

Jani Silfverberg
Joni Marttila

Moottoriöljyvertailu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Tutkinto-ohjelman nimi

Insinööriytyö

14.4.2018

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Jani Silfverberg Joni Marttila Moottoriöljyvertailu 42 sivua + 2 liitettä 14.4.2018
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine	Autosähkötekniikka
Ohjaajat	Lehtori Pekka Salonen
<p>Tämän insinööriyön toimeksiantaja on kilpa- ja performance-autojen moottoreiden suunnitteluun ja rakentamiseen erikoistunut MW Steel Oy. Työssä tarkastellaan moottoriöljyjen pintapaineenkestoa sekä niiden sisältämien lisäaineiden tribologia ominaisuuksia.</p> <p>Öljyn pintapaineenkestolla voidaan arvioida kahden toisiaan vasten liikkuvan osan välissä vaikuttavan öljykalvon lujuutta. Öljyfilmin rikkoutuessa ja voiteluaineen pettäessä kulumisen on välittömästi moninkertaista täydelliseen voiteluun verrattuna.</p> <p>Pintapaineenkesto kertoo hyvin myös moottoriöljyissä käytetyistä lisäaineista, niiden määrästä sekä tribokeraamisista ja -kemiallisista ominaisuuksista. Työssä perehdytään myös voiteluainejärjestelmiin ja -mekanismeihin, unohtamatta öljyissä käytettyjen raaka- ja lisäaineiden merkitystä. Koska lukuisat ulkoiset muuttujat tekevät kitka- ja kulumisilmiöiden tarkastelusta teoreettisesti haastavaa, keskitytään työssä kokeelliseen tutkimukseen moottorin kulumiseen vaikuttavia tekijöitä tutkittaessa.</p> <p>Markkinoilla myytävien kuluttaja- sekä performance-käyttöön tarkoitettujen moottoriöljyjen vertailemiseksi, todellisia käyttöolosuhteita simuloidaan toistettavuudeltaan luotettavalla testilaitteistolla, joka on suunniteltu ja rakennettu tutkimusta varten. Pintapaineenkeston tulokset ovat taulukoitu erikseen performance- ja kuluttaja-öljyille, mikä mahdollistaa helpon ja luotettavan vertailun eri moottoriöljyjen välillä.</p> <p>Moottoriöljyjen pintapaineenkestoissa on tutkimustulosten mukaan merkittäviä eroja.</p>	
Avainsanat	moottoriöljy, öljy, voiteluaine, pintapaine, öljyttesti, pintapaineenkesto, kuormituksenkesto, kulumisenkesto, moottoririkko, longlife, SAE, ACEA, API, tribologia, Mobil, Teboil, Exxonmobil, Shell, Redline, TriboDyn, Castrol, Kendall,

Author Title	Jani Silfverberg Joni Marttila
Number of Pages Date	42 pages + 2 appendices 14 April 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Professional Major	Automotive Electronics Engineering
Instructors	Pekka Salonen, Lecturer
<p>The contractor of this research is MW Steel, a company specializing in design and construction of racecar engines. This research examines the surface pressure resistance of engine oils and the tribological properties of the additives contained in them.</p> <p>Resistance of oil surface pressure is well depicted by the strength of oil film acting between two parts moving against each other. In case the oil film breaks, resulting in the protective function of the lubricant no longer to be effective, severe damage to the engine is often resulted.</p> <p>The strength of the oil film also reflects not only the additives used in the oil but also their amount and their tribochemical and -ceramic properties. The research focuses on lubrication systems and -mechanisms and takes into account the importance of the additives and raw materials used in engine oils. Because numerous external variables make theoretical study of friction- and wear phenomenon challenging, the focus has been on experimental research in the study of engine wear factors.</p> <p>For the comparison of engine oils used in factory-built cars as well as performance cars, a reliable test equipment simulating real operating conditions was designed and built. The results of the engine oil film strength are tabulated for two engine oil categories, enabling easy and reliable comparison between different engine oil film strengths.</p> <p>The research results show that there are significant differences in the film strengths of engine oils.</p>	
Keywords	motor oil, oil, lubricant, surface pressure, oil test, resistance of oil surface pressure, load resistance, antiwear, engine damage, longlife, SAE, ACEA, API, tribology, Mobil, Teboil, Exxonmobil, Shell, Redline, TriboDyn, Castrol, Kendall,

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Raaka-aineet	3
2.1	Jalostusprosessi	4
2.2	Mineraaliöljy	5
2.3	Krakattu perusöljy, EHVI, VHVI tai XHVI	6
2.4	Esteripohjaiset perusöljyt	6
2.5	Silikoniöljyt	7
2.6	Polyalfaolefiini (PAO)	7
3	Lisäaineet	8
3.1	Kulumisenestolisäaineet (EP/AW)	10
3.2	Pesevät lisäaineet (detergentit ja dispersantit)	11
3.3	Viskositeetti-indeksin parantajalisäaineet	12
3.4	Jähmepisteen parantajalisäaineet	13
3.5	Hapettumisenestolisäaineet	13
3.6	Vaahtoamisenestolisäaineet	14
3.7	Korroosionestolisäaineet	15
3.8	Kitkamuunninlisäaineet	15
3.9	Tunnistelisäaineet	16
4	Viskositeetti-indeksi ja HTHS	16
5	Tribologia ja voitelumekanismit	19
5.1	Polttomoottorin voiteluainejärjestelmä	22
5.2	Hydrodynaaminen voitelu	25
5.3	Elastohydrodynaaminen voitelu	26
5.4	Hydrostaattinen voitelu	27
5.5	Raja- ja sekavoitelu	28
6	Mittaukset	30
6.1	Mittauslaitteisto	30

6.2	Mittausten suoritus	32
6.3	Mittausten toistettavuus	35
6.4	Mittaustulokset	38
6.5	Dynamometrimittaukset	40
7	Yhteenveto ja tarkastelu	41
	Lähteet	44

Liitteet

Liite 1. Testitulokset taulukoituna pintapainetestin raapaisujäljistä ja kuormitusajasta

Liite 2. Testitulokset taulukoituna dynamometrituloksista

Lyhenteet

PAO	Polyalfaolefiini -öljy
EP	Extreme pressure
AW	Anti-wear
PPM	Parts per million
ACEA/API/ILSAC	Voiteluaineiden laatuluokitusstandardit
SAE	Society Of Automotive Engineers -standardi voiteluaineiden luokitteluun viskositeetin mukaan
Longlife	Pitkän huoltovälin moottorivoiteluaine
HTHS	High Temperature High Shear
VHVI	Very High Viscosity-Index
XHVI	Xtra High Viscosity-Index
EHVI	Extra High Viscosity-Index
HD	Hydrodynaaminen
EHL	Elastohydrodynaaminen

1 Johdanto

MW Steel Oy on Suomessa toimiva kilpa- ja performance-autojen korjaukseen ja rakentamiseen erikoistunut autoalan yritys. MW Steel Oy valmistaa kilpa- ja performance-autojen moottoreita, joissa voiteluaineiden pintapaineen kesto on tärkein osa moottorin voiteluaineiden tehtävistä. Työn tavoitteena oli saada selkeä vertailu Suomessa sekä maailmalla myytävien moottoriöljyjen pintapaineenkestosta, mikä auttaisi valitsemaan soveltuvimmat voiteluaineet eri käyttötarkoituksiin. Osa testiin kerätyistä öljyistä on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Testi-öljyjä.

Työ on toteutettu autoinsinööriopiskelijoiden opinnäytetyönä, ja toteutettu ajoneuvotekniikkaan erikoistuvasta näkökulmasta. Työssä keskitytään moottorivoiteluaineiden tärkeimpään ominaisuuteen eli voiteluaineiden pintapaineenkestoon. Työtä varten haasteltiin ja konsultoitin useita eri öljy-yhtiöiden voitelualan ammattilaisia, sekä moottoriteknikan ja tribologian ammattilaisia. Monella haastatteluihin osallistuneella ammattilaisella on kuitenkin eturistiriitoja informaation jakamisen suhteen, ja moottorivoiteluaineiden suojausominaisuuksien tutkiminen on monelle arka keskustelunaihe yrityssalaisuuksia varjeltaessa. Tästä syystä moni työssä jaettu informaation lähde jätetään jakamatta.

Suuret öljy-yhtiöt ovat keskittyneet volyymituotteiden markkinointiin ja myyntiin. Pienemät valmistajat pyrkivät usein kilpailemaan tuotteen laadulla ja pyrkivät valmistamaan mahdollisimman hyvän voiteluaineen volyymimarkkinoiden öljyjen sijaan. Suomessa myytävien performance-öljyjen rajoittunut tarjonta lisäsi kiinnostusta hankkia erilaisia moottorivoiteluaineita myös ulkomailta.

Työn tavoitteena oli luoda luotettava ja konkreettinen mittausjärjestelmä, sekä valmistaa oma käytännön ominaisuuksia simuloiva mittauslaitteisto. Tavoitteena oli myös selvittää sekä Suomessa että maailmanlaajuisesti myytävien moottorivoiteluaineiden pintapaineen kesto, ja etsiä kilpa- ja performance-käyttöön tarkoitettu mahdollisimman suuret suojausominaisuudet omaava voiteluaine.

Voiteluaineiden pintapaineen keston merkitys polttomoottorissa on huomattava. Standardoitujen mittaustapojen puuttuessa useimpien kuluttajien ja jopa autoalan harrastajien valintakriteereissä korostuvat suurten öljy-yhtiöiden imago sekä suurilla markkinointi- ja mainosbudjeteilla luodut mielikuvat, jotka kuvaavat valitettavan harvoin voiteluöljyjen todellisia ominaisuuksia ja aiheuttavat osaltaan räikeitä subjektiivisia käsityksiin perustuvia mielipide-eroja. Ilmiö heijastuu myös huoltoasemiin ja autokorjaamoihin.

Polttomoottorien nopea kehitys ja kuluttajien vaatimukset pitkistä huoltoväleistä asettavat voiteluaineille jatkuvasti vaikeutuvat olosuhteet. Selittämättömien moottoririkkojen määrä on kasvusuunnassa. Useissa tapauksissa heikko voitelu on joko koko- tai osasyllinen näihin vaurioihin. Autovalmistajat ovat entistä tarkempia omissa vaurioanalyysissä öljyn laatuluokituksen tarkistuksen suhteen.

Moottoriöljyn tärkein tehtävä on estää kuluminen ja voidella liikkuvia osia. Lisäksi moottoriöljy tiivistää, jäähdyttää sekä sitoo ja kuljettaa likaa. Pitkien huoltovälien ja longlife-öljyjen ollessa nykypäivää henkilöautojen moottoreissa, liankuljetus on tärkeässä osassa moottoriöljyn toimintaa. Voiteluaineeseen sitoutuu paljon epäpuhtauksia palamisjätteistä ja polttoaineista, ja puhuttaessa longlife-öljyistä voidaan tavoitella jopa 50 000km vaihtoväliä. Voiteluaineen tehtävä on kuljettaa nämä epäpuhtaudet suodatusjärjestelmään. Pitkä vaihtoväli tuo huomattavia haasteita voiteluaineen puhtaudelle. ([http://www.oil.fi/fi/oljytuotteet/voiteluoljyt,öljy & bio polttoaineala](http://www.oil.fi/fi/oljytuotteet/voiteluoljyt,öljy&bio%20polttoaineala))

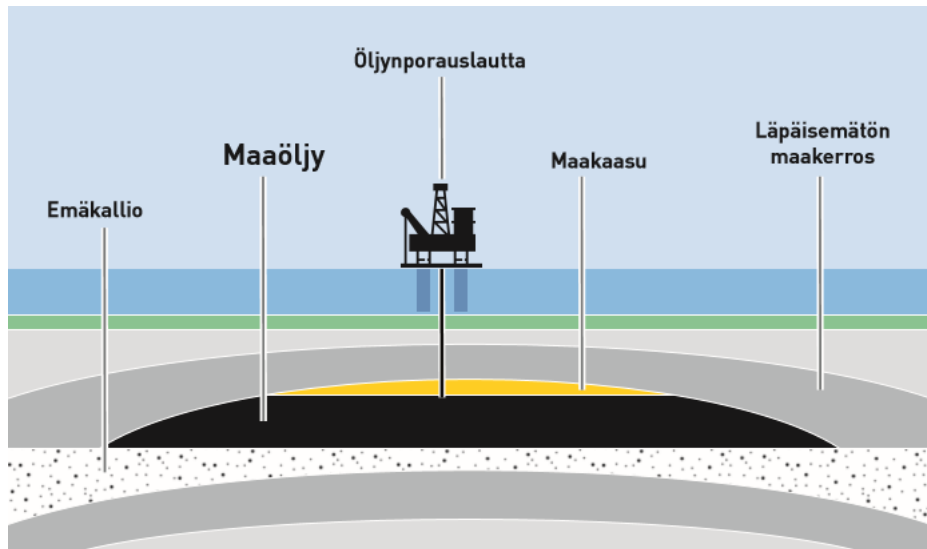
Kilpamoottorissa liankuljetusominaisuudesta ja sitä edistävästä lisäaineista saattaa olla enemmän haittaa kuin hyötyä. Käytännössä tämä ei kuitenkaan poissulje tribologisesti

kehittyneen öljyn pitkää vaihtoväliä ja hyvää pintapaineenkestoa. On kuitenkin muistettava, että äärimmäisessä tilanteessa hyvän ja huonon moottoriöljyn erona voi olla joko ehjä tai rikkoutunut moottori. (Lehtimäki Timo, Til-Racing)

Työhön hankittiin kaupallinen mittalaitteisto, johon tehtiin mittavia muutoksia halutun toistettavuustason saavuttamiseksi. Työtä varten tilattiin kattava valikoima eri moottorivoiteluaineita. Mittalaitteiston ääressä työskenneltiin operatiivisesti usean viikon ajan ennen varsinaisten mittausten suoritusta. Laitteistoon tutustuminen ja mittaustapahtuman sisäistäminen oli välttämätöntä tarkan toistettavuuden ja luotettavien tuloksien kannalta. Tutkimuksen operatiivinen ajanjakso kesti noin 6 kuukautta. Ajanjakson aikana mitattiin kaikki mukana olleet voiteluaineet. Kaikista mitatuista parametreista laadittiin taulukko. Tutkimuksia jatkettiin dynamometritesteillä, jotka on käsitelty kappaleessa 6.5. Työn loppuosa koostui haastattelu- ja raportointiosuuksista.

2 Raaka-aineet

Maaöljy on syntynyt merenpohjaan vajonneesta, kuolleesta planktonista miljoonia vuosia sitten. Planktonin päälle on kerrostunut ajan kuluessa hiekkaa ja kiveä, ja muodostuneen tiiviin kerroksen ja hapettoman olotilan, paineen sekä kuumuuden yhteisvaikutuksesta nämä ”eliöt” muuttuivat maaöljyksi. Maaöljyn perushiukkasiin kuuluvat eripituiset hiilivety-yhdisteketjut. Merenpohjasta ja mantereelta porattava raakaöljy on sellaiseenaan käyttökeltotonta voiteluaineeksi (Kuva 2). (https://www.koivunen.fi/tuotteet/file/ke-mikaalit/liqui_moly_voitelu_abc.pdf, Voiteluaineiden ABC)



Kuva 2. Raakaöljyn poraus maankuoresta. (https://www.koivunen.fi/tuotteet/file/kemikaalit/liqui_moly_voitelu_abc.pdf, Voiteluaineiden ABC)

2.1 Jalostusprosessi

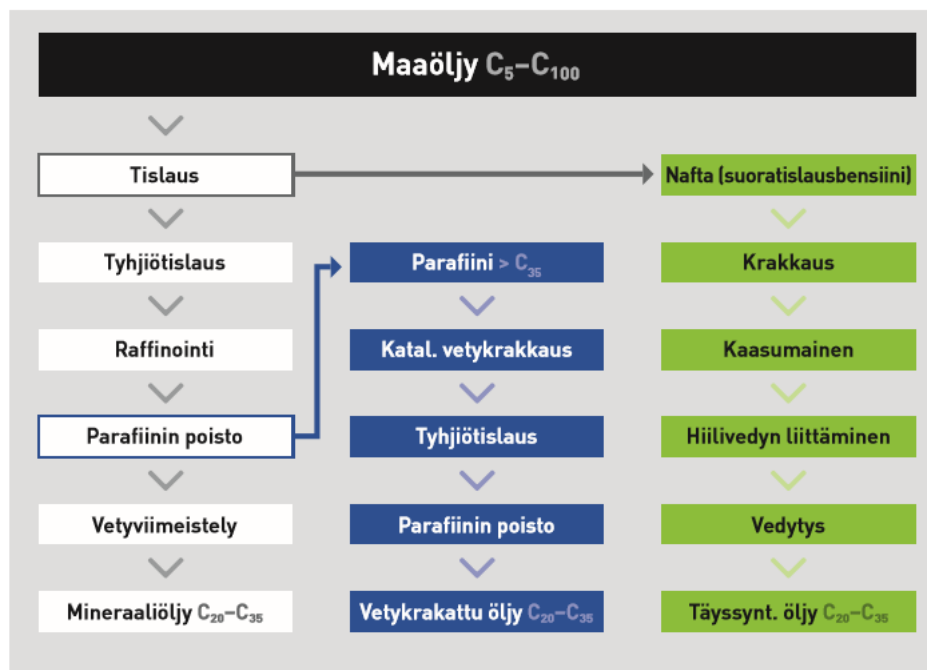
Raakaöljy vaatii monivaiheisen jalostuksen, jossa aluksi raakaöljy puhdistetaan epäpuhtauksista, kuumennetaan kaasuuntumislämpötilaan ja johdetaan jakotislaustorniin normaalissa ilmanpaineessa. Jakotislaustornissa öljykaasu jäähtyy hallitusti ja tislauksen eri jakeet tiivistyvät kunkin kiehumispisteen mukaisesti. Synteettisen öljyn valmistukseen on kaksi keinoa; eteenikaasusta polymerointi tai monivaiheinen muunto- ja jalostusprosessi. Peruseriaatteena on, että voiteluaineet tislataan polttoaineiksi kelpaamattomista tislauksjakeista. (https://www.koivunen.fi/tuotteet/file/kemikaalit/liqui_moly_voitelu_abc.pdf, Voiteluaineiden ABC)

On otettava huomioon, että synteettinen perusöljy ei ole tae öljyn laadusta, sillä on mahdollista valmistaa laadultaan mineraaliöljyä vastaavaa synteettistä perusöljyä. Markkinoilla annetaan ymmärtää synteettisten voiteluaineiden olevan ylivoimaisia mineraaliöljyihin nähden, ja tämän valmistusprosessin tapaa ei kerrota laatuluokituksissa eikä aina tuotetiedoissakaan.

Käytettäessä mineraalipohjaisia öljyjä, on niiden koostumus oltava sovelias käyttötarkoitukseen. Tällä koostumuksella tarkoitetaan nafteenien, parafiinien ja aromaattien suhdetta öljyssä. Nämä hyvälaatuiset mineraaliöljyt ovat pitkälle jalostettuja parafiinisia öljyjä sisältäen optimaalisesti noin 5-15% öljyn koostumuksesta.

Kuten kuvasta 3 näemme, perusöljyjä on olemassa kolmea eri päätyyppiä: Mineraaliöljy, vetykrakattu EHVI/VHVI -öljy, ja synteettinen öljy. Voiteluaineen lopputuote voidaan toteuttaa ja usein toteutetaankin näiden eri perusöljyjen yhdistelmänä. Yhdistämällä synteettisiä ja mineraalisia perusöljyjä saadaan nimitys ”osasynteettinen” ja ”puolisynteettinen”. (https://www.koivunen.fi/tuotteet/file/kemikaalit/liqui_moly_voitelu_abc.pdf, Voiteluaineiden ABC)

Nimitysten kanssa kannattaa kumminkin olla tarkkana, sillä moni öljymerkki saattaa kutsua tuotettaan synteettiseksi, mikäli siinä on käytetty vähänkin synteettistä perusöljyä. Suoraa johtopäätöstä öljypurkissa lukevista tiedoista synteettisyyden suhteen ei pystytä siis tekemään, vaan pitäisi tietää öljyn tarkempi kemiallinen koostumus ja ominaisuudet.



Kuva 3. Perusöljy tisleet. (https://www.koivunen.fi/tuotteet/file/kemikaalit/liqui_moly_voitelu_abc.pdf, Voiteluaineiden ABC)

2.2 Mineraaliöljy

Mineraaliöljy on yksinkertainen ja vanhin maaöljytislauksen suorista tuotteista. Mineraaliöljy tislataan kuumentamalla öljy masuunissa, jossa se hajoaa eri ainesosiinsa. Tämän jälkeen tisleestä poistetaan haitallisia ainesosia raffinointi- tai parafiinin poistoprosessissa. Viimeisessä vetyviimeistelyvaiheessa tisleeseen syötetään tarkoituksenmukai-

sesti vetyä, joka sulkee avoimet molekyyliketjut ja parantaa siten selvästi öljyn vanhenemisominaisuutta. Tällä perusöljytyypillä ei enää ole käyttöä nykyaikaisissa moottoreissa sillä sen ominaisuudet eivät riitä nykymoottoreiden vaatimustasolle. (https://www.koivunen.fi/tuotteet/file/kemikaalit/liqui_moly_voitelu_abc.pdf, Voiteluaineiden ABC)

2.3 Krakattu perusöljy, EHVI, VHVI tai XHVI

Krakkauksen yksi katalyyttisistä krakkausmuodoista on vetykrakkaus. Krakkauksessa mutkikkaat orgaaniset yhdisteet pilkotaan kemiallisesti yksinkertaisemmiksi, jolloin öljyn kuuman- ja kylmänkestävyys parantuvat. Reaktio perustuu hiiliatomien välisten sidosten katkaisemiseen. Krakattuja tuotteita on paljon erilaatuisia: laatu voi vaihdella mineraaliöljyä vastaavasta PAO-öljyä vastaavaksi. Näistä käytetään muun muassa lyhenteitä EHVI, VHVI ja XHVI, öljyn laadusta ja valmistajasta riippuen. Näiden krakattujen perusöljyjen osuus monista voiteluaineista on vielä huomattava, sillä ne auttavat luomaan voiteluaineseoksesta ja lisäaineesta homogeenisemmän ilman pelkoa lisäaineiden erottumisesta. Nämä öljyt ovat alan viimeisimmän kehityksen mukaisia ja niitä käytetään laajasti muun muassa huippumoderneissa bensiini- ja dieselsovelluksissa.

Vetykrakatut perusöljyt yhdistävät mineraalisten ja täyssynteettisten perusöljyjen parhaimmat puolet. Erinomaisina puolina mainittakoon terminen stabiliteetti ja vanhenemisresistiivisyys. Vetykrakkauksessa käytetään perusöljypohjana mineraaliöljyn valmistuksessa uutettua parafiinia. Nämä parafiinit koostuvat hyvin pitkäketjuisista molekyyliyhdisteistä (> C35). Molekyyliyhdisteet hajotetaan korkean paineen (70-200bar) ja lämpötilan avustuksella (500 °C). Tämän jälkeen ne katkaistaan haluttuun C20–C35-mittaan, ja suoritetaan tyhjiötislaus molekyyliketjujen krakkauksen estämiseksi. Viimeisenä tisleestä poistetaan mahdolliset parafiinijäämät.

2.4 Esteripohjaiset perusöljyt

Esteri-öljyt valmistetaan kasviöljyistä ja eläinrasvoista. Esteri-öljyjä käytettiin alun perin lentokoneiden suihkuturbiinimoottoreiden voitelussa, mutta pikkuhiljaa ne ovat saaneet jalansijaa myös kevyemmän liikenteen ajoneuvokäytössä. Suurin osa esterioöljyistä on sekoituksia PAO-öljyjen kanssa, sillä PAO-öljyt tarjoavat ominaisuuksia joita estereillä ei

kyetä tarjoamaan. Esteri-öljyjen parhaimpana puolena mainittakoon lämpötilavaihteluiden kesto ja viskositeettiominaisuudet, sekä palaessa hiilijäämien vähäisyys.

2.5 Silikoniöljyt

Silikoniöljyille ei löydy ajoneuvokäytöstä moniakaan sovelluksia. Silikoniöljyä käytetään yleisesti lämmönsiirrossa, erilaisten muovien ja kumien voiteluaineina, sekä ilmailualalla voitelurasvoissa. Henkilöautokäytössä silikoniöljyä on käytetty vaihteistojen tasauspyörästön lukkojen visko-kytkimissä niiden laajan viskositeettivalikoiman takia.

2.6 Polyalfaolefiini (PAO)

PAO on perusöljynä käytetyin synteettisten öljyjen raaka-aine. PAO-öljyjen käyttö on yleistä myös vaihteisto- ja vetopyörästö-öljynä. PAO-pohjaiset perusöljyt valmistetaan raakaöljyn raaka-aineista lämpökrakkaamalla. Näin eteenistä ja luonnonkaasusta saadaan täysin halutunlaista raaka-ainetta. Parhaat voiteluaineiden raaka-aineet muodostuvat ohjaamalla eteenikaasut monimutkaisen, mutta stabiilin käsittelyprosessin läpi. Näiden raaka-aineiden valmistajia on maailmassa vain muutamia. Toimijat ovat suuria globaalisti toimivia öljy-yrityksiä, joiden tuotantoprosessit ovat tarkasti hiottuja, ja tuotteet hyvin toistensa kaltaisia.

Ensimmäisessä vaiheessa raakaöljyn nafta krakataan ja molekyyliketjut (C5-C12) katkaistaan pituuteen C2. Aikaisempi nestemäinen aine on nyt eteenikaasua. Muodostuneet lyhyet molekyyliketjut (C2) jatketaan pitkiksi molekyyliketjuiksi (C20-C35). Molekyyliketjut suljetaan vedyn avulla, prosessissa, jota kutsutaan vedyttämiseksi. Raaka-aineena käytetty eteenikaasu on samaa kaasua, jolla elintarviketeollisuudessa kypsytetään banaaneja.

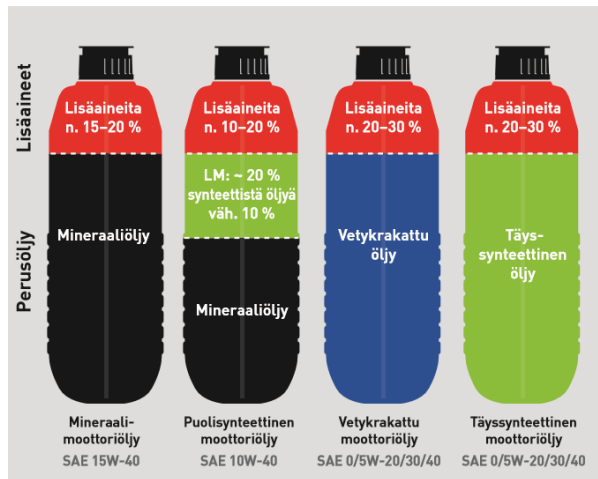
Myös muualla, kun öljyteollisuudessa, kuten makeisteollisuudessa, lopputuotteena käytetään polyalfaolefiinia. PAO-öljyjen lisääineistaminen on haasteellista, ja se vaatii runsaasti kokemusta ja suurta tarkkuutta. PAO-öljyjen taipumuksena on lisääineistamattomana reagoida moottorin kumisten tiivisteiden kanssa epätoivotulla tavalla aikaansaaden vuotoja. Homogeenisen seoksen aikaansaamiseksi lisääineiden ja PAO-öljyn se-

kaan lisätään muita synteettisiä voiteluaineita kuten alkyylibentseeniä, orgaanisia estereitä, polyglykolia, fosforihapon estereitä, tai silikoniöljyjä. Vaihtoehtona on myös tehdä homogeeninen seos PAO-öljyn ja osa- tai täysmineraaliöljyn kanssa.

PAO-öljyjen ominaisuuksiin lukeutuu hyvä sekoittuminen mineraaliöljyyn, pumpattavuus, alhainen jähmepiste, hapettumisenestokyky, vedensietokyky, korkea lämpötilansietokyky, vähäinen karstanmuodostus ja vähäinen haihtuvuus. PAO-öljyjen ja mineraaliöljyjen sekoittaminen on turvallista ja moottorin voiteluaineiden sekoittamisesta keskenään on säädetty laki, joka sallii tämän kaikissa tapauksissa. Hyvän pumpattavuuden takaa normaaliparafiinien poisto PAO-öljyjen seasta. PAO-öljyt kestävät keskimäärin noin 50°C korkeampia lämpötiloja kuin mineraaliöljyt. Lämpötilan ylärajana PAO-öljylle pidetään 160°C. Öljypohjasta mitatun lämpötilan olisi suotavaa olla tästä lämpötilasta vähintään 30°C vähemmän, sillä esimerkiksi kampiakselin laakerikauloilla suuren paineen alla öljyn lämpötilat ovat huomattavasti korkeampia kuin öljypohjassa. Luontaisen suuren viskositeetti-indeksin ansiosta voidaan kapean viskositeetin omaava öljy valmistaa jopa kokonaan ilman viskositeetti-indeksin parantajalisäaineita, millä on puolestaan myönteinen vaikutus moottorin karstoittumiseen.

3 Lisäaineet

Moottoriöljy koostuu kahdesta komponentista: Perusöljystä ja lisäaineista. Lähes kaikissa nykyisissä laadukkaissa moottorivoiteluaineissa perusöljy on täyssynteettistä. Näin ollen voiteluaineet ovat aina seoksia. Seossuhde vaihtelee käyttökohteen ja valmistajan mukaan, perusöljyn osuuden ollessa 70-90% ja lisäaineistuksen 10-30% (Kuva 4). (Lubricant Additives: Chemistry and Applications, Leslie R. Rudnick, CRC Press)



Kuva 4. Lisäaineiden osuus öljyssä. (https://www.koivunen.fi/tuotteet/file/kemikaalit/liqui_moly_voitelu_abc.pdf, Voiteluaineiden ABC)

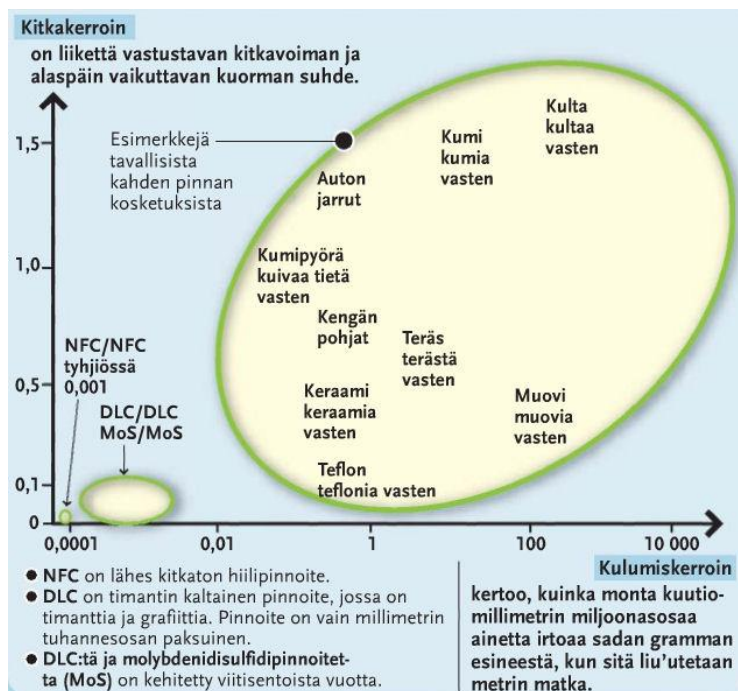
Kuvasta 5 havaitaan hyvin, kuinka nykyaikaisten voiteluaineiden laatuun ja ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa lisäaineilla.

Ominaisuudet	Vaikutettavissa lisäaineiden avulla	Saavutettavissa vain lisäaineiden avulla	Ei vaikutettavissa lisäaineiden avulla
Kylmänkestävyys	●	○	○
Vanhenemisvakioisuus	●	○	○
Viskositeetti/ lämpötilakäyttäytyminen	●	○	○
Korroosiosuojaus	●	○	○
Lian irrotuskyky	●	●	○
Dispergoimiskyky	●	●	○
Suurpaineominaisuudet	●	●	○
Vaahoutuminen	●	●	○
Ilmanpoistokyky	○	○	●
Veden erottuminen	○	○	●

Kuva 5. Lisäaineiden vaikutusalueet öljyssä. (https://www.koivunen.fi/tuotteet/file/kemikaalit/liqui_moly_voitelu_abc.pdf, Voiteluaineiden ABC)

Lisäaineet määrittelevät lopullisen öljytuotteen hinnan tehokkaasti, sillä raaka-aine kustannukset ovat vain 5-10%. Osa öljynvalmistajista ostaa lisäaineensa suurilta lisäainetoimittajilta, joilta löytyvät standardien mukaiset hyväksynnit. Useat pienet öljynvalmistajat eivät tyydy isojen lisäainetoimittajien lisäainepaketteihin vaan valmistavat suurimman määrän lisäaineistaan itse, ja tällä tavalla takaavat tuotteensa laadun, mikä on ainoa keino kilpailla suurilla toimittajilla vastaan. Tämän kaltaiset pienet toimijat kehittävät lisäaineitaan koko ajan taatakseen mahdollisimman hyvät tribologiset ominaisuudet öljylle.

Boori, wolfram ja timantti edustavat uuden sukupolven lisäaineita. Nanokokoisina partikkeleina näillä päästään erittäin pienikittakertoimisiin yhdisteisiin. Ne kuitenkin nostavat lisäaineiden kustannuksia. WS-2 on öljyn kulumisenestolisäaine, joka sisältää mm. wolframia ja booria. WS-2:ta on kutsuttu "liukkaimmaksi aineeksi mitä tiede tietää". Lisäksi näillä lisäaineilla on taipumus olla hyvin aktiivisia suurien paineiden ja lämpötilojen alaisina, mikä tuo huomattavan edun, kun kyseessä on kilpamoottori, jonka voiteluainejärjestelmään ei saa tulla pienintäkään häiriötä. Kuvassa 6 nähdään kahden saman materiaalin välisiä kitka- ja kulumiskertoimia, joihin lisäaineilla pyritään vaikuttamaan. (Lubricant Additives: Chemistry and Applications, Leslie R. Rudnick, CRC Press, 148-176)



Kuva 6. Eri materiaalien kitka- ja kulumiskertoimia. (Opetusmateriaali, Kai Laitinen)

3.1 Kulumisenestolisäaineet (EP/AW)

Kulumisenestolisäaineita on käytetty pitkään eri voiteluaineryhmissä, nämä EP- (Extreme Pressure) sekä AW (Anti Wear) -lisäaineet ovat kehittyneet viimeisten vuosikymmenien aikana huomattavasti. Sinkki oli ennen ainoa tehokas tapa suojata moottoria kulumiselta. Sinkkifosfaattia käytettäessä lisääntyy kuitenkin myös rikin ja fosforin määrä, jolloin on riskinä moottorin korroosiovaurio, jota on vaikea havaita ainoana haittatekijänä moottorissa tapahtuvan mekaanisen vaurion vaaran lisääntyessä. Sinkki on ollut suosittu

lisäaine sen edullisen hinnan ja helpon saatavuuden takia. (Lubricant Additives: Chemistry and Applications, Leslie R. Rudnick, CRC Press, 223-259)

Tribologiatieteen kehittyessä on keksitty ja patentoitu monia huomattavasti tehokkaampia tribokemiallisia kulumisenestolisäaineita, joiden pintapaineenkesto sinkkiin verrattuna voi olla jopa satakertainen. Näiden lisäaineiden kehittyessä sinkkifosfaatin osuus öljyn lisäaineena on vähentynyt, sillä sinkkifosfaatin käyttöä rajoittaa myös fosforin kertyminen saastelaitteisiin. Tribokemiallisten lisäaineiden ansiosta sylinteriseinämän kulumisen on vähentynyt ja moottoreiden sylinteriseinämän hoonausjälki on havaittavissa vielä usean sadantuhannen kilometrin jälkeenkin.

Uudentyyppiset lisäaineet absorboituvat oikeanlaisessa ympäristössä metallihuokosten pintaan muodostaen tehokkaan suojan sekä estäen metalliosien pinnankarheushuippujen kosketukset toisiinsa. Näiden lisäaineiden ominaisuudet vaikuttavat erityisesti moottorin osa-alueissa, joissa ei ole käytössä hydrodynaamista voitelua ja joissa vaaditaan suurta pintapaineenkestoa, kuten venttiilikoneistossa, jakoketjuissa ja sylinteriseinämissä. Työssä käytetty testilaitte jäljittelee tehokkaasti tämänkaltaista tapahtumaa moottorissa.

3.2 Pesevät lisäaineet (detergentit ja dispersantit)

Pesevillä lisäaineilla on kaksi päätehtävää, liuottaa likaa ja jakaa partikkeleita. Nykyisten pitkien öljynvaihtovälien seurauksena moottoriin kertyy huomattavia määriä likaa ja lietettä, eikä öljynsuodatusjärjestelmä yksinään pysty suoriutumaan näistä epäpuhtauksista. Tällöin tarvitaan öljynvalmistajan suunnittelemaa, pitkän öljynvaihtovälin omaavia voiteluaineita, jotka sisältävät runsaasti puhdistavia lisäaineita. (Lubricant Additives: Chemistry and Applications, Leslie R. Rudnick, CRC Press, 113-170)

Dispersantit jakavat likapartikkelit hienojakoisemmiksi, helpottaen niiden kulkeutumista öljyn mukana suodatinjärjestelmään, ja muodostaen epäpuhtauksien ympärille kerroksen, joka estää hiukkasia tarttumasta toisiinsa. Rakenteeltaan dispersantit ovat pitkäketjuisia, polaarisia yhdisteitä. Nykyaikaisten saastelaitteiden, nousseiden sylinteripaineiden ja pienempien välyksien takia likapartikkelien siirtokyky korostuu. Tällä lisäaineella on pyritty ehkäisemään nykyajan longlife -öljyjen lietteen keräytyminen moottoriin ja

moottorin öljypumpun imusihtiin. (Lubricant Additives: Chemistry and Applications, Leslie R. Rudnick, CRC Press, 113-170)

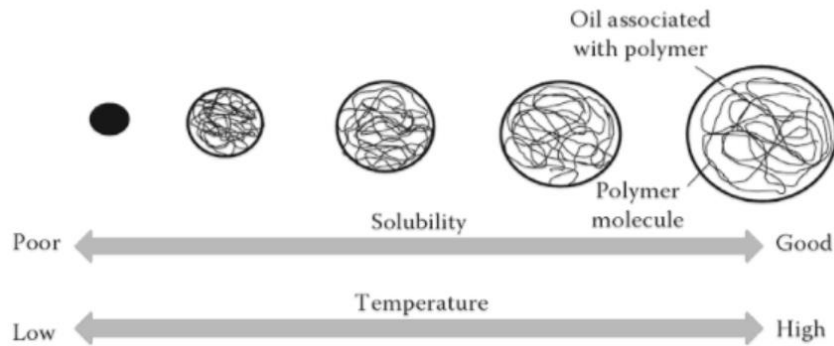
Detergentit ovat pinta-aktiivisia aineita, jotka on suunniteltu parantamaan sylinteritiiveyttä, saastelaitteiden elinikää ja pidentämään öljynvaihtoväliä. Rakenteeltaan detergentit ovat yhdisteitä, jotka koostuvat natriumista, kalsiumista ja magnesiumista. (Lubricant Additives: Chemistry and Applications, Leslie R. Rudnick, CRC Press, 113-170) Testin perusteella havaittiin, että runsaasti peseviä lisäaineita omaavilla öljyillä on negatiivinen vaikutus voiteluaineen pintapaineen kestoon useimmissa tapauksissa.

Voiteluaine- ja autonvalmistajien antamista laatuluokitusmerkinnöistä oli havaittavissa, että runsaasti luokituksia sisältävissä voiteluaineissa pintapaineenkesto oli usein matalammalla tasolla kuin vähemmän luokitelluissa voiteluaineissa. Nykymoottoriteknikan ja voiteluaineteollisuuden kulmakivenä on tasapainoilu pitkän öljynvaihtovälin ja moottorin kestävyuden välillä. Vaatimukset pitkistä öljynvaihtoväleistä sekä saastevaatimukset ovat saattaneet öljynvalmistajat ja autonvalmistajat haasteelliseen tilanteeseen, jossa äkillinen voiteluaineen laadun heikentyminen luo ongelmia. (Lubricant Additives: Chemistry and Applications, Leslie R. Rudnick, CRC Press, 113-170)

3.3 Viskositeetti-indeksin parantajalisäaineet

Viskositeetti-indeksin parantajalisäaineet ovat polymeerisakeuttimia, joiden tehtävänä on vastustaa viskositeetti-indeksin muuttumista. Näitä polymeerisakeuttimia käytetään runsaasti niissä voiteluaineissa, joissa viskositeetti-indeksi on laaja. Polymeerisakeuttimen huonona puolena voidaan pitää sen heikkoa pintapaineenkestoa ja lämpötilansietokykyä (Kuva 7). Sillä on taipumuksena leikkaantua suurissa lämpötiloissa ja suurien pintapaineiden vaikutuksen alaisena. Polymeeri on mikroskooppisen pientä muovipartikkelia, jolla on taipumus luoda öljyn koostumukseen sisäinen verkkorakenne. (Kai Laitinen, Lubricant Additives: Chemistry and Applications, Leslie R. Rudnick, CRC Press, 329-354)

Polyolefiinit ja metakrylaatit parantavat viskositeetti-indeksiä ja ne liukenevat perusöljyyn. On myös parantaja-aineita, joilla on peseviä- ja hapettumisenesto ominaisuuksia. Näillä pyritään kumoamaan yleisesti viskositeetti-indeksin lisäaineiden taipumusta karsottaa moottoria.



Kuva 7. Polymeerimolekyylin käyttäytyminen lämpötilan muutoksen mukaan. (ASTM D2782)

3.4 Jähmepisteen parantajalisäaineet

Jähmepistettä parantamalla muutetaan öljyn kylmäjuoksevuusominaisuuksia ja näin saadaan öljy säilymään paremmin juoksevana alhaisissa lämpötiloissa. Lisäaineella parannetaan kylmänä öljyn virtausta ja tehostetaan voiteluaineen kulkua voitelukohteelle. Tämä ominaisuus korostuu laajasti vaihtelevan ilmaston maissa. (Lubricant Additives: Chemistry and Applications, Leslie R. Rudnick, CRC Press, 355-362)

Huomattava osa polttomoottorin kulumisesta tapahtuu, kun öljyn lämpötila on alle 50 celsiusastetta. On hyvin tärkeää, että moottorin kuormittaminen kylmänä on maltillista, ja moottorin esilämmitys on suositeltavaa kylmissä olosuhteissa. Autonvalmistajat sekä esilämmitinvalmistajat ovatkin alkaneet suosia jäähdytinnesteen lämmityksen sijasta moottoriöljyn lämmittämistä. (Lubricant Additives: Chemistry and Applications, Leslie R. Rudnick, CRC Press, 355-362)

3.5 Hapettumisenestolisäaineet

Hapettuminen on kemiallinen reaktio, joka tummentaa öljyn väriä ja heikentää laatua. Öljyn hapettuessa sen hiilivety luovuttaa elektroneja hapelle. Ottaessaan elektronit vastaan, happi pelkistyy. Öljyn hapettuminen on kansankielellä vanhenemisreaktio. Reaktiota nopeuttaa korkeat lämpötilat ja öljyn sisältämät epäpuhtaudet. Kupari ja lyijy toimivat parhaimpina katalyytteinä tälle reaktiolle. Öljyn hapettuessa syntyy muun muassa alkoholeja, jotka edelleen hapettuvat aldehydeiksi ja ketoneiksi. Aldehydit jatkavat hapettumistaan edelleen karboksyylihapoiksi, ketonien ollessa hapettumisreaktioketjun

päässä. Karboksyylihapot ovat tehokkaita syövyttämään moottorin komponentteja. Karboksyylihapon ja kondenssiveden muodostama liuos syövyttää öljypinnan yläpuolisia komponentteja. Tämä ilmiö on havaittavissa öljykorkkiin muodostuvasta keltaisesta härmästä. (Lubricant Additives: Chemistry and Applications, Leslie R. Rudnick, CRC Press)

Öljyn sisältämät hiilivetyketjut pitenevät hapettumisreaktion edetessä. Tällöin polymeerisakeuttimet muodostavat voiteluainejärjestelmään lietettä, joka voi aiheuttaa tukoksia jopa öljypumppujen imusihteihin. Lietteinen öljy karstottaa moottorin kuumia komponentteja jättäen niiden pintaan kovan haitallisen kerrostuman. Ilmiö on parhaimmin havaittavissa nykyaikaisissa turboahtimissa.

Hapettuneen öljyn ensimmäinen indikaatio on öljyn muuttunut väri, joskin nykyisten EP-lisäaineiden tuomat värit voivat tummentaa öljyä jo uutena niin, että pieni hapettuminen ja noki öljyn seassa saa öljyn näyttämään hyvin tummalta. Hapettumisesta johtuvan värimuutoksen tarkasteluun on olemassa väriasteikko (ASTM D 1500). On myös olemassa mittareita, on-line testejä sekä laboratoriotestejä, joilla saadaan selville kokonaishappoluku (TAN, Total Acid Number, ASTM D 664). Kokonaishappoluku on viitteellinen öljyjen lisäaineiden värien kirjon lisääntyessä. (<http://www.ekomobiili.fi/Tekstit/Oljytesti.pdf>)

3.6 Vaahtoamisenestolisäaineet

On kaksi toisistaan riippuvaista käsitettä, jotka sekoitetaan helposti toisiinsa: ilmanerotuskyky ja vaahtoaminen. Moottoriöljyn vaahtoaminen on epätoivottu reaktio. Moottoriöljyyn sekoittuu ilmaa pieninä kuplina mikä heikentää voitelua. Ilmakuplat syntyvät öljypumpun kavitoidessa tai kampiakselin vastapainojen osuessa öljypohjassa lainehtivaan öljyyn. Vaahtoamista voi myös syntyä öljyssä itsessään virtausnopeuksien vaihdellessa äkillisesti, ja tätä ilmiötä pyritään estämään vaahtoamisenestolisäaineella, joka alentaa voiteluaineen pintajännitystä. Pintajännityksen ollessa matalampi voiteluaineeseen syntyneet pienet ilmakuplat särkyvät helpommin. Saadakseen mahdollisimman tehokkaan ilman erotuksen öljystä, pintajännityksen on oltava matala, jolloin ilmakuplat nousevat pintaan, rikkoutuvat ja erottuvat öljystä. (http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_e04_voiteluaineet_lisa-aineet.html)

3.7 Korroosionestolisäaineet

Nimensä mukaisesti korroosionestolisäaineen päätehtävä on suojata moottorin metallisia komponentteja kosteuden ja hapen aiheuttamalta korroosiolta. Kuten aikaisemmin on mainittu, EP-Lisäaineena käytetyn sinkkifosfaatin mukanaan tuoma korroosiorasitus pyritään neutralisoimaan näillä lisäaineilla. Tämän takia uuden teknologian öljyissä sinkkifosfaatin määrää EP-lisäaineena on rajoitettu. Sinkkifosfaatin määrää vähentämällä voidaan vähentää myös korroosionestolisäainetta. Uudentyyppisillä absorboituvilla lisäaineilla pystytään tunkeutumaan metallin huokosiin jättäen kriittistä kosketuskohdan pinta-alaa myös muille lisäaineille.

Korroosionestoa on kahta päätyyppiä: fysikaalinen ja kemiallinen. Fysikaalisena korroosionestona käytetään pitkäketjuisia hiilivetyjä, joiden tarttuvuus polaarisisina molekyyleina metallin pintaan on hyvä. Kemiallinen korroosionestoaine reagoi moottorikomponenttien kanssa muuttaen elektro-kemiallista potentiaalia. (http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_e04_voiteluaineet_lisa-aineet.html, Lubricant Additives: Chemistry and Applications, Leslie R. Rudnick, CRC Press)

Rikkiyhdisteet, karboksyylihappojen johdannaiset, typpiyhdisteet ja fosforihappojen johdannaiset ovat moottorivoiteluaineissa useimmin korroosionestoon käytettyjä lisäaine kemikaaleja. Useat näistä tuotteista ovat monitoimisia vaikutuksiltaan ja yhdisteinä käytetään muun muassa sinkkiditiofosfaattia ja bentsotriatsolia. Oman ryhmänsä muodostavat metallipassivaattorit, jotka syrjäyttävät happea ja kosteutta sekä estävät metallien liukenemistä öljyyn.

3.8 Kitkamuunninlisäaineet

Kitkamuunninlisäaineiden pääasiallinen tehtävä on absorboitua metallipintoihin ja luoda niihin mikroskooppisen ohut, lähes kitkaton pinta. Tämän lisäaineen vaikutus korostuu polttomoottorin voitelukohteissa joissa ei ole hydrostaattista, vaan hydrodynaaminen voitelu. Tilanteissa, joissa moottori käynnistetään tai sammutetaan ovat nämä lisäaineet pääsääntöisesti niitä aineita, jotka suojaavat moottoria, myös tilanteissa, joissa moottorin voitelujärjestelmään tulee häiriö, voivat nämä lisäaineet pelastaa moottorin voideltavat kitkapinnat. Kitkamuunninlisäaineet ovat tyypillisesti polaarisia öljyliukoisia yhdisteitä, kuten alkoholeja, amideja tai suoloja, tai vaihtoehtoisesti öljy- ja lisäaineyhtiöiden itse

kehittämiä salattuja kemiallisia yhdisteitä. (Lubricant Additives: Chemistry and Applications, Leslie R. Rudnick, CRC Press, 203-222)

3.9 Tunnistelisäaineet

Zirkonium (Zr) on yleisesti käytetty öljyn tunnistuslisäaine. Sillä ei ole mitään muuta tarkoitusta voiteluaineessa, eli se ei osallistu voiteluun eikä öljyn käyttäytymiseen moottorissa, eikä se voi syntyä epäpuhtautena tai kulumiselementtinä. Zirkoniumia on noin 20mg/kg longlife -moottoriöljyjen tunnistusaineena. Zirkoniumin avulla autonvalmistajat ja maahantuojaat voivat varmistaa tarvittaessa onko moottorissa käytetty hyväksyttyä long life -öljyä. (https://en.oelcheck.com/wiki/Zirkonium_%E2%80%93_why_does_this_element_pop_up_in_lab_reports%3F)

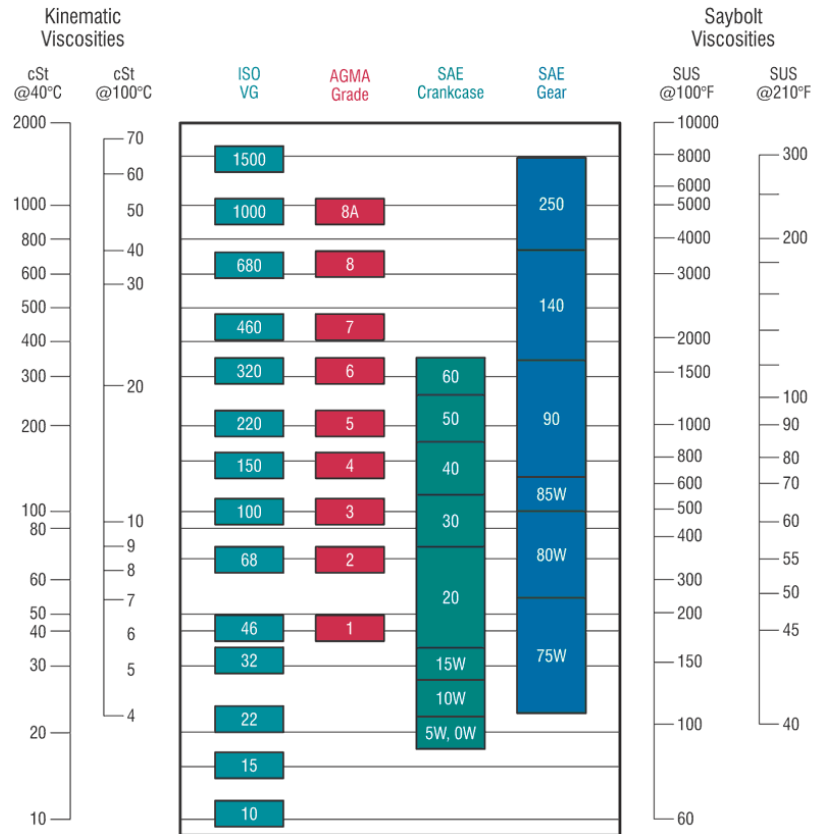
4 Viskositeetti-indeksi ja HTHS

Öljyn viskositeetti-indeksi kuvaa öljyn viskositeetin muutosta lämpötilan muuttuessa. Mitä korkeampi öljyn viskositeetti-indeksi on, sitä vähemmän sen viskositeetti muuttuu lämpötilan vaihteluissa. Voiteluaineen viskositeetin valintaan vaikuttaa laakerivällyksen koko ja moottorin käyttölämpötila. Turhan laajan viskositeetti-indeksin valitseminen lisää voiteluaineen suoriutumishaasteita. On kuultu, että viskositeetti-indeksin laskiessa yhden indeksivälin, voiteluaineen elinkaari on lyhentynyt huomattavasti.

Viskositeetti riippuu lämpötilasta ja paineesta. Lämpötilan noustessa nesteiden viskositeetti pienenee, ja paineen kasvaessa nesteiden viskositeetti kasvaa.

SAE-luokiteltujen perä- ja vaihteistoöljyjen viskositeetti-indeksiluku on yhteneväinen lukema SAE-luokiteltujen moottoriöljyjen kanssa, mutta eri mitta-asteikolla. Esimerkiksi viskositeetti-indeksin SAE 50 omaava yksiastemoottoriöljy vastaa viskositeetiltaan SAE 90 olevaa vaihteistoöljyä. Yleinen harhaluulo kohdistuu indeksilukemaan ja niiden vertailuun. Tätä viskositeetti-indeksiä selventää hyvin kuva 9, joka havainnollistaa viskositeetti-indeksi lukeman skaalauerot vaihteisto-, perä- ja moottoriöljyjen välillä. (http://www.upmpg.com/tech_articles/motoroil_viscosity/)

Table 2. Comparative Viscosity Classifications

Kuva 8. Viskositeetti-indeksi (<http://sovereign-omega.co.uk/what-is-viscosity/>)

Kilpamoottorien kampiakselin laakerivälysten yleisenä sääntönä on yksi millin sadasosa laakerivälystä kammenpolven halkaisijan kymmentä milliä kohden. Useimmissa moottoreissa tämän vällyksen arvo on 0.03mm-0.05mm, joskin uudessa moottoritekniikassa pyritään vällyksiä pienentämään tavoitteen ollessa pienemmät pumppaushäviöt, ja sitä kautta pienentyneet pakokaasupäästöt. Tämän takia monesti uusissa henkilöautoissa käytettävä viskositeetti-indeksi on esimerkiksi 0w-20 laakerivälysten ollessa noin 0,02mm.

Nykyisiä SAE-luokituksia saatetaan joutua uudistamaan ohuempien voiteluaineiden osalta, sillä monet autonvalmistajat käyttävät jo SAE-taulukon alimpaa viskositeetti-indeksiluokkaa voiteluaineissaan. Käsivalintaisissa vaihteistoissa ei luokitustaulukko enää riitä määrittelemään öljyn viskositeettiä sen ollessa niin ohutta. Käytännönteissä on havaittu, että suuremman viskositeetin omaava öljy pystyy kantamaan suurempaa kuormaa ja säilyttämään suuremman öljynpaineen laakerilla ja muodostaen näin paremman hydrostaattisen voitelun.

Suuri viskositeetti-indeksi saattaa kuitenkin olla haitaksi moottoreissa, jotka ovat suunniteltu pienelle viskositeetti-indeksille ja mitoitettu niin, että öljyn on läpäistävä huomattavan pieniä reikiä esimerkiksi ketjunkiristimissä ja venttiilinnostimissa. Korkea viskositeetti-indeksi myös lisää voiteluaineen sisäistä kitkaa, joka puolestaan nostaa voiteluaineen lämpötiloja. Taulukosta 1 nähdään, että viskositeetti-indeksi on suuntaa antava lukema. On mahdollista, että kahden eri viskositeetti-indeksin omaavan öljyn ero on vain 0.1cSt. Viskositeetti-indeksi antaa viitearvon, johon öljyn täsmällisen viskoosin pitää asettua. (http://www.upmpg.com/tech_articles/motoroil_viscosity/)

Taulukko 1. Viskositeetti-indeksi ja viskoosi. (http://www.upmpg.com/tech_articles/motoroil_viscosity/)

SAE Viscosity Chart (High Temp) 100° C (210° F)			
SAE Viscosity	Kinematic (cSt) 100° C Min	Kinematic (cSt) 100° C Max	
20	5.6	<9.3	
30	9.3	<12.5	
40	12.5	<16.3	
50	16.3	<21.9	
60	21.9	<26.1	

Winter or "W" Grades			
SAE Viscosity	Low Temp (°C) Viscosity cP		Kinematic (cSt) 100° C Min
	Cranking Max	Pumping Max (NYS)	
0W	3,250 @ -30	60,000 @ -40	3.8
5W	3,500 @ -25	60,000 @ -35	3.8
10W	3,500 @ -20	60,000 @ -30	4.1
15W	3,500 @ -15	60,000 @ -25	5.6
20W	4,500 @ -10	60,000 @ -20	5.6
25W	6,000 @ -5	60,000 @ -15	9.3

HTHS lukema mitataan öljystä 150-asteen lämpötilassa siihen erikseen kehitetyllä mittalaitteella (Kuva 9). Mittalaitteessa on nopeasti pyörivä liukulaakeri, joka leikkaus-rasittaa öljykalvoa. Tämän tyyppisellä mittausjärjestelyllä pyritään jäljittelemään tilannetta, joita syntyy korkeilla pyörimisnopeuksilla kuumassa moottorissa. Tämänkaltaisessa tes-

tissä pyritään testaamaan viskositeetin pysyvyyttä. Mittaustapahtuma ei kuitenkaan simuloi öljyjen pintapaineenkestoa moottorissa. (<http://www.teboil.fi/tuotteet/voiteluaineet/yleista-voiteluaineista/suorituskykyluokitukset/>)



Kuva 9. HTHS -mittalaite. (<https://www.crodalubricants.com/en-gb/discovery-zone/how-we-test-our-products/high-temperature-high-shear-viscometer>)

5 Tribologia ja voitelumekanismit

Tribologia-sana johtaa juurensa kreikan kielen tribos-sanasta, joka tarkoittaa hankausta. Tribologia on tutkimusalue, joka tarkastelee kosketuspintojen voiteluun, kitkaan ja kulumiseen liittyviä ilmiöitä. Ruotsissa on arvioitu, että kitkan ja kulumisen aiheuttamat kustannukset ovat noin 7 % bruttokansantuotteesta. Kitka- ja kulumisilmiöiden tarkastelu teoreettisesti on haasteellista monien muuttujien takia, joten kokeellinen tutkimus on usein ainoa keino selvittää kulumisen todelliset vaikutukset. Visuaaliset havainnot voiteluaineista ovat poikkeavia toisistaan, mutta suoraa johtopäätöstä visuaalisuuden perusteella voiteluaineiden eri ominaisuuksista ei pysty tekemään. Kuvassa 10 visuaalisesti kaksi erityyppistä voiteluainetta. (Kivioja, Kivivuori, Salonen, 1997, Tribologia-kitka,kuluminen ja voitelu, Opetusmateriaali Kai Laitinen)



Kuva 10. Moottoriöljyjen visuaalisia havaintoeroja.

Kulumismekanismit jaetaan usein neljään pääryhmään: abrasiiviseen-, adhesiiviseen-, tribokemialliseen- ja väsymiskulumiseen. Näitä kaikkia kulumismekanismeja esiintyy polttomoottorissa (Kuva 11). Teoreettisen tarkastelun tekee hankalaksi usein eri kulumismekanismien yhdistyminen. Pystyäkseen torjumaan kulumismekanismien, on se ensin tunnistettava. Tehokkaita torjuntakeinoja ovat olosuhteiden muuttaminen, rakenteen muuttaminen ja materiaalinvalinta. Kulumistyypeistä polttomoottorissa yleisin on abrasiivinen kuluminen. Yleisenä lähtökohtana pidetään, että mitä kovempaa materiaali on, sitä paremmin se kestävä abrasiivista kulumista. Tämä pitää paikkansa vain, jos kovuuden lisäämisellä muutetaan olennaisesti kuluvan ja kuluttavan materiaalin kovuussuhdetta. (Opetusmateriaali, Kai Laitinen)



Kuva 11. Abrasiivisen kulumisen seuraukset

Näennäisesti sileät pinnat eivät koskaan ole täysin tasomaisia, vaan ne ovat enemmän tai vähemmän karheita. Kun todelliset pinnat puristetaan toisiaan vasten, pinnankarheushuiput kantavat kuorman. Tällöin todellinen kosketuspinta-ala on usein vain muutama prosentti näennäisestä kosketuspinta-alasta. Pinnankarheuden huippujen lämpötilat voivat olla hetkellisesti tuhansia asteita. Lämpöshokit kestävät vain sekunnin tuhannesosia, mutta toistuessaan ne vaikuttavat materiaalin ominaisuuksiin. Nämä lämpöshokit pehmentävät ja pahimmillaan voivat sulattavat vastinpintoja. Kyseisistä lämpöshokeista aiheutuu myös termisiä kuormituksia kappaleiden pintaan, mikä edesauttaa väsymistä ja säröilyä hauraisiin materiaaleihin. (Opetusmateriaali, Kai Laitinen)

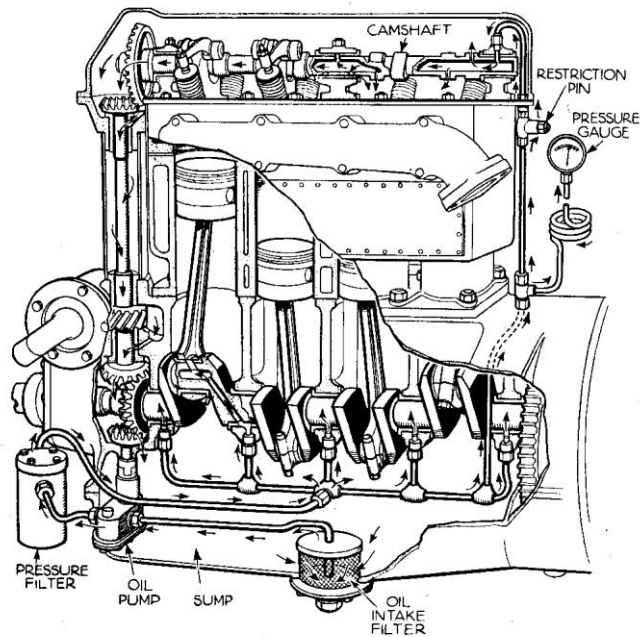
Hyvin pienillä kuormilla materiaalin myötöraja ei ylity ja kosketus on täysin elastinen. Kun pinnankarheuden huippu muokkautuu plastisesti tarpeeksi monta kertaa, sen muodonmuutoskyky loppuu ja se murtuu irti väsymisen seurauksena. Kuitenkin suurimmassa osassa kosketuksia pinnankarheudenhuiput muokkaantuvat plastisesti ja pinnankarheudenhuippujen välille muodostuu suuria pistemäisiä lämpökuormia. (Opetusmateriaali, Kai Laitinen)

Voiteluaineiden avulla kulumista voidaan vähentää tai se voidaan jopa estää kokonaan. Liukumisnopeus vaikuttaa voideltujen pintojen voitelukalvon paksuuteen, joka vaikuttaa sekä kulumiseen että kitkakertoimeen. Kuormituksen lisäys on myös suoraan verrannollinen kulumisnopeuteen, mutta ei välttämättä lineaarisesti. Toisiaan vasten liukuvien pintojen rasitus määräytyy kuorman eli pintapaineen ja liukumisnopeuden yhteisvaikutuksesta. (Opetusmateriaali, Kai Laitinen)

Kautta aikojen polttomoottoreiden tribologisia ominaisuuksia on koitettu parantaa erilaisilla pinnoitteilla. Komponenttien pinnoittaminen ei sinällään ole haaste nykyteknologialla, vaan ennemminkin pinnoitteiden kulumiskestävyys. Pinnoitettujen komponenttien haasteena usein onkin pinnoitteen ja perusmateriaalin välinen adheesio, kun komponenttiin kohdistuu suuria pintapaineita ja perusmateriaalissa tapahtuu elastista muodonmuutosta. Kahden kappaleen välisessä kosketuksessa muodostuva lämpö riippuu pinnoille tuotavasta energiasta eli pintojen välisestä nopeudesta, pintapaineesta ja kitkasta. (Opetusmateriaali, Kai Laitinen)

5.1 Polttomoottorin voiteluainejärjestelmä

Polttomoottorin voiteluainejärjestelmän ensisijaisena tehtävänä on voidella moottorin kitkapintoja. Voiteluainepumpulla tuotetaan öljynpaine polttomoottorin öljykanaviin, jotka kuljettavat voiteluaineen voitelukohteisiin (Kuva 11). Näin aikaansaadaan voitelukohteita, joissa on täydellinen hydrostaattinen voitelu, mikä on kaikkein tehokkain tapa toteuttaa kahden kitkapinnan erottaminen toisistaan. Polttomoottoriin jää kuitenkin useita kohteita, joissa ei voida käyttää hydrostaattista voitelua. Suurin osa näistä sijaitsee sylinterikannessa, joka on moottorin haastavin voiteluainekohde, koska se sijaitsee etäimmällä öljypumpusta ja lämpötilat ovat korkeat. (Opetusmateriaali Heikki Parviainen)



Kuva 12. Lämpileikkaus tyypillisen ottomoottorin voitelujärjestelmästä (<https://www.hls.ie/what-is-a-lubrication-system-hls-explains/>)

Yksi nykyaikaisten moottoreiden ongelmista on longlife-öljyjen lietteen keräytyminen öljypumpun imusiihtiin. Nykyaikaisella voiteluainejärjestelmällä on myös muita tehtäviä, tärkeimpänä moottorin lämpötilan hallinta. Yksi kolmasosa moottorin tuottamasta lämpöenergiasta haihdutetaan voiteluainejärjestelmän kautta. Nykyaikaisissa bensiinimoottoreissa öljyn lämpötilat voivat olla 150°C, ja lämpötilat ovat huomattavasti korkeammat suuren paineen alaisissa kohteissa kuten laakerikauloilla. On mitattu 30-40°C korkeampia lämpötiloja kammekaulan kuin öljypohjan voiteluaineessa. On myös mitattu 150°C ero männänrenkasalueen ja öljypohjan välillä. (Opetusmateriaali Heikki Parviainen)

Polttomoottorin suunnittelun yhtenä lähtökohtana on hallita kitkojen synnyttämää lämpöä ja aikaansaada tarvittava lämmönsiirtymä voitelutekniikalla. Nämä suunnittelun lähtökohdat kumoutuvat silloin, kun moottorin suorituskykyä aletaan parantamaan. Moottorin suorituskyvyn kasvattamisesta seuraa usein lisääntynyt lämpökuormitus, etenkin komponenteissa, joissa vallitsee raja- ja sekavoitelun periaatteet. (Opetusmateriaali Heikki Parviainen)

Yleisesti ottaen polttomoottorin öljyn paineeksi riittää 1000rpm kierrosalueella 0.7-1bar, ja kierrosten noustessa 1000rpm on paineen noustava 1bar verran aina 5000rpm asti.

Voiteluainejärjestelmän paineen kohotus nostaa käytettävän voiteluaineen lämpötilaa polttomoottorissa. Ohuemmalla viskositeetillä oleva moottoriöljyn jäähtyminen paranee mitä suurempi tilavuusvirta on, ja näin ollen enemmän öljyä virtaa järjestelmän läpi samassa ajassa. Voitelun kannalta tärkeintä on pysyä maltillisissa laakeri- ja liukupintojen liukunopeuksissa, sillä liiallinen liukunopeus aiheuttaa voiteluaineelle turhia haasteita, joita öljynpaineen nostokaan ei pysty kompensoimaan. Kokemus on osoittanut kierto- kangen kauloilla yli n. 25m/s olevien liukunopeuksien aiheuttavan haasteita voiteluaineille.

Kustannustehokkain keino parantaa nykyaikaisten polttomoottoreiden voiteluainejärjestelmää on käyttää tribologisesti suorituskykyistä öljyä. Tämä on myös suodatusjärjestelmän kannalta positiivista, koska nykymoottoreiden partikkelitasot on oltava pieniä materiaalien kovien karkaisutasojen ja pienien välysten takia. Liukupinnoille ei yksinkertaisesti mahdu kovinkaan suuria likapartikkeleita, jottei komponentteihin kohdistuisi voimia, jotka aiheuttavat plastista muodonmuutosta.

Oppikirjan mukaisessa puhtaassa nestevoitelussa pinnat erotetaan täysin toisistaan öljykalvon avulla. Tällöin kuluminen on vähäistä ja vähäininkin kuluminen johtuu voiteluaineen mukana kulkeutuvista epäpuhtauksista. Epäpuhtauksien partikkelikoko tulee olla tällöin suurempi kuin voitelukohteessa vallitseva voiteluainekalvon paksuus. Tämänkaltaisen nestevoitelu on polttomoottorin voitelumekanismeista parhaiten kulutukselta suojaava. Nestevoitelun voi jakaa kolmeen eri ryhmään, hydrodynaamiseen (hd), elastohydrodynaamiseen (ehl), ja hydrostaattiseen voiteluun. Näitä kaikkia voitelumekanismeja esiintyy nykyaikaisessa polttomoottorissa.

Puhtaan nestevoitelun lisäksi polttomoottorissa esiintyy seka- ja rajavoitelua. Näissä voitelumekanismeissa voiteluainetta ei pumpata paineellisena suoraan voideltaviin kohteisiin. Kohteet voidellaan kohdistetuilla ruiskukanavilla, ympäristössä tapahtuvalla roiskevoitelulla, tai edestakaisen liikkeen avulla nostetaan voiteluainetta kohteessa sijaitsevista poteroista esimerkiksi paininkuppien päälle venttiilikoneistossa.

5.2 Hydrodynaaminen voitelu

Hydrodynaamisen voitelun edellytyksenä on, että voitelukohteen voideltavien pintojen välillä vallitsee suhteellinen nopeusero. Nopeuseroa ja suppenevaa öljytaskua hyväksikäyttämällä saadaan aikaiseksi voiteluaineen kuljetus voideltaville liukupinnoille. Edellytyksenä on myös riittävä öljyn saanti suppenevaa öljyuraa edeltävälle öljytaskulle. Suppeneva öljyura luo voideltaville pinnoille ylipaineisen voiteluainekalvon. Ylipaineen avulla voiteluaine jakautuu laakeripinnoille ja voiteluainekalvo kykenee kantamaan laakereille kohdistuvan kuorman. (Opetusmateriaali Kai Laitinen)

Moottorin voiteluainepumpun tehtävä on siirtää laakerin öljytaskuun öljyä voiteluainejärjestelmää pitkin. Tällöin öljypumpun paineella ei ole ratkaisevaa merkitystä voitelumekanismiin, jossa on käytössä hydrodynaaminen voitelu. Tärkeää on tilavuusvirran suuruus ja laakeriliuskojen muotoilusta aiheutuva öljykalvon vaihtuvuus. Hydrodynaaminen voitelu on käytössä useimmissa nykyaikaisissa moottoreissa kampiakselin runkolaakerien voitelussa, tyypillisesti enemmän kuormaa kantavalla eli runkopukkien puolella. On myös laakerointiratkaisuja, joissa öljytasku on koneistettu molempiin runkolaakerin puolikkaaseen, jolloin hydrodynaamisen voitelun periaatteet eivät toteudu. Kuvan 13 kaltaisilla runkolaakereilla hydrodynaaminen voitelu toteutuu. Kuvan kaltainen vaurio on tyypillinen voiteluainejärjestelmän viasta tai häiriöstä johtuva vaurio.



Kuva 13. Kampiakselin vaurioituneet runkolaakerit (vas) sekä ehjät runkolaakerit (oik).

5.3 Elastohydrodynaaminen voitelu

Elastohydrodynaaminen voitelu toteutuu yleisimmin raskaissa vierintälaakereissa ja korkeasti kuormitetuissa hammaspyörissä. Polttomoottoreissa käytettävissä hammaspyörissä, joissa siirretään suuria voimia pienten pinta-alojen kautta, muodostuu korkeat kosketuspaineet, jotka voivat olla luokkaa 0,3-3Gpa. Suuren paineen alaisena voiteluainekalvon paksuus on vain n.1 μm . Voiteluainekohteessa kosketuspinnossa tapahtuu elastista muodonmuutosta. (Opetusmateriaali Kai Laitinen)

Voiteluaineessa viskositeetti kasvaa voimakkaasti korkeassa paineessa. Voiteluaine ei enää käyttäydy kuten hydrodynaamisessa voitelussa eikä enää poistu pois kiilamaisesta raosta. Tällainen suuri paine syntyy pistemäisissä ja viivamaisissa kosketuksissa. Paine vaikuttaa viskositeettiin eksponentiaalisesti seuraavan yhtälön mukaisesti. (Airila et all. 1995 s. 425)

$$\eta = \eta_0 e^{\alpha p}$$

missä η_0 viskositeetti normaalipaineessa

α viskositeetin paine- eksponentti (0,015-0,03 N 2mm)

Suuren paineen johdosta voiteluaineen puristuessa kasaan sen viskositeetti kohoaa raskaita voiteluainekalvoa. EP-lisäaineistuksesta on merkittävää hyötyä tällaisissa tilanteissa. Ohuiden voiteluainekalvopaksumien johdosta tribologisesti edistykselliset pinnat ja pinnoitteet auttavat suojaamaan elastohydrodynaamisesti voideltuja kohteita kulumiselta tehokkaasti. (Opetusmateriaali Kai Laitinen)

Kyseiset kohteet ovat myös arkoja epäpuhtauksille sillä ohuessa voiteluainekalvopaksuudessa ja pienessä kosketuspinta-alassa pienikin epäpuhtaus toimii tehokkaana abraasiivisena kulumispartikkelina. Kovat kulumispartikkelit ovat erityisen haitallisia elastohydrodynaamisen voitelun kohteissa, sillä jo muutaman mikrometrin kokoinen partikkeli aiheuttaa paineen alla suuren jännitys- ja lämpökeskittymän. Tyypillisimpiä elastohydrodynaamisesti kuormitettuja kohteita nykyaikaisissa polttomoottoreissa on jakopään ketjupyörät ja muut rataskomponentit. (Opetusmateriaali Kai Laitinen)

5.4 Hydrostaattinen voitelu

Hydrostaattisen voitelun tärkein komponentti on öljypumppu, jonka tuottamalla öljynpaineella voiteluaine siirretään suoraan liukupintojen väliin voideltavaan kohteeseen. Näin öljyn muodostama hydrostaattinen paine kykenee erottamaan liukupinnat toisistaan, vaikka pintojen välistä suhteellista liikettä ei esiintyisikään. (Opetusmateriaali Kai Laitinen)

Hydrostaattisen laakeroinnin etuja on pieni kitkahäviö. On kuitenkin huomioitava, että öljypumpusta johtuvat pumppaushäviöt kumoavat kitkahäviön vaikutuksia. Sen vuoksi sekä tilavuusvirta-muuttuvaisia öljypumppuja että matalan viskositeetin öljyjä on alettu suosia uudessa moottoritekniikassa. Hydrostaattisen laakerointijärjestelmän jäykkyyden on oltava suuri, sillä hydrostaattisen paineen luoma voiteluaineen kalvo ei kykene kantamaan suuria voimia.

5.5 Raja- ja sekavoitelu

Polttomoottorissa on useita raja- ja sekavoitelukohteita. Sekavoitelukohteessa yhdistyy neste- ja rajavoitelu. Tilanne on voitelumekanismeista haastavin voiteluaineen kannalta, sillä osan kuormasta kantaa ohut voiteluainekalvo ja loppuosa tulee pinnankarkeushuippujen kosketuksista toisiinsa. Tämän takia autonvalmistajat joutuvat käyttämään raja- ja sekavoidelluissa komponenteissa tribologisesti kehittyneitä materiaaleja sekä kovia karkaisuja. Näissä voitelukohteissa tilannetta auttaa tribologisesti suorituskykyinen öljy, jonka pinta-aktiiviset EP-lisäaineet pitävät metallien pinnankarkeushuiput erillään toisistaan. (Opetusmateriaali Kai Laitinen)

Näissä tilanteissa voiteluaineen tribologiset ominaisuudet ja ep-lisäaineistuksen vahvuus näyttölee suurta roolia ja tehokkaasti vähentää liukukitkaa, mikä vähentää moottorikomponenttien kulumista merkittävästi. Öljyn viskositeetti ei kykene suojaamaan sekavoitelutilanteessa, sillä pinnankarheuden huippujen osuessa toisiinsa nousee lämpötilat kosketuspintojen välillä huomattavasti romahduttaen öljyn viskositeetin. Tästä seurauksena sekavoitelutilanne muuttuu nopeasti rajavoitelutilanteeksi. Tribologisesti kehittynyt ja pinta-aktiivisilla lisäaineilla seostettu voiteluaine pystyy käyttämään tämänkaltaisen tilanteen hyväkseen, sillä lisäaineiden pinta-aktiivisuus vaatii toimiakseen lämpöä ja painetta, ja tämä ympäristö toimii katalyyttinä lisäaineiden absorboituessa pinnankarkeushuippujen väliin tehden pinnasta tribologisesti paremman.

Voitelun tehokkuus perustuu lähes yksinomaan raja- ja sekavoitelutilanteissa pintakalvojen tarttuvuuteen, kykyyn absorboitua huokosiin, stabiilisuteen ja muodostumisnopeuteen kosketuskohdassa. Pinta-aktiivisten lisäaineiden reagoitilämpötilaa voidaan säädellä lisäainetyyppien avulla ja kemiallisilla yhdistelmillä. Voiteluainekalvon pettäessä kitkakerroin voi helposti kohota materiaaliparin kuivakitka-arvojen tasolle tai jopa kiinni leikkautua. (Opetusmateriaali Kai Laitinen)

Polttomoottorissa käynnistys ja pysäytyshetket ovat yleisiä raja- ja sekavoiteluhetkiä, jolloin komponentit ovat rasituksen alaisena. Erityisesti näissä tilanteissa voiteluaineen EP-lisäaineistus vähentää abrasiivista ja adhesiivista kulumista. Raja- ja sekavoitelun tehostamiseksi on huolehdittava voiteluaineen jäähdytyksestä, sekä sen kuljetuksesta voitelukohteeseen. Tyypillisiä raja- ja sekavoitelukohteita ovat lähes kaikki venttiilikoneiston voitelukohteet, sekä ketjukäyttöiset jakopään komponentit ja sylinterin seinämät.

Kaikkiin hankalasti voideltaviin kohteisiin on kilpamoottorisovelluksissa kehitetty erilaisia komponenttipinnoitteita ja kiinteitä voiteluaineita kuten DLC, Cryo, Nicasil, Alusil, Black Carbon, MOS, NFC, PTFE yms. Komponenttien pinnoituksen tai kiinteän voiteluaineen sijaan voidaan samankaltaiset tribologiset ominaisuudet raja- ja sekavoitelukohteissa saavuttaa kustannustehokkaammin tribologisesti suorituskykyisellä öljyllä.

Kuvassa 13 kilpamoottorin männänhelman tribologisia ominaisuuksia on pyritty parantamaan helmaan kiinnitetyillä PTFE-tapeilla, sekä männänhelman alue on pinnoitettu kiinteällä voiteluaineella (NFC/DLC). Parannustoimenpiteistä huolimatta on nähtävissä, kuinka öljyn pintapaineenkesto on pettänyt, ja selkeää kulumista on tapahtunut.



Kuva 14. Männän helman vauriot

6 Mittaukset

6.1 Mittauslaitteisto

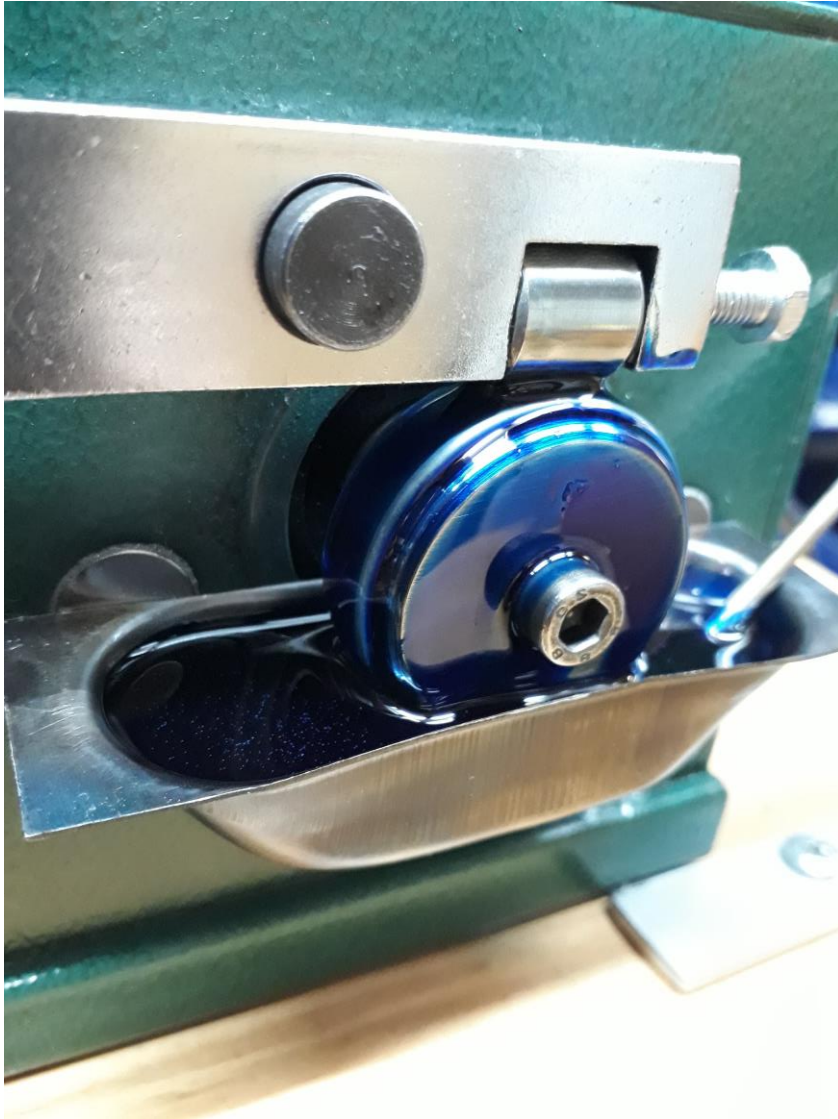
Työssä käytetty testilaitte pohjautuu Timken -tyyppiseen pintapaineentestauslaitteistoon, jonka Henry Timken kehitti jo vuonna 1935 (Kuva 15). Laitteen kuormitusmenetelmää joko lihasvoimaperäisesti tai punnuksilla on kyseenalaistettu, koska näin saadut tulokset ovat vain suuntaa-antavia, usein varsin epäluotettavia ja helposti vääristettäviä. Tämän

vuoksi testilaitteistoa muokattiin merkittävästi luotettavuuden ja toistettavuuden parantamiseksi.



Kuva 15. Tyypillinen kaupallinen Timken-laite. (https://www.alibaba.com/product-detail/Lubricants-abrasion-test-machine-oil-abrasion_60737766389.html?spm=a2700.7724857.main07.1.5b285faaDa6ysP&s=p)

Testilaitteisto kattaa sähkömoottorin, vipumekanismin, käyttökytkimen, virtamittarin, öljyastian, kuormanlisäysmenetelmän sekä koepalan ja koerullan (Kuva 16). Sähkömoottori pyörittää hihnan välityksellä koerullaa. Koerulla pyöriessään kaappaa öljyä öljyastiasta, joka ajautuu pyörivän testirullan ja koepalan väliin. Koepala on kiinnitetty ensimmäiseen vipuvarteeseen lukitusmekanismin avulla. Ensimmäiseen vipuvarren jatkona on toinen pidempi vipuvarsi, josta muodostuu testilaitteen vipulaitteisto. Kuormituksen massan lisääminen tapahtuu valuttamalla nestettä vakiovirtaushanan läpi vipuvarren päässä sijaitsevaan astiaan.



Kuva 16. Mittaustapahtuman keskipiste.

6.2 Mittausten suoritus

Ellipsin pinta-ala A saadaan kaavasta:

$$A = \pi \cdot ab$$

missä a ja b ovat ellipsin puoliakseleita. (Kivioja, Kivivuori, Salonen, 1997, Tribologia-
kitka, kuluminen ja voitelu, 88)

Mittaamalla raapaisujäljen leveys (l) ja pituus (h) saadaan:

$$A = \pi \cdot \left(\frac{l}{2}\right) \cdot \left(\frac{h}{2}\right)$$

Jonka jälkeen pintapaineenkesto P saadaan kaavasta:

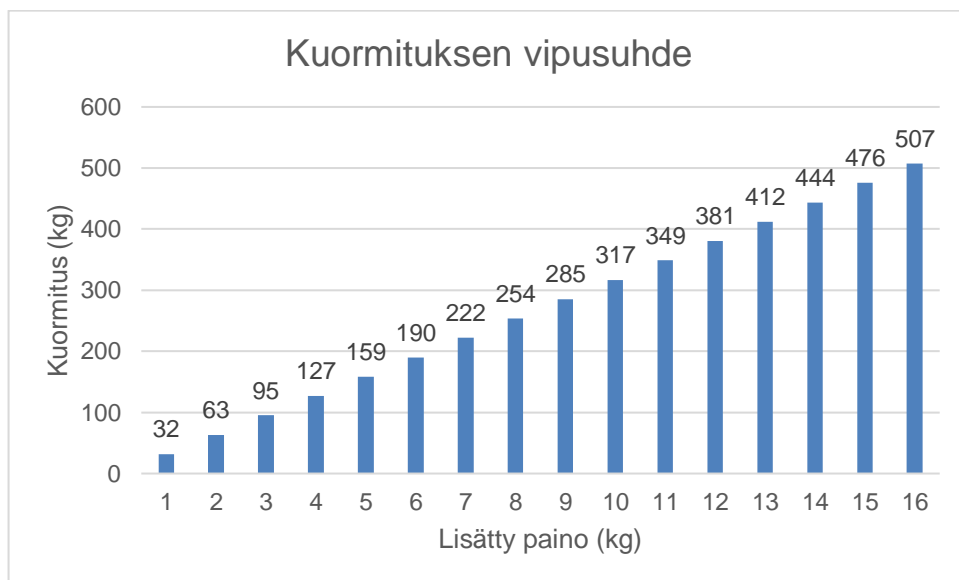
$$P = m/A$$

Laskettaessa lopullista pintapaineenkestoä, massan laskukaavaan lisätään vipumekanismiin alkupaino ja kerrotaan vipusuhteella x :

$$P = \frac{(m + 1) \cdot x}{A}$$

Alla olevasta taulukosta 2 näkyy vipumekanismiin kuormitussuhteen lineaarinen nousu. Massan lisäys laitteeseen kertaantuu suhteessa 1:31,71 vipumekanismiin johdosta. Suuren kuormituksen aikaansaaminen edellyttää näin radikaalia vipusuhdetta, jotta testissä parhaiten pärjäävien öljyjen kiinnileikkautumispiste saavutettiin.

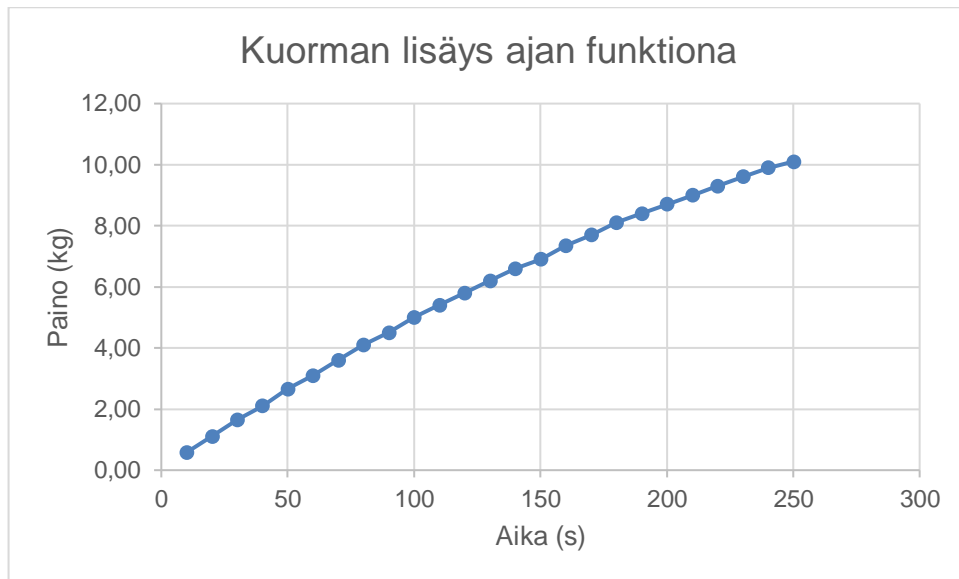
Taulukko 2. Kuormituksen vipusuhte



Mittausten suorittamisen edellytyksenä oli saada mittausolosuhteet pysymään vakioina koko mittaustapahtuman ajan. Voiteluaineiden mittaukset jaettiin kahteen eri pääryhmään, kuluttaja- ja performance-öljyt. Mittausten pääpaino oli voiteluaineiden pintapai-

neen kestossa. Lähtökohta oli saada toistettavuus mahdollisimman hyväksi, ja tässä onnistuttiin muokkaamalla kuormituksen lisääminen tapahtumaan nestevirtauksen avulla. Kuormituksen lisäys tapahtui identtisesti eri öljyillä, taulukon 3 mukaisesti, käyrän ollessa laskeva paraabeli. Tällä muutoksella saatiin toistettavuus halutulle tasolle, ja poistettiin ihmisen tekemät inhimilliset virheet.

Taulukko 3. Kuorman lisäys ajan funktiona



Kaikki pintapaineen testaukset suoritettiin saman kuluvaan päivän aikana. Jokainen testissä mukana ollut öljy numeroitiin ja listattiin taulukkoon. Öljyt testattiin numerojärjestyksessä ja öljyistä raportoitiin kuormituspunnus, loppulämpötila, kuormitukseen kulunut aika ja raapaisujäljen koko. Jokainen testi aloitettiin asentamalla testilaitteeseen puhdas laakerin ulkokehä, sekä puhdas rullalaakerin rulla (myöhemmin "testipala"), jotka toimivat testin pääosassa kuluvina pintoina.

Ennen koneen käynnistystä öljyt lämmitettiin ensin 110°C, ja annettiin sen jälkeen jäähtyä 100°C. Lämpötilan ollessa tasan sata astetta, testilaitteen moottori käynnistettiin. Tästä kolmen sekunnin kuluttua aloitettiin kuormitus. Testin aikana tehtiin audiovisuaalisia havaintoja eri öljyjen käyttäytymisestä kitkaa ja lämpötilaa kohtaan. Pintapaineen kohotessa ja öljykalvon pettäessä sähkömoottorin kuormitus kasvaa liian suureksi, ja moottorin tuottama vääntömomentti ei kykene kumoamaan testipalan ja rullan välistä kitkavoimaa. Kuormitus katkaistaan välittömästi, kun kitkavoima on voittanut moottorin vääntömomentin, ja tällä hetkellä jokaisesta öljystä kirjattiin suoritus aika ja loppulämpötila. Suorituksen lopussa koepalasta mitattiin raapaisujäljen pituus ja leveys.

Mittauksessa käytettiin Mahr-merkkistä digitaalista työntömittaa ja mikroskooppia visuaalisena apuna. Taulukointia helpotti langaton tiedonsiirtojärjestelmä mittalaitteen ja tietokoneen välillä. Tällä tavoin jokaiselle öljylle toistaen kirjattiin ylös mitattavat arvot.



Kuva 17. Koepalat arkistoituna.

6.3 Mittausten toistettavuus

Insinööriyön suunnitteluvaiheessa pohdittiin toistettavuutta, mikä oli ehdoton kriteeri mittausten aloittamiseksi. Riittävän toistettavuuden saavuttamiseksi testilaitteistoa kehitettiin muokkaamalla kuormitusmenetelmää ja parantamalla vipulaitteiston vastinkappaleiden tribologisia ominaisuuksia. Testaukseen orientoituminen ja systemaattinen käyttäytyminen itse mittaustapahtuman aikana olivat myös kehityksen kohteina.

Kuormituksenlisäysmenetelmä vaihdettiin kokonaan portaallisesti lisättävistä punnuksista tarkasti digivaa'alla tarkkailtavaan vesinesteen valutukseen vipuvarren päässä sijaitsevaan astiaan. Vipuvarsia muokattiin käyttämällä suurelle kuormitukselle joutuvia kovaksi karkaistuja vastinpintoja alkuperäisen pehmeäseosmetallin sijasta.

Testilaitteen käyttö aloitettiin tekemällä testejä eri öljyillä ennen virallisia mittauksia. Testejä toistettiin useita satoja kertoja. Näitä testejä tehdessä huomattiin, että pienetkin mit-

taustapahtuman muuttajat saivat aikaan toistettavuuden heikkenemisen. Näillä kontrollitesteillä saatiin toistovarmuutta ja kokemusta testilaitteistoon ja eri öljyihin. Työn edetessä havaittiin, kuinka tärkeää testilaitteen käyttö ennen virallisia mittauksia oli, sillä testaustapahtumassa oli useita pieniä tekijöitä, jotka vaikuttivat mittaustapahtumaan, ja nämä pystyttiin eliminoimaan ennen siirtymistä virallisiin mittauksiin.

Toistettavuustestiin valittiin kaksi toisistaan erilaista öljyä, joiden pintapaineen kesto oli kohtuullinen, mutta toisistaan eroava. Tällä saavutettiin toistettavuustestille tasainen kuormitusaika. Myös raapaisujäljissä esiintyi kahta eri kokoluokkaa. Vertailuparilla tehtiin kymmenen toisistaan poikkeamatonta toistettavuustestiä. Taulukosta 4 näkyy lämpötila, kuormitusaika ja -paino ja raapaisujäljen ellipsiset dimensiot. Mittaustulosten perusteella laskettiin keskiarvo, keskihajonta ja virheprosentti. Näiden toistettavuustestien perusteella toistettavuuden virheeksi todettiin alle viisi prosenttia.

Taulukko 4. Mittaustulokset toistettavuudesta.

Toistettavuustestin öljy 1.					
Lämpötila (Celsius)	Paino(lb)	Jäljen pituus (mm)	Jäljen leveys (mm)	Pinta-ala (mm ²)	Pintapaineen kesto (psi)
186,00	22,09	2,65	2,03	4,23	179570,50
182,00	21,98	2,53	1,99	3,95	190953,52
185,00	22,31	2,55	2,01	4,03	190264,29
190,00	21,89	2,62	2,09	4,30	174883,75
188,00	21,93	2,51	1,97	3,88	194006,08
188,00	21,70	2,62	2,05	4,22	176816,16
197,00	21,81	2,69	2,09	4,42	169737,56
179,00	22,22	2,68	2,14	4,50	169381,08
180,00	21,45	2,48	2,04	3,97	185646,06
179,00	22,54	2,65	2,11	4,39	176128,39
				Keskiarvo (psi)	180738,74
				Keskihajonta (psi)	8928,68
				Virheprosentti (%)	4,94
Toistettavuustestin öljy 2.					
88,00	3,02	6,69	4,37	22,96	5752,67
86,00	2,86	6,62	4,30	22,36	5672,99
89,00	3,01	6,81	4,42	23,64	5573,48
93,00	2,89	6,78	4,34	23,11	5530,72
98,00	2,99	6,66	4,14	21,66	6054,10
99,00	3,04	6,64	4,25	22,16	5989,29
90,00	3,19	6,73	4,38	23,15	5946,70
87,00	2,87	6,78	4,41	23,48	5414,94
84,00	3,08	6,84	4,52	24,28	5520,99
86,00	2,95	6,75	4,36	23,11	5615,11
				Keskiarvo (psi)	5707,10
				Keskihajonta (psi)	220,63
				Virheprosentti (%)	3,87

Kuvassa 16 on koepala, jossa on useampi samalla öljyllä tehty raapaisujälki. Näiden raapaisujälkien ja kuormituspainon avulla tehtiin toistettavuudesta laskelmat.



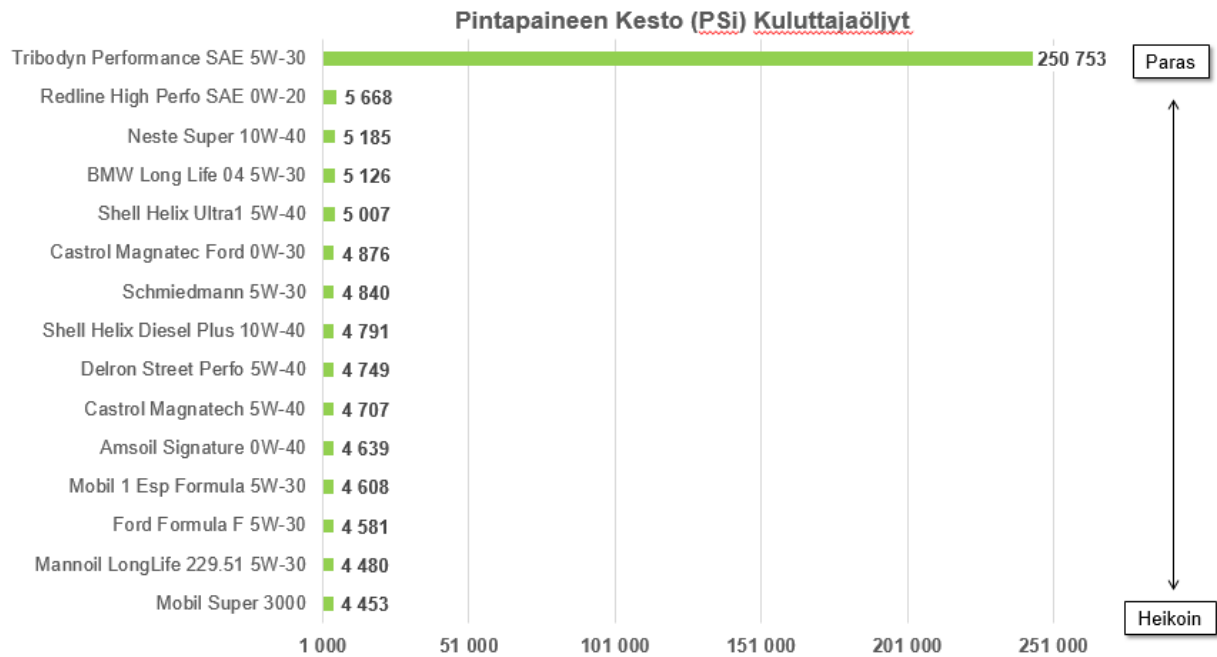
Kuva 18. Koepalan raapaisujäljet.

6.4 Mittaustulokset

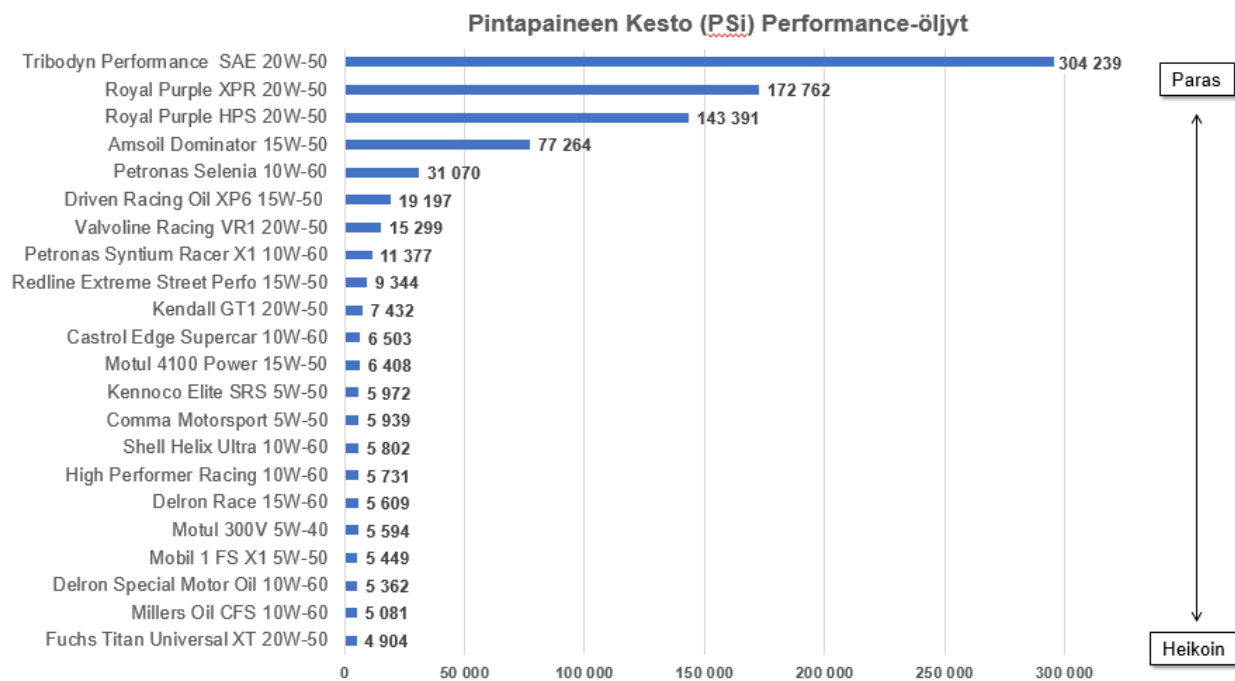
Tutkimustyön tulokset on esitelty taulukoissa 5 ja 6. Taulukossa 5 on kuluttaja-öljyjen pintapaineenkestot taulukoituna paremmuusjärjestykseen, ja taulukossa 6 vastaavat performance-öljyjen arvot. Voidaan havaita, että kuluttajakategoriassa olevat parhaat kuluttaja öljyt peittoavat performance-kategorian huonoimpia öljyjä pintapaineenkestossa. Tuloksista voimme havaita, että öljynvalmistajan kategoriointi ei kerro tuotteen öljyfilmin pintapaineenkestosta.

Työssä dokumentoidut parametrit raapaisujälkien koista sekä kuormitusajasta löytyvät liitteestä 1.

Taulukko 5. Kuluttaja-öljyjen pintapaineenkesto



Taulukko 6. Performance-öljyjen pintapaineenkesto



6.5 Dynamometrimittaukset

Pintapainetestin perusteella tehtyihin havaintoihin haluttiin saada tukea dynamometritesillä. Voidaan olettaa, että heikolla pintapaineenkestolla olevalla öljyllä tulee enemmän raja- ja sekavoitelutilanteissa pinnankarheushuippujen kosketuksia toisiinsa. Näiden pinnankarheushuippujen kosketukset lisäävät kitkaa, nostavat paikallisia lämpötiloja, ja vähentävät moottorin tuottamaa vääntömomenttia. Tavoite oli selvittää, kuinka paljon näiden raja- ja sekavoitelutilanteiden kitkahäviöt vaikuttavat todellisuudessa moottorin hyötysuhteeseen, sillä nämä uudenaikaiset tribologiset voiteluaineet pystyvät testin mukaan vähentämään pinnankarheushuippujen kosketuksia toisiinsa.

Monet öljynvalmistajat markkinoivat tuotteitaan kertomalla, kuinka öljynvaihdon vaikutukset näkyvät moottoritehossa ja vääntömomentissa. On yleistä, että öljynvalmistajat keuhvat tuotteidensa ”liukkautta” ilman selkeitä testituloksia. Tämän takia pintapainetestistä seitsemän öljyä valittiin dynamometritestiin. Testiin pyrittiin valitsemaan mahdollisimman samalla yläpään viskositeetillä olevia öljyjä, jotta pumppaushäviöt eivät vaikuttaisi mitattuun hyötysuhteeseen. Autoksi valikoitui Toyota Celica ST 205 34mm imukuristeella. Imukuristeesta oli hyötyä sillä tavoitteena oli selvittää tarkasti millaisia eroja öljyllä saadaan moottorin hyötysuhteeseen, ja imukuriste rajasi moottorin käytössä olleen ilman aina vakioksi jolloin yksi suurimmista muuttujista saatiin eliminoitua.

Testiauton valmistelut alustadynamometrille (T A T Chassis Dyno Rolling Road Inertia Dyno Systems) aloitettiin mittaamalla moottorin puristusaineet sekä ohivuodot. Autoon suoritettiin nelipyöräsuuntaus ja pyörät pyrittiin suuntaamaan mahdollisimman neutraalisti, jotta voimansiirron häviöt tai mittaustulokset eivät vääristyisi. Mittauksissa käytettiin jäykkäkylkisiä uusia renkaita, jotta mittaustulokset eivät vääristyisi lämpötilan aiheuttamista muodonmuutoksista renkaissa. Auto sidottiin alustadynamometrin päälle jokaisesta nurkasta, sekä vielä varmistusliinalla keskeltä auton lävitse. Tässä yhteydessä mitattiin myös etäisyys korin kiinteistä mittauspisteistä dynamometrin kiinteisiin mittauspisteisiin, ja tätä etäisyyttä valvottiin ja tarvittaessa korjattiin mittausten välissä. Auto kytkettiin alustadynamometrin ohjainlaitteisiin niin, että saatiin näkyviin ahtopaine, kierrosluku ja ilma/polttoaine -seossuhde.

Mittaukset aloitettiin tekemällä ensin useita kontrollimittauksia. Näiden aikana auton ja moottorin lämpötila saatiin stabiiliksi. Mittaus aloitettiin lisäämällä öljyt moottoriin ja vaih-

tamalla uusi öljynsuodatin. Moottoria käytettiin, kunnes öljy saavutti stabiilin 85 celsiusasteen lämpötilan. Moottoritehonmittaus suoritettiin, ja tämän jälkeen moottorinohjauksen tiedonkeruusta kirjattiin ylös öljyn paine- ja lämpötilatiedot esimääritetyiltä kierrosalueilta. Tämä mittaus suoritettiin toistaen systemaattisesti joka öljyn kohdalla. Kuvasta 19 nähdään alustadynamometritulokset listattuna, ja liitteessä 2 on vääntömomenttikurvat eri öljyjen dynamometrituloksista.

Kendall GT1 20W-50	310,3HP / 559,5NM
Amsoil Dominator 15W-50	309,8HP / 559,6NM
Redline Extreme Streetperformance 15W-50	309,3HP / 558,4NM
Castrol Edge Supercar 10W-60	309,4HP / 559,0NM
Delron Race 15W-60	311,2HP / 560,7NM
Royal Purple XPR 20W-50	310,2HP / 557,3NM
Tribodyn Performance Lubricants 20W-50	312,3HP / 559,3NM

Kuva 19. Dynamometrin tulokset.

Tulosten perusteella voidaan todeta moottorin suurimpien häviöiden johtuvan lämpöhäviöistä. Voiteluaineen vaikutukset hyötysuhteeseen olivat havaittavissa. Merkittäviä pintapaineenkestotulosten kaltaisia eroja ei havaittu. Useilta eri tahoilta on kantautunut tietoja useamman prosentin tehonnousuista moottoriöljyn vaikutuksena, mutta tämänkaltaisia tuloksia ei esiintynyt.

7 Yhteenveto ja tarkastelu

Voiteluaine-alalla toimii useita maailman suurimpia yrityksiä, joiden liikevaihto on jopa 200 miljardia euroa. Näiden yhtiöiden mainosbudjetit ovat sadoissa miljoonissa euroissa, ja brändien arvot sitäkin suurempia. Ihmisille luodaan mainosten avulla mielikuvia ja iluusiona tuotteidensa suojauskyvystä ja ominaisuuksista. Yrityksen brändillä voidaan vaikuttaa tehokkaasti kuluttajien mielikuviin ja sitä kautta öljyvalintoihin, joten ei liene yllätys, että yritysimageon ja brändin suojaamiseen, markkinointiin ja ylläpitoon satsataan vuosittain satoja miljoonia euroja.

On kuultu, että 2000-luvun alussa erään öljyvalmistajan tuote kattoi 80% Suomen pakatun öljyn myynnistä. Merkittävänä tekijänä oli valtava mainoskampanja, ralli- sekä formula-auton kuvien lisääminen purkin kylkeen ja aktiivisesti korjaamo- ja myymäläsektorille jalkautuminen. Tämä todistaa sen, kuinka suuri osa öljyjen myynnistä perustuu mielikuviin ja suhteisiin.

Isot öljy-yhtiöt varaavat jälkimarkkinoita veljeilemällä autonvalmistajien kanssa eli myymällä ensiasennus-öljyt jopa ilman katteita, saadakseen brändiensä logot täyttökorkkien päälle sekä autonvalmistajan laatuluokitukset heidän öljyihinsä. Tämä on tehokas keino taata jälkimarkkinat pakatulle öljymyynnille, toisin sanoen luomalla voimakkaita mielikuvia öljystä, joka olisi paras vaihtoehto kuluttajalle.

Yhden maailman suurimman öljy-yhtiön Pohjois-Euroopan tuotetuesta vastaava diplomi-insinööri kertoi, että ei ole epätavallista lanseerata sama tuote kahdessa tuotekategoriassa erilaisilla etiketeillä ja erihintaisena. Tämä kuvastaa hyvin, kuinka vaikeata kuluttajan on vertailla tuotteita, jos samaa öljyä pystytään myymään eri purkeissa eri hinnalla.

Teoreettisesti tarkasteltuna tapauksessa, jossa moottorin komponentit on suunniteltu hyvin ja suunnitelmissa onnistuttu eikä moottoria ole viritetty, voitelun voitaisiin olettaa olevan täydellistä eikä kulumista tapahdu, mutta tämä harvoin käy toteen. Jo auton suunnitteluvaiheessa suunnitellaan auton varaosamarkkinat, joissa laskelmoitu ja hallittu kulumisen on suunnittelun keskiössä. Tätä kulumista vastaan voidaan taistella paremmilla kulumisenesto-ominaisuuksilla varustetulla öljyllä.

Kun moottoriteho, vääntömomentti, maksimikierrokset tai komponentit ovat alkuperäisen moottorivalmistajan suunnitelmien jälkeen muuttuneet, on täydellisen nestevoitelun turvamarginaali pienentynyt. Tämä tarkoittaa sitä, että voiteluaineelta vaaditaan pintapaineenkestoa lisääntyneissä raja- ja sekavoitelutilanteissa. Nykyaikaisen autoteollisuuden valmistusmenetelmien ja varaosamarkkinaideologian seurauksena moottorivaurioista koituvat usein suuret kustannukset. On olemassa runsaasti suuria komponentteja ja isoja sovellutuksia jotka ovat rikkoutumisen jälkeen korjauskelvottomia. Erityisesti tämänkaltaisissa sovelluksissa voitelusta johtuvien vaurioiden minimointi on kustannussyistä järkevin ratkaista ennaltaehkäisevästi, valitsemalla suojausominaisuuksiltaan suorituskykyinen voiteluaine.

Parhaiden öljyjen tribologisesti kehittyneet, usein patentoidut, lämmöstä ja paineesta aktivoituvat pinta-aktiiviset EP-lisäaineet luovat metallipintojen päälle pinnoitteen. Tämä tribokemiallinen pinnoite suojaa laakereita ja venttiilikoneistoa silloin, kun ihanteellisen voitelun periaatteet ylitetään tai menetetään, ja toimitaan rajavoitelutilanteissa.

Insinööriyön tavoitteena oli luoda kattava, keskenään vertailukelpoinen listaus moottoriöljyjen pintapaineenkestosta. Tavoitteena oli koota mahdollisimman laaja otos kuluttaja- ja performance-öljyjä eri viskositeetti-indekseillä. Testien edetessä havaittiin joidenkin moottoriöljyjen ylittävän selkeästi pintapaineenkeston keskiarvon, mikä inspiroi perehtymään syvällisemmin performance-öljyihin.

Uudeksi tavoitteeksi otettiin etsiä ja löytää voiteluaine maailmanluokan moottoriurheilun parista. Lähes operatiivisen tutkimuksen loppuvaiheessa tilattiin lentorahdilla amerikkalaisesta motorsport-nettikaupasta erä kilpakäyttöön suunniteltuja moottoriöljyjä. Erän mukana tullut TriboDyn -merkinen moottoriöljy osoittautui tutkimuksemme menestyneimmäksi öljyksi niin kilpa-, kuin kuluttajakategoriassakin. Tutkimustuloksesta ja tuotteen laadusta raportoitiin TriboDynin tehtaalle, joka lopulta johti Pohjois-Euroopan maahantuontisopimukseen. Loppuun voidaan todeta, että työn tavoitteisiin päästiin ja ne jopa ylitettiin.

Lähteet

Opetusmateriaali Kai Laitinen

Opetusmateriaali Heikki Parviainen

Timo Lehtimäki Til-Racing

Materiaalitekniikka 978-952-63-0666-7

Tekijä: Airila, Mauri et al

ISBN: 951-0-14338-3

Chemistry and Technology of Lubricants

Mortier, Roy M. ; Fox, Malcolm F. ; Mortier, R. M. ; Orszulik, S. T.

Springer Netherlands 2010

Lubricant Additives: Chemistry and Applications, Leslie R. Rudnick, CRC Press

Kivioja Seppo, Kivivuori Seppo, Salonen Pekka, 1997, Tribologia-kitka, kuluminen ja voitelu

<http://www.oil.fi/fi/oljytuotteet/voiteluoljyt>

https://www.koivunen.fi/tuotteet/file/kemikaalit/liqui_moly_voitelu_abc.pdf

<http://www.ekomobiili.fi/Tekstit/Oljytesti.pdf>

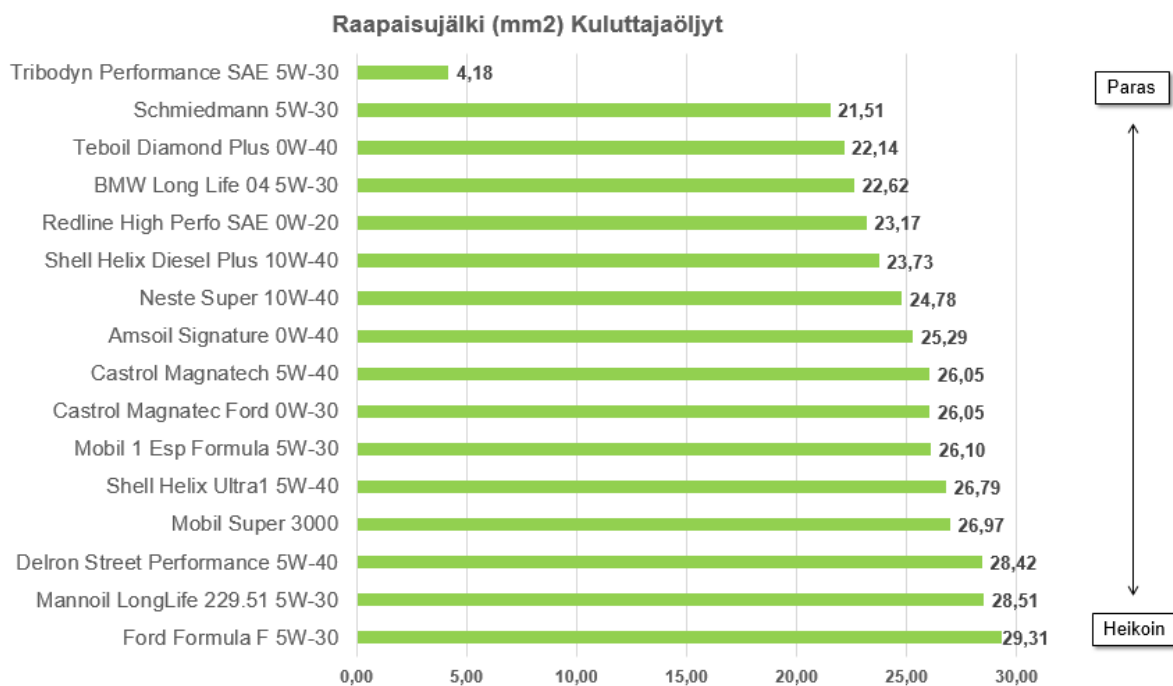
https://en.oelcheck.com/wiki/Zirconium_%E2%80%93_why_does_this_element_pop_up_in_lab_reports%3F

http://www.upmpg.com/tech_articles/motoroil_viscosity/

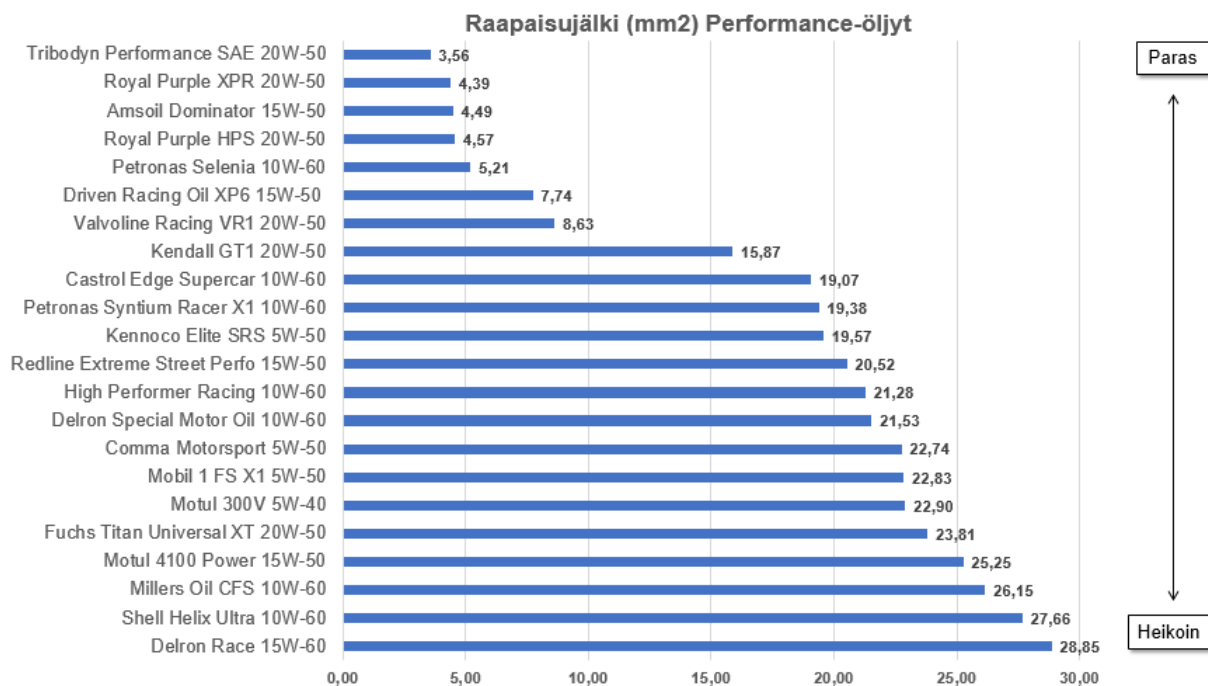
http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_e04_voiteluaineet_lisa-aineet.html

<http://www.teboil.fi/tuotteet/voiteluaineet/yleista-voiteluaineista/suorituskykyluokitukset/>

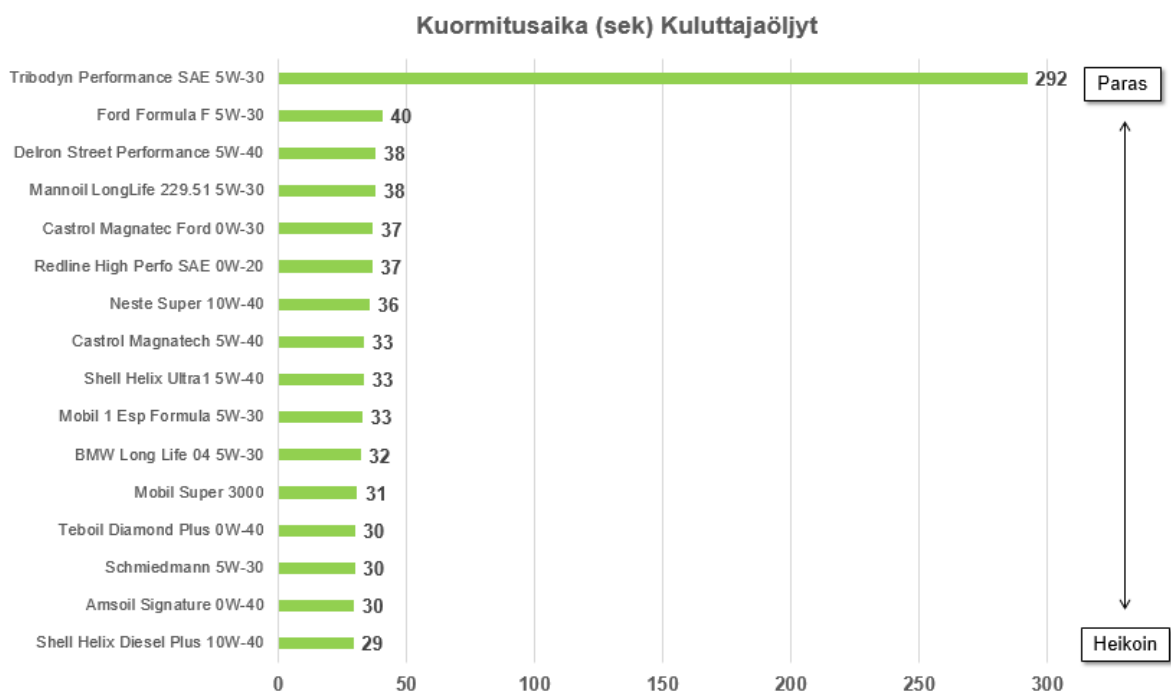
Taulukko 7. Kuluttaja-öljyjen raapaisujäljen koko



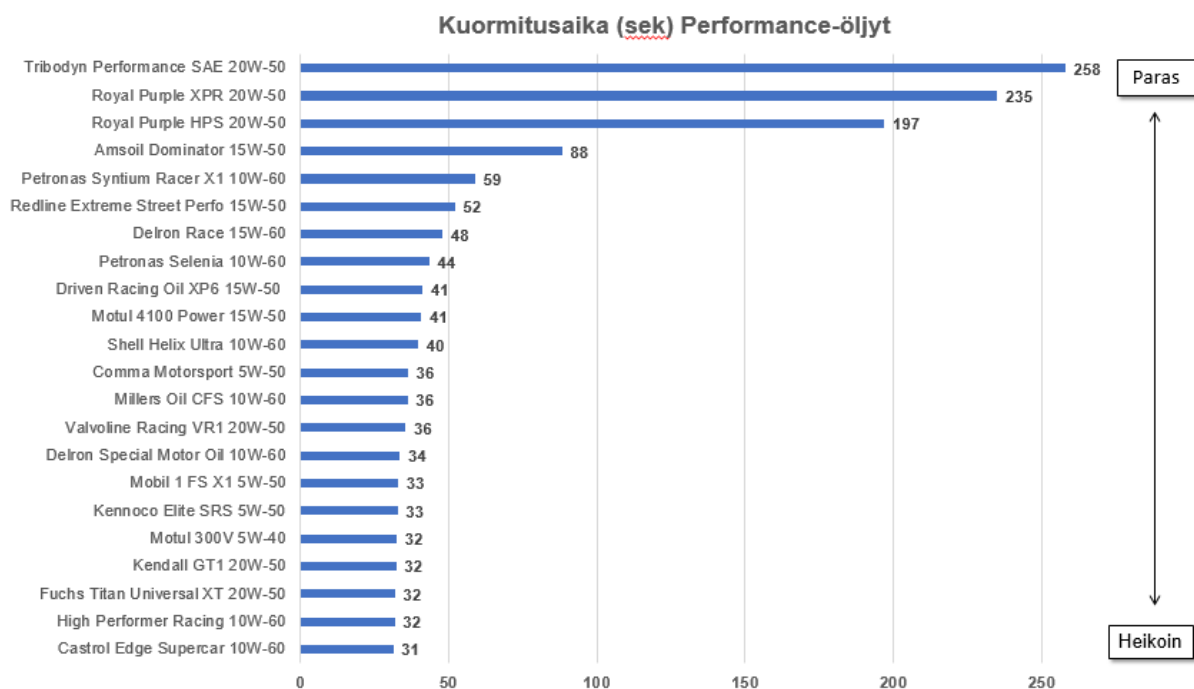
Taulukko 8. Performance-öljyjen raapaisujäljen koko



Taulukko 9. Kuluttaja-öljyjen kuormitusaika



Taulukko 10. Performance-öljyjen kuormitusaika



Alustadynamometritulokset

