HYDRAULIÖLJYN LAKKAUTUMISEN SYNTYMEKANISMIT JA EHKÄISEMINEN ENNAKOIVAN KUNNOSSAPIDON NÄKÖKULMASTA

VARNISH IN HYDRAULIC OILS – FORMATION CAUSES AND PREVENTION FROM THE PERSPECTIVE OF PREDICTIVE MAINTENANCE

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2024

Joona Lindgrén

Tarkastaja: TkT Katriina Mielonen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT energiajärjestelmien tiedekunta

Konetekniikka

Joona Lindgrén

Hydrauliöljyn lakkautumisen syntymekanismit ja ehkäiseminen ennakoivan kunnossapidon näkökulmasta

Konetekniikan kandidaatintyö

2024

47 sivua, 4 kuvaa, 5 taulukkoa ja 3 liitettä

Tarkastaja: TkT Katriina Mielonen

Avainsanat: Lakkautuminen, Ennakoiva Kunnossapito, Hydrauliöljy, Öljyn Kuluminen

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan ja esitetään hydrauliöljyjen lakkautumisen syntymekanismeja ja ennakoivan kunnossapidon ehkäisemismenetelmiä lakkautumiselle. Tutkimusmenetelminä käytetään kirjallisuustutkimusta, asiantuntijahaastatteluja ja mittausdatan tutkimusta. Menetelmillä saatavia tuloksia vertaillaan keskenään ja menetelmille ja tuloksille suoritetaan järjestelmällinen luotettavuustarkastelu.

Tutkimuksen tulokset ovat erityisesti kirjallisuustutkimuksen ja asiantuntijahaastattelujen osalta hyvin yhteneväisiä. Myös mittausarvojen perusteella saadut tulokset puoltavat osittain muiden menetelmien tuloksia. Keskeisimpinä syntymekanismeina tutkimus nostaa esiin sähköstaattiset purkaukset, lämpökuormituksen sekä öljyn hapettumisen. Nämä kaikki vaikuttavat osaltaan öljyn rakenteen ja lisäaineiden hajoamiseen ja kulumiseen. Ilmiön yleistymisen taustalla vaikuttavat öljylaatujen muutokset, öljyn epäpuhtaudet ja järjestelmälle asetettavien vaatimusten kasvaminen.

Ennakoivan kunnossapidon ja ehkäisemisen kannalta tutkimus nostaa esiin säännölliset mittaukset ja öljyn kunnonvalvonnan. Lakkautumisen mittauksista nostetaan esiin MPC, sähkönjohtavuuden mittaus sekä TAN- ja FTIR-mittaus. Ennakoivaa kunnossapitoa voidaan tehostaa yhdistämällä mittaustulokset alkuperäiseen öljyn ja järjestelmän tilaan, muihin kunnossapidon mittauksiin ja syntymekanismien tuntemiseen. Ongelmien ehkäisemiseksi tutkimuksessa nostetaan esiin myös järjestelmän ja komponenttien suunnittelu pitäen sisällään hydrauliöljyn valinnan sekä erilaiset menetelmät syntyvien lakkautumistuotteiden poistamiseksi öljystä, ennen kuin ne alkavat muodostaa kerrostumia.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Joona Lindgrén

Varnish in hydraulic oils – formation causes and prevention from the perspective of predictive maintenance

Bachelor's thesis

2024

47 pages, 4 figures, 5 tables and 3 appendices

Examiner: D. Sc. (Tech.) Katriina Mielonen

Keywords: Varnishing, Predictive Maintenance, Hydraulic Oil, Oil degradation

This Bachelor's thesis examines and puts forward formation causes of varnish as well as predictive maintenance's methods to prevent problems caused by varnish. Literary research, topic interviews on experts and research of measured data are utilized as research methods for this thesis. The received results are compared to each other and a methodical reliability audit is performed.

Especially the results from the literary research and the interview are compatible with each other. The results from the examination of the measured data do also support some of the results from the other two methods. The research puts forward electrostatic discharging, thermal degradation and oxidation as the foremost formation causes of varnish. All of these contribute to the breakdown and degradation of the oil and its additives. Factors contributing to the increase of the phenomenon include changes in oil types, contaminants in oil and increasing demands placed on the systems.

Regarding predictive maintenance and prevention the research highlights regular measurements and oil condition monitoring. Among the measurements for varnishing the study raises MPC, conductivity, TAN and FTIR measurements. Predictive maintenance can be further enhanced by combining and comparing the measurement results with the original state of the oil and system, other maintenance measurements and knowledge of the formation causes. To prevent the problems with varnishing the research also highlights the design of system and components and fluid selection as well as different methods to remove formed varnish precursors to prevent them from forming deposits.

KIITOKSET

Haluaisin kiittää Tehohydro Oy:tä ja erityisesti Jani Näivää tämän kandityön aiheesta, aiheen ideoinnista ja lakkautumiseen liittyvien ongelmien pohdiskelutuokioista. Lisäksi haluaisin kiittää ohjaajaani Katriina Mielosta avun tarjoamisesta aina tarvittaessa. Kiitokset menevät myös tyttöystävälleni ja muulle lähipiirilleni, jotka ovat kannustaneet kohti työn loppuun saattamista erityisesti oman huumorin välillä hiipuessa.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

i	tietueiden juokseva numerointi
n	näytteiden tai näyteparien käytetty määrä
r_{xy}	Pearsonin korrelaatiokerroin
r_{xy15}	Pearsonin korrelaatiokerroin tietueilla, joilla MPC > 15
S	Korrelaation keskivirhe
x_i	muuttujan x arvo tietueessa i
$\overline{x}$	muuttujan x keskiarvo
y_i	muuttujan y arvo tietueessa i
$\overline{y}$	muuttujan y keskiarvo

Lyhenteet

AN	happoluku (Acid Number), alias TAN
APC	automaattinen partikkelilaskuri (Automatic Particle Counter)
API	American Petroleum Institute
BCA	Balanced Charge Agglomeration
CPA	Colorimetric Patch Analyzer
ESC	sähköstaattinen varautuminen (Electrostatic Charging)
ESD	sähköstaattinen purkautuminen (Electrostatic Discharging)
FFPA	Finnish Fluid Power Association
FTIR	Fourier Transform Infrared
ICP	induktiivistesti kytketty plasmaspektrometri (Inductively Coupled Plasma)

MPC	Membrane Patch Colorimetry
NA	ei sovellettavissa (Not Applicaple)
PAO	polyalfaolefiini (Polyalphaolefin)
RPVOT	Rotary Pressure Vessel Oxidation Test
RULER	Remaining Useful Life Evaluation Routine
TAN	kokonaishappoluku (Total Acid Number), alias AN
TOST	Turbine Oil Stability Test
VI	viskositeetti-indeksi (Viscosity Index)

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KIITOKSET

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

1 JOHDANTO 9
1.1 Tutkimusongelma 9
1.2 Tutkimuksen merkitys, tavoitteet ja tutkimuskysymykset 10
1.3 Tutkimuksen rajaukset ja menetelmät 11
2 TUTKIMUKSESSA KÄYTETTÄVÄT MENETELMÄT 12
2.1 Kirjallisuustutkimus 12
2.2 Asiantuntijahaastattelut 13
2.3 Mittausdatan tutkimus 14
2.4 Menetelmien vertailu 15
2.5 Menetelmien luotettavuus ja sen tarkastelu 15
3 TULOKSET 17
3.1 Kirjallisuustutkimuksen tulokset 17
3.1.1 Lakkautumisen syntymekanismit kirjallisuudessa 17
3.1.2 Lakkautumisen mittaamismenetelmät kirjallisuudessa 21
3.1.3 Kirjallisuuden ratkaisut lakkautumisongelmien ehkäisemiseksi 24
3.2 Asiantuntijahaastatteluiden tulokset 28
3.3 Mittausdatasta saadut tulokset 33
3.4 Tulosten yhdistäminen 35
4 POHDINTA 38
4.1 Vertailu muiden tutkijoiden saamiin tuloksiin 38
4.2 Tutkimuksen objektiivisuus 39
4.3 Tutkimuksen reliabiliteetti ja validiteetti 40
4.4 Virhe- ja herkkyystarkastelu 41
4.5 Keskeiset johtopäätökset 42
4.6 Tulosten uutuusarvo, hyödynnettävyys ja yleistettävyys 43

4.7 Jatkotutkimusaiheet 44
5 YHTEENVETO 45
LÄHTEET 46

LIITTEET

LIITE 1. Kirjallisuustutkimuksen lähteiden arviointitaulukko

LIITE 2. Haastattelurunko asiantuntijahaastatteluille

LIITE 3. Kuvaajat mittausarvojen pohjalta

1 JOHDANTO

Lakkautumalla viitataan erilaisiin koviin, ohuisiin ja kiiltäviin kerrostumiin., jotka muodostuvat öljyn vanhetessa ja hajotessa syntyvistä epäpuhtauksista. Lakkautumista aiheuttavat epäpuhtaudet ovat luonteeltaan orgaanisia, pehmeitä ja polaarisia ja ne hakautuvat kerrostumiksi viileille metallipinnoille metallin ollessa öljyä polaarisempi materiaali. Liukoisuus öljyyn on lämpötilasta riippuvaista ja epäpuhtaudet voivat esiintyä öljyyn liuenneina tai liukenemattomassa. (Hong ja Jang 2023) Lakkautumiskerrostumat voivat olla väriltään ja koostumukseltaan vaihtelevia (Laamanen 2021).

Lakkautuman kerääntyminen pinnoille aiheuttaa useita ongelmia heikentäen voitelukykyä ja lämmönvaihtoa sekä lisäten kitkaa (MH Hydraulics 2020; Wooton 2014). Lisäksi järjestelmän energiantarve ja kuluminen lisääntyy sekä välykset pienenevät. Ongelmat voivat pysyä järjestelmässä pitkään piilossa, kunnes on liian myöhäistä. (MH Hydraulics 2020) Ongelmia aiheuttaa myös hydraulisten komponenttien, kuten venttiilien, jumiutuminen sekä suodattimien tukkeutuminen. (Hong ja Jang 2023)

Lakkautuminen voi tapahtua eksponentiaalisesti, ja isoimmat tappiot tulevat suunnittelemattomista huoltoseisokeista ja menetetyistä tuotoista. Nykyaikaisella hydraulijärjestelmien suunnittelulla korkeammat paineet ja lämpötilat sekä suuremmat tilavuusvirrat pienempien komponenttien lävitse aiheuttavat ongelmia. (Kaihlanen 2016). Useimmiten ennakoivan kunnossapidon toimilla saavutetaan kustannussäästöjä verrattuna ongelmien pohjalta toimimiseen ja korjaamiseen jälkikäteen. (Kunnossapitoyhdistys Promaint 2022) Ilmiö on yleistynyt uudempien synteettisten ja myrkyttömämpien hydrauliöljyjen käytön lisääntyessä. Näiden öljyjen alemman polaarisuuden takia kyky pitää lakkautumistuotteet liuenneina öljyyn on heikompi. (Kunnossapitoyhdistys Promaint 2018)

1.1 Tutkimusongelma

Lakkautuminen ilmiönä on yleistynyt erityisesti 2000-luvulta alkaen uusien öljylaatujen kehityksen ja käytön myötä (Kunnossapitoyhdistys Promaint 2018, 63-70). Tällä hetkellä lakkautuminen sisältää eniten ongelmia varhaisen tunnistamisen ja ehkäisemisen osalta.

Syntymekanismeihin ja varhaisiin merkkeihin liittyviä tutkimuksia hydrauliöljyistä on tehty melko vähän ja lakkautumista käsitellään usein yleisellä tasolla keskittyen sen aiheuttamiin ongelmiin ja niiden hoitamiseen jälkikäteen. Myös erityisesti hydrauliikkajärjestelmiä käsitteleviä artikkeleita on vähän, jolloin hydraulisessa järjestelmässä vaikuttava paine jää pienelle huomiolle. Osa tiedosta on yritysten sisäistä ja mahdollisesti tutkimatonta tietoa, eikä uusinta tietoa välttämättä löydy kirjoitettuna.

Ilmiön syntyyn vaikuttavia tekijöitä tiedetään jonkin verran ja näitä ovat mm. paine, tilavuusvirta, öljyn eri lämpötilat sekä öljyn kemialliset ja sähköiset ominaisuudet kuten lisäaineistus ja sähkönjohtavuus. Näiden muuttujien väliset vuorovaikutukset ja syy-seuraussuhteet voivat olla monimutkaisia eikä kaikkia yhteyksiä vielä tunneta. Kuitenkin tiedetään, että lakkautuminen ilmiönä on palautumaton öljyn jatkuvan vanhenemisen seurauksena. Ilmiö on myös luonteeltaan kiihtyvä, kun lakkautumisen aiheuttama jäähdytyskapasiteetin lasku nostaa järjestelmän lämpötilaa ja näin nopeuttaa lakkautuman syntymistä (Kunnossapitoyhdistys Promaint 2022).

1.2 Tutkimuksen merkitys, tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Mikäli lakkautumista pystytään ennakoimaan ja ehkäisemään nykyistä paremmin, saavutetaan taloudellisten hyötyjen lisäksi myös teknisiä ja ympäristöllisiä hyötyjä. Näistä merkittävimpiä ovat hydraulijärjestelmien suorituskyvyn ja energiatehokkuuden paraneminen, öljynvaihtovälien piteneminen sekä komponenttien vähentynyt kuluminen. Käytetty hydrauliöljy on ongelmajätettä ja sellaisena iso rasite ympäristölle. Lisääntyneet öljynvaihdot ja komponenttien kuluminen eivät ole kestävän kehityksen kannalta edullisia ja tämä puoltaa ongelman ennakoivaa ehkäisemistä taloudellisten seikkojen lisäksi (Kunnossapitoyhdistys Promaint 2022). Teknisiksi eduiksi voidaan lukea myös järjestelmän parempi toiminta ja ennustettavuus niin ohjauksen kuin öljyn tilankin osalta.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on esittää lakkautumiseen johtavia syy-seuraussuhteita teollisuushydrauliikan sovelluksissa ja sekä tarjota ennakkohuollollisia toimenpiteitä ilmiön aiheuttamien ongelmien ehkäisemiseksi. Työn tuloksia voidaan hyödyntää ennakkohuollon suunnittelussa sekä hydraulijärjestelmien pidemmän ja häiriöttömämmän toiminnan varmistamisessa. Erityisesti työn tulokset auttavat yrityksiä, joiden pääasiallinen toimiala on hydrauliikka sekä yrityksiä, joilla on käytössään useita hydraulijärjestelmiä.

Tieteellisenä antina tutkielma kerää uusinta tietoa ilmiöön liittyen ja nostaa esiin aiheita, joiden tutkiminen edelleen voisi olla tieteellisesti merkittävää. Yleisesti ilmiön parempi ymmärtäminen johtaa siihen, että ilmiön juurisyihin voidaan kohdistaa tarkempaa tutkimusta ja tehokkaammin puuttua niihin. Tutkimuksen hypoteesina on, että tutkimuksella pystytään esittämään laajasti erilaisia lakkautumisen juurisyitä sekä tunnettuja tai uusia käyttökelpoisia menetelmiä lakkautumisen aiheuttamien ongelmien ehkäisemiseksi.

Mitä paremmin lakkautumisen syntyyn liittyvät tekijät ja niiden syy-seuraussuhteet tunnetaan, sitä paremmin ennakoivan kunnossapidon toimilla ja mittauksilla voidaan saavuttaa järjestelmän häiriötön toiminta ja vähentää tai poistaa lakkautumisen esiintymistä. Tutkimuksen keskeisinä tutkimuskysymyksinä ovat seuraavat:

1. Miten eri muuttujat vaikuttavat toisiinsa ja lakkautumisilmiön syntyyn ja miksi ilmiö koskettaa vain tiettyjä järjestelmiä?
2. Miten ennakoivalla kunnossapidolla voidaan vähentää ilmiön esiintymistä ja syntymistä?

Näihin kysymyksiin vastaamalla pyritään saavuttamaan tutkimuksen tavoite. Kysymykset ohjaavat tutkimuksen tiedonhakua ja tutkimuksessa käytettävien menetelmien valintaa.

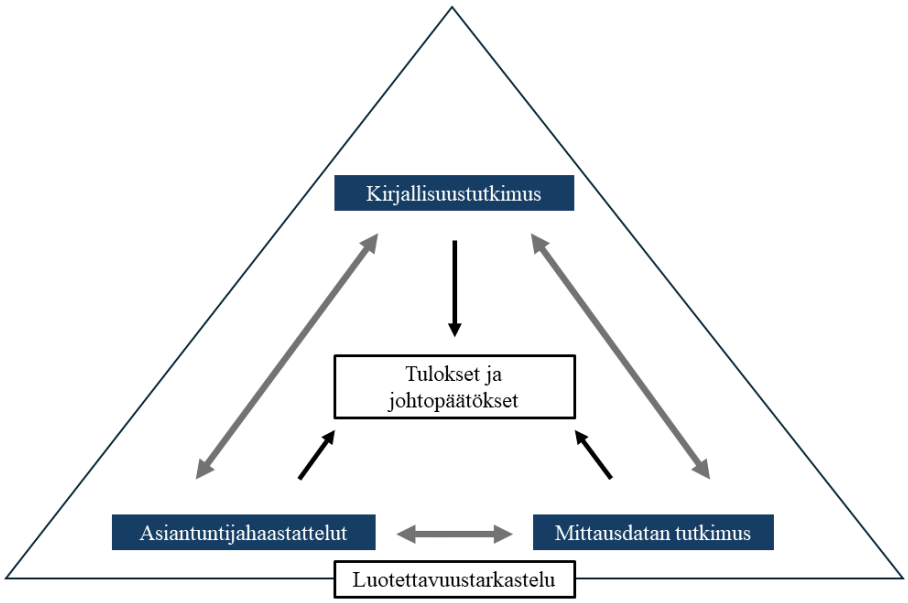
1.3 Tutkimuksen rajaukset ja menetelmät

Lakkautumalla viitataan tässä tutkimuksessa kaikkiin öljyssä esiintyviin pehmeisiin epäpuhtauksiin, jotka kerääntyvät pinnoille väriltään vaihtelevaksi, usein ruskeankellertäväksi, pinnoitteeksi ja aiheuttavat näin ongelmia järjestelmän suorituskyvylle. Tässä työssä pääpaino on teollisuushydrauliikan sovelluksissa, jolloin ympäristövaikutusten ja inhimillisten tekijöiden vaikutukset ovat useimmiten luonteeltaan pieniä ja tämän työn kannalta merkityksettömiä. Järjestelmien ominaisuuksista eniten mielenkiintoa herättävät öljylaatu ja sen ominaisuudet, lämpötilat, tilavuusvirta sekä paine. Tutkimuksen ulkopuolelle rajataan öljyn kemiallisen rakenteen ja ilmiössä tapahtuvien kemiallisten reaktioiden tarkempi tarkastelu työn aihealueen ollessa hydrauliikan ja konetekniikan puolella kemian sijasta.

Tutkimusmetodeina käytetään kirjallisuustutkimusta, asiantuntijahaastatteluita sekä mittausdatan tutkimista erilaisista teollisuuden järjestelmistä. Näillä menetelmillä kerättyjä tuloksia vertaillaan keskenään lopullisten tulosten ja johtopäätösten esittämiseksi.

2 TUTKIMUKSESSA KÄYTETTÄVÄT MENETELMÄT

Tässä tutkimuksessa hyödynnetään triangulaation mukaisesti kolmea toisistaan riippumatonta tutkimusmenetelmää. Nämä menetelmät ovat kirjallisuustutkimus, asiantuntijahaastattelut sekä mittausdatan tutkiminen. Kuvassa 1 esitetään tutkimusmenetelmät ja niiden väliset suhteet graafisesti.



Kuva 1. Käytettyjen tutkimusmenetelmien graafinen esitys

Kuvassa 1 nähdään tutkimusmenetelmien keskinäinen vertailu esitettynä menetelmien välisillä nuolilla. Menetelmistä keskelle osoittavilla nuolilla esitetään tutkimusmenetelmien yhdistäminen keskellä olevien tulosten ja johtopäätösten saamiseksi. Luotettavuustarkastelu puolestaan ympärille piirrettynä viivana rajaa sisälleen kokonaisuuden luotettavuustarkastelun niin menetelmien, tulosten kuin vertailujenkin osalta.

2.1 Kirjallisuustutkimus

Kirjallisuustutkimuksella haetaan tutkimustietoa ja muuta kirjallisuutta aiheeseen liittyen. Kirjallisuustutkimuksessa hakusanoina on käytetty yhdistelmää ’hydraulic AND varnish*’. Tarvittaessa edellisen avuksi on käytetty lisärajausta ’AND (oil OR fluid)’. Lähtökohtana tiedonhaulle on toiminut LUT-yliopiston kirjaston LUT Primo -hakupalvelu. Primon poh-

jalta tehdyn kartoituksen jälkeen tutkimuksessa on käytetty tietokantoina ja hakupalveluina ProQuest-, Knovel- ja Scopus-tietokantoja.

Löydetyt lähteet arvioidaan liitteenä 1 olevan taulukkopohjan avulla ja tämän pohjalta valitaan tutkimuksessa käytettävät lähteet. Lähteet valitaan siten, että ne täydentävät toisiaan ja aiheita käsitellään ristiin eri lähteissä. Tutkimuksessa lähteet rajataan vuonna 2015 ja myöhemmin julkaistuihin lähteisiin. Tarvittaessa käytetään myös vanhempia lähteitä, mutta niiden käyttöä pyritään välttämään. Lähteiden laatua ylläpidetään valitsemalla mahdollisimman paljon vertaisarvioituja tiedeartikkeleita sekä painettuja lähteitä.

Tietoa lakkautumisesta haetaan myös suomeksi Googlen hakukonetta käyttäen muiden hakupalvelujen tarjotessa lähes yksinomaan opinnäytetöitä. Suomenkielisessä haussa käytetään hakusanaa ’hydrauliöljyn lakkautuminen’. Suomenkielisellä haulla saadut lähteet valitaan painottamalla kirjallisia lähteitä, lähteiden informatiivisuutta sekä lähteiden uutuutta. Tiedon tarpeen kehittyessä on tehty myös lisähaku käyttäen hakusanana ”base oil groups”. Tässä lisähaussa painottuvat samat tekijät kuin suomenkielisessä haussa.

2.2 Asiantuntijahaastattelut

Asiantuntijahaastattelut suoritetaan suullisina teemahaastatteluina, joihin on rakennettu valmiit kysymysrungot (Liite 2) keskustelun ohjaamiseksi. Lopullisista haastatteluista tehdään litteroinnit, joita käytetään tutkimuksen lähteinä. Lisäksi mahdollisia kirjallisuuslähteitä, joita haastatteluiden yhteydessä nousee esiin, käytetään tutkimuksen toteuttamiseen.

Tutkimukseen haastateltavat asiantuntijat valitaan hyödyntäen Tehohydro Oy:n kontakteja sekä tuntemusta lakkautumisen asiantuntijoista. Tutkimukseen valittavien asiantuntijoiden tavoitteena on tuoda laajasti asiantuntijuutta sekä lakkautumiseen synnyn teoriasta että sen aiheuttamista ongelmista ja ennakoivasta kunnossapidosta käytännössä. Haastateltaviksi asiantuntijoiksi tutkimukseen on valittu Tehohydro Oy:n Jani Näivä, Hydac Oy:n TkT Arto Laamanen sekä Hydac FluidCareCenter GmbH:lta PhD John K. Duchowski.

Näivältä löytyy laajasti käytännön kokemusta aiheesta teollisuuden ja kunnossapidon näkökulmista. Laamasella on Suomen tasolla laajaa asiantuntijuutta aiheesta sekä teorian että käytännön näkökulmista. Hän on myös FFPA:n (Finnish Fluid Power Association) koulutusjaoksen jäsen. Duchowski on yksi maailman johtavia asiantuntijoita aiheessa ja tehnyt

aiheen parissa paljon tieteellistä tutkimusta erityisesti sähköstatiikan ja materiaalikemian näkökulmasta. Haastateltavilta on kerätty hyväksyntä nimien käyttöön tutkimuksen ja haastattelujen yhteydessä.

2.3 Mittausdatan tutkimus

Mittausdatan tutkimus tehdään keräämällä ja analysoimalla arvoja Tehohydron käyttämästä mittaustietokannasta. Tehohydron alaan erikoistunut henkilökunta on kerännyt näytteet teollisuuden hydrauliikka- ja voiteluöljyjärjestelmistä, ja öljynäytteet on tutkittu kaupallisissa laboratorioissa. Tietokannassa on noin 200 tietuetta yhteensä 96:sta erillisestä käyttöpaikasta. Tietueet käydään läpi ja joukosta kerätään ne, joissa on mitattu lakkautumista MPC-menetelmällä (Membrane Patch Colorimetry). Menetelmä käsitellään tarkemmin luvussa kolme. Tietueet kerätään ilman tietoa käyttöpaikasta tai yrityksestä.

Mittausdatasta rajataan pois ne tietueet, jotka eivät sisällä tutkimuksen kannalta mielenkiintoisia arvoja. Kiinnostavia arvoja tietuteissa ovat gravimetriset tulokset, vesipitoisuus, öljyn sähkönjohtavuus, puhtausluokat pienillä hiukkasko'oilla, viskositeetti sekä TAN-luku (Total Acid Number, kokonaishappoluku). Mittausdatan muut arvot rajataan tutkimuksen ulkopuolelle, niiden joko jäädessä tutkimuksen rajausten ulkopuolelle, sisältäessä liian vähän mittapisteitä tai ollessa epäolennaista tietoa lakkautumisen kannalta.

Kerätyt arvot taulukoidaan ja järjestellään siten, että muuttujia voidaan vertailla keskenään kuvaajia hyödyntäen ja tutkia yhteyttä MPC-arvoon. Mittausdatasta myös luokitellaan öljytyypit niiltä osin kuin on mahdollista kerätyn tiedon avulla. Muuttujien välisten yhteyksien matemaattinen tarkastelu suoritetaan käyttäen Pearsonin korrelaatiokerrointa

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})(y_i-\overline{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\overline{y})^2}} \tag{1}$$

, jossa n on näyteparien määrä, x_i ja y_i ovat tietueen i yksittäiset arvot ja $\overline{x}$ ja $\overline{y}$ ovat näytteiden keskiarvot. Lisäksi tuloksissa esitetään korrelaation selitysaste

$$100\ \% \cdot r_{xy}^2 \tag{2}$$

, jossa r_{xy} on Pearsonin korrelaatiokerroin.

2.4 Menetelmien vertailu

Tässä tutkimuksessa käytetään triangulaation mukaisesti kolmea toisistaan riippumatonta tutkimusmenetelmää. Näitä menetelmiä vertaillaan toisiinsa lopullisten tulosten ja johtopäätösten saamiseksi kuvan 1 mukaisesti. Vertailulla lisätään tulosten luotettavuutta ja tarkastellaan menetelmien keskinäistä riippumattomuutta. Menetelmien keskinäisellä riippumattomuudella varmistetaan, että menetelmät ovat vertailukelpoisia, eivätkä toista toisiaan.

Menetelmillä pyritään keräämään tietoa eri näkökulmista. Kirjallisuustutkimuksella haetaan mahdollisimman kattavaa teoriapohjaa erilaisista syntymekanismeista ja ehkäisemismenetelmistä. Asiantuntijahaastatteluilla haetaan tietoa käytännönläheisemmin sekä kerätään tietoa aiheista, joihin kirjallisuuskatsauksella ei päästä käsiksi. Haastattelut myös tuovat käytännönläheisyyden näkökulmaa teollisuudesta ja ennakoivasta kunnossapidosta. Mittaustiedon tutkimuksella saadaan vertailukohtaa muihin menetelmiin ja aiempiin tutkimuksiin ja voidaan esittää uusia tai tunnettuja mitattavien suureiden välisiä yhteyksiä.

2.5 Menetelmien luotettavuus ja sen tarkastelu

Metodien luotettavuutta tarkastellaan taulukon 1 mukaisesti. Jokaisen menetelmän luotettavuutta tarkastellaan omana kokonaisuutenaan, minkä lisäksi triangulaatiota tarkastellaan omana kohtanaan.

Taulukko 1: Luotettavuustarkastelut tutkimusmenetelmille

	Reliabiliteetti	Validiteetti	Herkkyystarkastelu	Matemaattinen virhetarkastelu	Mittaustarkkuus	Saturaatio
Kirjallisuustutkimus	X	X	X	NA	NA	X
Asiantuntijahaastattelut	X	X	X	NA	NA	X
Mittausdatan tutkimus	X	X	X	X	NA	X
Triangulaatio	X	X	X	NA	NA	X

Taulukossa 1 riveillä ovat tarkasteltavat kokonaisuudet ja sarakkeissa ovat tarkasteltavat kuusi luotettavuuden kohtaa. Luotettavuustarkastelussa tutkittavat ominaisuudet on merkitty X-kirjaimella ja huomiotta jätettävät on merkattu lyhenteellä NA (Not Applicaple). Kirjallisuustutkimuksella, triangulaatiolla ja asiantuntijahaastatteluilla tarkasteltavia luotettavuusnäkökulmia on neljä ja mittausdatan tutkimuksella tarkasteltavia kohtia on viisi.

Kirjallisuustutkimuksessa ja asiantuntijahaastatteluissa reliabiliteetti pyritään varmistamaan avaamalla tiedonhakuun ja haastatteluun käytetyt menetelmät toistettavasti sekä litteroimalla haastattelut huolellisesti. Validiteetti varmistetaan kirjallisuustutkimuksessa hyödyntämällä liitteen 1 taulukkoa, jolla varmistetaan lähteiden vastaavan tutkimuksen kysymyksiin. Haastattelussa validiteetti puolestaan varmistetaan muotoilemalla haastattelurunko tutkimuksen tavoitteiden ja kysymysten kannalta tarkoituksenmukaiseksi. Herkkyystarkastelussa molemmilla menetelmillä arvioidaan lähteiden määrän ja laadun yhteisvaikutusta. Saturaation osalta keskeisintä on, esitetäänkö asiat tutkimusmenetelmän sisällä yhteneväisesti.

Mittausdatan tutkimuksessa reliabiliteetti pyritään varmistamaan sisällyttämällä riittävän laaja määrä yksittäisiä mittauksia tutkimukseen. Toistettavuutta myös parannetaan käyttämällä ammattilaisten keräämiä ja tutkimia näytteitä. Koska näytteiden mittaustarkkuutta ei voida jälkikäteen selvittää, jätetään se käsittelemättä. Validiteetti varmistetaan keräämällä tietueista lakkautumisen ja tutkimuksen rajauksen kannalta oleellisimmat arvot hyödyntäen kirjallisuustutkimuksen havaintoja. Matemaattisessa virhetarkastelussa tarkastellaan korrelaatiokertoimen keskivirhettä

$$S = \frac{1-r_{xy}^2}{\sqrt{n-1}} \tag{3}$$

, jossa S on keskivirhe, r_{xy} on Pearsonin korrelaatiokerroin ja n on käytettyjen näyteparien määrä. Herkkyystarkastelussa ja saturaatiota tarkastellessa pohditaan mittaustietueiden riittävyyttä ja laatua sekä niiden yhteyttä tuloksen herkkyyteen vaihdella.

Menetelmiä vertaillessa reliabiliteetti liittyy vahvasti menetelmien valinnan ja sitä kautta tutkimuksen toteutuksen toistettavuuteen. Validiteetissa keskeistä on, ovatko valitut menetelmät yhdessä tutkimuksen tavoitteita palvelevia. Herkkyystarkastelun kannalta oleellista on menetelmien välisten yhteyksien tarkastelu ja menetelmien laatu. Saturaatiossa korostuu lähteiden näkemyksien yhteneväisyys ja sen riittävyys tai riittämättömyys.

3 TULOKSET

Tässä osiossa käydään läpi eri tutkimusmenetelmillä saadut tulokset. Keskeisimmät tulokset esitetään osiossa 3.4 *Tulosten yhdistäminen*. Kirjallisuustutkimuksen ja asiantuntijahaastatteluiden osioissa esitetään yksityiskohtaisemmin lakkautumisen syntymekanismeja ja niihin vaikuttavia tekijöitä. Lisäksi tarkastellaan eri mittaus- ja seurantamenetelmiä sekä ehkäisemiseen ja poistamiseen käytettyjä menetelmiä yksityiskohtaisemmin ja nostetaan esille niiden vahvuuksia ja heikkouksia. Mittausdatan osiossa esitetään näytteiden luokittelu sekä korrelaatiot eri muuttujien välillä sekä koko tutkimuksen datajoukolle että lakkautumisriskin rajan ylittäville näytteille.

3.1 Kirjallisuustutkimuksen tulokset

Tässä osiossa käsitellään kirjallisuustutkimuksen löydöksiä jaotellen ne kolmeen eri osioon. Syntymekanismeja käsitellään ensimmäisessä osiossa ja jälkimmäisissä kahdessa osiossa käsitellään ehkäisemiseen käytettäviä keinoja. Ehkäisemiseen käytettävät keinot jaetaan vielä erikseen lakkautumisen mittaamiseen käytettäviin menetelmiin sekä lakkautumisen aiheuttamien ongelmien ehkäisemiseen käytettäviin menetelmiin.

3.1.1 Lakkautumisen syntymekanismit kirjallisuudessa

Lakkautumistuotteet muodostuvat öljyn perusrakenteen ja lisäaineiden kuluessa ja hajotessa. Nämä polymeeriyhdisteet ovat öljyssä keskikooltaan alle mikrometrin kokoisina , mutta voivat pinnoille kerääntyessään ja sakkautuessaan muodostaa suurempia, jopa 6 µm:n kokonaisuuksia. Lakkautumistuotteiden liukoisuus öljyyn on selvästi lämpötilariippuvaista, ja kylmemmillä alueilla kerrostumien muodostuminen alkaakin helpommin. Lakkautumaa voi kerrostua myös kuumemmille alueilla pitoisuuksien ollessa riittäviä. Kuumissa oloissa kerrostumat kuivuvat ja paksuuntuvat kovaksi pinnoitteeksi. (Phillips ja Staniewski 2016)

Suurin osa lakkautumistuotteista syntyy järjestelmän lämpimissä osissa, jolloin öljy voi kylmille alueille tullessaan saavuttaa saturaatiopisteen. Tällöin lakkautumistuotteet alkavat

erottua liuoksesta pinnoille tai toisiinsa kasaantuen, kunnes uusi tasapainotila saavutetaan. (Hong ja Jang 2023) Sakkaantumisen alkaminen nesteessä riippuu lämpötilan lisäksi molekyylien painosta, polaarisuudesta ja nesteen tilavuusvirrasta. Sakkaantuminen hiilivedyistä alkaa yleisesti ottaen noin 55 °C ja 58 °C välillä, vaikka toisaalta hapettumistuotteiden pitäisi olla liukoisia yli 40 °C:n lämpötilassa. (Phillips ja Staniewski 2016)

Nopeutuvaa öljyn vanhenemista sekä sitä kautta lakkautumista aiheuttavat järjestelmän erilaiset lämpörasitukset, liuenneet kaasut, öljyn seassa oleva vesi, hapettuminen sekä kemialliset rasitteet ja yhteensopimattomuudet (Hong ja Jang 2023; Kaihlanen 2016). Muita tekijöitä ovat mikrodiesel-ilmiö sekä sähkövarausten muodostuminen ja näiden aiheuttama kipinöinti järjestelmässä (Michael ja Zhao 2019; Phillips ja Staniewski 2016) Hapettumisessa happi ja öljyn rakenneosat reagoivat keskenään voiden muodostaa radikaaleja, jotka edelleen muodostavat polaarisia lakkautumistuotteita. (Hong ja Jang 2023; Michael ja Zhao 2019) Tämä kemiallinen muutos on palautumaton toisin kuin lakkautumistuotteiden olomuodon muutos liuenneen ja liukenemattoman olomuodon välillä. (Hong ja Jang 2023)

Korkeat lämpötilat, vesi ja erilaiset kiinteät epäpuhtaudet toimivat hapettumisen katalyytteinä nopeuttaen ilmiötä ja sen kautta lakkautumista. Nyrkkisäännön mukaan käyttölämpötilan noustessa kymmenellä asteella, öljyn käyttöikä puolittuu. (Hong ja Jang 2023) Öljyn vaahtoutumisella on lisäksi heikentävä vaikutus öljyn hapettumisen kestolle, mikä edistää lakkautumista (Phillips ja Staniewski 2016).

Mikrodiesel-ilmiö sekä kipinöinti ovat paikallisia lämpöpiikkejä ja äärriolosuhteita synnyttäviä ilmiöitä, jotka vaikuttavat hapettumisen ohella lakkautumiseen. Mikrodiesel-ilmiössä nopea paineen muuttuminen aiheuttaa öljyyn liuenneiden kaasukuplien luhistumisen paineen alla, jolloin kaasut syttyvät palamaan räjähdyksenomaisesti. Palamisessa lämpötila voi saavuttaa hetkellisesti useiden satojen tai jopa 1000 °C:n lämpötiloja. Näissä lämpötiloissa perusöljy ja lisäaineet hajoavat erilaisiksi vanhenemis- ja palamistuotteiksi epätäydellisen palamisen seurauksena. Mikrodiesel-ilmiön merkkejä ovat muun muassa lakkautuman ja öljyn tumma väri, palanut haju sekä tummien, alle mikrometrin, nokipartikkeleiden esiintyminen öljyssä. (Phillips ja Staniewski 2016)

Kipinöinti synnyttää mikrodiesel-ilmiötä korkeampia lämpötiloja, jotka voivat olla yli kymmenkertaisia verrattuna mikrodiesel-ilmiöön. Kipinöinnin synnyttämät olosuhteet saavat aikaan erilaisia hiiliyhdisteitä, kaasumaisia vanhenemistuotteita ja vapaita radikaaleja,

jotka kiihdyttävät lakkautumista. (Hong ja Jang 2023; Phillips ja Staniewski 2016) Kipinöinti ilmiönä pohjautuu sähköstaattiseen varautumiseen (ESC, Electrostatic Charging) öljyssä ja näiden varausten purkautumiseen (ESD, Electrostatic Discharging) johdemateriaalien, kuten suodattimen kuori- ja ydinosien, kautta. Kipinöinnin korkeista lämpötiloista ja vaihtelevista olosuhteista johtuen reaktiossa syntyvät tuotteet voivat vaihdella, ja puhdasta hiiltä syntyy mikrodiesel-ilmiötä vähemmän. (Phillips ja Staniewski 2016)

Varausten kertyminen öljyyn johtuu öljyn heikosta sähkönjohtavuudesta ja kyvyttömyydestä johtaa syntyviä varauksia pois öljystä. Potentiaalisia paikkoja ESC:lle ovat suodattimet, tankki ja paluulinjat, joissa voi esiintyä öljyn ja ympäröivän väliaineen välistä hankautumista. Arkoja tilanteita ovat turbulenttinen virtaus, öljyn sumuttuminen tai suihkumaisuus sekä kulkeminen ahtaista väleistä. Öljy on todennäköisesti aina jonkin verran varauksellista koko järjestelmäkierron ajan, mutta varausten taso vaihtelee. (Phillips ja Staniewski 2016)

Kipinöinti on yleistynyt nykyisillä tuhkattomilla hydrauliöljyillä, joiden sähkönjohtavuus on heikompi (Kunnossapitoyhdistys Promaint 2018, 64-65; Phillips ja Staniewski 2016). Kipinöintiin ja ESC:hen vaikuttavia tekijöitä öljyn sähkönjohtavuuden ohella ovat muun muassa virtausnopeus, lämpötila, viskositeetti, ja virtauskanavien suunnittelu. Noki, vesi ja öljyn vanhetessa syntyvät hiiliyhdisteet lisäävät polaarisina yhdisteinä sähkönjohtavuutta nesteessä ja sitovat itseensä polaarisia lisäaineita ja lakkautumistuotteita. Öljyn kunnossapidolla pyritään epäpuhtauksien poistamiseen öljystä, jolloin öljyn sähkönjohtavuus hakee jatkuvasti tasapainoa. (Phillips ja Staniewski 2016)

Edellä mainittujen tekijöiden lisäksi lakkautumista aiheuttavat erilaiset kemialliset epäsopivuudet hydraulijärjestelmissä. Tällaisia epäsopivuuksia voi syntyä esimerkiksi vaihtaessa öljytyyppien välillä ryhmästä toiseen. Erityisesti vaihto ryhmästä I ryhmään II voi aiheuttaa öljyn hajoamista ja odottamattomia reaktioita eri ryhmien lisäaineiden välillä. Lisäksi jotkut korroosionestoaineet sekä huuhteluun käytettävät aineet ja niiden sisältämät metalliyhdisteet voivat reagoida tuhkattomien öljyjen sisältämien happojen kanssa muodostaen saippuoitumisen kautta lakkautumista aiheuttavia yhdisteitä. (Hong ja Jang 2023) Taulukossa 2 esitetään American Petroleum Instituten (API) öljyjen luokittelu viiteen perusryhmään sekä eri ryhmien ominaisuuksia.

Taulukko 2. Öljyjen luokittelu API:n mukaan ja ryhmien ominaisuuksia

	API-ryhmä				
	I	II	III	IV	V
Öljytyyppi	Liuotinjalostettu mineraaliöljy	Vetykäsitelty mineraaliöljy	Vetykrakattu mineraaliöljy	Synteettinen PAO (Polyalfaolefiini)	Ryhmiin I-IV kuulumattomat öljytyypit
Tyydyttyneitä hiilivetyjä [%]	< 90	> 90	> 90	100	NA
Viskositeetti-indeksi (VI)	< 120	< 120	≥ 120	≥120	NA
Rikki [%]	> 0,03	≤ 0,03	≤ 0,03	NA	NA
Sähkönjohtavuus	Hyvä	Huono	Huono	Ei johda	NA
Polariteetti	Korkea	Vähemmän polaarinen	Lähes polaariton	Polaariton	NA
Lakan liukoisuus	Hyvä	Huono	Alhainen	Alhainen	NA

Taulukossa nähdään öljyryhmien luokittelu ja eri öljyryhmien ominaisuuksia. Ryhmän I öljyjen käyttö on vähenemään päin niiden sisältämien rikin ja aromaattisten yhdisteiden aiheuttamien epätoivottujen ominaisuuksien vuoksi. Ryhmien II ja III öljyt ovat pidemmälle käsiteltyjä ja ominaisuuksiltaan ryhmän I öljyjä vakaampia. Ryhmän IV öljyt ovat PAO-pohjaisia täysin synteettisiä öljyjä ja ryhmä V sisältää muihin ryhmiin kuulumattomat öljyt. (Rosenbaum 2014; Rizvi 2019) Promaint (2018) taulukoi kirjassaan lisäksi polariteettia ja lakan liukenemista, jotka esitetään taulukossa ja ovat laskevia siirryttäessä ryhmästä I kohti ryhmää V.

Öljyryhmät II-IV ovat korvanneet eri käyttökohteissa ryhmän I öljyjä. Uusien ryhmien II-IV öljyjen lisäainepaketit eivät sisällä myrkkyjä tai raskasmetalleja ja ovat tuhkattomia. Lisäksi johtuen ryhmien II ja III valmistusprosessista, ne sisältävät vähemmän tyydyttymättömiä polaarisia hiilivetyjä. Polaaristen hiilivetyjen sekä metallien pienemmän määrän takia, niiden kyky liuottaa polaarisia lakkautumistuotteita itseensä on perinteisiä ryhmän I öljyjä heikompi. (Kunnossapitoyhdistys Promaint 2018, 64-72) Johtuen ryhmien II ja III heikommasta liuottavuudesta, öljyjä pitää lisäaineistaa liuotuskyvyn parantamiseksi. Näiden lisäaineiden kuluessa liuotuskyky laskee ja muut lisäaineet voivat alkaa erottumaan öljystä ja muodostaa lakkautumaa. (Hong ja Jang 2023)

Muiksi syiksi lakkautumistuotteiden muodostumiselle mainitaan UV-valo sekä kavitaatio. UV-valo ei kuitenkaan ole hydrauliikassa merkittävä tekijä vähäisestä altistumisesta johtuen (Hong ja Jang 2023). Öljynäytteiden säilytyksessä UV-valo tulee kuitenkin huomioida (Wooton 2014). Myös kavitaation vaikutukset ilmiöön ovat pieniä, sillä ilmiö voidaan välttää jo kohtalaisella järjestelmän suunnittelulla. (Phillips ja Staniewski 2016)

3.1.2 Lakkautumisen mittaamismenetelmät kirjallisuudessa

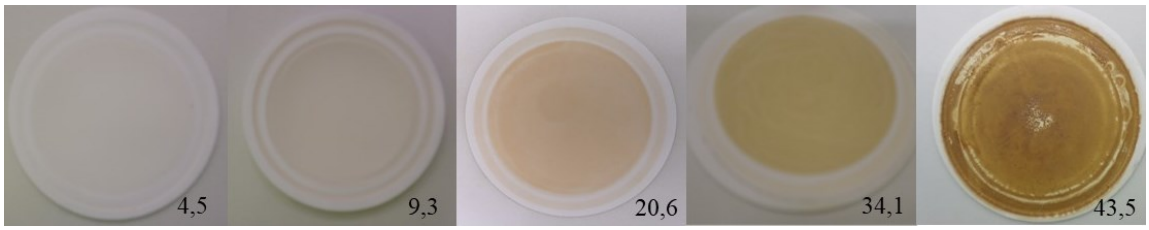
Lakkautumisen havaitsemisessa ongelmia tuottaa erityisesti partikkeleiden pieni koko ja koostumus. Tämän seurauksena perinteiset on-line- ja in-line-anturit eivät pysty tunnistamaan öljyssä olevia lakkautumistuotteita. Yleisesti käytössä olevilla automaattisen partikkelilaskennan menetelmillä, APC (Automatic Particle Counter), ei pystytä havainnoimaan alle 2 mikrometrin partikkeleita. APC:n ongelmia ovat myös syvyysnäön puute ja kykenemättömyys partikkelien koostumuksen määrittämiseen. APC:n käyttö painottuukin lähinnä öljyn puhtausluokan selvittämiseen. (Phillips ja Staniewski 2016) Lakkautumisen seurannassa käytetyin menetelmä on MPC standardiin ASTM D7843 pohjautuen (Hong ja Jang 2023; Phillips ja Staniewski 2016).

MPC:n lisäksi muita mittausmenetelmiä käytetään öljyn lakkautumispotentiaalin selvittämiseksi. Tällaisia menetelmiä ovat erilaiset hiukkaslaskentaan, epäpuhtauksien erottamiseen, antioksidantti-, happo-, tai vesipitoisuuteen sekä koostumuksen selvittämiseen perustuvat menetelmät. (Hong ja Jang 2023; MH Hydraulics 2020)

MPC:tä käyttäessä öljynäyte vedetään suodatuskooltaan 0,45 mikrometrin suodatinlapun lävitse, minkä jälkeen suodatinlapun keräämien jäännösten väriä arvioidaan. Tummempi väri kertoo korkeammasta lakkautumispotentiaalista. Menetelmän standardi myös määrittää lämpötilat ja ajat näytteen käsittelylle. (Hong ja Jang 2023; Kunnossapitoyhdistys Promaint 2018, 49-50) Näillä varmistetaan öljynäytteistä saatavien tulosten toistettavuus. MPC-menetelmässä ongelmana on sen riippuvuus näytteenottoväleistä ja kykenemättömyys kehityksen reaaliaikaiseen seurantaan. (Hong ja Jang 2023)

MPC:n tulokset esitetään MPC-luvulla, joka määritetään CIELAB ΔE-arvona asteikolla 0-100 nollan ollessa vaalein. MPC-luvun perusteella arvioidaan lakkautumisen vakavuutta. Seurantaa vaativia ovat arvot 15-30, epänormaaleja 30-40 ja kriittisiä arvot 41-50. Toisaal-

ta joissain ohjeissa hyväksyttäviä ovat arvot 0-40 ja seurantaa vaativia arvot 41-60. (Kunnossapitoyhdistys Promaint 2018, 49-50) Kaihlasen (2016) mukaan useimmat laboratoriot pitävät yli 40:n MPC-arvoa hälyttävänä, ja pitämällä MPC-arvo järjestelmässä alle 15:n pidennetään öljyn ja laitteiston elinikää. Kuvassa 2 havainnollistetaan eri ΔE-arvoja viidellä MPC-suodatinlapulla.



Kuva 2: eri ΔE-arvon omaavia MPC-suodatuslappuja

CPA (Colorimetric Patch Analyzer) menetelmä muistuttaa läheisesti MPC-menetelmää ja siinä hyödynnetään saman ASTM D7843 standardin esivalmisteluja öljynäytteelle. Suurimpana eroavaisuutena menetelmien välillä on testilapun suodatuskoko (0,8 µm) ja testituloksien tarkasteleminen RGB-arvona ja läpäisevän valon perusteella pelkän heijastavan valon sijasta. (Hong ja Jang 2023) Lakkautumista voidaan mitata myös gravimetrisesti standardin ASTM D4989 mukaisesti punnitsemalla suodatinkalvo, jolle lakkautumistuotteet kerääntyvät (Pravda, Sedenka, Blata ja Hrabovsky 2024).

Hiukkaslaskentamenetelmillä lämpötilalla on suuri vaikutus. On-line-mittauksen ja laboratorion öljynäytetutkimuksen eroavaisuus lakkautuneella järjestelmällä voi olla jopa viisi ISO-luokkaa standardin ISO 4406:2017 mukaisesti hiukkasko'oilla > 6 µm(c) ja > 14 µm(c). Tämä johtuu pullonäytteen jäähtymisestä ja öljyn liuotuskyvyn laskemisesta. Pienimmillä hiukkasilla > 4 µm(c) hiukkasten määrä voi olla reilusti yli kymmenkertainen 20 °C ja 80 °C näytteen välillä. (Kunnossapitoyhdistys Promaint 2018, 73-74) Myös muita partikkelilaskentamenetelmiä, kuten NAS 1638 ja SAE AS4059 voidaan hyödyntää ISO 4406:n sijasta (Hong ja Jang 2023).

Lakkautumispotentiaalia voidaan mitata myös välillisesti hapettumista ja antioksidanttien käyttöikää mittaamalla. Tähän perustuvia menetelmiä ovat RPVOT (Rotary Pressure Vessel Oxidation Test), RULER (Remaining Useful Life Evaluation Routine) sekä TOST (Turbine Oil Stability Test). Antioksidanttien väheneminen kertoo heikenneestä hapettumisenkestosta, jolloin hapettumisen seurauksena muodostuu enemmän lakkautumistuotteita. (Hong ja Jang 2023)

RPVOT perustuu ASTM standardiin D2272 ja öljynäytteen sisältävän pyörivän paineastian painemuutosten seuraamiseen. Tässä menetelmässä ongelmana on heikko toistettavuus, jolloin pienten muutosten seuraaminen on hankalaa. RULER on voltametrinen menetelmä, jossa standardin ASTM D6971 mukaisesti öljynäyte sekoitetaan elektrolyyttiin ja liuottimeen. Jännitettä vaihtelemalla aikaansaadaan muutoksia sähkövirrassa, minkä perusteella voidaan arvioida jäljellä olevien antioksidanttien määrää. (Hong ja Jang 2023) TOST mittaa standardin ASTM D943 mukaisesti öljynäytteen hapettumisen kestoa (Hong ja Jang 2023; Michael ja Zhao 2019) RULER ja RPVOT ovat menetelmiä, jotka eivät sovellu kaikille lisäainepaketeille tai öljytyypeille. (Kunnossapitoyhdistys Promaint 2018, 51)

Fourier Transform Infrared (FTIR) menetelmällä öljyssä tapahtuvia rakennemuutoksia voidaan tutkia näytteen läpäisevän infrapunakäyrän perusteella. Menetelmällä voidaan tutkia lisäaineiden määrien muutoksia, kun tunnetaan aallonpituudet, joilla lisäaineet absorboivat säteilyn. (Hong ja Jang 2023; Kunnossapitoyhdistys Promaint 2018, 51) Hapettumisessa syntyvien karbonyyliryhmien absorboiman aallonpituuden pohjalta voidaan arvioida hapettumista ja lakkautumista. (Hong ja Jang 2023)

Happoluvun (Acid Number, AN), joka tunnetaan myös nimellä TAN, mittaaminen näytteestä on eräs menetelmän lakkautumisriskin mittaamiselle. Menetelmä mittaa happamien aineiden määrää öljyssä ja kertoo öljyn vanhenemisesta hapettumisen kautta. (Hong ja Jang 2023)

Muita mainittavia menetelmiä ovat ultrasentrifugiset menetelmät sekä induktiivistesti kytketty plasmaspektrometri (ICP, Inductively Coupled Plasma). Ultrasentrifugilla saadaan pienet epäpuhtaudet kasaantumaan niiden havainnoimisen helpottamiseksi. (Hong ja Jang 2023). Lakkautumispotentiaalia voidaan arvioida myös vesipitoisuutta mittaamalla (Hong ja Jang 2023; Kaihlanen 2016).

ICP:llä voidaan tutkia muutaman mikrometrin kokoluokassa olevia pehmeitä hiukkasia ja saostumia. Näihin sisältyy suurin osa lakkautumisen aiheuttajista. Menetelmän haittapuolena on herkkyys vesipitoisuudelle ja toisaalta tarve löydösten vahvistamiseksi esimerkiksi tribomonitoroinnilla. (Kunnossapitoyhdistys Promaint 2018, 44-45)

Järjestelmästä voidaan mitata myös dielektrisyysvakiota. Dielektrisyysvakioon vaikuttavat polarisoituvuudet ja dipolimomentti, joka reagoi lakkautumiseen hapettumisen kautta. Vakion muutokselle lakkautumisen seurauksena ei kuitenkaan ole tarkkaa vertailuperustetta,

joten aihe kaipaisi vielä lisätutkimusta, jotta sillä voitaisiin luotettavasti ennustaa lakkautumista. (Hong ja Jang 2023)

Lakkautumispotentiaalia voidaan tarkkailla myös aistinvaraisesti. Aistinvaraisessa seurannassa varoitusmerkkeinä toimivat muutokset öljyn värissä, hajussa ja sakeudessa sekä varsinaiset epäpuhtaudet ja kerrostumat öljyssä ja järjestelmässä. Nämä kaikki ovat merkkejä öljyn kemiallisesta muutoksia ja voivat viitata lakkautumiseen. Erityisesti ongelman jo esiintyessä on komponenttien ja järjestelmän visuaalinen tarkastaminen hyödyllistä ongelman laajuuden selvittämiseksi. (Kaihlanen 2016)

Aistinvaraisten tarkastelujen tukena voidaan myös käyttää öljynäytteiden kemiallista analysointia, jolloin on mahdollista kemiallisen koostumuksen avulla luokitella lakkautuminen. Jos kertymä pystytään luokittelemaan syntyperän ja kemiallisen koostumuksen perusteella, voidaan juurisyy saada selville ja tämän kautta päästä tehokkaasti puuttumaan siihen. (Wooton 2014)

3.1.3 Kirjallisuuden ratkaisut lakkautumisongelmien ehkäisemiseksi

Yhtenä lähtökohtana ongelmien ehkäisemiseksi on säännöllinen öljyn kunnonvalvonta (Hong ja Jang 2023; Kaihlanen 2016). Säännöllinen öljyn kunnonvalvonta-ohjelma mahdollistaa öljyn tilan jatkuvan seuraamisen ja sitä kautta nopean ja ennakoivan reagoinnin ongelmien syntyyn (Kaihlanen 2016). Öljyn kunnonvalvontaa voidaan toteuttaa erilaisilla off-line-, on-line- ja in-line-menetelmillä. Lisäksi tiedot voidaan yhdistää äänestä, lämpötilasta, tärinästä ja voiteluominaisuuksista tehtäviin mittauksiin ennakoivan kunnossapidon tehostamiseksi. (Hong ja Jang 2023) Suurin osa edellisen osion menetelmistä on off-line menetelmiä, joissa öljynäyte erotetaan järjestelmästä erillistä tarkastelua varten. In-line mittauksessa mittaus tapahtuu suoraan järjestelmän virtauksessa ja on-line mittauksessa neste tuodaan virtauksesta mittalaitteelle erillisellä letkulla tai putkella. (Kunnossapitoyhdistys Promaint 2018, 13)

Myös hydrauliöljy voidaan valita ominaisuuksiltaan sellaiseksi, jolla on alhainen riski lakkautumiselle (Hong ja Jang 2023). Öljylaatu valitaan järjestelmän asettamien vaatimusten mukaisesti ja valintaan vaikuttavat useat tekijät järjestelmässä öljyn vanhenemisen lisäksi. Samaan aikaan öljyiltä vaaditaan myös ympäristöystävällisyyttä ja myrkyttömyyttä. Lisä-

ainekoostumuksella voidaan vaikuttaa öljyn ominaisuuksiin ja hidastaa öljyn kulumista sekä vanhenemista. Lisäksi voidaan parantaa veden ja ilman erottumista sekä öljyn termistä ja hapettumiskestävyyttä. (Gannon 2011)

Lakkautumistuotteiden syntyessä voidaan ongelmia ehkäistä järjestelmän huuhtelulla ja puhdistamisella öljyn vaihdon yhteydessä. Lisäksi kertymiä voidaan ehkäistä ja poistaa erilaisilla fyysisillä, sähköisillä ja kemiallisilla menetelmillä. Erilaisia vaihtoehtoja ovat mekaaninen suodattaminen, lakkautumistuotteita absorboivien väliaine-elementtien käyttäminen sekä erilaiset polaarisuuteen sekä sähköstaattisiin ratkaisuihin perustuvat menetelmät. (Hong ja Jang 2023; Kaihlanen 2016)

Ongelman ennakkoon välttämiseksi järjestelmän suunnittelu on tärkeä tekijä (Kaihlanen 2016; Phillips ja Staniewski 2016) Myös öljyjen suunnittelulla ja kehitystyöllä pyritään vähentämään lakkautumista. Nykytilanteessa suunnittelulla on suuri rooli lakkautumiseen käyttäjän keinojen ollessa vähäisiä. (Kaihlanen 2016) Komponenttien suunnittelulla on tärkeä rooli erityisesti mikrodiesel-ilmiön ja kipinöinnin osalta. Tankin mitoituksella ja suunnittelulla voidaan vaikuttaa molempiin. Oikein suunnitellulla tankilla öljypinta saadaan pysymään ohjearvojen sisällä ja saadaan öljylle riittävä rauhoittumisaika kaasujen ja veden erottumiseksi sekä varausten poistumiseksi. (Phillips ja Staniewski 2016)

Paluulinjojen mitoitus ja järjestelmän suunnittelu on myös tärkeässä roolissa molemmille ilmiöille turbulenttisten virtausten minimoimiseksi. Virtausta tankkiin vapaakierto- ja paineenrajoitusventtiilien läpi tulisi välttää, minkä lisäksi paluuputken pään oikeaoppinen sijoitus öljypinnan alapuolelle on tärkeää. Näillä menetelmillä sekä kaasukuplien että staattisten varausten muodostumista voidaan ehkäistä. Mikrodiesel-ilmiön kannalta myös öljyn kaasua erottavilla ominaisuuksilla sekä yleisellä järjestelmän huollolla on tärkeä rooli. Kipinöinnin kannalta virtauksen varautumista ei voida täysin estää, mutta sitä voidaan kuitenkin vähentää. (Phillips ja Staniewski 2016)

Kipinöintiin vaikuttavia tekijöitä suunnittelussa ovat virtausnopeus, nesteen ominaisuudet, järjestelmän maadoitus, materiaalit ja mitat sekä komponenttien suunnittelu ja näiden yhteisvaikutukset. Esimerkiksi sinkkiä sisältävät öljyt ovat pystyneet perinteisesti purkamaan syntyvät varaukset, mutta tilavuusvirtojen kasvaessa kipinöinti on yleistynyt myös niillä. Maadoitus poistaa varauksia, mutta ei kuitenkaan estä muodostumista eikä vaikuta poistumisnopeuteen öljyssä. Suodattimissa kipinöintiä voidaan vähentää tulo- ja paluupuolelle

asennettavalla johdeverkolla, laskemalla virtaustiheyttä tai käyttämällä paremmin sähköä johtavia väliaineita. Mitoituksessa pitää huomioida, että suodatintarkkuuden parantaminen saattaa lisätä kipinöintiä virtausnopeuden kasvaessa. (Phillips ja Staniewski 2016)

Mekaanisella suodatuksella voidaan poistaa öljystä lakkautumistuotteita (Hong ja Jang 2023; Kaihlanen 2016; Phillips ja Staniewski 2016). Tämä voi tapahtua joko pinta- tai syväsuodatuksena. Syväsuodatuksella saadaan pidempi vaihtoväli suodattimen kerätessä itseensä enemmän epäpuhtauspartikkeleita, mutta suodatuskyky pienille partikkeleille voi olla heikompi. Mekaaninen suodatus tarvitsee tuekseen usein muita menetelmiä, koska mekaanisella suodatuksella saadaan erotettua ainoastaan liukenemattomat partikkelit. (Hong ja Jang 2023) Hienosuodatuksella voidaan poistaa jopa alle 2 mikrometrin partikkeleita ja suodatusta voidaan tehostaa jäähdyttämällä öljy ennen suodatusta. Tällöin lakkautumistuotteet erottuvat liuoksesta paremmin jääden suodattimeen. Tämä voi kuitenkin edellyttää tarvetta lämmittää öljy uudelleen ennen sen palautusta järjestelmään. (Kunnossapitoyhdistys Promaint 2018, 74) Mekaanisen suodatuksen ongelmana on hienojakoisten suodattimien kalleus sekä herkkyys tukkeutua ja varata öljyä, eikä menetelmä siksi ole jatkuvassa käytössä optimaalinen (Phillips ja Staniewski 2016).

Lakkautumisen poistaminen polaarisiin materiaaleihin ja sähköstatiikkaan pohjautuvilla menetelmillä perustuu lakkautumistuotteiden polaarisuuteen. Näillä menetelmillä lakkautumistuotteet saadaan käyttäytymään halutulla tavalla, jolloin ne saadaan poistettua öljystä. (Hong ja Jang 2023; Phillips ja Staniewski 2016) Sähköstaattisilla menetelmillä saadaan poistettua öljystä jopa alle mikrometrin kokoluokkaa olevia tuotteita. Samalla nostetaan öljyn kykyä liuottaa järjestelmään sakkautuneita kerrostumia takaisin itseensä. (Kunnossapitoyhdistys Promaint 2018, 76-80)

BCA-menetelmässä (Balanced Charge Agglomeration) virtaus jaetaan kahtia ja jaetut osat varataan erimerkkisesti. Varatut virtaukset yhdistetään, jolloin varautuneet partikkelit kasaantuvat suuremmiksi kokonaisuuksiksi, jotka voidaan suodattaa mekaanisesti. (Hong ja Jang 2023; MH Hydraulics 2020; Phillips ja Staniewski 2016) Toinen vastaava menetelmä perustuu virtaussuuntaan nähden kohtisuoran sähkökentän muodostamiseen kahden elektrodilevyn välille. Näin polaariset ainesosat lähtevät liikkumaan virtauksen poikkisuunnassa kohti elektrodeja, jolloin ne voidaan kerätä erillisillä virtauksen suuntaisilla keräyselementeillä. (Hong ja Jang 2023; Kunnossapitoyhdistys Promaint 2018, 77-78)

Keräyselementit voivat olla materiaaliltaan esimerkiksi selluloosapohjaisia, joka polaarisena materiaalina sitoo itseensä lakkautumistuotteita (Hong ja Jang 2023; Phillips ja Staniewski 2016). Selluloosapohjaisia elementtejä voidaan lisäksi päällystää hartsilla, jolloin saadaan vahvistettua vetovoimaa polaarisiin ainesosiin. Ongelmana näillä menetelmillä on tarve suurelle pinta-alalle ja hitaalle virtausnopeudelle. Varaukseen pohjaavat menetelmät ovat myös herkkiä suurille vesipitoisuudelle, koska tällöin elektrodien välille voi muodostua sähkövirta veden toimiessa johteena. Nämä menetelmät myös keräävät ja yhdistävät polaarisia lisäaineyhdisteitä heikentäen niiden tehoa. Ei myöskään tiedetä, kuinka sähköisesti varautunutta öljy on näiden menetelmien jälkeen. (Phillips ja Staniewski 2016)

Ioninvaihtohartsien käytössä huokoinen elementti vetää puoleensa lakkautumistuotteita ja sitoo ne itsensä ioninvaihdolla. (Hong ja Jang 2023) Menetelmässä etuna on toimiminen liuenneisiin lakkautumistuotteisiin myös korkeammissa (> 40 °C) lämpötiloissa (Kaihlanen 2016; Phillips ja Staniewski 2016). Sekä ioninvaihtohartsilla että selluloosaelementeillä ongelmana on nopea kyllästyminen, mikä tarkoittaa pahasti saastuneissa järjestelmissä keräyselementtien lyhyttä vaihtosykliä (Phillips ja Staniewski 2016).

Huuhtelulla voidaan puhdistaa järjestelmä erilaisista kertymistä öljynvaihdon tai seisokin yhteydessä (Hong ja Jang 2023; Kaihlanen 2016). Huuhtelulla saadaan lakkautumisen poiston lisäksi poistettua vierasaineita, jotka voivat aiheuttaa lakkautumista. Huuhtelun jälkeen on tärkeää huolehtia huuhteluun käytettyjen kemikaalien poistamisesta, etteivät ne pääse reagoimaan öljyn tai sen lisäaineiden kanssa. (Hong ja Jang 2023)

Ongelmia voidaan ehkäistä myös kemiallisesti lisäämällä öljyyn liuotuskykyä parantavia lisäaineita. Tällöin öljyn kyky liuottaa itseensä järjestelmään sakkautuneita kerrostumia paranee. Menetelmä ei kuitenkaan ole tässä tehokkaimmillaan, vaan toimii parhaiten ennakoivana menetelmänä pitäen lakkautumistuotteet liuenneena pidempään. (Hong ja Jang 2023) Saatavilla on myös kemiallisia ratkaisuja, joilla saadaan estettyä lakkautumistuotteiden tarttumista pinnoille ja samalla lisättyä lakkautumistuotteiden erottumista öljystä, jolloin niiden suodattaminen järjestelmästä on helpompaa. (Kaihlanen 2016)

Lakkautumista aiheuttavia nesteen varautumista, kaasukuplien syntymistä ja hapettumista ei voida täysin estää, mutta niitä ja niiden vaikutuksia voidaan kuitenkin vähentää. (Phillips ja Staniewski 2016) Ongelmien ehkäisemiseksi ei ole yhtä jokaiseen sovellukseen toimivaa menetelmää ja tämän vuoksi eri menetelmien yhdistelmiä käytetään. (Hong ja Jang 2023;

Kaihlanen 2016) Tulevaisuudessa lakkautumista ehkäistessä korostuu menetelmien edelleen kehittäminen, sähkönjohtavuuden mittaaminen reaaliaikaisesti järjestelmistä sekä selkeiden raja-arvojen ja käyttäytymismallien selvittäminen lakkautuville systeemeille. (Hong ja Jang 2023)

3.2 Asiantuntijahaastatteluiden tulokset

Lakkautumiseen liittyvissä ongelmissa trendi on ollut kasvava viimeisimpien vuosien aikana, ja öljylaatujen muutoksella on ollut vaikutuksensa tähän kehitykseen. Toinen ongelma lakkautumiseen liittyen on tietoisuuden puute ilmiöstä ja sen aiheuttamista ongelmista ja kustannuksista. (Laamanen 2024; Näivä 2024) Lakkautumisen liukenevuus järjestelmässä riippuu öljyn rakenteesta, lämpötilasta ja paineesta. API II-IV ryhmien öljyillä on alhainen sähkönjohtavuus ja siten alhainen kyky liuottaa polaarisia lakkautumistuotteita. Liukenevuus lisäksi heikkenee paineen kasvaessa ja lämpötilan laskiessa. (Laamanen 2021)

Lakkautuminen on terminä ongelmallinen kattaen monia ilmiöitä, jotka aiheuttavat samankaltaisia ongelmia järjestelmässä. Käyttämällä termiä lakkautuminen (eng. *varnishing*) ei pystytä erottelemaan eri syntymekanismeista johtuvia ongelmia. (Duchowski 2024; Laamanen 2024) Erilaisia syntymekanismeja lakkautumistuotteille ovat muun muassa ESD, hydrolyysi, hapettuminen ja lämpökuormitus. (Duchowski 2024; Laamanen 2021) Myös mikrodiesel-ilmiö on yksi tekijä lakkautumisen takana (Duchowski 2024; Laamanen 2024). Koska lakkautuminen on taustoiltaan moninainen, ei ole yhtä jokaiseen paikkaan käyvää ratkaisua. Tiedossa on kuitenkin keskeisimmät tekijät ilmiön taustalla ja näin ollen jokaiseen tilanteeseen voidaan suunnitella ratkaisu (Duchowski 2024).

Kiihtyvä siirtyminen API ryhmästä I ryhmiin II ja III on aiheuttanut ongelmia ESD:n kanssa. Syinä tälle siirtymälle ovat paremmat hapettumisenkesto-ominaisuudet, alempi rikkipitoisuus ja parempi VI. (Duchowski 2014) Siirtymän myötä yleistyneet tuhkattomat ja sinkittömät öljyt aiheuttavat sähkönjohtavuuden laskemista ja sitä kautta ongelmia ESC:n ja ESD:n kanssa (Duchowski 2014; Laamanen 2024). Myös korkeampi jalostusaste vaikuttaa alentavasti sähkönjohtavuuteen. Uusilla öljyillä sähkönjohtavuus ei myöskään kasva lämpötilan noustessa yhtä voimakkaasti kuin vanhoilla öljylaaduilla. Tästä syystä ongelmat ESD:n kanssa ovat yleistyneet myös lämpimissä (≥ 50 °C) järjestelmissä aiemmin ongelmien rajoittuessa kylmempiin (≤ 20 °C) järjestelmiin. (Staudt, Duchowski ja Leyer 2020)

ESD:n esiintymiselle on kaksi välttämätöntä ja riittävää ehtoa: Ensimmäisenä ehtona öljyn sähkönjohtavuus on ≤ 500 pS/m ja toisena ehtona hydraulinen kuorma on ≥ 0,01 L/(min cm^2). (Duchowski 2024; Staudt, Duchowski ja Leyer 2020) Kokonaisuutena öljyn varautumiskäyttäytymiseen vaikuttaa siis sähkönjohtavuus lämpötilan funktiona, tilavuusvirta komponenttien läpi sekä hydraulinen kuorma (Staudt, Duchowski ja Leyer 2020). Sähkönjohtavuuden rajoittamista 500 pS/m:iin on myös ehdotettu, mutta tämä rajaus pudottaisi markkinoilta suurimman osan öljyistä (Duchowski 2024).

Edellä mainittujen ehtojen täyttyessä öljyn ja suodatinmateriaalien välinen potentiaaliero voi kasvaa riittävän suureksi kipinöinnin, eli ESD:n esiintymiseksi. ESD voi saavuttaa erittäin korkeita, jopa 10 000 °K lämpötiloja. (Duchowski 2024) ESD:n aikana syntyvä energia riittää katkomaan molekyyleissä esiintyviä sidoksia ja molekyylisidosten rikkoutuessa öljyyn muodostuu vapaita radikaaleja (Duchowski 2014; Duchowski 2024). Nämä vapaat radikaalit polymerisoituvat herkästi ja voivat näin muodostaa öljyyn lakkautumistuotteita (Duchowski 2024; Laamanen 2021) Mikäli ESD:tä esiintyy järjestelmässä, on se todennäköisesti merkittävä tekijä lakkautumisen kannalta (Duchowski 2024).

Varautumisen taustalla ovat erot öljyn ja käytettävien suodatinmateriaalien pintaenergioissa ja taipumus varautua erimerkkisesti. Eri materiaalien työfunktiot kertovat tarvittavan energian elektronien tuomiseksi materiaalin pintaan. (Duchowski 2024; Staudt, Duchowski ja Leyer 2020) Työfunktiolla on yhteys pintajännitykseen ja sen kautta eri materiaaleja voidaan verrata öljyyn. Työfunktioiden pohjalta materiaalit voidaan järjestää varautumistaipumuksensa perusteella tribosähköiseen sarjaan. (Staudt, Duchowski ja Leyer 2020)

Tribosähköisestä sarjasta voidaan tulkita materiaalien varautumistaipumusta. Mitä suurempi ero materiaaleilla on, sitä todennäköisempää varautuminen on. Yleisesti suodatinmateriaalina käytössä oleva lasikuitu on taipuvainen öljyn yhteydessä varautumaan positiivisesti, jolloin öljy on taipuvainen varautumaan negatiivisesti. Tuomalla nämä kaksi materiaalia lähekkäin ne varautuvat ja niiden välille syntyy jännite-ero. Valitsemalla sopivampi suodatinmateriaali tai pintakäsittelemällä suodatinmateriaalia, voidaan tätä varautumista kuitenkin ehkäistä tai jopa kokonaan estää. (Duchowski 2024)

Sähkönjohtavuuksilla on suuresta roolista huolimatta suuria eroja. Esimerkiksi PAO-öljyillä (API ryhmä IV) on erittäin alhainen sähkönjohtavuus heteroatomisten molekyylien puutteen seurauksena, ja toisaalta osalla ryhmän V öljyistä, kuten polyoli- ja fosforieste-

reillä sähkönjohtavuus voi olla 2 000:n pS/m ja 10 000:n pS/m välillä. Näillä ongelmia aiheuttavat kuitenkin heikko VI ja tarve erikoismateriaaleille tiivisteissä. (Duchowski 2024) Sähkönjohtavuus myös muuttuu käytön aikana, kun kosteus ja epäpuhtaudet muuttavat sähkönjohtavuutta. Myöskään alkuperäisen öljyn tarkkaa rakennetta ei aina saada selville johtuen rakenteen tarkasta suojelusta. (Laamanen 2021)

Öljylaadun valinnan ongelmana onkin eri ominaisuuksien tasapainottaminen, sillä lakkautumisen ehkäiseminen ei ole ainoa vaadittu ominaisuus öljyltä (Duchowski 2024; Laamanen 2024). Öljyille ja järjestelmälle asetetaan suunnittelussa korkeat vaatimukset eikä öljyjen rakenteen muutos helpota asiaa. Kasvavat tilavuusvirrat pienempien pinta-alojen läpi sekä suodatinmateriaalin valinta ovat osa ongelmaa. (Näivä 2024; Staudt, Duchowski ja Leyer 2020)

Mikrodiesel-ilmiössä keskeisenä piirteenä on alkuainehiilen ja nokihiukkasten muodostuminen öljyyn (Duchowski 2024; Laamanen 2024). Nämä nokipartikkelit ovat kooltaan alle kahden mikrometrin luokassa ja syntyvät kaasukuplien luhistuessa kasaan paineen noustessa niin nopeasti ettei syntyvä lämpö kerkeä siirtymään ympäröivään öljyyn. Mikrodiesel-ilmiössä syntyvä energia on riittävä katkomaan molekyylien sidoksia ja synnyttämään vapaita radikaaleja, jotka polymerisoituvat lakkautumistuotteiksi. (Duchowski 2024)

Lämpökuormituksen aiheuttamalla lakkautumisella syy voi löytyä komponenttien huonosta suunnittelusta tai mitoituksesta. Yksi esimerkki lämpökuormituksesta on väärin mitoitettu öljytankin lämmitin. (Duchowski 2024; Näivä 2024) Suositus upotuslämmittimen tehotiheydelle on 2,48 W/cm², jonka ylittyessä lämpökuormitus voi aiheuttaa ongelmia. Lämpökuormituksen syynä voi myös olla komponenteissa vallitsevat korkeat lämpötilat. Esimerkiksi pumpuissa lämpötila voi nousta 65 °C:n ja 70 °C:n välille ja aiheuttaa lämpökuormitusta öljylle. (Duchowski 2024) Vuodot järjestelmässä aiheuttavat myös öljyn lämpenemistä ja sitä kautta pistemäistä lämpökuormaa öljylle (Näivä 2024).

Järjestelmässä olevalla ilmalla on myös oma vaikutuksensa öljyn vanhenemiseen. Se aiheuttaa lämpöhäviöitä pumppujen hyötysuhteen laskiessa, minkä lisäksi sillä on suora nopeuttava vaikutus öljyn vanhenemiseen. (Laamanen 2024) Myös muut vierasaineet öljyssä voivat vaikuttaa lakkautumistuotteiden syntymiseen (Näivä 2024).

Säännölliset öljyanalyysit ovat yksi keino lakkautumisen seuraamiseksi (Laamanen 2024; Näivä 2024). Mittausdatan kerääminen vertailupohjaksi uudesta öljystä on tärkeää, jotta

muutoksiin voidaan reagoida nopeasti ja tehokkaasti. Lakkautumisen esiintymiselle ei ole selkeää aikaväliä monien tekijöiden kytkeytyessä siihen. Öljyn luontaisten hävikin, kuten vuotojen ja kunnossapidon kautta tapahtuva öljyn uusiutuminen sekä muut kunnossapitotoimet vaikuttavat lakkautumisen esiintymiseen. Lakkautumisen esiintyessä ole aina mahdollisuutta tutkia lakkautumisen juurisyitä, mutta mikäli niitä päästään selvittämään, voidaan ongelma yhdistää järjestelmän ominaisuuksiin tai öljylaatuun. (Näivä 2024)

Lakkautumista mitatessa MPC on käytetyin menetelmä lakkautumisen havaitsemiseksi. (Duchowski 2024; Laamanen 2024; Näivä 2024) MPC:llä on kuitenkin myös heikkoutensa. Siinä lakkautumistuotteet pakotetaan esiin öljynäytteen pitkillä varastointi- ja lämmitysajoilla, joiden aikana lakkautumistuotteiden muodostuminen mahdollistetaan tai sitä jopa kiihdytetään. Lisäksi menetelmässä käytettävät polaarittomat liuottimet pakottavat polaariset aineet, kuten lakkautumistuotteet esiin liuoksesta. Menetelmä näin ollen vahvistaa lakkautumisen esiintymistä näytteessä. Ongelmallista on myös tulosten mittaaminen pistekohtaisesti, jolloin näytteen epähomogeenisuus aiheuttaa ongelmia. (Duchowski 2024) MPC:n ongelmana on myös muiden ilmiöiden vaikutus näytteen väriin, jolloin MPC-arvo ei välttämättä suoraan kerro lakkautumisesta (Laamanen 2021).

Lakkautumista voidaan pyrkiä hallitsemaan säännöllisillä ja riittävillä on-line- ja laboratoriomittauksilla. MPC:n tukena voidaan käyttää puhtausluokan määrittämistä eri lämpötiloissa sekä TAN-arvon mittausta. Hiukkaslaskenta ISO 4406:n mukaan 20 °C:n ja 80 °C:n lämpötiloissa auttaa vanhenemistuotteiden määrän arvioinnissa. Alimman kokoluokan (>4 µm) hiukkasten määrä kasvaa merkittävästi lakkautuneella öljyllä alemmassa lämpötilassa. Tämä johtuu pienikokoisten lakkautumistuotteiden voimakkaasti lämpötilariippuvaisesta liukenevuudesta. TAN-arvo puolestaan korreloi karkeasti dielektrisyyteen ja sähkönjohtavuuteen, jolloin näitä voidaan mitata epäsuorasti on-line-antureilla. TAN-arvon ongelmana on kuitenkin vaihtelevuus öljylaatujen ja jopa valmistuserien välillä. (Laamanen 2021)

MPC:n ohella myös muita väriin perustuvia menetelmiä on tarjolla. Esimerkiksi tristimulusvärinmittauslaitteella (eng. *tristimulus colorimeter*) voidaan mitata öljynäytteen väriä suoraan ilman näytteen käsittelyä. Mittalaite käyttää aallonpituusaluetta 200-800 nm ja algoritmia selvittääkseen värin intensiteetin ja sävyn. Tätä menetelmää ei ole käytetty öljylle ainakaan laajassa mittakaavassa, mutta käyttämisen pitäisi olla mahdollista. (Duchowski 2024) Partikkelilaskenta jäähdytetystä öljystä voisi myös laajemmin käytettynä tarjota potentiaalisen vaihtoehdon lakkautumisen mittaamiselle (Laamanen 2024).

Sähkönjohtavuuden mittaaminen on yksi menetelmä lakkautumisriskin arvioinniksi erityisesti kipinöinnin osalta (Duchowski 2024; Laamanen 2024; Näivä 2024). Sähkönjohtavuuden, pintajännityksen ja lisäainetasojen mittaustuloksia yhdistämällä sekä kokemuksen perusteella voidaan ennustaa ESD:n todennäköisyyttä. Ongelmana on kuitenkin muuttujien keskinäiset vuorovaikutussuhteet, kuten lämpötilan ja lisäaineiden samanaikainen vaikutus sähkönjohtavuuteen. ESD:n mittauksessa voidaan myös hyödyntää Hydac:n kehittämää Stat-Stick®-menetelmää, jossa kuparisauvan avulla mitataan purkausten jännitteitä, joita voidaan edelleen lukea suoraan oskilloskoopin näytöltä. Mittauksissa eri järjestelmien väliset jännitetasot eivät kuitenkaan ole keskenään vertailukelpoisia. (Duchowski 2024)

Lakkautumisen ehkäisemiseksi on myös tärkeää hidastaa ja seurata vanhenemista. Vanhenemisen hidastamisen keinoja ovat kunnollinen suodatus sekä ilma- ja vesipitoisuuden hallinta öljyssä. Ilma- ja vesipitoisuutta voidaan hallita erityisesti ilman tai veden poistamiseen tarkoitetuilla suodattimilla, tankkioptimoinnilla tai eristämällä öljy kokonaan ympäröivästä ilmasta ja hyödyntämällä alipainetta öljyyn liuenneen ilman ja kosteuden poistamiseen. (Laamanen 2024) Vesi-, ilma- ja partikkelipitoisuuksien hallinnassa myös kunnossapidolla ja huolloilla on merkittävä rooli (Duchowski 2024).

Järjestelmän ja komponenttien suunnittelulla on tärkeä rooli lakkautumisen ehkäisemisessä. Järjestelmän suunnittelussa on tärkeää huomioida järjestelmän lämpötila, öljylaatu sekä epäpuhtauksien poistaminen ja suodatus (Duchowski 2024; Laamanen 2021; Näivä 2024). Edellisessä kappaleessa mainitut menetelmät ilma- ja vesipitoisuuksien rajoittamiseksi ovat myös yksi tärkeä osa järjestelmäsuunnittelua. Näillä menetelmillä voidaan saavuttaa kompakti järjestelmä vähentäen samalla lakkautumisen riskitekijöitä. (Laamanen 2024)

Komponenttitason suunnittelussa erityisesti ESD:n ehkäisemiseksi suodattimien ja niiden materiaalien suunnittelu on tärkeää. Aiemmin keinona on ollut suodatinmateriaalin muuttaminen, mutta nykyään tiedetään pintakäsittelyn olevan tehokkaampi vaihtoehto. Pintakäsittelyssä voidaan käyttää materiaaleja, jotka ovat öljyn kanssa samalla tasolla tribosähköisessä sarjassa tai öljyä kauempana lasikuidusta, jolloin materiaalien varautumistaipumukset kumoavat toisensa. Vaihtoehtona on myös komponenttien suurentaminen hydraulisen kuorman pienentämiseksi, mutta tämä ei aina ole mahdollista. (Duchowski 2024)

Suodatinmateriaalin muokkaamisen ohella aiemmin käytettyjä menetelmiä ovat myös olleet antistaattiset lisäaineet ja johdeverkot suodatinelementeissä. Pintakäsittelyllä päästään

kuitenkin kiinni juurisyyhyn muokkaamalla suodatinmateriaali vastaamaan pintaenergialtaan öljyä. (Staudt, Duchowski ja Leyer 2020) Myös komponenttien materiaalien vaihtaminen lakkautumisen kertymistä ehkäiseviksi voisi olla yksi keino vähentää ongelmia (Laamanen 2024).

Lakkautumisen aiheuttamien ongelmien ehkäisemiseksi on myös tärkeää poistaa lakkautumistuotteita järjestelmästä sitä mukaa, kun niitä syntyy (Näivä 2024). Tähän erilaisia menetelmiä ovat jäähdytetyn öljyn syväsuodattaminen sekä ioninvaihtoon perustuvat menetelmät. Poistamalla lakkautumistuotteita kiertävästä öljystä saadaan öljyn liuotuskykyä parannettua ja öljy pystyy liuottamaan lisää kerrostumia itseensä. (Laamanen 2021) Lakkautumistuotteita poistavat laitteet ovat kuitenkin ongelmallisia sen suhteen, että ne eivät poista juurisyytä, jolloin ongelma voi nousta uudelleen esiin, mikäli laite joudutaan irrottamaan järjestelmästä. Laitteiden suunnitelmallinen ennakoiva käyttö on myös haastavaa, sillä niiden käyttötarpeelle ei ole määritetty selkeitä ja yleisesti päteviä raja-arvoja. (Laamanen 2024)

Lakkautumisen ehkäisemiseksi tärkeintä on kerätä mittausarvoja mahdollisimman laajasti, jotta voidaan arvioida juurisyitä ja puuttua niihin lakkautumisen tehokkaaksi estämiseksi. (Duchowski 2024; Laamanen 2024) Ongelmiin puuttuminen on tehotonta, mikäli pyrkimystä juurisyiden ymmärtämiseen ei ole (Duchowski 2024; Laamanen 2021; Näivä 2024).

3.3 Mittausdatasta saadut tulokset

Tietokannasta olleista tietueista on valittu tutkimukseen 71 tietuetta rajausten pohjalta. Tässä osiossa esitellään keskeisimmät havainnot näissä tietueissa esiintyvien mitattujen arvojen pohjalta. Taulukossa 3 esitetään tietueiden luokittelu 40 asteessa mitatun viskositeetin pohjalta sekä öljynäytteiden luokittelu MPC-lukujen pohjalta käyttäen raja-arvoja 15 ja 30. MPC-luvun ollessa yli 15 käsitellään järjestelmää lakkautumisriskin alaisena järjestelmänä. Tätä raja-arvoa käytetään myös korrelaatioita tarkastellessa kaikista mittaustuloksista tehtävien korrelaatiotarkastelujen ohella. Raja-arvoa 30 käsitellään tuloksissa lakkautuneen järjestelmän rajana.

Taulukko 3: Mittatietueet luokiteltuna viskositeetin ja MPC-luvun perusteella

Viskositeettiluokka ISO VG (Viscosity Grade)	Raja-arvot [mm^2/s]	Näytteiden määrä [KPL]	MPC-luku > 15 [KPL]	MPC-luku > 30 [KPL]
32	[28,39]	8	0	0
46	]39,57]	54	22	11
68	]57,80]	2	0	0
100	]80,102]	6	0	0
Ei mitattu	NA	1	0	0
Yhteensä	NA	71	22	11

Taulukosta 3 nähdään, että suurin osa näytteistä, 54 kappaletta, on luokassa ISO VG 46. Lisäksi kaikki tietueet, joissa MPC-luku on koholla ovat tästä luokasta. Lakkautuneita näytteitä, joiden MPC-luku > 30, on 11 kappaletta. Luokittelu viskositeettiluokkiin on tehty käyttäen luokkien välisenä rajana luokkien nimellisten viskositeettien keskiarvoa.

Taulukosta 4 nähdään Eri mittaussuureiden yhteyksiä MPC-lukuun korrelaatiokertoimen ja selitysasteen avulla ilmaistuna. Tulokset esitetään erikseen koko mittausjoukolle sekä tietuille, joissa MPC-luku on yli 15. Liitteestä 3 löytyy pistekaaviot vastaaville suureille trendiviivoilla täydennettynä, sähkönjohtavuuden ja vesipitoisuuden välinen pistekaavio sekä muiden hiukkaskokojen puhtausluokkien kuvaajat.

Taulukko 4: Tutkittujen öljynäytteiden määrä ja korrelaatiokertoimet suureittain

Mitattu suure	Mittapisteitä [KPL]	Mittapisteitä MPC > 15 [KPL]	Korrelaatiokertoroin r_{xy} [-]	Selitysaste [%]	Korrelaatiokertoroin MPC > 15 r_{xy15} [-]	Selitysaste MPC > 15 [%]
MPC-gravimetrinen tulos [mg/L]	41	8	0,675	45.6	0,754	56.9
Vesipitoisuus [ppm]	71	22	-0,233	5.4	-0,872	76.0
Sähkönjohtavuus [pS/m]	66	19	-0,317	10.1	-0,782	61.2
Puhtausluokka > 4 µm ISO/SAE [-]	71	22	-0,004	0.0	-0,053	0.3
TAN [mgKOH/g]	71	22	-0,289	8.4	-0,868	75.3

Taulukosta nähdään, että MPC-gravimetrisellä tuloksella on positiivinen korrelaatio MPC:n kanssa. Vesipitoisuudella, sähkönjohtavuudella ja kokonaishappoluvulla on jonkin verran negatiivista korrelaatiota MPC:n kanssa. Pienimmällä hiukkasluokalla korrelaatio on nimellisesti negatiivinen, mutta suuruudeltaan erittäin lähellä nollaa. Korrelaatioiden selitysasteista merkittäviä ovat MPC-gravimetristen tulosten selitysasteet sekä vesipitoisuuden, sähkönjohtavuuden ja kokonaishappoluvun selitysasteet, kun MPC > 15.

Liitteen 3 kuvista nähdään trendikäyrien suuntien olevan korrelaatioiden kanssa yhtenevät. Kuvista voidaan myös nähdä korrelaatioiden parantuminen mittapisteiden hajonnan vähentyessä erityisesti sähkönjohtavuudella ja vesipitoisuudella. Liitteen viimeisestä kuvasta nähdään vesipitoisuuksien ja sähkönjohtavuuksien korreloivan positiivisesti keskenään korrelaatiokertoimen arvolla r_{xy} = 0,384.

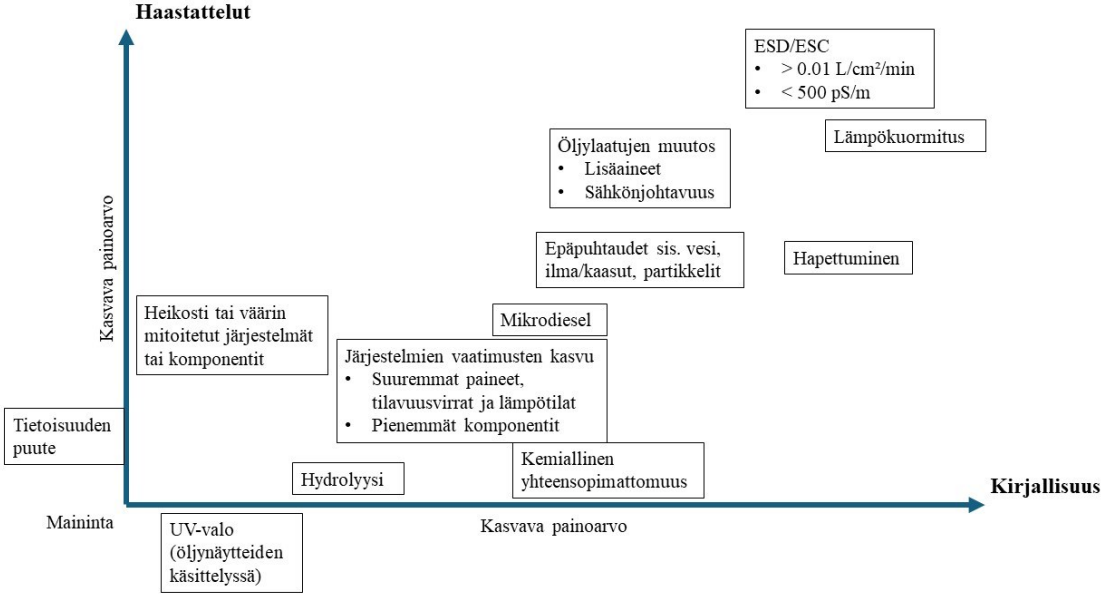
3.4 Tulosten yhdistäminen

Saadut tulokset ovat melko yhteneväisiä. Eri menetelmien välillä ei ole varsinaisia erimielisyyksiä vaan suurimmat eroavaisuudet tulivat esille siinä, mitä ja miten laajasti eri tekijöitä käsitellään tai miten merkittävinä niitä pidetään. Kuvassa 3 esitetään erilaiset syntymekanismit ja niiden käsittelyn painoarvo eri menetelmillä. Kuvassa 4 vastaavasti esitetään käsittelyn painoarvot erilaisille menetelmille, joilla lakkautumisen riskiä ja etenemistä voidaan mitata sekä menetelmille, joilla lakkautumiseen liittyvien ongelmien syntymistä voidaan ennakoivasti ehkäistä.

Kuvat eivät esitä tai vertaile menetelmien paremmuutta, vaan sen sijaan kuvilla esitetään menetelmien ja tekijöiden käsittelyn laajuutta kirjallisuudessa sekä asiantuntijahaastatteluissa. Menetelmien kuvauksen mukaisesti asiantuntijahaastattelun tulokset pitävät sisällään asiantuntijahaastatteluiden kautta esille nousseet kirjalliset lähteet, joita ei löydetä kirjallisuustutkimuksen menetelmien mukaisilla tiedonhauilla.

Vaikka tulokset ovat asiantuntijahaastattelujen ja kirjallisuustutkimuksen välillä melko yksimielisiä, mittausdatan analysoinnissa tulokset poikkeavat jonkin verran näiden menetelmien näkemyksistä. Sekä vesipitoisuus että kokonaishappoluku korreloivat negatiivisesti MPC-luvun kanssa. Haastatteluissa ja kirjallisuudessa korkea vesipitoisuus sekä hapettuminen mainitaan riskitekijöiksi lakkautumiselle, mikä antaisi olettaa positiivista korrelaa-

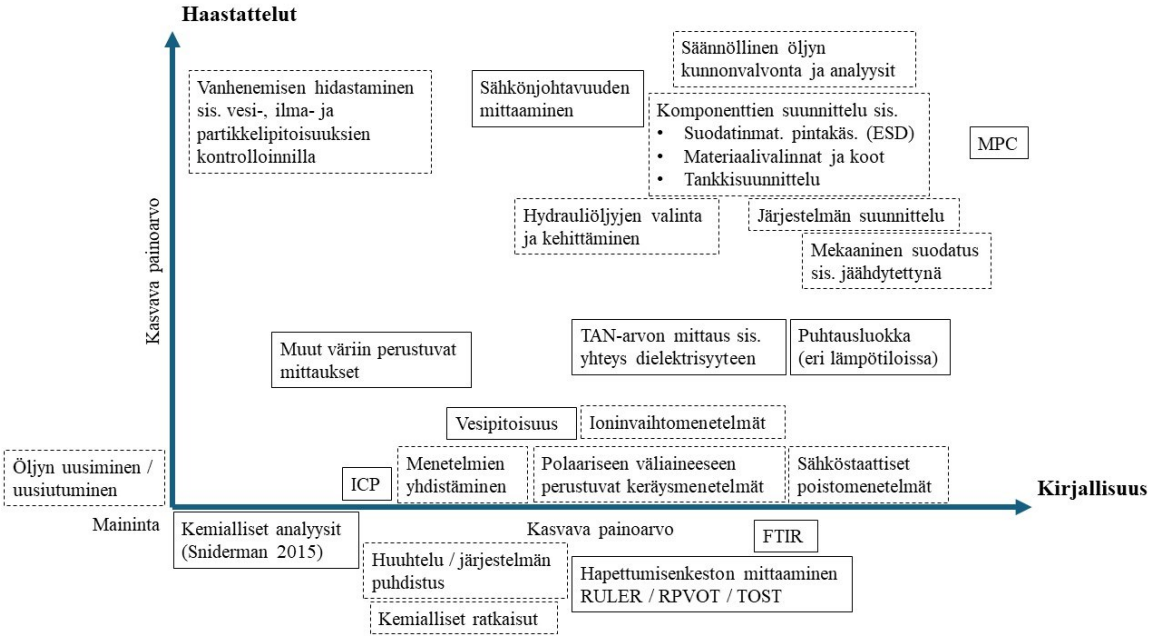
tiota. Myöskään partikkelimäärä ei korreloi pienimmässä puhtausluokassa odotetusti MPC-luvun kanssa korrelaation ollessa heikosti negatiivinen odotetun positiivisen korrelaation sijasta.



Kuva 3: Syntymekanismit ja niiden käsittely eri menetelmien tuloksissa

Kuvasta 3 nähdään eri syntymekanismien käsittelyn laajuus kirjallisuustutkimuksen ja asiantuntijahaastatteluiden lähteissä. Pystyakselilla on painoarvo asiantuntijahaastatteluissa ja vaaka-akselilla vastaavasti painoarvo kirjallisuustutkimuksen tuloksissa. Kohti vasenta alanurkkaa painottuvat tekijät, jotka vain mainitaan jommassakummassa lähteessä ja oikeaa yläkulmaa kohti sijoittuvat tekijät, joita käsitellään laajasti molempien menetelmien aineistoissa. Kuvasta nähdään, että laajimmin käsiteltyjä tekijöitä syntymekanismeille järjestyksessään ovat ESD ja ESC, lämpökuormitus, öljylaatujen muutos, hapettuminen sekä erilaiset epäpuhtaudet öljyssä.

Kuvasta nähdään mielipiteiden olevan melko yhteneväisiä koskien erilaisten syntymekanismien vakavuutta lakkautumiseen. Kaikki juurisyyt sijoittuvat melko lähelle diagonaalia, eikä tällöin kummankaan menetelmän aineistoissa käsitellä kovin laajasti juurisyytä, jota ei toisessa menetelmässä käsiteltäisi ollenkaan tai hyvin mitättömästi. Yksittäisiä tekijöitä löytyy kuitenkin molempien menetelmien tuloksista, joita ei käsitellä ollenkaan tai käsitellään hyvin vähäisesti toisessa menetelmän aineistoissa.



Kuva 4: Mittausmenetelmät ja ehkäisemiskeinot sekä niiden käsittely eri menetelmien tuloksissa

Kuvassa 4 esitetään erilaiset lakkautumisen mittaus- ja ehkäisemismenetelmät kuvan 3 kaavion periaatteita käyttäen. Mittausmenetelmät on kuvassa merkitty käyttäen yhtenäistä reunaviivaa ja ongelmia ehkäisevät keinot on merkitty käyttäen katkoviivaa. Ero kirjallisuustutkimuksessa ja haastatteluissa käsiteltyjen menetelmien välillä on selkeämpi kuin syntymekanismeilla. Tämä näkyy kuvassa eri menetelmien jakautumisena tasaisemmin ja kauemmas diagonaalista. Kuvasta myös nähdään, että kirjallisuustutkielmassa mainittavien menetelmien määrä on huomattavasti haastattelussa käsiteltäviä laajempi, mikä näkyy menetelmien painottumisena kuvan alalaitaan. Kaavion akseleiden ulkopuolelle sijoittuvat menetelmät ovat sellaisia, joita käsitellään ainoastaan kyseisen tutkimusmenetelmän aineistossa.

Kuvasta nähdään, että laajimmin tunnistettuja menetelmiä mittaamiseen ovat MPC, sähkönjohtavuuden ja puhtausluokan mittaaminen sekä kokonaishappoluvun hyödyntäminen. Myös FTIR nousee kirjallisuuden puolelta melko korkealle. Ongelmia ehkäisevien keinojen osalta esiin nousevat säännölliset öljyanalyysit ja kunnonvalvonta, komponenttien ja järjestelmän suunnittelu, mekaaninen suodatus sekä hydrauliöljyn valinta. Haastatteluissa esiin nousevat vanhenemisen hidastaminen ja kirjallisuuden puolelta sähköstaattiset menetelmät ja polaarisuuteen perustuvat menetelmät.

4 POHDINTA

Tässä osiossa käsitellään tutkimuksen tulosten luotettavuutta ja vertaillaan tuloksia aiempien tutkimusten tuloksiin. Lisäksi nostetaan esille työn keskeisimmät johtopäätökset sekä pohditaan tulosten uutuusarvoa, hyödynnettävyyttä ja yleistettävyyttä. Osiossa pohditaan myös tämän tutkimuksen aikana esiin nousseita jatkotutkimusaiheita, joilla tämän tutkimuksen tuloksia voitaisiin täydentää tai jatkojalostaa. Luotettavuuden tarkastelu tehdään osiossa 2.5 *Menetelmien luotettavuus ja sen tarkastelu* esitetyn taulukon 1 pohjalta.

4.1 Vertailu muiden tutkijoiden saamiin tuloksiin

Kuten tulosten yhdistämisestä huomataan, ovat asiantuntijahaastatteluissa ja näiden kautta tulleissa aineistoissa esitetyt seikat pääasiassa yhteneväisiä kirjallisuustutkimuksen näkemysten kanssa. Mittausten osalta MPC:n käyttö nousee haastatteluissa vahvasti esille, mutta se saa myös huomattavasti kritiikkiä. Lisäksi sähkönjohtavuuden mittaamiselle annetaan selkeästi kirjallisuutta suurempi painoarvo haastatteluissa. Ehkäisemiskeinojen osalta öljyn vanhenemisen hidastaminen suodatuksella ja pitoisuuksien hallinnalla nousee vahvasti esiin haastatteluissa.

Mittausdatan osalta poikkeavuutta on enemmän. Erityisesti kokonaishappoluvun ja vesipitoisuuden negatiivinen korrelaatio sekä puhtausluokan korrelaation puute herättävät mielenkiintoa. Näitä tekijöitä selittää omalta osaltaan se, etteivät kaikki mittaukset ole välttämättä lakkautuneista järjestelmistä. Koska öljynäytteiden taustalla saattaa olla myös muita järjestelmien käyttöongelmia kuin lakkautuminen, voivat korkean vesipitoisuuden mittaukset olla järjestelmistä, joissa vesipitoisuus on aiheuttanut suurimmat ongelmat eikä MPC tai lakkautuminen ole ollut välttämättä koholla.

Standardien mukainen puhtausluokka on ongelmallinen ottaessaan huomioon vain yli 4 µm:n partikkelit. Tällöin pienet lakkautumispartikkelit jäävät havaitsematta, mikä saattaa selittää korrelaation vähäisyyttä. Sähkönjohtavuudessa nähdään, että korkeammilla MPC-luvuilla ei esiinny korkeita sähkönjohtavuuksia, mikä on linjassa muiden tutkijoiden esittämän lakkautumisen ja sähkönjohtavuuden välisen yhteyden kanssa. Negatiivinen korre-

laatio myös lisääntyy, kun arvojen vaihtelu pienenee. Kokonaishappoluvulla syyt negatiiviselle korrelaatiolle saattavat selittyä vesipitoisuuden kanssa samoilla tekijöillä sekä sillä, että korkean vesipitoisuuden tai korkean hiukkaspitoisuuksien näytteillä hapettuminen on saattanut edetä pitkälle, vaikkei lakkautumista olisikaan tapahtunut merkittävästi. Myöskään mittaus- ja tutkimustarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä ei voida täysin sulkea pois.

4.2 Tutkimuksen objektiivisuus

Tutkimuksen aihe on lähtöisin yritykseltä, joka toimii hydrauliikka-alalla. Tämän seurauksena tutkimuksen objektiivisuuden tarkastelu on välttämätöntä tehdä. Lähtökohtaisesti tutkimus suoritettiin ilman yrityksen ohjausta ja ainut selkeä vaikutus yrityksellä on tuloksiin asiantuntijahaastattelun henkilövalintojen kautta. Objektiivisuutta heikentää asiantuntijoiden valitseminen aiheen antaneen yrityksen kontaktien kautta sekä valittujen asiantuntijoiden työskentely yrityksille puolueettomien tahojen sijaan.

Yritysasiantuntijoiden vastauksissa saattavat painottua edustetun yrityksen näkemykset aiheeseen. Haastateltavien nimien käyttämiseen saatu lupa antaa kuitenkin olettaa, että haastateltavat vastasivat kysymyksiin parhaan tietonsa mukaan. Lisäksi vastauksia tulkitessa yhteys yrityksiin tiedostetaan ja yritysten vaikutus vastauksia referoidessa pyritään minimoimaan. Haastattelukysymysten laatimista ei voida myöskään pitää täysin objektiivisena, mutta tämä on väistämätön ongelman haastatteluun perustuvissa menetelmissä.

Kirjallisuustutkimuksessa aineisto on kerätty ilman ulkopuolista vaikutusta ja kirjallisuuslähteet valittu puolueettomalla taulukolla (Liite 1), joka osittain on muotoutunut tiedonhaun mukana. Käytettyjen hakukoneiden kautta myös lähteiden laatu on sellainen ettei esimerkiksi yritysten kaupallisia nettisivuja käytetä lähteinä ollenkaan. Toki täytyy huomioida, että osa käytetyistä lähteistä on yritysten edustajien kirjoittamia. Tämä on tiedostettu lähteitä tulkitessa ja pyritty esittämään asiat mahdollisimman objektiivisesti.

Mittausdata on saatu aiheen ideoineelta yritykseltä. Mittausdatan käsittely avataan kokonaisuudessaan tässä tutkimuksessa, eikä siihen ole annettu ohjausta yrityksen puolelta, joten myös mittausdatan tutkimusta voidaan pitää objektiivisena. Lisäksi tuloksia vertaillaan keskenään ulkoisista tekijöistä riippumattomasti ja tällä vähennetään yksittäisien menetel-

mien subjektiivisuuden vaikutusta koko tutkielman objektiivisuuteen. Näin ollen voidaan todeta objektiivisuuden toteutuvan koko tutkimuksen osalta.

4.3 Tutkimuksen reliabiliteetti ja validiteetti

Tutkimuksen reliabiliteetin varmistamiseksi käytetyt tutkimusmenetelmät esitetään niin yksityiskohtaisesti, että niiden toistaminen on mahdollista. Kirjallisuustutkimuksessa avataan menetelmät tiedonhakuun sisältäen tietokannat, hakusanat sekä arviointikriteerit lähteille. Asiantuntijahaastatteluissa esitetään perustelut haastateltavien valinnalle sekä haastatteluista on muodostettu tarvittavat litteroinnit ja dokumentoinnit (Liite 2) haastattelujen rakenteen toistamiseksi. Haastatteluissa toistettavuutta heikentää jokaisen haastattelutilanteen ainutkertaisuus, mikä on ominaista valitulle haastattelumenetelmälle. Myös haastateltavien rajattu määrä ja valinta lisäävät toistettavuuden haasteita. Haastattelujen kautta kerättyä muuta aineistoa ei myöskään pystytä toisintamaan eri haastateltavilla. Mittausdatan osalta reliabiliteetti on melko vahva käytetyn suuren näytemäärän ansiosta. Käytetyn aineiston rajallisuudesta johtuen voidaan samoja menetelmiä hyödyntäen kuitenkin päätyä eri tuloksiin johtuen mittausten ja mitattavien järjestelmien suuresta vaihtelusta. Paremman toistettavuuden takaamiseksi suurempi datamäärä isommasta perusjoukosta olisi siis optimaalista. Tähän tutkimukseen tällaista dataa ei kuitenkaan ole ollut saatavilla.

Validiteetti on varmistettu kirjallisuustutkimuksessa käyttämällä liitteen 1 mukaista arviointitaulukkoa lähteille. Arviointitaulukko on muodostettu lähteiden sisällön pohjalta ja näin ollen sen vastaamisesta tutkimuksen kysymyksiin on pidetty huolta läpi aineiston keräämisen. Haastatteluissa kysymysrunkojen muodostaminen tutkimuskysymysten ja tutkimuksen tavoitteen pohjalta pyrkii varmistamaan validiteetin. Kysymysrungon heikkoutena on kuitenkin se, ettei jokaisessa haastattelussa saada vastausta kaikkiin kysymyksiin, mikä on validiteetin kannalta heikentävä tekijä.

Mittausdatan kerääminen pohjautuu kirjallisuustutkimuksen ja siten validiteetti pohjautuu vahvasti kirjallisuustutkimuksen löydöksiin. Tämä vähentää menetelmien riippumattomuutta, mutta mahdollistaa oikeiden muuttujien tarkastelun mittausdatasta satunnaisten muuttujien tarkastelun sijaan parantaen siten validiteettia. Kokonaisuutena tutkimuksen reliabiliteetti on mahdollistettu menetelmien ollessa toistettavissa työn menetelmiä seu-

raamalla. Myös validiteetti koko tutkimuksen osalta on riittävä, sillä valituilla menetelmillä mitataan ja havainnoidaan oikeita tekijöitä tutkimuskysymyksiin vastaamiseksi.

4.4 Virhe- ja herkkyystarkastelu

Sekä kirjallisuustutkimuksessa että asiantuntijahaastatteluissa luotettavuuden varmistamiseksi painoarvo on lähteiden korkealla laadulla niiden suuren määrän sijasta. Kaikki kirjallisuustutkimukseen valitut lähteet ovat painettuja, eli niiden sisältö ei muutu. Lisäksi yhtä lukuun ottamatta kaikki lähteet ovat alle 10 vuotta vanhoja, jolloin ne ovat myös ajantasaisia. Lähteiden joukossa on myös useampia vertaisarvioituja artikkeleita. Osassa lähteissä kirjoittajana on yrityksen edustaja, mutta tämä on tiedostettu lähteitä tulkitessa ja poimittu artikkeleista yleispätevät asiat. Lisäksi saturaatiota tarkkaillessa suurin osa tiedoista on pystytty varmistamamaan kahdesta tai useammasta lähteestä liitteen 1 mukaisesti, jolloin voidaan todeta kerättyjen tietojen olevan luotettavia.

Myös asiantuntijahaastatteluissa painopiste on haastateltavien korkeassa laadussa haastateltavien määrän ollessa pienempi. Haastattelu menetelmänä on herkkä haastattelutilanteiden ainutkertaisuuden vuoksi. Tätä saadaan kuitenkin tasapainotettua keräämällä tietoa myös haastattelujen yhteydessä esiin tulevista kirjallisista lähteistä. Saadut haastattelut ovat henkilöiltä, joilla on laaja ja tunnustettu kokemus sekä asiantuntijuus lakkautumisesta. Lisäksi saturaatiota tarkastellessa eri haastateltavat nostavat esiin pääpiirteessään samoja tekijöitä lakkautumisen taustalta. Koska haastateltavilla on yhteyksiä keskenään, on haastateltavien samat näkemykset toki odotettavia. Kokonaisuutena asiantuntijahaastatteluiden tuloksia voidaan kuitenkin pitää luotettavina, vaikkakin haastateltavia voisikin olla enemmän ja laajemmalta pohjalta.

Mittausdatan osalta tulosten herkkyys on ilmeistä mittausten ollessa tapauskohtaisia ja vaihdellessa eri järjestelmien välillä. Myöskään mittausten laatu ei ole tälle työlle täysin optimaalinen tietueiden sisältäessä tutkimuksen kannalta mittauksia myös epäolennaisista ongelmista. Mittausten määrä on kuitenkin riittävä saturaation osalta ja sen osalta menetelmää voidaan pitää luotettavana. Matemaattisen virhetarkastelun tulokset on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5: Korrelaatioiden keskivirheet

	MPC-gravimetrinen	Vesi-pitoisuus	Sähkön-johtavuus	Puhtaus-luokka	TAN
Keskivirhe r_{xy}	0.086	0.113	0.112	0.120	0.110
Keskivirhe r_{xy15}	0.163	0.052	0.092	0.218	0.054

Taulukosta nähdään, että vesipitoisuudella, sähkönjohtavuudella ja kokonaishappoluvulla keskivirheet ovat noin kolmasosan korrelaation suuruudesta, mikä on virheenä melko merkittävä. MPC-luvun ollessa yli 15 virheet pienenevät huomattavasti ja korrelaatio on selkeämpi myös virhetarkkuuden rajoissa. MPC-gravimetrisillä tuloksilla korrelaation keskivirhe on suurempi lakkautumisriskin järjestelmille, mikä todennäköisesti johtuu tietueiden vähäisestä määrästä. Puhtausluokan osalta keskivirheet ovat suuria ja vahvistavat entisestään sitä, ettei selkeää korrelaatiota esiinny mittaustuloksilla.

Menetelmien välistä yhteyttä tarkastellessa voidaan todeta, että menetelmien riippumattomuus toisistaan on riittävällä tasolla. Täyttä riippumattomuutta ei voida taata, sillä esimerkiksi haastateltujen henkilöiden tiedot voivat osittain perustua käytettyihin kirjallisuuslähteisiin. Menetelmien laatu on kokonaisuutena riittävä niiden täydentäessä toisiaan ja kuitenkin ollessa erillisiä. Saturaation osalta tuloksia voidaan myös pitää luotettavina, sillä eri menetelmillä saatiin toisiaan tukevia tuloksia erityisesti asiantuntijahaastattelujen ja kirjallisuustutkimuksen kesken, joita voidaan perustellusti pitää luotettavimpina menetelminä.

4.5 Keskeiset johtopäätökset

Lakkautumisen syntymisen taustalla vaikuttaa useita tekijöitä. Näitä ovat öljyn vanhenemista ja rakenteen hajoamista aiheuttavat ilmiöt, järjestelmien suunnittelun kautta öljylle asetetut vaatimukset sekä suoranaiset suunnittelu- tai käyttövirheet tietoisuuden puutteesta johtuen. Keskeisimpiä tekijöitä ovat ESC ja ESD, lämpökuormitus, öljylaatujen muutokset, öljyn hapettuminen sekä öljyssä esiintyvät epäpuhtaudet.

Eri tekijöillä on myös laajasti vaikutuksia ristiin, mikä voi tehdä ongelman ennustamisesta hankalaa. Esimerkiksi öljylaatujen muutoksen myötä polaaristen ainesosien liukoisuus ja öljyn sähkönjohtavuus ovat laskeneet. Alempi liukoisuus heikentää öljyjen kykyä liuottaa lakkautumistuotteita itseensä ja alempi sähkönjohtavuus altistaa öljyn ESC:lle ja edelleen

ESD:lle. Järjestelmien vaatimusten kasvu on puolestaan nostanut lämpötiloja, tilavuusvirtoja ja paineita, mikä aiheuttaa lisääntynyttä lämpökuormitusta sekä varautumista ja paineen kautta alentaa liuotuskykyä. Öljyssä esiintyvät epäpuhtaudet, kuten vesi, kaasut ja partikkelit nopeuttavat öljyn vanhenemista ja voivat toimia hapettumisen katalyytteinä.

Lakkautumista voidaan kuitenkin mitata ja ehkäistä useilla keinoilla. Ehkäisemisen keskeisin tekijä on öljykunnon säännöllinen valvonta ja analysointi yhdistettynä syntymekanismien ja niiden moninaisuuden ymmärtämiseen. Mittaamisessa MPC toimii vahvana perusmenetelmänä, mutta sitä voidaan tukea lukuisilla eri mittauksilla kuten sähkönjohtavuuden, TAN-arvon ja FTIR-mittauksilla. Myös puhtausluokan mittaaminen eri lämpötiloissa toimii potentiaalisena menetelmänä lakkautumisen arviointiin. Mittaustulosten vertaileminen alkuperäiseen öljyn tilaan ja yhdistäminen järjestelmän muihin mittauksiin on tärkeää muutosten havaitsemisen ja nopean reagoinnin kannalta.

Ehkäisemisen kannalta tehokkainta on järjestelmän ja komponenttien huolellinen suunnittelu lakkautumista ehkäiseviksi. Tämä pitää sisällään epäpuhtauspitoisuuksien hallinnan esimerkiksi suodattamalla, tankkien ja putkistojen suunnittelun sekä materiaalien valinnan. Tankkia suunnitellessa pitää ottaa huomioon veden ja kaasujen poistuminen, tankin oikea mitoitus sekä paluuputken pään sijoittaminen. Järjestelmää suunnitellessa öljyn kulkemista vapaakierto- ja paineenrajoitusventtiilien kautta tulisi välttää mahdollisimman paljon turbulenttisten virtausten ehkäisemiseksi. Myös hydrauliöljyn valinta on tärkeä osa suunnittelua ja vaikuttaa osaltaan lakkautumisen ehkäisemiseen. Erityisesti öljyn sähkönjohtavuudella ja polaarisuudella on suuri vaikutus lakkautumiseen.

Mikäli lakkautumistuotteita kuitenkin alkaa syntyä järjestelmään öljyn vanhetessa väistämättä, on niiden poistamiseen tarjolla useita erilaisia menetelmiä. Näihin sisältyvät mekaaninen suodatus, sähköstaattiset menetelmät, polaarissuutta hyödyntävät menetelmät ja ioninvaihtomenetelmät. Mekaanista suodatusta voidaan myös tehostaa jäähdyttämällä öljyä. Eri menetelmiä yhdistelemällä voidaan saavuttaa paras lopputulos.

4.6 Tulosten uutuusarvo, hyödynnettävyys ja yleistettävyys

Tulosten keskeisin uutuusarvo perustuu erityisesti lakkautumisen juurisyiden ja niitä ehkäisevien menetelmien esittämiseen kootusti ajantasaisimpaan tietoon pohjautuen. Aiem-

missa tutkimuksissa juurisyiden ehkäiseminen jää pienemmälle huomiolle huomion ollessa ongelmien poistamisessa tai ilmiön mittaamisessa. Tässä työssä mittaamisen kautta selvitettäville juurisyille esitetään konkreettisia keinoja poistaa tai ehkäistä syntymekanismien esiintymistä. Työn tuloksissa tarjottuja menetelmiä voidaan hyödyntää teollisuushydrauliikan järjestelmissä syntyvien lakkautumisongelmien ehkäisemiseksi, tunnistamiseksi ja poistamiseksi. Erityisesti menetelmiä voidaan hyödyntää osana ennakoivaa kunnossapitoa ja näin taata järjestelmälle katkottomampi ja taloudellisempi toiminta. Kun ongelmat havaitaan ajoissa, niihin voidaan puuttua ennen kuin ne aiheuttavat järjestelmän toiminnan heikentymistä tai tuotantokatkoksia.

Tulokset voidaan yleistää teollisuushydrauliikan ulkopuolelle liikkuvan hydrauliikan sovelluksiin. Tuloksia voidaan myös soveltaa suurimmalle osalle voiteluöljyistä, joilla esiintyy samoja ilmiöitä hydrauliöljyjen kanssa. Liikkuvalla hydrauliikalla merkittävimmät erot liittyvät järjestelmien pienempään kokoon ja öljytilavuuteen sekä öljylaatujen eroihin ympäristönäkökulmien ollessa suuremmassa roolissa. Voiteluöljyillä puolestaan korkeammat lämpötilat ja pienemmät paineet ovat keskeisinä eroina hydrauliöljyihin verratessa.

4.7 Jatkotutkimusaiheet

Tutkimus avaa tilaa myös useille jatkotutkimusaiheille lakkautumisen parissa. Syntymekanismien osalta esimerkiksi ESC:n tarkempi tarkastelu tarjoaa mahdollisuuden ilmiön parempaan ymmärtämiseen. Lisäksi ilmiön kemiallinen tausta ja lakkautumisen syntyessä tapahtuvat kemialliset muutokset öljyjen rakenteessa on aihe, josta löytyy aihetta lisätutkimukselle. Lisäksi lisäaineistuksen kemiallista vaikutusta lakkautumiseen voisi tutkia joko yhdessä kemiallisten reaktioiden kanssa tai omana kokonaisuutenaan.

Lakkautumista voisi tutkia myös kontrolloidumman ympäristön kvantitatiivisella tutkimuksella eri syntymekanismien merkittävyyden selvittämiseksi tai esitettyjen mittausmenetelmien raja-arvojen ja hyödynnettävyyden määrittämiseksi. Tässä tutkimuksessa eri syntymekanismien painoarvot jäävät vielä hieman avoimeksi ja tämä aihe kaipaisi lisätutkimusta, jotta eri ilmiöiden ehkäisemisen tärkeys voitaisiin selvittää. Esimerkiksi tässä tutkimuksessa esitettyjen mittausten ja lakkautumisen yhteyden tarkempi tutkiminen hallituissa olosuhteissa auttaisi valitsemaan tehokkaimmat menetelmät lakkautumisongelmien ehkäisemiseksi.

5 YHTEENVETO

Tämä kandidaatintyö toteuttaa sille annetut tavoitteet vastaten tutkimuskysymyksiin ja esittäen keskeisimmät syntymekanismit ja vuorovaikutussuhteet lakkautumisen takana. Lisäksi tutkimuksessa onnistuneesti esitetään laaja kirjo erilaisia menetelmiä, joilla lakkautumisen syntyä ja sen aiheuttamia ongelmia voidaan ehkäistä ennakoivasti joko kunnossapidolla tai jo järjestelmien suunnittelulla. Tutkimus on suoritettu järjestelmällisesti hyödyntäen esitettyjä tutkimusmetodeja, joita ovat kirjallisuustutkimus, asiantuntijahaastattelut sekä mittausdatan tutkimus teollisuuden öljyjärjestelmistä.

Menetelmiä vertaillaan keskenään triangulaation mukaisesti ja menetelmille sekä niiden vertailulle tehdään laaja ja huolellinen luotettavuustarkastelu esitetyillä menetelmillä. Luotettavuustarkastelun pohjalta voidaan todeta tulosten olevan luotettavia ja objektiivisia, eivätkä niihin vaikuta aiheen antanut yritys tai muut tahot. Erityisesti asiantuntijahaastattelut ja kirjallisuustutkimus tukevat toisiaan ja luovat pohjan keskeisimmille tuloksille.

Keskeisimpiä syntymekanismeja ovat ESD, eli kipinöinti, lämpökuormitus ja hapettuminen. Nämä kaikki vaikuttavat öljyn ja sen lisäaineiden hajoamiseen ja kulumiseen, ja sen kautta aiheuttavat lakkautumistuotteiden syntymistä. Syntymekanismien taustalla vaikuttavat ESC, öljylaatujen muutokset, öljyn epäpuhtaudet sekä järjestelmien kasvaneet vaatimukset tehoille ja lämpötiloille.

Ennakoivan kunnossapidon menetelmistä keskeisimpiä ongelmien ehkäisemiseksi ovat säännöllinen öljyn kunnonvalvonta erilaisilla mittauksilla, joista keskeisimpiä lakkautumisen osalta muun muassa MPC, sähkönjohtavuus, TAN ja FTIR. Analysoimalla mittaustuloksia ja yhdistämällä ne alkuperäiseen tilanteeseen, muihin kunnossapidon mittauksiin sekä syntymekanismien ymmärtämiseen voidaan tehokkaasti ehkäistä ongelmia. Ongelmien ehkäisemisessä keskeistä on myös järjestelmän suunnittelu sisältäen öljyn valinnan ja tarvittaessa lakkautumistuotteiden poistaminen niiden syntyessä järjestelmässä.

Yhteenvetona tutkimusta voidaan pitää onnistuneena sen esittäessä uusinta hyödynnettävissä ja sovellettavissa olevaa tietoa lakkautumisesta ja vastatessa onnistuneesti kysymyksiin ja tavoitteeseen. Lisäksi tutkimuksessa nostetaan esiin mielenkiintoisia jatkotutkimusaiheita lakkautumisen paremman ymmärtämisen mahdollistamiseksi.

LÄHTEET

Duchowski J. K. 2024. Topic interview on varnishing. Henkilökohtainen tiedonanto. Julkaisematon. Litterointi saatavissa työn kirjoittajalta.

Duchowski J. K. 2014. Electron Spin Resonance (ESR) Spectra of Butylated Hydroxytoluene (BHT) as Evidence of Free Radical Formation in Electrostatic Discharge (ESD) Damaged Lubricating Oils. Tribologia. Vol. 2014, nro. 4, s. 43–52.

Gannon M. C. 2011. Hydraulic fluids: the lifeblood of any system. Hydraulics & Pneumatics. Vol. 64, nro. 5, s. 38.

Hong S. ja Jang E. K. 2023. Varnish Formation and Removal in Lubrication Systems: A Review. Materials. Vol. 16, nro. 10, s. 3737.

Kaihlanen K. 2016. Varnish contamination in hydraulic & lube oil systems. Tribology & Lubrication Technology. Vol. 72, nro. 11, s. 68–70.

Kunnossapitoyhdistys Promaint. 2022. Öljyjen lakkautuminen kuriin. Promaint-lehti. Vol. 2022, nro. 1, s. 17-19

Kunnossapitoyhdistys Promaint, Hydraulitekninen toimikunta. 2018. Öljyn kunnossapito : Öljyn kunnossapidon uudet menetelmät ja haasteet sekä koneiden ja laitteiden ennakoiva kunnossapito öljyn avulla. 1. p. Helsinki, Promaint ry.

Laamanen A. 2024. Teemahaastattelu aiheesta lakkautuminen. Henkilökohtainen tiedonanto. Julkaisematon. Litterointi saatavissa työn kirjoittajalta.

Laamanen A. 2021. Öljyjen lakkautuminen: Ongelman havaitseminen ja korjaaminen vie kohti kestävän kehityksen tavoitteita. Helsinki, Suomi. 8.–9.12.2021. SKF Käyttövarmuus. Esitys saatavissa työn kirjoittajalta.

MH Hydraulics. 2020. MH TechTalk#3: Varnish, a silent killer in hydraulic systems. Oil & Gas News. Vol. 37, nro. 11.

Michael P. W. ja Zhao H. 2019. Chapter 17 | Hydraulic Fluids. Teoksessa: Totten G. E., Shah R. J. ja Forester D. R. (toim.) Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance, and Testing. 2. p. West Conshohocken, Pennsylvania, USA: ASTM International. S. 645–681.

Näivä J. 2024. Teemahaastattelu Lakkautumisesta. Henkilökohtainen tiedonanto. Julkaisematon. Litterointi saatavissa työn kirjoittajalta.

Phillips W.D. ja Staniewski J. W. G. 2016. The origin, measurement and control of fine particles in non-aqueous hydraulic fluids and their effect on fluid and system performance. Lubrication Science. Vol. 28, nro. 1, s. 43–64.

Pravda S., Sedenka D., Blata J. ja Hrabovsky L. 2024. Influence of incubation period on membrane patch color for insoluble contaminant measurement in degraded hydraulic oils. Frontiers in Mechanical Engineering. Vol. 10.

Rizvi S. Q. A. 2019. Chapter 10 | Petroleum-Derived Hydrocarbon Base Oils. Teoksessa: Totten G. E., Shah R. J. ja Forester D. R. (toim.) Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance, and Testing. 2. p. West Conshohocken, Pennsylvania, USA: ASTM International. S. 271–332.

Rosenbaum J. 2014. Base Oils Groups I-V: Manufacturing, Properties and Performance. STLE University Webinar 8.10.2014. Teoksessa: Brown S. F. 2015. Base Oil Groups: Manufacture, Properties and Performance. Tribology & Lubrication Technology. Vol. 71, nro. 4, s. 32–35.

Staudt J., Duchowski J. K. ja Leyer S. 2020. Prevention of Electrostatic Charge Generation in Filtration of Low-Conductivity Oils by Surface Modification of Modern Filter Media. Tribology Transactions. Vol. 63, nro. 3, s. 393–402.

Wooton D. 2014. Determining and Solving Varnish Problems. STLE University Webinar 3.12.2014. Teoksessa: Sniderman D. 2015. Determining and solving varnish problems. Tribology & Lubrication Technology. Vol. 71, nro. 11, s. 24–30.

LIITE 1. Kirjallisuustutkimuksen lähteiden arviointitaulukko

Alla esitetty lähteiden arviointiin käytetty taulukko kirjallisuustutkielmaan valituilla lähteillä täydennettynä. Taulukon alla avataan taulukon käyttöperiaatetta.

	Lähde:		Pravda et al. 2024	Michael ja Zhao 2019	Wooton 2014	Gannon 2011	MH Hydraulics 2020	Promaint 2018	Kaihlanen 2016	Phillips ja Staniewski 2016	Hong ja Jang 2023	Promaint 2022	Yhteensä
Lähdearvo	Lähde julkaistu < 10 v sitten		2	2	2		2	2	2	2	2	2	-
	Vertaisarvioitu tai painettu lähde		1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	-
Syntymekanismit	Hapettuminen	Epäpuhtaudet	1					1	1	1	1	1	6
		Vesi ja kaasu		1	1			1	1	1	1	1	7
		Lämpö		1		1	1	1	1	1	1	1	8
	Lämpökuorma		1	1		1	1	1	1		1	1	8
	Kipinöinti			1	1		1	1		1	1	1	7
	Mikro-diesel			1						1	1		3
	Öljytyypit	Lisäaineet						1	1	1	1		4
		Sähkönjohtavuus		1			1	1		1		1	5
	UV-valo				1						1		2
	Kavitaatio									1			1
	Kemiallinen yhteensopimattomuus				1		1		1		1		4
Ehkäiseminen	Mittaaminen	MPC	1				1	1	1	1	1	1	7
		RUL-menetelmät	1				1	1	1		1		5
		TAN/AN					1	1	1		1		4
		Aistinvaraiset			1			1	1		1		4
		Hiukkaslaskenta					1	1		1	1	1	5
		UC					1				1		2
		FTIR			1		1	1	1		1		5
		TOST		1							1		2
		Karl Fischer (vesipitoisuus)					1		1		1		3
		ICP						1			1		2
		Dielektrisyysvakio									1		1
		Kemiallinen analyysi			1								1
		Gravimetriset menetelmät	1										1
	Säännöllinen öljykunnonvalvonta							1	1		1	1	4

	Poistaminen	Hydrauliöljyn valinta				1	1				1		3
		Mekaaninen suodatus						1	1	1	1	1	5
		Sähköstaattiset menetelmät					1	1	1	1	1		5
		Polaariset menetelmät					1	1	1	1	1		5
		Kemiallinen							1		1		2
		Suunnittelu				1			1	1		1	4
		Järjestelmän puhdistus öljynvaihdon yhteydessä							1		1		2
		Menetelmien yhdistäminen							1		1		2
	Yhteensä			10	10	5	18	21	23	18	32	14	

Taulukkoon täytetään lähteitä ja ne pisteytetään sisällön ja laadun pohjalta. Taulukkoa täydennetään sitä mukaa, kun lähteitä käytiin lävitse. Tutkimukseen valitaan lähteet, jotka täyttävät taulukon mahdollisimman korkealla yhteistuloksella. Lähdearvossa sekä vertaisarvioinnista että painetusta lähteestä saa yhden pisteen arvostelussa. Lähteitä valitessa rajataan ulkopuolelle sellaiset lähteet, jotka eivät sisällöltään tuoneet uutta hyötyä tutkimukselle. Esimerkiksi jos aihetta X käsitellään jo kolmessa lähteessä ja aihetta käsitellään myös neljännessä lähdettä, ei neljättä lähdettä ole otettu mukaan, mikäli sen ainoa anti on neljännen lähteen tuominen aiheeseen X.

LIITE 2. Haastattelurunko asiantuntijahaastatteluille

Seuraavaa haastattelurunkoa käytetään tutkimuksen asiantuntijahaastatteluissa. Haastattelurunkoa sovelletaan jokaiselle haastateltavalle heidän asiantuntijuutensa sekä haastattelun kielen mukaan ja sovelletut haastattelurungot, jotka tämän rungon pohjalta on muokattu, ovat saatavissa tutkimuksen tekijältä.

Haastattelurunko:

Syntymekanismit:

Mitkä ovat keskeisimpiä syitä lakkautumiselle hydraulijärjestelmissä?

Osaatko antaa osuuksia sille, miten merkittäviä eri syntymekanismit ovat ilmiön takana?

Mitkä juurisyyt ovat merkittävimpiä?

Millaisia vaikutuksia paineella, lämpötilalla ja tilavuusvirralla on lakkautumiseen ja sen esiintymiseen?

Kuinka laajasta ongelmasta lakkautumisen kanssa on kyse?

Onko lakkautumisella joitain ominaispiirteitä, jotka esiintyvät pelkästään hydrauliikkajärjestelmissä?

Tunnetaanko lakkautumisen aiheuttamat ongelmat teollisuudessa ja osataanko niitä etsiä?

- Mikäli ilmiö tunnetaan, miten siihen suhtaudutaan?

Pystytäänkö lakkautumisen juurisyitä useimmiten selvittämään vai ovatko asiakkaat tyytyväisiä ongelmien loppumiseen?

- Jos kyllä, niin millä tavoin eri syntymekanismeja pystytään tunnistamaan?

Osaatko kertoa jotain ESC:stä/ESD:stä ja sen merkittävyydestä?

Osaatko kertoa mikrodiesel-ilmiöstä ja sen merkittävyydestä?

Kuinka tunnettu ilmiö on kyseessä suunnittelun näkökulmasta? Otetaanko ilmiötä tällä hetkellä riittävän voimakkaasti huomioon uusien järjestelmien suunnittelussa?

Lakkautumisen mittaaminen ja ehkäiseminen:

Millaiset merkit kertovat lakkautumisongelmista järjestelmässä?

Mitkä ovat tällä hetkellä käytetyimpiä menetelmiä lakkautumisen tutkimiseen ja mittaamiseen hydrauliikkajärjestelmistä?

Mitkä ovat tehokkaimpia menetelmiä, joilla lakkautuminen voidaan tunnistaa aikaisessa vaiheessa? Onko olemassa yksittäisiä menetelmiä, vai onko yleinen öljyn kunnon seuranta tehokkain tapa?
Millä järjestelmän ominaisuuksilla lakkautumista pystytään parhaiten ehkäisemään? (Virtausnopeus, neste, sähkönjohtavuus, viskositeetti, maadoitus, materiaalit, mitat?)
Millaisilla menetelmillä sähkönjohtavuutta voidaan selvittää ja voidaanko niillä esimerkiksi selvittää kipinöinnin todennäköisyyttä?
Mitkä ovat tällä hetkellä suurimpia ongelmia ongelmien varhaisessa tunnistamisessa?

- Onko kyse tekniikan puuttumisessa tai hinnassa
- Lakkautumisen ominaisuuksissa
- Vai jossain ihan muussa?
- Onko kyse lakkautumisen vajavaisessa tietoisuudessa ja yritysten suhtautumisessa ongelmaan?
- Toisin sanoen: Miksi ongelma pääsee edelleen niin usein yllättämään?

Mitä uusimpia menetelmiä on kokeiltu lakkautumisongelmien selvittämiseksi?
Miten ongelmien syntymistä voidaan ehkäistä?

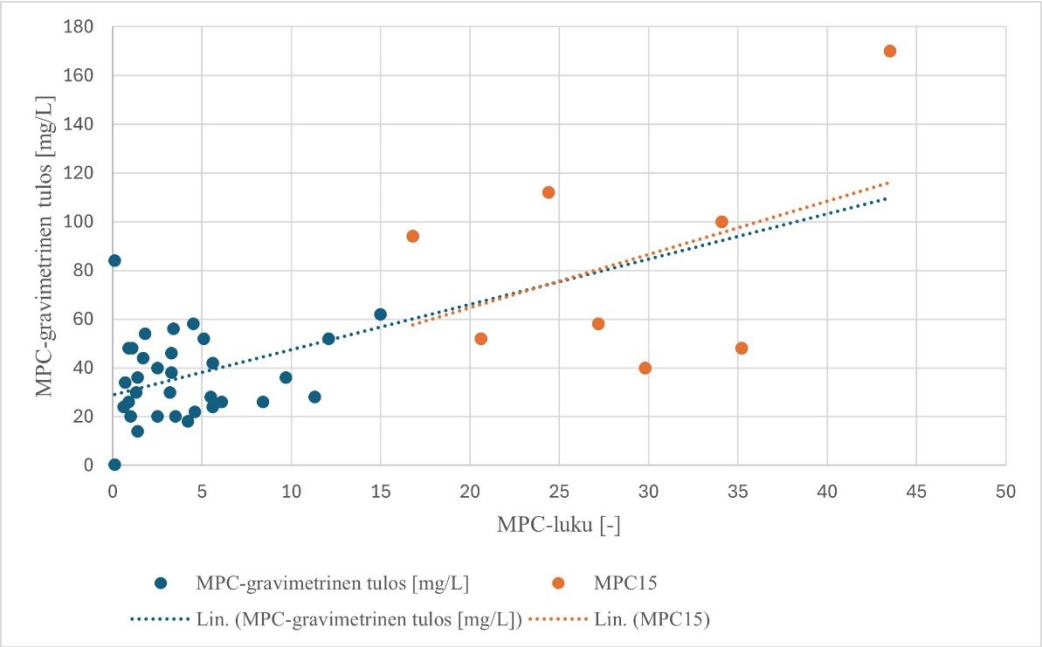
- Järjestelmän ja komponenttien suunnittelulla?
- öljykemialla ja öljyn valinnalla?
- järjestelmien mittauksilla ja lakkautumispotentiaalin selvittämisellä?
- poistamalla lakkautumistuotteita ja niiden esiasteita?

Öljyn vanheneminen ja sitä kautta lakkautumistuotteiden muodostuminen on väistämätön ilmiö. Onko öljyn käytölle havaittu jonkinlaista karkeaa aikaväliä, jolloin lakkautuminen aiheuttaa ongelmia?
Tällä hetkellä lakkautumista aletaan usein hoitamaan vasta sen aiheuttaessa ongelmia, millaisia keinoja näet siihen, että ongelmiin voitaisiin puuttua ja niitä estää ennakoitavasti?
Miten summaisit lakkautumisen muutamalla lauseella?

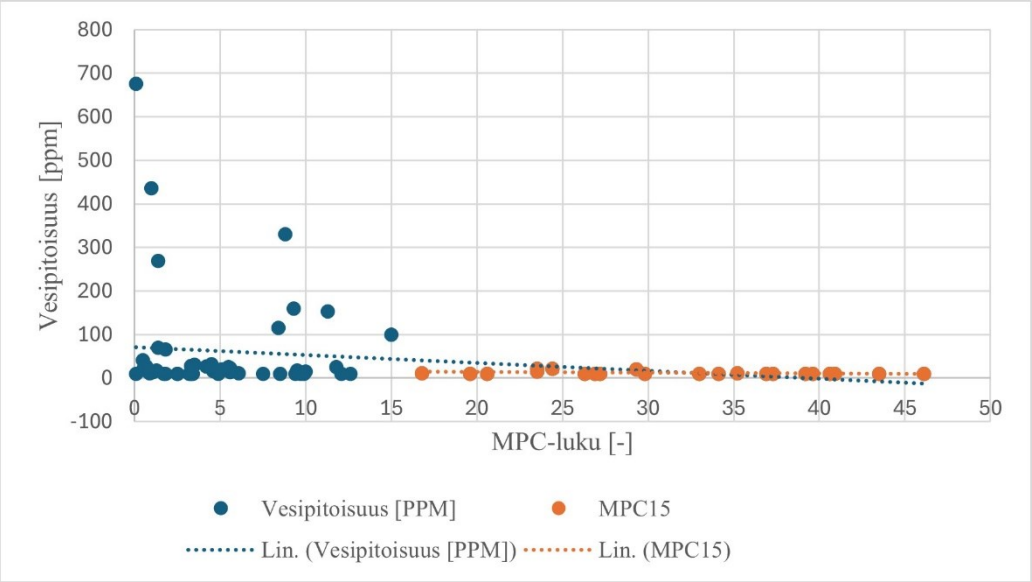
Tässä olivat kaikki kysymykseni haastattelua varten, mikäli teillä on aiheesta ajatuksia tai näkemyksiä, kuulen niitä mielelläni.

LIITE 3. Kuvaajat mittausarvojen pohjalta

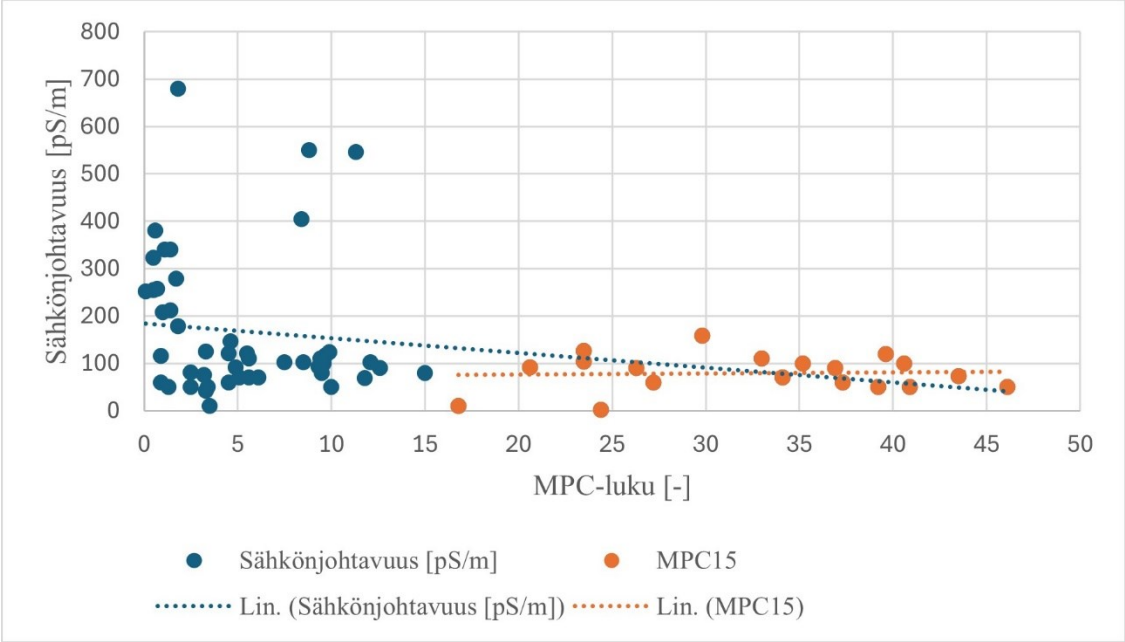
Tässä liitteessä esitetään mittausdatan pistekaaviot ja trendiviivat *TULOKSET* osion mukaisesti. Kuvaajat täydentävät tuloksien korrelaatiokertoimia esittäen mittausten arvot ja trendiviivat visuaalisemmin ja tarjoten mahdollisuuden tulosten paremmalle pohdinnalle. MPC-luvun 15 ylittävät mittapisteet sisältyvät kokonaissarjaan ja vaikuttavat kokonaissarjan trendiviivan muodostumiseen.



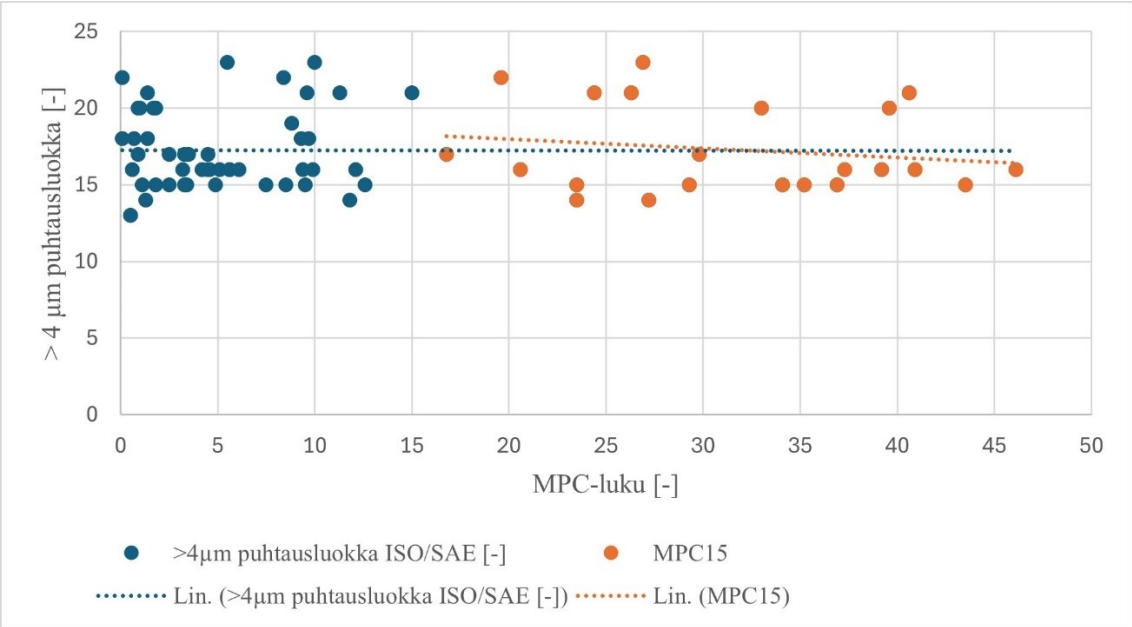
Kuvaaja 1: MPC-gravimetrinen tulos



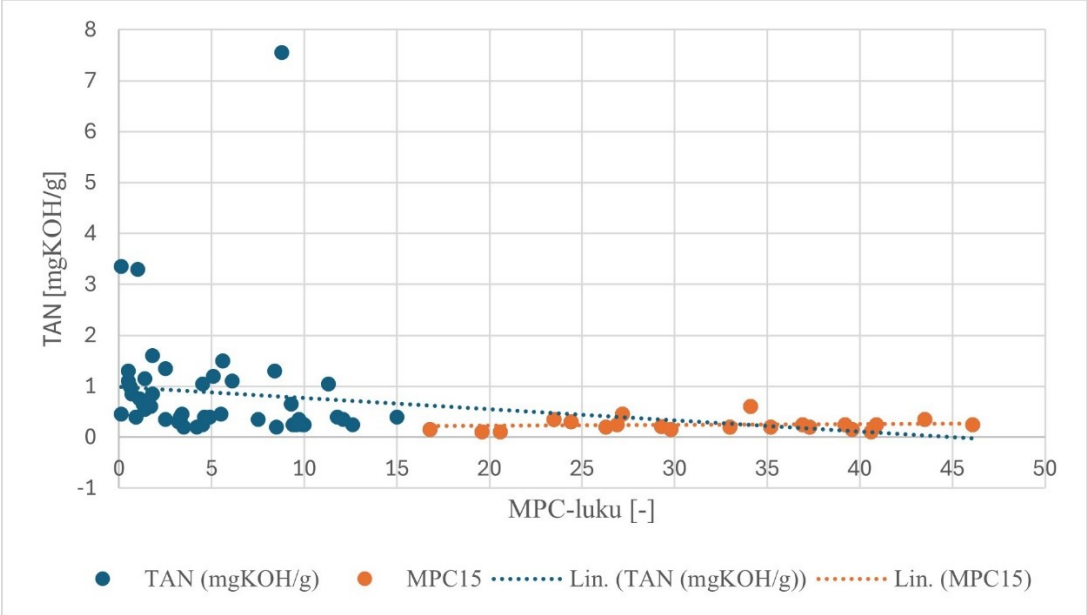
Kuvaaja 2: Vesipitoisuus



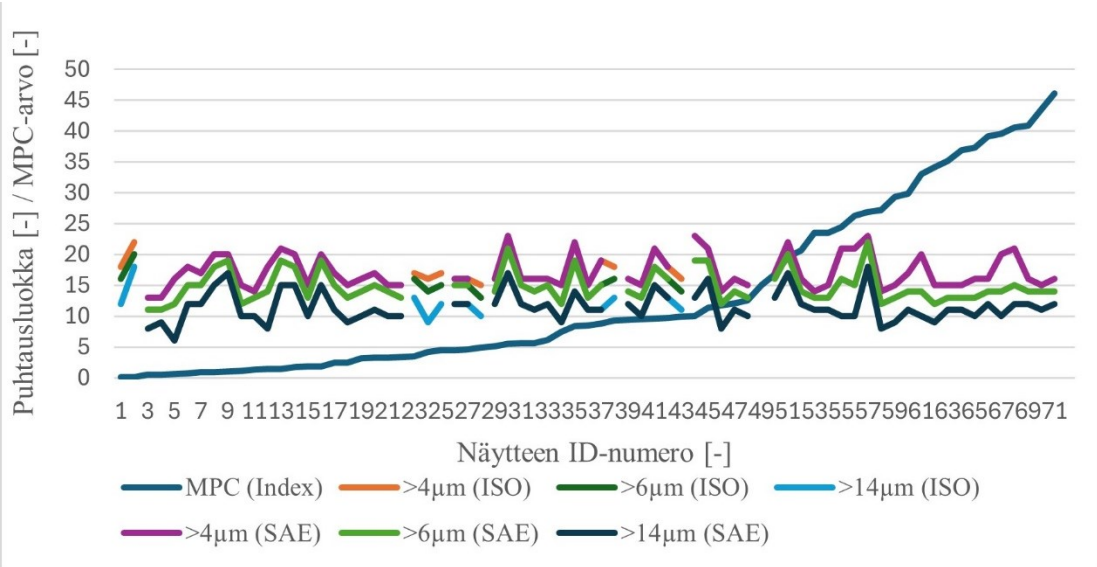
Kuvaaja 3: Sähkönjohtavuus



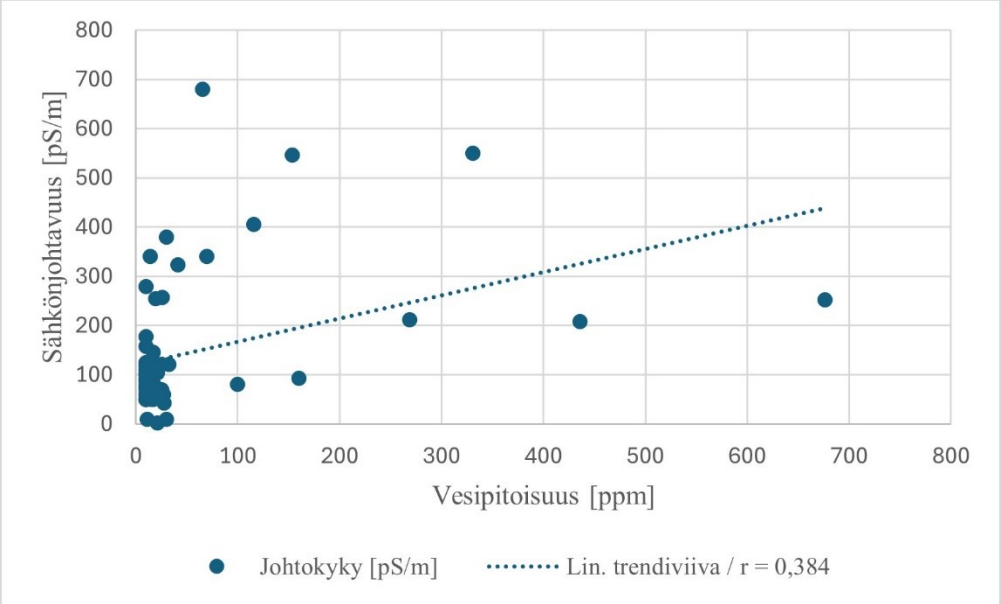
Kuvaaja 4: Puhtausluokka > 4 µm



Kuvaaja 5: Kokonaishappoluku (TAN)



Kuvaaja 6: Puhtausluokat ISO/SAE & MPC



Kuvaaja 7: Vesipitoisuuden ja sähkönjohtavuuden yhteys