



Anturit ja mittauslaitteet öljyjen kunnon- valvonnassa

No 9

FLUID
Finland
3-2004



KAUPALLISET ANTURIT JA MITTAUSLAITTEET ÖLJYJEN KUNNONVALVONTAAN



Risto Parikka



Ville Vidqvist

Kirjoittajat toimivat tutkijoina VTT Tuotteet ja tuotannossa, Koneiden käyttövarmuus -ryhmässä. Se kehittää ja soveltaa erityisesti kitkan ja kulumisen hallintaan, voitelutekniikkaan, kunnonvalvontaan ja diagnostiikkaan liittyviä teknologioita koneiden käytettävyyden optimoimiseksi.

Vuosien 2002-2003 aikana teollisuusyritysten ja VTT:n voimin toteutetun, Tekesin ja teollisuusyritysten rahoittaman Koneiden on-line-kunnonvalvonnan ja diagnostiikan tehostaminen öljytutkimuksen avulla -projektin ("Litkut-projekti") yhteydessä tehtiin kartoitus, jossa selvitettiin öljyn käynninaikaiseen kunnonvalvontaan saatavissa olevia kaupallisia ratkaisuja. Tässä artikkelissa tehdään yhteenveto kartoituksessa esille tulleista öljyn kunnonvalvonnan tekniikoista ja tunnetuimmista kaupallisista mittauslaitteista ja antureista sekä esitetään eräitä mittaustuloksia ja niihin perustuvia johtopäätöksiä.

Öljyn kunnonvalvontatavat voidaan jakaa kolmeen luokkaan, jotka ovat off-line-, on-line- ja in-line -valvonta. Off-line -valvonnassa osa öljystä otetaan manuaalisesti pois koneesta ja testataan laboratoriossa. On-line -järjestelmässä osa öljystä johdetaan pois koneesta ja analysoidaan saman tien sekä tämän jälkeen johdetaan takaisin koneeseen tai toiseen säiliöön. In-line -valvonnassa koko öljymäärää testataan jatkuvasti [1]. Nimitysten käytössä on erilaisia käytäntöjä, eivätkä edellä mainitut määritelmät ole täysin vakiintuneita. Usein puhutaan on-line- ja off-line -menetelmistä riippuen siitä, suoritetaanko analyysi automaattisesti koneen käytön aikana vai laboratoriossa järjestelmästä otetulle pullonäytteelle.

Käytännössä pienehköjen voitelu- ja hydraulikkajärjestelmien käytönaikaista valvontaa voitiin kartoituksen mukaan suorittaa optisen hiukkaslaskennan ja öljyn vesipitoisuusmittauksen muodossa, sekä kapasitiivisella dielektrisyysvakion mittauksella, jolla voidaan valmistajien mukaan havaita erilaisia öljyssä tapahtuvia muutoksia. Vesipitoisuuksia voitiin mitata joko absoluuttisina pitoisuuksina (ppm, parts per million) tai suhteellisena kosteutena eli veden aktiivisuutena öljyssä.



Kuva 1. Dielektrisyysvakioantureita.

Vasemmalla Kavlicon dielektrisyysanturi, keskellä TEMIC-dielektrisyysanturi, joka mittaa myös öljyn lämpötilan ja öljy-säiliön pinnankorkeuden ja oikealla Delphi automotiven valmistama dielektrisyysanturi, johon myös on integroitu lämpötilan sekä pinnan korkeuden mittaukset [3, 4, 5].

1 Dielektrisyysvakio

Kullakin materiaalilla on sille ominainen dielektrisyysvakio, joka kuvaa väliaineen kykyä eristää vastakkaisia varauksia toisistaan. Ilmassa dielektrisyysvakio on noin yksi, mutta esimerkiksi huoneenlämpöisellä vedellä se on noin 80. Öljyn kunnonvalvonnassa dielektrisyysvakiota mittaavan anturin käyttö perustuu vakion muutokseen öljyssä tapahtuvien kemiallisten muutosten tai öljyyn sekoittuneiden vieraiden aineiden takia. Samaa anturia voidaan usein käyttää pinnan korkeuden mittaamiseen eri aineiden rajapinnasta [2].

1.1 Dielektrisyttä mittaavien anturien valmistajia

Kavlico on amerikkalainen yritys, joka valmistaa pääasiassa ajoneuvoteollisuuteen antureita. Kavlico myy öljyn kunnonvalvontaan liittyvää dielektrisyysanturia. Anturi on alun perin tarkoitettu moottoriöljyn kunnonvalvontaan [1, 3].

Temic on autoteollisuudelle elektroniikkaa valmistava yritys. Yritys valmistaa myös dielektrisyysanturia. Anturiin on integroitu dielektrisyysvakion lisäksi lämpötilan sekä pinnankorkeuden mittaukset, ja ulostulo on digitaalisenä. Uusiin Mercedes-Benz ajoneuvoihin on saatavana tähän anturiin perustuva ASSYST-järjestelmä moottoriöljyn kunnonvalvontaan [1, 4].

Delphi automotive on iso autoteollisuudelle elektroniikkaa valmistava yritys. Delphin dielektrisyysanturi on ulkoisilta ominaisuuksiltaan jokseenkin samanlainen kuin Temicin anturi [1, 5].

1.2 Dielektrinen häviökerroin

Lubrigard Inc. on kehittämässä autoteollisuuteen tuotetta, joka mittaa dielektrisistä häviökerrointa eli Tandelta-arvoa (kuva 2). Kertoimen arvon on todettu nousevan voimakkaasti polaarisien epäpuhtauskijöiden, kuten veden, glykolin ja hapettumisen vaikutuksesta.



Kuva 2. Lubricard-anturi mittaa dielektristä häviökerrointa dielektrisyysvakion sijaan [6].

tuksesta. Myös metalliset partikkelit ja noki lisäävät Tandeltan arvoa. Tandeltan etuna voidaan pitää parempaa dynaamista aluetta (tyypillisesti 0,005-1 ja ylöspäin), kun sitä verrataan dielektrisyysvakioon (tyypillisesti 2,2-2,9). Yritys myy jo tuotekehitykseen tuotetta, jossa on mukana numeronäyttö sekä erivärisiin valoihin perustuva kuntoilmaisin. Anturista saa analogisen ulostulon ja siinä on myös lämpötilamittaus. Yritys on patentoinut kyseisen menetelmän [6] ja esittänyt testaustuloksia anturista [7].

1.3 Dielektrisyysvakion mittauksen tutkimukset Litkut-projektissa

Litkut-projektissa suoritettujen mittausten perusteella voidaan arvioida, että dielektrisyysvakion mittaus sopii öljyn pitkäaikaiseen valvontaan yhtenä diagnostiikkajärjestelmän osana, jossa mittaustuloksia voidaan keskiarvoistaa ja lämpötilan vaikutus kompensoida laskennallisesti [2]. Menetelmä on lineaarimittauksena on kaupallisesti valmis, ja markkinoille on tullut myös herkempi variaatio, dielektrisen häviökerroimen mittaus. Parhaiten mittaus sopii öljyn hapettumisen valvontaan, mutta sillä voidaan saada indikaatio myös veden tai jonkin muun vieraan aineen pääsystä voitelujärjestelmään esimerkiksi vuototapauksissa. Mittauksella saatu tulos on kuitenkin lähinnä suuntaa antava ja voi antaa impulssin öljynäytteen ottoon ja sitä kautta tarkempaan öljyanalyysiin. Projektin tutkimuksissa ei voitu arvioida mittausmenetelmän toimivuutta moottorien voitelujärjestelmissä tapahtuvien öljyn ominaisuuksien muutosten havaitsemisessa. Testattuun anturiin integroitu pinnan korkeuden mittaus oli toimiva, mutta mittausalue voi olla monissa käytännön järjestelmissä liian pieni.

2 Kulumametallien mittaus

Koneenosien kulumisen ennustaminen öljyn kunnonvalvonnan avulla on haasteellista, koska voitelujärjestelmässä olevat epäpuhtaudet voivat olla peräisin monista lähteistä; esimerkkeinä voiteluaineesta kemiallisten reaktioiden tuloksena syntyvät epäpuhtaudet, maalatuista pinnoista ja tiivisteistä peräisin olevat epäpuhtaudet ja valmistusperäiset epäpuhtaudet sekä toisaalta kokonaan voitelujärjestelmän ulkopuolelta tulevat epäpuhtaudet.

Öljyanalysimenetelmiä, joilla on mahdollista arvioida koneenosien kulumistilannetta, ovat esimerkiksi:

- hiukkaslaskenta
- ferrografinen kulumishiukkasanalyysi
- plasma-atomiemissiospektrometriset kuluma metallianalyysit
- röntgenfluoresenssiin perustuvat alkuaine-analyysit
- magneettikenttään perustuvat ja magneettisia hiukkasia keräävät ilmaisimet
- dielektrisyysvakion mittaus (valmistajan esitteen mukaan).

Markkinoilla olevista hiukkaslaskimista suurin osa on optisia valonpeittoon tai -sirontaan perustuvia laitteita. Toinen öljyanalysaattoreissa käytetty mittaustek-

niikka perustuu laitteen suodattimissa aiheutuvan paine-eron mittaukseen. Näiden etuna on tunteettomuus öljyn sisältämällä vesi- tai ilmapitoisuuksille [8].

Litkut-projektin puitteissa testattiin hiukkaslaskentaa ja dielektrisyysvakion mittausta laakerikoelaitteen yhteydessä jatkuvana käytönaikaisena mittauksena. Kulumistilanteen arviointiin ferrografia- ja kulumametalianalyysit ovat näitä mittauksia toimivampia ja monipuolisempia, mutta menetelmistä ei ole pystytty kehittämään edullisia mittaussaitteistoja käynninaikaiseen mittaukseen. Röntgenfluoresenssiin perustuva mittaussaitte on tosin kaupallisesti saatavissa, mutta sopii hintansa puolesta lähinnä laajoihin prosessijärjestelmiin. Magneettikenttään perustuvia ja magneettisia hiukkasia kerääviä ilmaisimia ei testattu hankkeessa. Niiden käyttökelpoisuus riippunee mm. järjestelmän laajuudesta ja mittauspisteen sijoituksesta [2].

2.1 Hiukkaslaskimien valmistaja

Hydac on iso hydraulikkatalo, jolla on tuotteita paineakuista suodattimiin. Nimikkeitä HYDACIN lisäksi ovat FLUTEC, HYROS, HYCON, BSO ja SEMPAS. Kokonaisuudessaan valikoimasta löytyy 50000 tuotetta ja järjestelmää. Öljyn kunnonvalvontaan löytyy öljyanalysisetitejä, kannettavia optisia on-line -hiukkaslaskimia ja in-line -hiukkaslaskimia. Myös off-line -laitteet veden mittaamiseen öljystä, kuuluu valikoimaan. Kuvassa 1 olevaan in-line -laskimeen on mah-

dollista saada mm. CAN-kenttäväyläliitäntä. Yritys myy myös suodattimien valvontaan tarkoitettuja paine-eroinstrumentteja [1,9].

Pamas on optiseen hiukkaslaskentaan erikoistunut yritys. Yritykseltä löytyy off-line-, on-line- ja in-line -laskentaan instrumentteja. Hydac käyttää omien hiukkaslaskimien kalibrointiin Pamasin antureita. Jokaisessa laskimessa on käytännössä sama optiikkaan perustuva anturi [1, 10].

Pacific Scientific Instruments on hiukkaslaskentaan erikoistunut amerikkalainen yritys. HIAC-merkkiset laskimet ovat tarkoitettuja öljyn hiukkaslaskentaan. Tuotteet ovat ulkoisilta toimintatavoiltaan varsin samanlaiset kuin Pamasilla. In-line -laskin on kuitenkin huomattavasti pienemmän kokoinen ja halvempi. In-line -laskin on varsin uusi tuote, joten laskimen toimintavarmuutta ei ole vielä kattavasti testattu. In-line -laskimessa on mm. kenttäväylälinkki ja langaton konfiguraatio PDA-laitteesta [1, 11].

Pall on suuri amerikkalainen suodatus- ja erotusvälineisiin erikoistunut yritys. Pall myy öljyn kunnonvalvontaan kannettavia optisia hiukkaslaskimia, veden määrän mittaamiseen tarkoitettuja paikallaan olevia instrumentteja ja uutena sovelluksena on in-line -hiukkaslaskinta. Myös suodatuksen kuntoa seuraavat paine-eroinstrumentit ovat tuotevalikoimassa [1, 12].



Kuva 3. Kiinteästi asennettavia hiukkaslaskimia käynninaikaiseen kunnonvalvontaan. Yläriivi vasemmalta Parkerin optinen in-line -hiukkaslaskin IQ200, Artin vastaava OPCO-laskin, Pallin PIM400 -hiukkaslaskimen anturi ja Pamas OLS in-line laskin. Alarivi vasemmalta Hydac CS 2000-sarjan optinen in-line -hiukkaslaskin ja HIAC PM4000 in-line -laskin [9-14].



Kuva 4. Kannettavia hiukkaslaskimia öljyn off-line- tai on-line -kunnonvalvontaan. Yläriivi vasemmalta: Artin kannettava pulloanalysointilaitteisto PODS, Pallin kannettava optinen hiukkaslaskin ja kannettava on-line -laskin HIAC PC4000. Alarivi vasemmalta: kannettava on-line -laskin Pamas S2, Hydacin kannettavat hiukkaslaskimet FCU 2210-4 ja 2210-1 ja Spectron LaserNet Fines hiukkaslaskin, johon on integroitu automaattinen tunnistus [9-15].

Arti valmistaa hiukkaslaskimia öljyn kunnonvalvontaan. Artilla on tuotevalikoimassa kannettava pulloanalysointilaitteisto ja in-line -hiukkaslaskin [1, 13].

Parker on iso amerikkalainen hydraulikka- ja automaatiotalo. Parker valmistaa öljyn kunnonvalvontaan mm. hiukkaslaskimia ja vesipitoisuuden mittaustaitteita. Erikoisuutena on kannettava FTIR-spektroskoopiainstrumentti öljyssä olevan veden valvontaan. Kannettavat hiukkaslaskimet myydään UCC nimellä [1, 14].

Spectro on kunnonvalvontaan erikoistunut yritys. Yritys myy LaserNet Fines nimistä kannettavaa hiukkaslaskinta. Tässä tuotteessa erikoista on hiukkasen muodon tunnistaminen automaattisesti hahmontunnistusalgoritmeilla hiukkaslaskennan lisäksi. Näin kohteen diagnostisointi nopeutuu. Tuote on kehitetty alun perin Yhdysvaltain ilma- ja merivoimille [1, 15].

2.2 Metallipartikkelien tunnistimia

Amot Controls on 1940-luvulla nimellä American Motors Co. perustettu venttiiliteknologian yritys. Yritys valmistaa on/off-tyyppistä metallipartikkelien tunnistinta. Periaatteena tunnistimen käytössä on, että tietyn kokoisen partikkelin kulkiessa laitteen läpi saadaan hälytys ja kone voidaan vakavamman vaurion välttämiseksi pysäyttää [1, 16].

Manortec valmistaa anturia, joka perustuu induktanssin muutokseen hiukkasen kulkeutuessa sen läpi. Tekniikka on kuitenkin varsin altis häiriöille [1, 17].

Smiths Aerospace on kehittämässä on-line öljyn kunnonvalvontaan anturia, joka perustuu staattiseen sähköön (kuva 4). Menetelmällä pystytään havaitsemaan pienempiä metallisia kulumispartikkeleita ja muita ei-metallisia partikkeleita voiteluöljyissä ja nes-



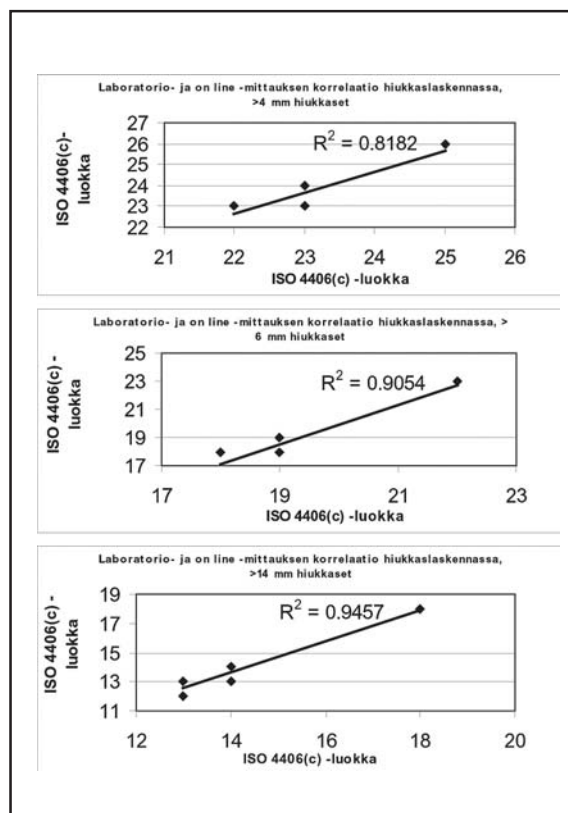
Kuva 5. Amot Controlsin valmistama MPD-metallipartikkelin tunnistin, Manortecin induktanssiin perustuva Patrol-anturi ja staattiseen sähköön perustuva Smiths Aerospace OLS öljyn kunnonvalvonta-anturi [16-18].

teissä kulumisen alkuvaiheissa. Menetelmä on kopioitu suihkukoneiden moottorien kaasuteiden yhteydessä käytettävistä antureista, joilla on pyritty havaitsemaan kulumisesta aiheutuneita epäpuhtaushiukkasia staattisen sähkön purkauksissa tapahtuneiden muutosten perusteella. Anturin tieto joudutaan vielä jälkikäsittelemään PC:ssä [1, 18].

Magneetikenttään perustuvia ja magneettisia hiukkasia kerääviä ilmaisimia on markkinoilla edellisten esimerkkien lisäksi lukuisia varsinkin ilmailuteollisuutta palvelevilta valmistajilta. Näitä ovat mm. Eaton Engineered Sensors, MACOM Technologies Ltd, Gas-TOPS Ltd ja T. F. Hudgins Inc [6].

2.3 Kulumismetallien mittauksen tutkimukset Litkut-projektissa

Projektin yhteydessä testattiin in-line -hiukkaslaskinta laakerikoelaitteen kiertovoitelujärjestelmässä [2]. Testattu hiukkaslaskin osoittautui tietyin rajoituksin käyttökelpoiseksi. Hiukkaslaskimella mitatut ISO 4406(c) -standardin mukaiset puhtausluokat poikkesivat korkeintaan yhden luokan verran laboratoriossa tehtyjen varmistusmittausten tuloksista. Korrelaatiot on esitetty kuvassa 6, joskin mittauspisteitä on liian vähän kovin pitkälle menevien johtopäätösten tekemiseksi.



Kuva 6. Laboratoriomittauksen ja on line -hiukkaslaskennan välinen korrelaatio [2].

Hiukkaslaskimen käytössä havaittiin jonkin verran häiriöitä. Yhdessä mittauksessa hiukkaslaskin menettiköön, mikä oli korjattavissa puhaltamalla laskimen läpi "vastavirtaan" paineilmaa. On huomattava, että mittauksissa käytetyssä voitelujärjestelmässä ei käytetty suodatusta, mikä mahdollisti suurten hiukkasien pääsyn öljykanavaan. Veden lisäys öljyyn aiheutti hiukkaslaskimen toiminnan häiriintymisen: laskurin näyttämä kohosi maksimiinsa, eikä laskuri "toipunut" siitä koko jäljelläolevan mittauksen aikana. Ongelmia saattaa aiheuttaa myös hiukkaslaskimen edellyttämä öljyn vähimmäispaine. Hiukkaslaskinta voidaan käyttää suoralla öljyn virtauksella ilman paineentasajaa, mutta tällöin öljyn virtauksen vaihtelut voivat vaikuttaa mittaustulokseen.

Mittausten perusteella voidaan arvioida, että on line -hiukkaslaskimella pystytään havaitsemaan laakerin vaurioituminen, mutta mittauspisteen valinta vaikuttaa ratkaisevasti menetelmän herkkyyteen. Mittausjärjestelmässä hiukkaslaskin jouduttiin asentamaan öljysäiliön ja pumpun jälkeen painelinjaan, jolloin menetelmän herkkyys oli huomattavasti värähtely- ja äänimittausta sekä akustisen emission mittausta heikompi. Mikäli hiukkaslaskin voitaisiin asentaa laakerilta lähtevään poistoputkeen, laakerivauriosta saataisiin todennäköisesti nopeampi indikaatio. Tällöin ongelmaksi muodostuu öljyssä oleva ilma. Hiukkaslaskin soveltuu kylläkin yleiseen voitelu- tai hydraulikkajärjestelmän puhtauden valvontaan.

Dielektrisyysvakion mittauksella ei pystytty havaitsemaan öljyn hiukkaspiteisuuden kasvua laakerikoelaitteen voitelujärjestelmässä. Käytännössä metallipitoisuuden kasvu öljyssä tuskin koskaan on normaalin käyttötilanteen aikana niin suuri, että dielektrisyysvakio reagoi muutokseen merkitsevästi.

Hiukkaslaskureiden luotettavuuteen vaikuttavia tekijöitä on tutkinut Tampereen teknillisen korkeakoulun Hydraulikan ja automatiikan laitos IHA. Lähteissä [8] ja [19-21] on esitetty tutkimuksien tuloksia. Lähteissä on myös vertailtu eräiden kaupallisten hiukkaslaskimien toimintaa ja luotettavuutta.

3 Vesipitoisuuden mittaus

Vesipitoisuuden mittaukseen on käytössä useita erilaisia menetelmiä, jotka voidaan jakaa kahteen pääryhmään: näytemenetelmiin ja on-line/in-line -menetelmiin. Näytemenetelmät perustuvat usein kemiallisiin reaktioihin, jotka aiheuttavat esimerkiksi värin muuttumisen, paineen kasvamisen tai johtokyvyn muuttumisen. Karl Fischer -titraus on eniten käytetty vesipitoisuuden mittausmenetelmä, ja sen etuna on laaja, eri öljytyypeille ja vesimäärille soveltuva käyttöalue. Menetelmää ei tarvitse kalibroida eri öljytyyppejä varten. Menetelmä on periaatteessa absoluuttinen, mutta haittoina ovat herkkyys käyttäjän toimenpiteille. Menetelmä selvittää vain vesimäärän, mutta se ei anna kattavaa kuvaa öljyn vesitilanteesta eli esiintyykö vesi liuenneena, emulsiona vai vapaana vetenä. Yleisimmät on-line -mittausjärjestelmät ovat kapasitiivisia, optisia tai paineeseen perustuvia [2].



Kuva 7. Absoluuttisen vesipitoisuuden eli ppm-arvon mittauslaitteita. Vasemmalta Kytölä Oilan, Parkerin kannettava IR-pohjainen mittalaite H2Oil, dielektrisyysvakion mittaukseen perustuva Thermo Measurement 4100 ja TTS Technologiesin Optec-F spektrofotometri [14, 22-24].

Öljyssä oleva vesi muuttua sen dielektrisyysvakiota, mutta muutos on varsin pieni. Herkkyys on huono erotuskyvyn ollessa tyypillisesti luokkaa 100 ppm. Laitteet on kalibroitava öljyä varten. Toinen tapa saada kapasitiivinen signaali on käyttää kapasitiivisia ohutkalvoantureita vahvistimina. Ne ovat käytännöllisiä sovelluksissa, joissa vesimäärä ei saa ylittää liukoisuusrajaa. Ne antavat tarkan suhteellisen vesipitoisuusarvon (veden aktiivisuus a_w eli suhteellinen kosteus) ilman öljykohtaista kalibrointia tai referenssiä. Infrapunaspektroskopiaan perustuvat laitteet ovat kalliita, ja ne vaativat kalibroinnit eri öljytyyppejä varten tai referenssikyvettien käyttämistä. Ne ovat lisäksi usein ristikkäisherkkiä hapetustuotteille. Oikein käytettynä laitteiden tulokset ovat tarkkoja ja toistettavia. Myös veden haihduttamiseen perustuvia menetelmiä käytetään vesimäärien valvontaan. Ne voivat mitata paineen kasvua tai kondensoituvan veden määrää. Haittapuolina ovat mekaanisesti monimutkaiset ja kalliit rakenteet [2].

3.1 Absoluuttista vesipitoisuutta mittaavien laitteiden valmistajia

Kytölä on suomalainen yritys, joka valmistaa virtauksen mittaamiseen tarkoitettuja instrumentteja. Yritys valmistaa mm. veden havaitsemiseen öljystä tarkoitettua mittausvälinettä (OILAN) [1, 22].

TTS Technologies on Tampereella sijaitseva yritys, joka perustettiin alun perin sähkösuunnitteluun ja asennustoimintaan. Tänä päivänä yrityksen ydinliiketoiminnan muodostavat erilaiset optiset analysointilinjat ja vakiointilaitteistot sekä kokonaisprojektit. TTS Technologiesin tuotemerkkejä ovat OPTECTM ja FluidScanTM [23].

Thermo Measurement valmistaa myös veden määrän mittareita öljyn kunnonvalvontaan. Thermo measurement kuuluu Amerikkalaiseen Thermo Electron Groupiin [1, 24].

Myös edellä mainittu **Parker** valmistaa infrapunatekniikkaan perustuvaa vesipitoisuuden mittauslaitetta [14].

3.2 Suhteellista kosteutta mittaavien anturien valmistajia

Sään ja ympäristön valvontaan tarkoitettuja tuotteita valmistava **Vaisala** valmistaa öljyssä olevan veden määrää mittaavaa instrumenttia HMP228. Eri sovellusvaihtoehdot löytyvät voitelu- ja lämmönvaihdinöljyille [1, 25].



Kuva 8. Suhteellista kosteutta mittaavia vesipitoisuusantureita. Vasemmalta Vaisala HMP228, Parker MS100, Hydro-lert-anturi ja Pall-kosteusmittari [25, 12, 26, 14].

Des-Case valmistaa Hydrolert-tuotenimellä tunnetua öljyn vesipitoisuusanturia. Anturi mittaa öljyn kosteutta sen yläpuolella olevasta ilmasta eikä ole kosketuksissa itse nesteeseen [1, 26].

Myös edellä mainitut **Pall ja Parker** valmistavat antureita vesipitoisuuden määrittämiseen öljystä. Vastaavantyyppinen mittauslaite löytyy lisäksi Rockwell-konserniin kuuluvan **Entekin** tuotevalikoimasta [1, 27].

3.3 Vesipitoisuusmittausten tutkimukset Litkut-projektissa

Pullonäytteille tehdyissä veden aktiivisuuden mittaustuloksissa vesipitoisuuden muutokset havaittiin luotettavasti silloin, kun mittausolosuhteet olivat vakiot tai mitattavassa näytteessä oli huomattavan korkea vesipitoisuus. Tällöin myös korrelaatio samoista näytteistä suunnilleen samaan aikaan mitattuihin ppm-arvoihin oli hyvä. Kuitenkin samastakin näytteestä eri mittauskerroilla mitatuissa veden aktiivisuuden arvoissa havaittiin vaihtelua. Todennäköisesti ympäröivän ilman kosteus vaikutti mittaukseen. Mahdollista on myös, että muovipullojen läpi pääsee haihtumaan vettä, mikäli näytteitä säilytetään pitkiä aikoja. Tutkimusten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että suhteellisen kosteuden eli veden aktiivisuuden mittaus soveltuu hyvin öljyn käytönaikaiseen kunnan seurantaan erityisesti silloin, kun järjestelmässä ei sallita vapaata vettä. Vaikka öljyjen kyky liuottaa vettä itseensä on lämpötilariippuvainen, menetelmä ilmoittaa yksiselitteisen suhteellisen arvon, joka sopii hyvin raja-arvojen asettamiseen. Koska eri öljyalaatujen kyky liuottaa vettä öljyyn on hyvin erilainen, yksi parannus olisi aw-mittauslaitteen tai diagnostiikkajärjestelmän kyky ilmoittaa veden aktiivisuusarvon ja veden ppm-arvon yhteys.

Molemmat testatut vesipitoisuuden mittaukseen käytettävät anturit olivat suhteellisen kosteuden eli veden aktiivisuuden mittauslaitteita. Absoluuttisen vesipitoisuuden on-line-mittauslaitteita ei testattu projektin yhteydessä. Kyseisiä laitteita on testattu aiemmin Tampereen teknillisen korkeakoulun toimesta [28].

4 Hapettumisen mittaus

TAN-luvun mittaus on hapettumisen mittauksessa perusmenetelmä. Kokonaishappoluku TAN kuvaa sitä määrää emästä ilmaistuna milligrammoina kaliumhydroksidia, joka tarvitaan neutraloimaan yhdessä grammassa öljyä olevat happamat yhdisteet. Laboratoriossa TAN-arvo määritetään potentiometrisellä titrauksella, missä seurataan pH-arvon muutosta lisätyn standardiemäksen funktiona. TAN-luvun suoraan määrittämiseen ei ole saatavissa hinnaltaan edullisia on-line-mittauslaitteita. Hapettumista voivat indikoida esimerkiksi dielektrisyysvakion muutos, värimuutos, IR-spektrissä tapahtuvat muutokset, lisäainesten katoaminen tai viskositeetin muutos [2].

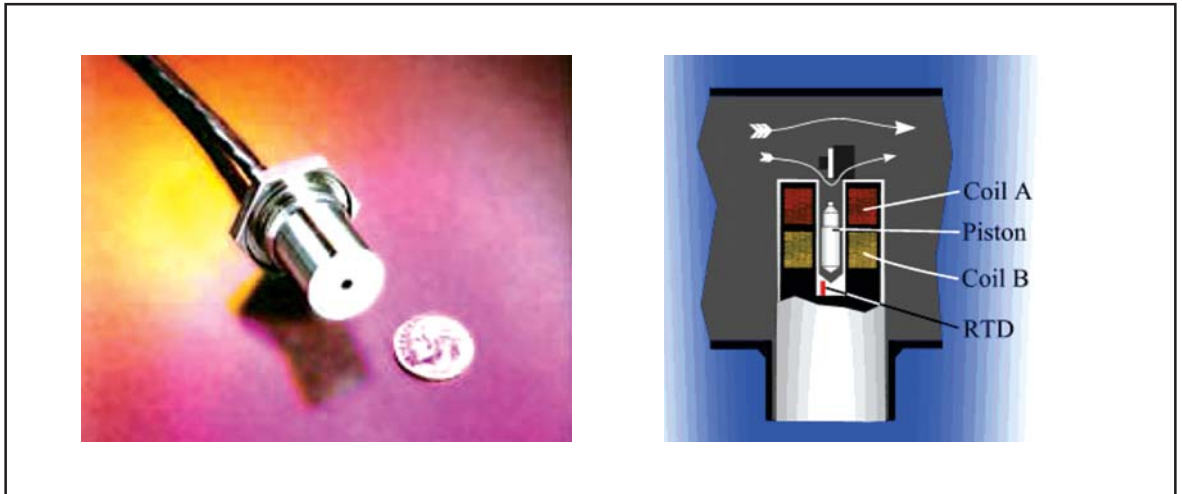
4.1 Kaupallisia tuotteita hapettumisen ja viskositeetin määrittämiseen

Dielektrisyysvakion mittaukseen soveltuvia antureita esiteltiin jo aiemmin luvussa 3.1. Seuraavassa esitellään joukko mittausvälineitä, jotka perustuvat erilaisiin tekniikoihin mutta joilla on mahdollista detektoida öljyn hapettuminen.

Fluitem on amerikkalainen yritys joka valmistaa kannettavia laitteita TAN-luvun ja tiettyjen antioksidanttien muutoksen seurantaan. Yrityksellä on oma RULER-valvontamenetelmä [1, 29].



Kuva 9. Vasemmalta RULER CE320, kannettava öljyn TAN-luvun mittari, K86000 - räätälöity kenttämittaussetti öljyn kunnanvalvontaan, joka voi sisältää mm. veden määrän, tiheyden, viskositeetin, TBN- ja TAN-luvun sekä epäpuhtauksien mittavälineet, sekä Foster-Millerin valmistama FluidScan™ on-line oil analysis spectrometer [29-31].



Kuva 10. Cambridge Applied Systemsin SPL571 on yksi maailman pienimmistä viskositeettiantureista (vas.). Valmistajan valikoimaan kuuluu joukko erilaisiin sovelluksiin tarkoitettuja antureita, joiden toiminta perustuu samaan elektromagneettiseen periaatteeseen (oik.) [32].

Koehler Instrument Company tekee mittavälineitä kentällä tapahtuviin mittauksiin petrokemianteollisuudelle. Testivälineistä muodostetaan paketteja asiakkaan vaatimuksen mukaan [1, 30].

IR-spektroskopia on nopeasti kehittyvä aihealue, ja markkinoille tulee jatkuvasti uusia ja kehittyneempiä sovelluksia. Myös on-line -spektroskopiaan on nykyisin saatavissa laitteita. Kuvassa 9 on esimerkki **Foster-Millerin** valmistamasta FTIR-analysaattorista [31]. Tällaisen analysaattorin hinta on kuitenkin siinä määrin korkea, että sillä lienee käyttökohteita lähinnä prosessiteollisuudessa. Yleisesti ottaen IR-spektroskopiaan perustuvia laitteita on tällä hetkellä kehitteillä ja pyrkimys on pienikokoisempiin ja hinnaltaan edullisempiin laitteisiin [2, 31].

Viskositeetin mittauksen avulla voidaan arvioida hapettumista, mutta myös tiettyjen lisäaineiden katoamista tai vieraiden aineiden joutumista voitelujärjestelmään. Viskositeetin on-line -mittauslaitteita on kaupallisesti saatavissa, mutta niiden hinnat ovat toistaiseksi melko korkeita. Kuvassa 10 on esitetty yksi **Cambridge Applied Systemsin** kehittämä viskositeettianturi periaatteineen [32]. Kyseisen valmistajan viskositeettianturien toiminta perustuu sähkömagneettiseen periaatteeseen. Viskositeetin mittaus sisältyy myös jäljempänä esiteltävään **Boschin** useita suuria mittaavaan anturiin, jossa määrittäminen perustuu pietsosähköiseen periaatteeseen [33].

4.2 Öljyn hapettumisen tutkimukset Litkut-projektissa

Litkut-projektin yhteydessä suoritettujen tutkimusten perusteella ei voitu löytää yksiselitteisesti parasta menetelmää öljyn hapettumisen mittaukseen. Menetelmät, joilla hapettuminen voidaan havaita, ovat tutkimuksen mukaan [2]:

- ◆ kapasitanssin mittaus ja siitä johdettu dielektrisyysvakion mittaus
- ◆ TAN-arvon mittaus
- ◆ viskositeetin mittaus
- ◆ öljyn värin mittaus
- ◆ IR-analyysi
- ◆ kaasukromatografia
- ◆ vesipitoisuuden (ppm) ja veden aktiivisuuden (aw) suhde.

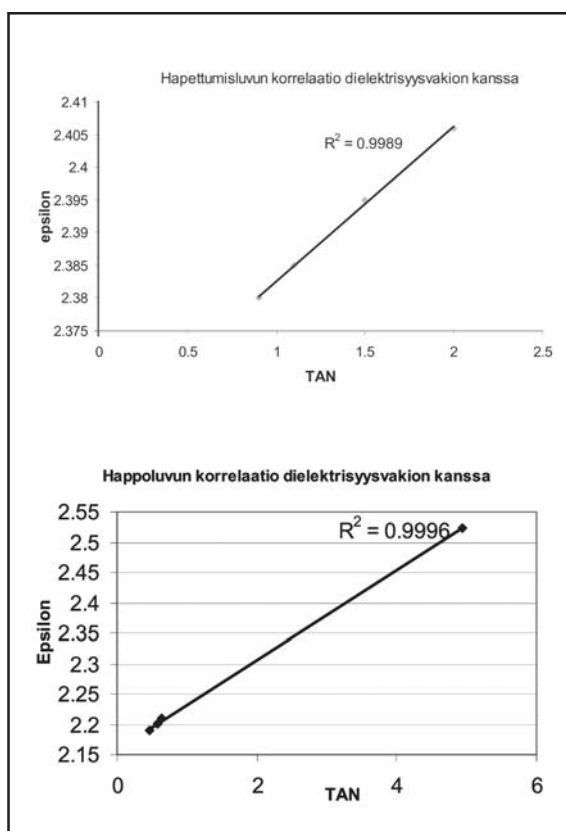
Tutkimusten mukaan varhaisin indikaatio hapettumisesta saadaan mittaamalla antioksidanttina toimivan aineen muutos. Muutos voidaan nähdä IR-analyysillä ja yhdisteestä riippuen mahdollisesti kaasukromatografialla. Ongelman muodostaa se, että öljy tulisi tuntea ennen mittausta, sillä antioksidanttina toimivia aineita on erilaisia, esimerkkeinä fenoliset ja amiiniset antioksidantit. Antioksidantin muodostama juova IR-spektrissä on myös usein vaikeasti havaittava. Fenolisen antioksidantin katoaminen pystyttiin tutkimuksessa havaitsemaan yhdestä keinotekoisesti vanhentusta hydrauliikkaöljystä.

Öljyn värin muutos näyttää korreloivan antioksidanttien katoamisen kanssa. Värin mittausta varten on mahdollista kehittää edullinen mittausmenetelmä. Yksinomaan värin mittauksella on kuitenkin vaikeaa arvioida värin muuttumisen syytä. Epäpuhtaudet tai ölj-

jiyn pääsevä muut vieraat aineet voivat myös aiheuttaa öljyn värin muuttumista yhtä lailla kuin öljyn hapettuminenkin.

Tutkituissa tapauksissa öljyn hapettuminen aiheutti aina TAN-luvun kohoamisen. Haittapuolena on, että TAN-luvun kohoaminen voi olla erittäin nopeaa antioksidanttien loppuun kulumisen jälkeen ainakin silloin, jos öljyä käytetään erittäin hapettavissa olosuhteissa. Tämä havaittiin öljyn vanhennuskokeessa, jossa öljyn TAN kasvoi moninkertaiseksi muutaman päivän aikana.

Riittävän pitkälle edennyt hapettuminen aikaansaa IR-spektriin muutoksia karbonyylialueelle. Tutkimusten perusteella voidaan todeta, että karbonyylialueen absorptiopiikin kasvu korreloi mineraaliöljyillä melko hyvin TAN-luvun muutoksen kanssa. Myös esteriä sisältävissä öljyissä muutos oli havaittavissa, vaikka esterin IR-juova osuu hapettumistuotteiden kanssa samalle aaltolukualueelle. Tutkitulla synteettisellä öljyllä hapettuminen kylläkin havaittiin karbonyylialueen muutoksina, mutta muutokset olivat epämääräisiä eikä juovien kasvu korreloinut TAN-luvun kanssa, joka näytti reagoivan hapettumiseen voimakkaammin. Hapettumisen IR-mittaukseen on mahdollista kehittää yksinkertainen mittauslaite, mutta sen luotettavuus jo käytössä oleviin mittausmenetelmiin verrattuna tulisi selvittää.



Kuva 11. Ylhäällä happoluvun (TAN) ja dielektrisyysvakion (epsilon) välinen korrelaatio synteettisellä öljyllä tehdystä vaihteistokokeesta. Alhaalla vastaava korrelaatio Fortumilla tehdystä öljyn vanhennuskokeesta [2].

Viskositeetin muutosta pidetään hitaana hapettumisen indikaattorina ja se kertoo yleensä pitkälle edenneestä hapettumisesta. Kuitenkin vaihteistoöljyillä viskositeetin havaittiin kasvaneen kaikissa hapettuneissa öljynäytteissä. Vastaavaa ilmiötä ei voitu havaita hydraulikkaöljylle tehdyssä vanhennuskokeessa. Viskositeetin muutos voi olla yhteydessä myös lisäaineissa tapahtuviin muutoksiin.

Kapasiitivisella dielektrisyysvakion mittauksella pystyttiin kaikista vanhenneista öljynäytteistä havaitsemaan öljyn hapettuminen, ja dielektrisyysvakion muutos näytti korreloivan melko hyvin TAN-arvon muutoksen kanssa (kuva 11). Korrelaatio oli kahdella testatulla öljyllä erittäin hyvä, mutta mittauspisteiden vähäisyydestä ja mittauslaitteen epätarkkuudesta johtuen tulokseen on syytä suhtautua tietyin varauksin. Käytetyllä mittauslaitteella ongelmana oli mittausarvon yllättävän suuri vaihtelu samalle öljylle tehtävissä peräkkäisissä mittauksissa. Dielektrisyysvakion arvon luotettavuus paranee, mikäli se lasketaan useiden mittausten keskiarvona. Käytännössä vasta use-



Kuva 12. Vasemmalla Bosch SGM 100, anturi öljyn kunnon ja pinnan korkeuden valvontaan [33], oikealla Qcept technologies yhtiön CPD-DAQ anturi, joka perustuu Scanning Contact Potential Difference -tekniikkaan [6].

an sadasosan nousua dielektrisyysvakion arvossa voidaan pitää merkitseväenä. On huomattava, että mitattavan öljyn lämpötila vaikuttaa mittausten tuloksiin, mikä on otettava huomioon tuloksia tulkittaessa [2].

Vesipitoisuusmittauksia on Vaisalan mukaan mahdollista hyödyntää myös öljyn vanhenemisen arvioinnissa: vesipitoisuuden ja veden aktiivisuuden suhde muuttuu silloin, kun öljyssä tapahtuu kemiallisia muutoksia. Menetelmällä saattaisi olla mahdollista havaita öljyn hapettuminen, mutta sitä ei kuitenkaan ole VTT:n toimesta testattu.

5 Integroidut anturit

Yhtenä suuntauksena on öljyjen kunnonvalvonnassa on useiden suureiden mittausta yhtä anturia käyttäen. Esimerkiksi **Robert Bosch GmbH** on tuomassa markkinoille erityisesti moottoriöljyjen kunnonvalvontaan tarkoitettua anturia (kuva 12). Kyseiseen anturiin on integroitu useiden suureiden mittauksia. Valmistajalta saatujen tietojen mukaan anturi mittaa dielektrisyysvakion, lämpötilan ja pinnankorkeuden lisäksi sähköjohtavuutta ja viskositeettia, joten laite on selvästi aiemmin tunnettuja dielektrisyysvakion mittaukseen perustuvia antureita monipuolisempi. Syksyllä 2003 anturista oli kuitenkin saatavissa vasta prototyypiversio [33].

Ocept Technologies Inc. kehittää anturia joka perustuu kahden kappaleen sähköiseen potentiaali-eroon luotaessa kontakti kappaleisiin ("Scanning Contact Potential Difference", kuva 12). Yrityksen mukaan menetelmällä voidaan laajentaa tulevaisuudessa anturin mittaamien suureiden määrää [6].

Monia suureita mittaavia antureita on kehitteillä useiden muiden valmistajien toimesta. Esimerkkeinä voidaan mainita **Symyx Technologies Inc.**:n anturi, joka käyttää kiinteän tilan mikromekaanista resonanssitoria ja erityistä signaalinkäsittelyalgoritmia fysikaalisten suureiden mittaukseen öljystä [34]. Mitattavat suureet ovat viskositeetti, tiheys ja dielektrisyysvakio. Lisäksi **Eaton Corporation** on kehittänyt FMC-tekniikan (Fluid Condition Monitor), jonka avulla useita sähköisiä ominaisuuksia voidaan mitata öljystä sähkökemialliseen menetelmään perustuen [35].

6 Yhteenveto

Teollisuusyritysten ja VTT:n toteuttaman tutkimushankkeen yhteydessä kartoitettiin markkinoilla oleva öljyn kunnonvalvonnan mittaustaitteiden tarjonta ottaen huomioon erityisesti hankkeeseen osallistuneiden pienehköjä hydraulii- ja voitelujärjestelmiä käyttävien yritysten tarpeet. Kartoituksen mukaan tarjontaa öljyn kunnonvalvonnan instrumenteissa oli jonkin verran, mutta yleisesti ottaen menetelmät olivat vielä melko hintavia tai tuotekehityksen alla. Voitiin kuitenkin selvästi nähdä, että käytönaikaiset mittaukset ovat tulossa laboratorioanalyysien tueksi erityisesti prosessiteollisuuteen. Valmistusmäärien kasvaessa hintojenkin voi odottaa laskevan, sillä varsinkin suuri-

volyyminen autoteollisuus pystyy laskemaan tiettyjen ratkaisujen hintoja. Prosessien ja tuotannon laitteiden valvontaan on olemassa laitteita, mutta hintansa vuoksi ne eivät sovellu liitettäviksi esimerkiksi työko-neisiin. Tuotteisiin integroitu käynninaikainen kunnonvalvonta ja diagnostiikka edellyttävät selkeästi edullisempia ratkaisuja kuin mitä kaupallisesti vielä tällä hetkellä on tarjolla.

Lähteet

- 1 Vidqvist, V., Tervo, J. & Parikka, R. Öljyjen analysointiin tarjolla olevat kaupalliset menetelmät ja palvelut. Espoo, VTT Industrial Systems, 2002. 15 s. + liitt. 3 s. BTUO43-021024.
- 2 Parikka, R., Tervo, J., Vaajoensuu, V., Vidqvist, V., Hiukka, R. & Kiviranta, A. Koneiden voitelu- ja hydrauliiikkajärjestelmien on-line-kunnonvalvonnan ja diagnostiikan tehostaminen Kunnossapito., vol. 18 (2004) 4, s. Erikolisliite "Kunnossapitokoulu".
- 3 Kavlico, valmistajan verkkosivu. www.kavlico.com, haettu: 2.7.2004.
- 4 Temic, valmistajan verkkosivu. Internet-osoite www.temic.com, haettu: 2.7.2004.
- 5 Delphi, valmistajan verkkosivu. Internet-osoite www.delphiautomotive.com, haettu: 2.7.2004.
- 6 Internet-osoite: http://www.practicingoilanalysis.com/article_detail.asp?articleid=521&relatedbookgroup=Which%20group, Haettu: 12.1.2004.
- 7 Collister, C.J. On-board Oil Condition Sensing, Tribo 2000. Germany.
- 8 Multanen, P. & Rinkinen, J. Partikkelilaskurit ja öljyanalysaattorit on-line-käytössä. Öljyn kunnonvalvontapäivä 10.9.1997. TTKK/IHA 1997.
- 9 Hydac, valmistajan verkkosivu. Internet-osoite www.hydac.com, haettu: 2.7.2004.
- 10 Pamas, valmistajan verkkosivu. Internet-osoite www.pamas.de, haettu: 2.7.2004.
- 11 Pasific Scientific instruments, valmistajan verkkosivu. Internet-osoite www.particle.com, haettu: 2.7.2004.
- 12 Pall, valmistajan verkkosivu. Internet-osoite www.pall.com, haettu: 2.7.2004.
- 13 Arti, valmistajan verkkosivu. Internet-osoite <http://arti.net/>, haettu: 2.7.2004.
- 14 Parker, valmistajan verkkosivu. Internet-osoite www.parker.com, haettu: 2.7.2004.
- 15 Spectro, valmistajan verkkosivu. Internet-osoite www.spectroinc.com, haettu: 2.7.2004.
- 16 Amot Controls, valmistajan verkkosivu. Internet-osoite <http://www.amot.com/>, haettu: 2.7.2004.
- 17 Manortec, valmistajan verkkosivu. Internet-osoite www.manortec.co.uk, haettu: 2.7.2004.
- 18 Smiths Aerospace, valmistajan verkkosivu. Internet-osoite www.smiths-aerospace.com, haettu: 2.7.2004.
- 19 Multanen, P., Rinkinen, J. & Kiviniemi, A. Käytännön ongelmatilanteita partikkelilaskennassa. Pamas hiukkaslaskenta-koulutuspäivä 9.9.1997. TTKK/IHA 1997.
- 20 Rinkinen, J. & Multanen, P. Voitelu- ja hydrauliiikkajärjestelmien käytönaikaiset mittaukset. Suosituksia ja ohjeita käytönaikaiselle kunnonvalvonnalle -kurssi 27.1.-22.4.1998. TTKK/IHA 1998.

- 21 Elo, L. & Nykänen, J. Tuloksia ja yllätyksiä hydraulikan kunnonvalvontamittauksista. FLUID Finland Vol. 2, no. 2, 2003. s. 9-13. ISSN 1458-7599.
- 22 Kytölä, valmistajan verkkosivu. Internet-osoite www.kytola.com, haettu: 2.7.2004.
- 23 TTS Technologies, valmistajan verkkosivu. Internet-osoite <http://yritys.soon.fi/tstechnologies/applications.htm>, haettu: 2.7.2004.
- 24 Thermo Measurement, valmistajan verkkosivu. Internet-osoite www.thermomeasurement.com, haettu: 2.7.2004.
- 25 Vaisala Oyj, valmistajan verkkosivu. Internet-osoite www.vaisala.com, haettu: 2.7.2004.
- 26 Des-Case, valmistajan verkkosivu. Internet-osoite <http://www.descase-europe.com>, haettu: 2.7.2004.
- 27 Entek, valmistajan verkkosivu. Internet-osoite: http://domino.automation.rockwell.com/applications/gS/REGION/EntekWebST.nsf/pages/Home_Page, haettu: 2.7.2004.
- 28 Sandt J., Rinkinen, J., Laukka J., Water Contents in Oil Condition Monitoring, VTT Symposium 172, COMADEM'97, 10th International Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, Espoo, Finland, 9-11 June, 1997. Vol. 2, s 236-245.
- 29 Fluitec, valmistajan verkkosivu. Internet-osoite www.fluitec.com, haettu: 2.7.2004.
- 30 Koehler Instrument Company, valmistajan verkkosivu. Internet-osoite www.koehlerinstrument.com, haettu: 2.7.2004.
- 31 FluidScan™ On-line Oil Analysis Spectrometer. Internet-osoite <http://www.foster-miller.com/FluidScan.pdf>, Haettu 29.9.2003.
- 32 Cambridge Applied Systems, valmistajan verkkosivu. Internet-osoite <http://www.cambridgeapplied.com>, haettu: 2.7.2004.
- 33 Robert Bosh, valmistajan verkkosivu. Internet-osoite www.bosch.com, haettu: 2.7.2004.
- 34 Symyx Technologies Inc., valmistajan verkkosivu. Internet-osoite <http://www.symyx.com>, haettu: 2.7.2004.
- 35 Eaton Corporation, valmistajan verkkosivu. Internet-osoite <http://www.eaton.com>, haettu: 2.7.2004.

Tämä artikkeli on laadittu Tekesin ja teollisuusyritysten rahoittaman projektin Koneiden on line -kunnonvalvonnan ja diagnostiikan tehostaminen öljytutkimuksen avulla ("Litkut") pohjalta. Projektiin osallistuneet yritykset olivat ABB Oy, Bronto Skylift Oy, Kalmar Industries Oy, MacGREGOR (FIN) Oy, Metso Drives Oy, Plustech Oy, Rolls-Royce Oy, Sisu Diesel Oy ja Vaisala Oyj. Kirjoittajat kiittävät projektiin osallistuneita tahoja työtä kohtaan osoitetusta mielenkiinnosta sekä taloudellisesta ja teknisestä tuesta.