulikkaöljyn partikkelianalyysinäytettä. Näytteitä käsitellään lämmittämällä, sekoittamalla ja ultraäänellä. Näillä menetelmillä pyritään saamaan epäpuhtaudet liikkeelle ja näin ollen näkymään ne partikkelianalyysissä. Esikäsiteltyjä näytteitä tullaan vertaamaan käsittelemättömiin näytteisiin ja näin saadaan tietoa kuinka paljon esikäsitteilyllä, on vaikutusta lopputulokseen.

6.1 Ultraääni

Ultraäänellä pyritään saamaan näytteen epäpuhtaudet liikkeelle sekä pilkkoutumaan pienemmiksi yksittäisiksi partikkeleiksi ja näin sekoittumaan mahdollisimman tasaisesti. Näytteen esikäsitteilyyn käytetään Ultrasonic cleaner 3 L laitetta (Kuvio 12). Laite myös lämmittää näytteen 60°C asteeseen, jolla toivotaan myös olevan myönteinen vaikutus näytteen tarkkuuteen.



Kuvio 12. Ultraäänipesuri (Motonet 2023)

Ultraääni on mekaanista aaltoliikettä, joka etenee ilmassa, nesteessä ja kiinteässä aineessa. Ultraäänestä syntyy värinää, joka aiheuttaa kavitaatiota. Ultraäänien taajuus on yli 20000 Hz, joten ihminen ei voi sitä kuulla.

Ultraääni on yleisesti käytössä nykypäivänä, sitä käytetään kaikuluotauksessa, lääketieteellisessä ultraäänikuvauksessa, hammaskiven poistossa, hitsiliitosten tarkistamisessa ja ultraäänipuhdistuksessa. (Oulun ultra 2023.)

6.2 Lämmitys

Näytteet lämmitetään lämpökaapissa 60°C asteeseen. Lapin ammattikorkeakoululla lämpökaappina toimii Memmert un30m (Kuvio 13). Näytteen lämmittämisellä vaikutetaan öljyn viskositeettiin. Lämpötilan noustessa viskositeetin eli sisäisen kitkan arvo pienenee (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 26).

Viskositeetin pienentyessä oletuksena pidetään, että epäpuhtauspartikkelit saadaan paremmin liikkeelle. Tällöin lämmitetyn näytteen tulos pitäisi olla tarkempi kuin lämmittämättömän. Lämmittäminen myös helpottaa näytteen sekoittamista, jolla on myös iso vaikutus näytteen tarkkuuteen.



Kuvio 13. Lämpökaappi Memmert un30m

6.3 Sekoitus

Näytteen sekoitukseen voi käyttää erillistä laitetta (Kuvio 14) tai sen voi tehdä käsin. Käsin sekoittaessa on oltava tarkkana, ettei näytteeseen synny ilmakuplia, jotka voivat haitata analyysin tulosta.

Tässä opinnäytetyössä näytteet sekoitetaan käsin, koska saatavilla ei ollut tähän tarkoitettua laitteistoa. Kun hydraulikkaöljy näyte seisoo kauan, laskeutuu epäpuhtauspartikkelit näyteastian pohjalle tällaisesta näytteestä tehty analyysi ei kerro totuutta öljyn kunnosta.



Kuvio 14. Sekoittaja (Avantor 2023)

7 KÄYTETTÄVÄT LAITTEET

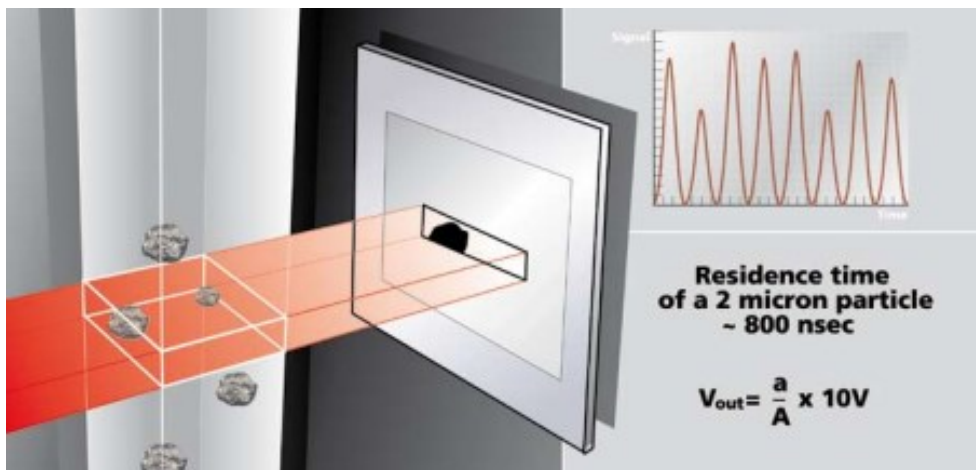
Opinnäytetyön suorittamiseen käytetään Lapin ammattikorkeakoulun omistamia laitteistoja sekä koulun laboratoriotiloja.

Öljyn esikäsitteilyyn käytetään Memmert un30m lämmityskaappia (Kuvio 13) sekä ultraäänipesuria (Kuvio 12). Partikkelianalyysi mittaukset suoritetaan PAMAS SBSS-hiukkaslaskimella (Kuvio 10) ja laskimen tulosten tulkintaan käytetään PAMAS PMA- & CMDM-ohjelmistoja.

7.1 PAMAS SBSS

PAMAS SBSS on laboratoriohiukkaslaskin, jota käytetään pullonäytteiden mittaamiseen. Laitteella onnistuu erilaisten aineiden partikkelianalyysit aina matalaviskositeettisista hydraulinesteistä, jäykkiin voiteluöljyihin. Laitteen sensori toimii leveälaser-teknikalla (Kuvio 15) jossa sensorin läpimenevät hiukkaset mitataan varjopinta-alansa mukaan. (Niiranen 2011,55.)

Kun partikkeli virtaa valotielle peittää se valon aiheuttaen valomäärän muutoksen. Valomäärän muutos on sensorin signaaliulostulossa jännitepulssi, jonka korkeudesta voidaan päätellä partikkelin koko (Niiranen 2013,10).

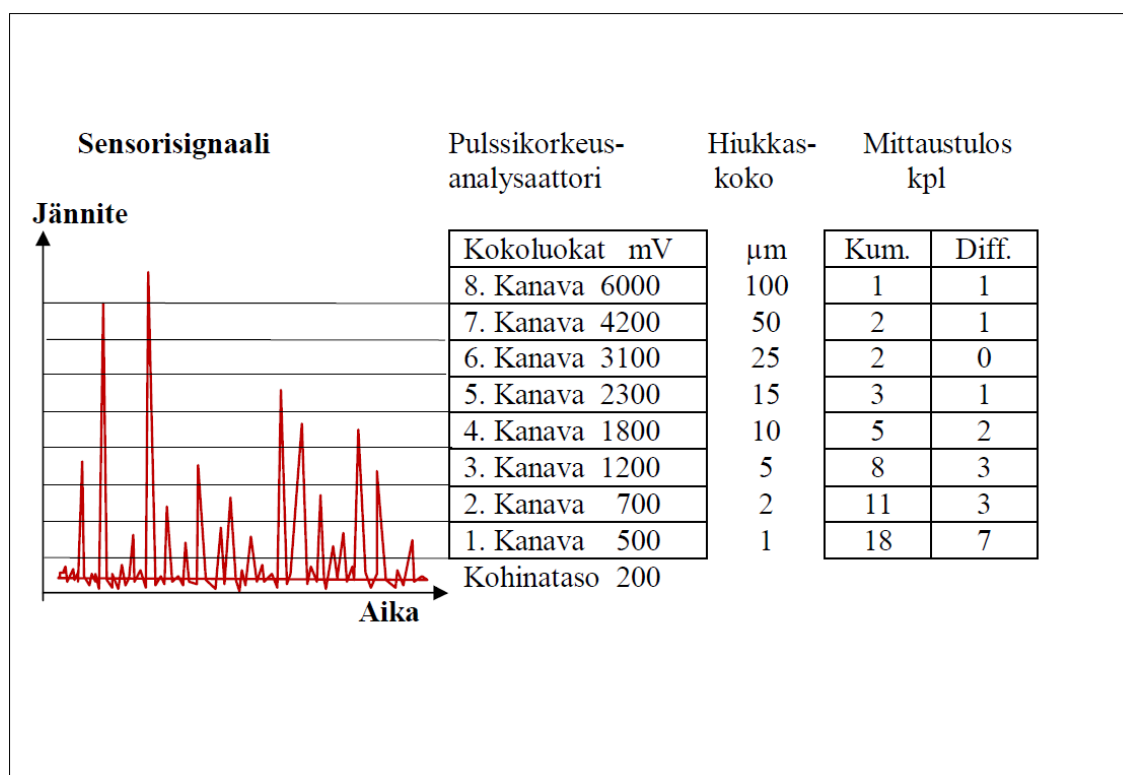


Kuvio 15. Hiukkaslaskentasensori (Niiranen 2011, 55)

Laitteen analysaattori analysoin jännitepulssin ja laskee hiukasmäärät kokoluokittain. Analysaattori vastaanottaa tulevan analogisen signaalin ja muuttaa sen

sähköiseen numeeriseen muotoon laitteen näytölle. Tämä tieto voidaan siirtää analysaattoriin liitettyyn tietokoneeseen, jolloin tulokset voidaan lukea esimerkiksi PAMAS PMA-ohjelmalla (Kuvio 17). (Niiranen 2013,7.)

Analysaattori käsittelee signaalin monikanavaisen pulssikorkeusanalysaattorin toimintaperiaatteella (Kuvio 16) määrittäen kokoluokat jännitepulssien mukaan. Hiukkaslaskimelta saadaan tulos jännitepulssien lukumäärästä eri kokoluokissa eli partikkelien kokojakauma kumulatiivisena sekä differentiaalisena. (Niiranen 2013,13.)

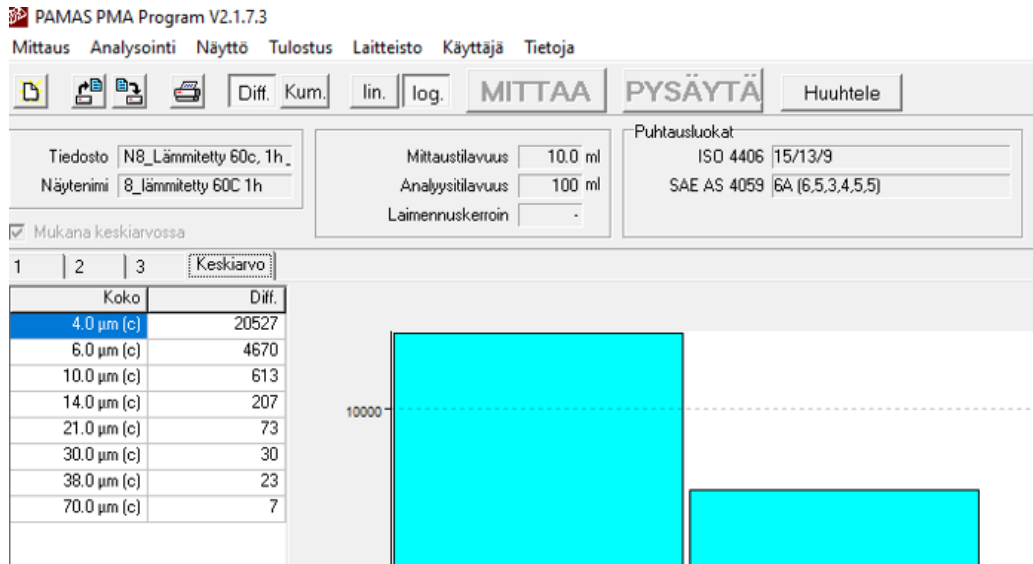


Kuvio 16. Hiukkaslaskimen pulssikorkeusanalysaattorin toimintaperiaate (Niiranen 2013, 13)

7.1.1 PAMAS PMA

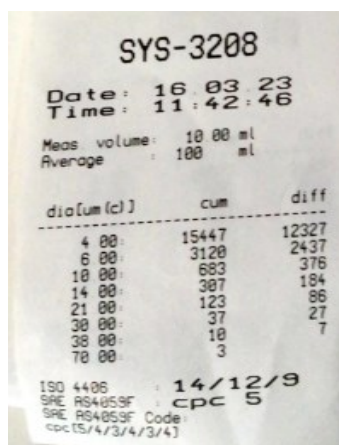
PAMAS PMA (Kuvio 17) on partikkelilaskentaohjelmisto. Ohjelmalla ohjataan PAMAS SBSS-hiukkaslaskinta. Ohjelmalla ohjataan laitteiston huuhtelu sekä aloitetaan partikkelianalyysimittaus, minkä jälkeen ohjelma kertoo partikkeleiden

määrän. Ohjelmassa voidaan itse päättää minkä standardin mukaan puhtausluokka ilmoitetaan, tässä opinnäytetyössä puhtausluokat ilmoitetaan ISO 4406:1999:n mukaisesti. (PAMAS 2018b, 2.)



Kuvio 17. PAMAS PMA

Kun mittaus on valmis tulostaa PAMAS SBSS-hiukkaslaskin kuitin (Kuvio 18). Kuitista selviää mittausaika, päivämäärä, puhtausluokka ja partikkelien lukumäärä kumulatiivisena sekä differentiaalisena. Kuitista saadaan tietona myös näytteen otto tilavuus 10 ml sekä suhteutettu keskiarvotilavuus 100 ml. Laite siis mittaa partikkelit 10:tä millilitrasta nestettä ja suhteuttaa tuloksen vastaamaan 100:aa millilitraa.



Kuvio 18 Analyysikuitti

7.1.2 PAMAS CMDM

PAMAS CMDM on ohjelmisto hydraulii- ja voitelujärjestelmien mekaaniseen kunnon-, sekä puhtaudenvalvontaan. Ohjelma tallentaa ja analysoi PAMAS SBSS-hiukkaslaskimen tulokset. Ohjelmalla voidaan helposti havainnollistaa useamman mittauspisteen tulokset trendiseurannan avulla (Kuvio 19), näin nähdään helposti mihin suuntaan öljyn kunto on menossa. Ohjelma onkin toimiva työkalu ehkäisevässä kunnossapidossa, kun trendiä seuraamalla voidaan nähdä jo viitteitä mahdollisesta viasta. (PAMAS 2018a,2.)



Kuvio 19 PAMAS CMDM trendiseuranta

Kuviossa näkyy kolmella eri tavalla esikäsiteltyjen öljynäytteiden ISO 4406:1999 mukaiset tulokset. Musta viiva kuvaa 4µm(c), punainen 6 µm(c) ja vihreä 14 µm(c) kokoisten partikkelien määrää näytteissä. Lisäksi on mahdollista valita trendissä näkymään, vielä standardin ohi menevät koot, 21µm(c) & 38µm(c).

7.2 Memmert un30m

Memmert un30m on Lapin ammattikorkeakoulun omistama lämpökaappi (Kuvio 13). Kaappi on valmistettu ruostumattomasta teräksestä, joten se sopii hyvin erilaisten aineiden kanssa toimimiseen. Kaapin lämpötila-alue on +300°C ja sen tilavuus on 30 l. Kaapissa on luonnollinen ilmankierto, ritilähyllyt sekä käyttäjää opastava kosketusnäyttö. Lämpökaapin ominaisuuksiin kuuluu:

- virrankulutus 1600W
- tilavuus 30 l
- lämpötilatarkkuus 150°C ±3
- lämpötilanvaihteluväli(aika)(°C) 150°C ±0,8
- lämpötila-alue, ympäristön lämpötila +5->300°C. (Avantor 2023.)

Lämpökaapissa lämmitettiin kolmea eri näytettä 30/60 & 90min ajan. Ajan ottaminen aloitettiin vasta kun kaapin sisälämpötila oli saavuttanut 60°C. Tämän jälkeen näytteet sekoitettiin huolellisesti ja suoritettiin partikkelianalyysit.

7.3 GT Sonic

GT Sonic (Kuvio 12) on Lapin Ammattikorkeakoululta löytyvä ultraäänipesuri, joka on tarkoitettu tehokkaaseen mutta hellävaraiseen lian poistamiseen. Pesurilla voidaan puhdistaa koruja, metalliosia, silmälaseja ja esimerkiksi tekohampaita. Pesurin ominaisuuksiin kuuluu:

- ultraäänitaajuus 40KHz
- ultraääniteho & lämmitysteho 100W
- lämmitysväli 20–80°C
- altaan mitta 270x170x240mm
- melutaso 72.5db (kansi auki). (Motonet 2023.)

8 PARTIKKELIANALYYSIT

Tässä opinnäytetyössä suoritettiin kahdeksan eri tavalla esikäsiteltyä partikkelianalyysiä. Analyysit suoritettiin PAMAS SBSS-laitteistolla (Kuvio 10) joka löytyy Lapin AMKin automaatiolaboratoriosta.

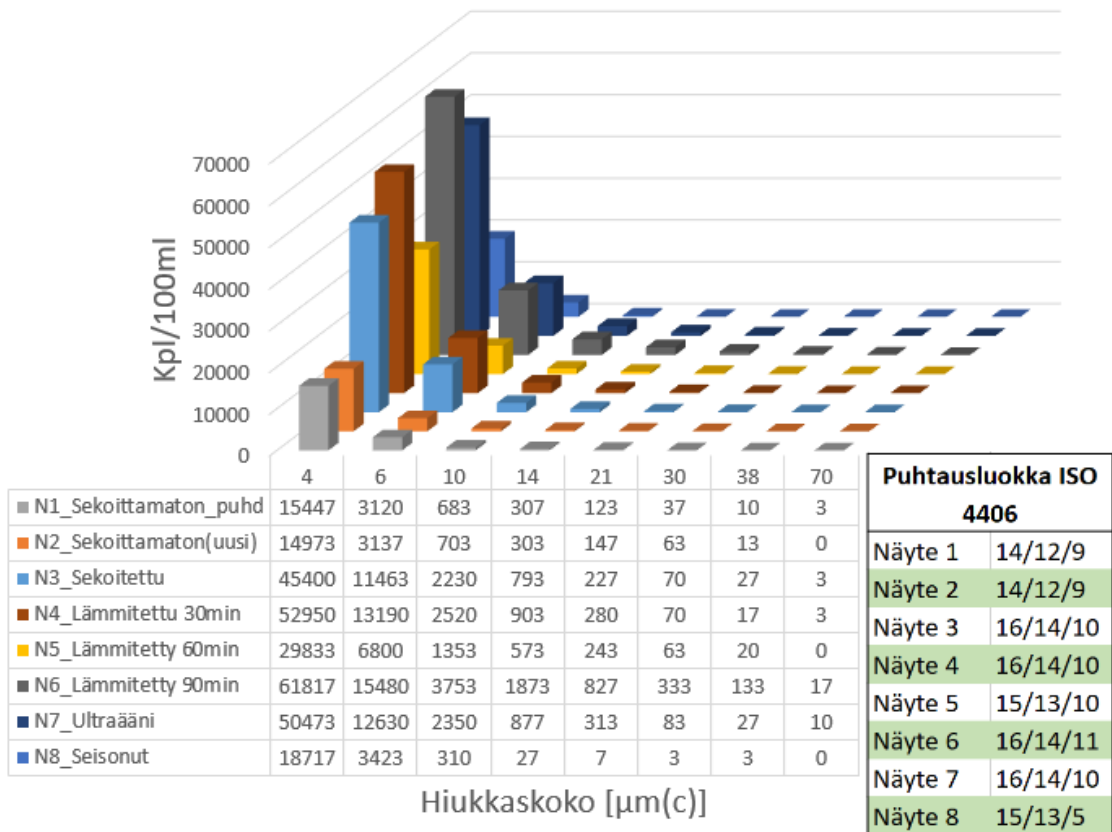
Kaikki näytteet on kaadettu samasta 20 l hydraulioöljyastiasta 200 ml näytepulloihin (Kuvio 20). Pullot ovat käyttämättömiä ja valmistajan putsaamia. Kaikki öljyn kanssa kosketuksissa olevat astiat on puhdistettu isopropanoli-heksaani liuoksella yhtä valmistajan puhdistamaa uutta pulloa lukuun ottamatta.



Kuvio 20. 200 ml näytepullo

Partikkelianalyyseissä (Kuvio 21) käytetty öljy on puhdasta suodattamatonta hydraulikkaöljyä, joka näkyy hieman tulosten vertailussa, käytetystä öljystä olisi voinut saada isompia eroja mittauksissa.

Partikkelianalyysinäytteet



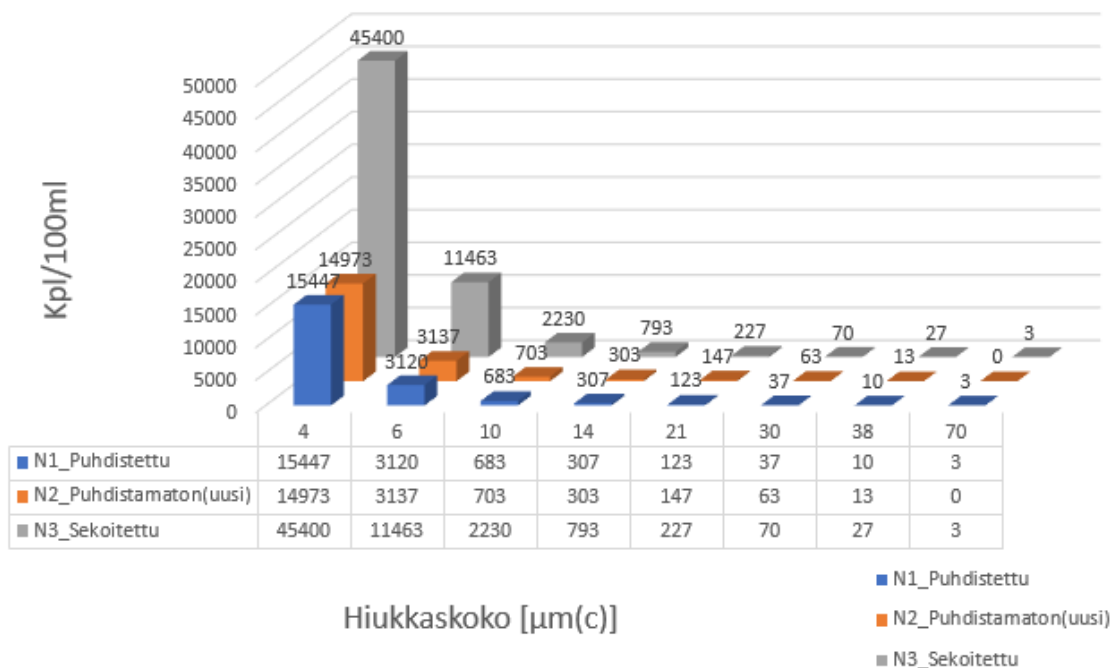
Kuvio 21. Partikkelianalyysit

8.1 Näytteet 1–3

Näytteissä 1–3 (Kuvio 22) haluttiin selvittää, onko pullon huolellisemmalla putsaamisella sekä alkuperäisen 20 l astian sekoittamisella vaikutusta partikkelianalyysin lopputulokseen.

Ensimmäiseksi yksi pullo puhdistettiin isopropanoli-heksaani liuoksella ja pullo täytettiin öljyllä, verrokiksi otettiin samanlainen käyttämätön valmistajan puhdistama näytepullo. Seuraavaksi 20 l astia sekoitettiin huolellisesti ja täytettiin loput näytepullot. 20 l astia on ollut sekoittamatta useamman viikon, joten epäpuhtaudet ovat todennäköisesti laskeutuneet sen pohjalle.

Näytteet 1-3



Kuvio 22. Näytteet 1–3

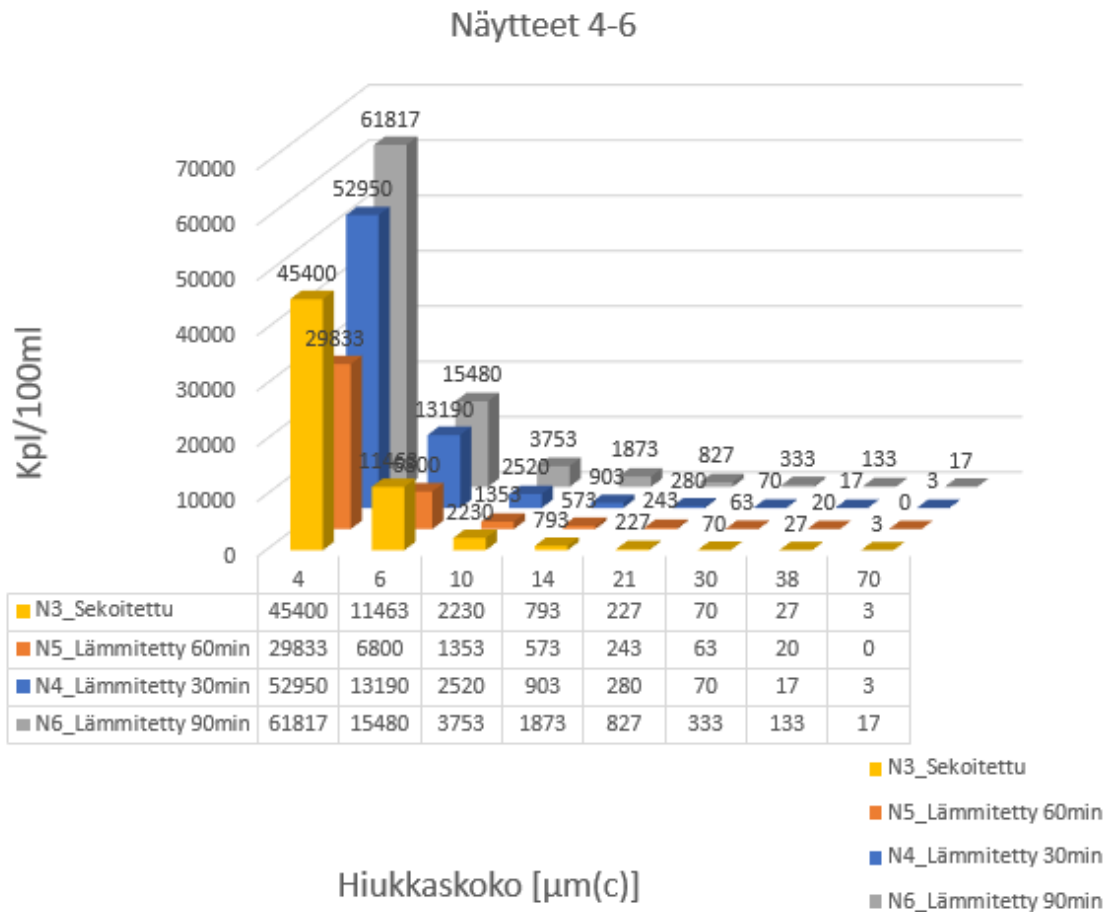
Tuloksista voidaan päätellä, että öljyn huolellisella sekoittamisella on vaikutusta partikkelianalyysin tulokseen. Sekoittamisen johdosta öljyn ISO 4406:1999 mukainen puhtausluokka nousi 14/12/9 -> 16/14/10. Huolellisen näytteen sekoittamisen takia tämä öljy ei enää täytä erittäin herkkien suurtehojärjestelmien vaatimuksia. Tuloksen perusteella voidaan olettaa, että sekoittamalla näyte huolellisesti saadaan todenmukaisempi kuva öljyn kunnosta.

Pullon puhdistamisella isopropanoli-heksaani liuoksella ei isoa vaikutusta ollut, mutta se laski kokojen 21–38 µm(c) epäpuhtauksien määrää. Tästä syystä jokainen näytepullo päätettiin puhdistaa.

Tästä eteenpäin näytettä numero 3 (Sekoitettu) käytetään verrokkina, kun näytteitä aletaan esikäsittlemään sekoittamista enemmän. Näin saadaan kuva, onko sekoittamisen lisäksi muilla esikäsittelyillä kuinka paljon vaikutusta analyysin lopputulokseen.

8.2 Näytteet 4–6

Näytteitä 4–6 (Kuvio 23) pidettiin lämpökaapissa 60°C lämpötilassa 30, 60 & 90min ajan ja lämmittämisen jälkeen näytteet vielä sekoitettiin huolellisesti käsin ennen partikkelianalyysiä.



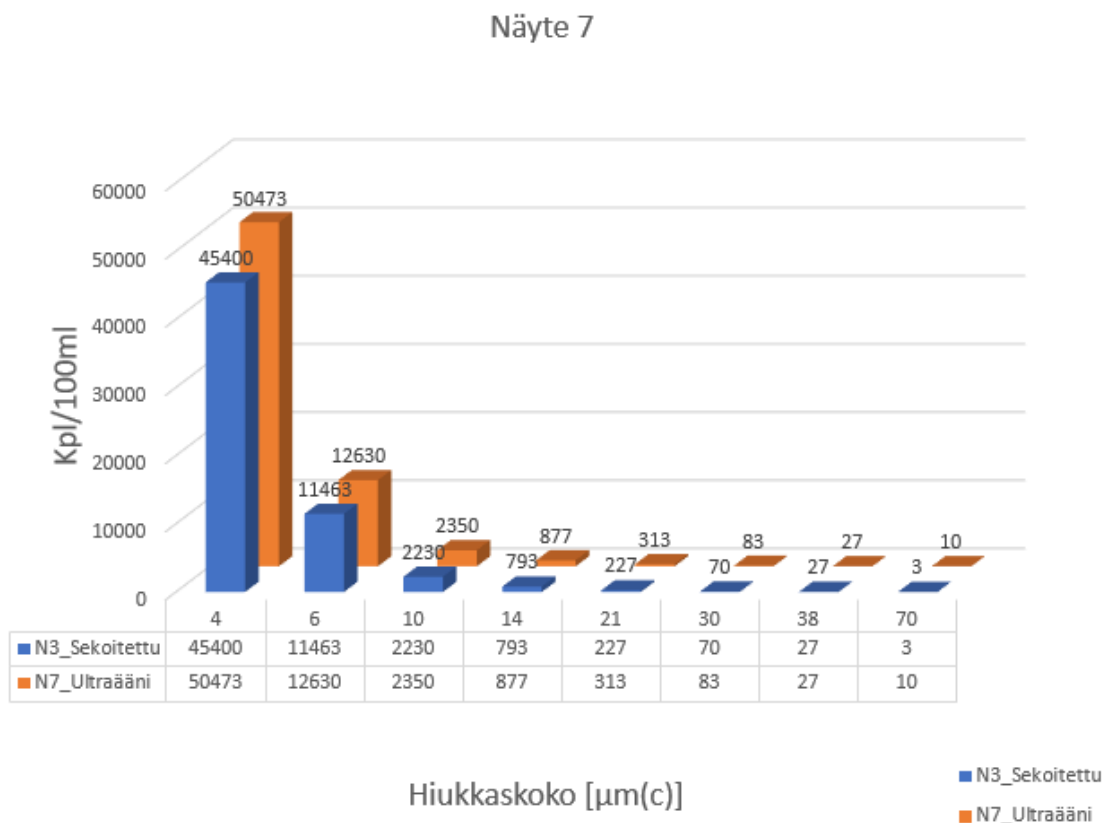
Kuvio 23. Näytteet 4–6

Lämmitetyistä näytteistä saa kuvan, että lämmitys parantaa partikkelianalyysimitauksen tarkkuutta eli epäpuhtaudet näkyvät selvemmin. Vaikutus on kuitenkin sen verran pieni, että ainoastaan näytteen numero 6 ISO 4406 mukainen puhtausluokka muuttui 16/14/10 -> 16/14/11 verrattuna näytteeseen nro. 3.

Näytteen numero 5 tulos kertoo taas aivan päinvastaista. Todennäköisesti näytteen kohdalla on esimerkiksi sekoitus jäänyt liian vähälle, jolloin tulos on epätarkempi.

8.3 Näyte 7

Näytteessä 7 (Kuvio 24) näytepullo altistettiin ultraäänelle noin 40minuutin ajaksi. Laite myös samalla lämmittää näytteen Max 60°C. Ultraäänikäsittelyn jälkeen näyte on vielä sekoitettu huolellisesti käsin.



Kuvio 24. Näyte 7

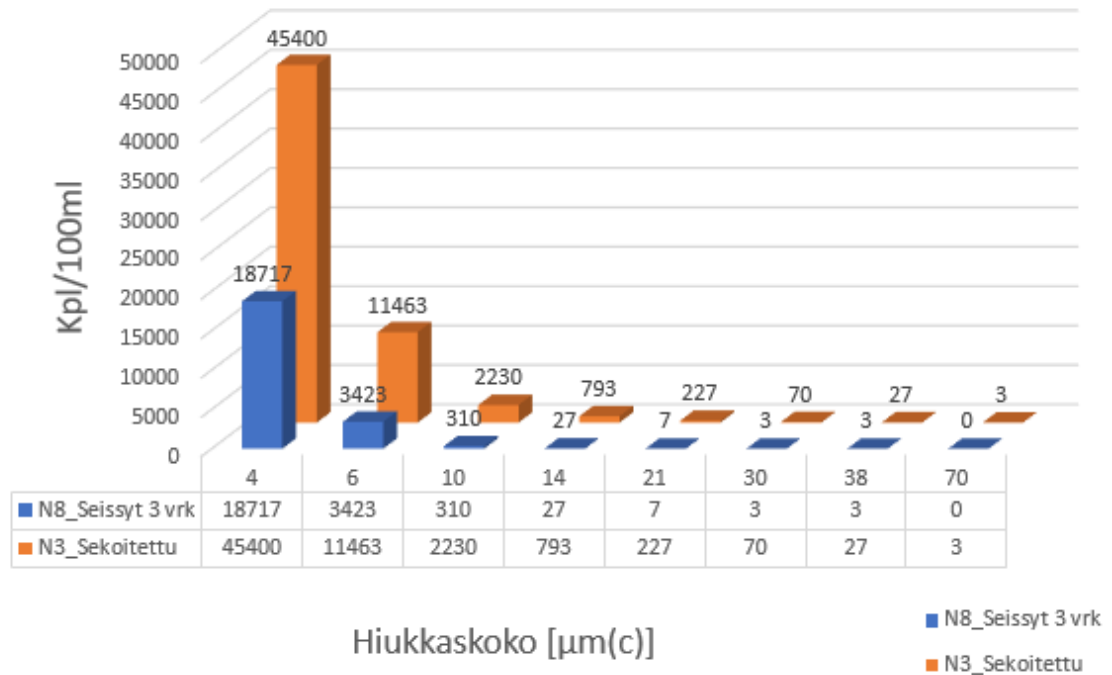
Tulosten perusteella ultraäänestä on hyötyä esikäsittelyssä ja todennäköisesti varsinkin käytettyjen/likaisten öljyjen kohdalla tämä esikäsittely voisi toimia vielä paremmin. Näytteen puhtausluokkaan ei tällä esikäsittelyllä ollut vaikutusta vaan se säilyi samana 16/14/10. Ultraääni paransi kuitenkin isompien partikkelien näkyvyyttä analyysissä, 30 ja 70 μm kokoisten epäpuhtauksien määrä kasvoi.

8.4 Näyte 8

Näytteen 8 (Kuvio 25) kohdalla haluttiin selvittää voiko jo lyhyt sekoittamatta oleminen vaikuttaa näytteen tarkkuuteen. On kuitenkin mahdollista, että näytteitä ei päästä aina testaamaan heti näytteenoton jälkeen. Niinpä alun perin sekoitettu

näyte jätettiin kolmeksi päiväksi kaappiin ja tämän jälkeen suoritettiin partikkelianalyysi.

Näyte 8



Kuvio 25. Näyte 8

Tuloksista näkee, että jo kolmen vuorokauden sekoittamatta oleminen vaikuttaa negatiivisesti näytteen tarkkuuteen. Mittauksen tulos oli melkein yhtä huono kuin useamman viikon sekoittamatta olleella öljyllä, eli näytteillä 1–2 (Kuvio 22).

Tutkimuksen perusteella näytteet kannattaisi sekoittaa aina juuri ennen analyysiä, jolloin saadaan varmasti mahdollisimman totuudenmukainen kuva öljyn kunnosta.

8.5 Yhteenveto

Analyysien tuloksista (Kuvio 21) voi päätellä, että partikkelianalyysinäytteiden esikäsitteilyllä on merkitystä, kun halutaan totuudenmukaista tietoa öljyn kunnosta.

Isoin merkitys tuloksien mukaan on sekoittamisella, jolla saatiin aikaan useamman hiukkaskokomäärän kaksin- tai jopa kolminkertaistuminen. Tulosta myös paransi näytteen lämmittäminen 60°C asteessa ja optimaalisin esikäsittely ainakin tässä opinnäytetyössä käytetyistä menettelyistä olisi sekoittaminen ja lämmitys.

Ultraäänikäsittely lisäsi myös analyysin tarkkuutta. Laitteessa myös automaattisesti yhdistyy ultraääni ja lämmitys. Käytetty laitteisto ei vain ollut paras mahdollinen 200 ml pullonäytteiden esikäsittelyyn pienen kokonsa vuoksi.

Suosittelinkin Lapin AMKin mahdollisesti hankkimaan näytteiden esikäsittelyyn sellaisen koneellisen sekoittajan, joka samalla lämmittää näytettä Max 60°C. Näin saadaan säästettyä aikaa minkä erillinen lämmitys vie, sekä vähennettyä inhimillisestä tekijästä johtuvia virheitä sekoituksen suhteen.

Inhimilliset virheet öljyn käsittelyssä yleensä näkyvät isojen epäpuhtauksien lukumäärän kasvuna, näiden virheiden välttämiseksi olisikin syytä tutustua näytteiden ottamisen ja oikeaoppisen käsittelyn tapoihin. Näyteastioita olisi hyvä pitää suljettuna mahdollisimman paljon ja kaikki välineet olisi syytä puhdistaa kunnolla.

9 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, kuinka paljon hydraulikkaöljyn esikäsitteilyllä on vaikutusta analyysinäytteen tarkkuuteen. Aiheesta ei löytynyt kovin paljon tutkimustietoa ja tästä syystä Lapin AMK tämän toimeksiannon antoi. Tarkoituksena oli selvittää, onko sekoittamisella, lämmittämällä tai ultraäänikäsitteilyllä vaikutusta analyysin lopputulokseen. Työssä analysoitiin puhdasta suodattamatonta hydraulikkaöljyä, jota esikäsiteltiin eri tavoin. Työtä myös rajattiin siten, että analyysit suoritettiin käyttäen vain yhtä hydraulikkaöljyä laatua.

Tuloksena saatiin tieto, että esikäsitteilyllä on merkitystä partikkelianalyysinäytteen tuloksen tarkkuuteen. Suurin merkitys oli näytteen huolellisella sekoittamisella, sekoittamisella saadaan jopa kolminkertaistettua tietynkokoisten epäpuhtauksien määrä näytteessä. Kauan sekoittamatta olleessa näytteessä epäpuhtaudet laskeutuvat astian pohjalle ja näin eivät välttämättä näy analyysissä. Myös lämmittäminen ja ultraääni paransivat analyysinäytteen tarkkuutta.

Tulosten pohjalta suosittelisin, että jokainen näyte lämmitettäisiin n. 60°C ja tämän jälkeen sekoitettaisiin huolellisesti. Optimaalinen tilanne olisi laite, joka sekoittaa ja lämmittää näytteen yhtä aikaa. Lämmittämällä öljyn sisäinen kitka eli viskositeetti pienenee, jolloin testien perusteella epäpuhtaudet saatiin paremmin liikkeelle.

Näytteiden käsittely ja analyysit on suoritettu laboratorio-olosuhteissa, joten ympäristö on ollut suhteellisen puhdas. On kuitenkin syytä muistaa, että näytteet on todella helppo pilata esimerkiksi pitämällä näytepullojen korkkeja auki turhaan, jolloin näytteisiin pääsee ulkopuolelta ylimääräisiä epäpuhtauksia. Tällaiset epäpuhtaudet vääristävät tutkimustuloksia ja vaikeuttavat tulkintaa.

Aiheen tutkimista voisi jatkaa tutkimalla mikä olisi optimaalisin sekoitusaika, jolla saadaan jo tarkempaa kuvaa öljyn puhtaudesta. Tähän olisi hyvä olla jokin laite, jolla näyte sekoitetaan, jolloin eri aikojen vertailu on helpompaa.

LÄHTEET

Avantor 2023. Lämpökaapit universal UN/unplus. Viitattu 29.3.2023
<https://fi.vwr.com/store/product/9804630/lampokaapit-generation-nbsp-2012-universal-nbsp-un-unplus-luonnollinen-ilmankierto>

Avantor 2023. Ravistelijat, sekoittaja, raex 20-sarja. Viitattu 21.3.2023
<https://fi.vwr.com/store/product/595975/ravistelijat-sekoittaja-raex-nbsp-20-sarja>

Foselius, J. 1993. Hydraulikka. Muurame: Opetushallitus

Kauranne, H., Kajaste, J. & Vilenius, M. 2013 Hydraulikkatekniikka. Helsinki: Sanoma

Keinänen, T & Kärkkäinen P 2000 Hydraulikka ja pneumatiikka (Koneautomaatio 1). Porvoo: Ws bookwell Oy

Korpi, A., Manninen, A., Rinkinen, J & Suontama., K. 2006 Öljyjen kunnonvalvonta. Teoksessa Torvinen J. Teollisuusvoitelu. kunnossapidon julkaisusarja nro. 8. Helsinki: KP-Media Oy

Malinen, R., Pulkkinen, P., Rätty, K., Suontama, K & Vuolle, P. 2006 Voiteluaineen puhtaus. Teoksessa Torvinen J. Teollisuusvoitelu. Kunnossapidon julkaisusarja nro. 8. Helsinki: KP-Media Oy

Memmert 2019. Memmert ufts operating manual. Viitattu 21.3.2023
<https://www.memmert.com/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=4619&to-ken=de89243d9dedc26b137467ee4a7642b9df90cc31>

Motonet 2023. GT Sonic VGT-1730QT Ultraäänipesuri pro 100 w 3l. Viitattu 8.3.2023
<https://m.motonet.fi/fi/tuote/7004575/GT-Sonic-VGT-1730QT-ultraaani-pesuri-Pro-100-W-3-l>

Niiranen, E 2013. Öljynäytteiden hiukkaslaskenta mekaanisessa kunnonvalvonnassa. Kunnonvalvonta-kurssin materiaali. Jyväskylän ammattikorkeakoulu

Niiranen, E. 2011. Öljynäytteiden hiukkaslaskenta: mekaniikan kunnonvalvontaa mikrometrin tarkkuudella. Promaint, 5/2011. Viitattu 27.2.2023 https://promaint-intra.net/wp-content/uploads/promaint_2011-5_s54-60.pdf

Oulun ultra 2023. Ultraääni: Mitä se on ja mihin sitä käytetään. Viitattu 8.3.2023 <https://oulunultra.fi/ultraaani/>

PAMAS 2018a. PAMAS CMDM Condition monitoring data manager kunnonvalvontaohjelmisto. Viitattu 22.3.2023 https://www.pamas.de/fileadmin/user_upload/download/brochure/Softwareprogramme/CMDM_fi.pdf

PAMAS 2018b. PAMAS PMA Particle measuring and analysing software. Viitattu 21.3.2023 https://www.pamas.de/fileadmin/user_upload/download/brochure/Softwareprogramme/PMA_en.pdf

PAMAS 2023a. PAMAS S40. Viitattu 28.2.2023 https://www.pamas.de/particle-counters/products-by-name/pamas-s40/?gclid=Cj0KCQiA6fafBhC1ARIsAIJlL8mXr-8wj9Jg8P8N18rDC1abBx-ZPQtf2HMnajoyL_trd5Dzp0QfdwaAg17EALw_wcB

PAMAS 2023b. PAMAS SBSS. Viitattu 28.2.2023 https://www.pamas.de/particle-counters/products-by-name/pamas-sbss?gclid=Cj0KCQiA6fafBhC1ARIsAIJlL8liD_HTCIfCw_YA5i8X01M14uo9Rq6Wn7PeMzYf4pmgyKxBZrjCEdo-aAndvEALw_wcB

Suomi, J 2009 Kemiallisen näytteen esikäsittely. Helsinki: Otava