



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

TUOTANTOTALOUDEN KOULUTUSOHJELMA

Kustannusjohtaminen

Älykäs kunnossapito

E-maintenance

Kandidaatintyö

Henri Paukkonen

Timo Vartiainen

TIIVISTELMÄ

Tekijä: Henri Paukkonen & Timo Vartiainen

Työn nimi: Älykäs kunnossapito

Vuosi: 2015

Paikka: Lappeenranta

Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, tuotantotalous.

46 sivua, 2 kuvaa ja 2 taulukkoa.

Tarkastaja: Lasse Metso

Hakusanat: älykäs kunnossapito, tilaan perustuva kunnossapito

Keywords: e-maintenance, condition-based maintenance

Valmistuksen ajatusmallin siirtyessä kohti kestävän kehityksen yhteiskuntaa, on kunnossapidon roolin täytynyt siirtyä kohti elinkaarilähtöistä ajattelua. Uusien ajattelutapojen lisäksi älykkäiden teknologioiden kehittymisen sekä liiketoiminnan integraation tarpeen lisääntymisen myötä on kehittynyt uusi kunnossapidon konsepti, älykäs kunnossapito.

Työn tavoitteena on esitellä älykästä kunnossapitoa ja sen kehitystä eri näkökulmista, selvittää sen teollista käyttöä ja tutkimusta sekä arvioida sen ominaisuuksia ja tulevaisuutta. Työ on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston tuotantotalouden koulutusohjelmalle.

2000-luvun alussa ensimmäisen kerran kirjallisuudessa esiintyneellä konseptilla on useita määrittelyjä, jotka vaihtelevat tarkasteltavan näkökulman mukaan. Älykkään kunnossapidon voidaan kuitenkin nähdä perustuvan älykkäillä teknologioilla toteutettuun laitteiden ja komponenttien valvontaan sekä kunnossapidon integraatioon tuotannon kanssa. Työn merkittävimpinä tuloksina voidaan pitää älykkään kunnossapidon ominaisuuksia, käyttöä sekä kyvykkyyksiä ja haasteita. Älykäs kunnossapito on kestävän kehityksen edistäjä, strateginen päätöksenteon apuväline sekä kilpailukyvyn parantaja. Suurista hyödyistä huolimatta ei sen käyttö ole vielä teollisuudessa suurta.

SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto	4
1.1	Työn tavoitteet	4
1.2	Työn rajaukset ja tutkimusmenetelmät	4
1.3	Työn rakenne	5
2	Älykkään kunnossapidon esittely	6
2.1	Määrittely	6
2.2	Älykäs kunnossapito liiketoiminnan tasoilla	8
3	Älykkään kunnossapidon kehitys	10
3.1	Älykkään kunnossapidon esiintulo	10
3.2	Uudet ajattelutavat	11
3.2.1	Kestävä kehitys	11
3.2.2	Elinkaariajattelu	12
4	Tilaan perustuva kunnossapito	14
4.1	Valvonta tilaan perustuvassa kunnossapidossa	15
4.2	Tilaan perustuva kunnossapito verrattuna muihin kunnossapitostrategioihin	17
4.2.1	Ehkäisevä kunnossapito	17
4.2.2	Mahdollisuuden mukainen kunnossapito	18
4.2.3	Vikatilanteessa korjaus	19
4.2.4	Design out	19
4.3	Tilaan perustuvan kunnossapidon edut ja haasteet	20
5	Älykkäät teknologiat	22
5.1	Verkot	22
5.2	Työkalut	23
6	Älykkään kunnossapidon kyvykkyydet ja haasteet	26

6.1	Kunnossapidon lajit ja strategiat	27
6.2	Kunnossapidon työkalut.....	28
6.3	Kunnossapidon aktiviteetit.....	30
6.4	Tiedon määrä	30
6.5	Käytön haasteet	31
7	Älykäs kunnossapito yrityksessä	33
7.1	Käyttöönotto	33
7.2	Älykäs kunnossapito päätöksenteon tukena.....	34
8	Älykkään kunnossapidon tulevaisuus	37
8.1	Käyttö.....	37
8.2	Tutkimus	38
9	Johtopäätökset.....	40
	Lähteet	42

1 JOHDANTO

Älykäs kunnossapito on 2000-luvun alussa syntynyt kunnossapidon konsepti, jossa kunnossapidon aktiviteetit yhdistetään uusiin tieto- ja viestintäteknikoihin sekä integroidaan strategisesti tuotantoon. Älykästä kunnossapitoa pidetään yrityksen päätöksenteon apuvälineenä ja sisäisen integraation mahdollistajana sekä toiminnan tehokkuuden valvonnan ja käyttövarmuuden maksimoinnin myötä suurena kestäväen kehityksen edistäjänä. Perinteiseen kunnossapitoon verrattuna älykästä kunnossapitoa voidaan myös pitää kriittisenä tekijänä yrityksen kilpailukyvyyn kehittämisessä. (Muller et al. 2008, s. 1165; Starr et al. 2010, s. 25) Tieteellisessä kirjallisuudessa älykästä kunnossapitoa käsittelevien julkaisujen määrä on kasvanut tasaisesti 2000-luvulla. Kaikista älykkään kunnossapidon termeistä ei ole suomenkielisiä käännöksiä, joten työssä on tehty uusia käännösehdotuksia.

1.1 Työn tavoitteet

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on esitellä älykästä kunnossapitoa, sen kehitystä ja käyttöä yrityksissä sekä arvioida älykkään kunnossapidon ominaisuuksia ja tulevaisuutta. Tutkimus perustuu älykästä kunnossapitoa ja sen osa-alueita käsitteleviin julkaisuihin, jonka pohjalta työssä pyritään vastaamaan tutkimuskysymyksiin:

- Mitä älykäs kunnossapito on ja millaisia ominaisuuksia sillä on?
- Mitä älykäs kunnossapito vaatii toimiakseen yrityksissä?
- Millaisena älykkään kunnossapidon tulevaisuus nähdään?

1.2 Työn rajaukset ja tutkimusmenetelmät

Työ on rajattu käsittelemään älykkään kunnossapidon konseptia ja sen konkreettisia ominaisuuksia ilman sen ympärillä vahvasti esiintyvää esineiden internetiä (Internet of Things, IoT). Työn ajankohtaisuuden varmistamiseksi ja aiheen nopean kehityksen vuoksi valtaosa työssä käytetyistä lähteistä on julkaistu vuoden 2005 jälkeen. Vanhempien lähteiden osalta erityisesti älykkään kunnossapidon käyttämiä teknologioita koskevat julkaisut eivät ole täysin ajankohtaisia.

Työ on parityönä tehty kirjallisuuskatsaus, joka pohjautuu aiemmin julkaistuihin tutkimuksiin ja kirjallisuuteen. Työssä esitetyt päätelmät perustuvat lähdeaineistoon, eikä työssä ole tehty omaa empiiristä tutkimusta.

1.3 Työn rakenne

Työssä esitellään ensin älykäs kunnossapito konseptina sekä sen kehitys. Luvussa kaksi esitellään, mitä älykäs kunnossapito tarkoittaa eri näkökulmista sekä mitä se on liiketoiminnan eri tasoilla. Luvussa kolme esitellään älykkään kunnossapidon kehitystä sen esiintuloon johtaneista syistä koko kunnossapidon roolin muutokseen älykkään kunnossapidon suuntaan.

Seuraavaksi työssä käsitellään älykkään kunnossapidon tärkeimpiä osa-alueita. Luvussa neljä esitellään vahvasti älykkääseen kunnossapitoon liittyvä tilaan perustuva kunnossapito. Tilaan perustuvaa kunnossapitoa myös verrataan muihin, perinteisempiin kunnossapitostrategioihin. Luvussa viisi esitellään älykkäessä kunnossapidossa käytettäviä teknologioita verkkojen ja työkalujen näkökulmista.

Kuudennessa luvussa arvioidaan älykkään kunnossapidon kyvykkyyksiä ja haasteita kunnossapidon lajina ja strategiana sekä kunnossapidon työkalujen ja aktiviteettien osalta. Siinä käsitellään myös älykkääseen kunnossapitoon liittyvää suurta tiedon määrää sekä arvioidaan käytön haasteita. Luvussa seitsemän käsitellään älykkään kunnossapidon käyttöä yrityksissä keskittyen älykkäiden kunnossapitojärjestelmien käyttöönottoon sekä päätöksentekoon. Kahdeksannessa luvussa arvioidaan älykkään kunnossapidon tulevaisuutta erityisesti käytön ja tutkimuksen osalta. Luvussa yhdeksän käydään läpi tutkimuksen tulokset ja johtopäätökset.

2 ÄLYKKÄÄN KUNNOSSAPIDON ESITTELY

Älykäs kunnossapito on 2000-luvun alussa ensimmäisen kerran esiintynyt konsepti (Iung et al. 2009, s. 220; Muller et al. 2008, s. 1165), joka yleisesti yhdistetään uusien tieto- ja viestintäteknikoiden käyttöön (Levrat et al. 2008, s. 408) ja integraatioon kunnossapidon strategiassa uusien innovatiivisten tuotantomallien kehitykseen vastaamiseksi (Muller et al. 2008, s. 1165). Sitä voidaan pitää eri yhteyksissä kunnossapidon strategiana, suunnitelmana, lajina tai sen tukena (Iung et al. 2009, s. 220; Levrat et al. 2008, s. 409; Muller et al. 2008, s. 1165-1166). Scopus-viitetietokannasta hakien artikkelien otsikoista ja avainsanoista termiä ”e-maintenance” voi huomata aiheen suosion nousseen tasaisesti 2000-luvun alusta lähtien, ja Mullerin et al. (2008, s. 1165) mukaan ”e-maintenance” onkin nykyisin yleinen termi kunnossapitoon liittyvässä kirjallisuudessa.

Kunnossapidon strategiana älykkäässä kunnossapidossa tehtäviä johdetaan sähköisesti käyttäen elektronisesti saatua reaaliaikaista dataa. Tällöin älykäs kunnossapito toimii kunnossapidon johtamisen prosessina, joka käsittelee saatavilla olevaa dataa ja hallitsee datan määrän kasvun. Älykästä kunnossapitoa voidaan myös pitää kunnossapidon suunnitelmana, joka kohtaa tulevaisuuden automaattisen valmistuksen tarpeet tutkimuksen siirtyessä kohti tilaan perustuvan kunnossapidon (CBM, condition-based maintenance) osa-alueita: ennakoiva kunnossapito, yhteistyökunnossapito, etäkunnossapito ja palvelutuki, reaaliaikainen tietoon käsiksi pääsy sekä tuotannon ja kunnossapidon integraatio. Kunnossapitolajina älykäs kunnossapito siirtyy perinteisistä kunnossapidon lajeista ennakoivampaan ja ennustavaan kunnossapitoon. Säännöllisestä jaksottaisesta kunnossapidosta tulisi siirtyä kohti älykästä kunnossapitofilosofiaa, jotta kohdataan valmistuksen kasvavat käyttövarmuuden vaatimukset. Älykäs kunnossapito voi toimia myös kunnossapidon tukena. Tällöin se toimii verkkopalvelun ja viestintäteknikoiden yhdistelmänä tarjoten tavan ymmärtää automaatiokoneiston älykkäitä ja yhteistoiminnallisia ominaisuuksia. (Muller et al. 2008, s. 1166)

2.1 Määrittely

Älykkäälle kunnossapidolle on useita määrittelyjä, eikä yhtenäistä määrittelyä ole hyväksytty, mikä myös heikentää konseptin tieteellistä käyttöä. Määrittelyt ovat hyvinkin erilaisia riippuen

määrittelijöiden näkemyksistä, joista yleisimmät ovat älykkään kunnossapidon ajattelemisen konseptina, filosofiana tai teknologiana (Levrat et al. 2008, s. 408; Muller et al. 2008, s. 1165). Yksi yhtenäinen hyväksytty määritelmä voisi helpottaa älykkään kunnossapidon tutkimusta ja sitä kautta sen käyttöönottoa ja käyttöä yrityksissä.

Muller et al. (2008, s. 1166-1167) ovat määrittäneet älykkään kunnossapidon ottaen huomioon sen edellä mainitut ominaisuudet kunnossapidon strategiana, suunnitelmana, lajina ja sen tukena sekä kunnossapidon Euroopan standardin (EN 13306:2001). Näin ollen älykäs kunnossapito voidaan määritellä ”kunnossapidon tukena, joka sisältää ennakoivan päätöksenteon prosessit mahdollistavat resurssit, palvelut sekä hallinnan. Tämä tuki sisältää älykkäitä teknologioita, kuten tieto- ja viestintäteknikoita ja verkkopohjaisuuden, sekä operaatioita ja prosesseja kuten monitorointia, diagnostiikkaa ja ennustusta”. (Muller et al. 2008, s. 1167)

Levrat et al. (2008, s. 409) esittelevät älykkään kunnossapidon määritelmiä eri näkökulmista. Konseptina älykäs kunnossapito on verkko, joka integroituu ja synkronoituu useiden kunnossapidon ja käyttövarmuuden sovellusten kanssa keräten tietoja ja toimittain tärkeää tietoa tarvittaviin paikkoihin. Integraation ja synkronoinnin käsitteenä Levrat et al. (2008, s. 409) pitävät älykästä kunnossapitoa kykynä valvoa tuotantolaitoksen lattiataason varoja, linkittää tuotannon ja kunnossapidon toimintojärjestelmät, kerätä palautetta etäkäyttäjien laitoksista sekä integroitua yrityksen ylemmän tason sovelluksiin. Tällöin se on myös muutosjärjestelmä, joka mahdollistaa valmistuksen toimintojen seisokkiajan saavuttavan lähes nollan sekä synkronoituvan liiketoiminnan järjestelmien kanssa verkon ja saumattomien teknologioiden avulla.

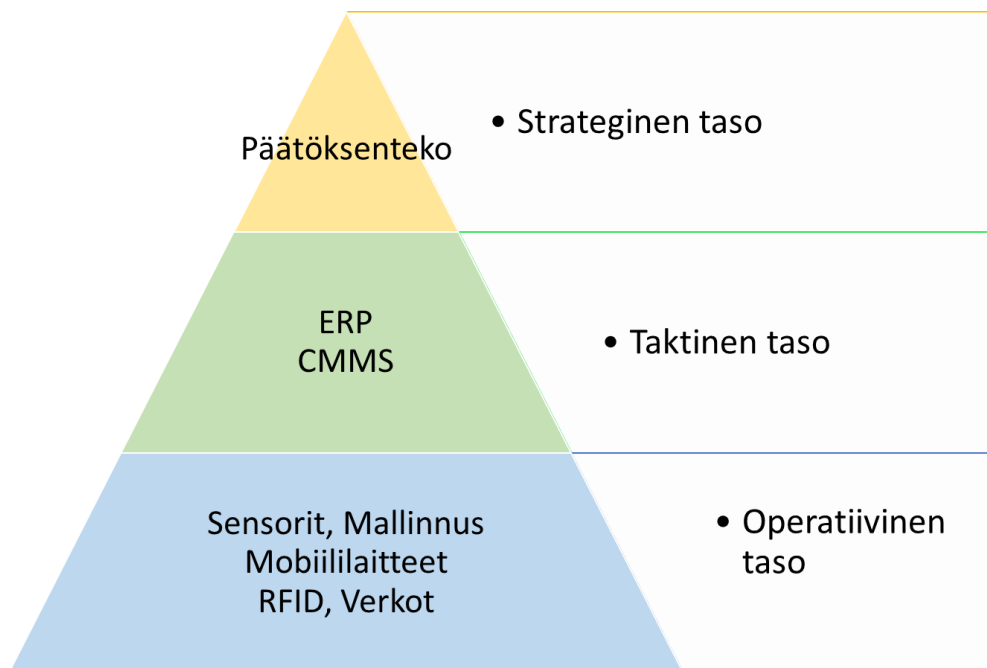
Yleispätevänä määrittelynä on esitetty älykkään kunnossapidon olevan kunnossapidon johtamisen konsepti, jossa pääomaa valvotaan ja johdetaan internetin välityksellä. Älykäs kunnossapito myös tuo ennennäkemättömän läpinäkyvyyden ja tehokkuuden tason koko teollisuudelle. (Levrat et al. 2008, s. 409) Toisaalta Kajko-Mattsson et al. (2011, s. 560) esittävät älykkään kunnossapidon yleiseksi määritelmäksi seuraavaa: Älykäs kunnossapito on tietokoneella johdettua ja suoritettua kunnossapitoa. Älykäs kunnossapito on kunnossapitoon

ja tietotekniikkaan perustuva monitieteinen kenttä, joka varmistaa älykkään kunnossapidon palvelujen vastaavan asiakkaiden ja toimittajien tarpeita koko tuotteen elinkaaren ajan.

Vaikka määrittelyt eroavatkin merkittävästi toisistaan, voidaan kaikista huomata älykkään kunnossapidon voimakas yhteys uusiin teknologioihin. Älykkäässä kunnossapidossa käytettäviä ja sen vaatimia teknologioita on esitetty luvussa viisi.

2.2 Älykäs kunnossapito liiketoiminnan tasoilla

Älykkään kunnossapidon voidaan katsoa ulottuvan yrityksissä kolmelle liiketoiminnan tasolle, operatiiviselle, taktiselle sekä strategiselle kuvan 1 mukaisesti. Älykkään kunnossapidon eri osa-alueet kattavat toimintansa jollain tavalla kaikille näistä tasoista ollen täten hyvinkin suuri ja tärkeä kokonaisuus yrityksen liiketoiminnassa.



Kuva 1 Älykkään kunnossapidon käyttö liiketoiminnan tasoilla

Operatiivisella tasolla älykäs kunnossapito tarjoaa teknologiat ja työkalut komponenttien kulumisen ja käytettävyyden valvontaan, päätöksenteon apuvälineiksi vianmääritykseen ja ennustamiseen sekä suorituskyvyn mittaamiseen. Lisäksi se tarjoaa kaikkialle ulottuvaa kunnossapidon johtamista, missä kunnossapidon toiminnot, työkalut ja tieto on saatavilla

valtuutetuille käyttäjille missä ja milloin vain. (Aboelmaged 2014, s. 640-641; Jantunen et al. 2010a, s. 2; Jantunen et al. 2009)

Liiketoiminnan taktisella tasolla älykäs kunnossapito tarjoaa työkalut ja tiedonsiirron välineet strategisella tasolla valittujen kunnossapidon toimintatapojen käyttöönottoon. Lisäksi älykäs kunnossapito tarjoaa saumattoman rajapinnan kunnossapidon tietojärjestelmiin (CMMS, Computerized Maintenance Management System) sekä toiminnanohjausjärjestelmiin (ERP, Enterprise Resource Planning), millä varmistetaan tarvittavien resurssien, palveluiden ja johtamisvälineiden käytettävyys kunnossapidon toimille. (Aboelmaged 2014, s. 641; Jantunen et al. 2010a, s. 2; Jantunen et al. 2009)

Liiketoiminnan korkeimmalla, strategisella tasolla älykäs kunnossapito tukee koko yrityksen päätöksentekoa ja kytkeytyy sisäiseen ja ulkoiseen logistiikkaan tähtäimenään liiketoimintaprosessien integraatio. Älykäs kunnossapito myös mahdollistaa tarvittavien tietoteknisten työkalujen käytön kunnossapitokäytäntöjen valinnan tukena sekä näiden käytäntöjen määrittämisen ja toteuttamisen alemmilla hierarkiatasoilla. (Aboelmaged 2014, s. 641; Jantunen et al. 2010a, s. 2; Jantunen et al. 2009)

3 ÄLYKKÄÄN KUNNOSSAPIDON KEHITYS

Viimeisten vuosikymmenien aikana kunnossapidon kehitykseen on eniten vaikuttanut ihmisten ja pääoman johtaminen sekä teknologinen kyvykkyys. Nämä osa-alueet ovat tärkeitä, sillä ne pyrkivät hyötymään parhaalla mahdollisella tavalla kalliista resursseista, oli hyöty sitten voittoa tai parhaan mahdollisen palvelun tarjoamista rajatuilla resursseilla. (Starr et al. 2010, s. 5) Perinteisesti kunnossapitoa on pidetty välttämättömänä pahana ja vain kustannuksena rajattuna ainoastaan tuotantoon ja toimintoihin. Valmistuksen ajatusmalli on kuitenkin siirtynyt kohti kestäväen kehityksen yhteiskuntaa, joten kunnossapidon roolin on myös täytynyt siirtyä elinkaarilähtöiseen ajatteluun ja älykäs kunnossapito on tämän myötä kehittynyt konsepti. (Iung et al. 2009, s. 220; Levrat et al. 2008, s. 409)

3.1 Älykkään kunnossapidon esiintulo

Edellisessä luvussa mainittujen määrittelyjen perusteella voidaan nähdä kaksi yhteistä tekijää, jotka selittävät älykkään kunnossapidon syntymisen. Syntymisen ja kehittymisen keskeisimpinä syinä voidaan pitää älykkäiden teknologioiden ilmaantumista sekä liiketoiminnan integraation tarpeen lisääntymistä. Myös kunnossapidon kasvavat kustannukset lisäävät uusien toimintatapojen löytämistä. Alasta riippuen kunnossapitokustannukset ovat 15-40 % tuotteen hinnasta, ja automaation lisääntyessä kustannukset todennäköisesti kasvavat (Han & Yang 2006, s. 569).

Älykkäinä teknologioina voidaan pitää uusia tieto- ja viestintäteknikoita, pääasiassa langattomia verkkotekniikoita, kuten WLAN ja Bluetooth, sekä uusia sensori- ja mittaustekniikoita, kuten RFID-sirut (Radio Frequency Identification Device). Nämä älykkäät teknologiat mahdollistavat kunnossapidon tehokkuuden, nopeuden ja ennustettavuuden optimoimalla kunnossapitoon liittyvän työmäärän (Levrat et al. 2008, s. 409; Muller et al. 2008, s. 1167; Jantunen et al. 2010b, s. 202-206). Älykkäät teknologiat myös mahdollistavat pääsyn suurempaan määrään tietoa useista eri lähteistä ja eri tavoilla sekä yhteistoiminnallisten aktiviteettien toteuttamisen ja edistyneemmän päättelyn ja päätöksenteon (Iung et al. 2009, s. 221; Muller et al. 2008, s. 1167).

Liiketoiminnan suorituskyvyn integraation tarpeen lisääntyminen on asettanut kunnossapidolle vaatimuksia avoimuudesta sekä integraatiosta ja yhteistoiminnasta yrityksen muiden palvelujen kanssa (Levrat et al. 2008, s. 409; Muller et al. 2008, s. 1167). Yrityksen muiden aktiviteettien ollessa jo erikseen optimoitu, vaati syvempi maailmanlaajuinen optimointi integraatiota, avoimuutta sekä laaja-alaista yhteistoimivuutta toimintojen välillä. Nykyisin kyseiset vaatimukset kohdistuvat yhä enemmän kunnossapitoon, sillä kunnossapidon päätökset eivät rajoitu ainoastaan kunnossapidon toimintoihin vaatien koordinoitua muiden toimintojen kanssa, erityisesti valmistuksessa. (Muller et al. 2008, s. 1167)

3.2 Uudet ajattelutavat

Uudet ajattelutavat liiketoiminnassa ovat muuttaneet kunnossapidon roolia viime vuosina. Erityisesti ympäristöseikat ovat korostaneet yhteiskunnan kestävästä kehitystä (Starr et al. 2010, s. 5) sekä kunnossapidon merkitystä tuotteiden koko elinkaaren ympäristötehokasta hallinnan kautta (Jung et al. 2009, s. 220-221). Kunnossapidon rooli on myös muuttunut älykkään kunnossapidon myötä vianmäärittämisestä ennustavaan ja ennaltaehkäisevään toimintaan laitteiden kunnonvalvonnan myötä (Lee et al. 2006, s. 476; Levrat et al. 2008, s. 412).

3.2.1 Kestävä kehitys

Kestävästä kehityksestä pidetään hyvin tärkeänä yhteiskunnalle, ja kunnossapito tähtääkin nykyisin kestävästä kehitykseen ympäristön ja energian säästön sekä turvallisuuden ja talouden kannalta (Starr et al. 2010, s. 5) säilyttäen tuotteen käytettävyyden, käyttövarmuuden sekä huollettavuuden koko sen elinkaaren aikana (Jung et al. 2009, s. 220). Kilpailukykyä kannalta koneiden ja kaluston käyttövarmuus ja käytettävyyden ovat ratkaisevia tekijöitä erityisesti sovelluksissa, joissa turvallisuus ja käytettävyyden ovat avainasemassa (Peng et al. 2010, s. 297; Starr et al. 2010, s. 5). Näin ollen kehittyneitä kunnossapitoa voidaankin pitää kriittisenä tekijänä yrityksen kilpailukykyä parantamisessa.

Starr et al. (2010, s. 6) toteavat käyttövarmuuden, käytettävyyden ja käyttöiän suunnittelun esiintyneen ensimmäisenä ydinenergian alalla. Ilmailuala seurasi nopeasti perässä kehittäen menetelmiä käyttövarmuuden varmistamiseksi hajauttaen ja kopioiden kriittisiä ominaisuuksia.

Turvallisuus- ja riskianalyysijä on kehitetty ja mukautettu erityisesti kemianteollisuudessa, mutta myös muilla teollisuuden aloilla. Toisaalta olemassa olevat toimintatavat eivät sovellu helposti esimerkiksi voimalaitoksiin tai prosessi- ja metalliteollisuuteen, sillä niillä aloilla käytettävyys on usein tärkeämpää kuin käyttövarmuus (Starr et al. 2010, s. 6), eli seisokkiajan minimointi on tärkeämpää kuin vikatilanteen pieni todennäköisyys.

Kunnossapidon kannalta tärkeä kehityssuunta on omistamisen liiketoimintamalli, jossa liikutaan kohti jaettua riskiä, jolloin myös koneiden ja kaluston omistus voi muuttua. Tällöin myöskään tuotteen tai palvelun tuottamiseksi ei tuotantolaitetta tarvitse omistaa. Perinteisesti valmistajat ovat saaneet tuottoja varaosien myynnistä. Nykyisin valmistajilla on kasvava taipumus säilyttää laitteen omistus, jolloin varaosien käyttö halutaan minimoida. Tällöin myös kunnossapidon huomio keskittyy tuotteen tarjoamaan palveluun. Investointipäätöksissä kunnossapidon kustannukset ovat nykyisin merkittävä tekijä, sillä kunnossapidon ja energian kustannukset usein jopa ylittävät alkuperäisen hankintahinnan. Näin ollen laitteiden kunnossapito ja laitteen toiminnan tehokkuuden valvonta ovat suuria kestävän kehityksen edistäjiä. (Starr et al. 2010, s. 23-24)

Tulevaisuudessa kunnossapidon merkitys kestäväälle kehitykselle edelleen kasvaa. Kunnossapidon päätehtävinä tulee olemaan tuotteen elinkaaren pidentäminen ja käyttövarmuuden maksimointi mahdollisimman pienin kustannuksin, ja kyseiset toimet lisäävät aitoa kilpailukykyä yritykselle. Uutena haasteena voidaan kuitenkin pitää ympäristöystävällisyyden parantamista. Esimerkiksi järjestelmien hiilijalanjälki on vielä nykyisin melko suuri valmistuksen sisäisen sekä toiminnassa tarvittavan hiilen vuoksi. (Starr et al. 2010, s. 25)

3.2.2 Elinkaariajattelu

Elinkaarilähtöisen johtamisen myötä resurssien ja energian kulutuksen rajoitteet ovat merkinneet huomattavaa muutosta valmistuksen tavoitteissa siirtyen tuotannon tehokkuudesta asiakastyytyväisyyden ja kannattavuuden varmistamiseen. Näin ollen kunnossapidon aktiviteeteista tulee yhtä tärkeitä tuotannon aktiviteettien kanssa. (Jantunen et al. 2010a, s. 2; Levrat et al. 2008, s. 409)

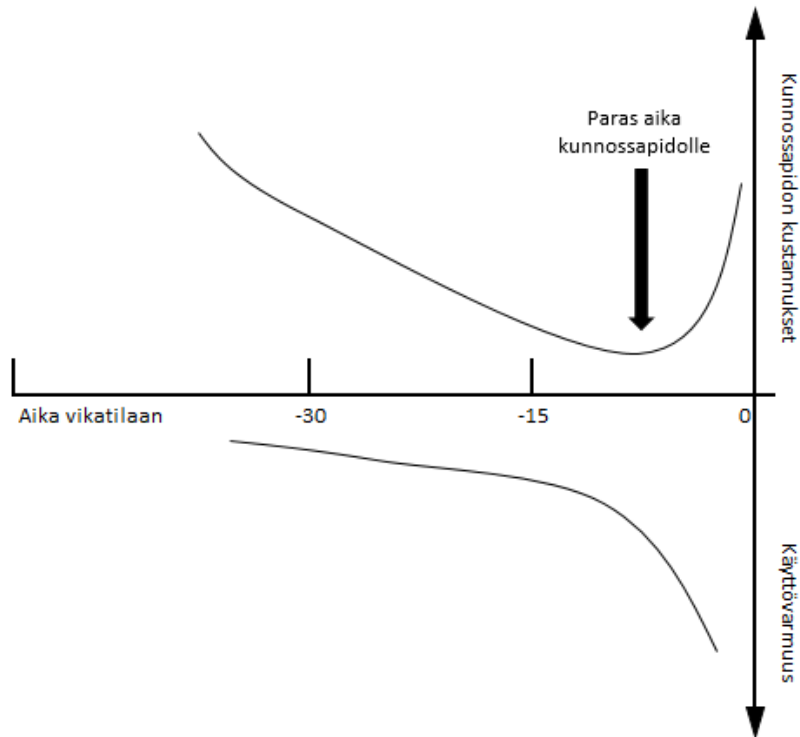
Iung et al. (2009, s. 220-221) toteavat käsitteiden ”ympäristötehokkuus” ja ”aktiivinen tuote” antavan älykkäälle kunnossapidolle suuren roolin strategisena työkaluna suorituskyvyn kontrollointiin tulevaisuudessa. Täten älykästä kunnossapitoa voidaan pitää filosofiana, joka tukee siirtymistä ”hajoa ja korjaa” –ajattelusta ”ennakoi ja ehkäise” –strategiaan pitäen samalla kunnossapidon yrityksen sisäisenä prosessina suorituskyvyn optimoimiseksi (Iung et al. 2009, s. 221; Lee et al. 2006, s. 476; Levrat et al. 2008, s. 412). Tämän ajatusmallin suurimpana etuna voidaan pitää kunnossapidon toteuttamista silloin, kun tuote, laite tai palvelu on heikentynyt määrättyyn tasoon, toisin kuin määrätyn ajan kuluttua (Levrat et al. 2008, s. 412), toisin sanoen tilaan perustuvaa kunnossapitoa, jota esitellään luvussa neljä. Ajatusmalli antaa myös valmiudet globaalin tavoitteen täyttymiseen kunnossapidon kannalta pakollisen yhteistoiminnan ja tiedon synkronoinnin myötä kaikissa tuotteen elinkaaren vaiheissa (Iung et al. 2009, s. 221).

Valmistajat perinteisesti takaavat tuotteen moitteettoman toiminnan määrättyksi takuuajaksi, mutta nykyisin elinkaarivoittojen suunnittelun suosio on kasvamassa ja se perustuu tuotteen käyttövarmuuteen koko sen käyttöiän ajalla. Elinkaarivoittojen suunnittelun myötä yritykset voivat käyttää tilastollisesti määriteltäviä vikojen esiintymistiheyttä, käytettävyyttä ja tuotteen käyttöikää kilpailuvaltteina sekä mahdollistaa luotettavan lähtökohdan tuotteen kierrätykselle. (Starr et al. 2010, s. 6)

4 TILAAN PERUSTUVA KUNNOSSAPITO

Tilaan perustuvaa kunnossapitoa (CBM, Condition-based maintenance) voidaan pitää älykkään kunnossapidon osa-alueena. Tilaan perustuva kunnossapito on vikatilanteiden ehkäisyyn kehitetty (Starr et al. 2010, s. 10) kunnossapito-ohjelma tai -strategia, joka ehdottaa kunnossapidon toimia päätöksentekoa varten laitteiden valvonnasta kerättyjen tietojen ja käyttöiän ennustamisen perusteella (Ahmad & Kamaruddin 2012, s. 140; Niu et al. 2010, s. 787; Peng et al. 2010, s. 298). Tämä valvonta perustuu siihen, että lähes kaikkia vikatilanteita edeltävät tietyt merkit tulevasta viasta. Tilaan perustuva kunnossapito pyrkiikin välttämään turhia kunnossapidon toimia ajoittamalla ne vain sellaiseen hetkeen, jossa voidaan huomata komponentin tai laitteen epänormaalia käyttäytymistä. (Ahmad & Kamaruddin 2012, s. 140; Borissova & Mustakerov 2013; Niu et al. 2010, s. 787-788; Peng et al. 2010, s. 298)

Valvontaprosessit, joissa tietynlaisilla sensoreilla ja mittareilla valvotaan signaaleja, ovat tilaan perustuvan kunnossapidon perusta. Valvontaprosessit ja laskenta oikein suoritettuna voidaan kunnossapidon toimia toteuttaa vain tarvittaessa ja juuri ennen vikatilannetta. Tilaan perustuvan kunnossapidon päätehtävä onkin suorittaa reaaliaikaista laitteiston kunnan arviointia kunnossapidon päätöksentekoa varten eristettynä laitteen toiminnasta, jotta vältytään toimintaan vaikuttamiselta sekä turhaa kunnossapitoa ja siihen liittyviä kustannuksia voidaan vähentää. (Ahmad & Kamaruddin 2012, s. 140; Lee et al. 2006, s. 477) Päätökset kunnossapitotoimista tehdään valvotun laitteen tai komponentin kunnan perusteella (Borissova & Mustakerov 2013). Toimintaa tarkkaillaan valvomalla ja analysoimalla sekä vertailemalla normaalin ja poikkeavien olosuhteiden signaaleja (Borissova & Mustakerov 2013), minkä mahdollistavat uudet sensori- ja mittausteknologiat (Lee et al. 2006, s. 477). Laskennan perusteella järjestelmä antaa ehdotukset kunnossapitotoimista lopulliselle päätöksen tekijälle – ihmiselle (Starr et al. 2010, s. 25).



Kuva 2 Jäljellä olevan käyttöajan suhde käyttövarmuuteen ja kunnossapidon kustannuksiin (Peng et al. 2010, s. 298)

Kuvassa 2 esitetään jäljellä olevan käyttöajan, käyttövarmuuden sekä kunnossapidon kustannusten väliset yhteydet optimaalisessa tilaan perustuvan kunnossapidon järjestelmässä. Kun aika vikatilanteeseen lähenee nollaa, järjestelmän käyttövarmuus laskee, ja ajan ollessa nolla on järjestelmä hajonnut. (Peng et al. 2010, s. 298) Kunnossapidon kokonaiskustannukset ovat alimmillaan hieman ennen vikatilaa käyttövarmuuden vielä ollessa hyväksyttävällä tasolla. Ennen optimaalista ajoitusta kunnossapitotoimia tulee tehdä useammin ja tämän jälkeen vikatilaa riski kasvaa huomattavasti, ja molemmissa tapauksissa myös kustannukset näin ollen kasvavat.

4.1 Valvonta tilaan perustuvassa kunnossapidossa

Tilaan perustuvassa kunnossapidossa voidaan suorittaa mittauksia ja valvontaa monien erilaisten muuttujien osalta. Suuri osa näistä mittauksista vaatii kehittyneitä teknologioita, joita on esitelty luvussa viisi. Useimmat mittaukset myös vaativat esimerkiksi sensoreita itse

laitteeseen tai komponenttiin kuitenkin sen toimintaa häiritsemättä. Taulukossa 1 on esitetty yleisimpiä mittaustyökaluja ja niiden kohteita tilaan perustuvan kunnossapidon järjestelmissä.

Taulukko 1 Tilaan perustuvan kunnossapidon mittauksia

Mittaustyökalu	Mittauskohde	Selvittää
Prosessimuuttajat (Starr et al. 2010, s. 20)	Suorituskyky, esim. paine tai virtausnopeus	Huomataan laskenut suorituskyky
Tärinä (Ahmad & Kamaruddin 2012, s. 140-141; Starr et al. 2010, s. 20)	Liikkuvien mekaanisten komponenttien kiihtyvyys, nopeus ja siirtymä	Tärinä voi viitata kuultaviin ääniin, ylimääräiseen rasitukseen tai myöhempisiin vikoihin
Akustinen emissio (Ahmad & Kamaruddin 2012, s. 141; Starr et al. 2010, s. 21)	Rakenteiden ja ilman läpi kulkevien ääniaaltojen voimakkuus ja kuvio	Antaa useimmiten varhaisen viitteen mekaanisten komponenttien ja rakenteiden vioista
Lämpötila (Ahmad & Kamaruddin 2012, s. 141; Starr et al. 2010, s. 21)	Elektronisista laitteiden, jäähdytys- ja voiteluaineiden sekä mekaanisten komponenttien lämpötila ja sen muutokset	Useimmiten elektronisten komponenttien valvontaa laitteen sisällä sensoreiden avulla
Infrapuna-analyysi (Starr et al. 2010, s. 21)	Infrapunasäteilyn mittaus määrättyltä alueelta	Lämpötilaerojen havaitseminen tarkasteltavalla alueella tai esimerkiksi putkistossa ja tiivisteissä tai mekaanisissa ja elektronisissa järjestelmissä
Voiteluaineet (Ahmad & Kamaruddin 2012, s. 141; Starr et al. 2010, s. 21)	Lisäaineiden, saasteen ja jätteen mittaus voiteluaineista	Vältytään turhilta öljynvaihoilta ja ylimääräisiltä kulumahiukkasilta koneen sisällä
Vuodot (Starr et al. 2010, s. 21)	Erilaisia metodeja saippuavedestä ultraääneen ja merkkikaasuihin	Pienten vuotojen havaitseminen
Korroosio (Starr et al. 2010, s. 21)	Sähköisen resistanssin ja potentiaalimittaus, sahatavara tai porausreiät	Korroosion mittaamista laitteen mekaanisissa osissa
Halkeamat (Starr et al. 2010, s. 21)	Tunkeumavärikokeet, virtauskokeet ja ultraäänitestit	Laitteen mekaanisten osien tarkastus halkeamien varalta rikkomattomilla aineenkoestustavoilla
Sähkövirta (Ahmad & Kamaruddin 2012, s. 141)	Muutokset laitteiston ominaisuuksissa resistanssin, johtavuuden, eristävyden ja sähköisen potentiaalimittaus	Käytetään eristeiden kulumisen, hajojen roottorien sekä oikosulkujen havaitsemiseksi

Vaikka useimpiin taulukossa 1 esitettyihin mittauksiin voidaan käyttää sensoreita ja antureita, on myös mittauksia, jotka tulee suorittaa laboratoriossa. Suurin osa mittauksista antaa myös mittauslaitteesta riippuen tiedon reaaliaikaisena, jolloin kunnossapitotoimia voidaan suorittaa välittömästi poikkeamien ilmetessä. Mittaustavoissa on myös huomattavia eroja kustannuksissa, myös saman tehtävän sensoreiden kesken. (Starr et al. 2010, s. 20-21, 23)

4.2 Tilaan perustuva kunnossapito verrattuna muihin kunnossapitostrategioihin

Kunnossapito on tärkeä osa kaikessa liiketoiminnassa, sillä sen tarkoitus on säilyttää liiketoiminnassa tärkeiden koneiden ja kaluston käytettävyyttä. Kunnossapitosuunnitelmaa muodostettaessa on tarkoituksena minimoida liiketoiminnan ja kunnossapidon yhteiset kokonaiskustannukset. Kunnossapidon organisaatio pohjautuu jatkuviin liiketoimintaprosesseihin, käyttökatkoihin, henkilöstön käytettävyyteen sekä varaosiin, jotka on suhteutettava toisiinsa. Kehittynein toimintatapa yhdistää eri kunnossapidon strategioita, joissa perinteisesti kunnossapidon toimet käynnistyvät vikatilanteissa tai ennakoivasti määrätyn ajan kuluttua edellisestä. (Starr et al. 2010, s. 10)

4.2.1 Ehkäisevä kunnossapito

Ehkäisevä kunnossapito (PPM, Planned preventive maintenance; TBM, Time-based maintenance) on aikataulutettua vikojen ehkäisyä ja on erittäin käytetty kunnossapitostrategia. Tässä strategiassa vikatilanteita ehkäistään vaihtamalla komponentteja määrättyinä aikoina kunnosta riippumatta ja toimien ajoitus perustuu tilastolliseen analyysiin. Tulee myös hyväksyä, että vaikka suurin osa vikatilanteista ennaltaehkäistään, tulee niitä silti tapahtumaan komponenttien ja koneiden kunnan epävarmuuden vuoksi. Ehkäisevä kunnossapito toimiikin parhaiten sellaisten koneiden ja komponenttien osalta, joiden käyttöikä on pitkälti ennustettavissa. Ehkäisevän kunnossapidon suurimpina etuina voidaan pitää ajan tehokasta käyttöä sekä vähäistä varaosien tarvetta muulloin, kuin itse kunnossapitotilanteessa. (Ahmad & Kamaruddin 2012, s. 136; Starr et al. 2010, s. 12)

Ehkäisevän kunnossapidon suurimmat heikkoudet esiintyvät huonosti tunnettuihin ja epävarmoihin laitteisiin ja komponentteihin. Niissä vikatilanteet eivät yleensä esiinny tarkoin

väliajoin, joten vikatilanteita voi esiintyä tai kunnossapitotoimia suoritetaan turhaan. Koska strategia perustuu tilastolliseen analyysiin, ei huonosti tunnettujen laitteiden tapauksissa sopivaa dataa ole saatavilla tarpeeksi. Liian usein kunnossapitotoimia tehtäessä voi turha laitteen purkaminen ja kokoaminen aiheuttaa ongelmia, eikä laitetta voi tällöin myöskään käyttää. Tämä voi johtaa ylimääräisiin korjauskustannuksiin sekä menetettyyn tuotantoon. (Starr et al. 2010, s. 12) Toisin kuin tilaan perustuvassa kunnossapidossa, ei laitteen tai komponentin kuntoa oteta huomioon itse kunnossapitohetkellä, jolloin tehokkuus ja hyödyllisyys kärsivät juurikin tilaan perustuvaan kunnossapitotoimintaan verrattuna. (Lee et al. 2006, s. 477)

4.2.2 Mahdollisuuden mukainen kunnossapito

Mahdollisuuden mukainen kunnossapito (OM, Opportunity Maintenance; Opportunistic Maintenance) on suunnitelman mukaisen kunnossapidon laajennus, jossa kunnossapito suunnitellaan ja toteutetaan mahdollisuuksien mukaan. Pääasialliset ongelmat suunnitelman mukaisessa kunnossapidossa liittyvät koneisiin ja laitteisiin, jotka liikkuvat – kuten junat ja ajoneuvot – sekä jatkuvasti käynnissä oleviin koneisiin ja laitteisiin – kuten kemialliset tehtaot ja ydinvoimalat. Tällaisten koneiden ja laitteiden osalta vaaditaan usein suunnittelua, mitä tehdä ennen seisokkia, sen aikana ja sen jälkeen. (Starr et al. 2010, s. 14) Mahdollisuuden mukaisessa kunnossapidossa kunnossapitotoimia suoritetaankin siten ja silloin, ettei se vaikuta järjestelmän toimintaan. Laitteen ollessa pois käytöstä, esimerkiksi seisokin aikaan kannattaa vaihtaa komponentteja, jotka tulisi joko tapauksessa pian vaihtaa, sillä tuotanto on jo pysähtynyt. (Ab-Samat & Kamaruddin 2014, s. 105)

Usein tilastollinen data on hyödyllinen todennuskeino sille, onko huolto tarpeellinen tehdä nyt vai seuraavan katkon aikana (Starr et al. 2010, s. 14). Mahdollisuuden mukainen kunnossapito toimiikin hyvin vain monimutkaisissa järjestelmissä, joissa eri komponenttien vikatilanteita ilmenee usein, ja joista löytyy tarpeeksi hyödyllistä dataa. Parhaimmillaan strategia parantaa järjestelmän kokonaiskäyttövarmuutta, vähentää tulevia ja potentiaalisia seisokkeja sekä lisää tuottavuutta. Sen haasteena on kuitenkin löytää juuri ne komponentit, jotka tulisi vaihtaa tai huoltaa. Usein komponentteja vaihdetaan turhaan tai kriittiset komponentit jäävät vaihtamatta, jotka aiheuttavat ylimääräisiä kustannuksia tilaan perustuvaan kunnossapitotoimintaan.

verrattuna. Kustannusten ja käyttövarmuuden optimointi sekä kunnossapitotoimien suunnittelu etukäteen on myös vaikeaa, sillä ei tiedetä, milloin vikatilanne tapahtuu, eikä mitä toimenpiteitä tulisi tehdä. (Ab-Samat & Kamaruddin 2014, s. 113-114)

4.2.3 Vikatilanteessa korjaus

Vikatilanteessa korjaus on perinteisesti käytetty kunnossapitostrategia, vaikkei sitä sinällään voi edes pitää kunnossapitona (Levrat et al. 2008, s. 409). Tässä strategiassa koneen tai laitteen annetaan mennä vikatilaan ennen kunnossapidon toimia. Vikatilanteessa korjaus toimiikin ainoastaan, jos vikatilän seuraukset ovat pieniä, tai kun vikatila, sen pituus tai korjauskustannukset eivät haittaa. Joskus vikatilannetta ei voi huomata kuin etsimällä vikaa, jolloin kyseinen strategia voi olla ainoa toimiva. Vikatilanteessa korjauksen etuina voidaan pitää suunnittelun helppoutta, sillä organisaation tulee vain mukautua vikatilanteiden esiintymistiheyteen, eikä työtä myöskään tarvitse aikatauluttaa. (Starr et al. 2010, s. 11)

Vikatilanteessa korjaamisessa on kuitenkin huomattavia heikkouksia erityisesti tilaan perustuvaan kunnossapitoon verrattuna. Vaaralliset ja kalliit vikatilojen seuraukset ovat yleisiä, erityisesti vikatilän tapahtuessa sopimattomaan aikaan. Kustannuksia lisäävät myös nopean korjauksen varmistamiseksi tarvittava suuri määrä varaosia, huomaamattomat komponenttien hajoamiset ja niistä johtuvat välilliset vahingot, seisokin aikana tarvittava suuri henkilöstömäärä tehtaalla ja helposti saatavilla sekä turhan työn muodossa korjausryhmän kapasiteettia suuremmat viat. Koneen tilasta menneisyydessä, nykytilasta tai tulevaisuuden tilasta ei myöskään ole tilaan perustuvasta kunnossapidosta poiketen tietoa. (Starr et al. 2010, s. 11)

4.2.4 Design out

Kunnossapitostrategiana design outissa eli uudelleensuunnittelussa vikatila huomioidaan korvaamalla viallinen prosessi vastaavalla tai päivitetyllä prosessilla tarkoituksena vähentää tai ehkäistä tulevia vikatilanteita. Uudelleensuunnittelua voidaan tarvita, kun laite tai prosessi toimii alkuperäisen kapasiteettinsa tai nopeutensa yläpuolella, vanhentuneet laitteet eivät tarjoa riittävää tietoa kapasiteetin laskemiseksi tai aiemmat komponenttien tai järjestelmien

ominaisuudet eivät vastaa suunniteltua. Kyseinen strategia on hyvin kattava, sillä monissa kunnossapidon toimissa suunnitellaan toistuvan vikatilanteen aiheuttavat komponentit uudelleen. Vaikka uudelleensuunnittelun tulisi ehkäistä tulevia hajoamisia, ei se toimi täysin itsenäisesti ja lisäksi tarvitaankin ehkäisevää tai tilaan perustuvaa kunnossapitoa. (Starr et al. 2010, s. 14)

4.3 Tilaan perustuvan kunnossapidon edut ja haasteet

Edellä esiteltyjen kunnossapitostrategioiden hyödyt sisältyvät lähes täysin tilaan perustuvaan kunnossapitoon. Lisäksi tilaan perustuva kunnossapito tarjoaa paremman kunnossapitotoimien suunnittelun esimerkiksi tuotannon ulkopuolelle, hankalien konerikkojen ja niistä johtuvien kalliiden välillisten vaurioiden välttämisen, tuotannon käytettävyyden ja käyttövarmuuden nousun vikatilanteiden tiheyden pienentyessä, varaosien tarpeen pienemisen sekä turhan työn välttämisen pitäen korjausryhmän pienenä ja taidokkaana. Optimaalisesti toteutettuna tilaan perustuvan kunnossapidon käyttö voikin johtaa huomattaviin tuotantokustannusten ja investointien vähentymisiin sekä laadun, voiton ja markkinaosuuden kasvuun, mikä tekee kunnossapidosta yrityksen voittojen edistäjän. (Starr et al. 2010, s. 15-16) Tilaan perustuvan kunnossapidon optimaalinen toteutus kuitenkin vaatii suurehkoja investointeja arvokkaisiin sensoreihin ja mittauslaitteisiin. Laitteiden kalleudesta johtuen Starr et al. (2010, s. 15-16) suosittelevat tilaan perustuvaa kunnossapitoa käytettävän vain yksiköissä, jotka ovat kriittisiä turvallisuuden, pääoma-arvon tai potentiaalisen tuotannon menetyksen osalta. Juuri kriittisissä yksiköissä tilaan perustuva kunnossapito voi tuoda suurimmat kustannussäästöt, sillä kriittisissä yksiköissä voi tapahtua katastrofisia onnettomuuksia, arvokasta pääomaa voi tuhoutua ja tuotantoa voidaan menettää. (Starr et al. 2010, s. 15-16)

Voimakkaasta kehityksestä huolimatta tilaan perustuvalla kunnossapidolla on vielä suuria puutteita. Suurin osa kehitetyistä ennustavista lähestymistavoista on sovellus- tai laitekohtaisia, eikä yleistä ja skaalautuvaa ennustuksen menetelmää tai työkaluja ole. Nykyisin kehitettävät menetelmät keskittyvät vian ennustamiseen, eikä niinkään järjestelmän suorituskyvyn tai kulumisen ennustamiseen. Ennustamisen yksityiskohtia tulisi kehittää eteenpäin. Useimpia kehitettyjä algoritmeja on käytetty vain laboratorio-olosuhteissa ilman vahvistusta teollisuudessa. (Lee et al. 2006, s. 478; Peng et al. 2010, s. 310-311) Teknologian halventuessa

(Jantunen et al. 2009) ja tutkimuksen kehittyessä voi tilaan perustuva kunnossapito, ja sitä kautta älykäs kunnossapito, yleistyä nykyaikaisissa yrityksissä.

5 ÄLYKKÄÄT TEKNOLOGIAT

Kunnossapidossa sovellusten ja tietokoneiden käyttö kasvoi huomattavasti pöytätietokoneiden yleistymisen myötä. Alun perin sovelluksia käytettiin pöytäkirjanpitoon sekä työn aikatauluttamiseen. 1980-luvulla asiantuntijajärjestelmät sekä muut tekoälyä käyttävät tekniikat alkoivat yleistyä kunnossapidossa. 1990-luvulla alkoi ilmestyä tutkimuksia muiden tekniikoiden sovelluksista, kuten neuroverkosta ja sumeasta logiikasta. Seuraavaksi kehitettiin hajautettu tekoäly sekä älykäs agenttitekniologia, joista ensimmäisestä tehtiin myös sovelluksia kunnonvalvontaan, kun taas agenttitekniologia saavutti yleisesti laajemman hyväksynnän. (Campos 2014, s. 233-234) Nykyisin uudet tieto- ja viestintätekniikat ovat hyvin tärkeitä älykkäälle kunnossapidolle monimuotoisista verkkoratkaisuista älykkäisiin sensoreihin ja komponentteihin (Iung et al. 2009, s. 221; Levrat et al. 2008, s. 408, 413-414; Muller et al. 2008, s. 1167).

5.1 Verkot

Teknologinen tuki älykkäälle kunnossapidolle koostuu intranetien, extranetien sekä internetin osista (Iung et al. 2009, s. 221; Levrat et al. 2008, s. 413). Nämä verkon osat mahdollistavat monimuotoisilla älykkäillä teknologioilla – kuten verkkotekniikoilla, uusilla sensoreilla, langattomalla kommunikaatiolla sekä mobiililaitteilla (Iung et al. 2009, s. 221) – älykkään kunnossapidon infrastruktuurin sekä sen toteutuksen. Toteutus pyrkii täyttämään asetetut vaatimukset käyttäen älykkäiden teknologioiden tukemia viestintä-, laskenta- ja säilöntätapoja. (Levrat et al. 2008, s. 413) Älykkäät teknologiat kasvattavat mahdollisuuksia hyödyntää monimuotoista ja erilaista dataa, käsitellä suurta määrää tietoa sekä toteuttaa yhteistoiminnallisia aktiviteetteja (Iung et al. 2009, s. 221; Levrat et al. 2008, s. 414; Muller et al. 2008, s. 1167). Älykkäät teknologiat ovatkin sitä kautta suuressa roolissa kunnossapidon päätöksenteon tukena (Levrat et al. 2008, s. 413).

Verkkotyöskentely toimii suuressa osassa älykkäässä kunnossapidossa (Starr et al. 2010, s. 20). Uudet verkkotekniikat ja protokollat mahdollistavat Levratin et al. (2008, s. 413-414) mukaan universaalien käyttöoikeuden itsenäisellä liitettävyydellä erilaisiin alustoihin avoimilla standardeilla. Koska verkko tukee multimediaa sekä vuorovaikutteisesti, että laajennettavasti,

voi siihen saumattomasti lisätä uutta sisältöä. Tietokantojen ja laitteiden teknologinen kehitys sallii käyttäjän pääsyn tietokantoihin ja sovelluksiin vaivattomasti käyttäjäystävällisen verkkokäyttöliittymän kautta mobiililaitteiden langattomilla yhteyksillä mistä vain (Levrat et al. 2008, s. 413-414; Starr et al. 2010, s. 19). Langattomat verkkotekniikat tuovat joustavuuden lisäksi myös kustannussäästöjä itse verkon rakentamisessa (Arnaiz et al. 2006, s. 14; Iung et al. 2009, s. 223; Levrat et al. 2008, s. 414). Datan lähetys, valvonta sekä kontrollointi verkon läpi helpottuvat langattomien teknologioiden, tietokoneistetun laskennan, etämittausten sekä laajakaistayhteyksien avulla. Nämä mahdollistavat tehtaan laitteiston jakaa omaa dataa ja tiedostoja sekä sallivat sen käytön etänä mistä tahansa (Iung et al. 2009, s. 223; Levrat et al. 2008, s. 414).

5.2 Työkalut

Erilaiset vianmäärityksen ja ennustamisen työkalut ja sovellukset ovat kriittisiä päätöksenteon apuvälineitä älykkäässä kunnossapidossa (Iung et al. 2009, s. 223). Monia innovatiivisia tuotteita ja komponentteja on jo olemassa älykkään kunnossapidon integraatiota varten (Iung et al. 2009, s. 223), ja edulliset, kaikkialle ulottuvat tietotekniset työkalut onkin jo omaksuttu osiksi kunnossapidon järjestelmäratkaisuihin (Starr et al. 2010, s. 19). Kunnossapidon järjestelmille yhteensopivuus on avaintekijä. Aiemmin laitteiston ja ohjelmiston valinnassa on tehty virheitä, mitkä ovat usein johtaneet kömpelöihin tai toimimattomiin yhteyksiin kunnossapidon ja teknisten järjestelmien välillä. Nykyisin laitteiston ja ohjelmiston yhteensopivuus on perusedellytys jatkokehitettyjä ja tulevia järjestelmiä myöten. Järjestelmiltä myös vaaditaan tiedon säilyttämistä pitkän aikaa, erityisesti tiedot suunnittelusta ja asennuksesta, varaosista, huoltohistoriasta sekä valvonnasta tulisi olla saatavilla jopa vuosikymmenien ajan. (Starr et al. 2010, s. 19)

Älykkään kunnossapidon toiminta vaatii monia älykkäitä teknologioita ja komponentteja. Useat näistä on kehitetty alun perin erilaiseen tarkoitukseen, mutta niiden integraatio tuo kuitenkin lisäarvoa kunnossapidon toimien kehittämiseen (Iung et al. 2009, s. 223; Starr et al. 2010, s. 26). Älykkäälle kunnossapidolle ominaisen tilaan perustuvan kunnossapidon avaintekijöitä ovat erilaiset sensorit. Näitä ovat esimerkiksi tavalliset ja langattomat sensorit, sensoriverkot sekä älykkäät sensorit, joissa voi olla itsenäiset virtalähteet, muisti, analoginen vahvistin ja

konvertteri. (Iung et al. 2009, s. 223; Starr et al. 2010, s. 26-28; Jantunen et al. 2010b, s. 202-203) Kuten sensorit, myös RFID-sirut (Radio Frequency Identification Device) ovat kiinni itse laitteessa. RFID-sirut tukevat toimijan ja komponentin tunnistamista, tavanomaisen datan säilömistä sekä aiempien toimien jäljittämistä. RFID-sirun toimintaa voidaan täydentää esimerkiksi GPS-paikannuksella, jolloin tiedetään toimijan tai työkalun sijainti. (Iung et al. 2009, s. 223; Jantunen et al. 2010b, s. 202) Myös mikrosysteemit (MEMS, Micro Electro Mechanical Systems) – eli komponentit, joissa yhdistyy useita erilaisia antureita ja mittaustapoja – voivat tulevaisuudessa olla tavanomaisia komponentteja älykkään kunnossapidon ratkaisuisissa (Starr et al. 2010, s. 28-31; Jantunen et al. 2010b, s. 205).

Innovatiiviset kommunikointilaitteet, kuten heijastusnäytöt ja puheohjaus helpottavat älykkäiden kunnossapitojärjestelmien käyttöä (Iung et al. 2009, s. 223). Lisäksi erilaiset visualisointisovellukset ja –teknologiat auttavat käyttäjää hahmottamaan laitteistoa ja tehdasta sekä kunnossapidon kohdetta paremmin (Oliveira et al. 2013, s. 385). Käyttöä helpottavat myös mobiililaitteet, kuten älypuhelimet, tabletit ja PDA-laitteet, sillä ne lisäävät käyttäjien liikkuvuutta ja joustavuutta itse paikan päällä tarjoten tarvittavat tiedot suoraan käyttäjälle missä vain (Iung et al. 2009, s. 223; Jantunen et al. 2010b, s. 204-205).

Mallinnusteknologioiden kehittyminen on mahdollistanut tuotteen arvioinnin sen elinkaaren eri vaiheissa. Mallinnuksen avulla voidaan analysoida esimerkiksi mahdollisia ongelmia suunnitteluvaiheessa tai diagnosointia tuotantovaiheessa (Holgado & Macchi 2014 s. 3). 3D-mallinnus voi auttaa myös työntekijöitä laitteen äärellä, jolloin työntekijä voi saada kuvan laitteesta esimerkiksi älypuhelimensa. Älykkäät sensorit voisivat myös välittää 3D-malliin tietoa mahdollisesta viasta (Jantunen et al. 2010b, s. 204).

Erilaiset standardit varmistavat tietoteknisten komponenttien sekä älykkään kunnossapidon ratkaisujen välisen integraation ja yhteensopivuuden. Verkkopalvelut valvontaan, vianmääritykseen, ennustamiseen ja aikatauluttamiseen perustuvat juuri teknisiin standardeihin ja protokolleihin, joita käytetään tiedon siirtoon sovellusten välillä heterogeenisessä ympäristössä. Näiden standardien ja protokollien avulla voidaan toteuttaa kunnossapidon tietojärjestelmä, jolla voi valvoa ja johtaa ennakoivan kunnossapidon toimia ja linkittyä mobiiliteknologioihin tiedon noutoa tai kunnossapidon toimen lataamista varten. (Iung et al. 2009, s. 223)

Standardoiminen myös helpottaa järjestelmän osien päivittämistä, lisää toimittajajärjestelmiä, tarjoaa enemmän vaihtoehtoja teknologian nopeampaan kehittymiseen sekä alentaa komponenttien hintoja (Campos 2014, s. 234).

6 ÄLYKKÄÄN KUNNOSSAPIDON KYVYKKYYDET JA HAASTEET

Älykästä kunnossapitoa pidetään koko yrityksen päätöksenteon apuvälineenä ja sisäisen integraation mahdollistajana (Aboelmaged 2014, s. 641; Crespo Marquez & Lung 2008, s. 63; Jantunen et al. 2010a, s. 2; Jantunen et al. 2009). Älykäs kunnossapito on myös toiminnan tehokkuuden valvonnan sekä elinkaariajattelun ja käyttövarmuuden maksimoimisen myötä suuri kestävä kehityksen edistäjä (Starr et al. 2010, s. 23-25). Perinteiseen kunnossapitoon verrattuna älykäs kunnossapito toimii enemmän strategisena työkaluna suorituskyvyn kontrolloinnissa (Lung et al. 2009, s. 220-221) ja kilpailukyvyn parantamisessa vikatilanteiden ja suunnittelemattomien seisokkien vähenemisen sekä tuottavuuden ja tuotteiden laadun paranemisen myötä (Peng et al. 2010, s. 297; Starr et al. 2010, s. 5). Älykäs kunnossapito ei ole kuitenkaan tehnyt suurta vaikutusta teollisuuteen, huolimatta sen tarjoamista hyödyistä perinteiseen kunnossapitoon verrattuna (Emmanouilidis et al. 2011).

Taulukko 2 Älykkään kunnossapidon suurimmat edut ja niihin liittyvät haasteet

Etä	Suurin haaste
Etäkäyttö	Turvallisuus, luotettavuus
Integraatio	Järjestelmien erilaisuus, puuttuvat rajapinnat, kokonaisvaltainen muutos
Reaaliaikaisuus	Teknologian kalleus ja puutteet
Ennakoivuus	Puutteelliset ja heterogeeniset mallit ja prosessit
Dokumentointi	Tiedon määrä
Organisaation oppiminen	Kokonaisvaltainen muutos, koulutuksen määrä
Kilpailukyvyn paraneminen	Käyttöönoton vaikeus
Kunnossapidon kehitys	Ei ennakkotapauksia, ei vertailukohtia

Tässä luvussa käydään läpi älykkään kunnossapidon kyvykkyyksiä ja haasteita perinteiseen kunnossapitoon verrattuna kunnossapidon lajien ja strategioiden, kunnossapidon tuen ja työkalujen sekä aktiviteettien osalta. Lisäksi luvussa pohditaan älykkään kunnossapidon suurta tietomäärää. Taulukossa 2 on esitetty älykkään kunnossapidon suurimpia etuja sekä niihin liittyviä haasteita.

6.1 Kunnossapidon lajit ja strategiat

Älykäs kunnossapito tarjoaa uusia kunnossapidon lajeja ja strategioita, joista tärkeimpinä voidaan pitää etäkäyttöä, integraatiota ja yhteistoiminnallisuutta, reaaliaikaisuutta sekä ennakoivuutta (Crespo Marquez & Iung 2008, s. 62-63; Muller et al. 2008, s. 1169-1171). Uusien verkkotekniikoiden avulla käyttäjät voivat kirjautua millä tahansa laitteella mistä vain verkon välityksellä älykkään kunnossapidon järjestelmään, linkittyä tehtaan koneisiin sekä analysoida ja ohjata niitä (Crespo Marquez & Iung 2008, s. 62; Muller et al. 2008, s. 1169). Etäkäyttö mahdollistaa keskitetyt asiantuntijakeskukset kaukana itse tehtaista (Crespo Marquez & Iung 2008, s. 62-63; Muller et al. 2008, s. 1169-1170) vähentäen tarvittavaa henkilöstöä ja siten myös kustannuksia (Muller et al. 2008, s. 1169-1170). Muller et al. (2008, s. 1170) pitävätkin juuri etäkäyttöä yhtenä älykkään kunnossapidon tärkeimmistä eduista. Etäkäytöllä on kuitenkin rajoitteita, joista suurin on verkon turvallisuus (Crespo Marquez & Iung 2008, s. 64; Muller et al. 2008, s. 1172). Tällöin joudutaan usein tekemään kompromisseja toiminnallisuuden, suorituskyvyn ja helppokäyttöisyyden sekä turvallisuuden ja luotettavuuden välillä (Muller et al. 2008, s. 1172). Toisaalta myös henkilöstön on oltava tarpeeksi osaavaa käyttämään älykästä järjestelmää sekä tekemään nopeita päätöksiä suuresta määrästä tietoa (Crespo Marquez & Iung 2008, s. 64; Muller et al. 2008, s. 1172).

Älykkään kunnossapidon alusta on ennennäkemättömän läpinäkyvä ja tehokas koko teollisuudessa ja se voi toimia pätevänä tukena liiketoimintaprosessien integraatiolle. Vahva integraatio nopeuttaa prosesseja, helpottaa suunnittelua, synkronoi valmistuksen ja kunnossapidon ja täten parantaa prosessien laatua. Älykkään kunnossapidon yhteistoiminnallisuus mahdollistaa maantieteellisesti hajautetut alijärjestelmät ja toimijat, jolloin myös henkilötekijöiden, yritysalueiden ja toimitusketjun eri yritysten välinen yhteistoiminta onnistuu. (Crespo Marquez & Iung 2008, s. 63; Muller et al. 2008, s. 1170) Muller et al. (2008, s. 1170) toteavat älykkään kunnossapidon myös helpottavan tiedon kaksisuuntaista kulkua päätösten tekemisessä sekä prosessien suunnittelussa kaikilla liiketoiminnan tasoilla ja täten automatisoivan tarkan ja tarpeellisen tiedon toimitusta päätösten tekijöille siitä, mihin kunnossapidon aktiviteettiin resursseja tulisi keskittää. Haasteita integraation ja yhteistoiminnan toteuttamiseen aiheuttaa useat järjestelmäriippumattomuuteen liittyvät ongelmat, kuten tiedonsiirron mekanismit, kommunikaatioviestien mallit, tiedonsiirron

protokollat sekä turvallisen tietoverkon rakentaminen (Crespo Marquez & Iung 2008, s. 64; Muller et al. 2008, s. 1172-1173). Jotta älykäs kunnossapitojärjestelmä saadaan toimimaan koko toimitusketjussa aina toimittajalta asiakkaalle, vaatii se tietoverkkojen rakenteellista yhtenäistämistä sekä yhtiön kunnossapidon, talouden ja liiketoiminnan järjestelmien yhtenäistämistä niiden keskinäistä kommunikointia varten (Muller et al. 2008, s. 1172-1173).

Valvonnan reaaliaikaisuus sekä ohjelmoitavat hälytykset älykkäissä kunnossapitojärjestelmissä mahdollistavat mukaan nopean vasteajan sekä mahdollisuuden puuttua ongelmaan optimaalisesti. Älykäs kunnossapito yhdistettynä huippunopeisiin kommunikointiyhteyksiin sisältääkin lähes rajattoman potentiaalisen perinteisen kunnossapidon ohjauksen yksinkertaistamiseen. (Crespo Marquez & Iung 2008, s. 63; Muller et al. 2008, s. 1170-1171) Täydellinen reaaliaikainen valvonta on kuitenkin kallista, eikä sitä välttämättä kannata suorittaa kuin toiminnan kannalta kriittisissä kohteissa (Starr et al. 2010, s. 15-16).

Älykkäissä kunnossapidossa käytetään pääasiassa ennustavia kunnossapidon tekniikoita, kuten laitteen tilan valvontaa ja jäljellä olevan käyttöiän ennustamista (Crespo Marquez & Iung 2008, s. 63). Näillä tekniikoilla pyritään välttämään odottamattomia häiriöitä ja hajoamisia ja sitä kautta parantamaan tuottavuutta (Muller et al. 2008, s. 1171). Kyseiset tekniikat myös vähentävät laitteiden ja tuotteiden elinkaarikustannuksia sekä toimintojen ja kunnossapidon logistiikkaa (Crespo Marquez & Iung 2008, s. 63). Tehokas ennustaminen on kuitenkin huomattavasti vianmääritystä hankalampaa puutteellisten ja heterogeenisten prosessien ja mallien vuoksi (Crespo Marquez & Iung 2008, s. 63, 64; Muller et al. 2008, s. 1173).

6.2 Kunnossapidon työkalut

Kunnossapidon työkalujen osalta älykäs kunnossapito tarjoaa tehokkaampaa vika-analyysiä (Crespo Marquez & Iung 2008, s. 63; Muller et al. 2008, s. 1171), asiakaspalvelulähtöisyyttä (Muller et al. 2008, s. 1172) sekä monipuolisempaa dokumentointia (Crespo Marquez & Iung 2008, s. 63; Muller et al. 2008, s. 1171-1172). Sensoriteknologian, signaaliprosessoinnin sekä tieto- ja viestintätekniikoiden nopea kehitys parantavat kunnossapidon henkilöstön ymmärrystä vikojen ja häiriöiden syistä, monitorointia ja signaalianalyysiä sekä materiaali-, suunnittelu- ja tuotantotekniikoita ja sitä kautta mahdollistavat siirtymän vianmäärityksestä kulumisen

valvontaan (Crespo Marquez & Iung 2008, s. 63; Muller et al. 2008, s. 1171). Verkkopalvelujen sekä langattomien viestintäteknikoiden käyttö on muuttamassa valmistavia yrityksiä palveluliiketoiminnan suuntaan tukemaan asiakkaitaan missä ja milloin vain (Muller et al. 2008, s. 1171-1172).

Älykkään kunnossapidon alusta tarjoaa läpinäkyvän, saumattoman ja automatisoidun tiedonvaihtoprosessin kaikkeen dokumentaatioon yhtenäisellä tavalla riippumatta tiedon lähteestä, laitteiston valmistajasta tai loppukäyttäjistä. Lisäksi pullonkaulat liiketoiminnan järjestelmien ja tuotannon välillä voidaan poistaa uusien teknologioiden avulla muuttamalla raaka data laitteen kunnosta sekä tuotteen laadusta ja prosessin toiminnasta suoraan hyödynnettäväksi tiedoksi dynaamisen päätöksenteon tueksi. Älykkään kunnossapidon alustan tulee kuitenkin tukea varastoja ja toimintojen opastusta sekä tarjota pääsy ulkopuolisiin katalogeihin. Lisäksi sen tulee kerätä, taltioida ja säilöä tietoa liittyen heikentymisen malleihin, osiin laitteessa, tiheyteen sekä aikaan ja paikkaan, ennaltaehkäisyyn vaadittavaan aikaan ja kustannuksiin sekä kunnossapidon käytäntöihin. Tämän yhteistyöhön perustuvan kunnossapidon alustan toimivuus vaatii moniajaja ja useita käyttäjiä tukevan ympäristön, jonka nopeaan ja helppokäyttöiseen tietokantaan pääsee asiantuntijat ympäri maailmaa helposti käsiksi noutamaan ja jakamaan tietoa. (Crespo Marquez & Iung 2008, s. 63-64; Muller et al. 2008, s. 1171-1173)

Älykäs kunnossapito mahdollistaa koneiden ja kaluston diagnosoinnin etänä. Sensorit ja mittauslaitteet koneissa lähettävät dataa yrityksen sisäisen kunnossapito-organisaation lisäksi etäiseen paikkaan, jossa asiantuntijat voivat tulkita koneen toimintakuntoa ja ohjeistaa paikallista kunnossapito-organisaatiota. Organisaation oppimisen kannalta ulkoistetut etädiagnostiikkajärjestelmät tuottavat saataville uutta tietoa, joka luo osaamista sekä palveluntarjoajalle, että asiakkaalle. Organisaatio hyötyy myös innovaatioiden näkökulmasta. Uusi osaaminen voi tuottaa yritykselle uusia palveluita tai uusia näkemyksiä laitteiston kunnossapitoon. (Jonsson et al. 2010, s. 211-212, 216)

6.3 Kunnossapidon aktiviteetit

Älykäs kunnossapito tarjoaa paranneltuja kunnossapidon aktiviteetteja. Näistä tärkeimpinä voidaan pitää vianmäärityksen ja korjauksen (Crespo Marquez & Iung 2008, s. 63-64; Muller et al. 2008, s. 1172) sekä kehittämisen parantamista perinteisestä kunnossapidosta (Muller et al. 2008, s. 1172). Jotkin älykkään kunnossapidon aktiviteetit ovat kuitenkin haastavia toteuttaa resurssivaatimusten vuoksi. Valvonnan toteuttaminen älykkään kunnossapidon järjestelmissä kehittyneiden sensorien verkostoa sekä muita älykkäitä teknologioita, jotka voivat olla hyvinkin kalliita. Lisäksi älykäs kunnossapito suuren pääoman ja tuotannon laitoksilla vaatii yleispätevän järjestelmän, joka tarjoaa integroidun valvontaratkaisun sallien erilaiset abstraktio- ja esittelytasot ollen räätälöitävissä useanlaisille sovelluksille. (Crespo Marquez & Iung 2008, s. 64; Muller et al. 2008, s. 1172)

Älykäs kunnossapito tarjoaa asiantuntijoille mahdollisuuden toteuttaa ajantasaista vianmääritystä, jakaa kokemuksiaan toisilleen ja ehdottaa käyttäjille korjauskeinoja yllättävien vikatilanteiden ilmetessä sekä tarvittaessa eristää tai lukita laitteita huomattavasti nopeammin kuin perinteisillä kunnossapitotekniikoilla. Älykkään kunnossapidon myötä vasteajat ja seisokit pienenevät huomattavasti suorien yhteyksien myötä sekä diagnoosit ja kunnossapito sekä tehdyn työn ja korvattujen osien dokumentointi tapahtuu välittömästi. (Crespo Marquez & Iung 2008, s. 63-64; Muller et al. 2008, s. 1172) Älykäs kunnossapito tarjoaa huomattavasti perinteistä kunnossapitoa monipuolisemmin tietoa tuotteesta koko sen elinkaaren ajalta, mikä yhdessä sen käsittelyyn vaadittavista työkaluista, joita älykäs kunnossapito tarjoaa, parantaa tuotteen kunnossapidon ja tuen kehitystä läpi tuotteen elinkaaren (Muller et al. 2008, s. 1172). Suurimpana haasteena tässä voidaan pitää tiedon oikeanlaista hyödyntämistä oppimiseen ja kehitykseen yrityksessä (Crespo Marquez & Iung 2008, s. 64-65; Muller et al. 2008, s. 1173).

6.4 Tiedon määrä

Älykkään kunnossapidon teknologioiden tulee tukea sen käyttäjiä, sekä helpottaa yhä suurempien tietomäärien hallintaa (Oliveira et al. 2013, s. 385). Kasvava tiedon määrä on kuitenkin haaste älykkään kunnossapidon käytössä; RFID-tarrat ja sensorit keräävät yhä enemmän tietoa, jolloin jopa vaatimaton tarrojen käyttö saattaa muodostua ongelmaksi

yhtäyksissä, joissa teknologinen taso ei ole riittävä. (Jantunen et al. 2010b, s. 202). Lisäksi älykkään kunnossapidon järjestelmä vaatii dokumentointia varten nopean tietokannan esimerkiksi heikentymismallien ja –osoiden sekä heikentymisen yleisyyden tietojen säilömiseen (Crespo Marquez & Iung 2008, s. 64-65). Tällöin yrityksen tulee ottaa investointikustannuksissa huomioon pelkkien komponenttien lisäksi myös laitteiston ja järjestelmien uusiminen.

Älykkään kunnossapidon järjestelmän rakentamisessa voi esiintyä useita integraatioon liittyviä ongelmia alustojen erilaisuuden vuoksi. Nämä haasteet, kuten tiedonsiirtomekanismit, viestien rakenteet, tiedonsiirtoprotokollat sekä verkon turvallisuus, tulee ratkaista järjestelmän sujuvan toimivuuden varmistamiseksi. Myös etäohjattavuus asettaa haasteita yhteyksien turvallisuudelle ja luotettavuudelle (Crespo Marquez & Iung 2008, s. 64-65). Tiedon siirtämistä verkkoon on hidastanut etenkin suuri määrä paperimuodossa olevaa tietoa, jonka siirtäminen verkkoon on hidasta. (Jantunen et al. 2010b, s. 205)

6.5 Käytön haasteet

Parhaat älykkään kunnossapidon ratkaisut perustuvat yleensä kalliisiin ja useimmiten räätälöityihin valvontateknologioihin, jotka ovat epäkäytännöllisiä asentaa suuressa mittakaavassa edullisiin laitteisiin, mikä taas rajaa niiden käyttöä suuriin laitoksiin ja kriittisten laitteiden valvontaan (Lazzarini et al. 2013, s. 732). Älykkään kunnossapidon ratkaisuja ei ole käytössä yleisesti, joten ennakkotapaukset sen toimivuudesta puuttuvat, eikä yrityksissä uskalleta olla edelläkävijöitä kunnossapidossa. Näin ollen myös menestystarinat puuttuvat. (Jantunen et al. 2010b, s. 208) Käyttöönottoa hankaloittaa myös erityisesti tilaan perustuvan kunnossapidon tutkimuksen tapauskohtaisuus. Lähes mikään tutkimus ei esitä yleispätevää ja helposti sovellettavaa älykkään kunnossapidon mallia teollisuudelle, mikä pakottaa yritykset ottamaan käyttöön huomattavasti kalliimmat räätälöidyt järjestelmät tai pitäytymään perinteisemmissä kunnossapitostrategioissa. (Lee et al. 2006, s. 478; Peng et al. 2010, s. 310-311)

Vaikka älykkään kunnossapidon jokaisella osa-alueella on tehty merkittäviä edistysaskelia, on tutkimusten ja käytännön teollisuuden välillä Jantunen et al. (2009) mukaan kuiluja.

Langattomien verkkojen häiriöt ja sironta aiheuttavat ongelmia suorituskyvyssä sekä palvelujen integraatio älykkään kunnossapidon, kunnossapidon johtamisjärjestelmien ja toiminnanohjausjärjestelmien välillä on vielä puutteellinen. Lisäksi tiedon yhteentoimivuus erilaisten järjestelmien välillä aiheuttaa haasteita. Operatiivisella tasolla älykkäiden sensorien tulisi olla vieläkin pienempiä laskentatehon ja erityisesti energiatehokkuuden kasvaessa. Tätä voidaan kuitenkin pitää selkeänä kehityssuuntana yleisestikin teknologiassa. (Jantunen et al. 2009)

Älykäs kunnossapito vaatiikin kehitystä, jotta se saadaan onnistuneesti käyttöön yrityksissä. Han & Yang (2006, s. 579) listaavat muutamia tärkeimpiä kehityskohteita älykkääseen kunnossapitoon; älykkäiden sensorien ja muiden seurantalaitteiden tulisi kehittyä edelleen kustannustehokkuuden saavuttamiseksi. Lisäksi valmiiksi asennettujen sensorien pitäisi muuttua vakiovarusteeksi suurissa laitteissa, kuten moottoreissa, pumpuissa ja turbiineissa. Kunnossapidon tulisi myös yhdistyä kokonaisuutena paremman luotettavuuden saavuttamiseksi. Myös integraation lisääntyminen ja yleisten standardien hyväksyminen kunnossapidon järjestelmissä on tärkeää.

7 ÄLYKÄS KUNNOSSAPITO YRITYKSESSÄ

Älykästä kunnossapitoa ei ole vielä käytetty laajassa mittakaavassa yritysmaailmassa, sillä se on vasta kehitysvaiheessa. Sen tarjoamia mahdollisuuksia on kuitenkin selvitelty erilaisissa yrityksissä ja lisäksi sen käyttöä yrityksissä on kuitenkin jo kokeiltu esimerkiksi Dynamite-projektiin osallistuneissa yrityksissä, jotka olivat FIAT CRF, Volvo, Goratu ja Martechnic (Mascolo et al. 2010, s. 391-392). Saadut tulokset vaihtelivat yritysten kesken, mutta kaikissa tapauksissa kokeilu todettiin onnistuneeksi.

FIAT:n osalta tulokset olivat erittäin positiivisia. Sen tutkimuskeskuksessa toteutetussa kokeilussa testattiin 25 Dynamiten järjestelmää, laitteistoa ja palvelua ja saatiin hyviä tuloksia sekä teknisesti että taloudellisesti, vaikka järjestelmien integrointi olikin oletetun haastavaa. Volvo testasi sensoreita öljyn mittaukseen tehtaansa tuotantolinjalla. Asennetut järjestelmät ja laitteistot toimivat hyvin laitoksessa, mutta ongelmiakin syntyi; öljyvirtaa jouduttiin säätämään sensorien mukaisesti, mutta silti öljyvirtauksessa tapahtuvat muutokset tekivät sensoreista saadun tiedon tulkinnan haastavaksi. Goratu testasi muutamia Dynamiten komponentteja sekä yhteyksiä sen tietokantaan. Yritys sai sensorien avulla suuren määrän arvokasta tietoa hydraulikka- ja jäähdytysjärjestelmiinsä liittyen. Lisäksi verkkopalvelut mahdollistivat diagnosoinnin ja seurannan internetissä, mikä oli ennen ollut mahdotonta. Myös kämmentietokoneiden käyttö todettiin mielekkääksi. Martechnic testasi simulointimallia suuren rahtilaivan tapauksessa. Turvallisuussyistä kokeilua ei tehty oikeassa laivassa, vaan sen testattavan alueen jäljitelmässä. Saadut tulokset olivat melko hyviä etenkin mittaavien sensorien osalta. (Mascolo et al. 2010, s. 392-393).

7.1 Käyttöönotto

Onnistunut älykkään kunnossapidon käyttöönotto vaatii kaikkien kunnossapitoon liittyvien toimintojen tehokkaan ja täydellisen integraation (Jantunen et al. 2010a, s. 3). Tällainen laajamittainen uudistus saattaa hidastaa yritysten siirtymistä älykkääseen kunnossapitoon. Aboelmagedin (2014, s. 642-644) mukaan yrityksen valmiuteen ottaa käyttöön älykäs kunnossapito vaikuttavat positiivisesti teknologinen infrastruktuuri ja pätevyys, odotetut älykkään kunnossapidon hyödyt, kunnossapidon tärkeys yrityksessä, yrityksen koko sekä

kilpailupaineet. Vastaavasti negatiivisesti valmiuteen vaikuttaa odotetut älykkään kunnossapidon haasteet (Aboelmaged 2014, s. 643). Kajko-Mattsson et al. (2011, s. 568) esittelevät älykkään kunnossapidon käyttöönottoon sekä käyttämiseen liittyviä haasteita, jotka käsittelevät suurelta osin koko kunnossapidon uudelleenjärjestelyä ja älykkään kunnossapidon johtamista. Uudelleenjärjestelyn kohteita ovat muun muassa kunnossapidon organisaatio sekä kunnossapidon palvelujen kehittämiseen käytetyt linkaariprosessit. Johtamisessa tulisi ottaa huomioon älykkään kunnossapidon luoma uudenlainen toimintaympäristö.

Kajko-Mattsson et al. (2011, s. 556) esittävät älykkään kunnossapidon konseptin elintärkeiksi komponenteiksi määritelmän, liiketoiminnan, organisaation, tuotteen, palvelun, metodiikan, teknologian, tiedon, asiakkaan sekä opettamisen ja koulutuksen. Nämä komponentit muodostavat monimutkaisen kokonaisuuden, joka tulisi ottaa huomioon siirryttäessä älykkääseen kunnossapitoon teollisuudessa. Erityisesti sidosryhmien tieto ja taito ovat Kajko-Mattssonin et al. (2011, s. 567) mukaan organisaation tärkein voimavara. Mikäli henkilöstöä ei ole koulutettu tarpeeksi, eivät he voi suorittaa velvollisuuksiaan tyydyttävällä tavalla tai hyödyntää älykkään kunnossapidon ratkaisuja tehokkaasti.

Älykkään kunnossapidon käyttöönottoa voidaan myös tarkastella erilaisten viitekehysten avulla. Iungin et al. (2009, s. 221-223) ja Levratin et al. (2008, s. 414-423) esittelemän viitekehysten myötä on mahdollista saada näkemys älykkään kunnossapidon konseptin kokonaisvaltaisuudesta. Tämä onnistuu erityisesti tarkasteltaessa viitekehysten abstraktiotasoja: strategista visiota, älykkään kunnossapidon liiketoimintaprosesseja, älykkään kunnossapidon organisaatiota, palvelu- ja data-arkkitehtuuria sekä älykkään kunnossapidon tietoteknistä infrastruktuuria. Älykkään kunnossapidon käyttöönotto vaatii kuitenkin täydellistä tiedon, järjestelmien ja prosessien integraatiota komponenttien ollessa maantieteellisesti hajautettuja, ja erilaiset tieto- ja viestintäteknologiat ovatkin tällöin suuressa roolissa. (Campos 2014, s. 235-237)

7.2 Älykäs kunnossapito päätöksenteon tukena

Teollisen kunnossapidon päätökset sisältävät laitteistoon, kuluihin ja henkilöstöön liittyviä riskejä, ja perustuvat usein epätarkkaan dataan. Silti päätökset tehdään nykyisin lähes

ainoastaan ihmisten toimesta huomioiden samalla riskien lisäksi rajatut resurssit, fyysiset rajoitteet sekä lain ja poliittisten päätösten vaatimukset. Nykyinen tutkimustyö pyrkii tarjoamaan automatisoidun avun päätöksentekoprosessiin, jossa järjestelmä löytää yhteyksiä erilaisesta datasta ja myös selviää tiedon puutteesta. (Starr et al. 2010, s. 25) Nämä lasketut ehdotukset tarjotaan Starrin et al. (2010, s. 25) mukaan aina lopulliselle päätöksen tekijälle, ihmiselle. Tieto on yksi älykkään kunnossapidon avainresursseista ja kriittinen tukeva osatekijä kunnossapidon prosesseissa. Jokainen kunnossapidon toimi vaatii tietoa ja kokemusta, ja älykkään kunnossapidon tehokas toteuttaminen vaatii täten hyvää tiedon johtamista. (Guo et al. 2013, s. 1847)

Päätökset milloin ja miksi pysäyttää tuotantolaitte sekä päätösten kustannustehokkuus ovat tärkeitä tuottavuuden kannalta erityisesti aloilla, jossa seisokkiaika on hyvin kallista. Näissä tapauksissa järjestelmä, joka tuottaa luotettavaa dataa kustannustehokkuuden ja dynaamisen kunnossapidon saavuttamiseksi, on hyvin tärkeä yrityksen tuottavuuden ja kilpailukyvyn kannalta. (Arnaiz et al. 2010, s. 77) Tällaisessa tilanteessa älykkään kunnossapidon järjestelmä voi olla erittäin toimiva ratkaisu.

Päätöksenteon tukisysteemit parantavat yksilön päätöksentekoa tarjoamalla helposti käyttöön ongelman tunnistuksen ja rakenteen, tiedon johtamisen, tilastolliset työkalut sekä tiedon soveltamisen. Tällainen järjestelmä mahdollistaa useammat vaihtoehdot, lisää tietoisuutta päätöksentekoprosessin puutteista sekä auttaa päätöksen tekijää tekemään toimivia ja tehokkaita päätöksiä monimutkaisissa tilanteissa (Borissova & Mustakerov 2013). Järjestelmä voisi käyttää apunaan kunnossapidon päätöksenteon tukityökaluja, joita Ni & Jin (2012, s. 412-414) listaavat artikkelissaan. Nämä työkalut antavat apua seuraavien kunnossapitoon liittyvien ongelmien ratkaisemiseksi:

- Tuotannon pullonkaulojen, joissa yhden laitteen hajoamien johtaa koko tuotantolinjan pysähtymiseen, havaitseminen ja ymmärtäminen
- Kunnossapidon mahdollisuuksien arviointi, eli milloin kunnossapitoa kannattaa tehdä, että se vaikuttaisi mahdollisimman vähän tuotantoon
- Kunnossapidon työtehtävien priorisointi siten, että kunnossapidon tehtävät tehdään siinä järjestyksessä, jossa seisokit ovat mahdollisimman lyhyet

- Ennaltaehkäisevän kunnossapidon muuttaminen vapaaseen aikatauluun jaksollisesta, jotta laitteen rikkoutuessa sen korjaamisen jälkeen ei tule heti aikataulutettua ennaltaehkäisevää kunnossapitoa
- Kunnossapidon henkilöstön järkevän määrän arviointi, sillä työvoimakulut voivat olla jopa 80 % kunnossapitokustannuksista.

8 ÄLYKKÄÄN KUNNOSSAPIDON TULEVAISUUS

Vaikka tieto- ja viestintäteknikoiden hyödyntäminen teollisuuden kunnossapidon toimissa tarjoaa älykkäälle kunnossapidolle mahdollisuuden yleistyä ja kehittyä, on se silti pääasiassa riippuvainen juuri tieto- ja viestintäteknikoiden kehityksestä (Haftor et al. 2011, s. 601). Suuri osa älykkään kunnossapidon teknologioista onkin jo olemassa ja niiden käyttö olisi myös taloudellisesti järkevää. Niiden käyttöönotto on kuitenkin ollut varovaista, sillä ennakkotapauksia käyttöönotosta ei ole ollut. Edelläkävijöiden menestys kuitenkin rohkaisee muitakin ottamaan uusia teknologioita ja menetelmiä käyttöön. (Jantunen et al. 2010b, s. 208)

8.1 Käyttö

Älykkääseen kunnossapitoon liittyvien työkalujen, laitteiden ja teknologioiden halventuminen johtaa yhä suurempaan älykkään kunnossapidon omaksumiseen nykyaikaisissa yrityksissä. Voidaankin olettaa älykkään kunnossapidon kasvavan jokapäiväiseksi käytännöksi teollisuudessa, mikäli sen tarjoamat ratkaisut ovat edullisia ja kustannustehokkaita investointeja sekä integroituvat hyvin nykyisiin ja tuleviin järjestelmiin, käytäntöihin ja teknologioihin. (Jantunen et al. 2009) Tieto- ja viestintäteknikoiden kehittyessä ja halventuessa tullaan kalliit räätälöidyt järjestelmät korvaamaan autonomisilla ”plug and play” –sensoreilla (Kärkkäinen 2014). Näin ollen älykäs kunnossapito voi olla paras ratkaisu myös suuressa mittakaavassa, halvoissa laitteissa, eikä vain kriittisissä, arvokkaissa koneissa (Lazzarini et al. 2013, s. 732). Myös mobiililaitteiden hinnat tulevat laskemaan, minkä lisäksi niiden käyttö helpottuu ja ne sopivat paremmin yhteen muiden järjestelmien kanssa sekä niiden potentiaalia yrityskäytössä aletaan ymmärtämään, jolloin voidaan pitää niiden käytön yleistyvän lähitulevaisuudessa (Jantunen et al. 2010b, s. 204).

Tulevaisuudessa älykkäässä kunnossapidossa siirrytään Camposin (2014, s. 243) mukaan luultavimmin pilvipalveluihin. Pilvipalvelut tarjoavat alhaisempia kustannuksia, skaalautuvuutta, välittömän pääsyn laskentaresursseihin, alhaisemmat tietotekniset esteet innovaatioille sekä helpomman tavan hankkia sovelluksia ja palveluita mahdollistaen yhteyden mistä tahansa (Campos 2014, s. 243-244; Gubbi et al. 2013, s. 1646). Pilvipalveluiden suurin ongelma on kuitenkin palvelun ja tietokantojen turvallisuus. Yritysten tulisikin selvittää

pilvilaskentaan siirtymisen turvallisuusriskit, sillä arkaluontoista tietoa ei säilytetä enää yrityksen omissa tiloissa. Myös pilvipalvelujen skaalautuvuus voi koitua ongelmaksi, sillä järjestelmän kuormitus vaihtelee useimmiten hyvinkin paljon ja kunnonvalvonta tuottaa huomattavan määrän dataa, joka tulisi prosessoida ja analysoida palvelussa. Juuri suurten prosessointivaatimusten vuoksi yhdistelmä yrityksen omaa laskentaa ja pilvipalveluita sopii hyvin älykkääseen kunnossapitoon. (Campos 2014, s. 243-244) Tulevina pilvipalveluina voidaan odottaa analytiikan ja visualisoinnin työkaluja (Gubbi et al. 2013, s. 1649).

Tulevaisuuden mullistavia teknologioita voi Starrin et al. (2010, s. 31-33) mukaan olla nanoteknologia, algoritmit sekä itsekorjautuvuus ja sitkeys. Nanoteknologiat voivat mahdollistaa laskennan pienentämisen edelleen jopa nanometrien mittoihin, jolloin esimerkiksi sensoreiden pienentyessä ne voidaan sijoittaa lähes mihin vain häiritsemättä laitteen toimintaa. Kehittyneet algoritmit mahdollistavat yhä parempia mittauksien ja päätösten määrittämisiä itse mittaussuorittimissa tai tietokoneissa. Itsekorjautuvat ja sitkeät laitteet ja komponentit voivat aloittaa oman korjausprosessinsa havaitessaan olevansa viallinen. (Starr et al. 2010, s. 31-33)

8.2 Tutkimus

Kunnossapidossa yritetään standardoida useita teknologioita. Kuitenkin kehityksen ollessa nykyisin hyvin nopeaa varsinkin uusien kielten ja protokollien kehittämisessä, on niitä hyvin vaikea seurata ja näin ollen myös standardoida. (Campos 2014, s. 234) Tulevaisuudessa älykkään kunnossapidon tutkimus- ja kehitystoiminnan tulisi keskittyä käyttäjälähtöisyyteen, monimutkaisen toiminnallisuuden yksinkertaistamiseen sekä valvonnan ja integraation tehokkuuden parantamiseen (Jantunen et al. 2009).

Suurin osa tilaan perustuvan kunnossapidon tutkimuksesta kohdistuu vain vikojen määrittämiseen ja ennustamiseen eikä niinkään sen integroimiseen kunnossapidon päätöksentekoon. Myöskään tilaan perustuvan kunnossapidon kustannuksia ei ole arvioitu tarpeeksi. Tilaan perustuvan kunnossapidon tutkimuksen tulisikin kohdistua jatkossa erityisesti kunnossapidon kustannusten integraatioon malleissa, ulkoisten tekijöiden huomioimiseen kulumisprosessissa ja vian ennustamisessa, kokonaisvaltaisiin ratkaisuihin sekä vianmäärityksen ja ennustamisen yhdistävien mallien kehittämiseen. (Barraza-Barraza et al.

2014) Signaalianalyysitekniikoiden kehitys yhdessä simulointimallien kanssa voi tarkoittaa todellista läpimurtoa komponenttien käyttöiän ennustamisessa ja sitä kautta tilaan perustuvassa kunnossapidossa (Jantunen et al. 2010b, s. 208).

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy tutkii tilaan perustuvaa kunnossapitoa. Tutkimus keskittyy uusiin sensori-teknologioihin, sulautettuihin mittausjärjestelmiin, tiedonhankintaan ja signaalianalyysiin, kunnonvalvontaan ja vianmääritykseen, ennustamiseen, automaattiseen päätöksentekoon sekä älykkääseen kunnossapitoon ja tilaan perustuvan kunnossapidon käyttöönottoon tehtaassa ja mobiileissa laitteissa. (VTT 2015) VTT on aiemmin johtanut Eurooppalaisen Dynamite-projektin toteutusta (Tekniikka & Talous 2005; VTT 2009) yhteistyössä yhdentoista yrityksen, neljän yliopiston, sekä toisen tutkimuskeskuksen kanssa vuodesta 2005 vuoteen 2009. Dynamite-projektin tuloksena syntyi DynaWeb, älykkään kunnossapidon ratkaisu tuleviin kestävän kehityksen teollisiin ja yhteiskunnallisiin haasteisiin. (VTT 2009) Aiemman suuren tutkimuksen vuoksi voidaan VTT:n tutkimusta tilaan perustuvan kunnossapidon osalta pitää merkittävänä.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Älykäs kunnossapito on 2000-luvun alussa ilmestynyt konsepti, jossa kunnossapitoon yhdistetään uusien tieto- ja viestintäteknikoiden käyttö sekä integraatio. Älykkäälle kunnossapidolle on useita erilaisia määrittelyjä, mutta ei hyväksytyä yhtenäistä määritelmää. Yleisimmin älykäs kunnossapito nähdään päätöksenteon tukena tiedonkeruun avulla.

Älykkään kunnossapidon kehitykseen on vaikuttanut eniten ihmisten ja pääoman johtaminen sekä uusien teknologioiden kehitys. Kunnossapitoa on perinteisesti pidetty pelkkänä kulueränä; kuitenkin valmistuksen ajatusmallin siirtyessä kohti kestävästä kehityksestä, on myös kunnossapidossa siirrytty elinkaarilähtöiseen ajatteluun, jolloin myös älykkään kunnossapidon konsepti on syntynyt. Kestävän kehityksen näkökulmasta laitteiden käytettävyyden, käyttövarmuuden sekä huollettavuuden tulisi säilyä koko sen yhä pitenevän elinkaaren ajan. Tällöin kehittynyt kunnossapito voidaan nähdä kriittisenä tekijänä yrityksen kilpailukykyä tarkasteltaessa. Toisaalta elinkaarilähtöisessä ajattelumallissa pyritään siirtymään ennaltaehkäisevään kunnossapitoon, ennen kuin hajoamisia tapahtuu. Elinkaariajattelu pohjautuu valmistajien haluun omistaa ja huoltaa laitteisto yrityksen puolesta.

Älykäs kunnossapito pohjautuu tilaan perustuvaan kunnossapitoon. Tilaan perustuva kunnossapito on vikatilanteiden ehkäisyä valvomalla laitteiden ja komponenttien kuntoa erilaisilla mittauksilla ja sensoreilla. Komponenttien käyttäytymistä valvotaan, jotta voidaan tunnistaa hajoamassa olevat komponentit ja tehdä kunnossapidon toimet juuri oikealla hetkellä. Tämä minimoi kunnossapidon kustannuksia, sillä tilaan perustuvassa kunnossapidossa pyritään välttämään turhia toimia ja tekemällä ne juuri ennen laitteen tai komponentin hajoamispistettä.

Älykkäiden teknologioiden kehitys on nopeutunut etenkin langattomien verkkojen kehityksen ja erilaisten sensorien mukana. Verkkotyöskentely on yksi älykkään kunnossapidon oleellisimmista osista. Älykkäät sensorit ja sirut keräävät tietoa tarkasti kohdelaitteesta ja välittävät ne langattomia yhteyksiä pitkin kunnossapidon järjestelmiin. Huoltohenkilöstö pystyy käyttämään apunaan älypuhelimia, tabletteja ja kämmentietokoneita paikan päällä. Mallinnus- ja visualisointitekniikoiden kehittäminen mahdollistaa laitteiston hahmottamisen paremmin ja myös sen arvioinnin sen elinkaaren eri vaiheissa.

Älykäs kunnossapito voi parhaimmillaan toimia koko yrityksen päätöksenteon apuvälineenä ja sisäisen integraation mahdollistajana. Elinkaariajattelun ja käyttövarmuuden maksimoinnin myötä älykästä kunnossapitoa voidaan myös pitää kestäväen kehityksen edistäjänä. Vikatilanteiden sekä suunnittelemattomien seisokkien vähenemisen myötä älykäs kunnossapito parantaa yrityksen tuottavuutta, ja yhdessä tuotteiden laadun paranemisen kanssa myös kilpailukykyä. Älykkään kunnossapidon mukanaan tuomat innovaatiot voivat olla merkittävä kilpailukykyä parantava tekijä. Tehokkaamman kunnossapidon tuottamaa lisäarvoa olisi syytä arvioida yrityksissä yhä enemmän, sillä automaation lisääntyessä myös kunnossapidon tarve kasvaa.

Älykkään kunnossapidon käyttö yrityksissä on vielä hyvin vähäistä. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n johtamassa Dynamite-projektissa saatiin lupaavia tuloksia yrityskäytössä. Nämä positiiviset tulokset saattavat olla ratkaisevia älykkään kunnossapidon yleistymisen kannalta, sillä ennakkotapauksia älykkäiden teknologioiden käytöstä ei ole. Älykkään kunnossapidon käyttöönotto on suuri ponnistus yritykseltä, sillä se vaatii kokonaisvaltaisen muutoksen kaikkien kunnossapitoon liittyvien toimintojen tehokkaassa integroinnissa. Koska älykkään kunnossapidon ratkaisuja ei ole yleisessä käytössä eikä yleistä mallia ole, joudutaan kaikissa tapauksissa tekemään ratkaisut tapauskohtaisesti, mikä on huomattavasti kalliimpaa. Muita haasteita ovat esimerkiksi kerätyn tiedon määrän huomattava kasvaminen, mikä voi koitua ongelmaksi yrityksissä, joissa teknologinen taso ei ole riittävä. Myös osaamisen puute on merkittävä haaste yrityksissä.

Tulevaisuudessa älykkäässä kunnossapidossa käytettävien teknologioiden halventumien johtaa niiden yleistymiseen. Mikäli tarjotut ratkaisut ovat edullisia ja kustannustehokkaita, voidaan älykkään kunnossapidon olettaa muodostuvan jokapäiväiseksi käytännöksi yrityksissä. Myös mobiililaitteiden hintojen lasku ja niiden käytön ymmärtäminen yrityskäytössä johtaa todennäköisesti niiden yleistymiseen. Tulevaisuudessa älykkään kunnossapidon mukanaan tuoman suuri tietomäärän vuoksi siirrytään pilvipalveluihin, jos niiden tietoturvaongelmat saadaan ratkaistua. Älykästä kunnossapitoa tutkitaan jatkuvasti ja kehitys on nopeaa, mikä vaikeuttaa standardointia.

LÄHTEET

Aboelmaged, M. G. 2014. Predicting e-readiness at firm-level: An analysis of technological, organizational and environmental (TOE) effects on e-maintenance readiness in manufacturing firms. *International Journal of Information Management*. Vol. 34, nro. 5, s. 639-651.

Ab-Samat, H. & Kamaruddin, S. 2014. Opportunistic maintenance (OM) as a new advancement in maintenance approaches. *Journal of Quality in Maintenance*. Vol. 20, nro. 2, s. 98-121.

Ahmad, R. & Kamaruddin, S. 2012. An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application. *Computers and Industrial Engineering*. Vol. 63, nro. 1, s. 135-149.

Arnaiz, A., Emmanouilidis, C., Iung, B. & Jantunen, E. 2006. Mobile Maintenance Management. *Journal of International Technology and Information Management*. Vol. 15, nro. 4, s. 11-21.

Arnaiz, A., Iung, B., Al-Najjar, B., Jantunen, E., Holmberg, K., Naks, T. & Baglee, D. 2010. A New Integrated E-maintenance Concept. Teoksessa: Holmberg, K., Adgar, A., Arnaiz, A., Jantunen, E., Mascolo, J. & Mekid, S. (toim.) E-Maintenance. Springer London. s 61-82. ISBN 978-1-84996-204-9

Barraza-Barraza, D., Limón-Robles, J. & Beruvides, M. 2014. Opportunities and Challenges in Condition-Based Maintenance Research. Industrial and Systems Engineering Research Conference, 31.5.-3.6.2014, Montreal, Kanada.

Borissova, S & Mustakerov, I. 2013. A Concept of Intelligent e-Maintenance Decision Making System. *IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications*.

Campos, J. 2014. Current and prospective information and communication technologies for the emaintenance applications. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. Vol. 20, nro. 3, s. 233-248

Crespo Marquez A. & Iung B. 2008. A review of E-maintenance capabilities and challenges. *Journal of Systemics Cybernetics and Informatics*. Vol. 6, nro. 1, s. 62-66.

Emmanouilidis, C., Jantunen, E., Gilabert, E., Arnaiz, A. & Starr, A. 2011. E-Maintenance update: The road to success for modern industry. International Congress on Condition Monitoring and Diagnostics Engineering Management, 30.5.-1.6.2011, Stavanger, Norja.

EN 13306:2001. European Standard on Maintenance Terminology. European Committee for Standardization.

Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S. & Palaniswami, M. 2013. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*. Vol. 29, nro. 7, s. 1645-1660.

Guo, J., Zou, J. & Chen, H. 2013. Development of Knowledge Integration Model for E-Maintenance. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. Vol. 5, nro. 5, s. 1841-1847.

Han, T. & Yang, B. (2006). Development of an e-maintenance system integrating advanced techniques. *Computers in Industry*, Vol. 57, nro. 6, s.569-580.

Haftor, D., Kajtazi, M. & Mirijamdotter, A. 2011. Information Logistics as a Guide for Research and Practice of e-Maintenance Operations. *International Journal of Performability Engineering*. Vol. 7, nro. 6, s. 593-603.

Holgado, M. & Macchi, M. 2014. Exploring the role of E-maintenance for value creation in service provision. ICE/IEEE International Technology Management Conference, 23.6.-25.6.2014, Bergamo, Italia.

Iung, B., Levrat, E., Crespo Marquez, A. & Erbe, H. 2009. Conceptual framework for e-Maintenance: Illustration by e-Maintenance technologies and platforms. *Annual reviews in control*. Vol. 33, nro. 2, s. 220-229.

Jantunen, E., Adgar, A., Emmanouilidis, C. & Arnaiz, A. 2010a. Next generation maintenance through the adoption of e-maintenance. Euromaintenance 2010 Conference (EFNMS), 12.-14.5.2010, Verona, Italia.

Jantunen, E., Emmanouilidis, C., Arnaiz, A. & Gilabert, E. 2010b. Economical and technological prospects for e-maintenance. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. Vol. 1, nro. 3, s. 201-209.

Jantunen, E., Gilabert, E., Emmanouilidis, C. & Adgar, A. 2009. E-maintenance, a means to high overall efficiency. 4th World Congress on Engineering Asset Management, 28.-30.9.2009, Ateena, Kreikka.

Jonsson, K., Holmström, J. & Levén, P. 2010. Organizational dimensions of e-maintenance: a multi-contextual perspective. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. Vol. 1, nro. 3, s. 210-218.

Kajko-Mattsson, M., Karim, R. & Mirjamdotter, A. 2011. Essential Components of e-Maintenance. *International Journal of Performability Engineering*. Vol. 7, nro. 6, s. 555-571.

Kärkkäinen, A. 2014. Comprehensive solution for condition monitoring. [PowerPoint-esitys]. [Viitattu 8.4.2015]. Saatavilla http://www.vtt.fi/files/sites/eemeli18/03_Anu_Karkkainen_Condition_monitoring.pdf

Lazzarini, R., Stefanelli, C. & Tortonesi, M. 2013. Large-scale E-maintenance: A New Frontier for Management. *IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM2013): Short Paper*. s. 732-735.

Lee, J., Ni, J., Djurdjanovic, D., Qiu, H. & Liao, H. 2006. Intelligent prognostics tools and e-maintenance. *Computers in Industry*. Vol. 57, nro. 6, s. 476-489.

Levrat, E., Iung, B. & Crespo Marquez, A. 2008. E-maintenance: review and conceptual framework. *Production Planning and Control*. Vol. 19, nro. 4, s. 408-429.

Mascolo, J., Nilsson, P., Iung, B., Levrat, E., Voisin, A., Garramiola, F. & Bellew, J. 2010. Industrial Demonstrations of E-maintenance Solutions. Teoksessa: Holmberg, K., Adgar, A., Arnaiz, A., Jantunen, E., Mascolo, J. & Mekid, S. (toim.) E-Maintenance. Springer London. s 391-474. ISBN 978-1-84996-204-9

Muller, A., Crespo Marquez, A. & Iung, B. 2008. On the concept of e-maintenance: Review and current research. *Reliability Engineering and System Safety*. Vol. 93, nro. 8, s. 1165-1187

Ni, J. & Jin, X. (2012). Decision support systems for effective maintenance operations. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 61 nro. 1, s. 411-414.

Niu, G., Yang, B. & Pecht, M. 2010. Development of an optimized condition-based maintenance system by data fusion and reliability-centered maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*. Vol. 95, nro. 7, s. 786-796.

Oliveira, A., Araujo, R. & Jardine A. 2013. A Human Centered View on E-Maintenance. *Chemical Engineering Transactions*. Vol. 33, s. 385-390.

Peng, Y., Dong, M. & Zuo, M. 2010. Current status of machine prognostics in condition-based maintenance: A review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 50, nro. 1-4, s. 297-313.

Starr, A., Al-Najjar, B., Holmberg, K., Jantunen, E., Bellew, J. & Albarbar, A. 2010. Maintenance today and future trends. Teoksessa: Holmberg, K., Adgar, A., Arnaiz, A., Jantunen, E., Mascolo, J. & Mekid, S. (toim.) E-Maintenance. Springer London. s 5-37. ISBN 978-1-84996-204-9

Tekniikka & Talous. 2005. VTT kehittää älykästä huolto- ja kunnossapitojärjestelmää. [Verkkouutinen]. [Viitattu 9.4.2015]. Saatavilla <http://www.tekniikkatalous.fi/innovaatiot/vtt+kehittaa+alykasta+huolto+ja+kunnossapitojarjestelmaa/a40150>

VTT. 2015. Condition based maintenance. [VTT:n www-sivuilla]. [Viitattu 8.4.2015]. Saatavilla http://www2.vtt.fi/research/technology/condition_based_maintenance.jsp?lang=en

VTT. 2009. Dynamite. [Dynamite-projektin www-sivuilla]. [Viitattu 8.4.2015]. Saatavilla <http://dynamite.vtt.fi/index.htm>