

Anssi Haltia

METSÄKONEIDEN IOT-DATA HYDRAULIIKAN KUNNONVALVONNASSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Joulukuu 2020

TIIVISTELMÄ

Anssi Haltia: Metsäkoneiden IoT-data hydrauliiikan kunnonvalvonnassa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikka
Joulukuu 2020

Kandidaatintyössä tarkastellaan teolliseen internetiin (engl. Industrial Internet of Things, IIoT) pohjautuvan ennakoivan kunnossapidon toteuttamisen nykyistä tilaa, sekä sen soveltamisen tuomia mahdollisuuksia ja haasteita metsäkoneissa. Kunnossapidon näkökulmasta keskitytään datan keräämiseen ja anturointiin metsäkoneiden hydraulijärjestelmissä, mutta IIoT-pohjaisten ratkaisujen soveltamista tutkitaan myös laajemmin modernien metsäkoneiden toimintaympäristössä Suomessa.

Työn tavoitteena on sekä analysoida että kriittisesti arvioida, millaisia mahdollisuuksia ja ongelmia on ennakoivan kunnossapidon toteuttamisessa metsäkoneissa. Lisäksi pyritään löytämään hydraulijärjestelmien vikaantumislmiöitä ja ratkaisuja niiden mittaamiseen. Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena, mutta soveltuvuuden arvioinnissa hyödynnetään myös työn kirjoittajan omia kokemuksia metsäkonealalta.

Työn tuloksena löydetään tyypillisimpiä hydraulijärjestelmien vikaantumislmiöitä sekä anturointiratkaisuja, joilla vikaantumislmiöiden esiintymisiä voidaan tutkia. Teolliseen internetiin pohjautuvan ennakoivan kunnossapitojärjestelmän toteuttamiseen löydetään useita mahdollisuuksia, mutta työssä pystytään esittämään myös kriittisiä tuloksia järjestelmien kehittämisen rajoitteista. Hydraulijärjestelmän vikaantumiseen liittyy lähes aina hydraulinesteen epäpuhtaus, mutta vian paikantamista varten tarvitaan järjestelmän toiminnallisia mittauksia. Yleisimpiä mitattavia suureita ovat paine, tilavuusvirta ja lämpötila. Ennakoivan kunnossapitojärjestelmän kehittämistä edesauttavat jo olemassa oleva teknologia, kehittyvät tiedonsiirtomahdollisuudet ja ratkaisut kasvavien datamäärien hallitsemiseen. Rajoitteita kehitystyöhön tuovat markkinoiden tarpeet, sekä haastavat ja muuttuvat olosuhteet.

Ennakoivan kunnossapitojärjestelmän käytännön toteutukseen vaadittaisiin paljon enemmän tuntemusta mittausedatan käsittelystä ja hallinnasta. Työn laajuuden puitteissa ei data-analytiikkaa pystytä tarkasti tutkimaan, joten jatkotutkimustarpeena olisi löytää toimivia menetelmiä kerättävän datan analysointiin ja kunnossapidon konkreettiseen toteuttamiseen.

Avainsanat: Ennakoiva kunnossapito, kuntoon perustuva kunnossapito, teollinen internet, metsäkone, hydrauliiikka.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TEOLLINEN INTERNET JA KUNNOSSAPITO	3
2.1 Teollisen internetin käsitteet ja tasot	3
2.1.1 Anturit	4
2.1.2 Datan käsittely ja tiedonsiirto	5
2.1.3 Datan analysointi ja mahdollisuudet	6
2.2 Kunnossapidon lajit	7
2.3 Ennakoiva kunnossapito	9
2.3.1 Datan kerääminen	10
2.3.2 Datan käsittely	10
2.3.3 Dataan pohjautuva päätöksenteko	11
3. HYDRAULIJÄRJESTELMÄN KUNNONVALVONTA	12
3.1 Järjestelmän rakenne ja toiminta	12
3.2 Vikaantumisilmiöt	14
3.3 Mittaus	17
4. METSÄKONEET JA NIIDEN TOIMINTAYMPÄRISTÖ	19
4.1 Koneen rakenne ja toiminta	19
4.2 Käyttäjät ja ympäristö	21
5. SOVELTAMINEN METSÄKONEISIIN	23
5.1 Mahdollisuudet	23
5.2 Ongelmat	25
6. YHTEENVETO	27
LÄHTEET	29

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CAN	Väyläteknologia (engl. controller area network)
CTL	Tavaralajimenetelmä (engl. cut-to-length)
IBC	John Deeren kehittämä älykäs puomin kärkiohjaus (engl. Intelligent boom control)
IIoT	Teollinen internet (engl. Industrial Internet of Things)
IoT	Esineiden internet (engl. Internet of Things)
MEMS	Mikrosysteemi (engl. micro electro-mechanical system)
M2M	Koneiden välinen viestintä (engl. Machine-to-machine)
PHM	Prognostiikka ja elinkaaren hallinta, ei suoraa käännöstä (engl. Prognostics and health management)
RUL	Jäljellä oleva käyttöikä (engl. Remaining useful life)

1. JOHDANTO

Teollinen internet on teollisuuden piirissä nopeasti yleistynyt käsite, johon sisältyy lukuisia mahdollisuuksia ja paljon potentiaalia, jota voidaan hyödyntää lukuisilla sovellusalueilla. Se mahdollistaa fyysisen ja digitaalisen maailman yhdistämisen liittämällä laitteet toisiinsa internetin avulla. (Collin & Saarelainen 2016, s. 29–31) Suurimmat odotukset kohdistuvat teollisen internetin mahdollistamaan ennakoivaan huoltoon ja etäkunnonvalvontaan (Collin & Saarelainen 2016, s. 73).

Teollinen internet mahdollistaa yrityksille suurten datamäärien keräämisen, jonka avulla yritykset voivat arvioida tuotteensa suorituskykyä ja kehitystä, sekä palvella asiakkaita paremmin (Park 2019). Kunnossapidon näkökulmasta suuresta datamäärästä voidaan etsiä erilaisia poikkeamia, joiden perusteella voidaan tehdä päätelmiä laitteiden tilasta, ja sen avulla ennakoita vikaantumistilanteita. Ennakoivan kunnossapidon avulla voidaan pienentää koneiden ylläpitokuluja, tehostaa käyttöä, vapauttaa pääomaa varaosista, pidentää koneiden elinkaarta sekä tunnistaa alisuorittavat laitteet. (Collin & Saarelainen 2016, s. 73–75)

Suuret datamäärät tuovat mukanaan myös ongelmia. Ennakoivaan huoltoon ja etäkunnonvalvontaan on olemassa lukuisia näkemyksiä ja menetelmiä, joita varten tulisi osata valita millaista dataa kannattaa kerätä ja millaista ei. Väärän datan kerääminen voi kuluttaa turhaan resursseja, eikä tuota oikeanlaisia tuloksia. Datan siirtäminen käsiteltäväksi ei aina ole tietoliikenneyhteyksien puolesta mahdollista tai tehokasta, joskus dataa on myös järkevämpää käsitellä paikallisesti. (Tsai, Lai et al. 2014)

Työn tavoitteena on selvittää, millaisia mahdollisuuksia teollisen internetin avulla toteuttavaan kunnossapitoon on olemassa ja miten niitä voidaan soveltaa metsäkonekäyttöön, uusissa ja nykyaikaisissa koneissa. Toimintaympäristön arviointi rajautuu Suomeen. Työssä keskitytään kunnonvalvontaan datan keräämisen, mitattavien suureiden ja anturoinnin näkökulmasta. Kerätyn datan yksityiskohtainen käsittely, prosessointi ja kunnossapitostrategian suunnittelu on rajattu työn ulkopuolelle.

Anturoinnin ja mitattavien suureiden osalta työssä keskitytään tarkemmin metsäkoneiden hydraulijärjestelmään. Kunnossapidon menetelmien soveltamista arvioidaan kuitenkin laajemmin nykyaikaisten metsäkoneiden rakenteen ja toimintaympäristön näkökulmasta.

Työssä toteutetaan katsaus mitä teolliseen internetiin pohjautuva ennakoiva kunnossapito on, sekä pyritään vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- 1) Mitä ilmiöitä ja millaisilla anturointiratkaisuilla voidaan kunnossapidon näkökulmasta hydraulijärjestelmästä mitata?
- 2) Miten ennakoiva kunnossapito soveltuu metsäkonekäyttöön?

Työn ensimmäisessä luvussa luodaan teoreettinen pohja teolliseen internettiin perustuvaan kunnossapitoon. Ensiksi selvitetään, mitä käsitteellä teollinen internet tarkoitetaan ja mitä se pitää sisällään. Tämän jälkeen määritellään kunnossapidon eri alalajeja ja taustaa mitä on ennakoiva ja kuntoon perustuva kunnossapito, sekä mitä niiden toteuttaminen pitää sisällään.

Toisessa teorialuvussa vastataan ensimmäiseen tutkimuskysymykseen eli keskitytään liikkuvien koneiden hydraulijärjestelmiin ja käsitellään niihin liittyviä ilmiöitä kunnonvalvontadatan keräämisen näkökulmasta. Kolmannessa luvussa määritellään tarkemmin metsäkoneet ja niiden toimintaympäristö, jonka pohjalta arvioidaan ennakoivan kunnossapidon toteutusmahdollisuuksia metsäkoneissa. Viimeisessä luvussa kootaan yhteen teoriaosuudessa selvitettyt asiat, sekä sovellettavuuden mahdollisuudet ja ongelmat.

Työ toteutetaan kirjallisuusselvityksenä. Työn loppupuolella hyödynnetään myös kirjoittajan omaa tietoa ja kokemusta metsäkoneista, kun arvioidaan menetelmien sopivuutta metsäkoneiden toimintaympäristöön.

2. TEOLLINEN INTERNET JA KUNNOSSAPITO

Internet of Things (IoT) eli esineiden internet on terminä yleisesti käytetty niin puhekielessä kuin kirjallisuudessakin, mutta sille ei kuitenkaan ole olemassa mitään yksikäsitteistä määritelmää. Usein määrittely riippuu asiayhteydestä ja sovellusalueesta. Myös teollinen internet eli Industrial Internet of Things (IIoT) on kirjallisuudessa usein esiintyvä käsite, joka lukeutuu osaksi esineiden internetiä. (Collin & Saarelainen 2016, s. 29–31; Boyes, Hallaq et al. 2018)

Standardin (SFS-EN 13306 2017) mukaan ennakoiva tai ennustava kunnossapito on yksi kunnossapidon alalajeista. Kunnossapidon käsitteitä ja alalajeja on olemassa paljon, ja ne voidaan jaotella usealla eri tavalla. Käsitteistä myös käytetään keskenään synonyymeja.

Tässä luvussa täsmennetään teollisen internetin ja kunnossapidon käsitteitä ja jaottelua sekä avataan, mitä ne tarkemmin sisältävät. Tämän jälkeen keskitytään tarkemmin ennakoivaan kunnossapitoon.

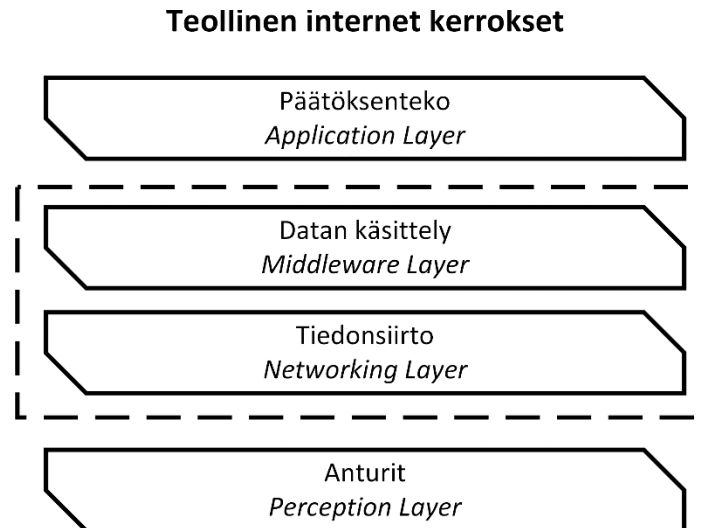
2.1 Teollisen internetin käsitteet ja tasot

Yksinkertaisimmalla tasolla esineiden internet on verkosto toisiinsa liitettyjä esineitä, ja se sisältää niin digitaalisia kuin mekaanisia laitteita. Kaikkien näiden laitteiden välinen kommunikaatio on toteutettu internetin avulla. (Ramgir 2019, s. 2) Verkkoon liitettävät esineet tai asiat voivat siis olla mitä tahansa, mutta kuitenkin kaikille yhteinen ominaisuus on oma yksilöllinen tunnus eli IP-osoite (Collin & Saarelainen 2016, s. 31).

Esineiden internetin (IoT) ja teollisen internetin (IIoT) välinen ero on käsitteellinen, ja teknologia molempien käsitteiden taustalla on pohjimmiltaan sama. Collin ja Saarelainen (2016, s. 31) esittävät, että teollinen internet on yksi esineiden internetin keskeisistä alakäsitteistä. Heidän mukaansa esineiden internet on enemmän yksityisiin kuluttajiin suuntautuva käsite ja teollinen internet on teollisuuden parissa oleva käsite, jonka avulla muodostetaan kokonaisia järjestelmiä ja ekosysteemejä.

Boyes et al. (2018) määrittelevät teollisen internetin olevan järjestelmä, jossa internetiin liitetyt älykkäät objektit ja kyberfyysiset systeemit yhdistettynä informaatioteknologiaan ja mahdolliseen hajautettuun laskentaan mahdollistavat reaaliaikaisen, älykkään ja autonomisen pääsyn, kokoelman, analyysin, kommunikaation ja tuoteinformaation teollisessa ympäristössä, siten että se tuottaa arvoa. Määritelmien pohjalta tämä työ keskittyy teolliseen internetiin, mutta teknologioista puhuttaessa käytetään myös termiä IoT.

Teollisen internetin teknologian voidaan ajatella koostuvan useista kerroksista, joilla jokaisella on oma tehtävänsä verkoston ja data-analyysin rakentumisessa. Eri versioissa kerrokset voivat koostua neljästä, viidestä tai kuudesta eri taosta. (Collin & Saarelainen 2016, s. 142) Tässä työssä jaottelu perustuu kuvan 1 mukaiseen nelitasoiseen malliin, sen avulla luodaan sopiva pohja IoT-pohjaisen kunnossapidon tarkasteluun, mutta ei keskitytä liian tarkasti teknologiaan teollisen internetin taustalla.



Kuva 1. Teollisen internetin nelitasoinen arkkitehtuuri malli, mukailten (Li, Liu et al. 2019).

Kaiken lähtökohdaksi ovat anturit, joiden avulla luodaan pohja IIoT-järjestelmälle eli tuotetaan dataa. Seuraavan kerroksen tehtävänä on yhdistää ja esikäsittää anturien tuottamaa dataa ja mahdollistaa sen siirtäminen verkkoon. Kolmas kerros mahdollistaa laajemman datan käsittelyn ja analyysin. Tässä työssä kolmannen kerroksen käsittely on yhdistetty toisen kerroksen kanssa samaan kappaleeseen. Viimeinen kerros hyödyntää dataa analyysissä, ja sen avulla mahdollistaa lopulta arvon tuottamisen kaikesta datasta. (Ramgir 2019, s. 81–83; Li, Liu et al. 2019)

2.1.1 Anturit

Anturi on laite, joka muuttaa fyysikaalisen ilmiön elektroniseksi signaaliksi (Wilson 2004, s. 1). Antureiden tuottamaa signaalia luetaan ja muutetaan elektroniikan avulla digitaaliseen muotoon eli mittausdataksi. Anturit ovat tärkeä osa rajapintaa fyysisen maailman ja tietokoneiden välillä. (Wilson 2004, s. 1; Wang 2010, s. 3)

Antureita voidaan jaotella usealla tavalla eri ryhmiin, esimerkiksi mitattavan ilmiön perusteella. Signaalinkäsittelyn kannalta anturit jakaa aktiivisiin ja passiivisiin. Aktiivinen anturi vaatii ulkoisen herätteen toimiakseen, passiivinen anturi generoi itse

ulostulosignaalin. (Wilson 2004, s. 16) Tyypillinen anturin ulostulosignaali on pieni virran, jännitteen tai resistanssin muutos, ja sitä täytyy käsitellä sopivilla menetelmillä, jotta signaalin laajempi prosessointi on mahdollista (Wilson 2004, s. 17).

Anturilaite (sensor node) sisältää erilaisia yksiköitä, joiden avulla se muodostaa ulostulonaan elektronisen signaalin. Tyypillinen anturilaite sisältää ainakin seuraavat yksiköt: anturi, kommunikaatio, mikrokontrolleri, muisti ja tehonsyöttö. (Wang 2010, s. 5) Elektrooniikan avulla anturien ulostuloa on mahdollista tarkentaa ja parantaa hyödyntäen erilaisia signaalinkäsittelypiirejä ja ohjelmistoja (Wilson 2004, s. 17; Collin & Saarelainen 2016, s. 155). Kuitenkin perinteisen anturin ulostulosignaali on silti analogisessa muodossa. On myös olemassa anturiyksiköitä, jotka voivat lähettää digitaalisia signaaleita (Wilson 2004, s. 17).

Nykyisin anturiyksiköt ovat siis itsessään pieniä tietokoneita. Modernin anturin päivitys voi tapahtua etäyhteyden avulla, milloin antureilla kerätyn datan laatua voidaan parantaa hyvinkin tehokkaasti muuttamalla anturin asetuksia. (Collin & Saarelainen 2016, s. 155–156)

Hyvä anturin ominaisuuksiin lukeutuu, että se on herkkä mitattavalle ilmiölle, se ei ole herkkä muille ilmiöille, jotka voivat häiritä mittausta, eikä se vaikuta mitattavaan ilmiöön (Wilson 2004, s. 22). Sopivan anturin valitseminen mittauskohteeseen on siis hyvin tapauskohtaista ja tärkeää harkita tarkkaan. Anturit myös vanhenevat ajan saatossa, saatavat sisältää laatueroja tai mittausalgoritmi ei välttämättä toimi oikein mittauskohteeseen. Kaikki nämä voivat aiheuttaa häiriöitä mittausprosessiin, mikä on oleellista tiedostaa, koska koko teollinen internet pohjautuu anturien tuottamaan dataan. (Collin & Saarelainen 2016, s. 156)

Nykyinen anturitekniikan kehitys on mahdollistanut lähestulkoon minkä tahansa ilmiön mittaamisen. Samalla kehitys on laskenut antureiden hintoja, minkä vuoksi anturidatan määrä on lisääntynyt huomattavasti. (Collin & Saarelainen 2016, s. 153) On tärkeää miettiä, mitä kohteita on todella tarpeellista anturoida ja mitkä tuottavat vain turhaa dataa. Erityisesti MEMS-anturit (micro electro-mechanical systems) eli mikrosysteemit ovat mahdollistaneet uusia ratkaisua teollisen internetin datan keräämisessä. Pienen kokonsa, virrankulutuksen ja edullisen hinnan vuoksi niiden käyttäminen on hyvin yleistä. (Collin & Saarelainen 2016, s. 152)

2.1.2 Datan käsittely ja tiedonsiirto

Suuri osa antureiden ulostulosignaaleista on analogisia, tieto täytyy muuttaa digitaaliseen muotoon, jotta sen jatkokäsittely on mahdollista. Anturidatan keräämiseen ja digi-

taaliseen muotoon muuntamiseen tarvitaan oma I/O-tiedonkeruujärjestelmä (data acquisition system). Myös mittausdatan esikäsittely lähellä anturitasoa on tärkeää, koska pelkän analogisen ulostulosignaalin talteen kerääminen tuottaisi valtavat määrät dataa, jonka hallitseminen olisi mahdotonta (Ramgir 2019, s. 82).

Tiedonkeruuyksikkö mahdollistaa anturidatan kokoamisen ja yhdistämisen internettiin sopivalla tiedonsiirtoprotokollalla (Ramgir 2019, s. 82). Tiedonsiirtoprotokollia on olemassa lukuisia ja sopivan valinta perustuu pitkälti käyttökohteeseen (Collin & Saarelainen 2016, s. 164). Tiedonkeruuyksikön tuottama esiprosessoitu mittausdata voidaan sinällään siirtää eteenpäin analysoitavaksi. Usein on kuitenkin järkevää käsitellä dataa vielä enemmän, ennen sen siirtämistä verkon yli datakeskukseen tai pilveen.

Datan paikalliseen käsittelyyn liittyy käsite hajautettu laskenta (edge computing), jolla tarkoitetaan datan käsittelyä mahdollisimman lähellä sen lähdettä. Jos dataa esimerkiksi hyödynnetään paikallisesti saman koneyksilön sisällä, ei sitä kannata siirtää ensin keskitettyyn tietovarastoon ja sieltä takasin koneyksilön käyttöön (Collin & Saarelainen 2016, s. 191). Hajautetun laskennan toteuttamisella voidaan mahdollistaa reaaliaikainen datankäsittely ja säästää verkkoresursseja, mutta samalla arvokasta tietoa saattaa jäädä käyttämättä keskitetysti.

Voidaan ajatella, että kerroksen tehtävä on mahdollistaan datan keskittäminen ja hallinta ylempien kerrosten käytettäväksi. Kerros luo yhteyden antureilta tietovarastoon ja myös mahdollistaa etäyhteys laitetasolle.

2.1.3 Datan analysointi ja mahdollisuudet

Valtavat datamäärät eivät itsessään ole minkään arvoisia ja suurimmat teollisen internetin mahdollisuudet ovat mittausdatan käsittelyssä. Tehokkaalla data-analyysillä voidaan jalostaa hyödyllistä tietoa päätöksenteon tueksi (Martinsuo & Kärri 2017, s. 124).

Analysointi keskitetyssä tietovarastossa ei ole niin nopeaa, mutta datakeskukset ja pilvipalvelut mahdollistavat laskentakapasiteetillaan paljon tarkemman ja laajemman analyysin kuin paikalliset hajautetut ratkaisut (Ramgir 2019, s. 83). Se miten analyysi kannattaa toteuttaa riippuu vahvasti siitä mitä tietoa datasta halutaan ja millaisiin kysymyksiin halutaan löytää vastauksia (Martinsuo & Kärri 2017, s. 124).

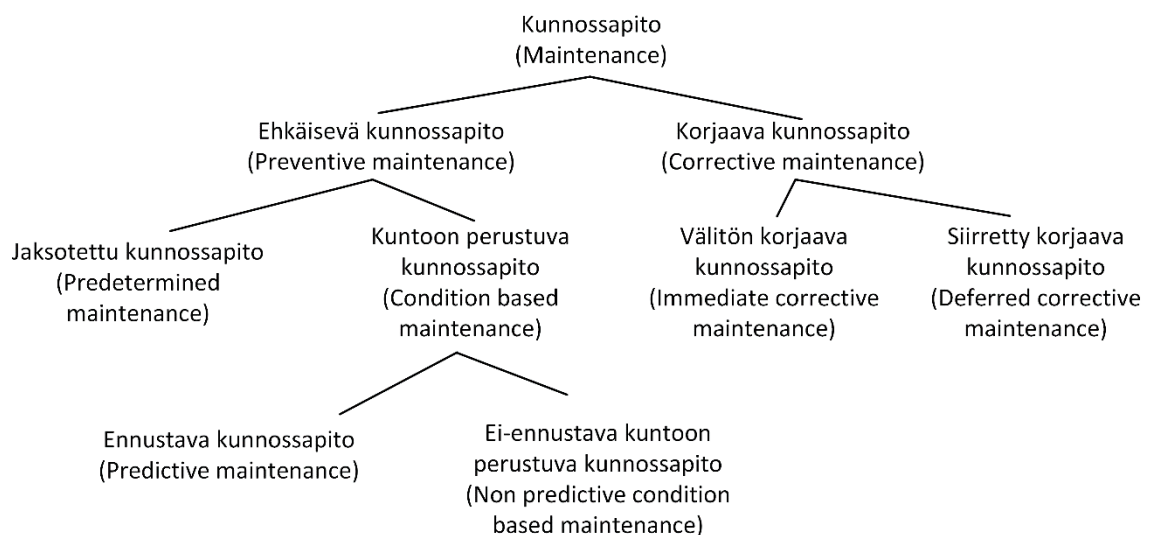
Analytiikka voidaan jakaa eri tasoihin, sen mukaan millaisiin kysymyksiin sen avulla voidaan vastata. Alimmalla tasolla on raportoiva analytiikka, jonka avulla voidaan vastata kysymykseen ”Mitä on tapahtunut?”. Seuraavalla tasolla puhutaan diagnostisesta analytiikasta, jonka avulla voidaan vastata kysymykseen ”Miksi näin on tapahtunut?”. Kolmannella tasolla analytiikka on ennakoivaa ja voidaan vastata kysymykseen ”Mitä tulee

tapautumaan?”. Neljännellä tasolla on päätöksenteko, jonka avulla voidaan pohtia ”Mitä pitäisi tehdä?”. (Martinsuo & Kärri 2017, s. 126–127)

Jatkuva laskentatehon kehitys mahdollistaa yhä tehokkaamman analyysin ja kattavamman datan hyödyntämisen. Koneoppiminen on keskeisessä asemassa etenkin ennakoivan data-analyysin toteuttamisessa, missä sen avulla voidaan löytää datasta erilaisia poikkeamia, jotka voivat olla esimerkiksi tulevan vikaantumisen ensioireita (Collin & Saarelainen 2016, s. 210). Koneoppimisalgoritmit voivat oppia paremmiksi historiadatan perusteella, ne soveltuvat myös hyvin käsittelemään korkeaulotteista (high dimensional) dataa useista lähteistä (König & Helmi 2020). Koska koneoppimisalgoritmit osaavat toimia osittain itsenäisesti ilman ulkopuolista ohjausta, datasta voidaan löytää yllättäviäkin piirteitä.

2.2 Kunnossapidon lajit

Standardi (SFS-EN 13306) määrittelee kunnossapidon seuraavasti ”kaikki kohteen elinjakson aikaiset tekniset, hallinnolliset ja liikkeenjohdolliset toimenpiteet, joiden tarkoituksena on ylläpitää tai palauttaa kohteen toimintakyky sellaiseksi, että kohde pystyy suorittamaan vaaditun toiminnon”. Kunnossapidon toteuttamiseen on olemassa monia eri strategioita, standardissa kunnossapito jaetaan kahteen pääluokkaan, jotka ovat ehkäisevä ja korjaava kunnossapito, ja ne jakautuvat vielä omiin alalajeihinsa. Kuvassa 2 on esitelty standardin mukainen kunnossapitolajien jaottelu, sekä englanninkieliset käsitteet.



Kuva 2. Kunnossapidon lajit, mukailten (SFS-EN 13306).

Korjaavalla kunnossapidolla tarkoitetaan, että kunnossapitotoimet aloitetaan vian ilmaantumisen jälkeen ja niiden tarkoituksena on palauttaa kohde takaisin toimintakuntoon (SFS-EN 13306 2017). Kunnossapito toimenpiteet voivat olla pieniä korjauksia tai osan vaihtoja. Joskus toimenpiteet ovat suuria korjauksia, jotka aiheuttavat pitkiäkin taukoja kohteen käytössä. Vian korjaaminen ei aina vaadi välittömiä toimenpiteitä ja korjausajankohtaa voidaan siirtää sopivaan aikaan. Jos vika vaikuttaa laitteen toimintaan merkittävästi tai estää sen kokonaan, täytyy korjaavat toimenpiteet aloittaa välittömästi. (Ben-Daya, Kumar et al. 2016, s. 139)

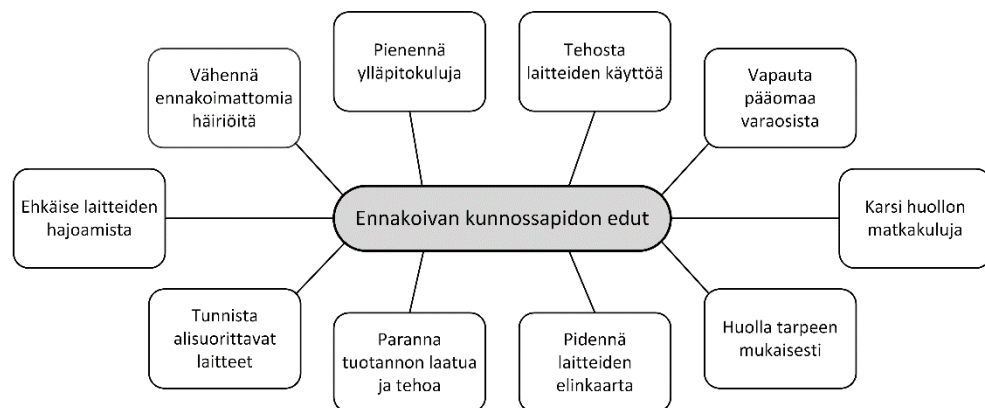
Ehkäisevän kunnossapidon tarkoituksena on arvioida ja vähentää kohteen heikentymistä, sekä vähentää vikaantumisen todennäköisyyttä (SFS-EN 13306). Sen toteuttamiseen on olemassa paljon enemmän lähestymistapoja kuin korjaavaan kunnossapitoon, jonka ajoittaminen ja toteutus määräytyvät selkeämmin laitteen vikaantumisen perusteella. Korjaava kunnossapito on kuitenkin perusteltua, jos kunnossapitoon ei löydy hyviä ennakoivia menetelmiä tai ehkäisevä kunnossapito on kalliimpaa kuin osan uusiminen, ja hajoaminen ei aiheuta turvallisuusriskiä (Ben-Daya, Kumar et al. 2016, s. 140).

Jaksotettu kunnossapito voidaan jakaa käyttöaikaan tai määrään perustuen (SFS-EN 13306). Aikaan perustuen kunnossapitotoimet voidaan ajoittaa tapahtuvaksi tietyn ajanjakson jälkeen, joka voi esimerkiksi olla ajanjakso kalenterista tai laitteen käyttötunnit. Määrään perustuessa laitteen käyttöön täytyy liittyä jokin mittari, esimerkiksi kuinka monesti laitteella on toteutettu jokin toimenpide. (Ben-Daya, Kumar et al. 2016, s. 132–133) Aikaan perustuva jaksotus ei välttämättä vaadi laitteistolta minkäänlaista mittaria, ja voi sen vuoksi olla helpompi toteuttaa. Kaikkien laitteiden käyttö ei kuitenkaan jakaudu tasaisesti ajan suhteen, milloin käyttöön perustuvat mittarit ovat tarpeellisia.

Kuntoon perustuva kunnossapito on standardin (SFS-EN 13306) mukaisesti kohteen fyysisen tilan arviointi ja analysointia, kunnossapitotoimia toteutetaan, kun jokin mitattava parametri ylittää ennalta määritellyn raja-arvon. Joskus kuntoon perustuva kunnossapito on oma alalajinsa korjaavan ja ehkäisevän kunnossapidon rinnalla (Wu, Tian et al. 2013; Niu 2017, s. 4). Tällöin kuitenkin keskitytään enemmän ennakoivaan kunnossapitoon, jossa kohteen fyysisen tilan arviointiin lisätään ennuste, miten kohteen tila tulevaisuudessa tulee kehittymään. Ennakoivaa ja kuntoon perustuvaa kunnossapitoa käsitellään tarkemmin seuraavassa kappaleessa.

2.3 Ennakoiva kunnossapito

Ennakoivalla kunnossapidolla voidaan saavuttaa paljon etuja verrattuna muihin kunnossapito strategioihin, mutta sen toteuttaminen vaatii myös suuria panostuksia ja alkuinvestointeja. Se vaatii myös datan keräämistä pidemmältä aikaväliltä, jotta ennustuksia voidaan luotettavasti tehdä (Collin & Saarelainen 2016, s. 29–31). Ennakoivan kunnossapidon tavoitteena on tunnistaa vikaantumisia ja niiden ensioireita, että niihin ehditään puuttua ennen kuin ne vaikuttavat kohteen toimintaan (Niu 2017, s. 5). Kuvassa 3 on esitetty etuja, joita ennakoivan kunnossapidon avulla voidaan saavuttaa.



Kuva 3. Ennakoivan kunnossapidon edut, mukailten (Collin & Saarelainen 2016, s. 29–31).

Ennakoivan kunnossapidon pohjana on data, siksi kuntoon perustuva kunnossapito (condition based maintenance) sekä kunnonvalvonta (condition monitoring) liittyvät vahvasti sen toteutukseen ja ennakoivaa kunnossapitoa voidaankin pitää näiden laajenuksena (Tran Anh, Dąbrowski et al. 2018). Schwabacher et al. (2007) mukaan ennakoivan kunnossapidon tehtävänä vikaantumisen ensioireiden löytämisen lisäksi arvioidaan jäljellä olevaa aikaa aikaa ennen kuin kohteessa ilmenee vikaa (katso Tran Anh, Dąbrowski et al. 2018).

Jäljellä olevan käyttöiän RUL (remaining useful life) arviointia kutsutaan prognostiikaksi (machine prognostics) ja se on yksi ennakoivan ja kuntoon perustuvan kunnossapidon tärkeimmistä osa-alueista (Lei, Li et al. 2018). Prognostiikkaan liittyy myös kunnossapidon kannalta laajempi strategia, josta käytetään lyhennettä PHM (prognostics and health management) (Niu 2017, s. 10). Suoraa suomenkielistä käännöstä käsitteelle ei löydy, mutta se on kehittynyt useiden kunnossapitostrategioiden yhdistelmänä, tarkoituksenaan yhdistää prognostiikkaa ja kohteen huoltojen suunnittelua ja aikataulutusta.

Ennakoiva kunnossapito ja prognostiikka jaetaan kolmeen tasoon, jotka pitävät sisällään datan keräämisen, datan käsittelyn ja analysoinnin, sekä tuloksiin perustuvan

päätöksenteon (Schmidt & Wang 2016; Niu 2017, s. 49). Teollinen internet tarjoaa erinomaisen totetusalustan ennakoivalle kunnossapidolle. Sen avulla voidaan kunnossapitoa toteuttaa myös suurelle laitekannalle, jolloin ennusteeseen voidaan lisätä samojen kohteiden lisäksi myös samankaltaisia kohteita ja niiden datan perusteella tarkentaa laskentamalleja entisestään (Schmidt & Wang 2016).

2.3.1 Datan kerääminen

Datan kerääminen toteutetaan kohteeseen sopivalla anturoinnilla, tiedonkäsittelyllä ja tallennusvälineillä. Laadukas toteuttaminen vaatii tarkkaa suunnittelua ja kohteen vikaantumismekanismien tuntemista, jotta analyysissä datasta voitaisiin koostaa oikeanlaista tietoa. Tällöin datan tulee olla myös laadullisesti hyvää, jotta se ei johda virheellisiin päätelmiin. (Lei, Li et al. 2018)

Kerätty data voidaan kategorisoida kahteen pääluokkaan, jotka ovat tapahtumadata (event data) ja kunnonvalvontadata (condition monitoring data). Tapahtumadata koostuu tiedosta mitä kohteelle on tapahtunut esimerkiksi hajoaminen tai asennus, ja mitkä seuraukset olivat. Kunnonvalvontadata voi olla hyvin monipuolista esimerkiksi laitteen värinä, öljynlaatu, painetiedot, lämpötila, ilmankosteus tai virrankulutus, yhteistä on, että se kertoo arvokasta tietoa kohteen sisäisestä tilasta ja ulkopuolisista olosuhteista. (Niu 2017, s. 50)

Hyvän datan keräämistä vaikeuttaa se, että luotettavien arvioiden tekemiseen tarvitaan tietoa kohteesta pitkältä aikaväliltä. Siksi datan laadun arvioiminen on hidasta ja voi viedä jopa vuosia ennen kuin tiedetään, saadaanko kerätystä datasta arvokasta tietoa. Hitauden lisäksi datan kerääminen on kallista. Usein laitteita ei myöskään voida käyttää niin että ne hajoaisivat kokonaan, jolloin saataisiin tarkempaa tietoa vikaantumismekanismista. Myös ulkoiset tekijät vaikuttavat datan keräämisen toistettavuuteen. (Lei, Li et al. 2018)

2.3.2 Datan käsittely

Oikein kerätty data sisältää paljon hyödyllistä tietoa kohteen kunnosta, sekä paljon mittaus häiriöitä ja kohinaa (Lei, Li et al. 2018). Kerätyn datan hallinta on pitkälti signaalinkäsittelyä ja sen tarkoituksena on mahdollistaa hyödyllisen tiedon löytäminen ja analyysin tekeminen (Niu 2017, s. 70). Datasta koostetaan erilaisia indikaattoreita eli (health indicator), jotka kertovat kohteen kunnosta ja tilasta (Lei, Li et al. 2018).

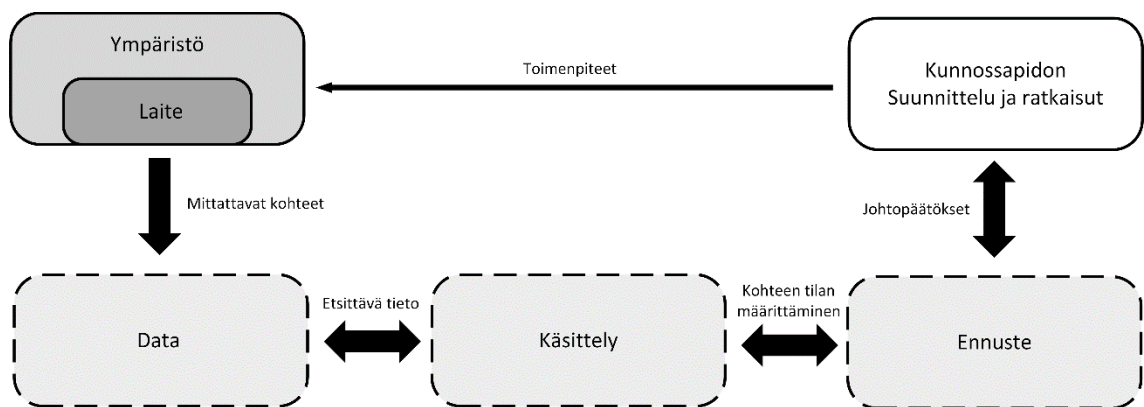
Signaalinkäsittelyn tarkoituksena on poistaa signaalin häiriöitä ja epärelevanttia mittausdataa sekä mahdollistaa piilossa olevan oleellisen tiedon löytäminen (Niu 2017, s. 70). Datasta pyritään löytämään kahdenlaista indikaattoreita: fyysisiä ja virtuaalisia. Fyysinen

indikaattori kertoo kohteen fyysisestä vikaantumisesta ja se voidaan luoda mittausdatasta tilastollisilla menetelmillä. Virtuaaliset indikaattorit kertovat laitteen hajoamisen trendeistä, niitä voidaan luoda yhdistelemällä mittausdataa useammalta anturilta. (Lei, Li et al. 2018)

Indikaattorien avulla voidaan ennustaa kohteen jäljellä olevaa käyttöikää, on kuitenkin tärkeää ymmärtää missä vaiheessa hajoamisprosessia kohde on, jotta osataan valita oikea lähestymistapa RUL-ennusteen laskemiseen. RUL-ennusteen laskentatekniikat voidaan jakaa neljään kategoriaan: fysikaaliseen malliin perustuviin, tilastoon perustuviin, tekoälypohjaisiin ja hybridimalleihin. (Lei, Li et al. 2018) Ennusteiden laskemista ei kuitenkaan tämän työn rajausten puitteissa käsitellä enempää.

2.3.3 Dataan pohjautuva päätöksenteko

Kunnossapidon kannalta tärkeintä on osata ajoittaa kunnossapitotoimet oikeisiin kohteisiin oikea aikaisesti. Oikeaan päätöksen tekoon tarvitaan sekä historia että reaaliaikaista dataa, jota yhdistelemällä voidaan löytää oikeat kunnossapitoratkaisut, joiden tarkoituksen on optimoida kohteen käytön riskit, kustannukset, luotettavuus ja käytettävyys. (Yan 2015, s. 251–252) Kuvassa 4 on esitetty työn mukainen yksinkertainen malli ennakoivan kunnossapidon vaiheista.



Kuva 4. Ennakoiva kunnossapito konseptina.

Datasta luotuihin ennusteisiin liittyy aina epävarmuus, eikä malleista voida koskaan saada täysin varmoja tuloksia, siksi niitä täytyy kehittää jatkuvasti, mikä vaikuttaa myös kerättävään dataan ja sen käsittelyyn. Myös kunnossapidon suunnittelussa tulee huomioida epävarmuudet ja inhimilliset tekijät, sekä ymmärtää mitkä osat ovat kokonaisuuden kannalta tärkeimpiä. Ennusteet ohjaavat kunnossapidon suunnittelua hyvin vahvasti. Tärkeimpänä tekijänä kunnossapitoon liittyvissä päätöksissä on taloudelliset vaikutukset, joiden arvioiminen on haastavaa, koska niihin liittyy aina useita tekijöitä.

3. HYDRAULIJÄRJESTELMÄN KUNNONVALVONTA

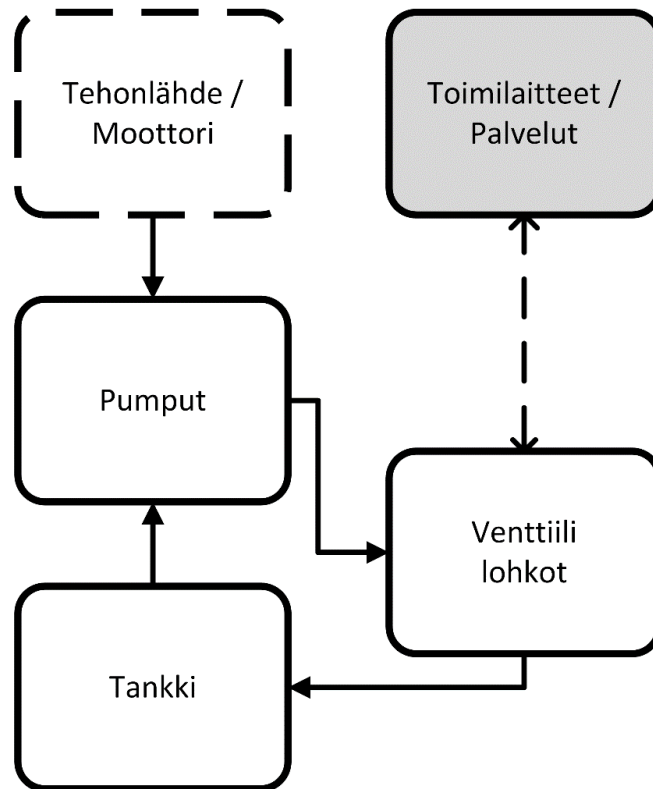
Kaikkia hydraulinesteellä toimivia laitteita voidaan kutsua hydraulijärjestelmän osaksi (Doddannavar & Barnard 2005). Tässä työssä keskitytään mobilehydrauliikkaan, joka käsittelee liikkuvien työkonoiden ja ajoneuvojen hydraulikkajärjestelmiä. Hydraulijärjestelmien rakenne ja toiminta riippuvat paljon käyttökohteesta, kuitenkin jokainen järjestelmä koostuu perusosista, joiden avulla monimutkaisetkin järjestelmätkin voidaan suunnitella ja rakentaa. Mobilehydraulijärjestelmän perusrakenne ja komponentit on tärkeää tuntea, jotta voidaan käsitellä niiden vikaantumista ja vaikutuksia järjestelmään.

Hydraulijärjestelmän vikaantuminen johtuu sen osien kulumisesta, yllättävästä kuormituksesta, väärästä suunnittelusta tai mekaanisesta valmistusvirheestä. Tässä työssä käsitellään järjestelmän kulumisesta ja kuormituksesta johtuvia vikaantumisia. Tyypillisiä vikaantumisolmiöitä ovat tukkiutuneet tai likaiset suodattimet, puutteellinen öljyn syöttö säiliössä, vuotavat tiivisteet, löysällä olevat liittimet ja ilman pääsy järjestelmään, vääränlainen öljy ja korkea öljyn lämpötila tai paine (Doddannavar & Barnard 2005, s. 190).

Hydraulijärjestelmästä voidaan mitata monenlaista tietoa, jonka avulla sitä ohjataan ja tilaa arvioidaan. Mitattavia suureita ovat esimerkiksi paine, virtaus, lämpötila, öljynlaatu, värinä, ääni ja pumpun ja/tai moottorin teho.

3.1 Järjestelmän rakenne ja toiminta

Hydraulinesteen paine ja virtaus ovat järjestelmän toiminnan kannalta oleellisia ominaisuuksia. Nesteeseen syntyy paine, kun tilavuusvirtaa vastustetaan. (Doddannavar & Barnard 2005, s. 16) Hydraulinesteen virtaus luodaan pumpun avulla ja sitä ohjataan erilaisilla venttiileillä toimilaitteiden käyttöön, jotka vastustavat virtausta ja hyödyntävät sen aiheuttamaa painetta toiminnassaan. Kuvassa 5 on esitelty yleisesti työkonissa käytettävän hydraulijärjestelmän perusrakenne.



Kuva 5. Yksinkertaistettu hydraulijärjestelmän rakenne, mukailten (Ng, Harding et al. 2017).

Pumpun tuottama tilavuusvirta on järjestelmän toiminnan mahdollistaja, ja sen tehtävänä on muuttaa mekaaninen energia hydrauliseksi energiaksi. Hydraulipumppuja on olemassa lukuisia erilaisia, niiden toimintaan kuitenkin liittyy aina tehonlähde, jonka avulla pumppua pyöritetään. Tehonlähde on kuitenkin pumpusta erillinen kokonaisuus. On tärkeää ymmärtää, että pumppu luo hydraulineesteeseen virtausta, ei painetta. Järjestelmän paine syntyy vasta, kun virtausta vastustetaan. (Doddannavar & Barnard 2005, s. 39–40) Hydraulipumpun suorituskyvyn kannalta sen pitämä ääni on merkityksellinen ja voi kertoa pumpun kulumisesta tai kavitoimisesta (Doddannavar & Barnard 2005, s. 63–64).

Toimilaitteet vastaavat järjestelmän ulkoisten toimintojen toteuttamisesta, ja koko hydrauliiikan olemassaolon tehtävänä on mahdollistaa toimilaitteiden toiminta. Yleisiä toimilaitteita ovat moottorit ja sylinterit. Hydraulimoottorin tehtävänä on muuttaa hydraulineesteen energia takaisin pyörimisliikkeen mekaaniseksi energiaksi ja se sopiikin hyvin käytettäväksi esimerkiksi hydrostaattisissa vaihteistoissa. Sylinterin taas muuttaa hydraulineesteen energian lineaariliikkeeksi. Toimilaitteiden suorituskykyä haittaa niiden sisäiset vuodot sekä ulkoisen kuormituksen aiheuttamat rasitukset, erityisesti, jos ulkoinen kuormitus kohdistuu toimilaitteeseen suunnittelun vastaisella tavalla. (Doddannavar & Barnard 2005, s. 69–92)

Hydraulinesteen virtausta toimilaitteille ohjataan pääasiassa venttiilien avulla, venttiilit myös suojaavat järjestelmää esimerkiksi ylipaineelta. Hydraulijärjestelmässä on kolmenlaisia venttiileitä, joilla vaikutetaan virtauksen suuntaan, paineeseen tai tilavuusvirtaan. Venttiilejä voidaan ohjata käsivivulla, painonapeilla, solenoideilla, jousilla, hydraulisella paineella tai näiden yhdistelmällä. (Doddannavar & Barnard 2005, s. 93–96) Venttiililohkojen avulla voidaan vähentää ulkoisten liitosten määrää yhdistämällä yhteiset linjat yhteen lohkon sisällä, ne ovat järjestelmän luotettavassa toiminnassa keskeisessä asemassa, sillä ulkoiset liitokset ovat potentiaalisia vikaantumiskohteita (Doddannavar & Barnard 2005, s. 130–131).

Hydraulinestettä voidaan pitää järjestelmän tärkeimpänä komponenttina, se toimii energian siirtämisessä, voiteluaineena, lämmönsiirron väliaineena ja tiivisteinä (Doddannavar & Barnard 2005, s. 167). Hydraulinesteen valinnalla on vaikutuksia järjestelmän käyttöikään, käytettävyyteen ja luotettavuuteen, koska niiden ominaisuudet poikkeavat toisistaan. Ei ole olemassa täydellistä hydraulinestettä, vaan valinta täytyy tehdä aina käyttökohteen mukaisesti (Doddannavar & Barnard 2005, s. 190).

Hydraulinesteen epäpuhtauksien eli kontaminaatioiden vähentämiseen käytetään suodattimia. Suodattimien avulla voidaan poistaa hydraulinesteeseen liukenemattomia kontaminaatioita, ne kykenevät poistamaan jopa yhden mikrometrin kokoisia hiukkasia hydraulinesteen seasta. Suodattimet ovat tarkoitettu uusittaviksi ja ne ovat järjestelmässä helposti vaihdettavia osia. (Doddannavar & Barnard 2005, s. 136–137)

Hydraulineste kiertää järjestelmässä pumpun, ohjausjärjestelmän, toimilaitteiden ja suodattimen kautta tankkiin, missä se on varastoituna ja jäähtyy. Tankissa hydraulinesteen sisältämät partikkelit ja vesi laskeutuvat pohjalle. Hydraulinesteen joukossa olevan ilman täytyy päästä haihtumaan huohottimen kautta. Tankin koko määräytyy sen mukaisesti, miten hydraulijärjestelmä minimissään tai maksimissaan tarvitsee öljyä eri toiminnoissaan, tilavuudessa täytyy myös huomioida nesteen mahdollinen kulumisen vuotojen kautta. (Doddannavar & Barnard 2005, s. 132–133) Mobilehydrauliikassa tankin koko on kuitenkin rajallinen ja joskus sen lämmönsiirtokyky ei ole riittävä, jolloin tarvitaan erillinen öljyn jäähdytysjärjestelmä.

3.2 Vikaantumisilmiöt

Merkittävä osa hydraulijärjestelmien vikaantumisista ja häiriöistä johtuu vääränlaisen tai epäpuhtaan hydraulinesteen käytöstä. Tutkimukset osoittavat, että jopa 70–90% hydraulijärjestelmän vikaantumisista johtuu hydraulinesteen kontaminaatioista (Ng, Harding et al. 2017). Hydraulinesteen kontaminaatiot voivat olla likaa, vettä, ilmaa tai kulumisesta

syntyvää roskaa. Järjestelmään syntyy jatkuvasti kontaminaatioita, niin sisäisten kuin ulkoistenkin tekijöiden toimesta. Kontaminaatioiden hallinta on toiminnan kannalta tärkeää. (Hunt & Vaughan 1996, s. 357)

Järjestelmään voi jäädä sisälle roskaa asennus ja testausvaiheessa, näiden määrää voidaan vähentää asennusprosessin tarkkuudella. Ympäristöstä likaa järjestelmään voi päästä huoltotöiden yhteydessä tai vuotavien tiivisteiden kautta. Monesti likaa kulkeutuu järjestelmään esimerkiksi hydraulinesteen lisäyksen yhteydessä, myös sylinterien tiivisteiden kautta lian ja veden kulkeutuminen on mahdollista, koska ne monesti altistuvat suurelle määrälle epäpuhtauksia toiminnassaan. (Ng, Harding et al. 2017) Sisäisesti järjestelmään syntyy partikkeleita kulumisen yhteydessä, sitä ei voida estää, mutta esimerkiksi operointilämpötila saattaa nopeuttaa kulumista huomattavasti (Hunt & Vaughan 1996, s. 357).

Normaaleissa olosuhteissa hydraulinesteen kontaminaatioiden konsentraatio pysyy vakiona ja partikkeleiden koko on välillä 10–20 µm. Kun tavallisesta poikkeavaa kulumista esiintyy, partikkelien konsentraatio nesteeseen kasvaa ja partikkeleiden koko on tyyppillisesti välillä 50–100 µm. (Zeng, Yu et al. 2018) Kulumisesta kertovat myös partikkelien materiaali, kupari ja rauta ovat komponenteissa yleisimmin käytettyjä materiaaleja ja niiden kasvava konsentraatio kertoo epätavallisesta kulumisesta (Ng, Harding et al. 2017).

Kaasukuplat hydraulinesteen joukossa voi olla erittäin haitallista järjestelmän toiminnalle ja ne voivat aiheuttaa suurtakin vahinkoa. Kaasua nesteeseen joukkoon voi päätyä ilmatasukuista virtaavan nesteeseen mukana tai nesteeseen paineen laskiessa alle sen höyrystymispaineen. Hydraulinesteen höyrystymistä ja sen aiheuttamia ongelmia kutsutaan kavitaatioksi. Ongelmat aiheutuvat, kun höyrystymisen takia syntyneet kaasukuplat romahtavat korkeassa paineessa ja iskeytyvät erittäin suurella nopeudella nestettä ympäröiviin metallipintoihin. Kaasukuplien romahtaminen aiheuttaa metallipinnan eroosiota ja kuluttaa sitä nopeasti, milloin pinnasta irtoavat partikkelit siirtyvät hydraulinesteen joukkoon. (Doddannavar & Barnard 2005, s. 191–192)

Kavitaatio on ongelma erityisesti pumppujen toiminnassa, mutta mahdollista myös muissa komponenteissa. Pumpun tapauksessa alhainen paine voi syntyä, kun pumppu imee hydraulinestettä säiliöstä, mutta myös pumpun akselin tai imulinjan vuotava tiiviste voi päästää ilmaa järjestelmään. Myös tankin huohottimen tukkiutuminen aiheuttaa ilman päättymistä pumpun imulinjaan. (Doddannavar & Barnard 2005, s. 192) Kaikki vuotavat tiivisteet voivat mahdollistaa ilman pääsyn järjestelmään, ulkoiset vuodot myös vähentävät hydraulinesteen määrää järjestelmässä, joka voi lopulta johtaa ongelmiin pumpun imulinjan öljynsaannissa ja aiheuttaa kavitaatiota.

Partikkelit järjestelmässä altistavat komponentteja lisää kulumiselle hankaamalla pintojen välissä ja vähentämällä voitelua. Tyypillinen esimerkki on hydraulisynterinin männän ja putken välisen tiivisteiden naarmuuntuminen, mikä altistaa synterinin sisäisille vuotoille, hidastaa synterinin liikettä ja vähentää sen tuottamaa voimaa. Synterinin ulkoiset vuodot ovat vielä yleisempiä, niiden vuoksi öljy vuotaa männänvartta pitkin ympäristöön. (Doddannavar & Barnard 2005, s. 191; Isermann 2011, s. 111). Vuotojen vuoksi synteri ei säilytä asemaansa ohjauksen loppumisen jälkeen, mikä altistaa vaaratilanteille ja hankaloittaa syntereiden aseman hallintaa ja ohjaamista. Myös hydraulisynterissä voi tapahtua kavitaatiota, jos paine laskee esimerkiksi kuormitustilanteen vuoksi riittävän alhaiseksi.

Venttiilien kulumisen johtuu suurimmilta osin likapartikkeleiden vaikutuksesta, ja virratessaan venttiilin läpi ne kuluttavat sen rakennetta, jolloin ohivuodot lisääntyvät ja ohjauksen tarkkuus kärsii. Likapartikkelit saattavat myös estää venttiilin liikkumisen ja esimerkiksi sulkeutumisen tai täysin aukeamisen. (Isermann 2011, s. 110) Venttiilien vääränlaista toimintaa voidaan kompensoida ohjauksen avulla, mutta suurissa määrin vuodot hankaloittavat laitteiston toimintaa.

Hydraulinesteen lämpötila nousee, koska mikään laite ei voi hyödyntää kaikkea hydraulinesteen energiaa toiminnassaan ja osa siitä muuttuu lämmöksi. Merkittäviä lämmönlähteitä ovat pumput, paineen alennusventtiilit ja virtauksen kuristimet. (Esposito 1980, s. 411) Liian korkea lämpötila kertoo huonosta hyötysuhteesta, mutta se myös alentaa hydraulinesteen viskositeettiä ja lisää tiivisteiden vuotoja, sekä heikentää voitelukykyä ja lisää tarkkasovitteisten komponenttien kulumista. Mobilehydrauliikassa myös liian matala lämpötila on mahdollista, koska laitteet operoivat muuttuvissa olosuhteissa. Liian kylmän hydraulinesteen viskositeetti on suuri ja voi altistaa esimerkiksi kavitaatiolle. Järjestelmän lämmöntuotto kuitenkin on yleensä vähintäänkin riittävä, eikä erillistä öljynlämmintä tarvita. (Hunt & Vaughan 1996, s. 325)

Erilaiset kuormitustilanteet voivat aiheuttaa ennalta arvaamatonta käytöstä hydraulijärjestelmässä. Erilaisia paineiskuja voi esiintyä etenkin mobiilihydrauliikan sovelluksissa, paineiskut johtuvat nopeista virtauksen muutoksista. Paineiskuja voivat aiheuttaa venttiilien ja pumpun lisäksi mekaaninen värähtely tai toimilaitteen nopea pysäyttäminen. Suuret paineiskut voivat vahingoittaa komponentteja järjestelmässä. (Doddannavar & Barnard 2005, s. 154; Lindák, Majdan et al. 2014) Yllättävien paineiskujen aiheuttamia tuhoja ei voida ennakoinnilla estää, mutta niiden esiintymisiä järjestelmässä voidaan tarkkailla ja sen perusteella tehdä johtopäätöksiä.

3.3 Mittaus

Hydraulinesteen puhtaus on merkittävässä osassa järjestelmän luotettavassa toiminnassa. Kontaminaatioiden mittausta voidaan toteuttaa monella tapaa, tarkimmat mittaus tulokset saavutetaan laboratorio olosuhteissa (Ng, Harding et al. 2017). Laboratoriomittaukset eivät sovellu ennakoivaan kunnossapitoon, koska niitä ei voida suorittaa automaattisesti eikä riittävän tiheästi.

Hydraulijärjestelmään voidaan asentaa kiinteästi erilaisia partikkelien määrää mittaavia antureita, jotka mittaavat hydraulinesteen kontaminaatioita jatkuvasti järjestelmän operoidessa. Puhutaan in-line mittauksista, jotka perustuvat optiseen, induktiiviseen, ultraääniseen tai kapasitiiviseen mittausmetodiin. Tällaiset anturit voivat mitata partikkeleiden määriä, mutta niillä on vaikea erotella partikkelien ominaisuuksia (Zeng, Yu et al. 2018). Täten mobilehydrauliikan öljyn kunnonvalvontaan ei ole olemassa täydellistä anturointi-ratkaisua ja eri vaihtoehdot sopivat eri käyttötapauksiin. Ainakin mittauksiin tarvitaan useampaa anturia, jotta saadaan kaikki tarvittava tieto. Myös anturin sijoittelulla järjestelmässä on merkitystä.

Öljyn kontaminaatioiden mittauksella saadaan tietoa koko järjestelmän kunnosta, ja voidaan löytää hälyttäviä merkkejä hajoamisesta. Se ei kuitenkaan kerro, mistä kontaminaatiot ovat lähtöisin, eikä sen avulla välttämättä voida paikantaa mikä komponentti on hajoamassa. Komponenttien kuntoa voidaan valvoa järjestelmän toiminnallisilla parametreillä, joiden perusteella voidaan johtaa ja päätellä erilaisia tietoja.

Paine ja tilavuusvirta ovat paljon, yleisesti ja pitkään mitattuja suureita hydraulijärjestelmässä. Ne ovat järjestelmän toiminnalle oleellisia suureita, joten niiden käytöksestä voidaan päätellä paljon järjestelmän kunnosta. (Esposito 1980, s. 413–414) Paine- ja tilavuusvirta-antureita on ollut pitkään saatavilla, joten niiden käyttö järjestelmien tutkimuksessa on vakiintunutta, myös niiden hinnat ovat edullisia. Kolmas yleinen ja helposti järjestelmästä mitattava suure on lämpötila (Esposito 1980, s. 413).

Paineen mittauksessa voidaan mitata kolmea eri tietoa; Paine-eroa kahden paikan välillä järjestelmässä, painetta järjestelmän ja ympäröivän ilmakehän välillä tai absoluuttista painetta järjestelmässä (Hunt & Vaughan 1996, s. 471). Paineen mittauksella voidaan löytää indikaattoreita vuodoista ja viallisista komponenteista, myös liialliset paineenlaskut putkistoissa tai liian korkeat paineet voidaan tunnistaa (Esposito 1980, s. 414).

Esimerkiksi hydraulimoottorin hyötysuhdetta voidaan tarkkailla mittaamalla sen pyörimisnopeutta ja paine-eroa moottorin yli. Myös pumpun ja viallisen virtaus- tai paineenalen-

nusventtiilin viat voidaan tunnistaa painekäytöksestä (Esposito 1980, s. 414). Paineikäyt-
tämisen muutokset pidemmällä aikavälillä antavat hyödyllistä informaatiota laitteen
kulumisesta.

Virtauksen mittauksella tiedetään tuottaako pumppu järjestelmään pyydettyä virtausta,
sekä miten sen ohjaaminen oikeisiin paikkoihin onnistuu (Esposito 1980, s. 414). Myös
vuoto-, ohjaus- ja paluulinjojen virtauksia voidaan mitata. Virtauksen mittauksella saa-
daan erityisesti tietoa pumpun ja venttiilien toiminnasta, sen perusteella voidaan myös
laskea esimerkiksi moottorien ja pumppujen volymetrisiä hyötysuhteita.

Lämpötilan mittauksia voidaan toteuttaa kaikkialla järjestelmän osissa. Sen avulla voi-
daan tunnistaa, jos öljyn jäähdytysjärjestelmä on viallinen ja tankissa oleva öljy lämpe-
nee liikaa. Myös järjestelmän ylikuormitus ja tukokset tuottava lämpöä järjestelmään.
(Doddannavar & Barnard 2005, s. 199) Lämpötilamittauksissa on tärkeää ottaa huomi-
oon myös ympäristön lämpötila, koska se vaikuttaa lämmön siirtymiseen ja komponent-
tien toimintaan, etenkin ennen järjestelmän kunnollista lämpenemistä käynnistyksen jäl-
keen.

Etenkin pyörivien laitteiden kunnonvalvonnassa värähtelydata on olennaisessa roolissa,
sen vuoksi pumpun kunnonvalvonnassa värähtelydata on oleellista tietoa (Rivera,
Scholz et al. 2018). Värähtelydatan perusteella voidaan päätellä pumpun akselin olevan
epätasapainossa tai tunnistaa oudon painekäytöksen aiheuttamaa tärinää. Pumpun ka-
vitoinnin voi tunnistaa tärinästä, mutta sen tunnistamiseen voidaan myös hyödyntää ää-
nen mittausta, sillä pumpun nopeasti rikkova kavitaatio voidaan kuulla myös pumpun
äänestä (Doddannavar & Barnard 2005, s. 198).

Nykyaikaisessa mobiilihydrauliikassa venttiilien ohjaukset on toteutettu sähköisesti, joten
sähköisiä ohjauksia kannattaa mitata. Yhdistelemällä tätä tietoa järjestelmän vasteisiin
tiedetään kuinka tarkasti järjestelmä reagoi käyttäjän antamiin pyyntöihin. Esimerkiksi
kulumisen takia venttiilien heikentynyt toiminta voi paljastua, sillä että venttiilin tarvitsema
ohjausvirta on suurempi. (Raduenz, Mendoza et al. 2018) Myös sylinterin liikkeen toteut-
tamiseen kuluva aika voi paljastaa vikoja järjestelmässä, ajan mittaaminen ei myöskään
tarvitse erillistä anturia vaan ohjainlaite voi laskea sitä.

4. METSÄKONEET JA NIIDEN TOIMINTAYMPÄRISTÖ

Metsäkoneet ovat laajoja ja moderneja konejärjestelmiä, joiden toimintaympäristöt ja olosuhteet vaihtelevat laajasti niin maantieteellisen sijainnin kuin ilmaston ja vuodenajan puolestakin (Uusitalo & Pearson 2010). Jotta kunnossapitomenetelmien soveltuvuutta voidaan tarkastella metsäkonekäyttöön, täytyy määrittellä millaisia laitteita metsäkoneet ovat ja millaisessa ympäristössä ne toimivat.

Nykyisten käytössä olevien metsäkoneiden ikä ja ominaisuudet vaihtelevat paljon. Tässä työssä keskitytään suurimmalta osin moderneihin koneisiin, joissa tietokoneet, digitalisaatio ja anturointi ovat suuressa roolissa. Metsäkoneiden tarkastelu rajautuu pohjoismaista tavaralajimenetelmä eli CTL (cut-to-length) metodia hyödyntäviin koneisiin. Kuvassa 6 on John Deeren valmistama CTL-metodia hyödyntävä kuormakone.



Kuva 6. John Deere 1910G kuormatraktori. (John Deere 2020a)

4.1 Koneen rakenne ja toiminta

Metsäkoneet ovat itseliikkuvia työkoneita, joiden tehonlähteenä toimii käytännössä aina dieselmoottori. CTL metodia hyödyntävissä harvesteri- ja kuormakoneissa runko jaetaan kahteen osaan, etu- ja takarunkoon, joiden avulla konetta ohjataan ja liikutetaan metsässä. Harvesteri ja kuormakoneiden käyttötarkoitus eroaa toisistaan keskenään, mutta rungoltaan ne ovat yhtenäisiä 6 tai 8 pyöräisiä laitteita. Rakenteessa yhtenäistä on myös aina hydrauliiikan avulla toimiva nostopuomi. (Uusitalo & Pearson 2010, s. 149–190)

Harvesteri ja kuormakoneet liikkuminen maastossa on nykyisin toteutettu hydrostaattisella voimansiirtojärjestelmällä, jossa moottorin mekaaninen energia muutetaan ensin pumpulla öljyn virtaukseksi ja siirretään letkujen avulla käyttökohteeseen,

jossa se hydraulisen ajomoottorin avulla muutetaan takaisin mekaaniseksi energiaksi. Järjestelmä on yhdistelmä mekaanisen ja hydrostaattisen voimansiirron parhaita puolia. Etuina ovat helpompi huollettavuus, pidempi käyttöikä ja portaaton tehonsiirto, minkä avulla voidaan optimoida dieselmoottorin toimintaa työsyklin mukaisesti. Järjestelmän avulla mahdollistetaan myös rungon hieman vapaampi rakenne, koska voimansiirto ei rajaudu moottorin sijoittelun mukaisesti. (Uusitalo & Pearson 2010, s. 153–156)

Harvesterin tehtävänä on kaataa, karsia ja katkaista puutavara metsässä sopivaan mitaan. Harvesterin puomi on varustettu harvesteripäällä, joka kykenee suorittamaan kaikki vaaditut toiminnot. (Uusitalo & Pearson 2010, s. 85) Harvesteripään ohjaus ja mittaus- tekniikka on nykyisin pitkälti automatisoitua ja mahdollistaa hyvän tarkkuuden ja datan keräämisten korjatusta puusta sekä harvesteripään toiminnasta (Uusitalo & Pearson 2010, s. 179–190). Harvesterin työsyklissä koneen ei tarvitse koko ajan liikkua vaan puomia käytetään myös koneen ollessa paikallaan maastossa.

Kuormakoneen tehtävänä on kerätä ja kuljettaa harvesterin hakkaama puutavara metsästä tien varteen, josta se voidaan edelleen kuljettaa jatkojalostettavaksi. Kuormakone on puun kuljettamista varten varustettu kuormatilalla, ja nosturissa on koura puutavaran kyytiin keräämiseksi. Kuormakoneen työsyklissä sen tulee liikkua harvesteria enemmän ja kuljettaa raskaampia kuormia.

Metsäkoneen puomi on koneen käytön kannalta ehkä tärkeimpiä laitteita, sillä se mahdollistaa puutavaran käsittelyn ja liikuttamiseen. Nosturin liikkeet toteutetaan hydraulisyntereiden avulla, jotka liikuttavat puomin niveliä, ja joita kuljettaja ohjaa (Uusitalo & Pearson 2010, s. 161–163). Kuljettaja vaikuttaa ohjausvivuilla, joko suoraan sylintereiden pituuksiin tai tietokoneen välityksellä, jolloin tietokone laskee sylinterien liikkeitä kuljettajan ohjatessa nosturin pään asemaa. Nykyisin tietokoneiden avulla nosturin liikkeitä voidaan tasoittaa, mikä pidentää sen käyttöikä ja lisää käyttömukavuutta. Esimerkiksi metsäkonevalmistaja John Deere on kehittänyt oman IBC (intelligent boom control) järjestelmän, jonka avulla kuljettaja voi keskittyä puomin pään ohjaamiseen nivelten asentojen sijasta. Järjestelmä myös osaa vaimentaa sylintereiden liikettä päätyasennossa, mikä vähentää puomin kulumista ja teräviä liikkeitä (John Deere 2020b).

Hydrauliikka on siis keskeisessä asemassa koneen ja puiden liikuttamisessa ja sen toiminta on koneen käytön kannalta kriittistä. Tärkeimpiä komponentteja ovat hydraulipumput, toimilaitteiden ohjausventtiilit sekä sylinterit ja moottorit.

Metsäkoneen tietojärjestelmät voidaan jakaa kahteen osaan: koneen sekä puunhankinnan ohjausjärjestelmään. Molemmissa järjestelmissä keskeisessä asemassa ovat tietokone ja useat kontrollerit, jotka toimivat yhdessä lukuisten antureiden tuottaman datan

kanssa. Metsäkoneen ohjausjärjestelmä ohjaa koneen liikkeitä kuljettajan käskyjen mukaan, se hyödyntää anturidataa ohjauksen ja koneen tilan seurannassa. Puunhankinnan ohjausjärjestelmä kerää ja yhdistää hakattujen puiden tiedot puunkorjuuyhtiön logistiikan ja tuotannon ohjausjärjestelmään. (Uusitalo & Pearson 2010, s. 174)

Tietokoneiden, antureiden ja kontrollereiden välinen tietoliikenne koneen sisällä on toteutettu jollakin tiedonsiirtoväylällä. Yleisin käytössä oleva väylä on CAN (controller area network) (Uusitalo & Pearson 2010, s. 179) Nykyisin CAN verkon tiedonsiirtokyky on tullut tiensä päähän, ja siirrettävät datamäärät sekä väylän nopeusvaatimukset kasvavat jatkuvasti. Yleisesti ajoneuvoteollisuudessa, kuin myös metsäkoneissa ollaan siirtymässä tai on siirrytty uusiin väyläteknologioihin, jotka mahdollistavat suurempien datamäärien siirtämisen tehokkaasti. (Kraus, Leitgeb et al. 2016)

Aikaisemmin koneiden anturoinnissa toteutettiin vain toiminnan kannalta tarpeellinen mittaaminen. Nykyisin anturitekniikan kehitys on mahdollistanut antureiden määrän kasvun, myös mittadatan ja anturien hallinta on helpottunut. Tämän vuoksi koneet sisältävät paljon antureita, eikä teknologia ole enää pullonkaulana anturimäärän kasvattamisessa.

Nykyaikaiset metsäkoneet ovat yhdistettynä internettiin mobiiliverkon avulla. Koneen omistaja ja käyttäjä saa tietoa metsäkoneen tilasta ja toiminnasta. Suurin internettiä hyödyntävä ominaisuus on kuitenkin harvesterin, ajokoneen ja puunkorjuuyhtiön välinen kommunikaatio ja raportointi. Tämä näkyy esimerkiksi Ponsen ja John Deeren metsäkone esitteistä. (Ponsse 2020b; John Deere 2020c)

4.2 Käyttäjät ja ympäristö

Metsäkoneet tuottavat arvoa, kun ne operoivat, eli käsittelevät ja kuljettavat puuta työympäristössään eli metsässä. Työolosuhteisiin vaikuttavat maantieteellinen sijainti, ilmasto, maaston ominaisuudet ja puuston rakenne (Uusitalo & Pearson 2010, s. 19). Eri työmaiden välillä metsäkoneita siirretään lavetin avulla. Puuston rakenne ei vaikuta suuresti koneen toimintaan, ja sillä on merkitystä, kun tarkastellaan koneen tuottavuutta.

Työn kannalta maantieteellisen sijainnin kannalta merkityksellisintä on korkeus merenpinnasta, joka saattaa vaikuttaa esimerkiksi koneen moottorin toimintaan. Muita vaikutuksia ovat vuodenaikojen vaihtelu ja päivänvalon pituus. (Uusitalo & Pearson 2010, s. 19)

Ilmastolliset tekijät vaikuttavat koneen toimintaympäristössä lämpötilaan, sekä ilman ja maaperän kosteuteen. Lämpötilavaihtelu saattaa esimerkiksi suomessa olla hyvin merkittävää ja vuorokaudenkin sisällä lämpötilat voivat muuttua useita kymmeniä asteita.

Sateet vaikuttavat työympäristön kosteuteen ja metsäkoneiden toimintaan, kostea maaperä tekee koneellisesta puunkorjuusta hankalaa ja joskus jopa estää sen. (Uusitalo & Pearson 2010, s. 20–21) Lämpötilan ja ilmankosteuden vaihtelu asettaa myös tiukat vaatimukset koneen eri komponenteille ja niiden yhteisvaikutus saattaa altistaa vikaantumiselle, etenkin sähköosissa, kuten antureissa.

Maaston ominaisuudet vaikuttavat koneen hallintaan ja käytettävyyteen. Maastoluokituksessa ominaisuudet voidaan jakaa kolmeen luokkaan: maaperän koostumus ja rakenne, maaston pintarakenne ja kaltevuus. (Uusitalo & Pearson 2010, s. 22)

Maaperän koostumus määrittelee sen kantavuuden, joka taas kertoo, kuinka hyvin koneella voidaan liikkua maastossa ilman että se uppoaa. Hienojakoinen maaperä on kosteana heikosti kantavaa, kuitenkin talvi ja pakkasen muuttavat luonnetta niin, että kantavuus paranee. Talvella maaperää peittää myös mahdollinen lumipeite. Lumikerros suojaa maaperää vaurioilta, mutta kuormittaa metsäkoneita ja kuljettajaa enemmän, koska siinä liikkuminen on vaikeampaa ja näkyvyys heikompaa. (Uusitalo & Pearson 2010, s. 22–24)

Maaston pintarakenteisiin lukeutuvat kivet, kannot, notkot ja ojat, ne kaikki vaikuttavat työskentelyn tehokkuuteen ja mukavuuteen (Uusitalo & Pearson 2010, s. 25). Kaikkien esteiden ylittäminen aiheuttaa koneeseen suuriakin kiihtyvyyksiä ja värähtelyä, jotka voivat olla merkityksellisiä rakenteen toiminnan ja kestävyuden kannalta. Kaltevuus taas vaikuttaa koneen pystyssä pysymiseen ja määrittelee siten, millaisissa ympäristöissä koneella voidaan työskennellä, yleisesti rajana pidetään 30 % kaltevuutta rinteessä (Uusitalo & Pearson 2010).

Monissa kehittyneissä maissa puunkorjuu on toteutettu pitkälti yksityisyrittäjien toimesta, tyyppillisesti koneyrittäjillä omistaa yksi tai kaksi koneketjua. Koneketjulla tarkoitetaan yhtä harvesteria ja yhtä kuormakoneita, jotka toimivat yhdessä samalla työmaalla. Metsäteollisuus on yrittänyt ajaa puunkorjuuta malliin, missä yrittäjä hoitaa sekä hakkuun että lähikuljetuksen on Suomessa edelleen paljon yrittäjiä, jotka omistavat vain yhden koneen. (Uusitalo & Pearson 2010, s. 111–112)

Koneen hankinta on suuri yksittäinen investointi ja siksi koneen tuottavuus ja luotettava toiminta on tärkeää. Koneilla operoidaan kahdessa vuorossa ympäri vuoden, eli koneen käyttöaste on korkea. Yksi koneketju työllistää siis yleensä 4 työntekijää kahdessa vuorossa. Koneiden käyttöastetta alentavia tekijöitä ovat huollot ja korjaustyöt, työmaiden väliset siirrot, puun tuotantolaitosten seisokit, sekä sopimattomat työolosuhteet, kuten kova pakkasen tai kosteus keväällä lumien sulaessa. (Uusitalo & Pearson 2010, s. 112–114)

5. SOVELTAMINEN METSÄKONEISIIN

Tässä luvussa käsitellään millaisia mahdollisuuksia ja haasteita IIoT-järjestelmien kehittäminen tuovat metsäkoneiden kunnonvalvontaan. Luvussa hyödynnetään kirjallisuuslähteiden lisäksi kirjoittajan omia kokemuksia metsäkonealalta, sekä metsäkonevalmistajien markkinointiesitteitä omista tuotteistaan.

5.1 Mahdollisuudet

Metsäkoneteollisuudessa IIoT-ratkaisut ovat jo jossain määrin käytössä, ja pohja tekniselle toteutukselle on olemassa. Metsäkonevalmistajat tarjoavat koneiden mukana erilaisia järjestelmiä, jotka mahdollistavat koneiden ja leimikoiden eli työmaiden reaaliaikaisen seuraamisen. Esimerkkejä erilaisista järjestelmistä ovat John Deeren TimberManager, Ponsse Manager ja Komatsun MaxiFleet. Järjestelmille yhteisiä ominaisuuksia ovat esimerkiksi koneiden sijainnin, käyttötuntien, tuottavuuden ja varaosien seuranta ja hallinta. (Komatsu 2020; Ponsse 2020a; John Deere 2020c) Vaikuttaa, että suurin osa nykyisten järjestelmien panostuksista on koneiden ja puutavaran logistiikan hallinnassa, ja siihen suurena ajurina on varmasti puutavaran jatkojalostuksen tarpeet.

Anturidatan hallintaan ja verkon yli siirtämiseen on siis kuitenkin jo olemassa teknologiaa, myös metsäkoneiden valmistajilla on osaamista IIoT-järjestelmien rakentamiseen ja kehittämiseen. Järjestelmissä on myös nykyisellään ominaisuuksia koneiden huoltojen hallintaan ja seurantaan. Kunnossapidon osalta järjestelmät liittyvät enemmän ehkäisevään kunnossapitoon ja varaosalogistiikan hallintaan, mutta Komatsun esitteessä on mainintoja koneen tilan syvällisemmästä analyysistä, esimerkiksi dieselmoottorin kunnonvalvonnasta (Komatsu 2020).

Kunnonvalvonnan kannalta oleellista anturidataa kerätään koneissa jo laajalti, ja sitä analysoidaan esimerkiksi apuna tuotekehityksessä, jolloin voidaan tarkkailla uusien komponenttien vaikutuksia koneen käyttöön tai tutkia vikaantumisia. Nykyinen anturointitekniikka mahdollistaa hyödyllisen datan keräämisen edullisesti ja koneen ohjausjärjestelmät mahdollistavat sen hallinnan koneen sisällä. Tällä hetkellä kerättyä dataa ei kuitenkaan systemaattisesti käsitellä, vaan sen analysointia toteutetaan enemmän epäsystemaattisesti, milloin potentiaalia ennakoivassa kunnossapidossa ei voida hyödyntää.

Tuotekehitysdatan kerääminen kuitenkin mahdollistaa ennakoivalle kunnossapidolle tärkeän historiadatan hyödyntämisen, tai ainakin sen laajamittaisen keräämisen aloittami-

nen on helpompaa. Hydraulijärjestelmien perusrakenne on myös säilynyt pitkään samana, mikä sekin tukee historiadatan keräämistä, koska uusien konemallien kehityksessä hydrauliiikan perusosat eivät ole merkittävästi muuttuneet. Laajat datankeräysmahdollisuudet ja pitkän aikavälin kokemukset hydraulijärjestelmien kehittämisestä antavat hyvän pohjan kunnossapidon kehitykselle. Hydrauliiikka on myös keskeisessä asemassa koneen toiminnan kannalta, joten sen luotettavaan toimintaan kannattaa panostaa.

Nykyaikaiset pilvipohjaiset järjestelmät mahdollistavat kerätyn datan hallinnan ja käsittelyn laajassa mittakaavassa, joten kerätyn datan määrä ei ole rajoitteena. Nykyisin yritykset ovat vähitellen alkaneet kehittää kaupallisia pilvipohjaisia ratkaisuja laitteiden kunnonvalvontaa varten. Pilvipohjaiset ratkaisut voivat myös mahdollistaa datan keräämisen koko koneen elinkaaren ajalta. (Schmidt & Wang 2016) Tietokoneiden laskentakapasiteetin jatkuvan kasvun voidaan olettaa jatkuvan tulevaisuudessakin, milloin datankäsittely tulee entistä tehokkaammaksi, ja entistä tarkempia ja enemmän laskentakapasiteettia vaatia ennuste algoritmeja ja malleja on mahdollista kehittää.

Metsäkoneiden toimintaympäristössä eli metsässä langattomat tiedonsiirtoyhteydet ovat pakollinen vaatimus koneiden datan siirtämisessä verkon yli. Koneet vaihtavat paikkaa useasti, ja siirrettävää dataa kertyy suuria määriä. Rajoitusten vuoksi tiedonsiirtoon sopivat parhaiten mobiiliverkkoon pohjautuvat ratkaisut (Collin & Saarelainen 2016, s. 171–181).

Suomessa langattoman tiedonsiirron mahdollisuudet mobiiliverkossa ovat maailman parhaimpien joukossa ja matkapuhelinverkon yli siirrettävät datamäärät ovat jatkuvasti kasvussa. Nykyisin käytössä on erikseen IoT-ratkaisuja tukevia M2M-liittymiä (eng. Machine-to-machine), jotka ovat tarkoitettu juuri laitteiden ja koneiden välisen yhteyden toteuttamiseen. (FiCom 2020) M2M-liittymiä ei lasketa Liikenne- ja viestintäviraston tilastoihin, joten niiden määrän muutoksesta ei ole saatavilla tietoa (Traficom 2020). Mobiiliverkoissa tulevaisuuden 5G-tekniikan kehitys luo uusia mahdollisuuksia, kun verkkoon liitetään yhä enemmän laitteita ja datamäärät kasvavat (Collin & Saarelainen 2016, s. 117).

Kunnonvalvonnan ennakoitavat vikaantumiset eivät vaadi tiedonsiirrolta äärimmäisen pientä viivettä. Vikaantumisten ennustaminen perustuu historiaan ja siinä tapahtuviin poikkeamiin pidemmällä aikavälillä, joten tiedonsiirron ei tarvitse olla reaaliaikaista. Suuret datamäärät tulee silti saada siirrettyä verkon yli käsiteltäväksi, eikä niitä voida rajattomasti varastoida koneyksikköön. Kriittisistä vikatiloista voidaan saada hälyttäviä merkkejä, kun dataa esikäsitellään paikallisesti koneyksikössä.

5.2 Ongelmat

Teollisuudessa kunnossapidon suunnittelua ja toteutusta ohjaavat vahvasti taloudelliset tekijät, kunnossapito myös nähdään yrityksissä usein kustannuksena, eikä niinkään mahdollisuutena (Yan 2015, s. 241). Toimivan ennakoivan kunnossapidon avulla kunnossapidon kustannukset laskevat ja koneiden luotettavuus ja laatu paranevat, mutta toteuttamine vaatii suuria alkuinvestointeja sekä paljon tuotekehitystä (Tran Anh, Dąbrowski et al. 2018).

Suomessa metsäkoneiden omistus on pitkälti pienillä yksityisyrittäjillä, jotka toteuttavat paljon huoltotoimenpiteitä ennakoivan kunnossapidon mukaisesti. Monet ovat myös tottuneet korjaamaan koneitaan omatoimisesti, toki uusien koneiden huolto on muuttanut tilannetta, koska monet huoltotehtävät vaativat erikoistyökaluja ja tietoa, joita yksityisellä yrittäjällä ei välttämättä ole. Kuitenkin ennakoivan kunnossapidon kehittämistä ohjaa vahvasti markkinoiden tarpeet, jotka eivät nykyisessä tilanteessa ole riittäviä. Yrittäjät eivät välttämättä koe tarvetta ennakoivalle kunnossapidolle, eivätkä ole valmiita maksamaan panostuksia, joita ennakoivan kunnossapidon kehittäminen vaatii.

Mobiiliverkkojen kattavuus ja toiminta ovat suomessa hyvällä mallilla, mutta jatkuvaa luotettavaa tiedonsiirtoyhteyttä nekään eivät voi tarjota. Pienet katkokset tiedonsiirrossa eivät vaaranna datankeruuta, jos se voidaan väliaikaisesti tallentaa. Joissain kohteissa on kuitenkin mahdollista, että yhteyttä ei vaan yksinkertaisesti ole saatavilla, jolloin datan siirtäminen mahdotonta ja kaikki koneen internet yhteyttä vaativat toiminnot ovat poissa käytöstä. Metsäkoneet siirtyvät eri työmaiden välillä ja vaihtelevuus yhteyksien laadussa on suurta.

Kerättyä dataa kertyy metsäkoneen operoidessa suuria määriä, joten kaikkea dataa ei voida käsittelemättä siirtää eteenpäin. Puhdas raakadata vie paljon kapasiteettia, joten sen esiprosessointi on tarpeen. Esiprosessoinnissa on mahdollista löytää jo hyödyllistä tietoa, mutta myös sen kadottaminen on mahdollista, siksi datankäsittelyn täytyy olla tarkasti suunniteltua.

Toimintaympäristön muuttuvien olosuhteiden vuoksi vikaantumisten ennustaminen on hankalampaa, koska ympäristön tila kuten lämpötila vaikuttaa hydraulijärjestelmän toimintaan merkittävästi. Olosuhteet vaikuttavat myös mittalaitteiden toimintaan, joten niidenkin vikaantuminen on suhteellisen rankoissa olosuhteissa todennäköisempää, kuin tasaisemmissa olosuhteissa. Anturoinnin suunnittelussa ja valinnassa tuleekin ottaa huomioon vaativat olosuhteet, mikä lisätä anturoinnin kustannuksia ja vähentää soveltuvien antureiden valikoimaa. (Jiang & He 2020)

Muuttuvien olosuhteiden lisäksi metsäkoneiden kuormitukset eivät ole kovinkaan hyvin ennustettavissa. Eri metsien pintarakenteet ja puusto eroavat toisistaan, koneella työskennellessä myös tulee vastaan erilaisia tilanteita, joihin koneen kuljettajan on reagoitava. Kaikki ympäristön tekijät vaikuttavat kuormitustilanteiden ennakoitavuuteen, joten niiden vaikutuksia ei voida helposti arvioida kunnossapitoa suunniteltaessa. Datan keräämisessä kunnonvalvontadataan ei voida yhdistää kaikkea tietoa ympäristöstä, joten ennustemallissa ei voida liikaa yhdistellä historiatietoja keskenään.

Lisäksi samaa metsäkoneetta ohjaa usein useampi kuljettaja, joiden työskentelytyylit eroavat keskenään toisistaan. Kunnonvalvontadataan voidaan yhdistää koneen kuljettajan yksilöivä tieto, mutta koneeseen aiheutuvat rasitukset eroavat toisistaan ja vaikuttavat vikaantumisiin eri tavalla. Liikkuvien työkonoiden, kuten metsäkoneiden osalta kuljettajan toimilla on merkittävän suuri vaikutus vikaantumistilanteiden syntymiseen verrattuna itsenään tai täysin tietokoneen ohjauksen alla toimiviin laitteisiin ja koneisiin.

Toimivien kunnossapitomallien ja ennusteiden valinta voi olla hankalaa, koska lähestymistapoja on lukuisia ja niillä on omat heikkoudet ja vahvuudet. Tämän työn puitteissa datan käsittelyä ja analysointia ei ole tarkemmin käsitelty, mutta datan keräämisen näkökulmasta eri lähestymistavat kaipaavat erilaista informaatiota, joten anturointiratkaisut vaikuttavat merkittävästi kunnossapidon onnistumiseen. Anturointiin liittyvien investointien lisäksi yrityksessä täytyy olla vahvaa tiedonkäsittelyn ja tietoliikenteen osaamista, ja ennakoivaan kunnossapitoon liittyvien tekniikoiden kehitys on vielä alkuvaiheessa (Tran Anh, Dąbrowski et al. 2018).

6. YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli selvittää, millaisia mahdollisuuksia teollinen internet luo ennakoivaan kunnossapitoon, sekä miten näitä mahdollisuuksia voidaan hyödyntää metsäkoneiden kunnossapidossa. Kunnossapidon näkökulmasta keskityttiin hydraulijärjestelmien mittaamisen mahdollisuuksiin.

Työssä tutustuttiin aiheita käsittelevään kirjallisuuteen, ja toteutettiin selvitys IIoT-pohjaisesta ennakoivasta kunnossapidosta. Työssä tutkittiin myös hydraulijärjestelmän yleisimpiä vikaantumisolmiöitä ja ratkaisuja, miten niiden esiintymisiä voidaan mitata. Löydettyjen ratkaisujen soveltuvuutta ennakoivassa kunnossapidossa arvioitiin metsäkoneiden toimintaympäristössä Suomessa.

Teollinen internet ja ennakoiva sekä kuntoon perustuva kunnossapito liittyvät vahvasti toisiinsa. Teollinen internet tarjoaa alustan yhdistää fyysiset laitteet ja tietokoneet, jolloin laitteiden tuottama data saadaan kattavasti hyödynnettyä. Ennakoiva kunnossapito hyödyntää laitteiden tuottamaa dataa ja sen analysointia. Näiden avulla voidaan saavuttaa merkittäviä etuja muihin kunnossapitostrategioihin nähden. Toimiva toteutus vaatii kuitenkin paljon ymmärrystä, tuotekehitystä ja suuria alkuinvestointeja.

Hydraulijärjestelmän vikaantumisista jopa 90 % liittyvät hydrauliohjauksen kuntoon. Pelkällä öljyn kunnonvalvonnalla ei voida kuitenkaan paikantaa vian lähdettä, vaan järjestelmästä täytyy mitata myös toiminnallisia parametrejä. Hydraulijärjestelmien mittauksia on toteutettu pitkään ja kokemusta vikaantumisista on olemassa. Nykytekniikka mahdollistaa datan laajamittaisen keräämisen uudella tavalla, milloin järjestelmien tilan seuraaminen on helpompaa. Toiminnallisista parametreistä tärkeimpiä ovat paine, virtaus ja lämpötila. Myös hydraulijärjestelmän ohjauksen mittaaminen on mahdollista, koska se on toteutettu sähköisesti kontrollereiden avulla.

Hydraulijärjestelmä on metsäkoneen toiminnan kannalta erittäin merkittävässä asemassa ja mahdollistaa koneen liikkumisen sekä työvaiheiden suorittamisen. Siksi hydraulikan kunnossapito on tärkeää, jotta turhat käyttökatkot voidaan välttää. Taulukkoon 1 on koottu työssä löydettyjä mahdollisuuksia ja ongelmia IIoT-pohjaisen ennakoivan kunnossapidon toteuttamiseen metsäkoneissa.

Taulukko 1. *Soveltamisen mahdollisuudet ja ongelmat kootusti.*

Mahdollisuudet	Ongelmat
Koneissa olevaa IoT-tekniikka on jo olemassa. Yrityksissä osaamista ja halua kehittää järjestelmiä.	Kehitystyö vaatii resursseja ja maksaa asiakkaille. Koneiden omistajien ollessa yksityisyrittäjillä markkinoilla ei suurta tarvetta tai halua maksaa kehitystyöstä.
Suomessa hyvät langattomat tiedonsiirtoyhteydet. Tulvaisuudessa tulevat yhä kehittymään.	Koneet liikkuvat paljon eri työmailla ja yhteyden laatu vaihtelee keskenään. Joissain kohteissa yhteyttä ei ole saatavilla.
Datan keräämiseen koneista hyvät edellytykset anturoinnin ja tiedon hallinnan kannalta. Myös historiadataa on mahdollisesti saatavilla vikatilanteiden tunnistamista varten. Erityisesti hydraulijärjestelmien mittaamisesta on kokemusta pitkältä ajalta.	Muuttuvat olosuhteet vaikeuttavat ennusteiden laskemista ja vaikuttavat vikaantumisiin. Myös yllättäviä kuormituksia syntyy olosuhteitten takia usein.
Laskentakapasiteetti lisääntyy jatkuvasti, joten kerätystä datasta voidaan löytää merkittävää tietoa tehokkaammin.	Toimivien kunnossapitomallien tekeminen vaikeaa ja toteuttamien tapauskohtaista, eli valmiita ratkaisuja ei ole olemassa.

Tämän kandidaatintyön perusteella ennakoivan kunnossapidon soveltaminen metsäkoneisiin on etenkin tulevaisuudessa mahdollista ja sen avulla voidaan saavuttaa merkittäviäkin etuja, mutta myös haasteita tuotekehitykseen on olemassa. Toteuttamiseen liittyy vahvasti kerättävän datan käsittely ja ennusteiden laskeminen, jota ei tämän työn rajauksen puitteissa käsitelty. Käytännössä menetelmien soveltaminen vaatii paljon suunnittelua ja tutkimusta, jotta oikeat menetelmät löydetään ja saadaan toimimaan.

LÄHTEET

Ben-Daya, M., Kumar, U. & Murthy, D.N.P. (2016). *Introduction to Maintenance Engineering: Modelling, Optimization and Management*. John Wiley & Sons, Incorporated.

Boyes, H., Hallaq, B., Cunningham, J. & Watson, T. (2018). The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. *Computers in Industry*, **101**, pp. 1–12.

Collin, J. & Saarelainen, A. (2016). *Teollinen internet*. Talentum.

Doddannavar, R. & Barnard, A. (2005). *Practical hydraulic systems operation and troubleshooting for engineers and technicians*. Newnes.

Esposito, A. (1980). *Fluid power with applications*. Prentice-Hall.

FiCom (2020). Matkaviestinverkossa siirretty data. URL: <https://www.ficom.fi/ict-ala/tietopankki/viestintaverkot-tietopankki/kiintea-ja-mobiili-laajakaista/matkaviestinverkossa-siirretty-data/> (viitattu 18.11.2020).

Hunt, T. & Vaughan, N. (1996). *Hydraulic handbook*. Elsevier Advanced Technology.

Isermann, R. (2011). *Fault-Diagnosis Applications: Model-Based Condition Monitoring: Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors, and Fault-Tolerant Systems*. Springer Berlin / Heidelberg.

Jiang, Y. & He, X. (2020). Overview of Applications of the Sensor Technologies for Construction Machinery. *IEEE access*, **8**, pp. 110324-110335.

John Deere (2020a). 1910G kuormatraktori. URL: <https://www.deere.fi/fi/kuormatraktorit/1910g/> (viitattu 19.11.2020).

John Deere (2020b). Puomin älykäs kärkiohjaus IBC. URL: <https://www.deere.fi/fi/mets%C3%A4koneet/ibc/> (viitattu 2.11.2020).

John Deere (2020c). Timbermanager. URL: <https://www.deere.fi/fi/metsakoneet/timbermatic-kartat-timbermanager/> (viitattu 4.11.2020).

Komatsu (2020). MaxiFleet. URL: <https://www.komatsuforest.fi/palvelut/maxifleet-konekaluston-hallintaj%C3%A4rjestelm%C3%A4> (viitattu 16.11.2020).

König, C. & Helmi, A.M. (2020). Sensitivity Analysis of Sensors in a Hydraulic Condition Monitoring System Using CNN Models. *Sensors (Basel, Switzerland)*, **20**(11), pp. 3307.

Kraus, D., Leitgeb, E., Plank, T. and Löschnigg, M. (2016). Replacement of the Controller Area Network (CAN) protocol for future automotive bus system solutions by substitution via optical networks, (2016)., pp. 1–8.

Lei, Y., Li, N., Guo, L., Li, N., Yan, T. & Lin, J. (2018). Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction. *Mechanical systems and signal processing*, **104**, pp. 799–834.

Li, J., Liu, Y., Xie, J., Li, M., Sun, M., Liu, Z. & Jiang, S. (2019). A Remote Monitoring and Diagnosis Method Based on Four-Layer IoT Frame Perception. *IEEE access*, **7**, pp. 144324-144338.

- Lindák, S., Majdan, R., Janoško, I., Pap, M. & Szabó, M. (2014). Hydraulic Device for Simulation of Pressure Shocks. *Acta technologica agriculturae*, **17**(2), pp. 44-48.
- Martinsuo, M. & Kärri, T. (2017). *Teollinen internet uudistaa palveluliiketoimintaa ja kunnossapitoa*. Kunnossapitoyhdistys Promaint ry.
- Ng, F., Harding, J.A. & Glass, J. (2017). Improving hydraulic excavator performance through in line hydraulic oil contamination monitoring. *Mechanical systems and signal processing*, **83**, pp. 176-193.
- Niu, G. (2017). *Data-Driven Technology for Engineering Systems Health Management Design Approach, Feature Construction, Fault Diagnosis, Prognosis, Fusion and Decisions*. Springer Singapore.
- Park, J. (2019). Advances in Future Internet and the Industrial Internet of Things. *Symmetry (Basel)*, **11**(2), pp. 244.
- Ponsse (2020a). Ponsse Manager. URL: <https://www.ponsse.com/fi/services/online-services/ponsse-manager/> (viitattu 16.11.2020).
- Ponsse (2020b). Tietojärjestelmät. URL: <https://www.ponsse.com/fi/tuotteet/tietojarjestelmat/> (viitattu 4.11.2020).
- Radeons, H., Mendoza, Y.E.A., Ferronato, D., Souza, F.J., da Cunha Bastos, Pedro Paulo, Soares, J.M.C. & De Negri, V.J. (2018). Online fault detection system for proportional hydraulic valves. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **40**(7), pp. 1-20.
- Ramgir, M. (2019). *Internet of Things*. Pearson Education India.
- Rivera, D.L., Scholz, M.R., Fritscher, M., Krauss, M. & Schilling, K. (2018). Towards a Predictive Maintenance System of a Hydraulic Pump. *IFAC-PapersOnLine*, **51**(11), pp. 447-452.
- Schmidt, B. & Wang, L. (2016). Cloud-enhanced predictive maintenance. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **99**(1-4), pp. 5-13.
- SFS-EN 13306, *Kunnossapito. Kunnossapidon terminologia*, (2017). Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
- Traficom (2020). Matkaviestinverkon liittymät. URL: <https://www.traficom.fi/fi/tilastot/matkaviestinverkon-liittymat> (viitattu 18.11.2020).
- Tran Anh, D., Dąbrowski, K. & Skrzypek, K. (2018). The Predictive Maintenance Concept in the Maintenance Department of the "Industry 4.0" Production Enterprise. *Foundations of Management*, **10**(1), pp. 283-292.
- Tsai, C., Lai, C. & Vasilakos, A.V. (2014). Future Internet of Things: open issues and challenges. *Wireless networks*, **20**(8), pp. 2201-2217.
- Uusitalo, J. & Pearson, M. (2010). *Introduction to forest operations and technology*. JVP forest systems.
- Wang, B. (2010). *Coverage control in sensor networks*. Springer-Verlag.
- Wilson, J.S. (2004). *Sensor Technology Handbook*. Elsevier Science & Technology.

Wu, B., Tian, Z. & Chen, M. (2013). Condition-based Maintenance Optimization Using Neural Network-based Health Condition Prediction. *Quality and Reliability Engineering International*, **29**(8), pp. 1151-1163.

Yan, J. (2015). *Machinery prognostics and prognosis oriented maintenance management*. Wiley.

Zeng, L., Yu, Z., Zhang, H., Zhang, X. & Chen, H. (2018). A high sensitive multi-parameter micro sensor for the detection of multi-contamination in hydraulic oil. *Sensors and actuators A Physical*, **282**, pp. 197–205.