

Opinnäytetyö AMK

Tuotantotalous

2019

Joonas Rantonen

LAIVAN PÄÄKONEEN VOITELUAINEJÄRJESTELMÄN HUUHTELUPROSESSIN SUUNNITTELU

– Meyer Turku Oy

Joonas Rantonen

LAIVAN PÄÄKONEEN VOITELUAINEJÄRJESTELMÄN HUUHTELUPROSESSIN SUUNNITTELU

– Meyer Turku Oy

Opinnäytetyö tehtiin toimeksiantona Meyer Turku Oy:lle. Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia ja kehittää laivan pääkoneen voiteluainejärjestelmän huuhteluprosessia sekä luoda uusi huuhtelusuunnitelma lähitulevaisuudessa rakennettavien laivojen voiteluainejärjestelmille. Opinnäytetyössä käsitellään alaan ja aiheeseen liittyvää teoriaa ja käytäntöjä sekä esitetään tärkeät huomioon otettavat seikat voiteluainejärjestelmän huuhtelusta.

Laivan pääkoneiden valmistaja asettaa usein järjestelmän voiteluaineelle tietyn puhtausluokkavaatimuksen, joka yleensä perustuu ISO 4406 - tai NAS1638 -standardiin. Tarkoituksena oli selvittää, miten kyseinen järjestelmä saadaan huuhdeltua tämän puhtausvaatimuksen mukaiseksi mahdollisimman tehokkaasti ja luotettavin tuloksin. Järjestelmän huuhtelun tarkoituksena on poistaa asennusvaiheesta ja uudesta öljystä peräisin olevat epäpuhtaudet ja varmistaa, että koko putkisto ja voiteluainejärjestelmä ovat riittävän puhtaita.

Työn tarkoituksena on myös toimia ohjeena voiteluaine- tai muiden hydraulikkajärjestelmien huuhtelusuunitelmien luomisessa. Toiminnallisen opinnäytetyön tuloksena syntyi lopputuote eli huuhtelusuunnitelma ja huuhteluohje, jotka otettiin heti käyttöön tuotannon avuksi.

ASIASANAT:

epäpuhtaudet, hiukkaset, hiukkaslaskenta, huuhtelu, laivanrakennus, suodatus, voiteluaineet

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Industrial Management

2019 | 32+10

Joonas Rantonen

PLANNING THE FLUSHING PROCESS FOR MARINE MAIN ENGINE LUBRICATION OIL SYSTEM

- Meyer Turku Oy

This Bachelor's thesis was commissioned by Meyer Turku Oy. The aim of the thesis was to study and develop a flushing process of the lubrication oil system for the ship main engines. Also, to create a new flushing strategy for the lubrication oil systems for all the ships to be built in the near future. The thesis discusses the theory and practices related to the field and the subject, as well as the important things to consider when flushing the lubrication oil systems.

The ship's engine manufacturer often sets a specific cleanliness grade for the lubrication oil system, usually based on ISO-4406 or NAS-1638 cleanliness standards. The purpose was to find out how the system can be flushed to meet the cleanliness requirement set by the engine manufacturer in the most efficient way and with the reliable results. The purpose of the flushing process is to remove installation dirt and the dirt from a new oil and to check that the piping and the system have been adequately cleaned.

The purpose of this thesis is also to provide guidance for the reader on creating a flushing strategy for a lubrication oil system or other hydraulic systems. As a result of this functional thesis, a new flushing strategy and flushing instruction was developed which immediately became available for production.

KEYWORDS:

contaminants, filtration, flushing, lubricants, particles, particle counting, shipbuilding

SISÄLTÖ

SANASTO	6
1 JOHDANTO	7
2 VOITELUAINEEN PUHTAUS	9
2.1 Puhtausluokat	9
2.2 ISO 4406:2017	9
2.3 NAS 1638	11
2.4 SAE AS 4059	13
3 HUUHTELUPROSESSI	14
3.1 Toimet epäpuhtauksien ehkäisemiseksi	14
3.2 Huuhtelu	14
3.3 Puhtaustasojen mittaaminen	17
4 SUODATUS	19
5 VOITELUAINEJÄRJESTELMÄN KUVAUS	22
6 HUUHTELUSUUNNITELMA	25
6.1 Aikataulu	25
6.2 Toimenpiteet ennen huuhtelua	25
6.3 Öljyn bunkraus tankkeihin	26
6.4 Näytteenottopiste	27
6.5 Turbulenttinen virtaus ja suodatus	27
7 LOPUKSI	29
LÄHTEET	31

LIITTEET

- Liite 1. Huuhteluohjeet toimeksiantoyritykselle
- Liite 2. Huuhtelusuunnitelma havainnollistettuna
- Liite 3. Puhtausanalyysin tulokset

KAAVAT

Kaava 1. Reynoldsin luvun laskentakaava.	15
Kaava 2. β x-suhteen laskentakaava.	19
Kaava 3. Suodattimen erotuskyvyn laskentakaava.	20

KUVAT

Kuva 1. Laminaarinen ja turbulenttinen virtaus.	16
Kuva 2. MAK VM 46 DF -voiteluainejärjestelmä havainnollistettuna.	24

TAULUKOT

Taulukko 1. ISO 4406:2017:n puhtausluokat.	11
Taulukko 2. NAS 1638:n puhtausluokat.	12
Taulukko 3. SAE AS4059 rev. E puhtausluokat.	13

SANASTO

Bunkraus	Laivan säiliöiden täyttö eli tankkaus (Meyer Turku Oy, henkilökohtainen tiedonanto 10.05.2019).
Propulsio	Propulsio tarkoittaa järjestelmää, jolla tuotetaan työntövoimaa. Propulsiojärjestelmällä tässä opinnäytetyössä tarkoitetaan laivan potkurilaitteistoa.
Pääkone	Pääkone tarkoittaa laivassa käytettävää moottoria, joka on vastuussa aluksen käyttövoimasta satamasta toiseen. Laivoissa pääkoneita on yleensä 2–4 kappaletta.
Reynoldsin luku	Reynoldsin luku on tärkeä dimensioton suhdeluku virtausmekaniikassa. Se saadaan jakamalla fluidiosaseen vaikuttava inertia voima osasen muodonmuutosta vastustavilla voimilla. Reynoldsin luku on nimetty fyysikko Osborne Reynoldsin mukaan, joka esitti sen vuonna 1883. (Meyer Turku Oy, henkilökohtainen tiedonanto 10.05.2019.)
Viskositeetti	Viskositeetti on suure, joka kuvaa nesteen kykyä vastustaa virtaamista, ts. fluidin sisäistä kitkaa. Nesteet, joiden viskositeetti on pieni, ovat ohuempia (esim. vesi), ja nesteet, joiden viskositeetti on suuri, ovat paksumpia (esim. moottoriöljy). Viskositeetti riippuu lämpötilasta ja paineesta. (Meyer Turku Oy, henkilökohtainen tiedonanto 10.05.2019.)

1 JOHDANTO

Laivan pääkoneiden valmistaja asettaa usein järjestelmän voiteluaineelle tietyn puhtausluokkavaatimuksen, joka yleensä perustuu ISO 4406 - tai NAS 1638 -standardiin. Puhtauteen on kiinnitettävä erityistä huomiota, koska siihen käytetty panostus saadaan jatkossa takaisin lisääntyneenä käyttövarmuutena, sillä epäpuhtaudet voivat aiheuttaa vakavia toimintahäiriöitä voiteluainejärjestelmissä.

Voiteluaineen puhtaus todetaan hiukkasanalyysillä, josta nähdään öljyn sisältämän epäpuhtaushiukkasten määrä sekä kokojakauma. Järjestelmän huuhtelun tarkoituksena on poistaa asennusvaiheesta ja uudesta öljystä peräisin olevat epäpuhtaudet ja varmistaa, että koko putkisto ja voiteluainejärjestelmä ovat riittävän puhtaita. Puhtaus saavutetaan kierrättämällä voiteluainetta järjestelmässä yleensä virtausnopeudella, joka on paljon korkeampi kuin järjestelmän normaalikäytön aikana.

Tämä opinnäytetyö toteutettiin toimeksiantona Meyer Turku Oy:n konevarusteluosastolle. Tarkoituksena oli kehittää aiempaa laivan pääkoneen voiteluainejärjestelmän huuhteluprosessia ja luoda uusi huuhtelusuunnitelma lähitulevaisuudessa valmistettavien risteilijöiden voiteluainejärjestelmille.

Toiminnallisen opinnäytetyön tuloksena on tarkoitus luoda lopputuote eli huuhtelusuunnitelma ja huuhteluohje, jotka tulevat käyttöön tuotannon avuksi. Huuhtelusuunnitelman ja ohjeen tarkoituksena on havainnoida sitä, miten valmistajan asettama voiteluainejärjestelmän puhtaustaso tullaan saavuttamaan mahdollisimman tehokkaasti ja luotettavin tuloksin.

Opinnäytetyössä käsitellään alaan ja aiheeseen liittyvää teoriaa ja käytäntöjä sekä esitetään tärkeät huomioon otettavat seikat voiteluainejärjestelmän huuhtelusta. Työn tarkoituksena on myös toimia ohjeena voiteluaine- tai muiden hydraulikkajärjestelmien huuhtelusuunnitelmien luomisessa.

Turussa on rakennettu menestyksellisesti laivoja vuodesta 1737 alkaen. Nykyään Meyer Turku Oy työllistää on n. 2 000 työntekijää, ja se on erikoistunut erittäin vaativien, innovatiivisten ja ympäristöystävällisten risteilyalusten, autolauttojen ja erikoisalusten rakentamiseen. Meyer Turku on yhdessä Meyerin perheen omistamien, Papenburgissa sijaitsevan Meyer Werftin ja Rostockissa olevan Neptun Werftin kanssa yksi maailman johta-

vista risteilyalusten rakentajista. Yhtiö rakentaa parhaillaan risteilyaluksia Costa Crocierelle sekä Carnival Cruise Linesille. Yhtiön tilauskannassa on lisäksi viisi muuta risteilylaivaa Costa Crocieren ja Carnival Cruise Linesin lisäksi TUI Cruisesille sekä Royal Caribbean Internationalille. Meyer Turun tytäryhtiöihin kuuluvat Piikkiössä sijaitseva hyttitehdas Piikkio Works Oy, Shipbuilding Completion Oy, joka tarjoaa ratkaisuja laivojen yleisiin tiloihin avaimet käteen -periaatteella, sekä laivanrakennus- ja offshore-alan suunnitteluyritys ENG´nD Oy. (Meyer Turku Oy, henkilökohtainen tiedonanto 10.06.2019.)

2 VOITELUAINEEEN PUHTAUS

Voitelu on välttämätön prosessi monien koneistojen toiminnassa. Laivakoneistojen voitelu on hyvin monipuolinen, ja siihen vaikuttaa monet tekijät kuten konetyyppi, käyttöolosuhteet, lainsäädännöt ja konevalmistajien ohjeet. Voitelun perustavoitteena ovat kitkan vähentäminen, pintojen erottaminen toisistaan ja epäpuhtauksien sitominen, mutta voitelukohteesta riippuen samaa ainetta tarvitaan myös koneosien jäähdyttämiseen, värähtelyn vähentämiseen ja korroosion ehkäisyyn. (Kauhanen 2017, 6.)

Kiertovoitelujärjestelmä voitelee, jäähdyttää ja puhdistaa kohdetta. Se tuottaa oikean määrän öljyä voitelukohteisiin. Järjestelmä poistaa epäpuhtaudet, kuten kulumispartikkelit, hapettumistuotteet, veden ja ilmakuplat. (Kunnossapitoyhdistys Promaint ry 2013, 234.)

Järjestelmän voiteluaineen puhtausaste vaikuttaa merkittävästi sen suorituskykyyn ja käyttöikään, sillä epäpuhtaudet aiheuttavat keskimäärin 80 % hydraulikkajärjestelmien toimintahäiriöistä. Siksi on tärkeää käyttää järjestelmässä puhdasta öljyä, sillä se vähentää kulumista merkittävästi, ja osat kestävät pidempään. Puhtauteen on kiinnitettävä erityistä huomiota, koska siihen käytetty panostus saadaan jatkossa takaisin lisääntyneenä käyttövarmuutena. (PSK 6709.)

2.1 Puhtausluokat

Öljyn puhtausluokituksissa käytetään yleensä erilaisia standardeja. Niissä määritellään tietyn järjestelmän öljyn kiinteiden epäpuhtaushiukkasten lukumäärä eri kokojakaumiin. Puhtausluokat esitetään tyypillisesti kansainvälisten standardien ISO 4406:n, NAS 1638:n tai SAE AS4059:n mukaisesti. (Kunnossapitoyhdistys Promaint ry 2013, 117.)

2.2 ISO 4406:2017

Yksi yleisin käytetty standardi on kansainvälinen ISO 4406:2017 -standardi ja -luokitusjärjestelmä, joka perustuu sen alkuperäiseen ISO 4406:1987 -julkaisuun. Sillä määritellään tietyn hydraulikkajärjestelmän käytössä olevan öljyn sisältämän hiukkasten määrä ja kokojakauma. Standardin tarkoituksena on yksinkertaistaa hiukkaslaskennan esitystä

ilmoittamalla hiukkasten lukumäärät laajemmissa kokoluokissa koodien avulla, missä yhden kokoluokan kasvu kaksinkertaistaa hiukkasten lukumäärän. (ISO 4406:2017.)

ISO 4406:2017 -standardi ilmoittaa hiukkaskoot kumulatiivisesti kolmessa eri kokoluokassa: $\geq 4 \mu\text{m}(c)$, $\geq 6 \mu\text{m}(c)$, $14 \mu\text{m}(c)$. Merkintä (c) tarkoittaa, että hiukkaskoon mittaus on tehty automaattisella hiukkaslaskimella, joka on kalibroitu ISO 11171 standardin mukaisesti. ISO 4406:n mukainen luokitus perustuu kolmen numeron tunnukseen, esimerkiksi 19/17/14. Ensimmäinen numero ilmoittaa suurempien kuin $4 \mu\text{m}$:n hiukkasten lukumäärän, toinen numero suurempien kuin $6 \mu\text{m}$:n hiukkasten lukumäärän ja kolmas numero suurempien kuin $14 \mu\text{m}$:n hiukkasten lukumäärän. (ISO 4406:2017.)

Taulukko 1 esittää ISO 4406:2017:n hiukkasmäärät puhtausluokittain. Puhtausluokat on järjestetty sen mukaan, kuinka monta hiukkasta on laskettu yhdestä millimetristä nesteistä näytettä.

Taulukko 1. ISO 4406:2017:n puhtausluokat (ISO 4406:2017).

Hiukkasten lukumäärä/1 ml		Puhtausluokka (ISO-koodi)
Enintään	Vähintään	
2 500 000		-
1 300 000	2 500 000	28
640 000	1 300 000	27
320 000	640 000	26
160 000	320 000	25
80 000	160 000	24
40 000	80 000	23
20 000	40 000	22
10 000	20 000	21
5 000	10 000	20
2 500	5 000	19
1 300	2 500	18
640	1 300	17
320	640	16
160	320	15
80	160	14
40	80	13
20	40	12
10	20	11
5	10	10
2,5	5,0	9
1,3	2,5	8
0,64	1,3	7
0,32	0,64	6
0,16	0,32	5
0,08	0,16	4
0,04	0,08	3

2.3 NAS 1638

Päinvastoin kuin ISO 4406, NAS 1638 ei ole kumulatiivinen, vaan hiukkasmäärät lasketaan tietyillä väleillä. NAS 1638 -standardin konsepti esitetään taulukossa 2, jossa hiukkaskoot on jaoteltu viiteen eri kokoalueeseen ja kahteentoista eri puhtausluokkaan. Hiukkasten lukumäärä lasketaan 100 ml:n näytteestä. Tulokseksi saadaan puhtausluokka, joka yleensä määritellään huonoimman tuloksen antavan, eli todennäköisesti 5–15 µm:n kokoalueen perusteella. Koska puhtausluokituksen määrittäminen perustuu vain yhteen koko-

luokkaan, saattaa se antaa hyvinkin harhaanjohtavan käsityksen järjestelmän puhtaus-
tasosta, sillä sen perusteella ei voida välttämättä kuvata koko järjestelmän hiukkasja-
kaumaa. (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2008, 380–381.)

Puhtausstandardi NAS 1638 kehitettiin alkujaan ilma-alusten komponenttien puhtaus-
tarkkailuun, mutta se on ollut laajasti käytössä myös muissa teollisuudenalojen hyd-
rauliikkasovelluksissa (Bensch 1999, 3). NAS 1698 -standardia käyttäessä on kuitenkin
tarpeellista huomioida, että SAE AS 4059D:n hiukaskokojen määrittelyperiaatteiden
myötä se on virallistesti poistettu käytöstä (Kunnossapitoyhdistys Promaint ry 2013,
117), vaikka se on vielä tietyillä teollisuudenaloilla käytössä, muun muassa meriteolli-
suudessa.

Taulukko 2. NAS 1638:n puhtausluokat (MAN Diesel & Turbo 2015, 6).

NAS 1638 -luokka	Hiukkasten lukumäärä/100 ml				
	Kokoalueet				
	5-15 µm	15-25 µm	25-50 µm	50-100 µm	>100 µm
0	125	22	4	1	0
0	250	44	8	2	0
1	500	89	16	3	1
2	1 000	178	32	6	1
3	2 000	356	63	11	2
4	4 000	712	126	22	4
5	8 000	1 425	253	45	8
6	16 000	2 850	506	90	16
7	32 000	5 700	1 012	180	32
8	64 000	11 400	2 025	360	64
9	128 000	22 800	4 050	720	128
10	256 000	45 600	8 100	1 440	256
11	512 000	91 200	16 200	2 880	512
12	1 024 000	182 400	32 400	5 760	1 024

ISO 4406:2017 -ja NAS 1638 -standardien vertailu toimeksiannossa on esitetty liitteessä
1.

2.4 SAE AS 4059

Kuten ISO 4406 ja NAS 1638, niin myös SAE AS 4059 kuvaa hiukkasjakautumaa nesteessä. SAE -puhtausluokat perustuvat hiukkaskokoon, määrän ja jakautumaan. Hiukkaskokoluokat ilmoitetaan nimetyin kirjaimin (A–F). SAE AS4059D -standardi perustuu kumulatiivisten hiukkasmäärien vertailuun NAS 1638 -standardissa käytettyyn differentiaaliseen verrattuna. (Kunnossapitoyhdistys Promaint ry 2013, 117–118.) Vaikka SAE AS 4059 onkin osittain korvannut NAS 1638 standardin, se ei ole tällä hetkellä käytössä kyseisessä toimeksiannossa.

Taulukko 3. SAE AS4059 rev. E puhtausluokat (Parker Hannifin Oy 2012).

MTD	Hiukkasten lukumäärä/100 ml					
	>4µm	>6µm	>14µm	>21µm	>38µm	>70 µm
ACFTD	>2µm	>5µm	>15µm	>25µm	>50µm	>100µm
Kokoluokka	A	B	C	D	E	F
0,00	195	76	14	3	1	0
0,0	390	152	27	5	1	0
0	780	304	54	10	2	0
1	1 560	609	109	20	4	1
2	3 120	1220	217	39	7	1
3	6 250	2430	432	76	13	2
4	12 500	4 680	864	152	26	4
5	25 000	9 730	1730	306	53	8
6	50 000	19 500	3 460	612	106	18
7	100 000	38 900	6 920	1220	212	32
8	200 000	77 900	13 900	2450	424	64
9	400 000	156 000	27 700	4 900	848	128
10	800 000	311 000	55 400	9 800	1 700	256
11	160 000	623 000	111 000	19 600	3 390	512
12	320 000	1 250 000	222 000	39 200	6 780	1 024

Taulukossa merkintä MTD tarkoittaa, että mittaus on tehty hiukkaslaskimella, joka on kalibroitu ISO 11171 -standardin mukaisesti. ACFTD tarkoittaa, että mittaus on tehty hiukkaslaskimella, joka on kalibroitu ISO 4402 -standardin mukaisesti.

3 HUUHTELUPROSESSI

3.1 Toimet epäpuhtauksien ehkäisemiseksi

Standardi (ISO 28521:2009), mikä käsittelee hydraulikkajärjestelmien putkien puhdistustapoja ja -tasoja, edellyttää, että voiteluöljyjärjestelmän putkien sisäpinnat ovat valmistuksen jälkeen ja ennen asennusta puhdistettu ruosteesta, irtoliasta ja kuona-aineista joko kemikaalisesti tai mekaanisesti. Tämän jälkeen olisi suositeltavaa käsitellä putkien sisäpinnat järjestelmään sopivalla suoja-aineella. Lisäksi on varmistettava, että järjestelmän eri toimittajien dynaamiset ja staattiset komponentit ovat riittävän puhtaita, kun ne toimitetaan. Putkien säilytyksen, kuljetuksen ja asennuksen ajaksi putkien sisäpintojen likaantumisen ja korroosion estämiseksi on niiden päät tulpattava tavalla, millä putkiin ei pääse enää irtolikaa eikä kosteutta. Putkien asennusvaiheessa tulpat voidaan poistaa varoen, mutta on tärkeää varmistaa, että kaikki auki jäävät putkien päät on pidettävä edelleen tulpattuna. Ennen huuhtelun aloittamista olisi suositeltavaa puhaltaa putkilinjat paineilmalla huuhteluajan lyhentämiseksi. (ISO 28521:2009.)

3.2 Huuhtelu

Järjestelmän komponenttien ja putkien valmistuksesta sekä asennuksesta peräisin olevat hiukkassaastumat voivat kiertyä järjestelmässä ja vahingoittaa sen komponentteja. Vaurioiden ehkäisemiseksi on järjestelmä huuhdeltava ennalta määritellyä puhtaustasoa vastaavaksi. Huuhteluprosessin tarkoituksena on siis poistaa asennusvaiheesta peräisin olevat epäpuhtaudet ja varmistaa, että koko putkisto ja voiteluainejärjestelmä ovat riittävän puhtaita. Puhtaus saavutetaan kierrättämällä voiteluainetta järjestelmässä yleensä virtausnopeudella, joka on paljon korkeampi kuin järjestelmän normaalikäytön aikana. Järjestelmän huuhtelussa voidaan käyttää sen sisäistä pumppua ja siihen suunniteltua öljyä, jos riittävä virtausnopeus sekä virtauksen turbulentsisuus saavutetaan. Muussa tapauksessa käytetään huuhteluun tarkoitettua pienempiviskositeettista öljyä, ulkoista pumppua tai erillistä huuhtelukoneikkoa. (ISO 23309:2007; ISO 28521:2009.)

Vaikka markkinoilla on erityyppisiä ja eri ominaisuuksilla varustettuja huuhteluun tarkoitettuja pienempiviskositeettisiä öljyjä, huuhtelu tapahtuu yleensä kustannussyistä järjestelmässä käytettävällä voiteluöljyllä. Jos järjestelmässä käytettävällä öljyllä on liian suuri

viskositeetti-arvo vaaditun turbulentsin virtauksen saavuttamiseksi, voidaan järjestelmään sopivaa pienempiviskositeettista huuhteluöljyn käyttöä harkita. Mikäli huuhtelussa tarvitsee käyttää huuhteluöljyä, on erityisen tärkeää varmistaa, että se on yhteensopiva kaikkien järjestelmän komponenttien kanssa. Järjestelmä pitää huuhtelun jälkeen kautaltaan tyhjentää käytetystä huuhteluöljystä. Järjestelmäöljy on lisättävä järjestelmään heti huuhteluöljyn tyhjennyksen jälkeen, sillä tässä kohtaa viive voi johtaa puhdistettujen pintojen ruostumiseen. (BFPA/P9 2004, 3.)

Turbulentsin virtauksen saavuttaminen voi yleensä edellyttää erillisen pumppausjärjestelmän käyttöä. Hiukkasmaiset epäpuhtaudet saadaan tehokkaimmin poistettua järjestelmästä turbulentsilla virtauksella. Se, että virtaus pystyy kuljettamaan mukanaan väliainetta tiheämpiä hiukkasia, perustuu turbulenssiin. (BFPA/P9 2004, 3–4; ISO 23309:2007.)

Reynoldsin luku on dimensioton suure virtausmekaniikassa, jolla kuvataan virtauksen luonnetta. Se saadaan jakamalla nesteosaseen vaikuttava inertiaovoima nesteosaseen muodonmuutosta vastustavilla voimilla. (Meyer Turku Oy, henkilökohtainen tiedonanto 10.05.2019.) Reynoldsin luku saadaan johdettua kaavasta 1.

$$Re = \frac{21220 \times qv}{v \times d}$$

$$qv = \frac{d \times Re \times v}{21\,220}$$

missä,

qv tilavuusvirta [l/min] v

v nesteen kinemaattinen maksimiviskositeetti [mm²/s]

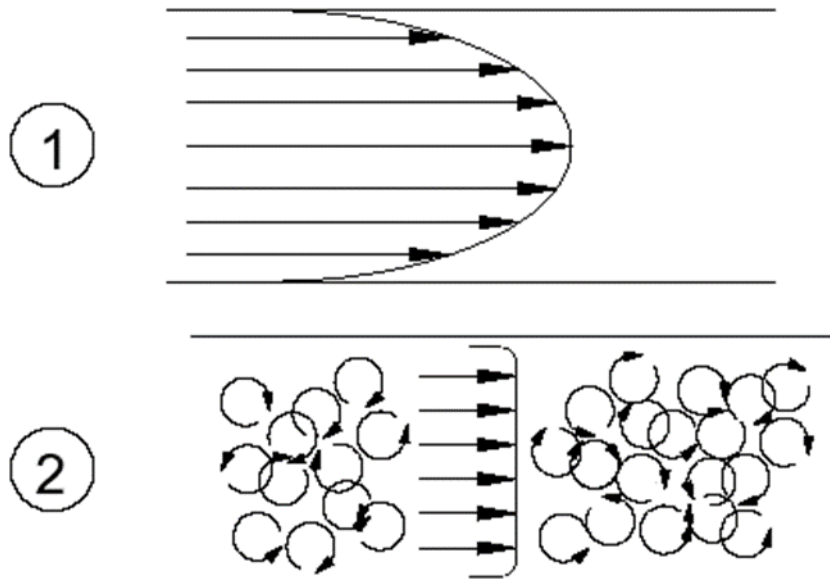
d putken sisähalkaisija [mm].

Kaava 1. Reynoldsin luvun laskentakaava (ISO 23309:2007).

Jos Reynoldsin luku jää alle 3 000...4 000 siihen voidaan vaikuttaa, joko kasvattamalla tilavuusvirtaa tehokkaammalla pumpulla tai alentamalla viskositeettia. Viskositeettia voidaan pienentää kasvattamalla öljyn lämpötilaa tai käyttämällä pienempiviskositeettista

huuhteluöljyä. Öljyä lämmittäessä tulee ottaa huomioon järjestelmän komponenttien lämmönkestävyys. (ISO 23309:2007.)

Putkivirtaus voi olla luonteeltaan laminaarista tai turbulenttista. Laminaarisessa virtauksessa nesteosasten liikeradat ovat yhdensuuntaisia, eivätkä ne sekoitu keskenään, eli ne seuraavat tiettyä rataa, jota kutsutaan *virtaviivaksi*. Näin virtaus pysyy paremmin koossa. Pyöreissä putkissa virtaus on laminaarinen, kun Reynoldsin luku on $< 2\,300$. Virtaus voi olla laminaarinen myös suuremmillakin Re-arvoilla, mutta tilanne on silloin labiili, jolloin virtaus voi muuttua turbulenttiseksi pienenkin häiriötekijän ansiosta, vaikka virtausnopeus ei kasvaisikaan. Jos virtaus on turbulenttinen, sen nesteosasten liikeradat eivät ole yhdensuuntaisia, vaan ne sekoittuvat jatkuvasti. Virtauksen muuttuminen laminaarisesta turbulenttiseksi tapahtuu virtausnopeuden kasvaessa, kun putkikoko pysyy vakiona. Tällöin nesteeseen alkaa syntyä pyörteitä yksittäisten nesteosasten poiketessa virtaviivoiltaan. Kun virtausnopeus kasvaa tarpeeksi, pyörteily lisääntyy ja lopulta virtaus muuttuu täysin pyörteelliseksi eli turbulenttiseksi, jossa nesteosaset liikkuvat vapaasti noudattamatta tarkkoja ratoja. Pyöreään putken virtaus on yleensä turbulentti, kun Re-luku on $> 2\,300 \dots 2\,500$. (T. Paanu, henkilökohtainen tiedonanto 2016.)



Kuva 1. Laminaarinen ja turbulenttinen virtaus (T. Paanu, henkilökohtainen tiedonanto 2016).

3.3 Puhtaustasojen mittaaminen

Puhtaustason mittaamiseen voiteluainejärjestelmästä on vuosien saatossa kehitetty monenlaisia keinoja. Oikein otetulla ja mitatulla öljynäytteellä saavutetaan suuria säästöjä teollisuudessa. Tarvitaan paljon tietoa ja kokemusta aina näytteenotosta sen tulkintaan ennen kuin analyysitulokset kertovat järjestelmän todellisen tilanteen; toisin sanoen tulos on todellinen. Hiukkaslaskennassa törmää usein ongelmaan, jossa samasta järjestelmästä tai jopa samasta näytteestä saadaan helposti hyvinkin poikkeavia tuloksia. Syy tähän voi olla, että tutkittavassa järjestelmässä puhtaustaso vaihtelee sen eri osissa, näyte on otettu väärästä kohtaa tai analysoija on käyttänyt sopimatonta analyysimenetelmää. (Vesala 2005, 22–27.)

Puhtausanalyysissä lasketaan hiukkamääriä ja hiukaskokojakaumia, tarkastellaan eri tyyppisiä epäpuhtaushiukkasia sekä tutkitaan voiteluaineen vesi- ja kaasupitoisuuksia. Perinteisin menetelmä mitata voiteluaineen puhtautta on ottaa mitattavasta kohteesta pullonäyte. Koska analysointi tapahtuu irrallaan järjestelmästä, sitä kutsutaan *offline-analyysiksi*. Laboratorio-olosuhteissa tehtävä analysointi on tarkka ja luotettava, ja sillä saadaan mitattua voiteluaineen kaikki fyysiset ja kemialliset ominaisuudet. Mikroskooppitutkimus laboratorio-olosuhteissa soveltuu kaiken tyyppisille näytteille. Näytteen vesi-pitoisuus tai viskositeetti ei rajoita analyysiä, eikä se vaikuta saatuun lopputulokseen. Mikroskoopilla saadaan myös kvalitatiivista tietoa kvantitatiivisen tiedon lisäksi järjestelmästä havaituista epäpuhtauksista. Menetelmän haittapuolina ovat paitsi tuloksen saamisen hitaus myös itse näytteen edustuskelpoisuus. Tärkeää on muistaa, että näyte tulee ottaa järjestelmässä kulkevasta öljystä eikä säiliössä seisovasta öljystä. Öljyn pitää olla lämmintä ja näyte tulisi ottaa kohdasta, jossa virtaus on turbulентinen. Myös näytteenottopiste kannattaa puhdistaa ulkopuolelta sekä öljyä valuttaa jäteastiaan muutamia litroja ennen näytteenottoa. (Honkola 2018, 18; Vesala 2005, 22–27.)

Myös näytepullon puhtauteen tulee kiinnittää huomiota. Esimerkiksi juomapullo ei ole koskaan riittävän puhdas kiinteiden epäpuhtauksien puhtaustason määrittelyyn. Näytepullon on oltava mahdollisimman hiukkasvapaa luotettavan tuloksen varmistamiseksi. Näytettä ottaessa pullon korkki avataan juuri ennen öljyn johtamista pulloon, ettei ympäristössä oleva lika pääse sisälle pulloon. Korkki tulee sulkea heti näytteenoton jälkeen, myöskään ei ole suotavaa täyttää näytepulloa täyteen vaan pieni sekoitusvara on hyvä jättää. (Kunnossapitoyhdistys Promaint ry 2013, 113–117; Vesala 2005, 22–27)

Kenttäkäyttöisten hiukkaslaskinten kehittyessä on tullut mahdolliseksi mitata voiteluaineen puhtautta suoraan järjestelmästä. Tätä mittaustapaa kutsutaan online-analyysiksi. Mittaus tapahtuu reaaliajassa, joko järjestelmän jo toimiessa tai huuhtelun yhteydessä. Tärkeimpinä etuina *offline-analyysiin* verrattuna on se, että automaattinen hiukkaslaskenta on yksinkertaisempi ja helpompi. Voiteluaineen puhtausluokka nähdään lähes reaaliajassa laitteen näytöltä ja tiedot voidaan tallentaa sähköisesti tarkempaa analysointia varten. Käyttäjä voi esimerkiksi seurata voiteluaineen puhtauden kehittymistä trenditietona tietokoneelta. Näin voiteluaineen puhtautta voidaan mitata useista eri järjestelmän kohdista. Myöskään ulkoiset epäpuhtaudet eivät pääse saastuttamaan näytettä, sillä voiteluaine virtaa suljettua letkua pitkin sensorille. Monet hiukkaslaskurit ovat varustettu myös pumpulla, joka vakioi virtauksen eri paineista mitattaessa, sekä mahdollistaa myös pullonäytteen ottamisen. Vaikka online-hiukkaslaskimen käytöllä saavutetaan paljon etuja, on tärkeä tietää, että välttämättä pelkkä hiukkaslaskentatulokset ei ole riittävä, vaan tarvitaan tietoa voiteluaineessa mahdollisesti esiintyvistä kaasuisista tai nesteiden määrästä ja havaittujen kiinteiden epäpuhtauksien materiaaleista. Siksi kenttäkäyttöisen hiukkaslaskurin tukena on ihanteellista käyttää perinteistä mikroskooppitutkimusta. Kummankaan analyysitavan ei ole tarkoitus kilpailla toisen kanssa vaan niiden pitäisi täydentää toisiaan. (Kunnossapitoyhdistys Promaint ry, 113-117; Vesala 2005, 22–27.)

4 SUODATUS

Huuhtelussa käytettävät suodattimet määräävät lopullisen puhtausasteen ja puhdistusajan. Optimaalisen suodatusasteen omaavan suodattimen valinta on tärkeää. Jos käytetään suodattimia, joiden suodatusaste on tarkoitukseen riittämätön voi syntyä tilanteita, joissa määriteltyä puhtaustasoa ei voida saavuttaa tai se saavutetaan vasta laajennetun huuhtelujakson jälkeen. Vaaditun puhtausluokan saavuttaminen edellyttää siis epäpuhtauksien poistamista tietyllä tarkkuudella. (ISO 23309:2007.)

Suodattimet luokitellaan usein niiden tehokkuuden mukaan poistaa epäpuhtauksia nesteestä. Tehokkuus voidaan ilmoittaa suodatussuhteena, absoluuttisena suodatusasteena tai nimellisenä suodatusasteena. Suodattimen valinnassa pitää ottaa sen tehokkuuden lisäksi huomioon myös: järjestelmän nimellistilavuusvirta, epäpuhtauskapasiteetti, kokoonpuristumis- ja repeytymispaine, väsymiskestävyys, nesteen viskositeetti sekä käyttölämpötila. Epäpuhtauskapasiteetti ilmaisee kiinteän epäpuhtauden kokonaisuuden, jonka suodatin on poistanut nesteestä suodattimen aiheuttaman painehäviön saavuttaessa sille sallitun maksimiarvonsa eli suodattimen tukkeutuessa. Kokoonpuristuspaineella tarkoitetaan suodatinpanoksen yli vallitsevaa paine-eroa, jolla panos vaurioituu, kun nesteen virtaussuunta on panoksen ulkopuolelta sisälle. Repeytymispaineella ilmaistaan suodatinpanoksen paine-eron kesto, kun virtaussuunta on sisältä ulos. (Kauranne ym. 2008, 388–390.)

β_x -suodatussuhde on luokitusjärjestelmä, jonka tarkoituksena on antaa sekä suodattimen valmistajalle että sen käyttäjälle tarkka ja edustava vertailuarvo eri suodattimien välille. Se on dimensioton suhdeluku, joka ilmoittaa tiettyä kokoa suurempien hiukkasten määrän suodattimen tulovirrassa suhteessa vastaavien hiukkasten määrään suodattimen lähtövirrassa. (Kauranne ym. 2008, 388–389; Sparks & Chase 2015, 39–44.)

$$\beta_x = \frac{N_1}{N_2}$$

Kaava 2. β_x -suhteen laskentakaava (Kauranne ym. 2008, 388).

Missä β_x on suodatussuhde hiukkaskoolle x [μm], N_1 suodattimen tulovirrassa olevien kokoa x suurempien hiukkasten määrä ja N_2 on suodattimen lähtövirrassa olevien kokoa x suurempien hiukkasten määrä. Tästä seuraa, että mitä suurempi suodatussuhde on, sitä suuremmalle hiukkaskoolle se on määritetty. Tällöin eri valmistajien suodattimien

suodatuskyvyn keskinäinen vertailu on mahdotonta, ellei niitä ole mitattu samalla hiukkaskoolla. Tästä syystä suodattimille on yleisesti tapana ilmoittaa se hiukkaskoko, jolla suodatussuhde saa vähintään arvon 75; Esimerkiksi suodattimelle on annettu arvo $\beta_5 > 75$, joka ilmoittaa, että se suodattaa vähintään 98,7 % niistä hiukkasista, jotka ovat kooltaan suurempia kuin $5\mu\text{m}$, jolloin suodatin on suodatuskyvyltään parempi kuin esimerkiksi suodatin, jolle on ilmoitettu arvo $\beta_{10} > 75$. Suodatussuhteen avulla voidaan määrittää myös toinen suodattimen tehokkuutta kuvaava tunnusluku, suodattimen erotuskyky, joka ilmoittaa, kuinka suuren prosentuaalisen osan tietyn kokoisista hiukkasista suodatin poistaa läpivirtaavasta nesteestä. (Kauranne ym. 2008, 388–389; Sparks ym. 2015, 39–44.)

$$s_x = \left(1 - \frac{1}{\beta_x}\right) \cdot 100\%$$

Kaava 3. Suodattimen erotuskyvyn laskentakaava (Kauranne ym. 2008, 388).

Vaikkakin suodatussuhteen määrittämiskokeessa on pyritty siihen, että koetilanne vastaisi mahdollisimman tarkasti todellista käyttötilannetta on suodattimia vertailtaessa hyvä ottaa huomioon se, että kokeen aikana suodattimen läpi kulkee vakioilavuusvirta, ja suodattimen yli vallitseva paine-ero nousee vähitellen koehiukkasten tukkiessa suodattimen huokokset. Todellisuudessa suodattimen läpi kulkeva virtaus ja suodattimessa vaikuttava paine vaihtelee usein suuresti. Kokeessa ei myöskään ole huomioitu nesteen lämpötilaa, viskositeettia, eikä järjestelmän sisältämän epäpuhtauksien koostumusta tai dimensiota. (Kauranne ym. 2008, 388–389.)

Absoluuttinen suodatusaste kertoo suodattimessa olevan suurimman huokosen mitan, minkä pallomainen hiukkanen voi läpäistä tietyissä koeoloissa. Tätä [μm] yksikössä ilmaistava luku ei todellisuudessa voi pitää täysin paikkansa, sillä todelliset epäpuhtaushiukkaset poikkeavat suuresti sekä muodoltaan että mitoiltaan koeoloista. (Kauranne ym. 2008, 388–389.)

Nimelliselle suodatusasteelle ei ole standardoitua määritelmää suodattimen tehokkuuden ilmaisemille, vaan se on suodatinvalmistajan itse määrittelemä. Valmistajien ilmoittama nimellisen suodatusasteen arvo perustuu usein siihen, että suodatin pystyy poistamaan 90-98% tietyn kokoisista hiukkasista. (Kauranne ym. 2008, 388–389; Sparks ym. 2015, 39–44.)

Huuhtelusuodattimiin valitaan usein joko pintasuodattavia- tai syväsuodattavia suodatuspanoksia. Syväsuodatin eroaa pintasuodattimesta siten, että epäpuhtaudet eivät jää suodatinmateriaalin pinnalle vaan ne voivat kulkeutua syvemmälle suodatinmateriaalin ennen pysähtymistä. Näin syväsuodatin pystyy sitomaan itseensä enemmän epäpuhtauksia kuin pintasuodatin, joten sen käyttöikä on huomattavasti pidempi. Syväsuodatuspanokset valmistetaan usein kuitumatoista, jotka tehdään levittämällä useita kerroksia eripaksuisia selluloosa-, kangas-, muovi-, lasi- tai metallikuituja päällekkäin. Siksi pintasuodatusperiaatetta voidaan pitää syväsuodatusperiaatetta täsmällisempänä, sillä pintasuodatuspanoksissa kaikki virtausaukot ovat teoreettisesti yhtä suuria, minkä vuoksi lähes kaikki aukkojen läpimittaa suuremmat hiukkaset jäävät suodattimen pinnalle. Pintasuodattavien suodatinpanoksien valmistuksessa käytetään usein metallilangoista, selluloosa- tai muovikuiduista valmistettuja ohuita kankaita. (Kauranne ym. 2008, 384–386.)

5 VOITELUAINEJÄRJESTELMÄN KUVAUS

Laivankoneistojen kiertovoitelujärjestelmä muodostuu yleensä sisä- ja ulkokierrosta. Sisäkierto, jossa tapahtuu koneiston varsinainen voitelu, on rakennettu pääkoneen sisälle. Sen tarkoituksena on suorittaa useita perustoimintoja, kuten: kitkan vähentäminen kulumispinnoilla, koneiston liikkuvien osien jäähtyminen, männänrenkaiden ja sylinterien välinen tiivistys, syövyttävien palamistuotteiden neutralisointi, sekä moottorin puhdistus liialta ja kulumispartikkeleilta. (Häkkinen 1999, 168–170)

Ulkokierto muodostuu kiertööljytankista, putkistoista, pumpuista, suodattimista ja separaattorista. Sen päätarkoituksena välittää tarpeeksi viileää ja puhdasta voiteluainetta pääkoneelle. Laivoissa käytettävät päämoottorit vaativat yleensä suuren kiertööljytankin. Se on rakennettu kaksoispohjaan suoraan moottorin alle niin, että öljy pääsee vapaasti virtaamaan takaisin kiertööljytankkiin. (Häkkinen 1999, 170)

Yksinkertaistettuna järjestelmä toimii siten, että pääkoneen voiteluöljypumppu imee kiertovoitelutankista imusuodattimen läpi öljyn, josta se lähtee paineellisena automaattifiltterin läpi jäädyttimelle, mistä se matkaa *duplex*-filtterin kautta pääkoneen voiteluöljykanavia eli sisäkiertoa pitkin voitelukohteisiin. Voiteluaine palaa takaisin kiertovoitelutankkiin painovoimaisesti.

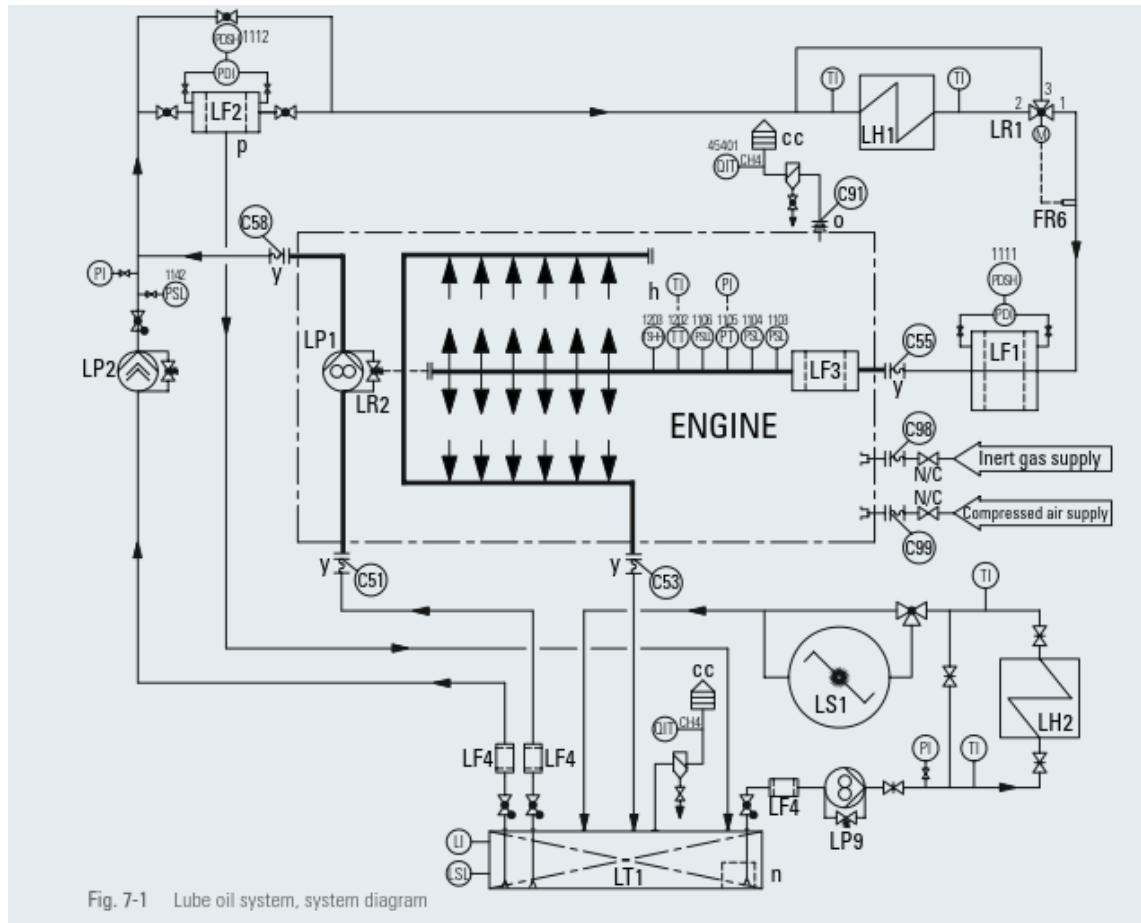
Voiteluaine vaatii jatkuvaa puhdistamista, sillä palamisprosesseista voiteluaineeseen joutuu aineita, jotka huonontavat sen ominaisuuksia. Se hapettuu ja likaantuu, sekä sen lisäaineet kuluvat ja analyysi muuttuu, ja usein voiteluaineeseen sekoittuu myös vettä. Voiteluaine puhdistetaan separaattorilla, jonka puhdistustekniikka perustuu keskipakovoimaan. Separaattorilla voidaan tehokkaasti poistaa voiteluaineesta suuriakin epäpuhtausmääriä mukaan lukien pienimmätkin hiukkaset. Separaattorissa sen läpi virtaava voiteluaine kiertää suurella nopeudella pyörivien separaattoripeltien lävitse, jossa keskipakovoima erottaa voiteluaineesta olevat epäpuhtaudet ja veden. Separaattorissa epäpuhtaudet siirtyvät sen ulkokehälle ja tietyn paineen saavuttaessa purkausaukot avautuvat ja epäpuhtaudet purkaantuvat jäteöljytankkiin. Prosessin jälkeen puhdistettu voiteluaine jatkaa takaisin kiertööljytankkiin. (Kauhanen 2017, 18; Häkkinen 1999, 169)

Kun moottori on käynnissä, voitelu tapahtuu konevetoisella voiteluöljypumpulla. Jokainen päämoottori on varustettu myös sähkömoottorikäyttöisellä magneettikytketyllä esi-voitelupumpulla. Se käynnistyy ennen moottorin käynnistystä ja pysähtyy, kun moottorin

kierrosluku nousee yli asetetun rajapisteen. Moottorin pysähtyessä pumppu käynnistyy, kun asetettu rajapiste alitetaan.

Ulkokierrossa on kaksi (2) pääsuodatinta, jotka suojaavat moottoria epäpuhtauspartikkeleilta. Toinen suodattimista on automaattisuodatin, joka toimii vastahuuhteluperiaatteella. Paine-eroon perustuva automatiikka ohjaa vastahuuhtelua. Vastahuuhtelussa virtaussuunta kääntyy suodatinelementtiä vastakkaiseksi ja putkilinjassa vallitseva paine aiheuttaa voimakkaan virtauksen avoimeen tilaan, esim. viemäriin. Tällöin suodatetut epäpuhtaudet siirtyvät ulos suodattimesta. Automaattisuodattimen absoluuttinen suodatusaste on 34 µm. *Duplex*-filtteri koostuu kahdesta suodatinpesästä, joissa molemmissa on 80 µm:n suodatinelementit. Järjestelmässä on käytössä karkeammat suodattimet kuin voiteluöljyn huuhtelussa, koska niiden tehtävänä on vain ylläpitää tiettyä puhtautta eikä enää puhdistaa sitä.

MAK VM 46 DF -moottorin voiteluainejärjestelmä pääpiirteittäin on nähtävissä kuvassa 2, jossa ohut viiva kuvaa ulkokiertoa ja paksumpi sisäkiertoa.



FR6	Sensor for temperature control valve	LI	Level indicator
LF1	Duplex lube oil filter	LSL	Level switch low
LF2	Self cleaning lube oil filter	PDI	Diff. pressure indicator
LF3	Protective strainer	PDSH	Diff. pressure switch high
LF4	Suction strainer	PI	Pressure indicator
LH1	Lube oil cooler	PSL	Pressure switch low
LH2	Lube oil preheater	PT	Pressure transmitter
LP1	Lube oil force pump	QIT	Gas indicator and transmitter
LP2	Lube oil stand-by force pump	TI	Temperature indicator
LP9	Transfer pump (separator)	TSHH	Temperature switch high
LR1	Lube oil temperature control valve	TT	Temperature transmitter (PT100)
LR2	Oil pressure regulating valve		
LS1	Lube oil separator		
LT1	Lube oil sump tank		

Kuva 2. MAK VM 46 DF -voiteluainejärjestelmä havainnollistettuna (Caterpillar Motoren GmbH & Co 2017, 78).

6 HUUHTELUSUUNNITELMA

Järjestelmän huuhtelusuunnitelmassa kuvataan tässä kappaleessa, joka myös hyväksytään moottorivalmistajalla. Suunnitelma sisältää koko järjestelmän huuhtelun asennuspaikalla. Huuhtelusuunnitelmassa havainnollistetaan putkilinjojen ja toimilaitteiden huuhteluperiaate erillisellä kaaviolla, joka on nähtävissä liitteessä 2. Suunnitelmaan sisältyy aikataulu, puhtausluokkatavoite ja laskema turbulenttisen virtauksen saamiseksi, sekä näytteenottopiste ja tapa jolla puhtaus on todettu. Moottorivalmistajan asettama puhtaus- tasovaatimus on ilmoitettu liitteessä 1.

6.1 Aikataulu

Laivanrakennuksen tuotantoaikataulua täydentävät ns. ”kovat pisteet”, mihin sisältyy eri tuotanto-ohjelman vaiheita, kuten: tuotannon aloitus, rungon koonnin aloitus, vesillelasku, pääkoneiden käynnistys, propulsio- käynnistys, merikokeet ja luovutuspäivämäärä. Nämä luetellut kovat pisteet ovat määritellyt jo tuotannon suunnitteluvaiheessa. Laivan luovutuspäivämäärä on kiinteä ja myöhästyminen voi johtaa suuriin sakkoihin. Tuotannon etenemistä seurataan kovien pisteiden kautta ja aikatauluissa pysyminen luo uskoa laivan tilaajalle ja näin helpottaa telakan työskentelyä. Koska myös pääkoneiden käynnistykset ovat ilmoitettu kovissa pisteissä pitää siihen kuuluvat työvaiheet olla tehtynä hyvissä ajoin, jotta tästä aikataulusta ei myöhästyä. Näihin työvaiheisiin lukeutuu kriittisesti voiteluainejärjestelmän huuhtelu, koska pääkoneita ei voida käynnistää ennen kuin järjestelmän putkisto, komponentit ja öljy ovat tarpeeksi puhtaita. Huuhteluaikataulu ajoittuu siten noin kahden viikon päähän moottorin käynnistämisestä. Siksi onkin erityisen tärkeää, että järjestelmän huuhtelu on suunniteltu siten, että vaadittu puhtaustaso saavutetaan mahdollisimman tehokkaasti.

6.2 Toimenpiteet ennen huuhtelua

Jotta voidaan huuhtelu ja järjestelmän vaadittu puhtaustaso saavuttaa mahdollisimman tehokkaasti ja luotettavasti on tärkeää, että prosessissa osallisena olevilla työntekijöillä –erityisesti asennuksessa ja tuotannossa työskentelevillä– on tiedossa järjestelmän vaa-

dittu puhtaustaso. Työntekijät voivat omalla panoksellaan vaikuttaa epäpuhtauksien pääsyn putkistoon sisälle. Tärkeää on myös tarkastaa putkien sisäpinnat silmämääräisesti ennen niiden asennusta. Näin pystytään pienentämään riskiä, että putkistoissa on jotain sinne kuulumattomia suurempia epäpuhtauksia, joiden poistaminen sieltä on hankalaa enää putkien asennuksen jälkeen.

Standardi (ISO 28521:2009) edellyttää, että teräspuutket voiteluöljyjärjestelmässä ovat valmistuksen jälkeen puhdistettu irtoliasta ja kuona-aineista joko kemikaalisesti tai mekaanisesti (ISO 8501-1) standardin mukaisesti, Sa 2 1/2 puhtaustasoa vastaavaksi. Mikä tarkoittaa sisäpinnan huolellista esikäsitteilyä suihkupuhdistuksella, jossa paljain silmin tarkastettaessa pinnalla ei saa olla näkyvää öljyä, rasvaa, likaa eikä hienosti kiinni tarttunutta valssihilsettä, ruostetta, maalia tai muita vieraita aineita. Ennen suihkupuhdistusta kaikki paksut ruostekerrokset tulee poistaa hankaamalla (ISO 8501-1 2007). Tämä on prosessissa huomioitu siten, että Meyer Turulla on teräksisten putkistojen valmistuksessa käytössä työtapa-standardi, joka edellyttää, että putkien hitsausseamat hiotaan ja tarvittaessa putket hiekkapuhalletaan ja lopuksi puhalletaan paineilmalla puhtaaksi. Sekä kaikissa suurta puhtautta vaativissa järjestelmissä käytössä olevat putket on valmistusvaiheessa merkitty koodilla (V), mikä tarkoittaa sitä, että putkien sisäpinnat käsitellään läpikotaisesti suojaavalla öljyllä. Jonka jälkeen velvoitetaan suojaamaan putkiston rakenneosien päät siihen määritellyllä suojatulpalla, siten että suojauksen on pysyttävä tiiviisti kiinni, kunnes se tarkoituksellisesti poistetaan. Lisäksi ohjeistetaan, että suojauksen saa poistaa vasta välittömästi ennen putkien asennusta. Putket puhdistetaan ennen pintakäsittelyä aikaisemmin mainituista epäpuhtauksista, joko paineistetulla vedellä tai ilmalla sekä tarpeen vaatiessa ne hiekkapuhallutetaan. (Meyer Turku Oy, henkilökohtainen tiedonanto 10.06.2019)

6.3 Öljyn bunkraus tankkeihin

Ennen huuhtelua kieroöljytankit puhdistetaan ja täytetään voiteluaineella. Valmistajalta tilattu uusi öljy ei ole tarpeeksi puhdasta sellaisenaan käytettäväksi ja se tulisi aina luokitella epäpuhtaaksi, ellei toisin ole todistettu (C.C. Jensen A/S 2018, 43). Voiteluöljyn bunkraus tehdään suodatinyksikköä käyttäen, jonka suodatustarkkuus on vähintään $\beta_x > 500$, jotta voiteluaineesta saadaan mahdollisimman paljon epäpuhtauksia erotettua yhdellä läpivirtauksella. Täytön jälkeen putkilinjat saatetaan siihen kuntoon, että huuhtelu

voidaan aloittaa. Huuhteluohje on liitteessä 1, jossa esitetään huuhteluun liittyvät toimenpiteet tarkemmin

6.4 Näytteenottopiste

Automaattisen hiukkaslaskurin näytteenottopaikka voi sijaita ennen tai jälkeen tutkittavan kohteen. Hiukkaslaskurille tuleva virtaus on kuitenkin otettava samasta virtauksesta, joka kohdistuu tutkittavaan kohteeseen. (Bensheim & Busch 2019, 26). Hiukkaslaskuri on sijoitettu ennen huuhtelusuodatinta, jotta järjestelmässä virtaavan öljyn todellinen puhtaustaso todetaan mahdollisimman luotettavasti. Näin laskurille tuleva virtaus on myös sama kuin huuhdeltavassa putkistossa. Samaa paikkaa käytetään myös pullonäytteiden ottoon, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia hiukkaslaskurin kanssa. Käytössä on kuitenkin todettu, että hiukkaslaskurin ja mikroskooppilaskennan tuloksissa on jonkin verran eroja.

Tämä voi johtua moottoriöljyn sisältämistä lisäaineista, joita hiukkaslaskuri ei kykene tunnistamaan. Näihin lisäaineisiin lukeutuu mm. polymeerit, joita käytetään moottoriöljyissä viskositeetti-indeksin parantajalisäaineina. Optiseen valonpeittomenetelmään perustuva hiukkaslaskuri ei kykene tunnistamaan polymeerejä tai muita lisäaineita, jotka ovat liukenemattomina saman muotoisia kuin epäpuhtauspartikkelit. Tästä syystä se laskee ne epäpuhtauksiksi, mikä voi vääristää järjestelmän puhtaustulosta (M. Vesala, henkilökohtainen tiedonanto 07.06.2019).

Hiukkaslaskurin käyttö on kuitenkin todettu olevan tarpeellista, sillä laskimesta saadaan reaaliaikaista tietoa puhtaustason muutoksista, jonka avulla tehdään päätöksiä hienomman suodatinelementtien vaihtoväleistä ja pullonnäytteen otosta. Järjestelmän lopullinen puhtaustaso analysoidaan pullonäytteeseen otetusta öljystä mikroskooppilaskelmenetelmää käyttäen laboratorio-olosuhteissa.

6.5 Turbulenttinen virtaus ja suodatus

Pääkoneen voiteluainejärjestelmän sisäinen esivoitelupumppu on laskettu olevan liian tehoton saavuttamaan turbulenttinen virtaus järjestelmän putkistossa. Edellä mainitusta syystä on huuhtelukäyttöön hankittu erillinen huuhtelupumppu. Pumppu on keskipakopumppu, jonka sähkömoottoria ohjataan taajuusmuuttajalla. Taajuusmuuttajalla voidaan

säätää kierrosnopeutta siten, että pumpun tuottoa saadaan ohjattua n. 750 l/min – 3900 l/min välillä. Turbulenttinen virtaus on laskettu 2100 l/min virtausnopeudella kaavan 1 mukaan, kun voiteluöljy on ollut huuhtelussa n. 60 °C:ta ja painepuolen putken sisähalkaisija on n. 250 mm. Näin Reynoldsin luvuksi saadaan n. 3200. Huuhtelussa on käytössä myös paineilmatoimisia täryttimiä, jotta varmistetaan hiukkasmaisten epäpuhtauksien poisto koko järjestelmän putkistosta. Putkeen kiinnitettyinä täryttimet aiheuttavat värinä. Värinä pienentää epäpuhtaushiukkasten ja putken seinämän välistä tarttumisvoimaa.

Huuhtelusuodattimena on käytetty suodatinyksikköä, minkä maksimitilavuusvirta on n. 5300 l/min. Siinä käytetään kahdeksaa (8) suodatinelementtiä, mitkä ovat laskostettuja syväsuodattavia suodatinpusseja. Suodatinelementtien absoluuttinen suodatusaste on 5 µm ja βx-suodatussuhde on ilmoitettu olevan > 1000.

7 LOPUKSI

Pääkoneen voiteluainejärjestelmän huuhtelun jälkeiset tulokset vastasivat vaatimuksia. Haastavista olosuhteista huolimatta huuhtelu toteutui annetun aikataulun mukaisesti, eikä huuhtelu-aika venynyt liian pitkäksi. Huuhtelu-aikaan vaikutti varmasti positiivisesti myös se, että osa putkista kuvattiin niiden asennuksen jälkeen, sillä putket oltiin valmistettu ja asennettu uuden yhteistyökumppanin toimesta, eikä niiden kunnosta oltu täysin varmoja. Joitakin putkia ei oltu suojattu standardien mukaisesti, mistä johtuen niiden sisäpinnat olivat osittain ruostuneet. Nämä putket lähetettiin hiekkapuhallettavaksi ja suojattavaksi ennen järjestelmän huuhtelua. Asiasta ollaan keskusteltu yhteistyökumppanin kanssa ja heidän toimintatapoihin ollaan puututtu.

Toimeksianto oli mielenkiintoinen, sillä se avasi kirjoittajalle aivan uusia ja innoittavia haasteita. Jos järjestelmän huuhtelu ei olisi onnistunut suunnitelmien mukaisesti, olisi jouduttu tekemään suuria investointeja jälkeinpäin tai pidentämään huuhtelu-aikaa suuresti. Tarkoittaen, että joko epäpuhtauspartikkelit eivät olisi irronneet putkistoista vaan putkiin olisi jäänyt joitain suurempia hiukkasia, jolloin ne olisi jouduttu irrottamaan ja puhdistamaan mekaanisesti. Tai vaihtoehtoisesti partikkelien suodattaminen olisi kestänyt luvattoman pitkään. Mikä olisi johtanut ajan menetykseen, millä olisi ollut merkittävä vaikutus tuotannon tiukkaan aikatauluun. Viivästymisen seurauksena kustannukset olisivat voineet nousta hyvinkin suureksi.

Yhden pääkoneen voiteluainejärjestelmän puhtausanalyysin tulokset ovat nähtävissä liitteessä 3.

Tulevaisuudessa voisi erillisen huuhteluöljyn käyttöä pohtia, jos vaadittavaa puhtaustasoa ei saavuteta tai huuhtelu-aika venyy liian pitkäksi. Bensheim ym. (2019) mukaan ”erityiset matalan viskositeetin omaavat mineraalipohjaiset huuhteluöljyt parantavat huuhtelun tuloksia. Ne madaltavat epäpuhtaushiukkasten ja putken seinän välistä tarttumisvoimaa. Erinomaisten pintakasteluominaisuuksien ansiosta ne tunkeutuvat epäpuhtaushiukkasten ja seinän väliin irrottaen hiukkaset. Tutkimukset ovat osoittaneet, että huuhtelunesteiden vaihto käyttönesteestä huuhteluöljyyn nostaa järjestelmän puhtautta nelinkertaisesti. Tämän tyyppisten huuhteluöljyjen tulee olla hyvin samankaltaisia kuin käyttööljyllä. Jos nämä kaksi eivät ole riittävässä määrin samankaltaisia, saattaa seurauksena olla huomattava öljyn vaahtoaminen, suodattimien tukkeutuminen tai järjestelmän tuk-

keutuminen”. Tästä on tärkeää kuitenkin huomioida se, että Bensheimin ym. (2019) mainitsemaa tutkimusta ei ollut tätä opinnäytetyötä kirjoittaessa saatavilla. Siksi ei voida tietää, että minkä kokoista järjestelmää on tutkimuksessa mitattu. Myöskään laitevalmistajalta ei ole tullut varmistusta huuhteluöljyn käytön mahdollisuudesta. Mutta se avaa kuitenkin uuden mahdollisuuden prosessin jatkokehitykselle.

LÄHTEET

Bensch, L. E. 1999. Uusien ISO-standardien vaikutus kokonaisvaltaiseen puhtaudenhallintaan. Pall Corporation. Suom. Vesala, M. Oy Colly Company Ab Vantaa.

Bensheim, E. & Busch, A. 2019. Puhtaudenvalvonta käytännössä. Tuotannosta toimitukseen. Hydac Oy. Viitattu 11.06.2019.

BFPA/P9 issue 2. 2004. Guidelines for the flushing of hydraulic systems. Oxfordshire, England the British fluid power association.

Caterpillar Motoren GmbH & Co. KG. 2017. MAK VM 46 DF project guide. Hamburg, Germany Caterpillar Marine.

C.C. Jensen A/S 2018. Clean oil guide. 10. painos. Viitattu 12.05.2019 https://www.cjc.dk/fileadmin/root/File_Admin_Filter/doc_Brochures/Clean_Oil_Guide.pdf.

Honkola, A. 2018. Hydraulijärjestelmän puhtaustasot tela-alustaisen murskaimen valmistuksessa. Diplomityö. Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto. Viitattu 17.06.2019 <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/handle/123456789/26887>.

Kauhanen, M. 2017. Laivakoneistojen voitelu. Opinnäytetyö. Merenkulun insinöörin tutkinto-ohjelma. Kotka. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. Viitattu 18.06.2019 <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201701171420>.

Kauranne, H., Kajaste, J. & Vilenius, M. 2008. Hydrauliteknikka. Helsinki: WSOY

ISO 23309:2007. Hydraulic fluid power systems – Assembled systems – Methods of cleaning lines by flushing. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

ISO 28521:2009. Ships and marine technology – Hydraulic oil systems – Guidance for grades of cleanliness and flushing. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

ISO 4406:2017. Hydraulic fluid power – Fluids – Method for coding the level of contamination by solid particles. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

Kunnossapitoyhdistys Promaint ry. Voitelutekninen toimikunta 2013. Teollisuusvoitelu – käsikirja. 5. painos. Helsinki: KP-Media Oy.

MAN Diesel & Turbo 2015. Filtration Handbook. Filtration and flushing strategy. Viitattu 17.11.2018 <https://marine.mandieselturbo.com/docs/librariesprovider6/test/filtration-handbook-filtration-and-flushing-strategy.pdf?sfvrsn=7>.

Mika Vesala 2005. Pieniä hiukkasia, joilla on suuri merkitys. FLUID Finland. Viitattu 28.05.2019. https://www.fluidlab.fi/sites/default/files/Pienia_hiukkasia_joilla_on_suuri_merkitys.pdf

Parker Hannifin Manufacturing (UK) Ltd. 2012. Hydraulic Filter Division Europe. Guide to Contamination Standards. Viitattu 01.06.2019. <https://www.parker.com/literature/Hydraulic%20Filter%20Division%20Europe/Literature%20FY15/Con%20Mon%20Guide.pdf>

Pentti Häkkinen. 1999. Laivan koneistot. 7., uudistettu painos. Otaniemi: Teknillinen korkeakoulu.

PSK 6709. 2006. Teollisuusjärjestelmän suunnittelu ja hankinta. Käyttöönotto. Helsinki PSK Standardisointiyhdistys ry.

SFS-EN ISO 8501-1 2007. Teräspintojen esikäsitteily ennen pinnoitusta maalilla tai vastaavilla tuotteilla. Pinnan puhtauden arviointi silmämääräisesti. Osa 1: Teräspintojen ruostumisasteet ja

esikäsittelyasteet. Maalaamattomat teräspinnat ja aiemmista maaleista kauttaaltaan puhdistetut teräspinnat. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

Sparks, T & Chase, G. 6. painos 2016. Filters and filtration handbook. Butterworth-Heinemann Elsevier Ltd.

FLUSHING INSTRUCTIONS OF LUBRICATION OIL SYSTEM FOR THE DIESEL GENERATORS

1. REQUIREMENTS

The cleanliness level after flushing has to reach level 8, acc. NAS code 1638 or equivalent level 19/17/14 acc. ISO 4406, see table below.

		Number of particles per 100 ml of oil				
ISO 4406	NAS 1638	5-15 µm	15-25 µm	25-50 µm	50-100 µm	over 100 µm
13/11/08	2	1000	178	32	6	1
14/12/09	3	2000	356	63	11	2
15/13/10	4	4000	712	126	22	4
16/14/11	5	8000	1425	253	45	8
17/15/12	6	16000	2850	506	90	16
18/16/13	7	32000	5700	1012	190	32
19/17/14	8	64000	11400	2025	360	64
20/18/15	9	128000	22800	4050	720	128
21/19/16	10	256000	45600	8100	1440	256
22/20/17	11	512000	91200	16200	2880	512
23/21/18	12	1024000	182400	32400	5760	1020

2. FLUSHING EQUIPMENT

The system is 20 000 liter capacity, SAE 40 grade diesel engine oil. Piping DN250.

The flushing rig is equipped with external flushing pump, special filter unit, particle counter and portable vibrators.

The final cleanliness will be verified from an oil sample with microscope counter under laboratory conditions.

Flushing pump unit:

- Centrifugal pump AL-1154/4
- Motor 30 kW 690/400 V 31,8/55 A 24,6 r/s 1475 r/min 50 Hz
- Frequency converter 30 kW 380/480 V, 61 A, IP54
- DN 150 connection flanges on suction and pressure side with butterfly valves.
- Vacuum manometer on suction side
- Pressure gauge on pressure side

Pump unit is designed in such a way that it can be handled by using a lift truck or forklift truck. For crane operation there are crane hooks mounted at the unit.

Flushing pump is equipped with a frequency converter to ensure safe operation with reproducible key data in both 50 Hz and 60 Hz operation, as well as the possibility of a manual flow adjustment of the pump over a range from approx. 750 l/min to approx. 3900 l/min.

Filter unit

- Operating pressure: max. 10 bar
- Operating temperature max. 80 °C
- Connection flanges DN 150 with butterfly valves.
- Equipped with: 2 drain valves. 1 pressure gauge
- Capacity: 455 l
- Max .flow 5300 l/min
- Rougher filter element: 15 µm absolute, depth filtration
- Finer filter element: 5 µm absolute, depth filtration
- Filter media: Polyester
- Numbers or filter elements: 8 pcs

Particle counter

- CSM1220-2-1-W/N/X60/O60-Z
- 400 V-50 Hz, 3-phase
- Measured variables: ISO 4406:1999 or SAE AS 4059 (D)
- Motor 0,18 kW
- Suction line pressure -0,4-+120 bar (G 1/4")
- Return line max. pressure 5 bar (G 1/4")
- Drain max. pressure 0,5 bar (G 1/4")

3. SYSTEM PREPARATIONS

All fabricated pipes and components should be cleaned, oiled and blanked off before assembly on board, according to the Meyer Turku standards. Also, after assembly all lubrication oil pipes should be blown through with pressurized air to remove loose dirt.

The lubricating oil circulation tanks should be cleaned properly before filling with oil. The tanks cleanliness will be inspected with the presence of a Surveyor. After the Surveyor has approved the cleanliness level, the tanks shall be protected on the inside with suitable oil product. Afterwards, the tanks shall be closed after the engine manufacturer and owner's approval.

Before the flushing, a leak-tightness test of the system will be checked in the following way:

- Bypass/blank off all engine inlets and all the components that are not suitable for high pressure testing.
- Pressure in accordance with the directions of the yard's and class society's standards using clean and dry air, and perform external testing with the presence of the Surveyors.

With the system prepared for filling with the system oil. Fill the system in accordance with the yard's work instructions. The oil filling shall be done through a special filter and preferably using 5 μm absolute filter elements. It is recommended that the filtering efficiency of the unit is at least $\beta_x > 500$ in order to remove sufficient amount of impurities during one circulation. It is also important to take an oil sample of the new oil while filling to ensure the cleanliness level of the oil.

Having filled the system with oil, heat the oil with lubricating oil separator's heater to the temperature of 60-70 °C to ensure that the system is flushed as quickly and efficiently as possible.

When all the above-mentioned procedures has been completed, all the engine inlets should be bypassed or blanked off. System shall be connected into one flushing circuit. Thereof, the external flushing pump will be connected to the suction side of the system after the suction filter and discharge side of the pump should be connected to the main line. While the external filter unit connected at the end of the circuit where the oil will be conducted via a flexible pipe through a crankcase door into the circulating tank. Add the rougher filter elements to the filter unit (15 μm absolute).

Connect the particle counter to the oil sampling point located on the inlet pipe of the flushing oil filter

Add portable vibrators to the pipeline particularly at formed bends and weld areas. This has the effect of loosening contaminants throughout the piping system.

4. FLUSHING

The flushing oil pump takes the oil from the circulating oil tank and presses into the lube oil system. Before engine inlet, the system is disconnected and the flushing oil is conducted via a flexible pipe to the filter unit. Thereof, through a crankcase door into the circulating tank.

During the first flushing period, the automatic lube oil filter, LO cooler and the pre lubricating oil line should be bypassed.

Start the flushing operation by starting the flushing oil pump. Start the flushing oil pump with lower power, monitor the flushing oil filter, temperature, and check for possible oil leaks. Afterwards, adjust the power of the flushing pump from the frequency converter in order to achieve turbulent flow and high velocity inside the pipe system. This will provide more effective removing off impurities from the pipelines and transportation out of the system, which makes it essential for effective flushing.

Adjust the portable vibrators power by opening the air valve and start the contamination sensor as instructed.

During the flushing operation, the cleanliness level should be monitored on a regular basis from the particle counter. The first reliable measurement result will be achieved after 30 minutes of the start of a measurement. The differential pressure of the filter unit should be monitored using the pressure gauge. The filter elements should be changed after there is 1 bar of differential pressure at the filter unit.

After the filter elements has been changed for the first time. Continue flushing operation with the rougher filter elements until there is no more differential pressure at the filter unit or at least 6-8 hours after the first change of new filter elements. Before changing the finer filter elements take an oil sample as instructed in paragraph 5.

Change the finer filter elements to the filter unit and repeat the procedures mentioned in above chapters. Continue flushing for at least 6-8 hours before opening the bypassed lines to the automatic filter and to the LO cooler.

Continue the flushing operation until an oil sample within the required cleanliness level are obtained. After the required cleanliness has been achieved. Stop the flushing pump and close the valves on the pump line. Open the valves on the pre lube oil line and start to flush with the pre lube pump. Continue flushing until an oil sample within the required

cleanliness level are obtained again. Stop the pre lube pump and close the valves on the pre lube line. Start the flushing pump and remember to open the closed valves, flush the system for couple of hours. Any temporary equipment and blanks should now be removed and the complete system reconnected after properly cleaning the pipes that could not be flushed.

5. TAKING AN OIL SAMPLE

It is important to remember that the sample should be taken from the oil sampling point located on the inlet pipe of the filter unit. In all cases, the actual flushing should be in operation when taking an oil sample. It is also advisable to clean the surface of the sampling point as well as to drain the oil for few liters before sampling.

Attention should also be paid to the purity of the sample bottle. For example, a drinking bottle is never sufficiently clean to determine the level of purity of solid contaminants. The sample bottle shall be as particulate free as possible to ensure reliable results. When the sample is taken, the bottle cap shall be opened right before the oil is drawn into the bottle. The cap should be closed immediately after sampling; it is also not desirable to fill the sample bottle completely but to leave a small mixer.

6. TURBULENT FLOW

For effectively removing particulate contamination from pipelines, the main requirement is that the flushing fluid has turbulent flow. Turbulent fluid flow will also ensure transportation of the particulate contaminants out of the system and to the filters. A fluid with a Reynolds number (Re) 3000-4000 should be used to flush the system. Re and the required flow rate can be calculated using the equations below.

$$Re = \frac{21220 \times qv}{v \times d}$$

$$qv = \frac{d \times Re \times v}{21220}$$

where:

- Re = 3000 - 4000 target value
- qv = outlet flow rate from oil tank [l/min]
- d = inner diameter of largest pressure pipe [mm]
- v = maximum kinematic viscosity [mm^2/s] at flushing temperature.

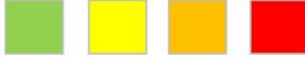
7. NOTICE

With all of the above procedures mentioned in this instruction, great care must be taken into account to maintain safety.

The particle counter is used only for reference. Its counting results will not determine the final cleanliness result of the system. The final cleanliness will be verified from the recent oil sample with a microscope counter, which is done in laboratory conditions.

Should the system require topping up after the flushing operation, it is essential that the fluid is transferred through a fine filter or through the lubrication oil separator, as the oil in storage tanks or a new oil may not be sufficiently clean.

Attached you can find a diagram that illustrates the flushing strategy



REPORT

1(4)

27.5.2019

Laboratory number: H66494

CUSTOMER

Meyer Turku Oy
Telakkakatu 1
20101 Turku

SAMPLE

Department / Project:
System (machine):
System ID:
Sampling:
Sampled by:
Oil: Mobilgard 412 (SAE40)
Filters:

Oil condition

Wear

Cleanliness

COMMENTS AND DIAGNOSIS

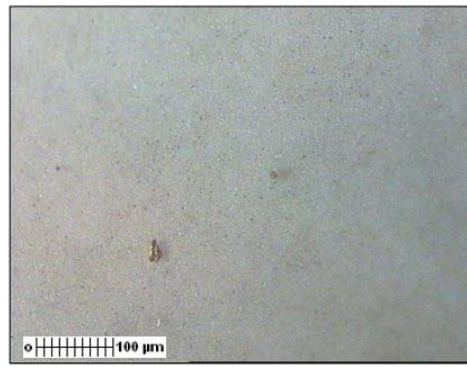
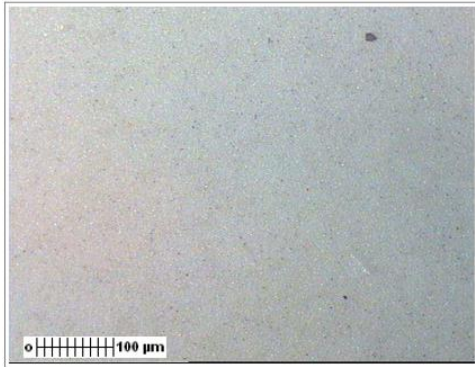
Particle counts determined with optical microscope:
>2 µm: 350 000 pcs / 100 ml
>5 µm: 56 000 pcs / 100 ml
>15 µm: 2 200 pcs / 100 ml

Particle cleanliness class determined with optical microscope: 19/16/12

RESULTS

Sampling date	26.5.2019	25.5.2019	24.5.2019	23.5.2019
Laboratory number	H66494	H66483	H66448	H66429
OIL CONDITION	Method			
Viscosity +40 °C	cSt	ASTM D445		
+100 °C				
Viscosity-index	-			
Colour	-	ASTM 1500		
Appearance of oil		clear, brown	clear, brown	clear, brown
Oxidation of oil	-TAN	mgKOH / g	ASTM D664	
	-IR	A / cm		
	-Color of memb.		light grey	light grey
			light grey	grey
Additives - ICP	ppm	ASTM D5185		
Calcium				
Magnesium				
Boron				
Zinc				
Phosphorus				
Barium				
Sulphur				

Microscope picture: (Sample volume: 50 ml)





REPORT

2(4)

27.5.2019

Laboratory number: H66494

RESULTS

Sampling date	26.5.2019	25.5.2019	24.5.2019	23.5.2019
Laboratory number	H66494	H66483	H66448	H66429
SYSTEM WEAR AND CONTAMINATION OF OIL				
Wear metals - ICP	ppm	ASTM D5185		
Iron				
Chrome				
Tin				
Aluminium				
Nickel				
Copper				
Lead				
Molybdenum				
PQ-index	-			
Contaminants - ICP	ppm	ASTM D5185		
Silicon				
Potassium				
Sodium				
Water content	ppm	ASTM D6304 C	20	20
Cleanliness class	ISO4406:1999	ISO11500	21/17/11	21/17/13
Particle counting (A=autom., M=microsc.)			A	A
ISO4406:1999	ISO4406			
> 4 µm	(> 2 µm)	pcs / 100 ml	1457875	1286525
> 6 µm	(> 5 µm)		94005	109220
> 10 µm	(> 10 µm)		4725	12025
> 14 µm	(> 15 µm)		1615	4430
> 21 µm	(> 20 µm)		540	1365
> 25 µm	(> 25 µm)		320	770
> 38 µm	(> 50 µm)		65	125
> 70 µm	(> 100 µm)		15	10
Visual particle identification (> 5 µm)	%	in-house		
Bright metal				3
Yellow metal				
Black metal				23
Rust				
Silica and other dust				14
Polymers				1
Fibers				<1
Others				58
Additional analysis				



REPORT

3(4)

27.5.2019

Laboratory number: H66494

