



Laitekohtaisten kunnossapitotaktiikoiden määrittäminen

Jesse Kolari

Opinnäytetyö, AMK

Toukokuu 2024

Insinööri (AMK), Konetekniikka

Kolari, Jesse

Laitekohtaisten kunnossapitotaktiikoiden määrittäminen.

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Toukokuu 2024, 41 sivua.

Konetekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

Tiivistelmä

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Äänekosken tehtaan kunnossapito-osasto. Äänekosken tehdas on suurin yksittäinen CMC:n tuottaja maailmassa. Työn toimeksiantajalla oli tarve määritellä laitekohtaiset kunnossapitotaktiikat tehtaan kriittisimmille laitteille, sillä tällä hetkellä kunnossapidon paino on enemmän reaktiivisessa kuin reagoivassa kunnossapidossa.

Opinnäytetyö toteutettiin kehittämistutkimuksen periaatteiden mukaisesti. Työn tavoitteena oli määritellä laitekohtaiset kunnossapitotaktiikat kriittisyysluokittelun pohjalta tehtaan kriittisimmille laitteille. Lisäksi työn tavoitteena oli arvioida erilaisten kunnonvalvontamenetelmien soveltuvuutta tehtaan laitteille.

Työn pohjimmaisena ajatuksena oli luoda Excel-työkalu, jonka avulla taktiikat voitiin määritellä tehokkaasti suurelle määrälle laitteita. Tämän pohjalta taktiikat luotiin laitetyypeittäin ja komponenttikohtaisesti. Taktiikoiden määrittäminen aloitettiin tekemällä kriittisten laitteiden laitetyypeistä listaus, jonka jälkeen laitetypit purettiin yleisimpiin komponentteihin. Seuraavaksi laitteet jaoteltiin eri kunnossapitolajeihin sen mukaan, mitä kunnossapitoa laitteelle oli kannattavinta tehdä. Tämän perusteella laitteille määriteltiin komponenttikohtaisia taktiikoita. Kunnonvalvonnan piiriin määriteltyjä laitteita käytettiin kunnonvalvontamenetelmien arviointiin, jossa menetelmiä arvioitiin soveltuvuusasteikon avulla. Asteikko perustui menetelmien mitattavuuteen ja P-F käyrään.

Työn tuloksena syntyivät laitekohtaiset taktiikat tehtaan kriittisimmille laitteille, sekä Excel-työkalu, jonka avulla taktiikat saatiin määriteltyä suurelle määrälle laitteita. Lisäksi luotiin arvio kunnonvalvontamenetelmien soveltuvuudesta tehtaan laitteille. Työn tuloksien avulla kunnossapito saadaan kohdistettua oikeille laitteille ja toimeksiantaja pystyy luomaan pohjan luotettavuusohjelmalle.

Avainsanat (asiasanat)

Kunnossapito, kriittisyysluokittelu, kunnonvalvonta

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Liitteet 1, 2, 3 ja 4 ja ovat salassa pidettäviä, ja ne on poistettu julkisesta työstä. Salassapidon peruste on Julkisuuslain 621/1999 24§ kohta 20. Salassapitoaika on kymmenen (10) vuotta työn julkaisusta.

Kolari, Jesse

Defining equipment-specific maintenance tactics.

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, May 2024, 41 pages.

Degree Programme in Mechanical Engineering. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

The thesis was assigned by the maintenance team of Äänekoski plant, which is the world's largest single producer of Carboxymethyl Cellulose (CMC). The maintenance team needed to define equipment-specific maintenance tactics for the plant's most critical equipment, as the current emphasis on maintenance is more reactive than proactive.

The thesis was conducted in accordance with the principles of developmental research. The aim of the thesis was to define equipment-specific maintenance tactics based on a criticality classification for the plant's most critical equipment. Additionally, the thesis aimed to evaluate the suitability of various condition monitoring methods for the plant's equipment.

The fundamental idea of the thesis was to create an Excel tool, that would enable the efficient defining of tactics for a large amount of equipment. Therefore, the tactics were created by equipment type and component-specifically. The process began with listing the types of critical equipment, followed by breaking down these types into their most common components. Subsequently, the equipment was categorized into different types of maintenance based on the most beneficial maintenance actions for each equipment. This categorization led to the definition of component-specific tactics. The equipment categorized under condition monitoring was further evaluated with a suitability scale. The suitability scale was based on the methods measurability and the P-F curve.

The results of the work included equipment-type-specific tactics for the most critical equipment, as well as an Excel tool that was used to define tactics for every piece of equipment. Additionally, an assessment was made of the suitability of condition monitoring methods for the plant's equipment. The result of this thesis enables maintenance to be focused on the right equipment, and the maintenance team can create a foundation for a reliability program.

Keywords/tags (subjects)

Maintenance, criticality analysis, condition monitoring

Miscellaneous (Confidential information)

Appendices 1, 2, 3, and 4 are confidential and have been removed from the public document. The basis for confidentiality is Section 24, Paragraph 20 of the Public Information Act 621/1999. The confidentiality period is ten (10) years from the date of publication of the document.

Sisältö

1	Johdanto	3
1.1	Opinnäytetyön tausta, tavoitteet ja rajaus	3
1.2	Toimeksiantaja	4
2	Tutkimusasetelma	4
2.1	Kehittämistutkimus	4
3	Kunnossapito	6
3.1	Kunnossapitolajit.....	7
3.2	World Class Maintenance	9
3.3	TPM	10
3.4	RCM	11
3.5	Kunnossapidon kustannukset	12
4	Kunnonvalvonta	14
4.1	Värähtelymittaus.....	15
4.2	Lämpötilan mittaus	16
4.3	Voiteluaineanalyysi	16
4.4	Ultraäänimittaus	17
4.5	Akustinen emissio	17
4.6	Staattorin virtaspektrin mittaus.....	18
4.7	Digitaalinen radiografia.....	19
5	Vikaantumisen	19
6	Vika- ja vaikutusanalyysi	21
6.1	Vikaantumismuodot.....	22
6.2	Tiedonhankinta analyysia varten	22
6.3	RPN.....	22
6.4	Vaihtoehtoiset riskienarviointimenetelmät.....	23
7	Lähtötilanne	25
7.1	Kunnossapidon nykytilanne	25
7.2	Kriittisyysluokittelu.....	25
8	Laitekohtaisten kunnossapitotaktiikoiden määrittäminen	27
8.1	Työn kulku	27
8.2	Kunnonvalvontamenetelmien arvioiminen	29
9	Tulokset	30
9.1	Kunnossapitotaktiikat.....	30

9.2 Kunnonvalvontamenetelmien arvioinnin tulokset	31
10 Pohdinta.....	34
Lähteet	36
Liitteet	38
Liite 1. Toimeksiantajayrityksen kriittisyysluokat (salattu).....	38
Liite 2. Laitetyypit (salattu).....	39
Liite 3. Laitetyyppien jako komponentteihin (salattu).....	40
Liite 4. Kunnonvalvontamenetelmien arviointitaulukko (salattu)	41

Kuviot

Kuvio 2. Tutkimussykli. (Kananen 2015, 40.)	5
Kuvio 3. Kunnossapitolajit (PSK 6201:2022, 40; SFS-EN 13306:2017, 22; Ben-Daya ym. 2016, 76, muokattu.)	7
Kuvio 4. TPM pilarit (Agustiady 2016, 148, muokattu.)	11
Kuvio 5. Vierintälaakerin vikaantumisen oireet P-F-käyrällä. (Mikkonen ym. 2009, 141.)	15
Kuvio 6. Vikaantumismallit. (Järviö & Lehtiö 2017, 81; Moubray 1997, muokattu.)	20
Kuvio 7. Laadullinen riskimatriisi. (Basson & Moubray 2018, 199).	24
Kuvio 8. Pystysekoitin purettuna komponentteihin.	28
Kuvio 9. Määriteltyjen taktiikoiden jakauma.	30
Kuvio 10. Taktiikoiden määrittämiseen käytetty pohja.	30
Kuvio 11. Osuus laitteista, joille menetelmä soveltui parhaiten.	31

Taulukot

Taulukko 1. Riskitasot. (Basson & Moubray 2018, 200, muokattu)	25
Taulukko 2. Kunnonvalvontamenetelmien arviointiasteikko.	29

1 Johdanto

1.1 Opinnäytetyön tausta, tavoitteet ja rajaus

Opinnäytetyön taustalla vaikuttavat teollisuudessa esiintyvät trendit, joissa pyritään kehittämään kunnossapitoa yhä ennakoivammaksi ja ennustettavammaksi. Kunnossapidon kehittämisen ja ennakoitavuuden avulla saavutetaan turvallisempi työympäristö ja pystytään minimoimaan ympäristövahingot. Tehokkaalla kunnossapidolla maksimoidaan myös laitteiden toimintavarmuus ja käytettävyys, mikä on erityisen tärkeää Äänekosken CMC-tehtaan kaltaisessa prosessiteollisuuden laitoksessa, jossa linjojen ajaminen alas ja ylös on pitkä ja monimutkainen prosessi ja jonka tuotantoprosesseissa käytetään ympäristölle ja ihmisille vaarallisia aineita.

Toimeksiantajalla on käynnissä MRM (Maintenance Reliability Management) -prosessi, johon opinnäytetyö liittyy. Prosessilla pyritään hallinnoimaan riskejä sekä parantamaan laitteiden käytettävyyttä ja luotettavuutta. Työ perustuu prosessin aikaisempiin vaiheisiin, joissa on aluksi kerätty dataa laitteiden toiminnasta, jonka pohjalta on tehty tehtaan laitteiden kriittisyysluokittelu.

Kriittisyysluokittelussa laitteet arvioitiin HSE:n (Health, Safety, Environment), kapasiteetin, laadun, korjauskustannusten ja lakivaatimusten mukaan kriittisyysjärjestykseen A-, B-, C- ja D-luokkiin.

Työn tavoitteena oli määritellä laitekohtaiset kunnossapitotaktiikat kriittisyysluokittelun mukaisesti kriittisimmille, eli A- ja B-luokan laitteille, joita oli tuhansia. Lisäksi tavoitteena oli perehtyä erilaisiin kunnonvalvontamenetelmiin ja arvioida niiden sopivuutta toimeksiantajan tarpeisiin. Kriittisyysluokittelun ja työn tulosten perusteella toimeksiantajan on mahdollista luoda pohja luotettavuusohjelmalle ja siten myös kunnossapidon pääpaino kohdistuisi oikeille laitteille.

Opinnäytetyön avulla tullaan myös pääsemään lähemmäksi toimeksiantajan asettamaa, WCM:n (World Class Maintenance) mukaista tavoitetta ehkäisevän ja korjaavan kunnossapidon kustannusjakauman suhteen, joka on 80 % ehkäisevää ja 20 % korjaavaa kunnossapitoa. Tavoitteeseen pääsyyn vaikuttavat laitekohtaisten kunnossapitotaktiikoiden luominen, jolloin huoltosuunnitelmien pohjalta tehtävien töiden kustannukset muodostavat 80 % kunnossapidon kustannuksista ja loput 20 % kohdistuvat kriittisyysluokittelun C- ja D-luokan laitteille, joiden taktiikaksi valikoituisi korjaava kunnossapito.

Aihe oli laaja, sillä laitteita oli niin paljon, minkä vuoksi työtä rajattiin koskemaan ensisijaisesti vain tehtaan kriittisimpiä laitteita. Lisäksi taktikat päätettiin luoda laitetyypeittäin, sillä yksittäisten laitteiden analysointi rajauksesta huolimatta olisi vienyt liikaa aikaa ja aiheesta olisi tullut liian laaja toteutettavaksi. Myöskään prosessin seuraavaa vaihetta, eli menetelmien käytäntöönpanoa ja seuranta, ei käsitellä tässä työssä, sillä aihe laajenisi liikaa. Työ kuitenkin jatkuu toimeksiantajalla opinnäytetyön valmistumisen jälkeen.

1.2 Toimeksiantaja

Toimeksiantajayritys on erikoiskemikaalien valmistaja, joka toimii yli 80 maassa. Yrityksen tuotteita käytetään niin puhdistusaineiden, hygieniatuotteiden ja lääkkeiden kuin myös maalien ja pinnoitteiden sekä maatalous- ja rakennustuotteiden valmistuksessa. Yrityksen liikevaihto oli vuonna 2022 5,8 miljardia dollaria ja yrityksessä työskentelee maailmanlaajuisesti tänä päivänä noin 8300 henkilöä. Yrityksen Äänekosken tehtaalla työskentelee noin 200 henkilöä ja tehtaan liikevaihto oli vuonna 2022 176 miljoonaa euroa.

Äänekosken tehtaalla on valmistettu CMC:tä, eli karboksimeetyyliselluloosaa vuodesta 1944. CMC on selluloosaan perustuva anioninen vesiliukoinen polymeeri, joka soveltuu monenlaisiin käyttökohteisiin. CMC:n eri laatuja käytetään esimerkiksi elintarvike-, kaivos- ja öljyteollisuudessa sekä akuissa ja akkuvarastojärjestelmissä.

2 Tutkimusasetelma

2.1 Kehittämistutkimus

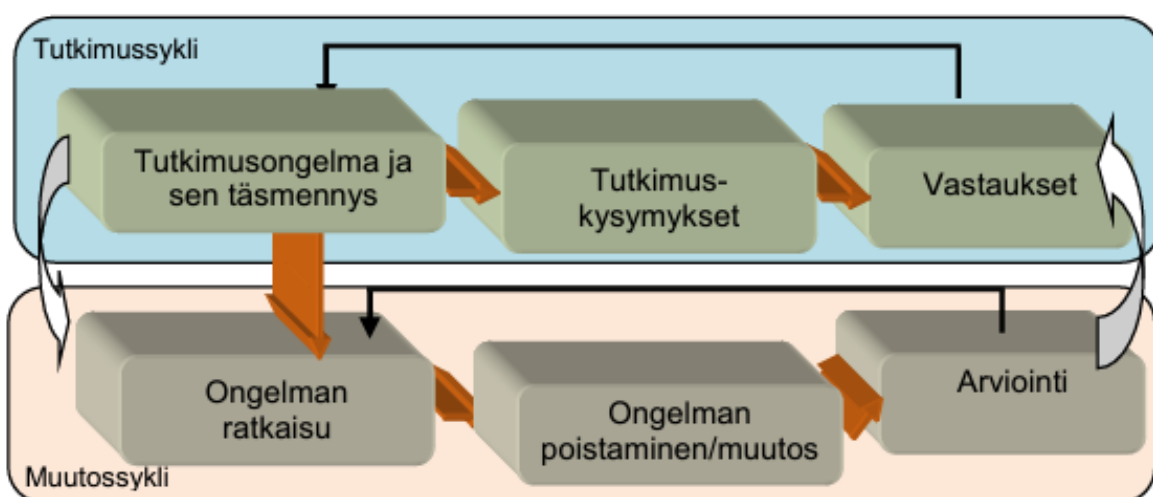
Kehittämistutkimuksessa pyritään muutokseen kehittämällä yleensä joko tuotetta, organisaatiota tai menetelmää. Se ei ole oikeastaan oma tutkimusmenetelmänsä, vaan pikemminkin yhdistelmä erilaisia menetelmiä. Kehittämistutkimus ei ole kuitenkaan sama asia kuin yrity maailmassa tehtävä kehittäminen, sillä kehittämissä on tutkimusosio ja tutkimuksellisempi ote työskentelyyn. Kuviossa 2 on esitetty kehittämissä osat, josta voidaan päätellä, että kehittämissä on jatkuva syklinen prosessi. (Kananen 2015, 40.)

Kehittämistutkimuksessa ongelman määrittely tulee tehdä huolellisesti, jotta ongelman juurisyy ja siihen vaikuttavat tekijät tulevat selville. Ongelmat muutetaan tutkimuskysymyksiksi, joihin tutkimuksessa pyritään löytämään vastaukset. Tutkimuskysymyksiä apuna kannattaa hyödyntää apukysymyksiä. Kun ongelmiin on löydetty vastaukset, niiden toimivuutta testataan, arvioidaan ja seurataan. (Kananen 2015, 41–42.)

Opinnäytetyön tutkimuskysymykset muodostuivat nopeasti toimeksiantajan toiveiden pohjalta. Toimeksiantajan toiveissa oli taktiikoiden määrittelyn lisäksi erilaisten kunnonvalvontamenetelmien tutkiminen. Täten työn tutkimuskysymyksiksi muodostuivat seuraavat kysymykset, joihin kehittämistutkimuksen avulla voidaan löytää vastaukset:

- Minkälaiset kunnossapitotaktiikat sopivat tehtaan laitteille parhaiten?
- Onko olemassa kunnonvalvontamenetelmiä, joita toimeksiantajalla ei ole käytössä, mutta joista voisi olla hyötyä kunnossapidossa?

Kehittämistutkimus eroaa perinteisistä tutkimusmenetelmistä siten, että siinä pyritään aktiivisesti poistamaan jokin ongelma, kun taas perinteisimmissä tutkimuksissa keskitytään ongelman ymmärtämiseen ja sen kautta ongelman ratkaisun esittämiseen. Ratkaisun esittäminen ei kuitenkaan tarkoita sitä, että ongelma poistuisi. (Kananen 2015, 40.)



Kuvio 1. Tutkimussykli. (Kananen 2015, 40.)

Opinnäytetyön aineisto koostuu pääosin toimeksiantajalta saadusta kriittisyysluokittelusta sekä siihen liittyvistä ohjeaineistoista. Lisäksi toimeksiantajalta saatiin hyödyllistä aineistoa MRM-prosessiin, kunnonvalvontamenetelmiin sekä taktiikoiden valitsemiseen liittyen. Opinnäytetyössä käytetyt lähteet koostuvat pitkälti alan kirjallisuudesta, tutkimusartikkeleista sekä verkkosivuista.

Opinnäytetyöhön liittyvät eettiset asiat liittyvät pääosin toimeksiantajalta saadun luottamuksellisen aineiston käsittelyyn ja hallussapitoon. Toimeksiantajalta saatu luottamuksellinen aineisto tuhottiin kaikkine varmuuskopioineen työn valmistuttua. Työstä myös salattiin kaikki liitteet, jotka eivät ole julkisessa versiossa nähtävillä.

3 Kunnossapito

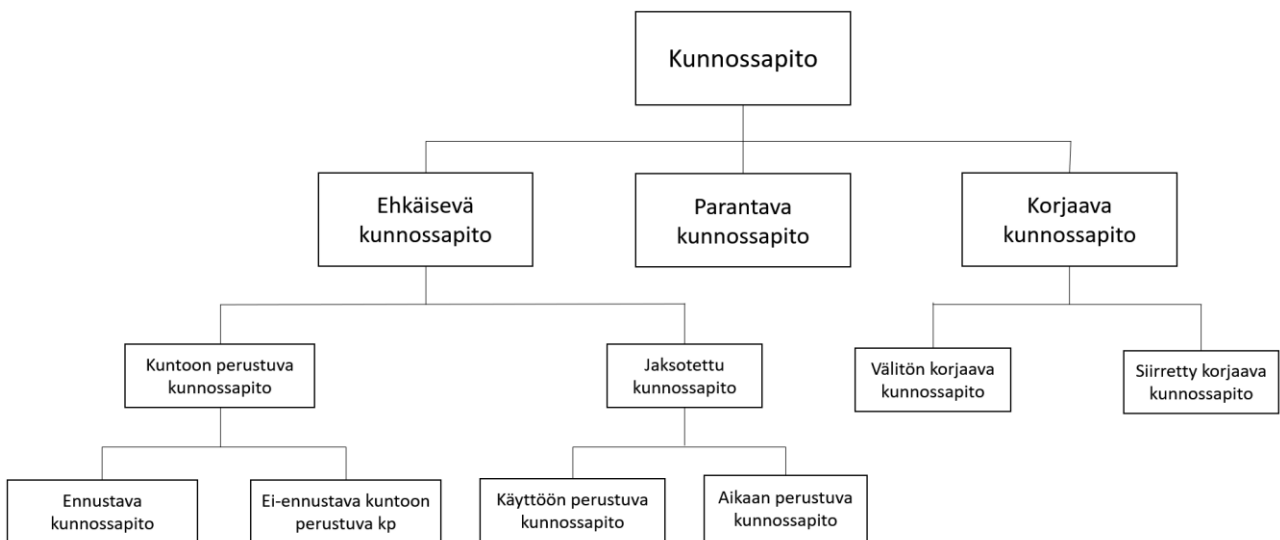
Kunnossapito on yleistermi, jolla viitataan yleisimmin tuotantolaitoksen koneiden, laitteiden ja kiinteistön toimintakunnon ylläpitoon. Kunnossapidon ensisijainen tavoite on varmistaa laitteiden ja koneiden toimintavarmuus, jotta niiden avulla voidaan harjoittaa tuotantoa turvallisesti, tehokkaasti ja siten ettei tuotteen laatu tai ympäristö kärsi. Tuotantotoiminnassa näihin tavoitteisiin päästäkseen kunnossapito tekee yleensä huoltoja, kunnonvalvontaa, korjaustöitä ja muutostöitä. Lisäksi kunnossapidon tulee huolehtia, että havaitut viat tai puutteet korjataan mahdollisimman nopeasti ja edullisesti (Mitä on kunnossapito? n.d.)

PSK 6201:2022 standardissa kunnossapito määritellään toimenpiteiden kokonaisuudeksi, joiden tarkoituksena on varmistaa, että kunnossapidon kohde pystyy toteuttamaan siltä vaadittuja toimintoja koko sen elinkaaren ajan. Toimenpiteet koostuvat johtamiseen liittyvistä, teknisistä ja hallinnollisista toimenpiteistä, joiden tavoitteena on ylläpitää kohteen toimintakykyä tai tarpeen tulleen palauttaa se. (PSK 6201:2022, 3.) SFS-EN 13306 standardissa kunnossapidon määritelmä on pitkälti sama. Siinä kunnossapidoksi määritellään kaikki kohteeseen kohdistuvat liikkeenjohdolliset, hallinnolliset ja tekniset eliniän aikaiset toimenpiteet, joiden tavoitteena on ylläpitää tai palauttaa kohteen toimintakyky, jotta se pystyy toteuttamaan siltä vaadittuja toimintoja. (SFS-EN 13306:2017, 5.)

3.1 Kunnossapitolajit

Kunnossapito jaotellaan hieman eri tavoin standardin mukaan. Eurooppalaisittain SFS-EN 13306:2017 standardissa kunnossapitolajit jaotellaan vikaantumisen mukaan joko vikaantumisen jälkeen tehtävään korjaavaan kunnossapitoon, ennen vikaantumista tehtävään ehkäisevään kunnossapitoon tai parantavaan kunnossapitoon (SFS-EN 13306:2017, 22). Kotimaisessa PSK 6201:2022 standardissa kunnossapitolajit taas jaotellaan joko suunniteltuun tai suunnittelemattomaan kunnossapitoon. Suunniteltua kunnossapitoa ovat esimerkiksi ehkäisevän kunnossapidon toimenpiteet, kuten määräaikaishuollot. Suunnittelematonta kunnossapitoa ovat häiriöstä johtuvat, korjaavan kunnossapidon toimenpiteet. (PSK 6201:2022, 40.)

Ben-Daya, Kumar & Murthy (2016) luokittelevat kunnossapidon hyvin samankaltaisesti kuin SFS-EN 13306:2017 standardissa. He jaottelevat kunnossapidon kolmitasoiseksi, päätasolla ollen ehkäisevä ja korjaava kunnossapito (Ben-Daya ym. 2016, 76). Toisin kuin standardeissa, lähteessä ei ole huomioitu parantavaa kunnossapitoa ollenkaan. Kuviossa 3 on määritelty kunnossapitolajit mukailen Ben-Dayaa ym. sekä edellä mainittuja standardeja.



Kuvio 2. Kunnossapitolajit (PSK 6201:2022, 40; SFS-EN 13306:2017, 22; Ben-Daya ym. 2016, 76, muokattu.)

Ehkäisevä kunnossapito

Ehkäisevä kunnossapito pyrkii arvioimaan kohteen kuntoa ja siten vähentämään sen vikaantumisen todennäköisyyttä jaksotetuin toimenpitein tai jatkuvan seurannan perusteella. Jaksotettua kunnossapitoa tehdään joko tietyn ajanjakson välein tai kohteen käytön perusteella. Jaksotetussa kunnossapidossa ei huomioida laitteen kuntoa ennen toimenpiteiden tekemistä. Kuntoon perustavassa kunnossapidossa taas kohteen kuntoa arvioidaan jatkuvasti, jolloin kunnossapitoa tehdään silloin, kun havaitaan kohteen kunnan heikkenemistä. (SFS-EN 13306:2017, 13–14.)

Parantava kunnossapito

Parantava kunnossapito määritellään standardissa PSK 6201:2022 standardissa seuraavasti: ”Kunnossapitoa, jonka tarkoituksena on parantaa kohteen toimintavarmuutta ja/tai kunnossapidettävyyttä ja/tai henkilö- ja ympäristöturvallisuutta muuttamatta kohteen vaadittua toimintoa.” (PSK 6201:2022, 32.) Järviö & Lehtiö (2017) jakavat parantavan kunnossapidon kolmeen ryhmään:

Ensimmäisessä ryhmässä kohteen komponentteja tai osia vaihdetaan uusiin, jolloin kohteen luotettavuus paranee mutta suorituskyky säilyy samana. Toisessa ryhmässä ovat korjaukset ja uudelleensuunnittelut, joilla pyritään parantamaan kohteen luotettavuutta, mutta kuitenkin pitämään suorituskykyä samalla tasolla. Kolmannessa ryhmässä on modernisointi, jolla pyritään parantamaan koneen suorituskykyä. Modernisointia tehdään yleensä laitteille, joiden elinikä on pidempi kuin valmistettavien tuotteiden elinkaaret. (Järviö & Lehtiö 2017, 51.)

Korjaava kunnossapito

Korjaavaksi kunnossapidoksi kutsutaan kunnossapitoa, jossa vikaantunut kohde palautetaan toimintakelpoiseksi vian havaitsemisen jälkeen, jotta se voi suorittaa siltä vaadittua toimintoa (PSK: 6201:2022, 27). Toimintakunto voidaan palauttaa joko korjaamalla vikaantunut laite, tai korvaamalla se uudella tai käytetyllä laitteella. (Ben-Daya ym. 2016, 83).

Korjaava kunnossapito voidaan jakaa vielä välittömään korjaavaan kunnossapitoon ja siirrettyyn korjaavaan kunnossapitoon. Välittömässä korjaavassa kunnossapidossa ryhdytään kunnossapito-

toimiin välittömästi vian havaitsemisen jälkeen, jotta laite palautuisi mahdollisimman nopeasti toimintakuntoiseksi. Siirrettyä korjaavassa kunnossapidossa vikaantumiseen ei puututa välittömästi, vaan toimenpiteitä siirretään sopivampaan ajankohtaan. (Ben-Daya ym.2016, 83–84.)

Siirrettyä korjaavaa kunnossapitoa kutsutaan joskus myös englanninkielisellä termillä ”Run to Failure”. Siinä kohdetta käytetään tietoisesti niin kauan, kunnes se hajoaa, jonka jälkeen se korvataan. Menetelmää käytetään silloin, kun kohde ei ole kriittinen ja jos kohteelle ei kannata taloudellisista syistä suorittaa ehkäisevää kunnossapitoa. (Ben-Daya ym. 2016, 84.)

3.2 World Class Maintenance

World Class Maintenance eli maailmanluokan kunnossapito on lähestymistapa kunnossapitoon, jolla pyritään parantamaan tuotantolaitoksen laitteiden tehokkuutta tiimipohjaisen, ennakoivan kunnossapitotoiminnan avulla. Maailmanluokan kunnossapidon ydinajatus on siinä, että kunnossapitoa tehdään kunnossapitohenkilökunnan, laitteiden käyttäjien sekä insinöörien yhteistoiminnan avulla. (Mobley 2002, 394–395.)

Maailmanluokan kunnossapito perustuu 80/20 sääntöön, jossa oletetaan, että 20 prosenttia ongelmista aiheuttaa 80 prosenttia kuluista. Täten kohdistamalla suurimmat panostukset pienempään, mutta suurimmat kulut aiheuttavaan ryhmään saadaan aikaan parhaimmat tulokset. Optimitilanteessa siis 80 prosenttia kunnossapidon kuluista tulisi koostua ehkäisevän kunnossapidon kustannuksista ja loput 20 prosenttia korjaavan kunnossapidon kustannuksista. (Smith & Hinchcliffe 2003, 15.)

Laitteiden käyttäjien ottaminen osaksi päivittäisen kunnossapidon toimintaa tarkoittaa sitä, että kunnossapitoa tulee kehittää paremmin suunnitelluksi, aikataulutetummaksi ja ennakoivammaksi. Käyttökunta tulee kouluttaa kunnossapidon tehtäviin, mutta myös käyttämään laitteita mahdollisimman järkevästi. Myös kunnossapitohenkilökuntaa tulee kouluttaa laitteiden kunnossapitoon liittyen. Lisäksi esihenkilöitä tulee kouluttaa toimimaan uudessa, ennakoivammassa tiimiympäristössä. (Mobley 2002, 396.)

Maailmanluokan kunnossapidossa pyritään jatkuvaan parantamiseen. Jatkuvaa parantamista voidaan tehdä esimerkiksi kannustamalla laitteiden käyttö- ja kunnossapitohenkilökuntaa antamaan

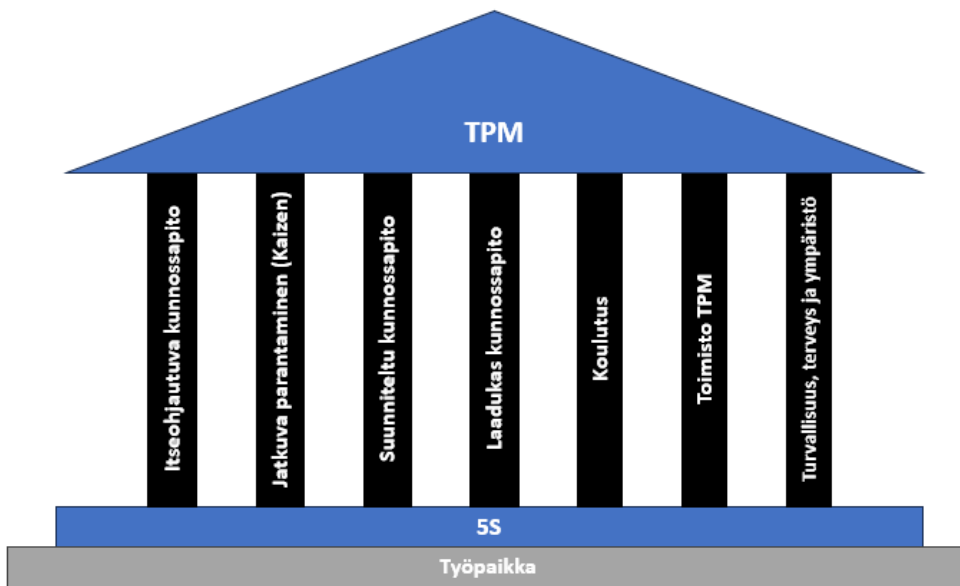
palautetta, jota voidaan hyödyntää kunnossapidon suunnitteluun, laitteiden hankintaan tai vikojen määrittelyyn. (Mobley 2002, 396.)

3.3 TPM

TPM (Total Productive Maintenance) eli kokonaisvaltainen tuottava kunnossapito on kunnossapitostrategia, jonka tavoitteena on tuotannon kokonaistehokkuuden ja laadun maksimoiminen maailmanluokan kunnossapidon ajattelumallin kautta. Tämä tarkoittaa sitä, että kunnossapitotoiminnasta tulee tavallaan kunnossapidon ja tuotannon yhteisprojekti, joiden yhteistyöllä pyritään minimoimaan laitteiden vikaantumiset (Agustiady, T.K 2016, 1 & 123.) Strategian takana piilee ajatus siitä, että kun myös laitteiden käyttäjät osallistuvat kunnossapitoon, he saavat syvempää ymmärrystä ja vastuuta laitteiden toiminnasta. Tämä toimii motivaattorina pitää laitteet hyvässä kunnossa, ja havaita viat mahdollisimman aikaisessa vaiheessa (Mikkonen ym. 2009, 79).

TPM:n tavoitteena on nollatoleranssi laitteiden vikaantumisten ja hajoamisten suhteen, sekä saada organisaation kaikki henkilöstötasot työntekijästä johtajatasolle saakka osallistumaan tuottavuuden parantamiseen (Gulatin 2021, 262). Agustiady (2016) mukaan TPM:llä pystytään puuttamaan kuuteen eri häviöön, joilla voidaan vaikuttaa positiivisesti tuottavuuteen. Näitä häviöitä ovat laitteiden tehokkuuteen liittyvät suunnittelemattomat pysäytykset ja seisokit, saatavuuteen liittyvät hajoamiset, asetukset ja säädöt sekä laadusta aiheutuvat laatuhäviöt. (Agustiady 2016, 1–2.)

Agustiady (2016) kuvailee TPM:ää taloksi, joka koostuu erilaisista kannattelevista pilareista sekä vahvasta perustasta (ks. kuvio 4). Talon perustana toimii 5S-menetelmä, joka toimii lähtökohtana TPM:lle. 5S koostuu seuraavista sanoista: sortteeraus, järjestäminen, siivous, standardisointi ja seuranta. 5S-menetelmällä otetaan ensimmäinen askel kohti jatkuvaa parantamista siisteyden ja järjestyksen muodossa. Siisteyden ja järjestyksen avulla taas saavutetaan parempi tuottavuus, tehokkuus ja laatu. (Agustiady 2016, 147–149.)



Kuvio 3. TPM pilarit (Agustiady 2016, 148, muokattu.)

3.4 RCM

Luotettavuuskeskeinen kunnossapito eli RCM (Reliability Centered Maintenance) on kunnossapitostrategia, jonka tavoitteena on tehostaa kunnossapitoa minimoimalla kunnossapidon työn määrää systemaattisuuden avulla, vaarantamatta kuitenkaan turvallisuutta, ympäristöä tai laitoksen toimintaa (Mikkonen, Miettinen, Leinonen, Jantunen, Kokko, Riutta, Sulo, Komonen, Lumme, Kautto, Heinonen, Lakka & Mäkeläinen 2009, 75). RCM sisältää päätöksentekologiikan, jonka avulla saadaan selville sopivat kunnossapitotoimet, joilla saadaan lievennettyä tai estettyä vikojen syntymistä. RCM-strategian ytimessä onkin ajatus siitä, että vikaantumisten seuraamuksia pyritään pikemminkin hallitsemaan kuin estämään kokonaan. Tätä perustellaan sillä, että kaikkia vikoja ei ole mahdollista kuitenkaan estää, mutta niitä vastaan voidaan kehittää ehkäiseviä toimenpiteitä. (Geisbush & Ariaratnam 2023, 314.)

RCM eroaa muista kunnossapitostrategioista siinä, että se ottaa huomioon sen, että kaikki tehtaan laitteet eivät ole tuotantoprosessin, turvallisuuden tai laitoksen tarpeiden kannalta yhtä tärkeitä. Tämä tarkoittaa sitä, että RCM:n avulla pyritään kohdistamaan kunnossapitotoimet juuri niille laitteille, jotka ovat kaikkein tärkeimpiä (Geisbush & Ariaratnam 2023, 314.) Järviön & Lehtiön (2017) mukaan RCM-strategian päämäärät ovat seuraavat:

- Laitteiden priorisointi tärkeysjärjestykseen laadun, kustannusten, turvallisuuden ja ympäristövaatimusten mukaan. Priorisoimalla laitteita kunnossapito kohdistuu eniten niille laitteille, jotka ovat kaikkein tärkeimpiä
- Selvittää laitteiden vikaantumismekanismit ja siten luoda perusta optimaalisten kunnossapitomenetelmien käytölle
- Saattaa kunnossapidon piiriin passiiviset raja- ja turvalaitteet
- Laatia toimintaohjeet vikaantumisen varalle laitteille, joille eivät sovellu ehkäisevän kunnossapidon menetelmät
- Opettaa laitteiden käyttöhenkilökunnalle kriittisten komponenttien toiminnan seuranta
- Luoda edellytykset laitteiden luotettavuuden parantamiselle, prosessin tuottavuuden parantamiselle sekä kunnossapidon kustannusten analysoimiselle. (Järviö & Lehtiö 2017, 167.)

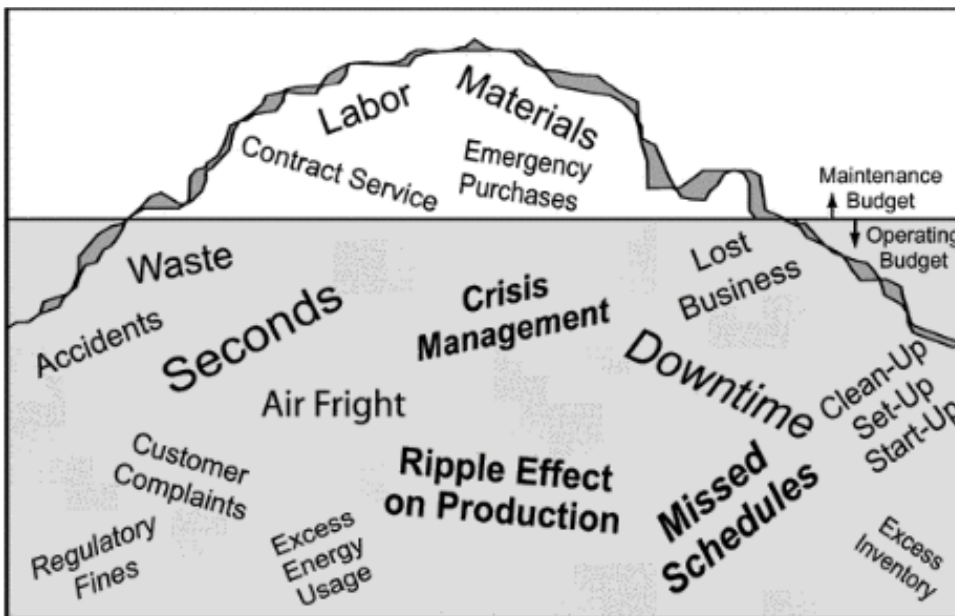
RCM prosessi on raskas varsinkin vanhoille laitoksille, jonka vuoksi siitä on kehitetty kevyempi versio, jota kutsutaan nimellä SRCM (Streamlined Reliability Maintenance) tai ARCM (Applied RCM). SRCM:ssä prosessia voidaan nopeuttaa esimerkiksi tekemällä ensiksi kriittisyyskartoitus laitteille, jonka jälkeen on määriteltävä tietty kriittisyystaso, jonka ylittäville laitteille sovelletaan RCM prosessia. SRCM:n huono puoli on siinä, että sen tulokset eivät ole välttämättä yhtä luotettavia kuin normaalissa RCM:ssä. Siksi sitä ei tulisi käyttää kriittisiin kohteisiin, kuten ydinvoimaloihin tai lentokoneisiin. (Mikkonen ym. 2009, 77–78.)

3.5 Kunnossapidon kustannukset

Kunnossapidon kustannukset jaotellaan yleisimmin joko välittömiin tai välillisiin kustannuksiin. Välittömät kustannukset ovat kunnossapidon tekemisestä aiheutuvia kustannuksia, kun taas välillisiä kustannuksia lasketaan hankalemmin kohdistettavat kustannukset, kuten tuotteen huo- nosta laadusta, tuotannonmenetyksistä tai epäsuhtaisista varastoista aiheutuvat kustannukset. Välittömiin kustannuksiin lasketaan esimerkiksi varaosat, kunnossapidon palkat, materiaalit ja kunnossapidon yleiskustannukset. Välittömiä kustannuksia on helpompi mitata, mutta ne ovat myös pienempi kustannuserä kuin välilliset kustannukset. Täten välillisiä kustannuksia vähentämällä saadaan aikaan selvästi suuremmat säästöt. (Järviö & Lehtiö 2017, 184–185.)

Levitt (2011) esittää kunnossapidon kustannukset jäävuoren muodossa, joista 90 % on pinnan alla olevia piilokustannuksia (ks. kuvio 5). Jäävuoren huippu kuvaa välittömiä kustannuksia ja pinnan alla oleva osa välillisiä kustannuksia. Kuvasta voidaan päätellä, että kunnossapidon kustannukset

ovat pieni kustannuserä verrattuna vikaantumisesta aiheutuvaan tuotannonkeskeytykseen ja siitä aiheutuviin kustannuksiin. (Levitt 2011, 37–38.)



Kuvio 5. Kunnossapidon kustannukset jäävuoren muodossa (Levitt 2011, 37.)

Levittin (2011) mukaan ehkäisevän kunnossapidon kustannuslaskenta voidaan jakaa kolmeen eri tasoon: makrotason, keskitason ja mikrotason analyysihin. Makrotaso on korkein, ja siinä arvioidaan yleisellä tasolla ehkäisevän kunnossapidon kannattavuutta ja sopivuutta yrityksen tarpeisiin. Makrotasolla kannattavuutta selvitetään yleensä sijoitetun pääoman tuoton eli ROI:n (Return of Investment) kautta. (Levitt 2011, 29.)

Keskitasolla arvioidaan kunnossapitomenetelmien kannattavuutta laitetasolla. Keskitason arvioinnissa merkittävin kannattavuuteen vaikuttava tekijä on yleensä laitteen käyttökatkosta aiheutuvat kustannukset. Mikäli laite ei ole tuotannon kannalta merkittävä tai se ei aiheuta pitkiä katkoksia tuotantoon, ei sille myöskään välttämättä kannata tehdä ehkäisevää kunnossapitoa. (Levitt 2011, 30.)

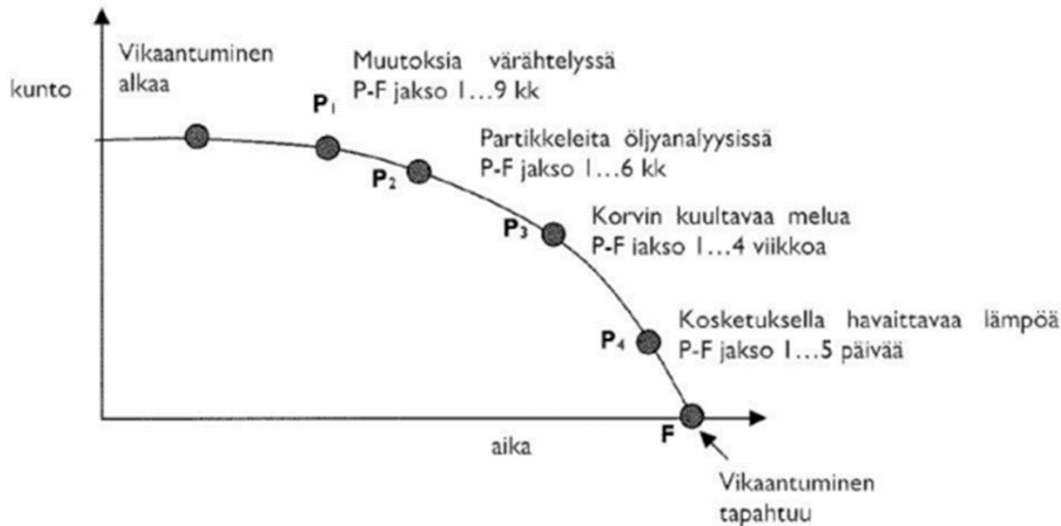
Kun korkeammalla tasolla on päätetty mitä menetelmiä tullaan käyttämään ja mille laitteille, siirrytään mikrotasolle. Mikrotason analyysi on alhaisin ja tarkin taso, jossa arvioidaan mitkä kunnossapitotyöt ovat kannattavia. Mikrotasolla voidaan arvioida esimerkiksi värähtelymittauksista syntyviä kustannuksia ja sen kannattavuutta. (Levitt 2011, 30.)

4 Kunnonvalvonta

Kunnonvalvonta kuuluu kuviossa 3 määriteltyjen kunnossapitolajien osalta kuntoon perustuvaan kunnossapitoon. PSK 6201:2022 standardissa kunnonvalvonta määritellään toiminnaksi, jolla seurataan ja havainnoidaan laitteen toimintaa esimerkiksi erilaisten mittareiden tai aistihavaintojen avulla. Kunnonvalvontaa voidaan tehdä jatkuvasti, tietyin väliajoin tai käytön perusteella. (PSK 6201:2022, 44.) Mikkosen ja muiden (2009, 77–78) mukaan Nohynek & Lumme (2007) määrittelevät kunnonvalvonnan tehtäväksi tuottaa tietoa, jonka avulla huollot ja korjaustoimenpiteet voidaan ajoittaa oikea-aikaisesti, jotta kone voi suorittaa siltä vaadittua tehtävää keskeytymättömästi vaaditun ajanjakson verran.

Mikkosen ja muiden (2009) mukaan Moubray (1997) määrittelee kunnonvalvonnan perusoletukseksi sen, että vaurioitumista edeltää aina jokin koneessa tapahtuva muutos, joka voidaan havaita etukäteen joko aistein tai erilaisilla kunnonvalvontamenetelmillä. Optimaalisten menetelmien ja valvottavien suureiden valitseminen edellyttää hyvää tietämystä todennäköisimmistä vikaantumismekanismeista. Kunnonvalvonnassa vikaantumismekanismeiksi kutsutaan prosesseja, jotka ovat mittausten tai aistien avulla havaittavissa. Näitä voivat olla esimerkiksi murtumat, syöpyminen, väsyminen tai kuluminen. (Mikkonen ym. 2009, 140.)

Kuviossa 5 kuvattu P-F käyrä on hyvä työkalu kunnonvalvonnan suunnitteluun. Käyrä kuvaa koneen kunnon muutosta ajan suhteen. ”P” ilmaisee pistettä, jolloin vikaantumisen oire havaitaan ja ”F” ilmaisee pistettä, jolloin laite vikaantuu. Jaksojen pituudet vaihtelevat kunnonvalvontamenetelmien ja parametrien valinnan mukaan, jolloin P pistettä voidaan siirtää lähemmäksi vikaantumisen ajankohtaa. (Mikkonen ym. 2009, 141.)



Kuvio 4. Vierintälaakerin vikaantumisen oireet P-F-käyrällä. (Mikkonen ym. 2009, 141.)

4.1 Värähtelymittaus

Värähtelymittaus on eniten käytetty kunnonvalvontamenetelmä ja sitä käytetään yleensä teollisuudessa pyörivien koneiden ja laitteiden kunnonvalvonnassa joko vianselvityksiin tai käytönvalvontaan. (Mikkonen, 2009, 223). Pyörivien koneiden värähtelymittauksissa havaitut viat johtuvat yleensä epätasapainosta, epäkeskisyydestä, resonanssista, vääntyneestä akselistä, väljyydestä, kuluneesta hihnasta tai ketjusta tai laakerien tai hammaspyörien vaurioista. (Ahmed & Nandi 2020, 20.)

Värähtelymittausmenetelmät voidaan jakaa yksinkertaisempiin ja monimutkaisempiin menetelmiin. Yksinkertaisissa menetelmissä mitataan koneiden yleistärinä sekä vierintälaakereiden värähtelyä yleensä kahdella mittalaitteella. Yleistärinä mittava laite mittaa värähtelyä 10–1000 Hz taajuusalueella, joka kertoo karkeasti akselin pyörimiseen liittyvistä vioista. Toinen mittalaite mittaa vierintälaakerin värähtelyä yli 2000 Hz taajuudella. Korkeataajuisen värähtelyn lisääntyminen implikoi yleensä laakerivikaa tai voitelukalvon häviämistä. Monimutkaisempia menetelmiä käytetään tapauksissa, joissa yksinkertaiset menetelmät eivät ole tarpeeksi tarkkoja. Näitä voivat olla esimerkiksi koneet, joiden voimansiirrossa käytetään hihnakäyttöä tai hammasvaihteistoa, jonka myötä akselit ovat erinopeuksisia. (Värähtelymittaukset, n.d.)

4.2 Lämpötilan mittaus

Lämpötilan mittaus voidaan tehdä kolmella eri tavalla: lämpökameralla, koskettavilla menetelmillä tai koskemattomilla mittausmenetelmillä. Koskettavia menetelmiä ovat esimerkiksi termoparimitaus, lasilämpömittarit, termistorit, anturit, bi-lämpömittarit ja lämpötilaindikaattorit. Koskemattomia ovat lähinnä joko skannaavat tai kiinteät infrapunälämpömittarit. Lämpökameroita taas on kahdenlaisia: jäähdyttämättömällä ja jäähdytetyllä ilmaisimella toimivia. (Mikkonen ym. 2009, 440.)

Lämpökamera mittaa lämpötilan kohteen pinnasta lämpösäteilyn avulla, parin asteen tarkkuudella. Lämpökameran suurin hyöty on siinä, että sillä voidaan mitata laajalta alueelta lämpötila samanaikaisesti, jolloin lämpötilaerot näkyvät välittömästi laitteen ruudulla. Lämpökameraa käytetään esimerkiksi koneenosien lämpötilanjakaumien määrittämiseen, lämpövuotojen paikantamiseen ja sähkökäyttöjen kaappien lämpötilan mittauksiin. (Mikkonen ym. 2009, 446.)

Infrapunälämpömittarit mittaavat lämpötilaa kohteesta säteilevän sähkömagneettisen säteilyn avulla (Mikkonen ym. 2009). Mittarit mittaavat pienen pistemäisen alueen lämpötilaa. Mittareita voidaan hyödyntää esimerkiksi värähtelymittauksien apuna laitteiden tai koneiden kriittisimmissä kohdissa. (Mobley, R.K 2002, 105.) Infrapunamittarin heikkous piilee siinä, että sillä ei voi mitata alhaisissa lämpötiloissa korkeasti heijastavia pintoja ollenkaan. Tämä johtuu siitä, että kiiltävä pinta heijastaa myös ympäristössä olevaa lämpösäteilyä sen itsensä tuottaman lämpösäteilyn lisäksi. (Mikkonen ym. 2009, 444.)

4.3 Voiteluaineanalyysi

Voiteluaineanalyysia käytetään voiteluaineiden sekä koneiden kunnonvalvontaan ja vianmäärittäykseen. Analyysien avulla saadaan tietoa itse voiteluaineen kunnosta ja voitelun tehokkuudesta, mutta myös koneen osien kuluneisuudesta sekä yleisestä prosessin toiminnasta. Voiteluaineanalyysissä analysoidaan rasvoja ja öljyjä. Molemmat analysoidaan pääosin samoilla menetelmillä. (Mikkonen ym. 2009, 429.)

Voiteluaineanalyysit jaotellaan yleensä tyypeittäin eri luokkiin: Perusanalyyseihiin, hiukkasanalyyseihiin, kulumametallianalyyseihiin ja vesipitoisuusanalyyseihiin. Perusanalyyseilla suoritetaan voiteluaineen kunnonvalvontaa. Hiukkasanalyyseillä seurataan voiteluaineessa olevien hiukkaspartikkelien avulla voiteluaineen puhtautta ja koneen kuntoa. Kulumametallianalyyseillä taas seurataan voiteluaineen metallipitoisuutta, joka kuvastaa koneen kuntoa. Voiteluaineanalyysit toimivat etenkin värähtelymittausten kanssa hyvin yhteen, ja niiden yhdistäminen tehostaakin kunnonvalvontaa merkittävästi. (Mikkonen ym. 2009, 429.)

4.4 Ultraäänimittaus

Ultraäänimittauksessa mitataan yli 30000 Hz taajuudella tapahtuvaa värähtelyä. Ultraäänimittauksessa käytetään yleisimmin paineputkistojen vuotojen havaitsemiseen, sillä vuodon yhteydessä syntyvä turbulентtinen virtaus aiheuttaa värähtelyä, jota voidaan havaita ultraäänimittareilla. Toinen ultraäänellä havaittava ilmiö on venttiileissä ja putkistoissa tapahtuva kavitaatio nestevirtauksessa, joka aiheuttaa myös korkeataajuisia värähtelyä. (Mikkonen ym. 2009, 463.)

Mobleyn (2002) mukaan ultraäänimittauksella ei voida hyödyntää esimerkiksi laakereiden tai koneiden osien värähtelyn mittaamisen avulla tapahtuvaan kunnonvalvontaan, koska menetelmällä ei voida mitata alhaisemmalla taajuudella tapahtuvaa värähtelyä. Täten mittausmenetelmällä ei voida korvata kalliimpia menetelmiä kuten värähtelymittauksia. (Mobleyn, R.K 2002, 111.)

Mikkosen ja muiden (2009) mukaan taas ultraääni kattaa laajan mittausalueen, mukaan lukien iskusäilyksen taajuusalueen. Tämän vuoksi koskettavilla ultraäänien mittausmenetelmillä olisi siten mahdollista mitata laakerivaurioiden lisäksi hankausta, kavitaatiota sekä puutteellista voitelua. Vioittumistapojen erottelu on tosin hankalampaa laajan mittausalueen vuoksi. Mittaus on kuitenkin nopea tehdä, jonka vuoksi se voi olla hyvä menetelmä alkavien vikojen havainnointiin. (Mikkonen ym. 2009, 250.)

4.5 Akustinen emissio

Akustinen emissio perustuu mitattavan kappaleen materiaalissa syntyvien korkeataajuisien jännitysaaltojen mittaamiseen. Jännitysaaltoja aiheuttavat esimerkiksi kappaleen pinnassa olevat säröt tai halkeamat sekä iskumaiset herätteet, jotka havaitaan mittaamalla kappaleen pinnassa olevalla

anturilla. Akustista emission aiheuttajia ovat muun muassa plastiset muodonmuutokset, faasimuutokset, dislokaatiot sekä pintojen väliset kosketukset. (Mikkonen ym. 2009, 250.)

Akustista emissiota käytetään yleensä vierintä- ja liukulaakerien kunnonvalvonnassa, sekä laakerien voitelun kunnonvalvonnassa (Mikkonen 2009, 251). Ahmedin ja Nandin (2020) mukaan akustista emissiota voidaan käyttää esimerkiksi vaihdelaatikoiden kunnonvalvonnassa. Lisäksi menetelmää käytetään sähkölaitteiden iskujen, kitkan, turbulenssin, kavitaation, vuotojen, syklisten väsymisen sekä materiaalihäviön mittaamiseen. (Ahmed & Nandi 2020, 8.)

Ahmed ja Nandi (2020) väittävät, että useiden tutkimuksien mukaan menetelmällä voidaan havaita laakeriviat aikaisemmin etenkin silloin, kun sensoreita ei voida asentaa lähelle mitattavaa laakeria. Menetelmän huonoja puolia ovat kuitenkin sen käyttöönottoon vaadittava erikoisosaaminen sekä korkeat kustannukset. (Ahmed & Nandi 2020, 8.)

Akustisen emission soveltuvuutta venttiilien vuotojen havaitsemiseen on tutkittu useissa tutkimuksissa. Esimerkiksi Kaewaewaen, Prateepasen ja Kaewtrakulpongien (2009, 274–282) mukaan akustisella emissiolla olisi mahdollista havaita venttiilien neste- tai kaasuvuotoja. Myös Ye, Xu ja Wu (2018) ovat samoilla linjoilla. Tutkimuksessa havaittiin, että akustisen emission signaalin keskijännällä ja vuodon määrällä on selkeä lineaarinen suhde. (Ye, Xu & Wu 2018, 340–347.)

4.6 Staattorin virtaspektrin mittaus

Staattorin virtaspektrin mittaus eli toisin sanoen epätahtimoottorin virtasignaalin analyysi on kunnonvalvontamenetelmä, jolla voidaan arvioida sähkömoottorin roottorin kuntoa. Menetelmä on herkempi kuin värähtelymittaus, jonka vuoksi se on suositeltava menetelmä roottorin kunnan arvioimiseen. Menetelmä perustuu staattorin virtasignaalin analysointiin, jossa roottorin sauvaviat havaitaan tietyllä taajuudella esiintyvänä piikkeinä. (Mikkonen ym. 2009, 388.)

Jotta mittaustulos olisi luotettava, täytyy mitattavan moottorin pyörimisnopeuden oltava tiedossa ja myös vakio. Lisäksi staattorin perustaajuuden on oltava vakio sekä moottorin kuormituksen oltava vähintään 50 %. Kun vika havaitaan menetelmän avulla, on suositeltavaa varmistaa mittaustulos värähtelymittauksen avulla. (Mikkonen ym. 2009, 388–389.)

4.7 Digitaalinen radiografia

Digitaalinen radiografia on edistyksellisempi versio perinteisestä röntgenkuvauksesta. Menetelmällä kuvataan kohteita digitaalipaneelin avulla, joka välittää kuvan välittömästi tietokoneelle tarkasteltavaksi. Kuvasta voidaan korostaa muokkauksilla ja käsittelyllä kohteita, jolloin niistä saadaan esille yksityiskohtia. Digitaalinen radiografia on tarkempi kuin perinteinen radiografia, jonka lisäksi se vaatii paljon vähemmän säteilyä. Lisäksi menetelmällä voidaan kuvata kohteita eristeiden läpi ja käynnin aikana. (Digitaalinen röntgenkuvaus eli radiografia DDA-laitteistolla n.d)

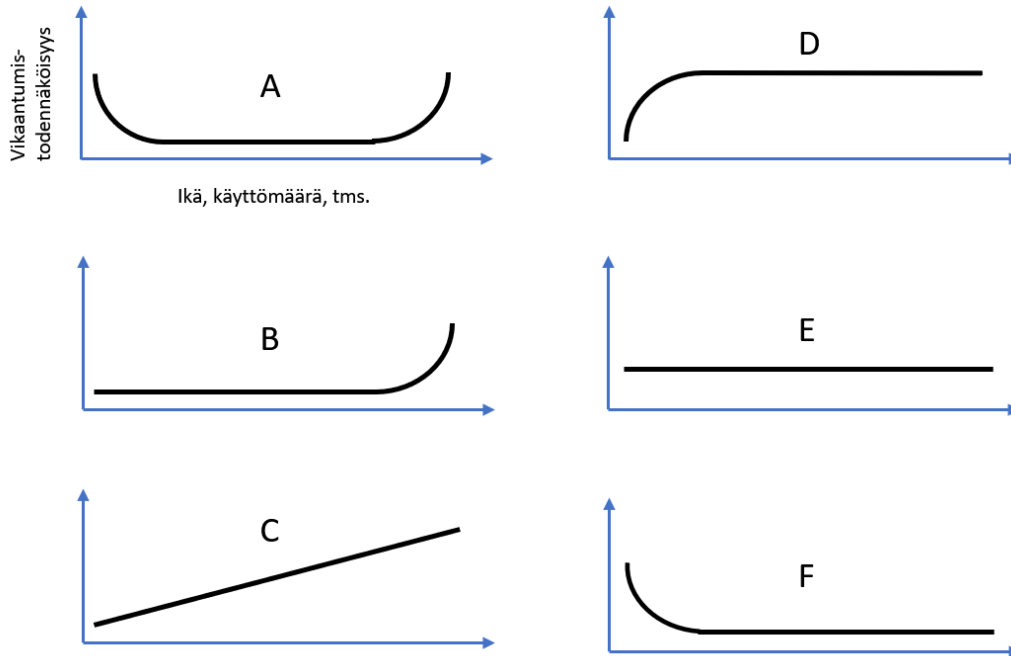
Menetelmä soveltuu useiden erilaisten materiaalien, kuten teräksen, alumiinin, puun, komposiittien, muovien sekä betonien kuvaukseen. Sitä käytetään venttiilien, konerunkojen, paineastioiden sekä putkien tarkastukseen ja kunnonarviointiin. Lisäksi menetelmää käytetään betonirakenteiden, hitsien sekä valukappaleiden tarkastukseen. (Digitaalinen röntgenkuvaus eli radiografia DDA-laitteistolla n.d)

5 Vikaantuminen

Vikaantuminen määritellään SFS-EN 13306:2017 standardissa tapahtumaksi, jossa kohde menettää kyvyn toteuttaa siltä vaadittua toimintoa. Vika taas määritellään vikaantumisen jälkeiseksi kohteen tilaksi. (SFS-EN 13306:2017, 10.) Jokaisella laitteen vialla on oma synty- ja kehittymismekanisminsa, joihin puuttuminen mahdollisimman aikaisessa vaiheessa vähentää vaurioitumisia ja siten myös kunnossapitoa. Laitteet on lähtökohtaisesti suunniteltu toimimaan moitteettomasti, ja mikäli niitä käytetään valmistajan ohjeiden mukaisesti sekä oikeissa olosuhteissa, ei laitteiden tulisi periaatteessa rikkoontua niiden suunnitellun käyttöiän aikana. (Järviö & Lehtiö 2017, 76.)

Perinteisessä käsityksessä laitteen vikaantumisesta on käytetty kuviossa 6 näkyvän A mallin mukaista käyrää, jota kutsutaan myös kylpyammekäyräksi. Siinä oletetaan, että laitteella saattaa olla uutena joitain ongelmia, kunnes laite on ns. ”sisäänajettu” jolloin laitteen toiminta vakiintuu. Vikaantumisen todennäköisyys taas kasvaa, kun lähestytään laitteen eliniän loppua. Kylpyammekäyrän todenpitävyyttä alettiin kuitenkin kyseenalaistamaan jo 1960-luvulla, kun vikaantumiset eivät vähentyneet lentokoneteollisuudessa siitä huolimatta, että osia vaihdettiin säännöllisin väliajoin. Tällöin amerikkalaiset Nowlan ja Heap alkoivat tekemään tutkimusta vikaantumisista, jonka

lopuksi he tulivat siihen johtopäätökseen, että vikaantumismalleja on kuudenlaisia. Nämä mallit ovat esitetty kuviossa 6. (Järviö & Lehtiö 2017, 80–81.)



Kuvio 5. Vikaantumismallit. (Järviö & Lehtiö 2017, 81; Moubray 1997, muokattu.)

Kuvion 8 malleista A, B ja C kuvaavat aikaan perustuvaa vikaantumista ja satunnaista vikaantumista kuvaavat D, E ja F. (Järviö & Lehtiö 2017, 81). Bassonin & Moubrayn (2018) mukaan korrosio, kuluminen, metallin väsyminen sekä lian kertyminen laitteeseen aiheuttavat laitteen vikaantumisen yleensä mallien A, B ja C mukaisesti. F mallin mukaista vikaantumista taas aiheuttavat esimerkiksi vääränlainen laitteen käyttäminen, väärin asennettu laite tai puutteellinen kunnossapito. E mallin mukaista satunnaista vikaantumista aiheuttavat esimerkiksi laitteen ylikuormitus tai vieraan esineen aiheuttama mekaaninen vaurio. (Basson & Moubray 2018, 138–139.)

Järviön & Lehtiön (2017) mukaan Moubray (1997) määrittelee teollisuudessa eniten esiintyviksi vikaantumismalleiksi D, E ja F mallit. Nykyaikaiset laitteet vikaantuvat yleisimmin F mallin mukaisesti, kun taas aikaan perustuvia vikoja esiintyy eniten kontaktissa olevilla yksinkertaisilla laitteilla

ja komponenteilla, kuten esimerkiksi ruuvikuljettimilla tai pumppujen juoksupyörillä. (Järviö & Lehtiö 2017, 82–83.)

Järviön & Lehtiön (2017) mukaan Moubray (1997) määrittelee 10–20 % vioista ennustettaviksi, kun taas 30–40 % olisi mahdollista löytää oireilun perusteella. Täten loppuja, eli noin 50 prosenttia ei olisi mahdollista ennakoita. Moubrayn (1997) mukaan 40–70 % ennakoivasta kunnossapidosta on turhaa, koska usein luullaan, että vikoja voidaan ennustaa useammassa tapauksissa kuin mitä todellisuudessa on mahdollista. Näissä tapauksissa yleensä joko kohde tai käytetty menetelmä on väärä, joka johtaa turhaan kunnossapitoon. (Järviö & Lehtiö 2017, 84.)

6 Vika- ja vaikutusanalyysi

FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) eli vika- ja vaikutusanalyysi on menetelmä, jonka avulla voidaan selvittää laitteen tai koneen toiminnalliset viat, tutkia niistä aiheutuvia seurauksia ja vaikutuksia sekä selvittää korjaavat toimenpiteet (Mikkonen ym. 2009, 153). FMEA:ta voidaan laajentaa kriittisyysanalyysillä, jonka avulla saadaan selville suurimman riskin aiheuttavat vikaantumismuodot. Laajennettua FMEA:ta kutsutaan FMECA:ksi (Failure Mode and Criticality Analysis) (SFS-EN IEC 31010:2019, 48–50.)

FMEA ja FMECA ovat hyödyllisiä työkaluja, joita voidaan soveltaa monissa eri tilanteissa, kuten kunnossapito-ohjelman suunnittelussa, fyysisen järjestelmän suunnittelussa, prosesseissa, menetelyissä, suunnittelun parantamisessa sekä suunnitteluvaihtoehtojen vertailemisessa. Lisäksi FMEA:lla tuotettua tietoa voidaan hyödyntää myös muissa analyysissä, kuten vikapuuanalyysissä ja juurisyyanalyysissä. (SFS-EN 31010:2019, 49.)

Stamatis (2003) määrittelee hyvän FMEA:n sellaiseksi, jossa tunnistetaan potentiaaliset ja tunnetut vikaantumismuodot, niiden syyt ja seuraukset sekä priorisoidaan vikaantumismuodot riskiluvun mukaan. Lopuksi puututaan ongelmiin ja pyritään löytämään oikeat vaihtoehdot niiden ehkäisemiseksi. (Stamatis 2003, 22.)

6.1 Vikaantumismuodot

Vikaantumismuodot voidaan yleisesti jakaa kolmeen eri kategoriaan. Ensimmäiseen kategoriaan kuuluvat tapaukset, joissa laitteen suorituskyky laskee vaaditun tason alapuolelle. Näissä tapauksissa suorituskyvyn heikkenemisen taustalla ovat yleensä voiteluhäiriöt, laitteen kuluminen, lian kertyminen, laitteen osien irtoaminen sekä ihmisten tekemät virheet käytön aikana. Toisessa kategoriassa ovat tapaukset, joissa laitteelta vaadittu suoritustaso nousee laitteen maksimitason yläpuolelle. Näissä tapauksissa laitetta ylikuormitetaan joko tahallisesti tai vahingossa, jolloin laite altistuu vikaantumiselle. Kolmanteen kategoriaan kuuluvat tapaukset, joissa laite ei pysty suoriutumaan halutulla tavalla. Näissä tilanteissa hankittu laite ei ole uutenakaan ollut tarpeeksi tehokas suoriutumaan siltä vaadituista tehtävistä. (Basson & Moubray 2018, 122–132.)

6.2 Tiedonhankinta analyysia varten

Analyysin tiedonkeruussa tulisi ajatella ennakoivasti. Painoarvon tulisi olla yhtä paljon tulevaisuudessa kuin myös menneessä. Tietoa voidaan hankkia laitteen valmistajalta, muiden vastaavien laitteiden käyttäjien tiedoista sekä kolmansien osapuolien tekemistä vika- ja vaikutusanalyyseista tai vikalistaista. Parhaana tiedonlähteenä kuitenkin pidetään laitteiden ja koneiden käyttö- ja kunnossapitohenkilökuntaa, sillä heillä on käytännönläheisintä tietoa laitteiden toiminnasta, vikaantumisista sekä niiden korjaamisesta. (Basson & Moubray 2018, 158–162).

6.3 RPN

RPN (Risk Priority Number) eli riskiluku on numeroarvo, joka kuvaa vikaantumismuodon aiheuttamaa riskiä. Riskiluvun tavoitteena on priorisoida vikaantumismuodot tärkeysjärjestykseen, jotta ehkäiseviä toimenpiteitä voidaan suunnitella ensiksi niille vikaantumismuodoille, jotka aiheuttavat suurimman riskin. Riskiluku on kolmen osatekijän tulo, joita ovat vakavuus, esiintymistiheys ja havaittavuus. Mitä korkeamman luvun vikaantumismuoto saa, sitä suurempi siitä aiheutuva riski on. Riskilukua tulee kuitenkin arvioida kriittisesti, sillä vikaantumismuoto voi saada alhaisen numeerisen tuloksen, vaikka se olisi vakavuudeltaan hyvinkin korkea. Täten korkean vakavuusarvon vikaantumismuotoja on syytä tarkastella erikseen, sillä ne voivat aiheuttaa esimerkiksi turvallisuusriskin tai merkittäviä tuotannonmenetyksiä tuotantolaitoksessa. (Carlson 2012, 150.)

Stamatisin (2019) mukaan vikaantumismuodon vakavuuden ja esiintymistiheyden pienentämiseksi täytyy yleensä tehdä muutoksia joko tuotteen suunnittelussa tai valmistusprosessissa. Tarvittaessa näiden lisäksi voidaan tehdä muutoksia myös normeihin, menettelyihin sekä ohjeisiin. Havaittavuuden parantamiseen ei esitetä keinoja, mutta sen sijaan korostetaan sitä, että ensisijaisesti tulisi käyttää muita keinoja kuin tarkastuksien lisäämistä. (Stamatis 2019, 50–52.)

Riskiluvussa on kuitenkin omat heikkoutensa. Esimerkiksi Stamatis (2019, 42) korostaa sitä, että riskiluku ei ole paras mahdollinen indikaattori, sillä kolmen osatekijän tulosta yleensä vakavuus tai esiintymistiheys hallitsee usein sitä. Myös Carlson (2012, 150–151) luettelee useita riskilukuun liittyviä heikkouksia, joita ovat muun muassa sen subjektiivisuus, havaittavuusarvon epämääräisyys, RPN skaalassa olevat aukot sekä riskiluvun tuloksien päällekkäisyys.

6.4 Vaihtoehtoiset riskienarviointimenetelmät

Riskien arvioimiseksi on olemassa myös vaihtoehtoisia menetelmiä. Bassonin & Moubrayn (2018, 196) mukaan riskien arviointitavat jaotellaan yleisesti kolmeen eri kategoriaan, joita ovat subjektiiviset, määrälliset sekä laadulliset lähestymistavat.

Subjektiivisessä arvioinnissa korostuu riskienarvioijien tietotaito ja kokemus. Arvioinnissa haastatellaan niitä ihmisiä, joihin riskit kohdistuvat eniten ja joilla on tietoa laitteiden tai koneiden vikaantumisista ja niiden seurauksista. Näitä ihmisiä ovat esimerkiksi laitteiden tai koneiden käyttäjät sekä kunnossapitohenkilöstö. Arvioijat arvioivat riskejä oman tietotaitonsa, kokemuksensa sekä haastatelluiden henkilöiden arvioiden perusteella. Subjektiivisiä menetelmiä ei tulisi käyttää silloin, kun vikaantumismuodosta aiheutuvat riskit ovat suuria, jolloin niistä voisi aiheutua suurta vaaraa ihmisten turvallisuudelle sekä ympäristölle. (Basson & Moubray 2018, 197.)

Määrällisessä lähestymistavassa riskejä arvioidaan vikaantumismuodon vakavuuden tai seurausten sekä todennäköisyyden kautta. Vakavuuden arviointiin voidaan hyödyntää esimerkiksi todennäköisyysperusteista riskianalyysiä, kun taas todennäköisyyttä arvioidaan esimerkiksi Monte Carlo analyysin avulla. Analyysien tulokset esitetään logaritmisella asteikolla, jonka avulla voidaan arvioida riskin suuruutta. (Basson & Moubray 2018, 197–198.)

Laadullinen lähestymistapa perustuu riskimatriisiin, jossa myös arvioidaan vikaantumismuodon seurauksia vakavuuden tai seurausten sekä todennäköisyyden avulla. Kuviossa 7 on esimerkki riskimatriisista, jossa todennäköisyys ja seuraukset ovat jaoteltu viiteen eri tasoon, joista jokaisessa on lyhyt kuvaus. (Basson & Moubray 2018, 198–199.)

Aladon | The Risk Reliability DIGITAL NETWORK

Failure Effect / Consequence Severity
(where an event has more than one Loss Type choose the Consequence with the highest ranking)
Consider the Typical Worst Case considering the relevant Operating Context

Consequence or Loss Type <small>Additional Loss Type may exist for an event, identify and rate accordingly</small>		1 Insignificant	2 Minor	3 Moderate	4 High	5 Major
SAFETY AND HEALTH <small>Harms to People (Safety & Health)</small>		First aid case / Exposure to minor health risk	Medical treatment case / Exposure to major health risk	Lost time injury / Reversible impact on health	Single fatality or loss of quality of life / Irreversible impact on health	Multiple fatalities / impact on health ultimately leading to a fatality
ENVIRONMENTAL <small>Environmental Impact</small>		Minimal environmental harm	Minor environmental harm - remedial short term	Serious environmental harm with irreversible impact during plant life	Major environmental harm with irreversible impact post plant life	Extreme environmental harm with irreversible impact
OPERATIONAL (ASSETS) <small>Business Interruption / Material Damage & other Consequential Losses</small>		No disruption to operations / Loss of production and assets totaling up to \$25,000	Brief disruption to operations / Loss of production and assets totaling between \$25,001 < > \$150,000	Partial shutdown / Loss of production and assets totaling between \$150,001 < > \$500,000	Partial loss of operations / Loss of production and assets totaling between \$500,001 < > \$1,500,000	Substantial or total loss of operations / Loss of production and assets totaling more than \$1,500,000
OPERATIONAL (L & R) <small>Legal & Regulatory</small>		Low level legal issue	Minor legal issue / noncompliance or breach of regulation	Serious breach of regulation / investigation / report to authority / prosecution and/or minor penalty possible	Serious breach of regulation / considerable prosecution & penalties	Very serious penalties and prosecutions / Multiple lawsuits & possible jail time
OPERATIONAL (R / S / C) <small>Impact on Reputation / Social / Community</small>		Slight impact / public awareness may exist but no public concern	Limited impact / local public concern	Considerable impact / regional public concern	Serious impact / national public concern	Extreme impact / international public concern
Likelihood / Probability <small>Consider near hits as well as actual events</small>		Risk Rating				
5 Almost Certain	The unwanted event occurred frequently, occurs one or more times a year and is likely to occur within 1 year	11 (M)	16 (S)	20 (S)	23 (H)	25 (H)
4 Likely	The unwanted event occurred infrequently, occurs in the order of less than once a year and is likely to occur within 5 years	7 (M)	12 (M)	17 (S)	21 (H)	24 (H)
3 Possible	The unwanted event occurred sometimes and could occur within 10 years	4 (L)	8 (M)	13 (S)	18 (S)	22 (H)
2 Unlikely	The unwanted event occurred sometimes and could occur within 20 years	2 (L)	5 (L)	9 (M)	14 (S)	19 (S)
1 Rare	The unwanted event has never occurred in the business and is not likely to happen within 20 years	1 (L)	3 (L)	6 (M)	10 (M)	15 (S)

Legend:

- 1 – 5(L) = Low Tolerable Risks – Can be tolerated without the need to do anything about the risk
- 6 – 12(M) = Medium Tolerable Risks – Risks can be tolerated but should be reviewed periodically
- 13 – 20(S) = Significant Risks – Risk Management Strategies must be developed to reduce the risk to medium (M) category
- 21 – 25(H) = High Risks – Risk Management Strategies must be developed to reduce the risks to at least medium (M) category

Kuvio 6. Laadullinen riskimatriisi. (Basson & Moubray 2018, 199).

Kun riskimatriisista on saatu tulos, riskin suuruutta voidaan arvioida esimerkiksi taulukon 2 tyyppisen riskiluokituksen avulla. Riskiluokituksessa alhaisimman riskin taso on ihanteellisin, jolloin toimenpiteisiin ei tarvitse ryhtyä. Keskitason riskin omaavat vikaantumismuodot ovat siedettäviä, mutta niitä tulisi tarkastella määräajoin. Merkittävän ja suuren riskin vikaantumismuodot tulisi toimenpiteiden avulla yrittää laskea vähintään keskitason riskeiksi. (Basson & Moubray 2018, 203–204.)

Taulukko 1. Riskitasot. (Basson & Moubray 2018, 200, muokattu)

Riskitaso	Riskikategoria
1-5	Alhainen riski
6-12	Keskitason riski
13-20	Merkittävä riski
21-25	Suuri riski

7 Lähtötilanne

7.1 Kunnossapidon nykytilanne

Tehtaan omistajavaihdoksen jälkeen kunnossapito-organisaatiolle tuli vaatimus yrityksen EMEA-tiimiltä toteuttaa laitteiden kriittisyysluokittelu, sekä taktiikoiden määrittäminen jo vuoden 2022 aikana, mutta työ ei ole edennyt toivotusti puutteellisten resurssien vuoksi. Nyt kuitenkin kriittisyysluokittelu on saatu viimein valmiiksi. Nykytilanteessa luotettavuusohjelma perustuu vanhojen, entisen omistajan aikaisten luokittelujen pohjalle, jotka eivät vastaa toimeksiantajayrityksen vaatimuksia.

Päivittäisen kunnossapidon puolella toiminta on KPI-mittareiden perusteella melko hyvällä tasolla. Yhtenä selkeänä puutteena nähdään kuitenkin kustannusjakauma korjaavan ja ehkäisevän kunnossapidon suhteen. Nykytilanteessa korjaavan kunnossapidon kustannukset vastaavat 61 prosenttia kunnossapidon kustannuksista, kun taas ehkäisevän kunnossapidon osuus on 39 prosenttia. Toimeksiantajan tavoitteena olisi maailmanluokan kunnossapidon jakauma, joka on 80 prosenttia ehkäisevää ja 20 prosenttia korjaavaa kunnossapitoa.

7.2 Kriittisyysluokittelu

Työ perustui kriittisyysluokitteluun, jossa laitteiden kriittisyydet ovat määritelty lakisääteisten vaatimusten, HSE:n (Health, Safety, Environment), kapasiteetti- ja laatuhäviöiden sekä korjauskustannusten mukaan kriittisyysjärjestykseen A-, B-, C- ja D-luokkiin. Kriittisyysluokittelussa jokaista

osiota on tarkasteltu erikseen laitekohtaisesti, joista korkein yksittäinen luokka määrittelee laitteen kokonaiskriittisyyden. Mikäli useasta yksittäisestä osiosta saadaan tulokseksi C, korottuu laite B-luokkaan. Toimeksiantajayrityksen määrittelemät kriittisyysluokat ovat kuvattu tarkemmin liitteessä 1.

Kriittisyysluokittelun HSE-osiossa laitteen kriittisyys määritellään skenaarioiden avulla. Osiossa arvioidaan tapahtuman vakavuutta ja esiintymistiheyttä riskimatriisin avulla. Mikäli laite saa riskimatriisista tulokseksi S5 tai S4 tason, laite luokitellaan A-kriittiseksi laitteeksi. Mikäli taso on S3, kriittisyysluokaksi määrittyy B. Mikäli taso on S2 tai S1, määrittyy laitteen luokaksi C tai D. A-luokka on käytössä ainoastaan HSE osiossa. Täten laite voi saada A-luokan kriittisyyden ainoastaan, mikäli laite on HSE:n kannalta kriittinen. Mikäli laite on lakisäätteisten tarkastusten piirissä, laite määritellään automaattisesti B-kriittiseksi laitteeksi.

Kapasiteettihäviötä määrittelevät laitteen vikaantumisesta aiheutuvat tuotannonmenetykset, joille on määritelty tuntihinta ja arvioitu korjausaika. Korjausaika tässä tapauksessa tarkoittaa käytännössä varaosan toimitusaikaa, sillä oletuksena on, että varaosia ei ole varastoituna. Kriittisyysluokille on omat kustannusrajansa, jonka ylittyessä laite saa sen luokan.

Laatuhäviön kriittisyysluokka määrittyy laatuvirheen aiheuttamien kustannusten kautta. Kustannukset arvioidaan sen mukaan, että onko tuotteessa oleva virhe havaittu ennen asiakkaalle toimittamista vai sen jälkeen. Lisäksi kustannuksiin lasketaan myös muut epäsuorat tekijät, kuten raaka-aine menetykset sekä energiankulutuksesta syntyvät kustannukset. Myös tässä osiossa ovat kriittisyysrajat, joiden ylittyessä määrittyy kriittisyysluokka. Elintarviketurvallisuuden kannalta kriittiset laitteet, kuten metallinilmaisimet määritellään automaattisesti tässä osiossa B-kriittisiksi laitteiksi.

Kriittisyysluokittelun viimeisessä osiossa on määritelty vikaantumisesta aiheutuvat kunnossapitokustannukset. Siinä kriittisyysluokka määrittyy sen mukaan, kuinka suuret kustannukset aiheutuvat joko laitteen korjaamisesta tai sen vaihdosta kokonaan uuteen vastaavaan. Kunnossapitokustannuksiin lasketaan ainoastaan itse korjauksesta syntyvät kustannukset.

8 Laitekohtaisten kunnossapitotaktiikoiden määrittäminen

Laitteiden analysointiin ja taktiikoiden määrittämiseen oli tarkoitus alun perin käyttää vika- ja vaikutusanalyysia sekä riskilukua. Ongelmaksi kuitenkin osoittautui työn määrä, joka kaikkien laitetyyppien vika- ja vaikutusanalyysiin ja sitä kautta taktiikoiden valitsemiseen uppoaisi. Työssä myös pyritään tuottamaan suuntaa antavia vastauksia suurelle määrälle laitteita, jonka vuoksi vika- ja vaikutusanalyysin käytöstä päätettiin luopua.

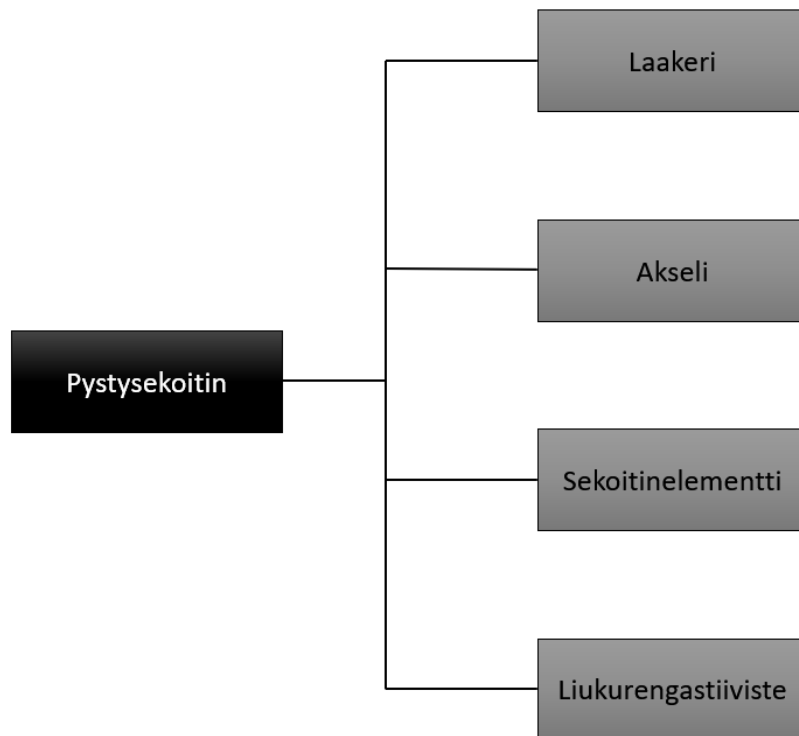
Työn pohjimmaisena ajatuksena on luoda Excel-työkalu, joka ehdottaisi kunnossapitotoimenpiteitä tiettyjen ehtojen täytyessä. Esimerkiksi jos kyseessä on pyörivä, korkeanopeuksinen laite, joka on kriittinen ja jossa on laakeri, työkalu ehdottaisi värähtelymittausta, säännöllistä voitelua ja ei varaosan varastointia. Näin saadaan määriteltyä kunnossapitotaktiikat tehokkaasti suurelle laitemäärälle. Lisäksi lisättäessä uusi laite järjestelmään saadaan automaattisesti ehdotus kunnossapitomenetelmistä, joita laitteelle tulee tehdä. Kunnossapitoinsinööri voisi tämän jälkeen pohtia tapauskohtaisesti näiden menetelmien kannattavuutta.

8.1 Työn kulku

Laitteiden purku komponentteihin

Laitekohtaisten kunnossapitotaktiikoiden määrittäminen aloitettiin luomalla listaus Excelliin laitetyypeistä, jotka ovat A- ja B-kriittisiä. Listaus perustui kriittisyysluokittelussa määriteltyihin laitetyyppihin, sillä tavoitteena oli välttää sekaannuksia ja pitää yhtenäinen linja. Erilaisia laitetyyppisiä kertyi listaukseen yhteensä 112 kappaletta, jotka ovat listattuna liitteessä 2.

Laitteet, jotka oli mahdollista purkaa komponentteihin, purettiin kriittisimpiin komponentteihin (kts kuvio 8), joilla arvioitiin olevan suurin vaikutus laitteen toimintaan ja joille olisi mahdollista tehdä kunnossapitoa. Näin tietyn laitetyyppin laitteen komponenteille voitaisiin määritellä kunnossapitotoimet, joita voitaisiin käyttää kaikkiin samantyyppisiin laitteisiin tiettyjen ehtojen täytyessä. Laitteet, joita ei voitu purkaa pienempiin komponentteihin määriteltiin kunnossapitotaktiikat yleisemmällä tasolla. Laitteiden komponenttilistaus kokonaisuudessaan löytyy liitteestä 3.



Kuvio 7. Pystysekoitin purettuna komponentteihin.

Lakisäätöisten laitteiden arviointi

Ensimmäiseksi arvioitiin laitetyypit, joita koskevat lakisäätöiset määräykset. Näitä laitteita ovat esimerkiksi paineastiat, hälyttimet, varolaitteet ja varoittimet. Laitteiden kunnossapitotaktiikat määräytyivät pitkälti lakisäätöisten tarkastusten ja testausten mukaisesti, sillä lakimääräykset ajavat kaiken edelle.

Kunnossapitolajien määrittäminen

Muiden laitteiden arvioinnissa tarkasteltiin jokaista laitetyyppiä tapauskohtaisesti. Työssä tarkasteltiin ainoastaan A- ja B-kriittisiä laitteita, joten ehkäiseviä toimenpiteitä pyrittiin löytämään ensisijaisesti kaikille laitteille. Yleisesti korjaavan kunnossapidon piiriin päätyivät ainoastaan ne laitteet ja komponentit, joille ei ollut tehtävissä ehkäisevää kunnossapitoa esimerkiksi niiden hankalan sijainnin vuoksi. Jaksotetun kunnossapidon piiriin määriteltiin kaikki laitteet ja komponentit, joille on tehtävissä ehkäisevää kunnossapitoa, joiden vikaantuminen voidaan havaita tai estää erilaisten

tarkastusten tai vaihtojen perusteella, mutta joille ei voida tai ei ole teknisesti tai taloudellisesti kannattavaa tehdä kunnonvalvontaa. Kunnonvalvonnan piiriin taas päätyivät ne laitteet ja komponentit, joilla oli korkea keskimääräinen korjausaika tai joiden vikaantuminen saattaisi aiheuttaa turvallisuus- tai ympäristöriskin.

Kunnossapitolajien määrittelyn jälkeen perehdyttiin tarkemmin toimenpiteisiin, joita laitteille ja komponenteille voidaan tehdä. Toimenpiteet ovat suuntaa antavia, ja rajoitteellisten tietojen vuoksi toimenpiteet määriteltiin hyvin yleisellä tasolla. Niitä voi kuitenkin käyttää pohjatietona tarkemmassa kunnossapidon suunnittelussa.

8.2 Kunnonvalvontamenetelmien arvioiminen

Kunnonvalvontamenetelmien arviointiin käytettiin taulukkoa, johon oli kerätty kaikki laitteet ja komponentit, jotka oli määritelty kunnonvalvonnan piiriin. Taulukossa menetelmät pisteytettiin laitetyypeittäin asteikon avulla, arvioiden komponenteille tehtävissä olevaa kunnonvalvontaa. Asteikko perustui menetelmien soveltuvuuteen sekä P-F käyrään. Esimerkiksi asteikon arvo 2 tarkoittaa sitä, että menetelmällä tehty havainto on kuviossa 5 esitettyssä P-F käyrässä noin pisteessä P4. Asteikko ja sen kriteerit ovat kuvattu tarkemmin taulukossa 2.

Taulukko 2. Kunnonvalvontamenetelmien arviointiasteikko.

Soveltuvuusasteikko	Selite	Kuvaus
1	Ei sovellu lainkaan	Kunnonvalvontamenetelmä ei ole yhteensopiva laitteen kanssa tai mittauksia ei ole tehtävissä.
2	Soveltuu heikosti	Vikaantuminen voidaan havaita menetelmän avulla, mutta laite on jo siinä vaiheessa todennäköisesti vaurioitunut.
3	Soveltuu kohtalaisesti	Vikaantuminen todennäköisesti havaitaan, mutta myöhäisessä vaiheessa. Lyhyt reagointiaika.
4	Soveltuu hyvin	Vikaantuminen havaitaan. Reagointiaikaa on kohtalaisesti.
5	Soveltuu erinomaisesti	Vika havaitaan P-F käyrän alkupäässä. Korjaavat toimenpiteet kerätään ajoittaa hyvin etukäteen. Menetelmällä saadaan kattava yleiskuva laitteen kunnosta.

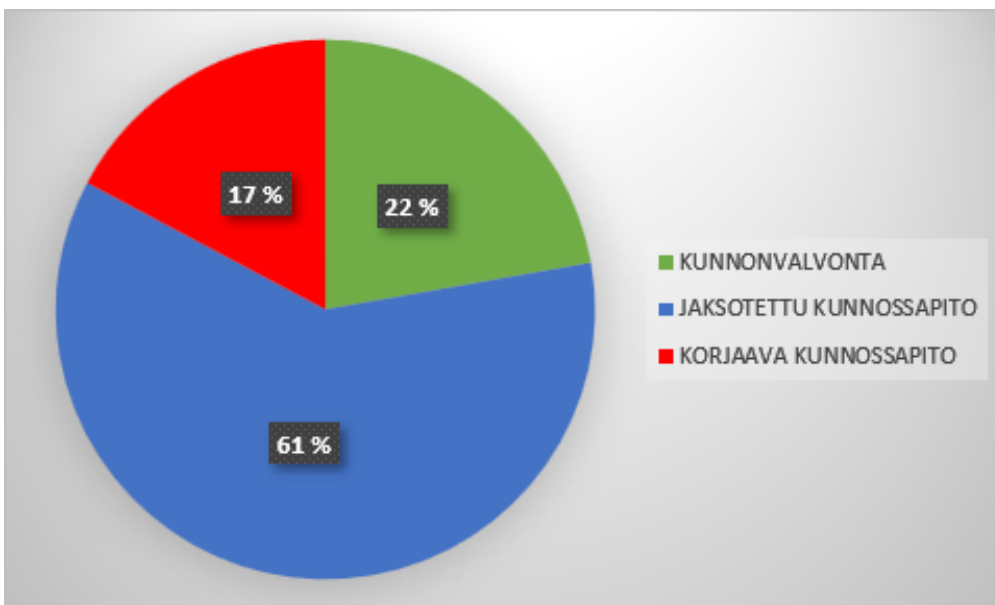
Kunnonvalvontamenetelmistä arviointiin otettiin yleisimmät menetelmät, eli värähtelymittaus, lämpötilan mittaus ja öljyanalyysi. Lisäksi arvioitiin ultraäänimittausta, akustista emissiota, digitaalista radiografiaa sekä virtaspektrin mittausta. Akustinen emissio ja digitaalinen radiografia otettiin tarkasteluun niiden putkien ja venttiilien kunnonvalvontapotentiaalini vuoksi. Virtaspektrin mittaus taas otettiin tarkasteluun sen vuoksi, että tehtaalla on paljon kriittisiä sähkömoottoreita, joihin menetelmää voidaan hyödyntää. Toimeksiantajalla on tällä hetkellä menetelmistä laajemmassa käytössä värähtelymittaus, lämpötilamittaus ja öljyanalyysi. Lisäksi tehtaalla tehdään ulkopuolisten

toimesta lauhteenpoistimien ultraäänimittauksia. Kunnonvalvontamenetelmien arviointitaulukko tuloksineen löytyy liitteestä 4.

9 Tulokset

9.1 Kunnossapitotaktiikat

Ehkäiseviä kunnossapitotaktiikoita saatiin soviteltua hyvin laitekannalle, sillä ainoastaan 17 % laitteista päätyi korjaavan kunnossapidon piiriin (kts kuvio 9). Suurimmalle osalle laitteista taktiikaksi valikoitui jaksotettu kunnossapito, eli erilaisia tarkastuksia, voiteluita ja puhdistuksia. Kunnonvalvonnan piiriin päätyivät kriittiset korkeanopeuksiset pyörivät koneet, sähkölähdöt, venttiilit, putket sekä muuntajat. Kuviossa 10 on esimerkki luodusta taktiikoiden pohjasta, johon määriteltiin toimenpiteitä, ja jota käytettiin työkalun luomiseen.



Kuvio 8. Määriteltyjen taktiikoiden jakauma.

SELITE	MTTR	LAITE	KOMPONENTTI	KUNNOSSAPITOMENETELMÄ	TEHTÄVÄ	MUUT TEHTÄVÄT	VARAOSA	LAKI
PYSTYSEKOITIN	168	AGITATOR	LAAKERI	KUNNONVALVONTA	VÄRÄHTELYMITTAUS	VOITELU	EI	EI
PYSTYSEKOITIN	168	AGITATOR	AKSELI	KUNNONVALVONTA	VÄRÄHTELYMITTAUS		EI	EI
PYSTYSEKOITIN	168	AGITATOR	SEKOITINELEMENTTI	JAKSOTETTU KUNNOSSAPITO	SÄÄNNÖLLINEN TARKASTUS		EI	EI
PYSTYSEKOITIN	168	AGITATOR	LIUKURENGASTIIVISTE	KORJAAVA KUNNOSSAPITO			KYLLÄ	EI
HÄLYTTIN	96	ALARM		JAKSOTETTU KUNNOSSAPITO	LAKISÄÄTEISET TARKASTUKSET/TESTAUKSET		EI	KYLLÄ
O2-ANALYSAATTORI	336	ANALYZER		JAKSOTETTU KUNNOSSAPITO	SÄÄNNÖLLINEN TESTAUS		KYLLÄ	EI

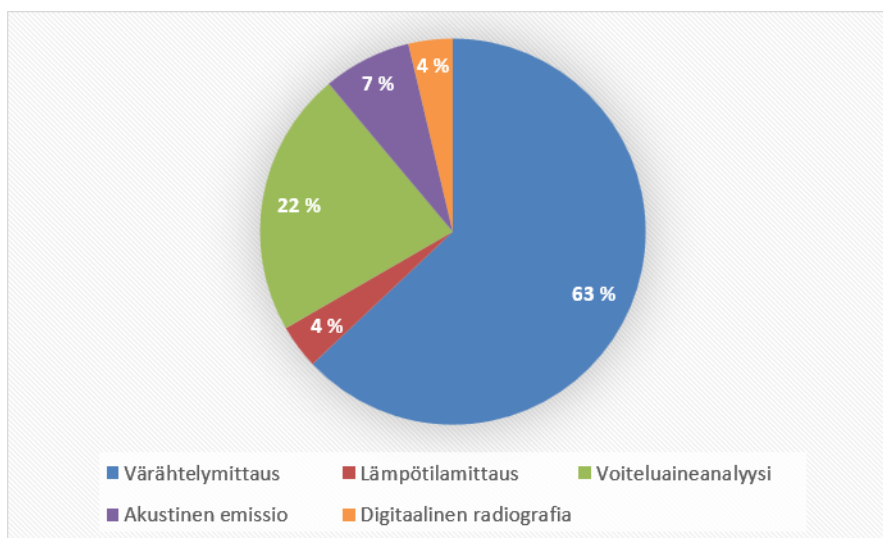
Kuvio 9. Taktiikoiden määrittämiseen käytetty pohja.

Taktiikoiden laajempaa soveltamista varten luotiin Excel-työkalu, jonka avulla taktiikat voidaan määrittellä suurelle määrälle laitteita. Kun laite syötetään työkaluun, työkalu hakee käytännössä erilaisten ehtolausekkeiden avulla ensiksi laitetyypin eri komponentit, jonka jälkeen se tarkistaa onko laite A tai B kriittinen. Jos laite on kriittinen, se noutaa määritellyt kunnossapitotoimet laitteelle. Jos laite ei ole kriittinen, päättyy se automaattisesti korjaavan kunnossapidon piiriin. Laitteita, joita ei ole purettu komponentteihin ehdotetaan suoraan joitain toimenpiteitä.

Työkalu laskee myös automaattisesti laitteen aiheuttamat OEE-kustannukset, sekä korjaavasta ja ehkäisevästä kunnossapidosta syntyneet kustannukset viimeisen neljän vuoden ajalta. Laitteita, joille tämänkaltaista dataa on saatavilla, on kuitenkin vähän. Kustannusten avulla pystytään kuitenkin kohdistamaan joissain määrin kunnossapitotoimia sinne missä niitä tarvitaan.

9.2 Kunnonvalvontamenetelmien arvioinnin tulokset

Arvioinnin tuloksien perusteella värähtelymittaus oli parhaiten soveltuva menetelmä tarkastelluille laitteille. Kuviossa 11 on kuvattu prosentuaalinen osuus laitetyypeistä, joille tietty menetelmä soveltui parhaiten. Öljyanalyysi ja värähtelymittaukset saivat yhtä korkeat arviot joissain laitteissa, mutta ne ovat esitelty soveltuvimpina menetelminä niille laitteille. Kaaviossa ei ole ultraäänimitausta tai virtaspektrin mittausta, sillä menetelmät eivät arvioinnin mukaan soveltuneet parhaiten yhdellekään laitteelle.



Kuvio 10. Osuus laitteista, joille menetelmä soveltui parhaiten.

Värähtelymittaukset

Taulukon tuloksien perusteella tarkastelluille pyöriville laitteille tehokkain kunnonvalvontamenetelmä on värähtelymittaus. Värähtelymittauksilla pystytään valvomaan laajinta kirjoa erilaisia komponentteja sekä havaitsemaan useita erilaisia vikaantumismuotoja. Värähtelymittaus on myös jo toimeksiantajalla käytössä oleva menetelmä, jonka vuoksi menetelmää oli helppo suositella sille soveltuville laitteille.

Online värähtelymittauksien käyttö on perustelua laitteille, joilla on korkea keskimääräinen korjausaika ja jotka ovat kapasiteettikriittisyyden lisäksi joko laatu- tai kunnossapitokriittisiä. Näitä laitteita ovat muun muassa karkea- ja hienorepijät, jauhimet, puhaltimet ja vaihteet. Kriittiset kompressorit voivat vikaantua nopeasti, jonka vuoksi niiden vikaantumista ei välttämättä havaita säännöllisillä mittauksilla. Tämän vuoksi laitteille suositellaan Online mittauksia, kuten myös kriittisimmille pumpuille, joiden mekaanisten vikojen lisäksi voidaan havaita kavitaatiota.

Ultraäänimittaus

Ultraäänimittaus soveltuu hyvin putkien kunnonvalvontaan. Putkien kuntoa voidaan tarkastella hyvinkin tarkasti ja laajasti edistyneimmillä laitteistoilla. Peruslaitteistolla, joihin arvioinnissa keskityttiin, voidaan havaita paineputkistojen kavitaatio ja vuodot. Venttiileissä menetelmällä voidaan havaita kavitaatio. Perinteinen ultraäänimittaus onkin hyvä edullisempi vaihtoehto putkien kunnonvalvontaan, mutta menetelmää ei kuitenkaan tässä tapauksessa suositella minkään laitteen kunnonvalvontaan, sillä vaihtoehtoiset menetelmät tarjoavat laajemmat mahdollisuudet.

Lämpötilan mittaus

Arvioinnin tuloksien mukaan lämpötilan mittaus soveltuu useimmille laitteille kohtalaisesti ja harvoille parhaiten. Usein pelkillä lämpötilamittauksilla ei voida havaita laitteiden vikaantumisia kovinkaan aikaisessa vaiheessa, jonka vuoksi menetelmä toimii parhaiten täydentävänä menetelmänä esimerkiksi värähtelymittausten kanssa vikahavaintojen vahvistamisessa. Tämän vuoksi Online lämpötilamittauksia suositellaan käytettäväksi yhdessä Online värähtelymittausten kanssa kriittisten laitteiden laakereiden kunnonvalvonnassa.

Lämpökamerakuvaus oli paras menetelmä arvioiduista menetelmistä sähkölähtöjen kuvaukseen, sillä kameralla voidaan kuvata alue, josta erottuvat mahdollisista vioista johtuvat korkeat lämpötilat. Arvioinnissa lämpötilamittaus soveltui myös parhaiten Atrex-jauhimien kunnonvalvontaan, sillä laitteelle ei ole tehtävissä värähtelymittauksia sen hankalan luokse päästävyuden vuoksi. Tämän vuoksi suositeltavin toimenpide laitteen kunnonvalvontaan on lämpökamerakuvaus.

Voiteluaineanalyysi

Voiteluaineanalyysi soveltuu erinomaisesti niille laitteille, joille sitä oli tehtävissä. Näitä laitteita ovat muun muassa kompressorit, vaihteet, hydraulikoneikot sekä muuntajat. Kriittisten kompressoreiden sekä vaihteiden kokonaiskunto saadaan kattavasti selville öljyanalyyseiden sekä värähtelymittausten yhteistyöllä. Muuntajien keskimääräinen korjausaika on laitteista kaikkein korkein, jonka takia on välttämätöntä, että laitteille tehdään muuntajaöljyanalyysejä kunnon arvioimiseksi.

Akustinen emissio

Akustinen emissio on mielenkiintoinen kunnonvalvontamenetelmä, jossa on potentiaalia kunnonvalvonnassa monenlaisiin käyttötarkoituksiin. Tutkimuksen mukaan menetelmällä voidaan arvioida hyvin esimerkiksi vaihdelaatikoiden ja pumppujen kuntoa sekä yleisesti laakerien kuntoa. Värähtelymittaus on kuitenkin tehokkaampi tapa laakerien kunnonvalvontaan, jonka lisäksi värähtelymittauksilla voidaan valvoa useampia komponentteja ja siten havaita useampia vikaantumismuotoja. Akustinen emissio on myös kalliimpi ja vaikeakäyttöisempi menetelmä, jonka vuoksi sitä ei kannata käyttää pyörivien laitteiden kunnonvalvontaan.

Venttiileissä menetelmää voidaan käyttää vuotojen ja kavitaation havaitsemiseen. Myös venttiileissä alkavat murtumat voidaan havaita niiden aiheuttaman äänen perusteella. Vuotojen havaitseminen on tärkein havaittava vika venttiileissä, jonka valvomiseen menetelmä on arvioiduista menetelmistä soveltuvin. Tämän vuoksi menetelmä valittiin venttiilien suositeltavaksi kunnonvalvontamenetelmäksi. Menetelmää voitaisiin käyttää esimerkiksi A-kriittisten läppäventtiilien kunnonvalvontaan.

Virtaspektrin mittaus

Virtaspektrin mittaus on tehokkain tapa arvioida sähkömoottorin roottorin kuntoa. Menetelmän heikkous on kuitenkin se, että moottorin mittaukseen liittyy tiettyjä rajoitteita. Virtaspektrin mittauksella ei myöskään voida valvoa laakerin kuntoa kovin hyvin, sillä menetelmällä havaitaan laakerivauriot usein vasta myöhäisessä vaiheessa. Värähtelymittauksilla pystytään arvioimaan paremmin laakerien kuntoa ja myös roottorin kuntoa, joskaan ei aivan yhtä tehokkaasti.

Värähtelymittaus on myös jo toimeksiantajalla käytössä oleva menetelmä, jonka vuoksi sähkömoottorien kunnonvalvontaan suositellaan mieluummin myös tässä tapauksessa värähtelymitausta kuin virtaspektrin mittausta.

Digitaalinen radiografia

Digitaalisella radiografialla voidaan arvioida putkien kuntoa käytön aikana, ja myös eristeiden läpi. Mittauksilla myös saadaan tarkat tulokset välittömästi, jonka vuoksi menetelmä soveltuu hyvin yksittäisten kohteiden pikaiseen arviointiin. Mittaukset ovat myös helpommin tulkittavissa, kuin esimerkiksi ultraäänimittauksissa. Näiden syiden vuoksi menetelmä valikoitui suositeltavaksi kunnonvalvontamenetelmäksi putkille.

Digitaalista radiografiaa voidaan käyttää myös venttiilien kunnonvalvontaan, mutta konkreettista näyttöä menetelmän käytöstä oli heikosti saatavilla. Tämän vuoksi menetelmän soveltuvuutta tulisi tutkia käytännössä tarkemmin, jotta sitä voitaisiin suositella venttiilien kunnonvalvontaan.

10 Pohdinta

Työlle asetetut tavoitteet laitekohtaisten taktiikoiden määrittämisestä ja kunnonvalvontamenetelmien arvioinnista saavutettiin hyvin. Laitekohtaiset taktiikat saatiin luotua kriittisimmille laitteille, jonka lisäksi taktiikat saatiin määriteltyä tehokkaasti kaikille laitteille Excel-työkalun avulla. Käytössä oleville kunnonvalvontamenetelmille löydettiin uusia käyttökohteita ja myös uusia soveltuvia kunnonvalvontamenetelmiä löydettiin.

Työn tuloksien perusteella toimeksiantaja voi arvioida uusien kunnonvalvontamenetelmien käyttöönottoa. Lisäksi toimeksiantaja voi hyödyntää määriteltyjä taktiikoita pohjana kunnossapito-ohjelman suunnittelussa. Luotu työkalu taas mahdollistaa sen, että kun uusia laitteita luokitellaan kriittisyysluokittelun avulla, saadaan automaattisesti ehdotukset kunnossapitotoimista uudelle laitteelle.

Tarkasteltaessa teoriaosion luotettavuutta, osiossa pyrittiin käyttämään mahdollisimman tuoreita, mutta luotettavia lähteitä. Lähteet koostuvat pääosin tunnetuista alan kirjoista ja standardeista, joita voidaan lähtökohtaisesti pitää luotettavina. Tutkimusartikkeleihin suhtauduttiin kriittisesti, sillä työssä käytettiin ainoastaan vertaisarvioituja tutkimuksia. Kokonaisuudessaan teoriaosuutta voidaan pitää luotettavana.

Työn tulosten luotettavuuteen tulee suhtautua kriittisesti. Taktiikat määriteltiin vähäisen tiedon perusteella, sillä dataa laitteista, niiden vikaantumisista, tuotantokatkoista ja niiden aiheuttamista kustannuksista oli hyvin vähän saatavilla. Taktiikat ovat myös hyvin yleistäviä, sillä arvioituja laitetyppejä oli 112, kun taas laitteita oli kokonaisuudessaan tuhansia. Taktiikoiden määrittäminen tarkemmin vaatii laitteiden tarkempaa analysointia esimerkiksi vika- ja vaikutusanalyysin avulla, jolloin voidaan pureutua ongelman juurisyyn, eli vikaantumiseen, ja siten määrittämään ehkäisevät toimenpiteet niiden ehkäisemiseksi.

Kunnonvalvontamenetelmien arviointi tehtiin pitkälti kirjallisuuden ja tutkimusten pohjalta, jonka vuoksi tulokset ovat suuntaa antavia joidenkin vähemmän tunnettujen menetelmien osalta. Mikäli menetelmiä halutaan arvioida tarkemmin, tulee niitä käytännössä testata ja havainnoida sekä peilata kerättyä dataa kirjallisuuteen ja tutkimuksiin. Tähän ei kuitenkaan tätä työtä tehdessä ollut aikaa.

Lähteet

Agustiady, T.K. 2016. Total Productive Maintenance. Strategies and Implementation Guide. Viitattu 25.3.2024. <https://janet.finna.fi/>, EBSCOhost Ebooks.

Ahmed, H. & Nandi, A. 2020. Condition monitoring with vibration signals. Hoboken, New Jersey. John Wiley & Sons, Inc. Viitattu 4.5.2024. <https://janet.finna.fi/>. Ebook.

Basson, M. & Moubray, J. 2018. RCM3: Risk based reliability centered maintenance. South Norwalk, Connecticut. Industrial press. Viitattu 19.3.2024 <https://janet.finna.fi/>, Knovel Industrial Engineering & Operations Management Academic.

Ben-Daya, M. Kumar U. & Murphy, D. N. P. 2016. Introduction to maintenance engineering: Modeling, optimization, and management. Viitattu 18.3.2024. <https://janet.finna.fi/>, Ebook.

Carlson, C. 2012. Effective FMEAs: Achieving safe, reliable, and economical products and processes using failure mode and effects analysis. Wiley. Viitattu 2.3.2024. <https://janet.finna.fi/>, Ebook.

Digitaalinen röntgenkuvaus eli radiografia DDA-laitteistolla. n.d. Viitattu 12.5.2024. <https://www.kiwa.com/fi/fi/palvelumme2/ndt-tarkastus-ja-teknologiapalvelut/digitaalinen-rontgenkuvaus-eli-radiografia-dda-laitteistolla/>

Geisbush, J. & Ariaratnam, S.T. 2023. Reliability centered maintenance (RCM): Literature review of current industry state of practice. <https://janet.finna.fi/>, ProQuest Central. Viitattu 4.4.2024.

Järviö, J. & Lehtiö, T. 2017. Kunnossapito. Tuotanto-omaisuuden hoitaminen. 6. täydennetty painos. Helsinki. Promaint ry. Viitattu 20.2.2024

Kaewwaewnoi, A., Prateepasen A., & Kaewtrakulpong, P. 2009. Investigation of the relationship between internal fluid leakage through a valve and the acoustic emission generated from the leakage. Measurement Volume 43, Issue 2. ScienceDirect. Viitattu 23.4.2024 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224109002140>.

Kananen, J. 2015. Kehittämistutkimuksen kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylä. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Viitattu 7.3.2024 <https://janet.finna.fi/>, Booky.

Kunnonvalvonta. N.d. Artikkelit opetushallituksen sivustolla. Viitattu 27.2.2024 http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_k1_johdanto_kunnonvalvontaan.html

Levitt, J. 2011. The complete guide to preventive and predictive maintenance (2nd edition). Viitattu 26.3.2024. <https://janet.finna.fi/>, Knovel.

Mitä on kunnossapito? N.d. Artikkelit opetushallituksen sivustolla. Viitattu 20.2.2024 http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/perusteet_1-1_mita_on_kunnossapito.html

Mikkonen, H., Miettinen, J., Leinonen, P., Jantunen, E., Kokko, V., Riutta, E., Sulo, P., Komonen, K., Lumme, V., Kautto, J., Heinonen K., Lakka S. & Mäkeläinen, R. 2009. Kuntoon perustuva kunnossapito. Käsikirja. Helsinki: KP-Media Oy

Mobley, R.K. 2002. An Introduction to Predictive Maintenance. 2. p. Amsterdam; New York: Butterworth-Heinemann. Viitattu 28.2.2024. <https://janet.finna.fi/>, Ebook.

PSK 6201:2022. Kunnossapito. Käsitteet ja määritelmät. PSK Standardisointiyhdistys ry. Viitattu 19.2.2024. <https://janet.finna.fi/>, PSK Standardit.

Ramesh, G. 2021. Maintenance and Reliability Best Practices (3rd Edition). Viitattu 25.3.2024. <https://janet.finna.fi/>, Knovel.

SFS-EN 13306:2017. Kunnossapito. Kunnossapidon terminologia. Suomen Standardisointiliitto. Viitattu 19.2.2024. <https://janet.finna.fi/>, SFS Online.

SFS-EN 31010:2019. Riskienhallinta. Riskien arviointimenetelmät. Suomen Standardisointiliitto. Viitattu 21.3.2024. <https://janet.finna.fi/>, SFS Online.

Smith, A.M. & Hinchcliffe, G.R. 2003. RCM-Gateway to World Class Maintenance, <https://janet.finna.fi/>, Ebook. Viitattu 4.4.2024

Stamatis, D.H. 2003. Failure Mode and effect analysis: FMEA from theory to Execution. 2. p. ASQ Quality Press. Viitattu 29.2.2024. <https://janet.finna.fi/>, Knovel.

Stamatis, D.H. 2019. Risk management using failure mode and effect analysis (FMEA) 2.p. ASQ Quality Press. Milwaukee, Wisconsin. Viitattu 20.3.2024. <https://janet.finna.fi/>, EBSCOhost Ebooks.

Värähtelymittaukset. N.d. Artikkelin opetushallituksen sivustolla. Viitattu 4.3.2024
http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_k2_varahtelymittaukset.html

Ye, G-Y., Xu, K-J., Wu W-K. 2018. Standard deviation based acoustic emission signal analysis for detecting valve internal leakage. Sensors and Actuator A: Physical. Volume 283. Viitattu 24.4.2024
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424718308665>

Liitteet

Liite 1. Toimeksiantajayrityksen kriittisyysluokat (salattu)

Liite 2. Laitetyypit (salattu)

Liite 3. Laitetyyppien jako komponentteihin (salattu)

Liite 4. Kunnonvalvontamenetelmien arviointitaulukko (salattu)