

Kiira Saarela

KUNTOON PERUSTUVAN KUNNOSSA- PIDON TEKNOLOGIARATKAISUT JA KÄYTTÖÖNOTTO

Kandidaatintyö
Johtamisen ja talouden tiedekunta
Tarkastaja: Ulla Saari
Toukokuu 2022

TIIVISTELMÄ

Kiira Saarela: Kuntoon perustuvan kunnossapidon teknologiaratkaisut ja käyttöönotto
(Condition-based maintenance technologies and implementation)

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Tuotantotalouden tutkinto-ohjelma

Toukokuu 2022

Kunnossapidolla on teollisuuden yrityksille yhä suurempi strateginen merkitys, sillä kriittisten laitteiden hajoaminen kuuluu suurimpiin liiketoiminnan riskeihin. Perinteisesti yrityksissä on käytetty korjaavaa kunnossapitoa, eli laite huolletaan tai vaihdetaan sen vikaantuessa, tai jaksotettua kunnossapitoa, esimerkiksi määräajoin toteutettavia huoltoja. Kuntoon perustuvalla kunnossapidolla tarkoitetaan prosessia, jossa seurataan laitteen todellista kuntoa ja pyritään ennustamaan sen jäljellä olevaa käyttöikää. Tämän perusteella voidaan tehdä päätöksiä tarvittavista kunnossapitotoimenpiteistä. Kuntoon perustuvan kunnossapidon avulla voidaan muun muassa vähentää tuotannon keskeytyksiä sekä saavuttaa kustannussäästöjä, kun huoltotoimenpiteitä ei tehdä varmuuden vuoksi, vaan silloin kun se on laitteen kunnon perusteella tarpeellista. Tästä huolimatta kuntoon perustuvan kunnossapidon käyttö teollisuusyrityksissä on yleistynyt hitaasti.

Tämä kandidaatintyö toteutettiin kirjallisuuskatsauksena ja sen tarkoitus on esitellä kuntoon perustuvan kunnossapidon mahdollistavia teknologisia ratkaisuja sekä selvittää millaisia kokemuksia yrityksillä on kuntoon perustuvan kunnossapidon käyttöönotosta. Työssä tarkastellaan miten teknologian avulla pystytään keräämään ja käsittelemään kuntoon perustuvassa kunnossapidossa tarvittavaa dataa sekä tukemaan kunnossapidon päätöksentekoa diagnostiikan ja prognostiikan keinoin. Lisäksi käsitellään kuntoon perustuvan kunnossapidon käyttöönottoprosessin vaiheita ja siihen liittyviä haasteita sekä mahdollisia yhteistyökumppaneita.

Vaikka kunnonvalvontaa ja kuntoon perustuvaa kunnossapitoa käsittelevää kirjallisuutta löytyy paljon, tietoa on monesti hankala soveltaa käytännössä. Monet yritykset kokevat kuntoon perustuvan kunnossapidon käyttöönoton haastavaksi ja sen onnistumisen epävarmaksi. Lisäksi tarvittava alkuinvestointi on suuri ja taloudelliset hyödyt hankala tarkasti määrittää etukäteen. Käyttöönotto helpottuu, kun noudatetaan ennalta määriteltyä käyttöönottoprosessia sekä tehdään siihen liittyvät päätökset huolellisesti ja perustellusti.

Avainsanat: Kuntoon perustuva kunnossapito, kunnonvalvonta, ennustava kunnossapito

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TEOLLISUUDEN KUNNOSSAPITOTOIMINTA.....	3
2.1 Kunnossapidon käsitteet	3
2.2 Kunnossapitotoiminta valmistavassa teollisuudessa	5
2.3 Modernin teknologian tarve kunnossapidossa.....	6
3. TEKNOLOGIA KUNTOON PERUSTUVAN KUNNOSSAPIDON MAHDOLLISTAJANA.....	8
3.1 Datan kerääminen ja käsittely	8
3.2 Diagnostiikka ja prognostiikka kunnossapidon päätöksenteon tukena	10
4. KUNTOON PERUSTUVAN KUNNOSSAPIDON KÄYTTÖÖNOTTO.....	12
4.1 Käyttöönottoon liittyvät haasteet	12
4.2 Vaiheet onnistuneeseen käyttöönottoon.....	13
4.3 Yhteistyökumppanit käyttöönoton yhteydessä.....	15
5. PÄÄTELMÄT	17
LÄHTEET	18

1. JOHDANTO

Kunnossapitoa voidaan valmistavassa teollisuudessa toteuttaa monilla eri tavoilla. Tuotantolaitte voidaan korjata kun se menee rikki tai sille voidaan tehdä tiettyjä määräajoin toteutettavia huoltotoimenpiteitä. Korjaavan tai jaksotetun kunnossapidon sijaan on mahdollista tarkkailla laitteen tilaa ja suorittaa kunnossapitotoimenpiteitä vain silloin, kun se on laitteen kunnan kannalta perusteltua. Tätä kutsutaan kuntoon perustuvaksi kunnossapidoksi. (Ahmad & Kamaruddin 2012) Digitalisaation ja esineiden internetin myötä datan kerääminen tuotantolaitteista helpottuu, mikä tehostaa kunnonvalvontaa ja mahdollistaa sen tekemisen etänä (Grubic & Peppard 2016).

Neljäs teollinen vallankumous, Industry 4.0, liittyy uusien digitaalisten teknologioiden hyödyntämiseen teollisuudessa ja siihen liittyy muun muassa kunnossapitotoiminnan kehittäminen. Kunnossapito on muuttumassa strategiseksi toiminnoksi pelkän välttämättömän pahan sijaan. Kuntoon perustuvan kunnossapidon kautta yritysten on mahdollista saavuttaa pysyvää kilpailuetua, sillä sen avulla voidaan pidentää laitteiden käyttöikää, pienentää ylläpitokustannuksia, lyhentää tuotannon keskeytyksiä, parantaa turvallisuutta ja käyttövarmuutta sekä tehostaa kunnossapitoresurssien käyttöä. (Bousdekis et al. 2020) Silti edelleen suuri osa yrityksistä luottaa kunnossapidon suunnittelussa asiantuntijoidensa tietämykseen ja kokemukseen sen sijaan, että hyödyntäisivät laitteista mitattavaa dataa, data-analytiikkaa ja mallinnusta (Tiddens et al. 2022).

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selventää minkälaista teknologiaa valmistavan teollisuuden yritykset tarvitsevat siirtyäkseen kuntoon perustuvaan kunnossapitoon. Lisäksi käsitellään kuntoon perustuvan kunnossapidon käyttöönoton prosessia sekä käyttöönottoon liittyviä haasteita ja yhteistyökumppaneita. Tutkimuskysymykset ovat:

1. Minkälaiset teknologiset ratkaisut mahdollistavat kuntoon perustuvan kunnossapidon?
2. Millaisia kokemuksia yrityksissä on kuntoon perustuvan kunnossapidon käyttöönotosta?

Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena. Kirjallisuushaku kohdennettiin aluksi aiheen kannalta oleellisiin tieteellisiin lehtiin. Muutamien kunnossapitoa käsittelevien artikkelien avulla saatiin yleiskuva aiheesta sekä laajennettua hakusanojen joukkoa. Näiden haku-

sanojen avulla tehtiin laajempia hakuja Web of Science -tietokannasta sekä Andor-hakupalvelusta. Lähteiden etsimisessä hyödynnettiin myös artikkeleiden lähdeluetteloita sekä viittaustietoja. Kirjallisuushakuja tehtiin englannin kielellä ja keskeisiä hakusanoja olivat muun muassa kuntoon perustuva kunnossapito (*condition-based maintenance*), kunnonvalvonta (*condition monitoring*), ennustava kunnossapito (*predictive maintenance*), prognostiikka ja kunnonhallinta (*prognostics and health management*) sekä etävalvonta (*remote monitoring*).

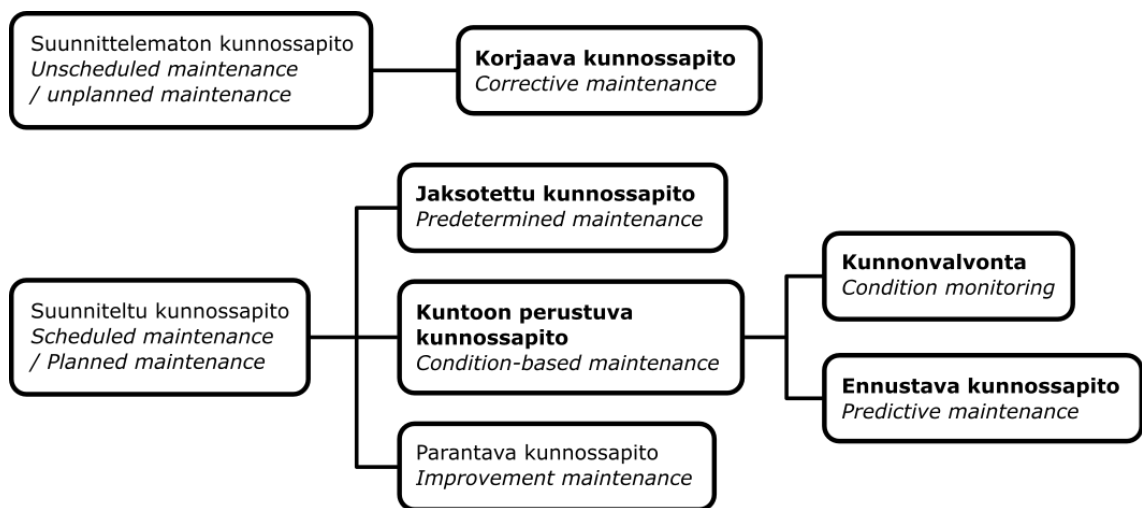
Seuraavassa luvussa käsitellään yleisemmin teollisuuden kunnossapitotoimintaa. Ensin vertaillaan kunnossapitoon liittyviä käsitteitä sekä pohditaan kunnossapidon merkitystä valmistavassa teollisuudessa, minkä jälkeen tarkastellaan teknologian tarvetta kunnossapidon toteuttamisessa. Kolmannessa luvussa käsitellään tarkemmin teknologioita, joita teollisuusyrityksissä on hyödynnetty ennakoivan kunnossapidon toteuttamiseksi. Neljännessä luvussa listataan erilaisia kuntoon perustuvan kunnossapidon käyttöönottoon liittyviä haasteita sekä esitellään prosessi, jonka vaiheita seuraamalla käyttöönoton onnistumisen todennäköisyyttä pystytään nostamaan. Lisäksi pohditaan mahdollisten yhteistyökumppaneiden roolia. Lopuksi esitellään työn tärkeimmät havainnot ja päätelmät.

2. TEOLLISUUDEN KUNNOSSAPITOTOIMINTA

Tässä luvussa käsitellään kunnossapitotoimintaa ja siihen liittyviä käsitteitä. Käsitteiden määrittelyn jälkeen esitellään tarkemmin kunnonvalvontaa ja kuntoon perustuvaa kunnossapitoa. Lopuksi tuodaan esiin valmistavan teollisuuden näkökulma sekä käsitellään teknologian roolia kunnossapitotoiminnassa.

2.1 Kunnossapidon käsitteet

Standardin PSK 6201 (2022) mukaan kunnossapitotoiminnan tavoite on varmistaa laitteen hyvä käyttövarmuus ja tuotannon kokonaistehokkuus. Kunnossapitoon liittyviä olennaisia käsitteitä on esitetty kuvassa 1. Kunnossapitotoiminta voidaan jakaa korjaavaan, jaksotettuun, kuntoon perustuvaan ja parantavaan kunnossapitoon. Näistä korjaava kunnossapito on suunnittelematonta ja muut suunniteltua kunnossapitoa. Tässä työssä ei käsitellä parantavaa kunnossapitoa, mutta sillä tarkoitetaan toimenpiteitä, joiden tarkoitus on parantaa esimerkiksi laitteen toimintavarmuutta. (PSK 6201 2022)



Kuva 1. Kunnossapidon käsitteitä

Korjaava kunnossapito tarkoittaa sitä, että toimitaan vasta, kun vika on ilmennyt (PSK 6201 2022). Muita kirjallisuudessa esiintyviä korjaavaan kunnossapitoon liittyviä käsitteitä ovat muun muassa reaktiivinen kunnossapito (*reactive maintenance*) ja vikaan perustuva kunnossapito (*failure-based maintenance*).

Jaksotetulla kunnossapidolla tarkoitetaan ennalta määritetyllä aikataululla toteutettavia kunnossapitotoimenpiteitä (PSK 6201 2022). Aikataulu voi perustua laitteen valmistajan suositukseen tai ajan myötä kertyneeseen tietoon ja yleensä jaksotettua kunnossapitoa toteutetaan tasaisin väliajoin. (Lai et al. 2019) Jaksotettu kunnossapito perustuu vikaantumisaikojen analyysihin sekä oletukseen siitä, että vikaantumiset ovat ennustettavissa. Huoltopäätökset nojaavat tähän tilastolliseen tietoon. (Ahmad & Kamaruddin 2012) Muita jaksotetusta kunnossapidosta käytettäviä käsitteitä ovat aikaan perustuva kunnossapito (*time-based maintenance*) ja jaksollinen kunnossapito (*periodic maintenance*).

Kuntoon perustuvassa kunnossapidossa pyritään ennakoimaan kunnossapitotarpeet jo ennen laitteen vioittumista ja siten vähentämään korjaavan kunnossapidon tarvetta. Kuntoon perustuvaan kunnossapitoon liittyy kunnonvalvonta, eli laitteen tilan seuranta eri ominaisuuksien ja parametrien avulla joko aistihavaintoihin tai mittauksiin perustuen, sekä ennustava kunnossapito, eli pyrkimys ennustaa tulevien kunnossapitotarpeiden ajoitusta ja sisältöä. (PSK 6201 2022) Kuntoon perustuvassa kunnossapidossa siis hyödynnetään kunnonvalvonnasta saatavaa tietoa ja huoltopäätökset tehdään laitteiden todellisen kunnon perusteella (Ahmad & Kamaruddin 2012).

Kunnonvalvonnan tarkoitus on havaita laitteen tilan muutoksia erilaisten parametrien avulla ennen kuin varsinainen rikkoutuminen tapahtuu. Käytettäviä parametreja voivat olla esimerkiksi värähtely, lämpötila, voiteluöljyn laatu, epäpuhtaudet ja ääni. Kunnonvalvontaa voidaan toteuttaa jatkuvasti tai määräajoin ja havainnointia voidaan tehdä joko laitteen ollessa käytössä tai tuotannon keskeytyksien aikana. Jatkuvalle mittaamiselle varmistetaan, että tärkeää tietoa ei jää havaitsematta, mutta toisaalta se voi olla kallista ja datan määrä kasvaa hyvin suureksi. (Ahmad & Kamaruddin 2012)

Ennustavan kunnossapidon tarkoitus on hyödyntää reaaliaikaista dataa sekä historiadataa poikkeamien tunnistamiseen ja huoltosuunnitelmien tekemiseen. Ennustava kunnossapito koostuu kolmesta vaiheesta: poikkeaman havaitseminen, vikaantumisen ennustaminen ja huoltopäätöksen tekeminen. Kun kunnonvalvonnan tuloksena havaitaan poikkeama laitteen toimintaa mittaavissa parametreissa, käynnistyy prosessi, joka pyrkii ennustamaan mahdollisen tulevan vikaantumisen ajankohdan. Tämän ennusteen perusteella pystytään päättämään sopiva ajankohta laitteen huoltamiselle. (Bousdekis et al. 2020)

Kunnossapidon käsitteiden käyttö kirjallisuudessa ei ole täysin yhdenmukaista, vaan tulokset saattavat vaihdella kirjoittajasta riippuen. Esimerkiksi Biggio ja Kastanis (2020) tulkitsevat kuntoon perustuvan kunnossapidon ja ennustavan kunnossapidon käsitteet hieman eri tavalla. Heidän mukaansa kuntoon perustuva kunnossapito tarkoittaa sitä, että korjaavat toimenpiteet tehdään heti sen jälkeen, kun poikkeama laitteen kunnossa havaitaan, kun taas ennustavassa kunnossapidossa ennustetaan laitteen vikaantuminen havaittujen poikkeamien avulla ja suoritetaan toimenpiteet juuri ennen vikaantumista. Monissa yhteyksissä kuitenkin kuntoon perustuvaa kunnossapitoa ja ennustavaa kunnossapitoa pidetään käytännössä samana asiana (esim. Ahmad & Kamaruddin 2012).

2.2 Kunnossapitotoiminta valmistavassa teollisuudessa

1900-luvun alkupuolelle asti kunnossapitoa pidettiin välttämättömänä pahana, jonka kustannuksiin ei juuri pystytty vaikuttamaan. Vuosina 1950–1980 uusien kunnossapitotekniikoiden myötä kunnossapidosta tuli suunnitelmallisempaa ja sen ajateltiin olevan teollisuudessa tärkeä tukitoiminto. Nykyään kunnossapito on tärkeä osa liiketoimintaprosesseja ja arvontuottoa. (Parida & Kumar 2006) Teollisuudessa perinteisesti käytetyt korjaava sekä jaksotettu kunnossapito aiheuttavat ylimääräisiä kuluja tuotannon keskeytyksien, komponenttien korvaamisen ja turhien huoltotoimenpiteiden muodossa. Industry 4.0 ja tuotannon digitalisoituminen mahdollistavat edistyneemmän ja älykkäämmän kunnossapitotoiminnan ja monet yritykset ovat alkaneet tehdä merkittäviä investointeja kunnossapidon kehittämiseen. (Biggio & Kastanis 2020)

Bousdekisin et al. (2020) mukaan ennustavan kunnossapidon tulisi olla teollisuuden yritysten tärkein prioriteetti. Toiminnan suurimpiin riskeihin kuuluu kriittisten laitteiden hajoaminen ja kunnossapito nähdäänkin entistä useammin osana yritysten strategista liiketoimintaa. Greenough ja Grubic (2010) käsittelevät kuntoon perustuvan kunnossapidon toteuttamista palveluna ulkopuolisen yrityksen toimesta. Tällöin tapahtuu riskin siirtyminen asiakkaalta palveluyritykselle, jolla voi toiminnan laajuuden vuoksi olla paremmat mahdollisuudet tehdä investointeja kuntoon perustuvan kunnossapidon käyttöönottoon riskien pienentämiseksi.

Riskien torjunnan lisäksi kunnossapidolla on tärkeä merkitys teollisuuden yritysten kestävyystavoitteiden onnistumisessa. Tarkoituksenmukaisen kunnossapidon myötä voidaan muun muassa parantaa tuotannon resurssitehokkuutta, laitteiden käyttöikä ja turvallisuutta sekä vähentää energian käyttöä ja päästöjä. Tulevaisuudessa ympäristölainsäädäntö ja standardit todennäköisesti yhä kiristyvät, jolloin kunnossapidon tärkeys kestävä tuotannon tukemisessa korostuu entisestään. (Holgado et al. 2020; Bokrantz et al. 2017)

Ingemarsdotterin et al. (2021) mukaan kuntoon perustuvan kunnossapidon avulla yritykset voivat tehostaa ja paremmin ajoittaa kunnossapitotoimenpiteitä, parantaa laitteiden suorituskykyä, vähentää tuotannon keskeytyksiä ja pidentää laitteiden elinikää. Sen avulla voidaan myös vähentää kunnossapidon kustannuksia verrattuna perinteisempiin menetelmiin ja esimerkiksi ajoittaa huoltotoimenpiteitä suunniteltuihin huoltokatkoihin, jolloin tuotanto on muutenkin keskeytynyt (Rastegari & Bengtsson 2014). Monista hyödyistä huolimatta kuntoon perustuvaa kunnossapitoa ei ole vielä otettu laajasti käyttöön (Ingemarsdotter et al. 2021).

Monet kirjallisuudessa esiintyvät kuntoon perustuvan kunnossapidon sovelluskohteet ovat vielä yksittäisiä laitteita, laitteiden osia tai kriittisiä komponentteja. Eräs tyypillinen esimerkki on laakereiden kunnan valvonta. Tuotantolaitteessa käytetyn laakerin hajoaminen voi aiheuttaa huomattavia vahinkoja ja sen kunnan heikkenemiseen vaikuttavat useat tekijät, kuten voitelu, viallinen kiinnitys tai sähkövirrat. Laakerin kuntoa voidaan arvioida esimerkiksi värähtelyanalyysin tai iskusysäysmenetelmän avulla. (Rastegari & Bengtsson 2014)

Yksittäisten laitteiden tai komponenttien lisäksi kuntoon perustuvaa kunnossapitoa voidaan toteuttaa laajemmassakin mittakaavassa. Esimerkiksi Grubic (2018) esittelee artikkelissaan yrityksen, joka valmistaa teollisuuden käyttöön muun muassa vierintälaakereita, tiivisteitä, mekatroniikkaa ja voitelujärjestelmiä. Tuotteiden lisäksi yritys tarjoaa huolto- ja kunnanvalvontapalveluita sekä integroitua kunnossapitoratkaisuja. Ratkaisut voidaan räätälöidä asiakkaan tarpeen mukaan, ja ne voivat sisältää suuren määrän sensoreita, joilla pystytään tarkkailemaan jopa koko tuotantolaitosta.

2.3 Modernin teknologian tarve kunnossapidossa

Kunnossapitotoimenpiteiden suunnittelussa luotetaan usein joko laitteen valmistajan suositukseen tai kokeneeseen henkilökuntaan, joka oppii havaitsemaan laitteen poikkeavan toiminnan. Erilaiset aistihavainnot ovatkin tärkeä osa kunnanvalvontaa, mutta esimerkiksi kokeneiden työntekijöiden lähteminen yrityksestä voi aiheuttaa haasteita, mikäli laitteen kunnan havainnointi on vain heidän vastuullaan. Kokeneetkaan työntekijät eivät myöskään pysty havaitsemaan jokaista poikkeamaa tai päivystämään laitteiston toimintaa vuorokauden ympäri. (Ahmad & Kamaruddin 2012) Näihin tilanteisiin liittyvien riskien pienentämiseksi voidaan hyödyntää teknologian tuomia mahdollisuuksia.

Modernin teknologian avulla voidaan huomata, kun tuotantolaite tai komponentti poikkeaa normaalista tilastaan, sekä pyrkiä ennustamaan vikaantumisen ajankohtaa. Tämä parantaa turvallisuutta estämällä vakavia rikkoontumisia sekä vähentää kustannuksia

karsimalla turhia kunnossapitotoimenpiteitä. Erityisesti datan saatavuuden lisääntyminen sekä koneoppimisen ja syväoppimisen tekniikoiden nopea kehittyminen tukevat uusien dataan pohjautuvien kunnossapidon teknologioiden kehittämistä. (Biggio & Kastanis 2020)

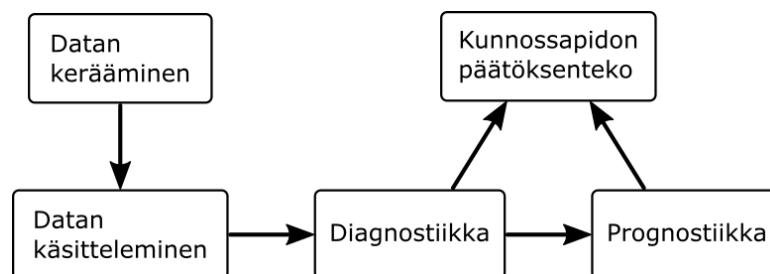
Kuntoon perustuvan kunnossapidon ja erityisesti datan keräämisen tärkein mahdollistaja on esineiden internet (IoT, *internet of things*). Erilaisin anturein varustetut laitteet yhdistetään internetiin, jolloin niiden toimintaa pystytään seuraamaan ja ohjaamaan reaaliaikaisesti. IoT-tekniikat mahdollistavat sensoridatan langattoman siirtymisen ja tallentamisen pilvipalvelimelle, missä se on helposti hyödynnettävissä. Laitteen toimintaa pystytään siis tarkkailemaan oltaessa fyysisesti eri paikassa kuin tarkkailtava laite. (Kwon et al. 2016) IoT-tekniikkaan liittyy oleellisesti myös pilvilaskenta (*cloud computing*), big data ja data-analytiikka (Paiola & Gebauer 2020). Teollisuuden kontekstissa esiintyy termi teollinen internet (IIoT, *industrial internet of things*). Boyes et al. (2018) määrittelevät teollisen internetin älykkäistä laitteista, informaatioteknologioista ja pilvi- tai reunalaskennasta koostuvaksi systeemiksi, joka mahdollistaa prosessia, tuotetta tai palvelua koskevan tiedon reaaliaikaisen keräämisen, analysoimisen ja siirtämisen.

Tekniikka, erityisesti esineiden internet, helpottaa kunnossapidon tuottamista palveluna, sillä etävalvonnan avulla voidaan nopeasti havaita vikaantumisen ja toimittaa tarvittava tieto samanaikaisesti huoltoteknikolle sekä varaosien jakelukeskukseen. Ilman kyseistä tekniikkaa, huoltoteknikko joutuu matkustamaan paikan päälle diagnostiikkatyökalujen kanssa, tilaamaan mahdolliset varaosat ja myöhemmin vielä saapua suorittamaan huollon. (Lai et al. 2019)

Kuntoon perustuvan kunnossapidon toteuttamista varten on otettu käyttöön monenlaisia tekniikoita, kuten etävalvonta (*remote monitoring technology*), älykkäät palvelut (*smart services*), etädiagnostiikka (*remote diagnostics*), älykkäät tuotteet (*intelligent products*), älyteknologia (*smart technology*) sekä prognostiikka ja kunnonhallinta (*prognostics health management*). Useista vaihtoehtoisista tekniikoista huolimatta niiden päämäärä on kuitenkin sama: kerätä reaaliaikaista dataa, jonka avulla pystytään määrittämään laitteen nykyinen ja ennustettu kunto sekä optimoimaan laitteen käyttövalmiutta ja suorituskykyä. (Grubic & Peppard 2016)

3. TEKNOLOGIA KUNTOON PERUSTUVAN KUNNOSSAPIDON MAHDOLLISTAJANA

Kuntoon perustuva kunnossapito voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen: datan kerääminen, datan käsittely ja kunnossapidon päätöksenteko (Jardine et al. 2006). Kunnossapitopäätösten tukena käytetään erilaisia diagnostiikka- ja prognostiikkamenetelmiä (Bousdekis et al. 2015). Kuntoon perustuvan kunnossapidon vaiheet on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Kuntoon perustuvan kunnossapidon vaiheet

Tässä luvussa esitellään kuntoon perustuvan kunnossapidon eri vaiheisiin liittyviä teknologiaratkaisuja. Ensin käsitellään kunnonvalvontadatan ja muun tarvittavan tiedon keräämistä sekä datan määrää ja laatua. Sen jälkeen käsitellään kunnossapidon päätöksenteon tukemista diagnostiikan ja prognostiikan avulla sekä erilaisia prognostiikkamenetelmiä, eli tapoja ennustaa laitteen kunnan muuttumista.

3.1 Datan kerääminen ja käsittely

Kuntoon perustuvassa kunnossapidossa hyödynnetään kunnonvalvontamittauksia. Seurattavasta laitteesta voidaan kerätä esimerkiksi värähtely-, ääni-, lämpötila-, paine-, kosteus- ja ympäristödataa sekä voiteluöljyn laatuun liittyvää dataa (Jardine et al. 2006). Värähtelymittauksissa käytetään sensoreita mittaamaan etenkin pyörivien laitteiden värähtelyä silloin, kun ne ovat käytössä. Mittausta voidaan tehdä joko jaksottain tai jatkuvasti. Äänen mittaaminen tehdään muuten samankaltaisesti, mutta sen sijaan että sen-

sorin pitäisi olla laitteessa kiinni, se havaitsee laitteesta lähtevää ääntä. Voiteluöljyn mittauksissa seurataan öljyn laatua, joka voi kertoa öljyn kunnan lisäksi laitteen sisäisten komponenttien kunnosta. (Ahmad & Kamaruddin 2012)

Kunnonvalvontadatan lisäksi Jardinen et al. (2006) mukaan on tärkeää kerätä niin sanottua tapahtumadataa, eli tietoa esimerkiksi laitteen asentamisesta, vioista ja huoltotoimenpiteistä. Tapahtumadatan avulla saadaan selville vioittuneet ja vaihdetut komponentit sekä näiden tapahtumien ajankohdat. Yhdistämällä tämä tieto kunnonvalvontadataan, pystytään tarkastelemaan toimenpiteiden vaikutusta laitteen suorituskykyyn. (Schmidt & Wang 2016)

Koska reaaliaikaisista mittauksista saatavan datan määrä on hyvin suuri, täytyy sitä käsitellä ennen palvelimelle tallentamista. Lisäksi datan virheitä ja puutteita pystytään korjaamaan tässä vaiheessa. Jardine et al. (2006) korostavat ensimmäisen vaiheen eli datan siivoamisen tärkeyttä, sillä erityisesti tapahtumadatassa voi olla inhimillisiä virheitä ja kunnonvalvontadatassa sensoreista johtuvia virheitä. Seuraava vaihe on data-analyysi, jossa käytettävät menetelmät riippuvat datan tyypistä. Esimerkiksi aaltomuotoisen kunnonvalvontadatan käsittelyssä käytetään signaalinkäsittelyn menetelmiä ja pelkkään tapahtumadataan perustuvaa analyysiä kutsutaan luotettavuusanalyysiksi. Kuntoon perustuvassa kunnossapidossa kuitenkin hyödynnetään näiden yhdistelmää. (Jardine et al. 2006)

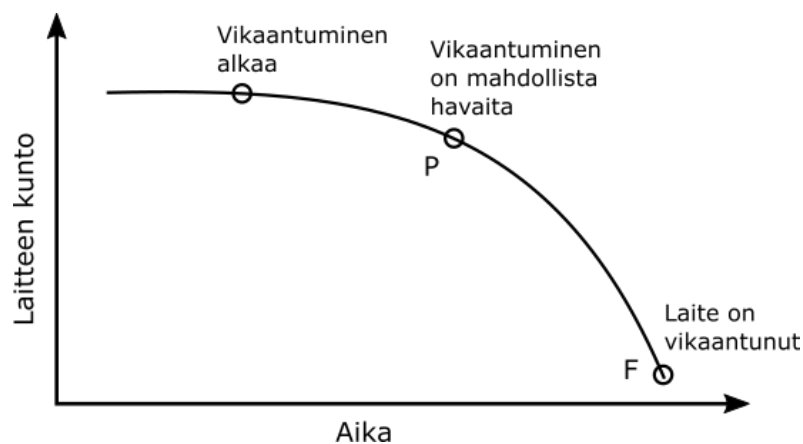
Datan määrän lisäksi on huomioitava datan heterogeenisyys. Yan et al. (2017) tutkivat teollisen big datan käsittelyä ennustavassa kunnossapidossa. Artikkelissa esitetyssä esimerkitapauksessa pyrittiin ennustamaan erään työstökeskuksen keskeisten komponenttien jäljellä olevaa käyttöikää. Hyödyntämällä useista eri lähteistä saatua dataa onnistuttiin tekemään huomattavasti tarkempia ennusteita verrattuna pelkän värähtelydatan käyttämiseen. Koska eri lähteistä saatavan datan rakenne vaihtelee, täytyy kiinnittää huomiota datan strukturointiin ennen kuin siitä pystytään saamaan hyödyllistä tietoa. (Yan et al. 2017)

Lein et al. (2018) mukaan datasta voidaan etsiä erilaisia laitteen kunnosta kertovia fyysisiä ja virtuaalisia indikaattoreita. Fyysiset indikaattorit kuvaavat laitteen fysiikkaan liittyvää vikaantumista ja niitä voidaan muodostaa tilastollisten tai signaalinkäsittelyn keinoin, kun taas virtuaaliset indikaattorit yhdistelevät dataa eri lähteistä ja pyrkivät kuvaamaan laitteen kunnan heikkenemisen trendiä. Näiden trendien avulla voidaan jakaa laitteen käyttöikä eri vaiheisiin, minkä avulla voidaan tehdä päätelmiä muun muassa laitteen kunnan heikkenemisen nopeudesta. (Lei et al. 2018)

3.2 Diagnostiikka ja prognostiikka kunnossapidon päätöksen tukena

Kunnonvalvonnasta saatavan datan hyödyntämiseen voidaan käyttää sekä diagnostiikan että prognostiikan menetelmiä. Siinä missä diagnostiikan keinoin pyritään selvittämään poikkeaman tai vian syy ja varoittamaan laitteen poikkeavasta toiminnasta, prognostiikkaa tarvitaan, kun halutaan tietää kuinka kauan laitetta voidaan poikkeaman havaitsemisen jälkeen vielä turvallisesti käyttää. Prognostiikan avulla arvioidaan, milloin laitteen vikaantuminen voisi tapahtua. (Ahmad & Kamaruddin 2012) Usein ennustettavana parametrina on laitteen jäljellä oleva käyttöikä (RUL, *remaining useful life*). Prognostiikkamenetelmiä on useita ja valittu menetelmä vaikuttaa laitteesta kerättävän datan tarpeeseen. (Bousdekis et al. 2015)

Arvioidessa jäljellä olevaa käyttöikää eräs hyödyllinen periaate on laitteen vikaantumista kuvaava P-F-käyrä (kuva 3). Pistellä P (*potential failure*) tarkoitetaan ajanhetkeä, jolloin kunnan heikkeneminen pystytään havaitsemaan ja pisteellä F (*functional failure*) todellista vikaantumisen hetkeä. Valittu tekninen ratkaisu vaikuttaa siihen, kuinka aikaisin vikaantumisen alkaminen on mahdollista havaita. (Bousdekis et al. 2015)

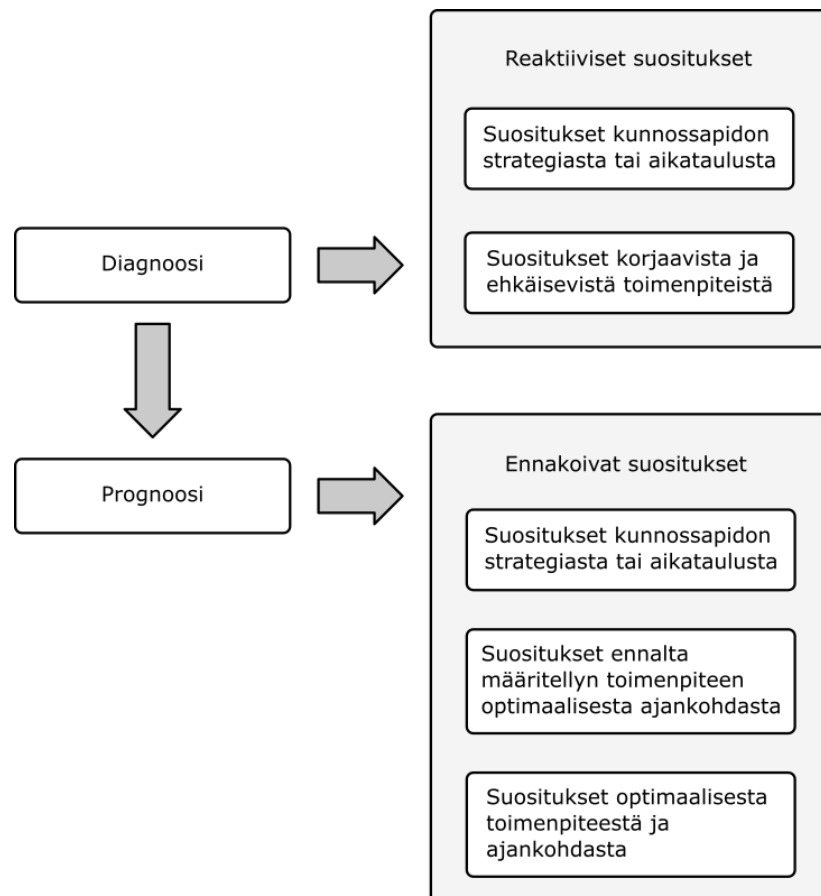


Kuva 3. P-F-käyrä (Bousdekis et al. 2015)

Kwonin et al. (2016) mukaan prognostiikkamenetelmät voidaan jakaa kolmeen luokkaan: vikaantumisen fysiikkaan perustuva (PoF, *physics-of-failure*), dataan perustuva (*data-driven*) ja fuusio eli edellä mainittujen yhdistelmä. Fysiikkaan perustuva lähestymistapa vaatii ymmärrystä siitä, miten fyysikaalinen, sähköinen, kemiallinen ja mekaaninen rasitus

voivat aiheuttaa vikaantumisen. Dataan perustuva lähestymistapa puolestaan hyödyntää data-analytiikkaa ja koneoppimista poikkeamien tunnistamiseksi ja toimintavarmuuden ennustamiseksi. (Kwon et al. 2016) Biggio ja Kastanis (2020) korostavat erityisesti sellaisten mallien potentiaalia, jotka yhdistävät fysiikkaan perustuvien sekä koneoppimista ja erityisesti syväoppimista hyödyntävien mallien vahvuudet.

Sekä diagnostiikka että prognostiikka ovat tärkeä osa kuntoon perustuvaa kunnossapitoa. Diagnostiikan avulla pystytään muodostamaan reaktiivisia suosituksia ja prognostiikan avulla ennakoivia suosituksia kunnossapidon päätöksentekoon. Kuvassa 4 esitetään Bousdekisin et al. (2015) esittämä viitekehys kuntoon perustuvan kunnossapidon päätöksenteosta. Reaktiiviset suositukset perustuvat tietoon laitteen nykyisestä kunnosta ja keskittyvät suosittelemaan välittömiä lieventäviä toimenpiteitä. Proaktiiviset suositukset sen sijaan liittyvät toimenpiteiden ja niiden ajankohdan optimointiin. (Bousdekis et al. 2015)



Kuva 4. Kunnossapidon päätöksenteon tukeminen (Bousdekis et al. 2015)

4. KUNTOON PERUSTUVAN KUNNOSSAPIDON KÄYTTÖÖNOTTO

Vaikka kuntoon perustuvan kunnossapidon avulla on mahdollista pienentää kunnossapidon kokonaiskustannuksia, on vielä paljon tehtävää, ennen kuin se saadaan laajasti teollisuuden käyttöön. Käyttöönottoon liittyy monenlaisia haasteita ja päätöksiä, minkä takia on hyvä määritellä konkreettiset askeleet, jotka helpottavat optimaalisen kunnossapitostrategian muodostamisessa. (Hoffmann & Lasch 2020)

Tässä luvussa käsitellään kirjallisuudessa esitettyjä kuntoon perustuvan kunnossapidon käyttöönottoon liittyviä haasteita sekä pohditaan minkälainen prosessi mahdollistaa uuden kunnossapitostrategian käyttöönoton onnistumisen ja miten yhteistyökumppanit vaikuttavat siihen.

4.1 Käyttöönottoon liittyvät haasteet

Ingemarsdotter et al. (2021) jakavat kuntoon perustuvan kunnossapidon käyttöönottoon liittyvät haasteet kuuteen kategoriaan: datan laatuun ja saatavuuteen liittyvät haasteet, tarvittavan ajan, resurssien ja kokemuksen puute, datan keräämisen joustamattomuus, prosessien, roolien ja vastuiden puute, käyttäjien kokemattomuus ja muutoshaluttomuus sekä organisaation ristiriitaisiin tavoitteisiin tai kunnossapidon liiketoiminnalliseen merkitykseen liittyvät haasteet. Tutkimuksessa havaittiin muun muassa se, että kerättävän datan valinnalle ei ole selkeitä prosesseja, mikä voi johtaa puutteellisen tai hyödyttömän datan keräämiseen. Myös organisaation prosesseja, kuten tiedon siirtymistä yrityksen eri toimintojen välillä, jouduttiin selkeyttämään käyttöönottoprosessin aikana. (Ingemarsdotter et al. 2021)

Tiddens et al. (2022) korostavat käyttöönotossa tehtävien päätösten merkitystä. Vaikka erilaisia kunnossapidon tekniikoita ja teknologioita on tutkittu paljon, yrityksissä ei ole aina selvää minkälaista dataa tulisi kerätä ja mitä tekniikoita mihinkin kunnossapitotarpeeseen tulisi käyttää. Jos näiden päätösten tekemiselle ei ole ennalta määriteltyä menettelytapaa, perustuu käyttöönotto yritykseen ja erehdykseen, eikä sen lopputuloksesta ole varmuutta. (Tiddens et al. 2022) Myös Ingemarsdotter et al. (2021) tunnistavat kuilun yritysten kokemien haasteiden sekä kirjallisuudessa esitettyjen edistyneiden kunnossapitoratkaisuiden välillä.

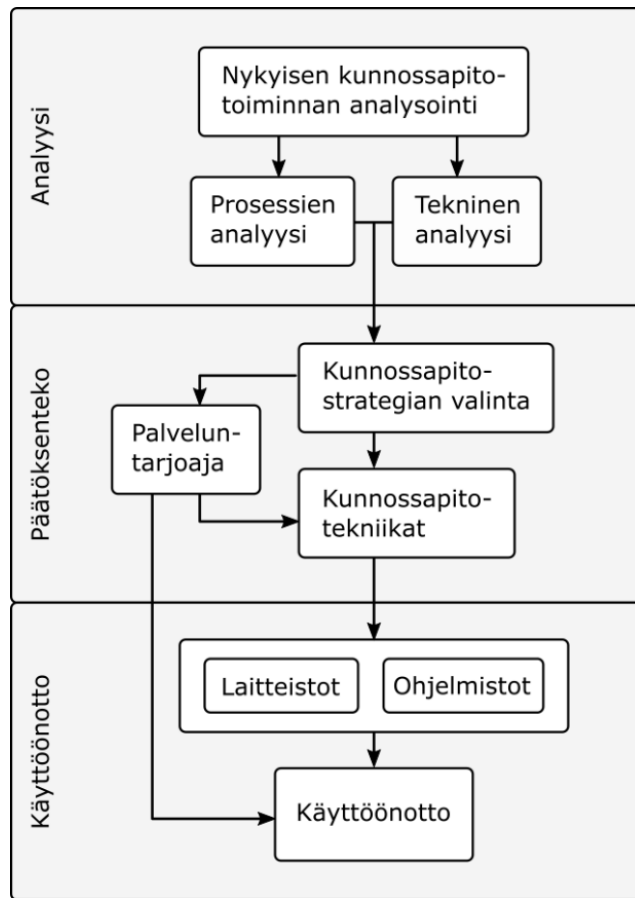
Bousdekis et al. (2020) listaavat käyttöönottoon liittyviä teknisiä haasteita, kuten tiedon löytäminen suuresta datamäärästä, standardien puute, kyberturvallisuusriskit ja reaaliaikaisen sekä historiatiedon saatavuus. He toteavat kuitenkin, että vielä merkittävämpiä haasteita ovat liikkeenjohdolliset ja organisatoriset haasteet, kuten investointikustannukset, strategiset valinnat sekä muutos- ja projektijohtaminen. Uusien kunnossapitoratkaisuiden käyttöönottoa vaikeuttaa usein työntekijöiden muutosvastarinta. Yrityksen johdon tulee tukea sellaisen yrityskulttuurin syntymistä, joka kannustaa työntekijöitä kokeilemaan uudenlaista teknologiaa ja työtapoja. (Bousdekis et al. 2020) Tämä vaatii sitä, että johdon on itse uskottava muutokseen. Kulttuuri vaikuttaa myös siihen, luotetaanko yrityksen sisällä uuteen teknologiaan ja algoritmeihin, joita ei välttämättä syvällisesti ymmärretä. (Bokrantz et al. 2020)

Usein merkittäväksi haasteeksi nousee tarvittavien investointien perusteleva perusteleminen, sillä kunnossapidon kehittämisen tuottamaa arvoa on vaikea määrittää. Vaikka sensorit ja laskentateho ovat nykyään suhteellisen edullisia, niitä ei pystytä tehokkaasti hyödyntämään ilman investointeja henkilökunnan koulutukseen, yrityksen toimintojen uudelleenorganisointiin ja ulkoisten yhteistyösuhteiden tarkasteluun. Sen lisäksi, että henkilökunnan tulee ymmärtää modernin kunnossapidon edut, tarvitaan investointien mahdollistamiseksi konkreettisten taloudellisten hyötyjen määrittämistä. (Bokrantz et al. 2020)

4.2 Vaiheet onnistuneeseen käyttöönottoon

Kun yrityksessä aloitetaan kunnossapitotoiminnan kehittämisprojekti, liittyy siihen paljon päätöksiä, jotka vaikuttavat lopputuloksen onnistumiseen. Ensimmäisenä on tunnistettava, onko lähtökohtana teknologinen työntö, eli jokin uusi saatavilla oleva teknologia, vai tietyn päätöksen tukeminen, jolloin etsitään tarkoitukseen sopiva teknologia. Toiseksi tulisi päättää mitä dataa kerätään ja miten se käytännössä tehdään. Kolmas päätettävä aihe liittyy siihen, miten tarvittavat ennusteet luodaan. Ennusteet voivat perustua dataan, fysikaaliseen mallinnukseen tai asiantuntijan tietämykseen. Viimeinen aihe on kunnossapidon päätöksenteon taso, eli hyödynnetäänkö poikkeamien tunnistamista, diagnostiikkaa vai prognostiikkaa. Näiden päätösten järjestys ei välttämättä ole aina sama, mutta ne ovat asioita, joita tulisi pohtia käyttöönottoprosessin aikana. (Tiddens et al. 2022)

Siirtyminen kuntoon perustuvaan kunnossapitotoimintaan on merkittävä muutos yrityksen kunnossapitotoiminnassa, joten on hyödyllistä tehdä se ennalta määriteltyä prosessia noudattaen. Hoffmann ja Lasch (2020) esittävät prosessin, jonka avulla teollisuuden yritykset voivat uudistaa kunnossapitotoimintaansa vähentääkseen kunnossapidossa tarvittavia kuluja ja resursseja. Prosessi on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Kuntoon perustuvan kunnossapidon käyttöönottoprosessi
(Hoffmann & Lasch 2020)

Käyttöönottoprosessi alkaa kunnossapidon nykytilan selvittämisellä. Analysoimalla olemassa olevaa kunnossapitoprosessia voidaan arvioida kuntoon perustuvan kunnossapidon tarjoamia potentiaalisia hyötyjä ja puolestaan tekninen analyysi auttaa hahmottamaan teknistä valmiutta ja vaadittavia toimenpiteitä ja kustannuksia. (Hoffmann & Lasch 2020). Alustava arvio investoinnin kannattavuudesta sisältää käyttöönoton vaatimien kustannusten lisäksi arviot kunnossapidon kustannuksista sekä pysähtyneen tuotannon aiheuttamista menetyksistä (Rastegari & Bengtsson 2014).

Kunnossapitostrategian valintaan kuuluu alustavan kustannus- ja hyötyarvion lisäksi päätös siitä, toteutetaanko kunnossapito itse vai hyödynnetäänkö palveluntarjoajan osaamista (Hoffmann & Lasch 2020). Rastegarín ja Bengtssonin (2014) mukaan myös yrityksen sisällä on tärkeää jakaa vastuuta pienemmille ryhmille käyttöönottoprosessin

tarpeiden mukaan. Strategian valinnan jälkeen seuraava kriittinen vaihe on kunnossapitotekniikoiden valinta. Kun tiedetään, mitä laitteita halutaan seurata ja tunnetaan kyseisten laitteiden vikatyypit, voidaan päätellä mitä parametreja tai indikaattoreita tulisi seurata, jotta vika on mahdollista havaita. Tämän tiedon perusteella voidaan tehdä päätöksiä halutusta kunnossapitotekniikasta. On kuitenkin huomioitava myös tarvittavan teknologian saatavuus, kustannustehokkuus sekä teknologian käyttämiseen tarvittava osaaminen. (Rastegari & Bengtsson 2014) Ennen varsinaista käyttöönottoa on vielä hankittava ja asennettava tarvittavat laitteistot ja ohjelmistot. Näihin sisältyvät muun muassa sensorit, tietovarastot, data-analytiikkatyökalut, pilvilaskentaratkaisut sekä mahdolliset mobiililaitteet. (Hoffmann & Lasch 2020)

Edellä mainittujen vaiheiden lisäksi Rastegari ja Bengtsson (2014) mainitsevat käyttöönoton vaiheiksi muun muassa koulutuksen, arvioinnin ja kehittämisen. Järjestelmien käyttöön vaadittava koulutus riippuu siitä, kuinka pitkälle järjestelmä jalostaa tietoa automaattisesti ja minkä verran ihmisen täytyy sitä tulkita. Arviointivaiheessa pohditaan käyttöönoton onnistumista tarkastelemalla kunnonvalvonnasta saatavan tiedon hyödyllisyyttä, käyttöönoton toteutuneita kustannuksia sekä järjestelmän tuottamien hälytysten oikea-aikaisuutta. Käyttöönoton jälkeen, kun kunnossapidon kokonaiskuva on selkeämpi, saatetaan havaita vielä kehityskohteita. Kunnossapidon kehittämistä kannattaakin jatkaa vielä käyttöönoton jälkeen, jotta siitä saadaan mahdollisimman paljon hyötyä. (Rastegari & Bengtsson 2014)

4.3 Yhteistyökumppanit käyttöönoton yhteydessä

Teollisuuden yrityksissä ei välttämättä ole kuntoon perustuvan kunnossapidon toteuttamiseen vaadittavia teknologisia kyvykkyyksiä. Tällöin voi olla järkevää hyödyntää yhteistyökumppanien osaamista. (Bousdekis et al. 2020) Usein kunnossapitopalveluita voidaan hankkia laitevalmistajilta. Suurin osa teollisuuden laitteiden valmistajista tarjoavat esineiden internetin mahdollistamia tuotteisiin liittyviä palveluita. Edistyneimmät näistä keskittyvät asiakkaan prosessien optimointiin esimerkiksi kunnossapidon osalta. (Paiola & Gebauer 2020)

Vaikka kunnossapidon toteuttaisi ulkopuolinen yhteistyökumppani, tulee yrityksen sisällä olla selvää, mitä hyötyjä kuntoon perustuvaan kunnossapitoon liittyy ja miten niihin on mahdollista päästä sekä ymmärtää teknologian rajoitteet. Yhteistyö kunnossapitopalvelun tarjoajan kanssa on tärkeätä, sillä esimerkiksi pelkkä laitteista saatava kunnonvalvontadata ei välttämättä riitä kunnossapidon toteuttamiseen, vaan yrityksen on oltava sitoutunut toimittamaan tarvittavia lisätietoja. Olemalla mukana kunnossapitoprosessissa yritys pystyy parantamaan analyysien paikkansapitävyyttä. (Grubic & Peppard

2016) Esimerkiksi tieto laitteen ja käyttäjän välisestä vuorovaikutuksesta voi olla oleellista vikaantumisen syiden ymmärtämiseksi. (Kamp et al. 2016)

Kunnossapitopalvelun tuottajan lisäksi käyttöönottoon liittyy myös muita osapuolia. Teollisuuden yrityksillä tai laitetoimittajilla ei välttämättä ole tarvittavaa datan keräämiseen ja data-analytiikkaan liittyvää osaamista, jolloin on hyvä hyödyntää olemassa olevia pilvipalveluihin ja analytiikkaan keskittyviä alustoja. Myös konsultointipalveluita voidaan hyödyntää etenkin opastamaan käyttöönoton alkuvaiheessa. (Giada & Rossella 2021) Tarkasteltavien laitteiden sekä sensorien tuottajat kannattaa ottaa mukaan prosessiin, sillä laitteen sisäinen sensori helpottaa laadukkaan datan saamista verrattuna ulkoiseen, jälkikäteen asennettuun sensoriin. (Kamp et al. 2016)

Uudet digitaaliset teknologiat mahdollistavat laitteiden valmistajien liiketoimintamallien painopisteen siirtymisen palveluihin (Paiola & Gebauer 2020). Nämä palvelukeskeiset liiketoimintamallit edellyttävät tiivistä yhteistyötä eri osapuolten välillä, uudenlaisia kommunikointitapoja asiakasyritysten ja palveluntuottajan välillä sekä palveluntuottajan perehtymistä datan hallintaan ja tarjoomien räätälöimiseen kunkin asiakkaan tarpeita varten (Suppatvech et al. 2019).

5. PÄÄTELMÄT

Tässä työssä käsiteltiin kuntoon perustuvan kunnossapidon teknologiaratkaisuja ja käyttöönottoa. Koska neljännen teollisen vallankumouksen myötä kunnossapidolla on entistä suurempi strateginen merkitys teollisuusyrityksille, tulee sen kehittämiseen tehdä investointeja. Yritykset kokevat investointien kannattavuuden arvioimisen haastavaksi, sillä kunnossapidon kehittämisestä aiheutuvien säästöjen suuruuden määrittäminen ei ole yksinkertaista. Myös käytännön tasolla kuntoon perustuvaan kunnossapitoon ja sen käyttöönottoon liittyy haasteita, mikä aiheuttaa epävarmuutta yrityksissä. Näistä syistä kuntoon perustuvan kunnossapidon yleistyminen on ollut hidasta.

Hyvin määritellyn käyttöönottoprosessin avulla voidaan huomioida monia haasteita ja pyrkiä minimoimaan niiden vaikutus. Käyttöönottoprosessiin kuuluu paljon päätöksentekoa ja tehtävät valinnat vaikuttavat siihen, miten haasteista selviydytään. Esimerkiksi sensorien valintaan ja asentamiseen liittyvät valinnat vaikuttavat siihen, saadaanko oikeaa ja riittävän laadukasta dataa. Käyttöönotossa on tärkeää myös hyödyntää yhteisökumppaneita, mikäli yrityksellä ei ennestään ole tarvittavia kyvykkyyksiä.

Kuntoon perustuvan kunnossapidon teknologioita on tutkittu paljon ja tekniselle toteutukselle löytyy siis perusta kirjallisuudesta. Vaikka myös käyttöönottoa ja kunnossapitopalveluita käsittelevää kirjallisuutta löytyy, tutkimukset on usein tehty palveluntuottajan näkökulmasta ja niissä käsitellään esimerkiksi uusia palveluihin keskittyviä liiketoiminta- ja ansaintamalleja. Huomattavasti vähemmän löytyy tutkimuksia, jotka hyödyttävät teollisuuden yritystä, joka haluaa kehittää oman tuotantolaitoksensa tai laitteidensa kunnossapitoa. Teorian ja käytännön välillä on siis vielä matkaa ja tarvitaan lisätutkimusta tukemaan yritysten siirtymistä modernimpaan ja älykkäämpään kunnossapitoon ja etenkin käyttöönottovaiheen päätösten tukemiseen.

LÄHTEET

- Ahmad, R., & Kamaruddin, S. (2012). An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application. *Computers & industrial engineering*, 63(1), 135–149.
- Biggio, L., & Kastanis, I. (2020). Prognostics and Health Management of Industrial Assets: Current Progress and Road Ahead. *Frontiers in artificial intelligence*, 3, 578613–578613.
- Bokrantz, J., Skoogh, A., Berlin, C., & Stahre, J. (2017). Maintenance in digitalised manufacturing: Delphi-based scenarios for 2030. *International journal of production economics*, 191, 154–169.
- Bokrantz, J., Skoogh, A., Berlin, C., Wuest, T., & Stahre, J. (2020). Smart Maintenance: A research agenda for industrial maintenance management. *International journal of production economics*, 224, 107547.
- Bousdekis, A., Apostolou, D., & Mentzas, G. (2020). Predictive Maintenance in the 4th Industrial Revolution: Benefits, Business Opportunities, and Managerial Implications. *IEEE engineering management review*, 48(1), 57–62.
- Bousdekis, A., Magoutas, B., Apostolou, D., & Mentzas, G. (2015). A proactive decision making framework for condition-based maintenance. *Industrial management + data systems*, 115(7), 1225–1250.
- Boyes, H., Hallaq, B., Cunningham, J., & Watson, T. (2018). The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. *Computers in industry*, 101, 1–12.
- Giada, C. V., & Rossella, P. (2021). Barriers to Predictive Maintenance implementation in the Italian machinery industry. *IFAC PapersOnLine*, 54(1), 1266–1271.
- Greenough, R. M., & Grubic, T. (2010). Modelling condition-based maintenance to deliver a service to machine tool users. *International journal of advanced manufacturing technology*, 52(9–12), 1117–1132.
- Grubic, T. (2018). Remote monitoring technology and servitization: Exploring the relationship. *Computers in industry*, 100, 148–158.
- Grubic, T., & Peppard, J. (2016). Servitized manufacturing firms competing through remote monitoring technology: An exploratory study. *Journal of manufacturing technology management*, 27(2), 154–184.

- Hoffmann, M. A., & Lasch, R. (2020). Roadmap for a Successful Implementation of a Predictive Maintenance Strategy. In P. Golinska-Dawson, K.-M. Tsai & Monika Kosacka-Olejnik (Eds.). *Smart and sustainable supply chain and logistics – trends, challenges, methods and best practices*. Cham: Springer International Publishing, 423–439.
- Holgado, M., Macchi, M., & Evans, S. (2020). Exploring the impacts and contributions of maintenance function for sustainable manufacturing. *International journal of production research*, 58(23), 7292–7310.
- Ingemarsdotter, E., Kambanou, M. L., Jamsin, E., Sakao, T., & Balkenende, R. (2021). Challenges and solutions in condition-based maintenance implementation—A multiple case study. *Journal of cleaner production*, 296, 126420.
- Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical systems and signal processing*, 20(7), 1483–1510.
- Kamp, B., Ochoa, A., & Diaz, J. (2016). Smart servitization within the context of industrial user–supplier relationships: Contingencies according to a machine tool manufacturer. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 11(3), 651–663.
- Kwon, D., Hodkiewicz, M. R., Jiajie Fan, Shibutani, T., & Pecht, M. G. (2016). IoT-Based Prognostics and Systems Health Management for Industrial Applications. *IEEE access*, 4, 3659–3670.
- Lai, C. T. A., Jiang, W., & Jackson, P. R. (2019). Internet of Things enabling condition-based maintenance in elevators service. *Journal of quality in maintenance engineering*, 25(4), 563–588.
- 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, 799–834.
- Paiola, M., & Gebauer, H. (2020). Internet of things technologies, digital servitization and business model innovation in BtoB manufacturing firms. *Industrial marketing management*, 89, 245–264.
- Parida, A., & Kumar, U. (2006). Maintenance performance measurement (MPM): Issues and challenges. *Journal of quality in maintenance engineering*, 12(3), 239–251.
- PSK 6201 (2022). Kunnossapito. Käsitteet ja määritelmät. PSK standardisointi. 44 s.

Rastegari, A., & Bengtsson, M. (2014). Implementation of Condition Based Maintenance in manufacturing industry—A pilot case study. *International Conference on Prognostics and Health Management*, 1–8.

Schmidt, B., & Wang, L. (2016). Cloud-enhanced predictive maintenance. *International journal of advanced manufacturing technology*, 99(1–4), 5–13.

Suppatvech, C., Godsell, J., & Day, S. (2019). The roles of internet of things technology in enabling servitized business models: A systematic literature review. *Industrial marketing management*, 82, 70–86.

Tiddens, W., Braaksma, J., & Tinga, T. (2022). Exploring predictive maintenance applications in industry. *Journal of quality in maintenance engineering*, 28(1), 68–85.

Yan, J., Meng, Y., Lu, L., & Li, L. (2017). Industrial Big Data in an Industry 4.0 Environment: Challenges, Schemes, and Applications for Predictive Maintenance. *IEEE access*, 5, 23484–23491.