LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
Konetekniikan koulutusohjelma

Tapani Lehtonen

ELINTARVIKETEHTAAN TUOTANTOLINJAN KUNNONVALVONNAN KEHITTÄMINEN

Julkinen versio

Tarkastajat: Professori Juha Varis
Professori Jukka Martikainen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Konetekniikan koulutusohjelma

Tapani Lehtonen

Elintarviketehtaan tuotantolinjan kunnonvalvonnan kehittäminen

Diplomityö

2014

79 sivua, 7 kuvaa ja 4 taulukkoa

Tarkastajat: Professori Juha Varis
Professori Jukka Martikainen

Hakusanat: kunnonvalvonta, mittaava kunnossapito, kunnossapito, elintarviketeollisuus, kunnonvalvontahypoteesi

Tutkimuksen tavoitteena oli kunnonvalvontajärjestelmän kehittäminen nykyaikaiselle elintarviketeollisuuden tuotantolinjalle. Työssä etsittiin olemassa olevia kunnonvalvontamenetelmiä ja -sovelluksia erityisesti jäätelötuotantolaitteiden tarpeisiin. Kirjallisuudesta löydettiin sovelluksia lähinnä yksittäisille komponenteille ja kone-elimille. Tutkimuksen kohteena oleva tuotantolinja käytiin läpi toimintojen ja komponenttien osalta. Tehtaan laitekantaa ja valmiutta kunnonvalvonnan käyttöönotolle käsiteltiin yleisellä tasolla.

Kunnonvalvontajärjestelmää kehitettäessä käytettiin hyväksi kirjallisuudesta löytyneitä menetelmiä, joista soveltuvimpia käytettiin kunnonvalvontametodien kartoittamiseen. Kunnonvalvontametodit muodostettiin toiminnanohjausjärjestelmästä ja linjan käyttöönotosta saatujen tietojen avulla. Tietoja käytettiin vika-vaikutusanalyysissä, joka oli pohjana komponentti- ja menetelmäkohtaisessa analyysissa. Kriittisiä ja tuotannon tehokkuuteen vaikuttavia koneenosia ja kokonaisuuksia tarkasteltiin kunnonvalvontamenetelmien soveltuvuuden avulla.

Tutkimuksen edetessä kehitettiin kokonaisvaltaiset toiminnanohjausjärjestelmän avulla toimivat eritasoiset kunnonvalvontahypoteesit, joiden avulla linjan yksittäisten komponenttien kuntoa voidaan valvoa. Lisäksi tutkimuksessa kehitettiin uusia kunnonvalvontasovelluksia, joita on mahdollista käyttää myös tehtaan muilla linjoilla.

Kunnonvalvontahypoteeseja käytettiin kokonaisen kunnonvalvontajärjestelmän luomiseen. Tehtaalla on mahdollisuus valita käyttöönotettavan kunnonvalvonnan taso hypoteesien sekä kunnossapitostrategian avulla.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
School of Technology
Master's Programme in Mechanical Engineering

Tapani Lehtonen

Development of condition monitoring process in a production line at a food industry factory

Master's thesis

2014

79 pages, 7 figures and 4 tables

Examiners: Professor Juha Varis
Professor Jukka Martikainen

Keywords: condition monitoring, predictive maintenance, maintenance, food industry, condition monitoring hypothesis

The aim of the study was the development of a condition monitoring system for the modern production line in the food industry. Existing monitoring techniques and applications were searched especially for ice cream production equipment. In the literature review applications mainly for the individual components and machine parts were found. Investigated production line was reviewed through the functions and components. The factory's readiness for the condition monitoring startup was studied in general level.

Information found from the condition monitoring literature was used in the development of the condition monitoring methods for the line. Component selection for condition monitoring was based on the Enterprise Resource Planning (ERP) system information and the startup knowledge of the line. Collected data was used in the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), which was the main method in study of component base analysis. Critical parts and efficiency affected assemblies of the production line were selected by their feasibility in the condition monitoring methods.

During the study a comprehensive condition monitoring hypotheses were developed based on the existing ERP system's preventive maintenance schedule. Condition monitoring hypothesis allows the condition monitoring of the individual components. In addition, the study developed new condition monitoring applications, which can also be used in other lines in the factory.

Condition monitoring hypotheses were used for creation of a complete condition monitoring systems. The factory has an opportunity to choose a level of condition monitoring by using developed hypotheses and factory maintenance strategy.

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO **6**

1.1 Työn rajaus 7

1.2 Suomen Nestlén Turengin tehdas 7

2 KUNNOSSAPITO JA KUNNONVALVONTA **8**

2.1 Kunnonvalvonta ja ennakoiva kunnossapito 10

2.2 Mittaava kunnonvalvonta 16

2.3 Kunnonvalvontatoiminnan aloittaminen ja suorittaminen 19

3 PERINTEISET KUNNONVALVONTAMENETELMÄT **22**

3.1 Värähtelymittaus 23

3.2 Aistinvarainen kunnonvalvonta 26

3.3 Voiteluaineanalyysi 28

3.4 Lämpötilan mittaus 30

4 KUNNONVALVONNAN NDT-MENETELMÄT **32**

4.1 Silmämääräinen tarkastus 34

4.2 Röntgenkuvaus 35

4.3 Pyörrevirtausmittaus 37

4.4 Tunkeumanestetarkastus 39

4.5 Magneettijauhetarkastus 40

4.6 Kovuusmittaus 40

4.7 Jäljennemenetelmä 41

4.8 Ultraäänimittaus 42

4.9 Akustinen emissio 43

5 LAITEKANTA JA VALMIUDET KUNNONVALVONTAAN **45**

5.1 Tehtaan laitekannan soveltuvuus kunnonvalvontaan 45

5.2 Tehtaan valmius kunnonvalvonnan käytön laajentamiseen 46

5.3 Tuotantolinjan rakenne ja laitteisto 47

5.3.1 Täyttökone 48

5.3.2 Karkaisutunneli 48

5.3.3 Puskuriyksikkö ja pakkausrobotti 49

6 KUNNONVALVONTAMENETELMIEN KARTOITUS 50

6.1 Toiminnanohjausjärjestelmän tiedot 50

6.2 Linjan käyttöönottotiedot 51

6.3 Komponentti- ja menetelmäkohtainen analyysi 52

6.3.1 Servo- ja sähkömoottorikäytöt 53

6.3.2 Vaihteistot 55

6.3.3 Laakeroinnit 56

6.3.4 Paineilmajärjestelmä 58

6.3.5 Ketjukäytöt ja hammashihnat 60

6.3.6 Rakenteet ja kiinteät prosessiosat 62

6.3.7 Muut komponentit 64

7 KUNNONVALVONTAHYPOTEESIT 66

7.1 Perustason kunnonvalvontahypoteesi 66

7.2 Kehittyneen tason kunnonvalvontahypoteesi 68

8 JOHTOPÄÄTÖKSET 72

9 YHTEENVETO 75

LÄHDELUETTELO 77

1 JOHDANTO

Kunnonvalvonnan kehittyminen, luotettavuuden lisääntyminen ja käyttäjäystävällisyyden parantuminen avaavat uusia mahdollisuuksia kunnossapidon suorittamiselle. Mittaavassa kunnonvalvonnassa muutos harvojen herkusta joka tehtaan kunnossapidon perustyökaluksi on ollut yksi viimeisten vuosikymmenten suurista mullistuksista teollisuudessa. Suomen teollisuudella on suuria haasteita kansainvälisessä kilpailussa – korkeat tuotantokustannukset syövät kilpailukykyä ja kannattavuutta.

Tämän työn tavoitteena on parantaa Suomen Nestlé:n Turengin tehtaan kannattavuutta ja toimitusvarmuutta kunnossapidon kehittämisen kautta. Kehittämisen kohteena on yksi tehtaan tärkeimmistä tuotantolinjoista, joka on myös työn julkaisuhetkellä uusin tuotantolinja. Tutkimuksen julkaisuhetkellä linjan kunnossapidossa kunnonvalvonnan rooli on pieni. Työn tarkoituksena on kasvattaa kunnonvalvonnan merkitystä, jolloin kokonaisvaltaista kunnossapitoa voidaan tehostaa. Tavoitteena on, että linjan kunnonvalvonnan kehityksen kautta saavutettuja hyviä toimintamalleja ja käytäntöjä voidaan soveltuvilta osin laajentaa koko tehtaan kunnossapitoon. Työn tulee tarjota tehtaalle lähtökohdat laajamittaiseen kunnonvalvonnan käyttöönottoon ja kehittämiseen.

Työssä selvitetään kirjallisuudesta löytyviä kunnonvalvontamenetelmiä, joita voidaan soveltaa linjan kunnossapidossa. Lisäksi soveltavat ja tutkimuksen yhteydessä kehitettävät kunnonvalvontametodit tulevat olemaan osa työn tuloksia. Työssä esitettävien kunnonvalvontahypoteesien avulla tullaan ehdottamaan mahdollisia toimintamalleja, joilla kunnonvalvonta voidaan liittää tehokkaasti ja tuloksellisesti osaksi linjan kunnossapitoa.

Työssä käytetään hyväksi tutkimuksen tekijän kandidaatintyötä: ”Kunnonvalvontamenetelmien esiselvitys elintarviketehtaan kunnossapitoon”.

1.1 Työn rajaus

Varsinaiset kunnonvalvontamittaukset ja niiden tulokset rajataan yksiselitteisesti tämän työn ulkopuolelle. Kunnonvalvontahypoteesien käyttöönotto ja tarvittavien laitteistojen hankinnan suunnittelu jää toteutettavaksi tehtaan tekniselle osastolle. Työssä ei keskitytä tehokkuuden arviointiin tai käyttöönoton kannattavuuteen. Lisäksi henkilöstön osaamisen arviointi ja koulutustarpeen suunnittelu jää yksityiskohtien osalta tutkimuksen ulkopuolelle.

Työssä tutkittavaa tuotantolinjaa on kunnonvalvonnan osalta käsitelty kokonaisuutena, joka sisältää linjan päälaitteet. Päälaitteina voidaan pitää täyttökonetta, karkaisutunnelia, puskuriyksikköä ja pakkausrobottia, jotka toimivat synkronoidusti yhtenä laitekokonaisuutena tuotannon aikana. Muut linjalla olevat laitteet ovat pääosin rajattu tutkimuksen ulkopuolelle.

1.2 Suomen Nestlén Turengin tehdas

Suomen Nestlén jäätelötehdas sijaitsee Kanta-Hämeessä Janakkalan kunnassa Turengin taajamassa. Tehdas tuottaa vuosittain 20–30 miljoonaa litraa jäätelöä pääosin kotimaan markkinoille. Tuotevalikoimaan kuuluu irtojäätelöt, kotipakkaukset, tuutit ja puikot, joita valmistetaan kahdeksalla tuotantolinjalla. Turengin tehdas on osa Nestlé S.A. elintarvikekonsernia, joka osti tehtaan Valio Oy:ltä vuonna 2004. Tehdas on pohjoismaiden suurin jäätelötehdas, jossa työskentelee sesongin aikana noin kaksisataa henkilöä.

2 KUNNOSSAPITO JA KUNNONVALVONTA

Kunnonvalvonnalla on useita määritelmiä. Joillekin määritelmä tuo mieleen värähtelymittauksen laakerivaurion estämiseksi, toiselle se saattaa tarkoittaa lämpökamerakuvausta sähkökeskuksen vaurioituneiden komponenttien paikallistamiseksi. Kaikki ovat kuitenkin yhtä mieltä siitä, että kunnonvalvonta on laitteiden säännöllistä tutkimista erilaisten menetelmien avulla. Kaikki kunnonvalvontamenetelmät tarjoavat tietoa laitteen kunnosta. Tavoitteena on luonnollisesti saavuttaa valvottavalle kohteelle mahdollisimman pitkä häiriötön ajanjakso. Lisäksi vaurion tapahtuessa tavoitteena ovat mahdollisimman kustannustehokkaat toimenpiteet tilanteen korjaamiseksi. (Mobley, 2002, s. 4)

Todellisuudessa kunnonvalvonta tarkoittaa tuottavuuden parantumista, tuotteiden laadun varmistamista ja kokonaisvaltaista tehokkuutta teollisuudessa. Kunnonvalvonta on siis filosofia, jossa tietoa laitteiden todellisesta kunnosta käytetään tuotantolaitoksen toiminnan tehostamiseen. (Mobley, 2002, s. 5)

”Kunnossapidon ensisijainen tehtävä nykykäsityksen mukaan on pitää laitteet jatkuvasti käyttökunnossa. Kunnossapitoon toki edelleenkin kuuluvat rikkoontuneiden laitteiden tai komponenttien korjaukset, mutta korjaustoiminto ei missään nimessä ole kunnossapidon päätarkoitus.” Nykynäkemyksen mukaan kunnossapito ei ole pakollinen menoerä, vaan tärkeä osa tuotantoa ja tuotantolaitoksen kilpailukykyä. (Mikkonen, 2009, s. 25)

Aina 1960-luvulle kunnossapito oli rikkoutuneiden laitteiden korjausta. Kunnossapidon tehokkuuden määritti kunnossapitäjien nopeus rikkoutuneen koneen korjauksessa. Vasta 1970-luvulta alkaen kunnossapidon tehtäväksi nousi koneen rikkoutumisen estäminen erilaisin kunnossapidollisin toimenpitein. Tuolloin kehitettiin uusia laitestrategioita. Nyky-ymmärryksen mukaan kaikkia taulukossa 1 olevia strategiavaihtoehtoja on käytettävä samanaikaisesti. Laitekohtaisesti käytettävät strategiat valitaan tuotanto- ja kunnossapitostrategian mukaan. (Laine, 2010, s. 105)

Taulukko 1. Erilaisia kunnossapitostrategioita (Laine, 2010, s. 105-106)

Taso 0 Ajetaan rikkoutumiseen Operate To Failure (OTF)	1960-luvulla oli vallitsevana kunnossapitotasona ajaminen rikkoutumiseen saakka. Laitteita siis ajettiin, kunnes ne rikkoutuivat ja pysähtyivät. Korjaustyöt tehtiin "on call" -työnä kiireesti, suunnittelemattomasti ja yliaktiivisesti. Varallaolo oli odottelua, varsinainen motivaatio tuli "palokuntatyöstä". Laitteiden ollessa käynnissä rikkoutuvat osat turmelivat niihin liittyviä tai lähistöllä olleita ehjiä osia. Laitteiden seisokit tulivat pitkiksi ja korjauskustannukset korkeiksi.
Taso 1 Määräaikaishuollot Fixed Time Maintenance (FTM)	1970-luvulla taas tuli muotiin "sokea", vahvasti etukäteen suunniteltu määräaikainen kunnossapitoajattelu. Huoltotyön suunnittelu oli huoltotöiden listausta ja raportointi oli palaute listattujen töiden suorittamisesta - "tehty ja ruksi ruutuun". Tämä toimintatapa on erittäin kallis (sokeat osien vaihdot määräajoin), eikä se oleellisesti vähennä odottamattomia laiterikkoja ja seisokkeja
Taso 2 Kuntoon perustuva kunnossapito Condition Based Maintenance (CBM)	1980-luvulla kehittyi jo laitteiden kuntoon pohjautuva kunnossapidollinen ajattelutapa. Huollon etukäteissuunnittelua ruokkii määräajoin tehtävien huoltotöiden raportointi, huoltoilmoitus, jolla annetaan laitteen tai koneen komponenttien ja osien senhetkisestä kunnosta selkeä kuva käytön ja turvallisuuden kannalta. Laite tarkastetaan määräajoin tai seurataan jatkuvilla mittauksilla osien kuntoa. Näillä toimenpiteillä annetaan entistä syvempi kuva laitteen kunnosta, jolloin kunnossapidon ennakoitavuus paranee. Tämä johtaa suunnittelemattomien rikkoutumisten vähenemiseen. Myös sähköiset yhteydet laitetoimittajiin parantavat kunnon valvontaa.
Taso 3 Kunnossapito-ongelmien vähentäminen suunnittelulla Design Out Maintenance Problems (DOMP)	Hyvät yritykset käyttävät tason 3 mallia. Se on tasoon 2 liittyvä oleellinen toimintamalli kunnossapidollisten ongelmien eliminoimiseksi suunnittelussa. Tämä perustuu laitteen tai koneen vikaraportointiin (vikatiheydet), vika-analyyseihin ja kyvykkyyteen suunnitella vioittuneiden komponenttien tilalle paremmat vaihtoehdot. Tähän liittyy myös itse huoltotyön analysointi ja parannustoimenpiteet sekä laitteiden käyttäjäkoulutus. Käyttäjän kannalta ratkaisu saattaa olla myös laitteen hallittavuuden parantaminen, Tason 2 toiminta pyrkii vähentämään "ajetaan laiterikkoon" -toiminnan järkevälle tasolle, jolloin laitteiden rikkoutumiset ja seisokit ovat hallittavissa.
Taso 4 Tarvepohjainen kunnossapito	Käytön ja kunnossapidon yhteistyö on entisestään tiivistynyt, ja voidaan puhua tarvepohjaisesta toiminnasta. Tarvepohjaisessa kunnossapidossa käyttö ja kunnossapito yhdessä vaikuttavat tulevien laitteiden ja koneiden valintaan ja teknisiin ratkaisuihin, jolloin saadaan

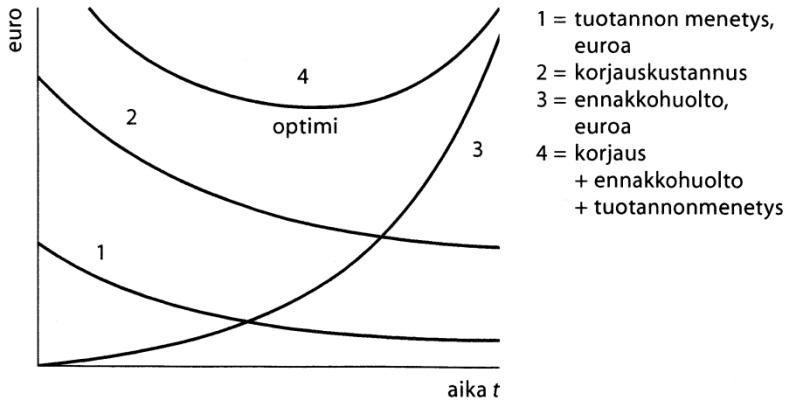
Needed-Based Maintenance (NBM)	oikealuokkaiset laitteet tarvetta vastaavaan käyttöön. Ennakoidut käytön muutokset otetaan huomioon modernisoimalla laitteen komponentit vaaditulle käyttötasolle ennen kuin käyttö on muuttunut. Näin vältytään arvaamattomilta rikkoutumisilta. Huoltotyö voidaan myös mitoittaa tai muuttaa käyttövaihteluiden mukaan tarvetta vastaavaksi, jolloin työtä tehdään ja tarkastellaan kriittisemmin. Tarvepohjaisessa kunnossapidossa käytetään tasoja 0, 1 ja 2 hyväksi kunnossapitotoiminnassa tarpeen, mahdollisuuksien ja sovittujen strategioiden mukaan.

2.1 Kunnonvalvonta ja ennakoiva kunnossapito

Laitteiden toiminta voidaan usein jakaa kahteen jaksoon, joista ensimmäisessä laite toimii suunnitellusti. Tällöin laitteen toimivuudessa ei ole nähtävissä suuria poikkeamia normaaliin toimintaan verrattuna. Edellä mainitun jakson jälkeen kone toimii edelleen suunnitellusti, mutta saattaa vikaantua tai jopa vaurioitua. Kunnonvalvonnan avulla koneen toiminta-aikaa voidaan pidentää löytämällä alkavat vauriot ennen niiden kehittymistä laiterikoiksi. Kunnonvalvonnan avulla kunnossapitotoiminnot voidaan järjestellä tehokkaammin ja esimerkiksi kunnossapidon kohdentaminen, varaosatilaukset ja huoltoseisokit voidaan hoitaa ennakkoon suunnittelemalla. (Wang, 2007, s. 1177–1178)

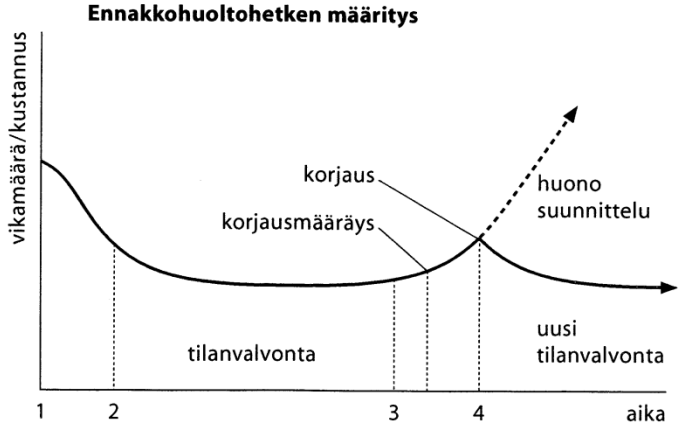
Kunnonvalvonta täydentää käyttöseurantaa ja on osa toimivaa kunnossapitotoimintaa. Käyttöseuranta voidaan jopa nähdä kunnonvalvonnan osaksi. ”Kunnonvalvonta perustuu siihen, että tunnistetaan laitteiston kuntoa ja tilaa osoittavat tunnussuureet ja määritellään niille tarkistusmenetelmät mittaustavat ja -laitteet sekä hälytysrajat ja tulkintajärjestelmät. On myös luotava järjestelmä, jonka mukaan mittaustuloksiin ja hälytyksiin reagoidaan.” (Ansaharju, 2009, s. 302)

Ennakkohuollon toiminnallista periaatetta kuvataan oheisien käyrien (kuva 1) avulla. Lähtökohtana ennakkohuoltotoiminnalle on laitteiston käyttövarmuuden parantaminen oikean huoltohetken määrittelyllä. ”Ennakkohuolto on osa koko yrityksen systemaattista toimintaa, sitä ei pidä hoitaa erillisenä toimintona muusta kunnossapidosta, vaan sen pitäisi nivoutua päivittäisiin toimiin.” (Heinonkoski, 2004, s. 145)



Kuva 1. Ennakkohuollon taloudellinen perusta (Heinonkoski, 2004, s.145)

Heinonkosken (2004, s. 146) mukaan kuvassa 2 ovat korjaushetken määrittelyn periaatteet. Ennakkohuollon tarkoituksena on lisätä laitteen käyttöaikaa vaurioiden välillä ja kunnonvalvonnalla pyritään ennakoimaan, milloin vikojen määrä kasvaa korjauksen vaatimalle tasolle.



Kuva 2. Oikean korjausajan määritys (Heinonkoski, 2004, s. 147)

Heinonkosken (2004, s. 146–147) mukaan kuvassa 2 olevat ”välit” kuvaavat seuraavaa:

- Väli 1-2
  - ”Määräävänä tekijänä ovat alkuvaikeudet eli "lapsen taudit", jotka ilmenevät välittömästi laitteen käyttöönoton jälkeen.

- Laitteen suorituskyky, toiminta-arvot ja ennakkohuollossa käytettävien mittaavien kunnossapitomenetelmien tasot määritellään. Näitä ovat lämpötilat, paineet, tärinät jne.
- Alkuvaiheessa saadaan ensimmäiset oireet niistä vioista, jotka laitteen vanhetessa tulevat esille. Oireet ja syyt on tallennettava myöhempää käyttöä varten.

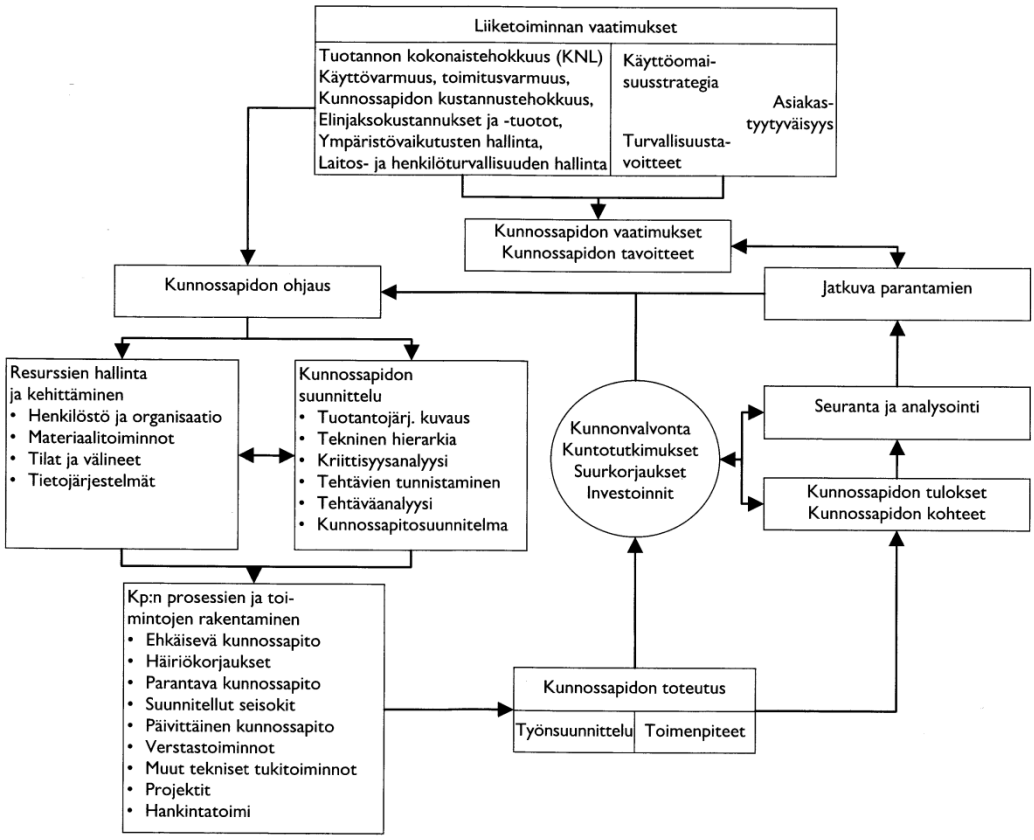
- Väli 2-3
  - Laitteen normaalin tilan valvomiseen ja ylläpitoon kuluva aika. Vertaamalla laitteen tilaa sen mitoitettuun ja käyttöönotettuun suorituskykyyn, käytettävyyteen sekä tehtyihin kunnossapidon mittauksiin voidaan päätellä, milloin mahdollinen korjaus tehdään.
  - Tarvittavan tuotannon seisokin ajoitus tehdään näillä perusteilla.
  - Kokemusten perusteella pyritään parantamaan toimintaa.
  - Päätökset tehdään mittausarvojen muutosten mukaan.

- Väli 3-4
  - Yleensä päätös korjauksesta tehdään tällä välillä.
  - Vaikka näyttäisi, että laitteen käyttöä voidaan jatkaa ilman korjausta, on pidettävä huoli siitä, että laitteiston kunto ei heikkene liikaa.
  - Korjaamishetken työ on suunniteltava tarkasti, jotta laitteen seisonta-aika olisi mahdollisimman lyhyt.

Korjaamishetken suunnittelussa on sovittava vähintään
- korjausaika ja yksittäisten töiden aikataulu
- henkilö- ja laiteresurssit sekä työkalut
- varaosat ja asennusmateriaalit
- purku, siirrot, kuljetukset, nostot ja kasaus
- tarvittavat koeajot ja testit, joilla varmistetaan korjaustyön onnistuminen.”

Kuntoon perustuva kunnossapito on ehkäisevää kunnossapitoa, jossa seurataan kohteen suorituskykyä tai muita parametreja ja toimitaan havaintojen mukaisesti. Seuranta on aikataulutettua, jatkuvaa tai sitä tehdään vaadittaessa. Kuntoon perustuva kunnossapito

perustuu näin ollen kunnonvalvontaan, tarkastuksiin ja käyttöparametrien seurantaan, mutta se sisältää myös kaikki muut asiaan liittyvät kunnossapitotoiminnot. Kuvassa 3 esitetään kuinka erilaiset kunnossapidon toiminnot kytkeytyvät toisiinsa. Kuntoon perustuvalla kunnossapidolla ja erityisesti kunnonvalvonnalla on kokonaisuudessa merkittävä rooli. Kunnonvalvonnan tavoitteena on havaintojen ja suositusten perusteella tapahtuvat tarpeelliset kunnossapidolliset toimenpiteet. Kunnonvalvonnalla kehitetään näin ollen kunnossapidon toimintaa kokonaisvaltaisesti. (Mikkonen, 2009, s. 100–101)

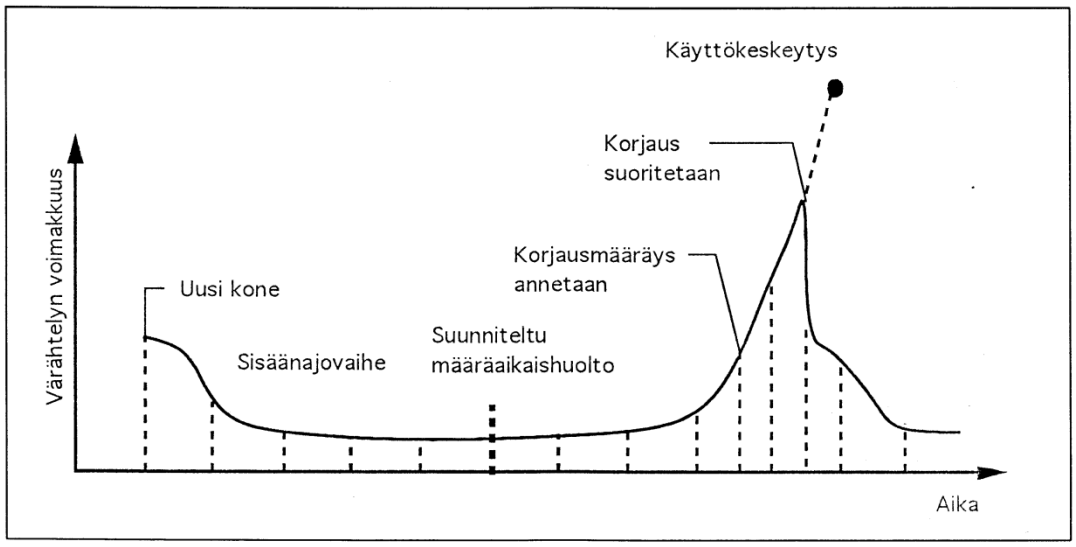


Kuva 3. Ennakoivan kunnossapidon toimivuus edellyttää, että kaikki kunnossapitotoiminnon osa-alueet on huomioitu. Kunnonvalvonta on tärkeä osa ennakoivaa kunnossapitoa. (Mikkonen, 2009, s. 100)

Kunnonvalvonta on terminä selkeä ja helposti ymmärrettävissä. Tästä seuraa, että se on myös helppo tulkita eri tavoin. Sisällöstä on olemassa useita toisistaan poikkeavia tulkintoja eri lähteissä. (Mikkonen, 2009, s. 101) Standardin PSK 6201 (2011) mukaan määriteltynä: ”Kunnonvalvonnalla määritellään kohteen toimintakunnon nykytila ja arvioidaan sen kehittyminen mahdollisen vikaantumis-, huolto- ja korjausajankohdan määrittämiseksi. Kunnonvalvonnan toimenpiteitä ovat aistein sekä mittalaittein

tapahtuvat tarkastukset ja valvonta sekä mittaustulosten analysointi. Kunnonvalvonta tuottaa lähtötietoja ehkäisevän kunnossapidon ja korjauksen suunnitteluun”.

Kunnonvalvontaan kuuluu koneen ja laitteiden tarkkailu, mittaava kunnossapito ja lopputuotteen laadun seuranta. Lisäksi säännölliset tarkastukset ovat osa kunnonvalvontaa. Kunnonvalvonta ja määräaikainen kunnossapito eroavat pääpiirteissään siten, että kunnonvalvonnassa kone voidaan pysäyttää ja suojapeltejä sekä tarkastusluukkuja avata, mutta varsinaisia koneen osia ei pureta. Kunnonvalvonnan avulla kunnossapitotoiminnot voidaan ajoittaa ennalta. Tarpeeton huolto vähenee ja käyntijaksot korjausten välillä pitenevät (kuva 4). Kunnonvalvontaan kuuluu kriittisten komponenttien tarkastukset, vioittuneiden ja huonokuntoisten komponenttien korjaus. Laitteen toimiessa mitään toimenpiteitä ei tarvitse tehdä. (Rossi, 1993, s. 29)



Kuva 4. Määräaikaishuolloissa korjaukset ja osien vaihdot joudutaan ajoittamaan tarpeettoman aikaisiksi. Koneen tai komponentin "elinkaari" osoittaa valvonnan avulla määritellyn korjausajankohdan. Esimerkiksi kuulalaakereiden nimellisen eliniän täyttyessä on vielä 90 % laakereista toimintakuntoisia. (Rossi, 1993, s. 29)

”Ehkäisevän kunnossapidon keinoin seurataan kohteen suorituskykyä tai sen parametreja. Päämäärä on vähentää vikaantumisen todennäköisyyttä tai koneen/osan toimintakyvyn heikkenemistä. Ehkäisevä kunnossapito on säännöllistä (aikataulutettua ja jatkuvaa) tai sitä tehdään vaadittaessa. Tulosten perusteella voidaan suunnitella ja

aikatauluttaa kunnossapidon tehtäviä. Ehkäisevään kunnossapitoon sisältyvät muiden muassa:

- tarkastaminen
- kuntoon perustuva kunnossapito
- määräystenmukaisuuden toteaminen
- testaaminen/toimintakunnon toteaminen
- käynninvalvonta
- vikaantumistietojen analysointi

Kunnonvalvontaa tehdään kohteen toimiessa tai seisokin aikana. Kunnonvalvonnan avulla etsitään oireilevia vikoja tai todetaan kohteen olevan toimintakunnossa.” (Järviö & Lehtiö, 2012, s. 50)

Aallon (1997, s. 33) mukaan kunnonvalvonnalla saavutettavia hyötyjä ovat:

- Kustannussäästöt: kokonaiskustannuksissa saavutetaan kustannussäästöjä toimintojen optimointimahdollisuuden kautta.

- Turvallisuus: laitteen yllättävä rikkoutuminen muodostaa turvallisuusriskin joko käyttäjälle tai sivullisille.

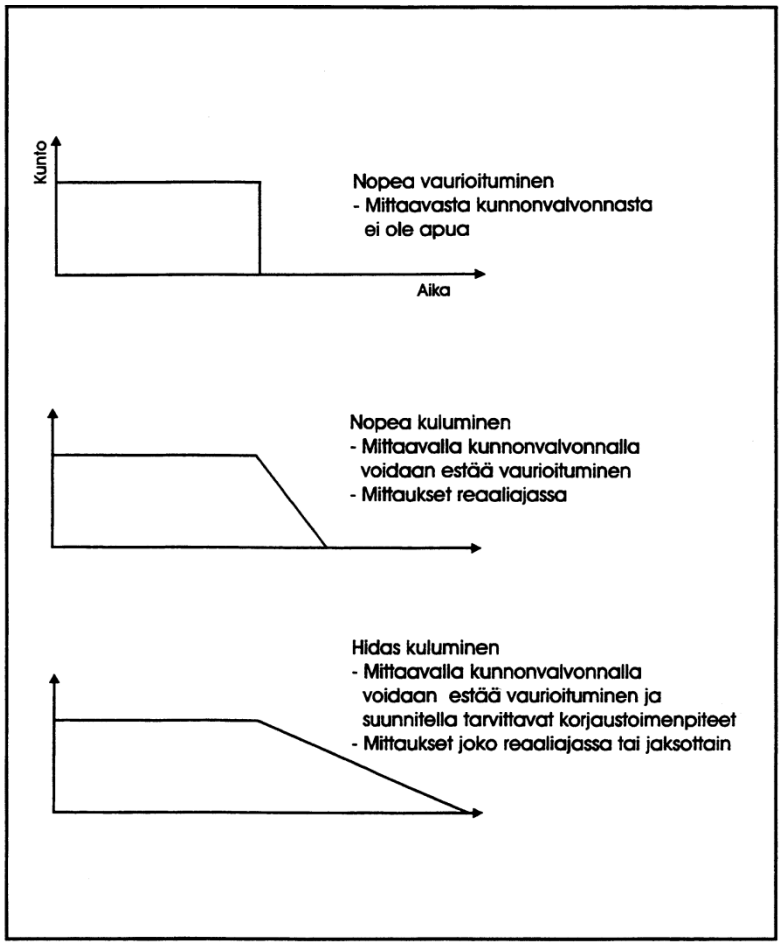
- Päästöt ympäristöön: kunnonvalvonnalla voidaan vähentää sekä jatkuvien että kertaluontoisten päästöjen riskejä.

- Tehokkaampi käyttö ja parempi laatu: kunnonvalvonnan mittaustuloksia voidaan kunnossapidon lisäksi hyödyntää laitteen kehittämisessä

- Takuukysymykset ja tuotekehitys: kunnonvalvonnan mittaustuloksia voidaan käyttää takuuaikana tarvittaessa todisteina laitteen kunnosta. Kunnonvalvonnassa saadut tiedot ovat korvaamaton lähtökohta jatkosuunnittelulle.

2.2 Mittaava kunnonvalvonta

Mittaava kunnonvalvonta soveltuu parhaiten hitaasti kehittyvien vikojen, kuten kulumavaurioiden, havaitsemiseen ja analysointiin. Esimerkiksi prosessiteollisuudessa mittaavalla kunnossapidolla on pystytty vähentämään suunnittelemattomia huoltoja ja tuotannon häiriötunteja. (Rossi, 1993, s. 30) Mittauksiin liittyy kiinteästi itse mittaus sekä tuloksen tulkitseminen. Mittauksilla pyritään selvittämään onko mittaustulos sallittujen rajojen sisällä. Lisäsi mittaustuloksen trendiä verrattaan aiempiin mittauksiin. Kuvan 5 mukaisesti kunnonvalvontamittausten tehokkuus ja soveltuvuus riippuu voimakkaasti tutkittavan vaurion muodostumisnopeudesta. (Aalto, 1997, s. 33)



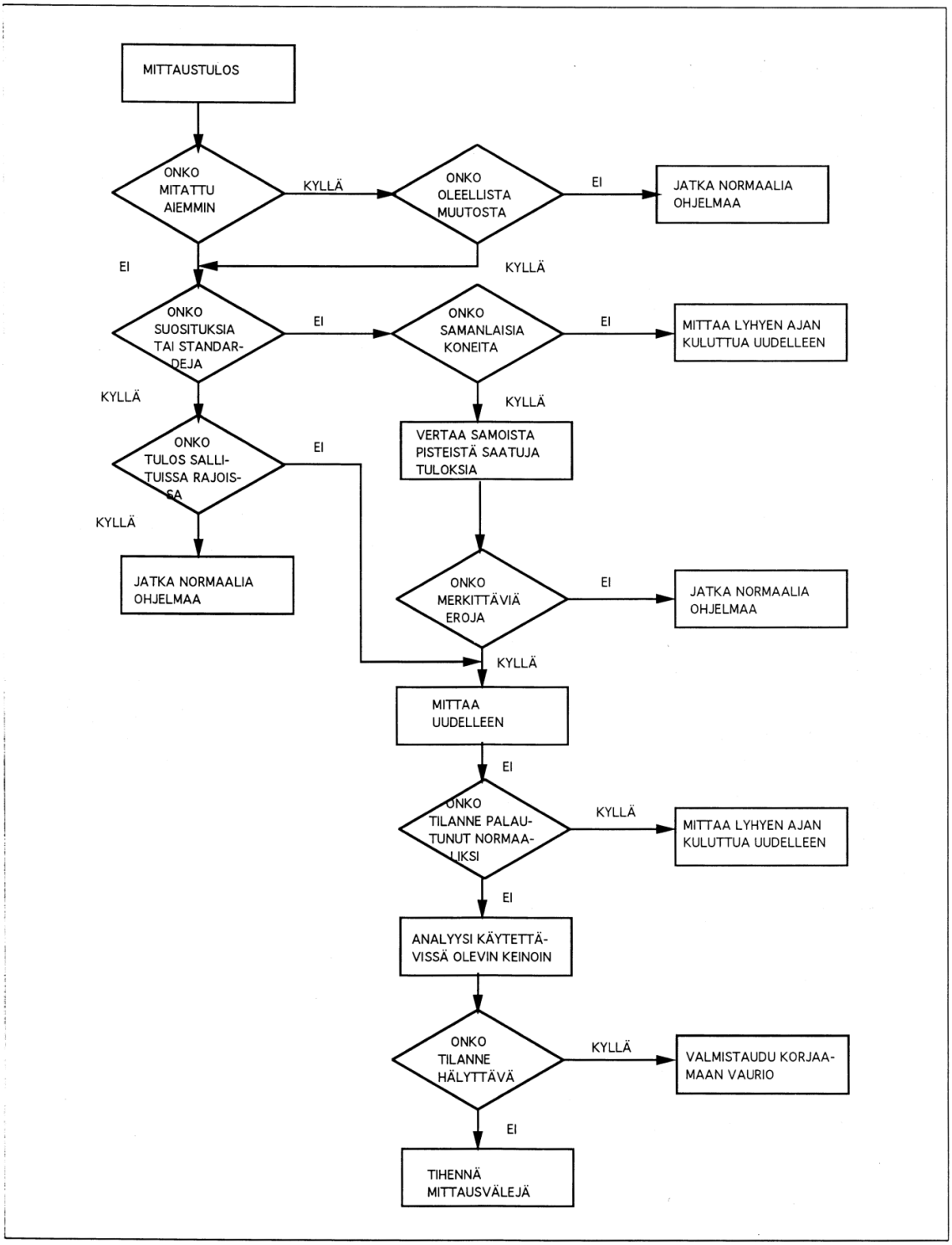
Kuva 5. Vaurioitumisen nopeuden vaikutus mittaavan kunnonvalvonnan käyttökelpoisuuteen (Aalto, 1997, s. 34)

”Ihmisaistien avuksi on kehitetty erilaisia mittalaitteita ja apuvälineitä mm. pyörivien koneenosien kunnonmittaukseen. Voidaan mitata koneen aiheuttamaa melua, tehonkulutusta, laakerien lämpötilaa, värähtelyä tai analysoida käytetty voiteluöljy. Mittaamalla koneen kuntoa käynnin aikana voidaan parantaa käyntivarmuutta ja välttää turhia huoltokustannuksia.” Kunnonvalvontaa voidaan siis tehdä monin eri tavoin, jolloin tärkeäksi seikaksi tulee laadukas oikein kohdennettu mittaus. (Rossi, 1993, s. 30)

Rossin mukaan (1993, s. 30) ”Mittaavan kunnonvalvonnan menetelmiltä vaaditaan:

- mittaustulos on luotettava ja antaa riittävästi tietoa
- mittauksen toistettavuus on hyvä ja se on mittaajasta riippumaton
- mittaus on helppo ja nopea suorittaa yksinkertaisin laittein
- tulokset ovat yksiselitteisiä ja dokumentoitavissa
- olosuhteista, kuten prosessiparametreista, riippuvuus on mahdollisimman pieni.”

Kahden tai useamman menetelmän yhtäaikainen käyttö varmistaa mittauksen luotettavuutta. Tyypillinen yhdistelmä on värähtelymittausten ja öljyanalyysin käyttö. Vikojen tunnistaminen helpottuu, jos analysoidaan myös aikaisempia mittaustuloksia. Ihanteellisessa tapauksessa voidaan tutkia vikojen aiheuttamia mittaustulosten muutoksia. Tällaisen tiedon puuttuessa on järkevintä turvautua kirjallisuudessa esitettyihin kuvan 6 mukaisiin vianhakutaulukoihin ja laitevalmistajan suosituksiin sekä standardeihin. (Rossi, 1993, s. 30)



Kuva 6. Kunnonseurantamittauksen toimenpiteet (Rossi, 1993, s. 31)

Rossin (1993, s. 32) mukaan ”Mittaustulosten dokumentointitavalla on ratkaiseva merkitys valvontajärjestelmän toimivuudelle. Pääsääntöinä dokumentoinnille voidaan pitää:

- konekohtaiset tiedot ovat helposti löydettävissä
- tulokset esitetään niin, että eri mittauskertojen tulokset ovat keskenään vertailukelpoisia
- tulokset esitetään graafisesti, jolloin muutokset ja muutosnopeudet nähdään heti
- jätetään pois kaikki epäoleellinen
- kunnossa olevan (uuden) koneen referenssikäyrä otetaan vertailujen perustaksi.”

”Koneen kunnon seuraamisessa on suositeltavaa ns. trendikäyrän mittaaminen. Valitusta mittaustavasta riippumatta mitataan riittävän tihein välein. Mittausvälin valintaan vaikuttavat mm. koneen vaurioitumisherkkyys sekä kriittisyys tuotannossa.” Tallennettujen mittaustuloksien avulla voidaan muodostaa visuaalinen esitys, jonka avulla nähdään helposti laitteen normaalista arvostelutasosta poikkeava trendi. Mitattaville kohteille voidaan määrittää hälytys- ja korjaustasot, joita voidaan seurata visuaalisen esityksen avulla. Mittaustuloksiin vaikuttavien muutoksien merkitys koneessa on arvioitava tapauskohtaisesti. Esimerkiksi muutokset koneen rakenteessa, alustassa, laakerityypeissä tai voiteluöljyssä saattavat aiheuttaa tarpeen arvostelutason muutokseen. (Rossi, 1993, s. 32)

2.3 Kunnonvalvontatoiminnan aloittaminen ja suorittaminen

Kunnonvalvonnan käyttöönoton suunnitteluvaiheella on suuri merkitys lopputuloksen onnistumisen kannalta. Kunnonvalvonta on kunnossapidon kehittämisen työkalu, näin ollen eri osa-alueille tulee antaa riittävästi aikaa omaksua uusia toimintatapoja. Kunnonvalvonnassa tulokset saavutetaan vain pitkäjänteisen toiminnan avulla. Mittausten ja tarkastusten huolellinen suunnittelu ja suunnitelman noudattaminen ovat henkilöstön osaamisen lisäksi tärkeimpiä seikkoja kunnonvalvonnan käyttöönotossa. Taulukossa 2 on esitelty hyvin onnistuneen kunnonvalvonnan käyttöönoton piirteitä. (Kautto, 2011, s. 15)

Taulukko 2. Toimivan kunnonvalvontaan perustuvan kunnossapidon piirteitä (Kautto, 2011, s. 15)

Koneiden kunnon kehitystä valvotaan käynninaikaisesti tehtävillä tarkastuksilla sekä periodisilla ja/tai online-mittauksilla. Toiminta on suunniteltua, aikataulutettua ja jatkuvaa.
Kunnonvalvonta määrittää laitoksen koneiden sen hetkisen kunnon ja ennustaa tulevaisuuden. Kuntotietoa käytetään hyväksi laitoksen käytön ja kunnossapidon ohjauksessa ja suunnittelussa.
Mittaukset ja tarkastukset tehdään aina ennalta suunnitellun ohjelman ja toimintatavan mukaan. Toimintatapoja muutetaan vain harkitusti.
Koneiden huolto- ja korjaustoimenpiteet määritetään kunnonvalvonnan tekemien havaintojen perusteella. Huollot ja korjaukset tapahtuvat suunniteltujen seisokkien yhteydessä.
Kun koneiden kunnossa havaitaan poikkeamia, määrittää kunnossapidon seuraavan vaiheen nopea diagnoosi mahdollisen vian ja luotettavan ennusteen sen etenemisestä.
Korjaus- ja huoltotoimenpiteet ja muut rutiinit on ennalta selvitetty ja mahdollisesti ”standardoitu”, eli ne on ohjeistettu.
Ongelmatilanteisiin on varauduttu ja toimenpiteet mahdollisimman hyvin ennalta sovittu ja selvitetty.

”Kunnonvalvontajärjestelmän luomisen päävaiheet ovat:

- Valitaan mitattavan kohteen tilaa parhaiten mittaavat tunnussuureet.
- Valituille tunnussuureille määritellään mittauksen suoritustaajuudet sekä hälytysrajat.
- Luodaan mittausten suoritusjärjestelmä sekä tulosten tulkinta- ja taltiointijärjestelmä.
- Luodaan hälytys- ja toteutusjärjestelmä mittaustulosten vaatimille päätöksille ja toimenpiteille.” (Aalto, 1997, s. 32)

Kunnonvalvonnan määrittämiseen vaikuttavat ensisijaisesti lainsäädännön vaatimuksien tai viranomaissäätelyn puuttuessa laitteen vastaanottokokeissa sovitetut kunnonvalvontarutiinit. Uuden laitteen kunnonvalvonnassa noudatetaan valmistajien suosituksia tarkastuksista ja tarvittaessa vakuutusyhtiöiden mahdollisia määräaikaistarkastusvaatimuksia. Käyttökokemuksien kertyessä tarkastuksia voidaan ennakoivan kunnossapito-ohjelman kehittymisen myötä tarkentaa tai kiristää kunnossapitostrategian mukaisesti. (Järviö et al., 2007, s. 273)

Kunnonvalvonta menettää arvonsa, jos tuloksia ei dokumentoida oikein. Tarkastusten suunnittelu ja tulosten dokumentointi onnistuu tehokkaimmin käytettäessä tietojärjestelmää, joka on yhteydessä tehtaan kunnossapito-ohjelmaan. Laitelomakkeet,

menetelmälomakkeet, navigointikuvat ja raportointilomakkeet tulisivat olla saatavilla tietojärjestelmässä. Järjestelmästä pystytään etsimään tietoa yksittäisestä mittauksesta, tarkastuksesta, korjauksesta tai muusta tietyllä hetkellä tietylle laitteen osalle suoritetusta toimenpiteestä. Tarkastustuloksiin voidaan liittää esimerkiksi kuvia selventämään tehtyä toimenpidettä. (Järviö et al., 2007, s. 273–274)

Hyvin toimivassa kunnonvalvonnan tietojärjestelmässä on mahdollista tallentaa ja analysoida mittaustuloksia verkon yli. Parhaassa tapauksessa verkossa olevien analysointimoduulien avulla voidaan ennustaa vaurioiden etenemistä. Esimerkiksi hitaasti etenevät vauriot, kuten korroosio tai viruminen voidaan tällöin havaita tehokkaasti. (Järviö et al., 2007, s. 274)

”Pätevyysjärjestelmä on ollut pitkään käytössä ultraääni-, radiografia-, magneettijauhe- ja tunkeumanestetarkastusmenetelmissä. Viime vuosikymmenen aikana järjestelmään lisättiin meillä ensin pyörrevirtatarkastus ja visuaalinen tarkastus.” (Järviö et al., 2007, s. 274) Suomessa on mahdollista suorittaa pätevyyskokeita vuototestauksessa ja lämpökuvausalalla sekä lisäksi suunnitelmissa on järjestää pätevyyskokeita myös värähtelymittausalalla. (Järviö et al., 2007, s. 274)

3 PERINTEISET KUNNONVALVONTAMENETELMÄT

Ansaharjun (2009, s. 303) mukaan kunnonvalvontamenetelmät voidaan luokitella kuuteen kategoriaan seuraavasti:

1. ”Aistinvaraisissa tarkistuksissa käytetään ihmisen aisteja eli näkö-, kuulo-, haju- ja tuntoaistia. Aistihavainnot antavat yleiskuvan, mutta eri henkilöiden eri aikoina tekemien havaintojen ja dokumentointien vertailukelpoisuus voivat olla ongelma.

2. Fysikaalisista perussuureista voidaan mitata esimerkiksi lämpötilaa, painetta ja dimensioita. Lämpötilan tarkkailua käytetään jäähdytys- ja voitelujärjestelmissä ja laakeroinneissa. Mittauksen kohde voi olla lämpötilan muutos tai lämpövuoto. Paineenmuutosten mittausta voidaan käyttää hydrauliikka- ja pneumatiikkajärjestelmissä ja voitelujärjestelmissä. Välykset, muoto ja sijainti ovat niitä dimensioita, joiden muutosta kannattaa kunnonvalvonnassa mitata.

3. Sähköisten perussuureiden eli jännitteen, virran, tehon ja resistanssin mittauksilla voidaan todeta sähkö- ja elektroniikkalaitteiden ja -komponenttien sekä sähkökäyttöjen kunto.

4. Ainetta rikkomattomilla mittauksilla, kuten ultraäänellä ja röntgenkuvauksella, päästään jo ennen vauriota toteamaan halkeamat, väsymismurtumat, korroosiovauriot ja vuodot.

5. Värähtely- ja äänimittauksia ovat värähtelymittaus ja iskusysäys. Niillä voidaan todeta alkavat viat esimerkiksi pyörivien laitteiden laakereissa ja hammasvaihteissa. Äänimittauksella todetaan koneen tai laitteen yleiskunto. Tottunut asentaja tai koneenkäyttäjä tunnistaa kuluneen laakerin tai hammaspyörän äänen asettamalla puukepin toisen pään kiinni käyvän koneen runkoon ja toisen pään korvalleen. Saatavilla on kuitenkin myös monipuolisia mittareita, joiden arvoista voi tulkita vaurioiden suuruuden ja tyypin.

6. Öljyanalyysejä ovat hiukkasanalyysi ja kemiallinen analyysi. Hydrauliikka- ja voiteluöljyjen analysointi osoittaa öljynvaihdon tarpeen ja myös laitteiston kuluneisuuden. Analyysillä selvitetään, onko öljyssä metallihiukkasia tai muuta roskaa ja onko sen notkeus tai viskositeetti muuttunut.”

Tyypillisiä kunnonvalvontamenetelmiä ovat aistinvaraiset tarkastukset, fysikaaliset ja sähköiset perussuureet, värähtely- ja äänimittaukset sekä voiteluaineanalyysit. Ainetta rikkomattomia mittauksia (NDT-menetelmät) käytetään yleisesti valmistavassa teollisuudessa ja laaja-alaisesti myös erikoissovelluksissa. (Mikkonen, 2009, s. 223) ”Käyttökelpoisimmat valvontamenetelmät riippuvat lähinnä valvottavasta kohteesta ja erityisesti sen kriittisyydestä tuotannon kannalta sekä toisaalta taloudellisista tekijöistä.” (Mikkonen, 2009, s. 223)

3.1 Värähtelymittaus

Värähtelymittauksia käytetään yleisesti pyörivien teollisuuden laitteiden ja koneiden kunnonvalvonnassa. Värähtelyvalvonnan suunnittelu ja mittausasetusten määrittäminen on haastava prosessi ja vaatii monien asioiden ottamista huomioon. Lisäksi värähtelyvalvonnassa on ymmärrettävä muun muassa valvottavien laitteiden toimintaperiaatteet, vikaantumismekanismit sekä prosessi, jossa valvonnan kohteena olevat laitteet toimivat. (Mikkonen, 2009, s. 223)

Värähtelymittauksen kohteeksi tulee valikoitua laitteet, joiden kuntoa on tarpeellista valvoa. Lisäksi kohteen värähtelymittauksen tulee olla teknisesti mahdollista ja kannattavaa. Värähtelymittaus ei välttämättä sovellu mitattavan kohteen ensisijaiseksi kunnonvalvontamenetelmäksi, tällöin muiden menetelmien käytön mahdollisuutta tulee arvioida tarkkaan. (PSK 5705, 2006)

Mikkosen (2009, s. 223) mukaan värähtelymittauksien määrittelyyn vaikuttavia asioita ovat:

”1. Kuinka usein värähtelyä on tarpeen mitata?
- kuinka kriittinen laite on tuotannon kannalta?
- millaiset viat ovat todennäköisiä?
- kuinka nopeasti todennäköinen vika kehittyy?

2. Millaisia vikoja laitteeseen voi tulla?
- mitä mittaussuureita ja - parametreja on tarpeen käyttää?
- millä taajuudella mittauksia on suoritettava?
- tarvitaanko useita mittauksia?

3. Millaisessa ympäristössä laite toimii?
- onko mittaaminen kannettavilla mittalaitteilla mahdollista?
- onko ympäristössä häiritseviä taajuuksia?

4. Millaisella laitteistolla mittaukset kannattaa tehdä?
- kuinka paljon mittaukseen on järkevää investoida, eli pystytäänkö mittaus-toiminnan avulla saavuttamaan taloudellista hyötyä?
- riittääkö poikkeavan tilanteen havaitseminen vai onko tarpeen pystyä tekemään tarkempaa diagnostiikkaa?”

Kaikki pyörivät laitteet värähtelevät käydessään. Värähtely johtuu herätteistä, joita koneen dynaamiset voimat aiheuttavat. Herätteinä voivat toimia esimerkiksi polttomoottoreiden palotapahtumat ja venttiili- ja kampiakselikoneistojen liikkeet. Herätteiden aiheuttama värähtely voi johtua normaalista toiminnasta, valmistuksen tai asennuksen epätarkkuuksista ja virheistä, epätasapainosta sekä kulumalla tai muuten vaurioituneista osista. (Mikkonen, 2009, s. 224)

Värähtelymittaajan on tunnettava mittaamisen teoriaperusteita, jotta mittautapa on tarkoituksenmukainen ja mittausten tulokset voidaan tulkita oikein. Värähtelyjen mittaaminen ja analysointi eivät edellytä käyttäjältä erityistä matemaattista osaamista,

vaan lähinnä huolellista suhtautumista sekä kiinnostusta yksityiskohtiin. (Mikkonen, 2009, s. 224) ”Värähtelyn mittauspaikka on yleensä laitteen kiinteässä osassa, esimerkiksi rungossa. Tavallisesti herätteen aiheuttaa liikkeessä oleva koneenosa kuten roottori, mäntä tai akseli, josta sitä ei yleensä voida suoraan mitata.” (Mikkonen, 2009, s. 224)

Mobleyn mukaan (2002, s. 100) värähtelymittauksen rajoitteiksi voidaan lukea saadun värähtelytiedon yksinkertaistaminen haluttuun muotoon, tällöin riski väärien johtopäätösten tekemiseen kasvaa. Erityisesti haastavien mittauskohteiden ja monimutkaisten järjestelmien osalta mittaajan ammatillinen osaaminen korostuu. Nohynek ja Lumme (2004, s. 107–111) sekä Mobley (2002, s. 100–101) näkevät erityisen haastavaksi mittauskohteen muuttuvat taajuudet tai rakenteen ulkopuoliset herätteet. Muuttuvien taajuuksien tapauksessa tarvitaan monikanavaista signaalinkäsittelyä, jolloin yksi kanava valvoo kohteen pyörimistaajuutta ja mittalaite suhteuttaa värähtelyarvot saatuun taajuuteen. Luotettavien tuloksien saamiseksi koneen pyörimisnopeuden muutoksien tulisi olla suhteellisen pieniä. Suurilla pyörimisnopeuseroilla laitteen resonanssiominaisuudet aiheuttavat suuria haasteita tulosten tulkintaan.

”Vianmääritys värähtelymittausten avulla perustuu yleensä herätteiden ja erityisesti niiden muutosten selvittämiseen. Voimakkaan värähtelyn syynä saattaa olla koneen suuri liikkuvuus jollakin herätevoimataajuudella, vaikka voimat sinänsä ovat pieniä. Suureen liikkuvuuteen voi olla syynä koneen osan tai sen tukirakenteen liiallinen joustavuus tai keveys. Usein on kyseessä ominaistaajuudesta johtuva resonanssi-ilmiö.” (PSK 5708, 2003) Ominaistaajuudet ilmenevät suurina arvoina liikkuvuusasteikolla. Värähtelyn arvoon vaikuttavat herätevoimat sekä rakenteen tukevuus. (Mikkonen, 2009, s. 224)

Mikkosen (2009, s. 225) mukaan herätteellä tarkoitetaan rakenteeseen kohdistuvaa voimaa, joka saa rakenteen värähtelemään. ”Tyypillisissä teollisuuden koneissa herätetaajuuksien määrä on suuri ja niiden tarkka tunnistaminen on usein vaikeaa. Rakenteeseen kohdistuvasta herätteestä käytetään myös nimitystä pakkovoima.

Pakkovoimat voivat johtua viasta koneessa tai ne voivat olla koneen normaaliin käyntiin liittyviä.” (Mikkonen, 2009, s. 225)

”Kaikilla rakenteilla on useita ominaistaajuuksia eli sellaisia taajuuksia, joilla ne pyrkivät herätteen vaikutuksesta värähtelemään. Ominaisvärähtelyt ovat yleensä kiusallisia ja aiheuttavat suuren osan rakenteellisista värähtelyongelmista, koska monimutkaisia rakenteita suunniteltaessa ominaistaajuuksien laskeminen on vaikeaa. Lisäksi laitteissa voi esiintyä paikallisia ominaistaajuuksia, joista saattaa aiheutua ongelmia.” (Mikkonen, 2009, s. 225–226) Ominaistaajuutta käytetään myös joissain mittausmenetelmissä. Esimerkiksi verhokäyrämittaus, PeakVue – menetelmä ja iskusysäysanturi käyttävät hyväksi ominaisvärähtelytaajuutta. (Mikkonen, 2009, s. 226)

Mikkosen (2009, s. 226) mukaan koneenosan tai laitteen resonanssissa herätetaajuus ja ominaistaajuus ovat lähellä toisiaan aiheuttaen yleensä epätoivottuja värähtelyjä. ”Resonanssissa värähtely vahvistuu tyypillisesti 5...50 -kertaiseksi. Kun rakenteen sisäinen vaimennus on pieni, seurauksena on korkea ja kapea resonanssihuippu. Vaimennuksen lisääntyessä vahvistus resonanssikohdassa pienenee, mutta vahvistava vaikutus ulottuu laajemmalle kaistalle. Käytännössä herätetaajuus osuu harvoin täsmälleen ominaistaajuuden kohdalle. Tällöin värähtelyn voimakkuus vaihtelee herkästi pyörimisnopeuden muuttuessa tai resonanssin siirtyessä esim. lämpötilamuutoksen seurauksena.” (PSK 5708, 2003)

Kriittisellä nopeudella käyvän laitteen herätevoiman taajuus on sama kuin pyörimistaajuus. Laitteen pyörimistaajuudella ilmenee aina värähtelyä, minkä takia ominaistaajuuden pitää poiketa pyörimistaajuudesta. Yleisenä ohjeena on, että ero ominaistaajuuden ja käytettävän pyörimistaajuuden välillä tulee olla vähintään 20 %. (Mikkonen, 2009, s. 226)

3.2 Aistinvarainen kunnonvalvonta

Aistihavainnot olivat aiemmin kunnonvalvonnan synonyymi. Laakereita kuuntelemalla, kokeilemalla koneenosien lämpöä tai tunnustelemalla koneen värähtelyä saatiin tietoa koneen toiminnasta. Nämä menetelmät ovat edelleen käytössä, vaikka niitä korvaamaan

ja täydentämään käytetään yhä enemmän mittaavia menetelmiä. Mittaavan kunnonvalvonnan piirissä olevia koneita kannattaa valvoa lisäksi aistinvaraisesti, ja suuri osa koneista onkin pelkästään aistinvaraisen valvonnan varassa. (Mikkonen, 2009, s. 418)

Mikkosen (2009, s. 418) mukaan aistinvaraisen kunnonvalvonnan apuvälineet ovat kehittyneet. Kehityksestä johtuen aistinvaraista kunnonvalvontaa suorittavien henkilöiden tulee kiinnittää huomiota seuraaviin seikkoihin.

”Suorittajan tulee tuntea:

- aistien toiminnan pääperiaatteet
- aistien toiminnan herkkyyteen vaikuttavat tekijät
- aistien käyttötavat kunnonvalvonnassa
- apuvälineiden käytön aistien tukena
- koneiden toimintatavat

Suorittajan tulee ymmärtää:

- aistien ja apuvälineiden käytön rajoitteet kunnonvalvonnassa
- apuvälineiden toiminnan
- koneiden vikaantumisilmiöt

Suorittajan tulee osata:

- suorittaa aistinvaraista kunnonvalvontaa
- käyttää apuvälineitä
- tulkita astinvaraisia havaintoja ja oireita sekä niiden muutoksia
- yhdistää eri lähteistä saamiaan tietoja ja havaintoja
- raportoida havaintoja

Suorittajan ammattitaidon lisäksi tarvitaan suunnitelma, jonka mukaisesti valvonta toteutetaan.

Suunnitelman tulee sisältää:

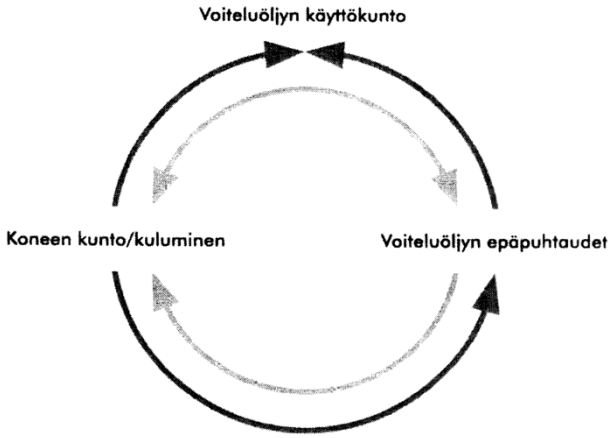
- kuka valvontaa toteuttaa

- mitä koneita valvotaan
- miten valvontaa tehdään
- mitä apuvälineitä käytetään
- miten havainnot raportoidaan
- miten raportointia hyödynnetään” (Mikkonen, 2009, s. 418)

3.3 Voiteluaineanalyysi

Voiteluaine on osa koneen toimintaa ja näin ollen voiteluaineanalyyseillä saadaan tietoa osien kulumisesta, prosessista, voitelusta ja itse voiteluaineesta. Voitelu- ja hydrauliöljyn sekä voitelurasvan analysoinnilla saadaan tietoa koneen ja voiteluaineen kunnosta sekä voiteluaineen epäpuhtauksista. (Mikkonen, 2009, s. 428) Antilan (2013, s. 164) mukaan voiteluöljyn ja koneen kunto sekä voiteluaineen epäpuhtaudet muodostavat ketjureaktion, joka vaikuttaa kuvan 7 mukaan:

- epäpuhtauksista johtuva kuluminen lisääntyy
- epäpuhtaudet huonontavat öljyä
- öljyn laatu heikentää voitelua
- laitteen kuluminen lisääntyy
- lisääntyvä kuluminen ja öljyn heikentyminen aiheuttavat epäpuhtauksia



Kuva 7. Voiteluaineen kunnonvalvontaan liittyvät keskeiset riippuvuussuhteet. (Antila, 2013, s. 164)

Mikkosen (2009, s. 428) mukaan voiteluaineanalyyseillä pyritään selvittämään seuraavia kysymyksiä:

- ”Ovatko voiteluaineen voiteluominaisuudet säilyneet riittävinä?
- Onko voiteluaineen puhtaus sillä tasolla, jota voideltava kohde tai järjestelmä ja itse voiteluaine edellyttävät?
- Onko voiteluaineen joukkoon kertyneiden kulumishiukkasten määristä, muodosta ja laadusta tunnistettavissa laitteen kulumismuutokset?
- Tarvitaanko analyysitulosten perusteella huoltotoimenpiteitä voiteluaineelle tai laitteelle?”

Öljyanalyysiin tarvitaan tarkat tiedot käytettävästä öljystä, öljyn käyttöiästä ja voideltavasta kohteesta. Lisäksi öljyn lisäykset ja koneen häiriöt ovat merkityksellisiä analysoinnin kannalta. Edellä mainittujen tietojen lisäksi koneen rakenteet tulee selvittää mittauspisteiden ja näytteenottopaikkojen määrittämiseksi. (Rossi, 1993, s. 30) Voiteluteknisen toimikunnan (2010, s. 13–16) mukaan Voitelutavan ja voiteluaineen valintaan vaikuttavat oleellisesti myös lämpötila, värähtely, käyttöympäristö ja mekaaniset rasitukset. Vanhentunut voiteluaine, soveltumaton tai puutteellinen voitelu aiheuttaa yli puolet teollisuuden vierintälaakerivaurioista. Voiteluaineen toimivuus lämpötila-alueen alarajalla ei vastaa normaalilämpötilan voitelutehokkuutta. Todellisuudessa rasvojen perusöljyn luovutus on riittävää vasta noin 20 astetta celsiusta korkeammissa lämpötiloissa.

Voiteluaineanalyysit ovat nousseet tärkeäksi menetelmäksi teollisuuden kunnonvalvonnassa ja vianmäärityksessä. Voiteluaineanalyysien liittäminen osaksi koneiden kunnonvalvontaa auttaa vähentämään kulumisen ja kitkan aiheuttamia haittoja. Analyysimenetelmien kehittyminen reaaliaikaisen tutkimuksen suuntaan ja paikan päällä suoritettaviin testauksiin mahdollistaa kunnonvalvonnan toteuttamisen entistä tehokkaammin. Näytetuloksien käsittelystä ja tuloksista on tehtävä tarkat suunnitelmat luotettavien ja nopeiden korjaustoimenpiteiden pohjaksi. (Mikkonen, 2009, s. 428) (Voitelutekninen toimikunta, 2006, s. 163, 179–180)

”Analyysilaitteiden ja sähköisen tiedonsiirron kehittyminen mahdollistavat myös analyysitulosten nopean saatavuuden, joka on perusedellytys tulosten hyödyntämisessä

ja kunnonvalvonnan toimivuudessa. Jos tulosten saaminen kestää liian kauan, laite saattaa sillä välillä vaurioitua ja kuitenkin vika olisi ollut nähtävissä analyysituloksista.” (Mikkonen, 2009, s. 429) Voiteluhuollon monipuolisuus ja tiedon hallinnan laaja-alaisuus vaativat tiivistä yhteistyötä kunnonvalvonta- ja voiteluhenkilöstön välillä. (Mikkonen, 2009, s. 429)

3.4 Lämpötilan mittaus

Lämpötila on yleinen mittaussuure teollisuudessa, etenkin prosessien valvontaan sekä ohjaukseen lämpötilatietoa käytetään yleisesti. Koneiden kunnonvalvontaan lämpötilan mittausta käytetään yleisesti. Esimerkiksi virheellinen linjaus, voitelun vikatilanteet tai alkavat laakerivauriot voidaan tunnistaa lämpökameran avulla. Lämpötilan avulla tapahtuvalla kunnonvalvonnalla voidaan parantaa komponenttien oikea-aikaista huoltoa tai vaihtoa. Lisäksi kohonnut lämpötila saattaa indikoida kohonneesta energian kulutuksesta mitattavassa kohteessa, tällöin voidaan suorittaa korjaavia toimenpiteitä taloudellisista syistä. Lämpötilanmittausta käytetään myös suojaus- ja hälytysjärjestelmien mittauksissa. (Mikkonen, 2009, s. 439) (Bagavathiappan, et al., 2013, s. 35–36, 46–47)

Lämpötilan mittauksella voidaan tutkia esimerkiksi laakerien, puhaltimien, sähkömoottorien, vaihteiden ja pumppujen kuntoa. Muita lämpötilan kunnonvalvonnan kohteita voivat olla kompressorit, työstökoneet, hissit, polttomoottorit ja turpiinit. (Mikkonen, 2009, s. 178) Kunnonvalvonnassa lämpötilan mittausta käytetään tyypillisesti lämpövuotojen, laakerikuormituksen ja mekaanisten- sekä sähkölaitteiden hukkatehon määrittämiseen. (Mikkonen, 2009, s. 456)

Lämpötilan nousu sähkölaitteissa ja komponenteissa saattaa johtua monista erilaisista ongelmista; esimerkiksi epätasaisesta kuormituksesta, eristyksen vaurioista, vaurioituneista kytkimistä tai liittimistä. Mahdollisimman aikainen vaurion havaitseminen on tärkeää niin laitteiston luotettavuuden lisäämiseksi kuin lisävaurioidenkin välttämiseksi. Lämpökameran avulla laitteiston kuntoa voidaan seurata tehokkaasti ja tuotantoseisokkeja välttäen. Säännöllisesti otettujen

infrapunakuvien vertailulla saavutetaan hyviä tuloksia sähkökomponenttien kunnonvalvonnassa. (Huda & Taib, 2013, s. 220–223)

Mikkosen (2009, s. 440) mukaan ”lämpötilan mittausmenetelmät voidaan jakaa kolmeen päätyyppiin: koskettavat menetelmät, koskettamattomat lämpötilan mittausmenetelmät ja lämpökamerat. … Koskettamattomat menetelmät perustuvat kappaleen lähettämän lämpösäteilyn mittaamiseen”. Taulukossa 3 on esitelty lämpötilan mittausmenetelmiä ja niiden käyttölämpötiloja. (Mikkonen, 2009, s. 439) Lämpökuvauksessa yleisin käytettävä menetelmä on vertaileva lämpökuvaus, jossa kohteen lämpötilaeroa verrataan ympäristöön. Tällöin mahdolliset muutokset olosuhteissa eivät aiheuta vääristymää kunnonvalvonnan tuloksiin. Myös lämpökameran avulla tapahtuvaa lämpötilanmittausta voidaan käyttää kunnonvalvontaan, kun halutaan tietää kohteen todellinen lämpötila. (SFS-ISO 18434-1, 2011)

Taulukko 3. Lämpötilan mittausmenetelmiä ja käyttölämpötiloja (Mikkonen, 2009, s.440)

Koskettavat menetelmät	
Lasilämpömittarit Lasisäiliössä oleva neste laajentuu ja nousee kapillaariputkeen lämpötilan noustessa. Pinnankorkeus kertoo lämpötilan. Nesteenä on esim. elohopea, -273 °C…750 °C.	*Metallivastusanturit* Vastusanturit ovat metallista valmistettuja antureita. Menetelmä perustuu siihen, että anturien resistanssin lämpötilariippuvuuden avulla voidaan mitata lämpötila, -250 °C … 850 °C.
Termoparimittaus Termoparin toiminta perustuu lämpösähkö- eli Seebeckin ilmiöön. Kun kaksi eri metallista valmistettua metallilankaa yhdistetään toisesta päästään (kuumapää), lankojen toisten päiden (kylmäpää) välille syntyy kuuma- ja kylmäpään lämpötilaeroon verrannollinen tasajännite, -273 °C... 2200 °C.	*Bi-metallilämpömittari* Bi-metallilla eli kaksoismetallilla tarkoitetaan kahdesta eri metallia olevasta liuskasta yhteen valssaamalla saatua liuskaa. Metallien erilaisten lämpötilakertoimien johdosta liuska taipuu lämpötilan muuttuessa, -70 °C...550 °C.
Termistorit Puolijohdetyyppinen anturi, jonka herkkyys on suuri, mutta on voimakkaasti epälineaarinen, -100 °C... 320 °C	*Lämpötilaindikaattorit* Lämpötilavärit ja tarrat, jotka muuttavat väriään kun lämpötila muuttuu, kapea lämpötila-alue.
Koskettamattomat menetelmät	
Infrapunalämpötilamittarit Kiinteät	*Infrapunalämpötilamittarit* Skannaavat
Lämpökamerat	
Jäähdytetyllä ilmaisimella toimivat Jäähdytettyjen matriisien toimintalämpötila on noin -200 °C. Soveltuvat erittäin nopeiden ilmiöiden kuvaamiseen.	*Jäähdyttämättömällä ilmaisimella toimivat* Soveltuvat yleisimpiin kuvaustilanteisiin. Tarjoavat mahdollisuuden jatkuvaan valvontaan, koska niissä ei ole jatkuvasti liikkuvia mekaanisia osia.

4 KUNNONVALVONNAN NDT-MENETELMÄT

NDT-menetelmien käyttö on lisääntynyt huomattavasti myös kunnossapitotoiminnassa. Kunnonvalvontaa suoritetaan mahdollisuuksien mukaan komponenttien ja laitteiden käytön aikana, muutoin tarkastukset suoritetaan huoltoseisokkien yhteydessä. Rikkomattomien aineenkoetusmenetelmien käytön merkitystä lisäävät laitosten ja laitteiden koon kasvaminen, lujuustekninen mitoitus suunnittelussa ja uusien materiaalien käyttö. (Barck, 2004, s. 824)

Käytetyin tarkastusmenetelmä on silmämääräinen tarkastus, joka tehdään käytännössä aina ennen muiden NDT-menetelmien käyttöä tai näiden yhteydessä. Muita tyypillisiä NDT-menetelmiä ovat magneettijauhetarkastus, tunkemanestetarkastus, ultraäänitarkastus, pyörrevirtamittaus ja radiografia. Kyseisistä menetelmistä teollisuudella on jo vuosikymmenten kokemus. (Järviö et al., 2007, s. 254, 256, 266) Ansaharjun (2009, s. 303) mukaan ”ainetta rikkomattomilla mittauksilla, kuten ultraäänellä ja röntgenkuvauksella, päästään jo ennen vauriota toteamaan halkeamat, väsymismurtumat, korroosiovauriot ja vuodot.” Perinteisten menetelmien lisäksi käytössä on erikoislaitteita vaativia muita kunnonvalvonnan sovelluksia, joita käytetään erikoistapauksissa. Esimerkiksi korkeataajuusultraäänitarkastus, monitaajuuspyörrevirtatarkastus, säröjen syvyydenmittaus, kovuusmittaus kentällä, jäljennemenetelmä, akustinen emissio ja Barkhausen kohinamittaus ovat erikoissovelluksia. (Järviö et al., 2007, s. 254)

Mikkosen (2009, s. 447) mukaan ainetta rikkomattomia tarkastusmenetelmiä kutsutaan NDT-menetelmiksi; lyhenne NDT tulee englanninkielisistä sanoista "Nondestructive testing". NDT-menetelmiä käytetään kunnonvalvonnan lisäksi myös yleisesti materiaalien ja tuotannon laadun seurannassa. ”Tyypillisiä tuotannon laadunvalvonnassa käytettäviä menetelmiä ovat koneistuksen pinnankarheuden mittaus, karkaisun jälkeinen kovuudenmittaus tai hitsausliitosten[!] röntgentarkastus. Vastaavasti kunnonvalvonnassa yleisesti käytettyjä menetelmiä ovat endoskooppitarkastelu, ultraääniluotaus, stroboskooppitarkastelu, äänimittaukset, värähtelymittaukset tai

voiteluaineanalyysit. Taulukossa 4 on yhteenveto NDT-menetelmistä, niiden soveltuvuudesta sekä esimerkkejä käyttökohteista.” (Mikkonen, 2009, s. 447)

Taulukko 4. NDT menetelmiä, niiden soveltuvuus sekä käyttökohteita (Mikkonen, 2009, s. 456)

Soveltuvuus / Menetelmä	Särö	Kuluminen	Murtuma	Korroosio	Eroosio	Vuoto	Materiaalianalyysi	Materiaalin kunto	Jännitys	Muodonmuutos	Materiaalin paksuus	Kerrostuman paksuus	Fysikaalinen rajoitus	Muu	Esimerkki kohteesta tai muu huomautus
Akustinen ristikorrelaatio						x									Putkivuotojen paikannus
Akustinen emissio	x		x			x		x		x				x	Materiaalin jännitysaallot
Pinnoitteen paksuus												x		x	Magneettiset ja pyörrevirta-menetelmät
Tunkeumaneste	x		x			x									Liitu-, vesi- ja alkoholimene-telmät mukaan lukien
Pyörrevirtatestaus	x	x	x	x	x	x					x	x		x	Lämmönvaihtimien putket, teräsköydet, pinnan tutkimi-nen,
Emissio spektroskopia							x								Vähän- ja runsasseosteiset teräkset
Endoskopia	x	x	x	x	x	x						x	x		Sisäiset tarkastukset
ER-anturi				x											Korroosion eteneminen
Ferrografia		x													Voitelujärjestelmät, kulumis-mekanismit
Kovuuden mittaus								x							Brinell, Vickers, Rockwell B, C ja N, Knoop, Shore
Vetykenno				x											Korroosion eteneminen
Isotooppimenetelmä		x				x		x			x	x	x	x	Radiometria, ym.
Laser etäisyydenmittaus		x									x			x	Pinnankarheus, geometria
Vuodon mittaus						x								x	Nesteen tunkeutuminen, ultraääni, paineen muutos, ym.
LPR anturi, polarisaatio vastus				x											Hetkellinen korroosion nope-us
Magneettitulppa		x													Voitelujärjestelmät
Magneettisten partikkeli-en havainnointi	x													x	Hitsausvirheet, laminoidut rakenteet
Mekaaninen kalibrointi		x		x	x						x	x		x	Fyysiset mitat
Melumittaus														x	Äänitaso, intensiteetti
Hahmontunnistus	x	x	x	x	x					x	x	x	x		Kulumishiukkasten muoto
P-skannaus, röntgen	x	x	x	x	x						x			x	Hitsisaumat, jännityskorroo-sio, virumisvauriot
Reikien havainnointi														x	Pinnoite
Radiografia	x	x	x	x	x	x					x	x	x	x	Liitokset, laminaatit, betoni, korroosio ja eroosio
Jäljennementelmä	x	x	x					x		x				x	Pinnankarheus ja -muoto
Spektrometrinen voitelu-aineanalyysi		x													Voiteluainejärjestelmät
Venymäliuskamenetelmä									x	x					Jännitys, paine, värähtelyt
Stroboskopia	x	x	x											x	Visuaalinen tarkastus, liikkeen pysäytys
Termografia	x			x		x						x		x	Lämpövuoto, laakerikuormi-tus, hukkateho
Ultraääni ilmasta						x								x	Painevuoto, sähköpurkaukset
Ultraääni	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x				Myös uä:n vaimeneminen

4.1 Silmämääräinen tarkastus

Eniten käytetty ja pisimpään käytössä ollut tarkastusmenetelmä on visuaalinen eli silmämääräinen tarkastus. Visuaalinen tarkastus tehdään ennen muiden NDT-menetelmien käyttöä tai näiden yhteydessä. (Järviö et al., 2007, s. 256) ”Ihmissilmän tarkkuus on hyvä ja kun tähän yhdistetään kokemusperäistä tietoa, joka nykyään voi olla tallennettuna massamuistiin, tuloksena on tehokas tarkastusmenetelmä.” (Järviö et al., 2007, s. 256)

Ihmissilmä havaitsee taustasta viivan, joka on hiuskarvan paksuinen (n. 50 µm). Kapeammat epäjatkuvuuskohdat, esimerkkinä halkeamat tai 100 µm:ä pienemmät pisteet, havaitaan vasta magneettijauhe- tai tunkeumanestetarkastuksen avulla. Silmämääräisessä tarkastuksessa käytössä olevien yksinkertaisten apuvälineiden, esimerkiksi suurennuslasien ja erilaisien peililaitteiden, käyttö vaatii kokemusta. (Järviö et al., 2007, s. 256)

Silmämääräisen tarkastuksen apuna käytetään usein optisia katselulaitteita. Näistä suoraan kohteeseen pääsyyn soveltuu boroskoopit. Muihin kohteisiin on käytettävä taipuisia kuituoptiikoita eli fiberoskooppeja tai videoskooppeja, joilla tarkastelusuunta voi olla myös vino. (Järviö et al., 2007, s. 256) ”Endoskooppi on laite, joka mahdollistaa kohteen visuaalisen tarkastuksen vaikeasti havaittavissa paikoissa kuten koneiden ja laitteiden sisäpuolisissa koteloissa ja putkissa. … Taipuisan putken pituus voi olla jopa muutama kymmenen metriä. Taipuisan putken etu on se, että sillä voidaan kulkea pitkin mutkittelevaa reittiä ja kuvauspäätä voidaan käännellä eri suuntiin.” (Mikkonen, 2009, s. 447)

”Fiberoskoopissa valo kuljetetaan kohteeseen valokuiduilla. Fiberoskooppien pituus on normaalisti 1,5–3 m:n luokkaa. Halkaisijat vaihtelevat alueella 6–15 mm, ja niiden okulaari-päätä voidaan normaalisti kääntää +/- 120°.” Fiberoskooppeihin voidaan liittää myös järjestelmäkamerarunkoja. Erikoissovelluksiin voidaan käyttää pieniä fiberoskooppeja, joiden halkaisijat vaihtelevat 0,9–2,7 mm:n ja pituudet vastaavasti alueella 36–175 mm:n välillä. (Järviö et al., 2007, s. 256)

”Videoskooppi on taipuisa optinen endoskooppi, jossa kuva siirretään sähköisesti. Kuvan siirtoa lukuun ottamatta näissä on sama rakenne kuin fiberoskoopeissa. Videoskoopissa optiikka on korvattu CCD-elementillä yhtä linssiä lukuun ottamatta. Näin ollen kamera mahtuu kokonaisuudessaan kuituoptisen kaapelin päähän, jonka halkaisija on esimerkiksi 6 mm 2 m:n kaapelipituudella ja 13 mm 6 m:n kaapelipituudella.” Digitaalisessa muodossa tuleva kuvavirta voidaan tallentaa suoraan joko video- tai pysäytyskuvaksi. Tietokoneen kuvankäsittelyohjelmalla kuvia voidaan parantaa tosiaikaisesti tai jälkikäteen paremman havaittavuuden saavuttamiseksi. Video tai kuvavirtaa voidaan seurata myös etävalvontana tietoverkon yli. (Järviö et al., 2007, s. 257)

Erikoisvarustetun videoskooppin okulaaripäätä ohjataan tyypillisesti joy-stickin avulla. Lisäksi vidoeskooppi voidaan varustaa sisäänrakennetulla mittaustoiminnolla, päähän asennetulla pyörrevirta-anturilla tai pienellä työkalulla. Työkalulla voidaan esimerkiksi poistaa vierasesineitä putkistoista. (Järviö et al., 2007, s. 257)

”Stroboskopialla tarkoitetaan menetelmää, jossa visuaalisesti tarkasteltavaa yleensä pyörivää tai värähtelevää kohdetta valaistaan vilkkuvalla valolla. Kun valon välähdystaajuus on sama kuin tarkasteltavan kohteen pyörimis- tai värähdystaajuus, näyttää sen liike pysähtyneeltä. Jos välähdystaajuutta hieman nostetaan tai lasketaan, näyttää kohde liikkuvan hitaasti.” Työturvallisuuden huomioiminen on erityisen tärkeää käytettäessä stroboskooppia. Pyörivä tai värähtelevä koneenosa saattaa näyttää pysähtyneeltä tietyllä välähtelytaajuudella, jolloin kohteen vaarallisuus saattaa jäädä huomioimatta. Stroboskoopin avulla voidaan tarkastella visuaalisesti pyörivien komponenttien kuntoa. Esimerkiksi joustavien kytkinten kunto, telojen pintavauriot tai murtumat puhaltimen siivissä ovat tutkittavissa stroboskoopin avulla. (Mikkonen, 2009, s. 448)

4.2 Röntgenkuvaus

Röntgen- ja gammasäteily läpäisee kiinteät materiaalit kuten teräksen, puun, betonin ja muovin. Menetelmässä kappale altistetaan röntgensäteilylle ja vastapuolelle sijoitetaan röntgensäteilylle herkkä filmi tai sähköinen mittaus. Kuvattavan aineen tai komponentin

epäjatkuvuuskohdat aiheuttavat säteilyn heikentymistä eli absorptiota siten, että säteilyä tulee kappaleen läpi erilainen määrä sen eri kohdista. Tummuuserot filmissä tai sähköisessä mittauksessa ilmaisevat läpimenneen säteilyn määrän. Syntyneiden tummuuserojen perusteella tietyt kohdat voidaan luokitella tiettyjen normien ja röntgenkuvaajan kokemuksen perusteella esimerkiksi materiaalin sisältämiksi huokosiksi tai muiksi epäjatkuvuuskohdiksi. (Järviö et al., 2007, s. 264) (Mikkonen, 2009, s. 448)

Röntgenkuvausta käytetään tyypillisesti suhteellisena mittauksena, jolloin eri kohdista otettujen kuvien tummuusasteita ja sisältöä vertaillaan keskenään. Kalibroinnin avulla on myös mahdollista mitata eri materiaalien absoluuttisia paksuuksia. Röntgenkuvauksen stereoradiografisessa menetelmässä voidaan havainnoida kappaleen sisältämiä kolmiulotteisia vikoja. Vaativien hitsausliitosten tarkastuksessa stereoradiografinen röntgenkuvaus on yleisesti käytetty menetelmä, jolla voidaan havaita esimerkiksi huokosia, kuonasulkeumia, valumia, ainevajautta ja juurivikoja. Myös korroosion ja eroosion aiheuttamat kuopat ja muut viat saadaan esille hyvin esille kolmiulotteisina epäjatkuvuuskohtina. Radiografian huomattavin rajoitus on etenkin säröjen ja halkeamien havaitseminen, jos ne eivät ole säteilyn suuntaisia. Vaikka säteilyn suunta olisi optimaalinen, on vian leveyden oltava suurempi kuin menetelmän luontainen epätarkkuus. (Järviö et al., 2007, s. 264) (Mikkonen, 2009, s. 448) ”Tarkka röntgenkuva voi myös paljastaa pintojen rosoisuuden tai epätasaisuuden. Vaurioiden aiheuttamat mustumaerot ovat yleensä niin pieniä, että näiden esille saamiseksi on syytä käyttää melko pehmeätä säteilyä. Tästä syystä isotooppikuvaus soveltuu tähän tarkoitukseen röntgenkuvausta huonommin.” (Järviö et al., 2007, s. 264)

Järviö et al., (2007, s. 264) mukaan radiografiassa ollaan siirtymässä röntgenfilmien asemasta digitaaliseen kuvaukseen. Röntgenkuvauksessa voidaan käyttää kolmea erilaista digitalisoinnin mahdollisuutta:

”1. Vanhan röntgenkuvan digitalisoiminen. Kuva pyyhkäistään laservalolla. Laservalon synnyttämä tuikahdusvalo luetaan optisesti ja digitalisoidaan ja viedään tietokoneelle käsiteltäväksi.

2. Kuva muodostetaan fluoresoivilla ilmaisimilla. Kuvalevyyn kohdistuvan säteilyn aiheuttama fluoresoiva valo digitalisoidaan ja viedään samalla tavalla tietokoneelle käsiteltäväksi. Ilmaisimesta käytetään usein nimitystä "flat panel". Molemmista näistä tekniikoista käytetään nimitystä CR eli Computed Radiography.

3. Jos käytetään vastaanottimena amorfisesta alkuaineesta tehtyjä levyjä, saadaan suora muutosprosessi, jolloin röntgensäteily muutetaan suoraan sähköksi, eli kysymyksessä on tällöin DR Direct Radiography ja tulos näkyy suoraan tietokoneen näyttöruudulla.”

4.3 Pyörrevirtausmittaus

Pyörrevirtamittaus on sähkömagneettiseen induktioon perustuva menetelmä, jossa etsitään sähköä johtavien aineiden pinnan ja pinnan välittömässä läheisyydessä olevia epäjatkuvuuskohtia. Menetelmän avulla voidaan havainnoida pintavikoja ja säröjä sekä muita lähellä pintaa sijaitseva vikoja. Tyypillinen pyörrevirtamenetelmän sovellus on ei-ferromagneettisten putkien tarkastaminen. Menetelmää voidaan käyttää myös säröjen syvyyden sekä pinnoitteen paksuuden mittaamiseen. (Järviö et al., 2007, s. 266) (Mikkonen, 2009, s. 449)

Pyörrevirtamittalaitteessa on oskillaattoripiiri, jonka tuottama vaihtojännite johdetaan pyörrevirta-anturissa olevaan pienikokoiseen kelaan. Anturin ympärille muodostuu primäärinen magneettikenttä, joka indusoi aineeseen pyörrevirtoja vaihtovirtamagneettikentän avulla. Ferromagneettisen kappaleen pinnan läheisyydessä anturi aiheuttaa kappaleeseen sekundäärisen magneettikentän, joka vaikuttaa impedanssiin. Kelan vaikutuspiirissä oleva särö, korroosion aiheuttama kuoppa tai muu ainevajaus on rekisteröitävissä impedanssin muutoksen avulla. Kappaleen sähköiset ja magneettiset ominaisuudet vaikuttavat oleellisesti sekundäärisen magneettikentän intensiteettiin. Esimerkiksi mitattavan putken geometrian muutos aiheuttaa impedanssiin muutoksen, joka havaitaan pyörrevirtamenetelmällä helposti. (Mikkonen, 2009, s. 449) (Järviö et al., 2007, s. 266) ”Erilaisten materiaalien vaikutus voidaan korjata mittalaitteen nollaussäätimestä. Kun nollaus on suoritettu, vaikuttavat kappaleeseen syntyvien magneettikenttien voimakkuuteen kappaleen sisältämät häiriöt. Mittaamalla materiaalin sisältämien häiriöiden vaikutusta primäärisen ja sekundäärisen

magneettikentän tasapainoon, voidaan havainnoida epäpuhtauksia, säröjä ja sulkeumia.” (Mikkonen, 2009, s. 449)

”Pyörrevirtatarkastusta pyritään myös nykyään soveltamaan ferromagneettisten aineiden tutkimiseen. Menetelmä edellyttää tällöin aineen magneettista esikyllästämistä. Ferromagneettisia lämmönvaihdinputkia on tällä tavalla tarkastettu pyörrevirralla. Koska tulokset ovat vielä melko epätarkkoja, voidaan näiden tarkastuksien yhteydessä epäilyttäviä kohtia tarkastaa jälkikäteen ultraäänitekniikkaa käyttäen.” Tarkastussyvyys rajoittuu yleensä 5 mm:iin, parhaimmillaan pystytään erottamaan 2 mm:ä syvät 0,1 mm:n porauksella tehdyt reiät. Muistioskilloskooppien avulla indikaatiot ovat valokuvattavissa ja dokumentoitavissa. (Järviö et al., 2007, s. 267)

”Teollisuudessa käytetään pyörrevirtamenetelmää ennen kaikkea lämmönvaihtimien ja lauhduttimien tuubien sisäpuoliseen tarkastamiseen. Tällöin työnnetään tai ammutaan anturi ilmanpaineen avulla putkeen, joko kaikkiin, tai tiettyyn ennalta sovittuun osaan kaikista putkista.” Putkien mittaamiseen käytettäviä sisäisiä standardikeloja on jokaiselle putkihalkaisijalle (välille 1,2 - 40 mm) erikseen. Tarkastamalla määritellään putket, jotka on vaihdettava tai korjattava määritetyn käyttövarmuuden saavuttamiseksi. (Järviö et al., 2007, s. 266–267)

Mikkosen (2009, s. 450) mukaan ”pyörrevirtamenetelmän tyypillisiä käyttökohteita ovat:

- säröjen havainnointi
- materiaalin paksuuden mittaus
- korroosion havainnointi
- pinnoitteen paksuuden mittaus
- sähkönjohtavuudenmittaus
- metallin havainnointi esim. muovissa
- korkeaan lämpötilaan altistuneet kohdat metallissa”

4.4 Tunkeumanestetarkastus

Tunkeumanestetarkastus soveltuu sellaisten vikojen havainnointiin, jotka avautuvat kappaleen pintaan asti. Tyypillisiä havaittavia vikoja ovat esimerkiksi säröt ja huokoset. Menetelmä soveltuu erityisen hyvin esimerkiksi ruostumattoman teräksen ja titaanin tarkastukseen. Luonnostaan huokoisille materiaaleille tunkeumanestetarkastus ei sovellu. (Järviö et al., 2007, s. 259) (Mikkonen, 2009, s. 452)

Kappaleen pintaan levitetään hyvin tunkeutuvaa joko värillistä tai fluoresoivaa nestettä, joka imeytyy epäjatkuvuuskohtiin. Ylimääräinen neste pyyhitään pois tietyn vaikutusajan jälkeen ja tarkastettava kappale kuivataan. Pinnalle levitetään tämän jälkeen ohut kehitekerros, joka imee halkeamiin jääneen väriaineen ja antaa näyttämän ohuessa kehitekalvossa. Indikaatio pystytään havaitsemaan silmämääräisesti, koska epäjatkuvuuskohtiin jäänyt nestetilavuus aiheuttaa pinnalle suurennoksen vikakohdista. Luonnollisesti kehitteessä oleva väriaine ilmaisee myös vikojen sijainnin. (Järviö et al., 2007, s. 259) (Mikkonen, 2009, s. 452) ”Tunkeumanestetarkastus on herkempi ulkopuolisille vaikutuksille ja suoritustapavaihteluille kuin magneettijauhetarkastus. Sen vuoksi olisikin pintamenetelmistä aina ensisijaisesti käytettävä magneettijauhetarkastusta, jos kysymyksessä on magneettinen aine.” (Järviö et al., 2007, s. 260)

”Menetelmällä on mahdollista havaita leveydeltään jopa 0,1 μm:n halkeamat. Tarkasteltavan pinnan tulee olla puhdas, ja lämpötilan noin 20 °C. On olemassa nesteitä myös matalammille ja erittäin korkeille lämpötiloille.” (Mikkonen, 2009, s. 452) ”Tunkeumanesteindikaation leveys on riippuvainen epäjatkuvuuskohtaan imeytyneestä nestetilavuudesta, jolloin pyöreistä epäjatkuvuuskohdista, kuten huokosista, tulee hyvinkin selviä indikaatioita. Tunkeumanestetarkastuskin[!] vaatii kalibroinnin. Kemikaalien toimivuus on kokeiltavissa sopivilla kalibrointikappaleilla.” (Järviö et al., 2007, s. 260)

Mikkosen (2009, s. 452) mukaan ”tunkeumanestemenetelmän tyypillisiä käyttökohteita ovat:

- väsymisen aiheuttamat säröt akseleissa
- lämpökäsittelyn aiheuttamat säröt

- puhaltimien ja turpiinien siipien säröt
- säiliöiden vuotojen tarkastus”

4.5 Magneettijauhetarkastus

Magneettijauhetarkastus on ferromagneettisten aineiden pinnassa ja enintään 2 mm:n etäisyydellä pinnasta olevien vikojen etsimismenetelmä. Magneettijauhemenetelmässä aikaansaadaan kappaleen pintaan voimakas magneettivuo, joka pysyy kappaleen sisällä, mikäli tarkasteltavan kohdan pinta on ehjä. Magneettivuo vuotaa ulos eli pyrkii etenemään ilman kautta mahdollisissa epäjatkuvuuskohdissa. Magneettijauhetarkastuksessa tutkittavan kohdan pinnalle levitetyssä nesteessä olevat rautahiukkaset järjestäytyvät magneettivuon mukaan. Magneettikentän riittävyys tulee arvioida sopivilla kalibrointikappaleilla tai tarkastusohjeilla. Magneettikentän suunnan on oltava kohtisuorassa vikaan nähden, jolloin vian varmistamiseksi magneettikentän suuntaa on käännettävä ennen lopullisten johtopäätösten tekemistä. (Järviö et al., 2007, s. 257–259) (Mikkonen, 2009, s. 452)

Magneettivuon vuotokohtaan kerääntyy hiukkaskasauma, joka indikoi mahdollisesta viasta. Hiukkaskasauman leveys verrattuna särön leveyteen on suuri ja näin ollen magneettijauhetarkastuksella on mahdollisuus löytää hyvinkin pieniä säröjä. Vian havaitsemiseksi käytetään värillisiä hiukkasia kontrastiväripohjalla tai fluoresoivia hiukkasia. Tyypillisesti magneettijauhemenetelmä toimii hyvin kapeiden epäjatkuvuuskohtien havaitsemisessa. Menetelmällä voidaan havaita pituudeltaan vähintään millimetrin luokkaa ja leveydeltään yli 0,01 mm pintasäröjä. (Järviö et al., 2007, s. 257–258) (Mikkonen, 2009, s. 452)

4.6 Kovuusmittaus

”Kovuusmittaus on yleisnimitys niille useille menetelmille, joita käytetään mittamaan pinnan kykyä vastustaa sen vaurioitumista iskumaisia tai staattisia kuormituksia vastaan.” (Mikkonen, 2009, s. 452) Kovuusmittaus ei ole tarkkaan ottaen NDT-menetelmä johtuen mitattavaan pintaan tulevasta jäljestä. Normaalisti koneenosaa ei kuitenkaan tarvitse vaurioittaa käyttökelvottomaksi mittauksen takia. Mittaustulokseen vaikuttavat esimerkiksi kimmomoduuli, lujuusarvot, kappaleen dimensiot, pinnanlaatu

ja materiaalin tasalaatuisuus. Myös kuormituksen suuruudella, kestoajalla ja kuormituksen muutosnopeudella on vaikutusta mittauksiin. Näin ollen mittausmenetelmä on valittava huolellisesti käyttötarkoituksen mukaan ja käytetyn standardin tarkat tiedot on sisällytettävä mittaustuloksiin. (Järviö et al., 2007, s. 270) (Mikkonen, 2009, s. 452)

”Kunnossapitoalalla voi vaurioiden tutkimuksissa olla hyötyä tällaisista mittauksista, joissa tulos saadaan heti. Menetelmillä saadut tulokset saattavat vaihdella johtuen pinnankarheus- ja paikallisista koostumuseroista, mutta usein vertaileva tulos on jo varsin käyttökelpoinen.” Kovuusmittausta käytetään myös aineiden tunnistamiseksi kentällä, jolloin mittaus voidaan suorittaa esimerkiksi painettavilla käsikovuusmittarilla tai poldivasaralla. (Järviö et al., 2007, s. 270)

Kovuusmittausta ei normaalisti luokitella NDT-menetelmäksi johtuen mittaustapahtuman seurauksena syntyvästä jäljestä, mutta ”markkinoilla on saatavilla myös siirrettäviä mittareita, joilla saadaan mittatulos välittömästi mittauksen yhteydessä digitaalisena vertailulukuna, josta kovuus on suoraan tulostettavissa. Näistä ensimmäinen mittausmenetelmä (Mechanical Vibration Attenuation) perustuu aineen kimmoisiin muodonmuutosominaisuuksiin. Mittaus suoritetaan siten, että pintaan ammutun pienen kuulan lähtönopeutta verrataan siihen nopeuteen, jolla se kimmahtaa takaisin. Tuloksena on niin kutsuttu Leeb-kovuus keksijänsä mukaan. Toinen menetelmä (Ultrasonic Contact Impedance) perustuu anturin siirtymän aiheuttamaan impedanssimuutokseen. Viimeinen vuonna 2002 markkinoille tullut menetelmä (Through Indenter Viewing) mittaa läpinäkyvän Brinell-kovuuskärjen läpi painauman ja tulostaa siitä suoraan kovuuden.” (Järviö et al., 2007, s. 270)

4.7 Jäljennemenetelmä

Jäljennemenetelmässä materiaalin mikrorakennetta voidaan tutkia ilman koepalan ottamista ja näin ollen tutkittavaa komponenttia ei tarvitse vaurioittaa. Menetelmässä tutkittavan kohteen pinta hiotaan ja syövytetään siten, että metallin mikrorakenne saadaan näkyviin. Tämän jälkeen käsiteltyä pintaa vasten painetaan jäljennemateriaali. Esimerkiksi pehmennettyä muovia voidaan käyttää jäljennemateriaalina, jolloin sen

annetaan kovettua painamisen jälkeen. Muoviin muodostuu tarkka kopio tutkitusta pinnasta. (Mikkonen, 2009, s. 451)

”Jäljenne toistaa mikrorakenteen peilikuvana, joka voidaan analysoida optisella mikroskoopilla suurennuksen ollessa 500...1000-kertainen. Tarkemmassa analyysissä voidaan käyttää myös elektronimikroskooppia. Tällöin jäljenteen pintaan on kuitenkin höyrystysmenetelmää käyttäen muodostettava ohut sähköä johtava kalvo, esimerkiksi kultapinnoite.” (Mikkonen, 2009, s. 451)

Mikkosen mukaan (2009, s. 452) ”Jäljennemenetelmä soveltuu käytettäväksi lämpötila-alueella 5...40 °C. Jäljennemenetelmän tyypillisiä käyttökohteita ovat:

- pintojen kuluminen, esim. telapinnoitteet, hammaspyörät, laakerit ym.
- materiaalin mikrorakenteen tutkiminen
- virumisilmiöt
- säröytyminen
- pinnan profiilin ja karheuden mittaus”

4.8 Ultraäänimittaus

Ultraäänitarkastuksessa etsitään pinnasta käsin äänen heijastumia, jollaisia ovat lähes kaikki materiaalin epäjatkuvuuskohdat. Materiaaliin lähetetty ultraääni heijastuu takaisin anturiin havaittavista epäjatkuvuuskohdista kuten rajapinnoista, halkeamista ja huokosista. NDT – tarkastaja analysoi tuloksia ja päättelee niiden perusteella onko kysymys viasta vai geometriasta johtuvasta heijastumasta. Tyypillisesti ultraäänimittauksella voidaan mitata ainevahvuuksia sekä havainnoida valmistus- tai materiaalivikoja. (Järviö et al., 2007, s. 261) (Mikkonen, 2009, s. 450)

Ultraääniluotaimia on käytössä kahta eri tyyppiä; normaali- ja kulmaluotaimia. Näistä normaaliluotain löytää parhaiten kerrostumat, ja kulmaluotaimella havaitaan tutkittavan kohteen pinnasta alkavat halkeamat ja muut vastaavat vauriot. Kulmaluotaimella tutkitaan esimerkiksi hitsausliitoksia ja korroosio- sekä väsymisvaurioita. Ultraääntä vaimentavissa materiaaleissa, kuten austeniittisessa ruostumattomassa teräksessä mittauksia on hankala toteuttaa. (Järviö et al., 2007, s. 261) (Mikkonen, 2009, s. 450)

”Ultraääniluotaimen anturi lähettää lyhyen ultraäänitaajuisen pulssin materiaaliin. Pulssi etenee mekaanisena värähtelynä materiaalin sisällä ja heijastuu takaisin anturiin, joka toimii myös mikrofonina. Anturin ja tutkittavan materiaalin välissä on käytettävä geeliä värähtelypulssin välittäjäaineena. Ultraääniluotauksen luotettava käyttö ja tulosten oikea tulkinta vaatii kokemusta.” (Mikkonen, 2009, s. 450)

Mikkosen (2009, s. 451) mukaan ”ultraääniluotauksen tyypillisiä käyttökohteita ovat:

- hitsausliitosten[!] tarkastus
- materiaalin tarkastukset, huokoisuus, säröt, epäpuhtaudet, valssausvirheet ym.
- valuvirheiden havainnointi
- paksuuden mittaus
- soveltuu useimmille teräslaaduille ja jotkin laitteet soveltuvat myös muoville
- siipipyörien materiaalivirheet tai säröytymät
- pinnoitteiden paksuuden mittaus, esim. liukulaakerien metallipinnoitteen mittaus”

Kaasun tai nesteen purkautuminen pienestä aukosta aiheuttaa äänialuetta korkeammalla taajuudella olevan äänen. Kyseinen ääni voidaan vastaanottaa ultraäänianturilla ja muokata taajuusmuuntimen avulla ihmiskorvalla kuultavaksi ääneksi. (Järviö et al., 2007, s. 263) ”Vuotokohta haetaan ilmaisulaitteella joko suoraan koestamalla tai ilman kautta etsimällä. Ilman kautta etsintä on käytännöllistä ympäristössä, jossa perusmelu on korkea, kuten kattilalaitoksilla. Joissain tapauksessa voidaan etsiä vuotoja kuten lämmönvaihtimista, käyttämällä aktiivista ultraäänilähetintä sijoitettuna tarkastettavaan kojeeseen.” (Järviö et al., 2007, s. 263)

4.9 Akustinen emissio

Akustista emissiota käytetään komponenttien tai laitteiden kunnonvalvontaan. Menetelmässä käytetään hyväksi materiaaleille ominaisten ainevikojen ultraäänitaajuuksilla havaittavia signaaleja, mitkä viat aktivoituvat esimerkiksi koeponnistusten aikaisissa muodonmuutoksissa. (Järviö et al., 2007, s. 270) ”Muuttamalla kappaleen pintaan kiinnitettyjen pietsosähköisten antureiden avulla äänet sähköisiksi pulsseiksi, ja niitä sopivasti suodattamalla ja lähetyskohtia seismografisesti

paikantamalla, voidaan saada informaatiota mahdollisista kasvavista ainevioista. Menetelmää voidaan myös käyttää suoraan kuuntelemiseen kuten säiliöiden vuotojen hakuun ja on myös käytetty esim. ydinvoimaprosessissa liikkuvien ei-toivottujen esineiden havaitsemiseen.” (Järviö et al., 2007, s. 270)

Vibroakustisten mittauksien perusteella on mahdollista havaita tietyn kohteen eri mittausajanjaksojen välillä tapahtuvia muutoksia. Muutoksien analysoinnin avulla voidaan arvioida kohteen kuntoa. Useiden mittauksien ja siihen liittyvien signaalinkäsittelyjen jälkeen voidaan aloittaa vaurioiden etenemisen arviointi. Mittauksissa tapahtuneet muutokset eivät indikoi suoraan mahdollista vauriota ja näin ollen laitteen kunnonvalvonnassa pitkäaikainen analysointi on välttämätöntä. (Kolakowski et al., 2008, s. 37–39)

5 LAITEKANTA JA VALMIUDET KUNNONVALVONTAAN

Elintarviketeollisuuden tuotantolaitteet ja -prosessit asettavat huomattavia haasteita kunnonvalvontasovelluksien käytölle. Laitteet ovat usein kevytrakenteisia ja sisältävät runsaasti värähteleviä, sekä perinteiselle koneenrakennukselle epätyypillisiä rakenteita. Tyypillisesti pienet laitetoimittajat suunnittelevat tuotantolaitteet ja -linjat yhteistyössä tehtaan henkilöstön kanssa, jolloin erilaisia laitevariaatioita syntyy jokaisessa projektissa. Tuotantoprosessien monimutkaisuus ja suuri lopputuotevariaatioiden määrä aiheuttavat jatkuvia muutoksia linjojen säätö- ja ajoarvoihin. Lisäksi tuotantolaitteiden operaattorit säätävät parametreja jatkuvasti epähomogeenisten raaka-aineiden, lämpötilojen ja tuotantotarpeen aiheuttamien vaihtelujen kompensoimiseksi.

Tuoteturvallisuus-, tehokkuus- ja toimintavarmuusvaatimukset aiheuttavat tuotantolaitteiden kunnossapidolle merkittäviä erityisvaatimuksia. Määräaikaishuoltojen yhteydessä vaihdetaankin huomattavan suuri määrä ehjiä komponentteja erityisesti tuotekontaktin alaisiin laitteisiin. Vauriotilanteissa tehdään tavanomaista teollisuutta laaja-alaisempia komponenttien vaihtoja tuoteturvallisuuden varmistamiseksi. Kunnonvalvonnan lisäämisellä resursseja voitaisiin kohdentaa tarkoituksenmukaisempaan kunnossapitoon ja saavuttaa kustannussäästöjä.

5.1 Tehtaan laitekannan soveltuvuus kunnonvalvontaan

Tehtaan laitekantaa ja prosessia on modernisoitu voimakkaasti tutkimuksen tekoa edeltäneiden viiden vuoden aikana. Uusittujen tuotantolaitteiden osuus koko tehtaan laitekannasta on näin ollen huomattava. Uusittujen laitteiden tekninen laatu niin suunnittelun kuin valmistuksenkin osalta kestää hyvin vertailun muilla teollisuuden aloilla säännöllisen kunnonvalvonnan piirissä oleviin laitteisiin. Tuotannon, kiinteistön tai hyödykkeiden piirissä olevat koneet ja laitteet eivät aseta rajoitteita kunnonvalvonnan laajamittaiselle käyttöönotolle.

5.2 Tehtaan valmius kunnonvalvonnan käytön laajentamiseen

Nestlé:n kunnossapitostrategian mukaan ennakoiva kunnossapito on tärkein yksittäinen kunnossapidon toteuttamiskeino. Kunnonvalvonnalla tulisi olla merkittävä rooli ennakoivassa kunnossapidossa. Strategian mukaan tehtaan tuotanto- ja kunnossapitotietojen avulla tulisi selvittää mahdolliset käytettävät kunnonvalvonnan prosessit ja toimintamallit. Lisäksi kunnonvalvonnan toteuttamisesta tulisi tehdä toimintasuunnitelma – toteutunutta kunnonvalvontaa tulisi arvioida tämän jälkeen tuotanto- ja kunnossapitotietojen avulla. Jatkuvan parantamisen mallin mukaisesti kunnonvalvonnan käytön tulisi kehittyä yhdessä tehtaan muiden toimintojen mukana. (NEE, 2013, s. 37–39)

Tekniseltä osastolta puuttuu kokonaisvaltainen kunnonvalvonnan toteuttamissuunnitelma, näin ollen kunnonvalvontaa suoritetaan tyypillisesti toimihenkilöiden harkinnan ja viranomaismääräyksiin perustuvan ennakkohuoltosuunnitelman mukaan. Tehtaan kunnonvalvontalaitteiden määrä on vähäinen eikä kunnonvalvontaan ole määrätty erillisiä resursseja. Tutkimuksen teon aikaan lämpökameran käyttökoulutuksessa on käynyt yksi sähköasentaja ja endoskooppi on käytössä satunnaisesti kiinteistöön liittyvissä tutkimus- tai kunnossapitotehtävissä. Näin ollen käytännössä kaikki vaativat kunnonvalvontaan ja NDT-tarkastuksiin liittyvät työtehtävät ja mittaukset suoritetaan alihankkijoiden toimesta.

Tekniseltä osastolta löytyy runsaasti kompetenssia mittaavan kunnossapidon menetelmien käyttöönotolle laajemmassa mittakaavassa. Myös Nestlé:n tavoitteet kunnonvalvonnan käytölle antavat vahvan taloudellisen perustan ja tahtotilan kunnossapidon kehittämiselle ja ohjaamiselle kohti kunnonvalvonnan käytön lisäämistä. Laitteiden hankinnalla, koulutuksella ja ajankäytön muutoksilla kunnossapito-osasto pystyy vastaamaan kunnossapitostrategian vaatimuksiin. Mooren (2006, s. 254–256) mukaan kunnossapito-osaston työntekijöiden lisäksi myös koneiden operaattoreiden tulisi osallistua kunnonvalvonnan toteuttamiseen. Operaattorit toimivat koneiden kanssa huomattavan paljon, jolloin esimerkiksi aistinvaraisella kunnonvalvonnalla on saavutettavissa huomattavia tuloksia.

5.3 Tuotantolinjan rakenne ja laitteisto

Tutkimuksen kohteena olevalla tuotantolinjalla valmistetaan jäätelötuutteja irto- ja monipakkausmyyntiin. Ensimmäisenä varsinaisesti linjaan kuuluvana laitteistona voidaan pitää vispareita, joiden tarkoituksena on tehdä jäätelömassa ilman, kylmäntuonnin ja mekaanisen liikkeen avulla. Seuraavana laitteistona linjalla on täyttökone, joka yhdistää kaikki jäätelötuutin komponentit teoriassa valmiiksi tuotteeksi. Täyttökoneen osana on robottiyksikkö, joka siirtää tuotteet karkaisutunneliin. Karkaisutunnelissa tuutit karkaistaan hyvin kylmiksi, jolloin niiden pakkaaminen ja siirto lopputuotevarastoon on mahdollista. Karkaisutunnelin jälkeen tuotteet siirretään robotin avulla puskuriyksikköön, jolla voidaan kompensoida mahdollisia lyhyitä häiriöitä tuotantoketjun loppuosalla. Puskuriyksiköstä tuotteet liikkuvat syklisesti pakkausrobotille, joka pakkaa tuotteet erillisen laatikonmuodostajan muodostamiin laatikoihin. Laatikot suljetaan erillisellä laatikonsulkijalla, jolta laatikot siirtyvät pakkausmerkintöjen, metallinpaljastuksen ja läpivalaisun kautta kutistekalvokoneelle. Lopuksi tuote siirtyy lavauksen kautta lopputuotevarastoon. Täyttökone, karkaisutunneli, puskuriyksikkö ja pakkausrobotti ovat erillisiä laitteita, mutta toimivat tuotannon aikana synkronoidusti samalla nopeudella.

Halutusta lopputuotteesta riippuen linjaan liitetään tai sen osana käytetään huomattavaa määrää muita koneita ja laitteita. Kuvauksen osalta linja on automatisoitu ja normaalissa tuotantotilanteessa operaattorin ei tarvitse olla fyysisesti yhteydessä prosessiin, raaka-aineisiin tai lopputuotteisiin. Prosessin hallinta tapahtuu kuitenkin paikallisesti laitteiden omien HMI:n (Human-Machine Interface) kautta. Tällöin operaattori pystyy valvomaan prosessia ja puuttumaan mahdollisiin ongelmatilanteisiin nopeasti. Prosessin luonteesta ja elintarvikkeiden hygieniavaatimuksista johtuen mahdolliset häiriöt aiheuttavat usein koko linjan pysäyttämisen ja tästä johtuvan suuren hävikin. Linjan tuotantokapasiteetti on kansainvälisessä mittakaavassa suuri.

Tutkimuksessa tuotantolinja on määritelty vain linjan päälaitteiden mukaan. Päälaitteina voidaan pitää täyttökonetta, karkaisutunnelia, puskuriyksikköä ja pakkausrobottia. Kyseiset laitteet toimivat synkronoidusti yhtenä laitekokonaisuutena tuotannon aikana.

5.3.1 Täyttökone

Täyttökoneen runko on ruostumattomasta teräksestä (EN 1.4307) valmistettu modulaarinen särmäyspuristettu levyrakenne. Moduuleja ja siten myös koneen pituutta voidaan lisätä tai vähentää käyttötarkoituksen mukaan. Koneen pituuden muuttaminen vaatii kuitenkin massiivisen muutostyön ja tyypillisesti tällöin myös layout-muutokset ovat välttämättömiä. Koneen toiminnallisen perustan luovat servokäyttöinen lineaarinen tuoteketju ja servokäyttöiset vertikaaliset asemat. Koneen automaatioon on rakennettu virtuaalinen pääkäyttö, johon kaikki täyttökoneen toiminnot on sidottu. Tämä mahdollistaa käytännössä rajattomat säätömahdollisuudet fysikaalisten raja-arvojen sisällä. Esimerkiksi raaka-aineiden annostelussa voidaan säätää annostelupään nopeutta, kiihtyvyyttä, liikerataa ja ajoitusta. Lisäksi ajoituksia voidaan tehdä myös automaation ohjaamassa pneumaattisessa järjestelmässä, jolloin esimerkiksi venttiilien auki- ja kiinnioloa, annostelutilavuutta ja tilavuusvirtaa voidaan säätää jopa yksittäisen rivin mukaan. Konenäköön ja anturointiin yhdistettynä tuotteiden laatu voidaan varmistaa ja vialliset tuotteet poistaa prosessista mahdollisimman aikaisessa vaiheessa.

Erittäin laajalla ja käytännössä kaiken mahdollistavalla säädettävyydellä on myös haasteensa; tehtaan työntekijöistä ani harvalla on riittävä osaaminen koneen kokonaisvaltaiseen säätämiseen ja hallinnointiin. Esimerkiksi järjestelmäkäyttäjä-tasolla HMI:lla voidaan muuttaa koneen synkronointiin määritettyjä raja-arvoja, tällöin koneen käyttäminen saattaa pahimmillaan aiheuttaa massiivisia vaurioita koneen komponenteille. Näin ollen operaattoreiden ja teknisen henkilöstön tulee olla hyvin koulutettuja.

5.3.2 Karkaisutunneli

Jäätelötuuttien karkaisuun käytetään hyvin eristettyä rakennusta, jonka sisä- ja ulko-osissa on huomioitu kunnossapidettävyys ja pudistettavuus. Sisäpuoliset rakenteet ja komponentit ovat ruostumatonta terästä. Kylmäntuonti tapahtuu kahden ammoniakki-jäähdytteisen lämmönvaihtimen avulla. Lämmönvaihtimet sijaitsevat tunnelin keskellä, jolloin niiden taajuusmuuttajakäyttöiset puhaltimet saavat aikaan ilmanohjaimien avulla pyörivän ilmankierron tuotteiden ja lämmönvaihtimien läpi. Ammoniakki-järjestelmän kylmäntuotanto tapahtuu erillisellä kylmälaitoksella, josta ammoniakkilinjat tulevat

tunnelille ulkokautta. Tuotteiden kulku tunnelissa tapahtuu ketjuun liitettyjen reiällisten levyjen päällä pystyasennossa. Ketju ja levyt kulkevat kahden monikerroksisen kaksiakselisen tornin läpi, jolloin karkaisun aikana tuotteet kulkevat kovassa pakkasessa useiden satojen metrien matkan. Ketju ja tuotelevyt käyvät ulkona tunnelista työpöydällä vain lyhyen matkan, jolloin karkaistut tuotteet otetaan robotin avulla pois levyiltä ja tämän jälkeen karkaisemattomat tuotteet lisätään samoille levyille.

Tunnelissa on useita taajuusmuuttajaohjattuja käyttömoottoreita, jotka kuorman ja asetetun nopeustavoitteen puitteissa pitävät ketjun kireyden mahdollisimman tasaisena. Työpöydän taittopään pyörimisnopeus määrittää koko linja kulloisenkin ajonopeuden.

5.3.3 Puskuriyksikkö ja pakkausrobotti

Lineaarirobotti nostaa jäätelötuutit siirtopään avulla kaksiosaiselle lineaariselle lamellikuljettimelle. Kuljettimella on kaksi päätehtävää: toimia tarvittaessa puskurina mahdollisissa häiriötilanteissa ja kuljettaa tuotteet servo-ohjatuille siirtovarsille. Siirtovarret laskevat tuotteet taskukuljettimelle, joka siirtää tuotteet syklisesti pakkausrobotille. Taskukuljettimella suoritetaan laadunvalvontaa operaattorien toimesta. Pakkausrobotti toimii lineaariperiaatteella ja sen tarttumaelin toimii alipaineen avulla. Tuotteet pakataan laatikoihin joko yhteen tai kahteen kerrokseen. Esiohjelmoituja laatikkokokoja ja pakkaustapoja on useita.

6 KUNNONVALVONTAMENETELMIEN KARTOITUS

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää tuotantolinjan kunnonvalvonnan vaihtoehtoja. Toiminnanohjausjärjestelmän ja linjan käyttöönottotietoa käytettiin kunnonvalvonnan mahdollisten kohteiden määrittämiseen ja analysointiin. Tavoitteena oli löytää ensisijaisesti sekä linjan tuoteturvallisuuteen, käyttövarmuuteen että hävikkiin vaikuttavia kunnonvalvonnan kohteita. Toissijaisesti etsittiin kohteita, jotka ovat korjauskustannuksiltaan suuria tai vaikeita korjata kunnossapitoseisokkien aikataulujen puitteissa.

Löydettyjen kunnonvalvontakohteiden osalta suoritettiin komponenttikohtainen analyysi, jossa arvioitiin tutkittujen kunnonvalvontamenetelmien soveltuvuutta kyseiseen kohteeseen. Lisäksi pohdittiin kunnonvalvontaa kokonaisuutena, jolloin kunkin yksittäisen kunnonvalvontakohteen menetelmiä verrattiin keskenään. Tavoitteena oli löytää taloudellisesti ja organisaation kannalta järkevä kunnonvalvontakokonaisuus, jossa on huomioitu mahdollisuudet ja tosielämän rajoitteet.

6.1 Toiminnanohjausjärjestelmän tiedot

Tehtaan toiminnanohjausjärjestelmänä on SAP AG:n Nestlé:lle räätälöimä Globe. Globe:a käytetään tehtaan kunnossapidossa laajasti ja sen käyttöä on tarkoitus lisätä kunnossapidon kehittämisen myötä. Järjestelmässä on tutkimuksen kohteena olevalle linjalle ennakkohuoltosuunnitelma, jossa määritellään linjalla tarkastettavat kohteet ja tarkastuksien intervallit. Ennakkohuoltosuunnitelma muodostettiin laitevalmistajan ja linjan asennusaikaisen projektijohdon yhteistyönä. Toiminnanohjausjärjestelmään kirjataan kaikki linjalla tapahtuneet teknisistä syistä johtuvat tuotantohäiriöt, lukuun ottamatta lyhyitä mikropysähdyksiä. Järjestelmästä löytyy luonnollisesti myös suunnitellut vauriokorjaukset ja havaitut poikkeamat laitteiden toiminnassa.

Tutkimuksessa toiminnanohjausjärjestelmän kunnossapito-osiota käytettiin hyväksi tuotantolinjan kunnonvalvontakohteiden määrittämisessä. Kaikki vuoden mittaisella

tarkastelujaksolla tapahtuneet tekniset pysähdykset analysoitiin, jotta kunnonvalvonnan kehittäminen suuntautuu toimintavarmuuden kannalta oleellisiin kohteisiin. Lisäksi linjalle käyttöönoton jälkeen tehdyt parannukset ja muutokset huomioitiin tutkimuksessa.

6.2 Linjan käyttöönottotiedot

Tutkimuksen kohteena olevan linja käyttöönotto tapahtui kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa talvella 2011–2012 asennettiin uusi täyttökone oheislaitteineen vanhan linjan osaksi vanhoihin tiloihin. Toisessa vaiheessa tehtaan tuotantotilaa laajennettiin siten, että uusi tuotantotila voitiin rakentaa valmiiksi vaikuttamatta oleellisesti vuoden 2012 sesongin aikaiseen tuotantoon. Toisen vaiheen laiteasennukset ajoittuivat talvelle 2012–2013, jolloin myös täyttökone ja oheistaitteet liitettiin osaksi uutta tuotantolinjaa. Lopputuotteisiin tulleiden muutosten johdosta toimitusketju jouduttiin täyttämään kokonaisuudessaan alkuvuonna 2013, jolloin linja käyttöönotto tapahtui nopealla aikataululla. Käyttöönottotiedon keruu tapahtui pääosin projektijohdon ja laitetoimittajien tekemien muistiinpanojen avulla. Kunnonvalvonnan käyttöönotto ja kehittäminen siirtyivät tuotannon ylösajon jälkeiseen aikaan.

Laitteiden suunnittelussa huomioitiin kunnossapidon suorittamiseen liittyviä erityistarpeita, esimerkiksi komponenttien luoksepääsevyyteen panostettiin ja rakenteista tehtiin teknisesti mahdollisimman yksinkertaisia. Lisäksi valittujen osien sopivuutta kunnonvalvonnan osaksi tarkasteltiin projektinjohdon toimesta laaja-alaisesti. Linjan päälaitteet erotettiin mekaanisesti toisistaan värähtelyjen pienentämiseksi sekä kunnonvalvontamittausten luotettavuuden parantamiseksi. Laitteiden suunnittelu-, valmistus-, asennus- ja käyttöönottovaiheista kerättiin mahdollisimman paljon tietoa valokuvien, teknisten dokumenttien ja ohjeiden muodossa. Suunnitteluvaiheessa linjalle luotiin käyttövarmuustavoitteet tekniselle toimivuudelle. Yksittäisten komponenttien kriittisyysluokittelu tehtiin käyttöönoton jälkeen kunnonvalvonnan kehittämistutkimuksen yhteydessä.

Linjalle toimitettujen laitteiden valmistajilla ei ollut lainkaan kunnonvalvontasuunnitelmia omiin laitteisiinsa tai komponentteihinsa. Ilmeisesti syynä

tähän oli asiakkaiden vaatimuksien ja kiinnostuksen puute. Lisäksi laitetoimittajat huoltavat mielellään laitteitaan itse, jolloin asiakkaan laitteille voidaan suorittaa laajoja ja kustannuksiltaan suuria huoltoja. Tällöin asiakkaan on vaikeaa tai mahdotonta varmistua huoltojen tarpeenmukaisuudesta. Huomattavia puutteita löytyi myös ennakkohuoltosuunnitelmista ja varaosasuosituksista. Tutkimuksen tekemisen aikana linjalle muodostettiin toimiva ennakkohuoltosuunnitelma sekä määriteltiin tehtaalla säilytettävien varaosien tarve.

6.3 Komponentti- ja menetelmäkohtainen analyysi

Kunnonvalvontamenetelmiä ja linjalla olevia yksittäisiä komponentteja tutkittiin teoreettisesti, jotta niiden keskinäinen soveltuvuus saatiin selville. Toimintamallina oli ennakkoluuloton lähestyminen erilaisiin komponenttikohtaisiin kunnonvalvontahypoteeseihin tutkimuksessa kertyneen tiedon pohjalta. Tavoitteena oli saada mahdollisimman laaja ja monipuolinen näkemys erilaisista kunnonvalvonnan toteuttamistavoista ja mahdollisuuksista. Löydettyjen kunnonvalvontamallien soveltuvuutta tehtaan resursseihin, strategioihin ja tavoitteisiin ei arvioitu vielä tässä vaiheessa.

Komponentti- ja menetelmäkohtaisessa analyysissä sovellettiin myös epätavanomaisia kunnonvalvontametodeja, joita tutkimuksen edetessä selvitettiin. Esimerkkinä tutkittavan pneumaattisen koneenelimen paineilman tulo- tai poistopuolelle kunnonvalvonnan ajaksi liitettävä tiedonkeruujärjestelmällä varustettu siirrettävä paineen ja virtauksen mittauslaitteisto. Valmiina kokoonpanona toimivaa paineilmalaitteiston kunnonvalvontamenetelmää tutkimuksessa läpikäydystä kirjallisuudesta ei löytynyt. Nohynekin ja Lumpeen (2004, s. 23) mukaan kunnonvalvonnan osana kuitenkin käytetään hyötysuhdemittauksia, joissa voidaan mitata esimerkiksi virtausmääriä, lämpötiloja, painetta tai sähkönkulutusta. Mittausparametrien avulla voidaan päätellä turbiinien ja pumppujen kulumista, välystä, mekaanisia vaurioita, asennusvikoja tai pinnan karhentumista. Teollisuudessa kyseisten mittauksien hyötyjä ei tunneta riittävän hyvin, joten niiden käyttöönoton kasvupotentiaali on huomattava.

Epätavanomaisena kunnonvalvontamenetelmänä voidaan myös pitää myös RFID-tunnisteiden käyttöä kulumisen ja mahdollisten alkavien vaurioiden selvittämisessä. Lempinen et al. (2012, s. 12–13) mukaan RFID-tunnisteita voidaan käyttää pinnan sisään laminoituna, jolloin vaurio laminoidussa pinnassa aiheuttaa myös tunnisteen vaurioitumisen. Tällöin lukulaitteella voidaan havaita mahdollinen alkanut vaurio, jolloin vaurion ajallinen havaitseminen riippuu tunnisteen lukutiheydestä. Kuitenkaan tekniikkaa ei käytetä kunnonvalvonnassa, joten kokemusperäistä tietoa ei ole saatavilla.

Komponentit komponenttikohtaiseen analyysiin valittiin laitteiston toiminta-analyysin periaatteiden mukaisesti. Laineen (2010, s. 127) mukaan vika-vaikutusanalyysin avulla pyritään tunnistamaan laitteiston mahdolliset vikaantumiseen vaikuttavat osat ja osakokonaisuudet. Komponentit, jotka käydään läpi komponenttikohtaisessa analyysissä aiheuttavat vikaantuessaan koko tuotantolinjan välittömän pysähtymisen joko hallitusti tai pahimmassa tapauksessa hallitsemattomasti.

6.3.1 Servo- ja sähkömoottorikäytöt

Servo- ja sähkömoottorikäytöt on ryhmitelty niihin soveltuvien kunnonvalvontamenetelmien mukaan. Käyttö muodostaa uuden ryhmän, mikäli yksikin kunnonvalvontamenetelmä tai kunnonvalvonnan soveltuvuus eroaa oleellisesti olemassa olevista ryhmistä.

Servomoottoreiden rakenne ja käyttötapa ovat linjalla olevien kohteiden osalta yhtenevät, ainoastaan käyttökohteissa ja suuruusluokassa on eroja. Kaikki servot ovat käytössä kohteissa, joissa toiminta on syklistä taajuusalueella ~0,13 – 1,1 Hz. Lisäksi lineaarisen liikkeen osuus on vähäistä ja joidenkin käyttökohteiden osalta sitä ei ole lainkaan. Mittaavaa kunnonvalvontaa käytettäessä linja ajonopeuden tulee olla vakio kaikilla mittauskerroilla. Lisäksi asemat ja rasituksiin vaikuttavat lisäkomponentit tulee olla käytössä mahdollisimman samanlaisella kokoonpanolla. Kunnonvalvontaa servomoottoreille voidaan suorittaa servo-ohjaimien avulla, jolloin ohjaimien tarjoamaa reaaliaikaista momenttia, virrankulutusta tai vika-analyysiä käytetään kuntoarvion tekemiseen. Myös värähtelymittaus soveltuu servon laakereiden ja muiden pyörivien komponenttien kunnonvalvontaan. Värähtelymittausta suoritettaessa pyörimisnopeuden

jatkuvan muutoksen aiheuttama sykli tulee kuitenkin huomioida loppupäätelmissä. Pyörimisvaihtelut saattavat rajata joitakin värähtelyanalyysejä pois soveltuvien menetelmien listalta. Lämpötilan mittauksen käyttäminen servojen kunnonvalvonnassa vaikuttaa hyvin toimivalta ja soveltuvalta menetelmältä. Servomoottorien ollessa joko suojien sisällä tai liikkuvissa yksiköissä mittaukset vaativat erityisjärjestelyjä. Lämpökamerat ja koskettamattomat menetelmät eivät sovellu kyseisten kohteiden mittaukseen, sen sijaan koskettavilla menetelmillä saavutetaan todennäköisesti luotettavia tuloksia. Lämpötila-anturin kiinnitykseen ja johdotuksien suunnitteluun tulee kiinnittää erityistä huomiota. Lisäksi mittauksen aikaisen työturvallisuuden varmistaminen vaatii huolellisen mittaussuunnitelman. Edellä käsiteltyjä kunnonvalvontamenetelmiä voidaan soveltaa seuraaviin kohteisiin: vertikaaliasemien servot, horisontaalilamelliketjun pääservo, vertikaalirobotin servot, poistorobotin servot, puskuriyksikön horisontaalilamelliketjun servot, siirtovarsien servot, taskukuljettimen servomoottori, laatikonsyötön servomoottori ja laatikkoon pakkaajan servot.

Normaalien sähkömoottorien kunnonvalvontaan voidaan soveltaa pitkälti samoja periaatteita kuin servomoottorien kunnonvalvonnassa on käsitelty. Linjalle asennettujen sähkömoottorien kierrosnopeus pysyy normaalisti vakiona tuotantoprosessin aikana, tällöin värähtelymittausta voidaan käyttää hyväksi ilman rajoituksia. Esimerkiksi massaruuvien moottorit, pintakoristelun sähkömoottorit, tunnelin käyttömoottorit, tunnelin puhallinmoottorit, tuutinpoistohihnan sähkömoottori, tyhjälaatikkoradan kuljettimien moottorit, laatikonpoistokuljettimen sähkömoottori ja poistohihnan sähkömoottori ovat taajuusmuuttajakäyttöisiä, jolloin niiden kuntoa voidaan arvioida myös taajuusmuuttajien parametrien avulla. Tällöin tulee kuitenkin varmistua mittaustapahtuman vakioinnista siten, että tulokset kerätään vasta tietyn testisyklin jälkeen. Edellä mainittujen sähkömoottoreiden kuntoa voidaan arvioida helposti ja turvallisesti myös koskettavalla lämpötilan mittauksella tai lämpökameralla. Karkaisutunnelissa sijaitsevien tunnelin käyttömoottorien ja tunnelin puhallinmoottorien osalta tulee varmistua tunnelin vakiolämpötilasta mittauksen aikana. Luotettavimman tuloksen saamiseksi kannattanee tunnelissa sijaitsevien käyttöjen kaikki mittaukset suorittaa sekä huoneenlämmössä että karkaisulämpötilassa.

Kääreenpoistokuljettimen sähkömoottorin ja tuutinpoistokuljettimen sähkömoottorin kunnonvalvontaan soveltuvia menetelmiä ovat värähtelymittaus ja lämpötilan mittaus. Kyseiset kohteet ovat hyvin yksinkertaisia ja sijaitsevat luoksepäästävyydeltään helpoissa paikoissa.

Servo-ohjaimien ja taajuusmuuttajien sijainti keskitetysti sähkökaapeissa mahdollistaa lämpökameran tehokkaan käyttämisen kyseisten komponenttien kunnonvalvontaan. Myös servo-ohjaimien ja taajuusmuuttajien itsediagnostiikka mahdollistaa tehokkaan kunnonvalvonnan jopa reaaliaikaisesti.

6.3.2 Vaihteistot

Vaihteistot on ryhmitelty niihin soveltuvien kunnonvalvontamenetelmien mukaan. Vaihteisto muodostaa uuden ryhmän, mikäli yksikin kunnonvalvontamenetelmä tai kunnonvalvonnan soveltuvuus eroaa oleellisesti olemassa olevista ryhmistä.

Suurin osa linjan vaihteistoista on servokäyttöjen kulmavaihteita, joiden toiminta on syklistä taajuusalueella ~0,13 – 1,1 Hz. Vakiokierrosnopeutta kyseisillä vaihteilla voidaan käyttää vain lyhyitä ajanjaksoja testiajossa. Värähtelymittauksessa pyörimisnopeuden jatkuvan muutoksen aiheuttama sykli tulee huomioida loppupäätelmissä, jolloin joitakin värähtelyanalyysejä rajautuu pois soveltuvien menetelmien listalta. Lämpötilan mittaus servokäyttöjen kulmavaihteiden kunnonvalvonnassa vaikuttaa toimivalta ja soveltuvalta menetelmältä. Kulmavaihteiden ollessa joko suojien sisällä tai liikkuvissa yksiköissä mittaukset vaativat erityisjärjestelyjä. Lämpökameroiden ja koskettamattomien menetelmien soveltuvuutta tulee arvioida tarkkaan kulmavaihteiden pinnoituksesta ja koteloinnista johtuen, sen sijaan koskettavilla menetelmillä saavutetaan hyvin todennäköisesti luotettavia tuloksia. Voiteluaineanalyysiä voidaan käyttää kulmavaihteiden kunnonvalvontaan, tällöin tulee kuitenkin huomioida harva näytteenottotaajuus. Näytteidenotto sijoittuu käytännössä harvoin tapahtuvaan voiteluaineen vaihtoihin, jolloin voidaan saada tietoa vaihteen mekaanisesta kunnosta ja tiivisteiden toimivuudesta. Kohteita, joihin edellä kuvattua kunnonvalvontaa voidaan kohdistaa: vertikaaliasemien kulmavaihteet, horisontaalilamelliketjun pääservon kulmavaihde, vertikaalirobotin servojen

kulmavaihteet, poistorobotin servojen kulmavaihteet, puskuriyksikön horisontaalilamelliketjun servojen kulmavaihteet, siirtovarsien servojen kulmavaihteet, taskukuljettimen servomoottorin kulmavaihde, laatikonsisäänsyötön servomoottorin kulmavaihde ja laatikkoonpakkaajan servojen kulmavaihteet.

Vakionopeudella käytettävissä vaihdelaatikoissa voidaan käyttää laajaa kunnonvalvontamenetelmien kirjoa. Kyseisen kaltaisia vaihteita linjalla ovat: massaruuvien kulmavaihteet, tuutinpoistokuljettimen sähkömoottorin kulmavaihde, tunnelin käyttömoottorien alennusvaihteet, tuutinpoistohihnan sähkömoottorin kulmavaihde, tyhjälaatikkoradan kuljettimien moottoreiden kulmavaihde, laatikonpoistokuljettimen sähkömoottorin kulmavaihde ja poistohihnan sähkömoottorin kulmavaihde. Värähtelymittaus soveltuu edellä mainituille vaihteistoille hyvin. Mittaustapahtuman ajaksi vaihteistoissa voidaan helposti vakioida seuraavat suureet: pyörimisnopeus, kuorma, ympäristön lämpötila ja mittapisteet. Testiajossa myös luoksepäästävyys on hyvä sillä kyseiset vaihteet pysyvät käytön aikana paikallaan. Lämpötilan mittauksella saadaan myös luotettava arvio vaihteiden kunnosta. Käytettäväksi menetelmäksi soveltuu myös lämpökamerakuvaus koskettamattomien ja koskettavien menetelmien lisäksi. Öljynvaihtojen ja muiden mahdollisten öljynäytteiden avulla voiteluaineanalyysistä saadaan tietoa vaihteiden kunnosta. Lisäksi endoskopiaa voidaan käyttää karkaisutunnelin käyttömoottoreiden alennusvaihteiden kunnonvalvontaan.

6.3.3 Laakeroinnit

Laakeroinnit on ryhmitelty niihin soveltuvien kunnonvalvontamenetelmien mukaan. Laakerointi muodostaa uuden ryhmän, mikäli yksikin kunnonvalvontamenetelmä tai kunnonvalvonnan soveltuvuus eroaa oleellisesti olemassa olevista ryhmistä.

Täyttökoneen ja puskuriyksikön servokäyttöisten komponenttien laakerien kunnonvalvonta värähtelymittauksella on erityisen haastavaa syklisen liikkeen ja alhaisen pyörimisnopeuden johdosta. Värähtelymittauksesta kyseisissä kohteissa voidaan mahdollisesti käyttää hyväksi siirtymän arvoja ja soveltuvilta osin myös nopeuden arvoja. Lämpötilan mittauksella havaittu mahdollinen vaurio on suurella

todennäköisyydellä edennyt jo hyvin pitkälle alhaisen pyörimisnopeuden johdosta. Todennäköisesti akselien koneistetulta pinnalta heittokellolla mitattu siirtymä antaa jopa paremman arvion laakerin kunnosta kuin lämpötilan mittaus. Siirtymän mittaus soveltuu erityisesti kohteisiin, joissa laakeriin kohdistuvan kuorman suunta vaihtelee 180 astetta. Kyseisissä kohteissa laakerin sisä- ja ulkokehä tekevät toisiinsa nähden noin 40 asteen edestakaista liikettä. Edellä kuvattua kunnonvalvontaa voidaan soveltaa seuraaviin laakerointeihin: vertikaaliasemien käyttöakseli- ja varsistolaakerit, horinsontaalilamelliketjun veto- ja taittopään laakerointi, vertikaalirobotin akseleiden laakerointi, poistorobotin akseleiden laakerointi, puskuriyksikön horinsontaalilamelliketjun veto- ja taittopään laakerointi, siirtovarsien laakerointi, taskukuljettimen veto- ja taittopään laakerointi, laatikonsisäänsyötön veto- ja taittopään laakerointi, laatikkoonpakkaajan akseleiden laakerointi, laatikonpoistokuljettimen veto- ja taittopään laakerointi.

Vakionopeudella kunnonvalvonnan suoritushetkellä pyöriviä laakereita ovat: kääreenpoistokuljettimen laakerointi, tuutinpoistokuljettimen veto- ja taittopään laakerointi, tunnelin tuoteketjun taittopäiden laakerointi, tuutinpoistohihnan veto- ja taittopään laakerointi, tyhjälaatikkoradan kuljettimen veto- ja taittopään laakerointi, laatikonsisäänsyötön veto- ja taittopään laakerointi, laatikonpoistokuljettimen veto- ja taittopään laakerointi, poistohihnan veto- ja taittopään laakerointi. Värähtelymittaus soveltuu edellä mainituille laakereille hyvin. Mittaustapahtuman ajaksi laakereissa voidaan helposti vakioida seuraavat suureet: pyörimisnopeus, kuorma, ympäristön lämpötila ja mittapisteet. Testiajossa myös luoksepäästävyys on hyvä sillä kyseiset kohteet eivät liiku käytön aikana. Lämpötilan mittauksella saadaan myös luotettava arvio laakereiden kunnosta. Käytettäväksi menetelmäksi soveltuu myös lämpökamerakuvaus koskettamattomien ja koskettavien menetelmien lisäksi. Endoskopiaa voidaan hyödyntää laakereiden visuaaliseen kunnonvalvontaan. Esimerkiksi tuutinpoistokuljettimen veto- ja taittopään laakerointi sekä laatikonpoistokuljettimen veto- ja taittopään laakerointi ovat kohteita, joiden laakerit sijaitsevat rakenteen sisällä. Voiteluaineanalyysi soveltuu karkaisutunnelin tuoteketjun taittopäiden laakeroinnin kunnonvalvontaan. Kyseisten laakereiden vaihtoväli on kymmenen tuhatta tuntia, jolloin on syytä tarkkailla myös niiden voiteluaineen kuntoa.

Laakerit joutuvat kestämään yli seitsemänkymmenen asteen lämpötilaeroja, erilaisia kemikaaleja sekä kosteutta kaikissa muodoissa.

Vertikaaliasemien lineaarilaakerien kunnonvalvonta on pääosin visuaalista tarkastelua. Endoskooppia voidaan käyttää hyväksi osittain tai kokonaan koneen sisäpuolella olevien laakerien tarkasteluun. Tällöin kunnonvalvonta voidaan suorittaa turvallisesti ja purkamatta koneen rakenteita ja kiinteitä suojia. Visuaalisessa tarkastelussa voidaan käyttää myös stroboskooppia, jolla nähdään lineaariakselin kunto ja voitelun riittävyys koneen käydessä niin testiajossa kuin tuotannossakin. Lämpötilan mittaus soveltuu lineaarilaakeroinnin kunnonvalvonnassa lähinnä voitelun riittävyyden ja tiivisteiden kunnon arviointiin. Vaillinaisen voitelun tai vaurioituneiden tiivisteiden tapauksessa laakerointielementin pintalämpötila nousee voimakkaasti, jolloin kunnossapitotoimintojen tarve on helppo havaita koskettavilla mittausmenetelmillä.

6.3.4 Paineilmajärjestelmä

Paineilmajärjestelmät on ryhmitelty niihin soveltuvien kunnonvalvontamenetelmien mukaan. Järjestelmä muodostaa uuden ryhmän, mikäli yksikin kunnonvalvontamenetelmä tai kunnonvalvonnan soveltuvuus eroaa oleellisesti olemassa olevista ryhmistä.

Paineilmajärjestelmän kokonaiskuntoa voidaan valvoa erään komponenttivalmistajan valmistamalla laitteistolla. Laitteisto on kehitetty Turengin tehtaalle tutkimuksen tekijän ja komponenttivalmistajan yhteistyöllä. Tutkimuksen teon yhteydessä havaittiin tarve tutkia paineilmajärjestelmien osakokonaisuuksien kulumista ja suorituskykyä, jolloin käytiin läpi markkinoilla olevat kunnonvalvontajärjestelmät. Havaittiin, ettei kyseiseen käyttötarkoitukseen soveltuvia laitteistoja ollut saatavilla. Kehitetyn laitteiston toimintaperiaatteena on mitata paineen, virtauksen ja lämpötilan muutosta ajan funktiona. Laitteisto kerää tietoa ennalta valituista muuttujista mittaukseen valitun syklin aikana. Saatua tietoa verrataan mitattavan paineilmaosakokonaisuuden perustilassa mitattuun vastaavaan sykliin. Mittausten luotettavuuden kannalta on ensiarvoisen tärkeää, että ulkoiset muuttujat sekä laitteiston asetukset ovat mahdollisimman samankaltaiset jokaisessa mittaustapahtumassa. Jos mittausten välillä

on kulumiseen viittaava ero, mittalaitteisto siirretään analysoimaan suppeampaa osakokonaisuutta. Kunnonvalvonnan suorittamisen jälkeen kunnossapito kohdennetaan yksittäisiin komponentteihin tai komponenttiryhmiin. Edellä kuvattua kunnonvalvontamenetelmää voidaan käyttää käytännössä koko linjan kaikkiin pneumaattisiin osakokonaisuuksiin ja jopa yksittäisiin komponentteihin, joista parhaiten soveltuvia kohteita ovat: venttiililohkot, täyttöventtiilien paineilmasylinterit, annosteluasemien paineilmasylinterit, robottien tarttujien paineilmaelimet, tunnelin ejektoreiden paineilmasylinterit, kansittajan imulaitteisto ja laatikkoonpakkaajan tarttuja.

Yksittäisten paineilmakomponenttien kunnonvalvontaan soveltuvana menetelmänä voidaan pitää lämpötilan mittausta. Lämpötilan mittauksella saadaan tietoa komponenttien sisäisestä kitkasta, joko kasvaessaan korreloi lämpötilan nousun kanssa. Menetelmä sopii erityisesti tiheän liiketaajuuden komponentteihin, näitä tutkitulla tuotantolinjalla ovat venttiililohkot, täyttöventtiilien paineilmasylinterit, annosteluasemien paineilmasylinterit, kansittajan imulaitteisto, ejektoreiden paineilmasylinterit ja robottien tarttujien paineilmakomponentit.

Paineilmasylinterien kunnonvalvontaan soveltuvana menetelmänä voidaan pitää stroboskopiaa. Esimerkiksi täyttökoneella olevien asemien paineilmasylinterien liike voidaan säätää automaation avulla toimimaan synkronoidusti. Tällöin myös stroboskoopin taajuus voidaan määrittää koneen ajonopeuden kanssa yhteneväksi. Sylinterien ja venttiilien toimiessa normaalisti sylinterien avautumisaste on yhtenevä koko liikkeen ajan. Visuaalisessa tarkastelussa kaikki sylinterit vaikuttavat pysähtyneen samaan kohtaan kesken liikkeen, erot sijainneissa indikoivat mahdollisia vaurioita. Vaurioiden kehittymistä voidaan arvioida säätämällä vaurioituneen kohteen ajoitusta, jolloin sylinteririvistö toimii jälleen synkronoidusti. Tällöin muutokset ajoituksessa voidaan yhdistää vaurion etenemiseen. Edellä mainittua kunnonvalvontasovellusta voidaan käyttää seuraavissa osakokonaisuuksissa: täyttöventtiilien ja annosteluasemien paineilmasylinterit, annosteluasemien venttiilien paineilmasylinterit, ejektoreiden paineilmasylinterit, robottien tarttujat sekä tunnelin ejektoreiden paineilmasylinterit.

Ultraäänimittausta voidaan käyttää hyväksi paineilmalaitteistoissa ja järjestelmissä olevien vuotojen havainnointiin. Mitattavia kohteita ovat käytännössä kaikki linjalla sijaitsevat paineilmakomponentit, putkistot ja letkut liittimineen.

Paineilmakomponenttien kunnonvalvontaa voidaan suorittaa myös järjestelmän sisäisesti. Feston (2013, s. 7–27) mukaan tällöin kunnonvalvonta tapahtuu venttiililohkoon kiinnitettävien lisäosien avulla. Automaatiojärjestelmään liitettynä muodostuu kokonaisuus, jonka avulla jopa yksittäisten komponenttien kuntoa voidaan valvoa reaaliaikaisesti. Edellä mainittuja lisäosia voidaan liittää täyttökoneen, puskurointiyksikön ja laatikkoonpakkaajan venttiililohkojen yhteyteen. O'Connorsin (2006, s. 409) mukaan järjestelmän sisäänrakennettu kunnonvalvontajärjestelmä aiheuttaa kuitenkin lisääntyneen vikaantumisriskin koko järjestelmälle. Lisäksi kunnonvalvontajärjestelmän vikaantuminen aiheuttaa tarpeettomia hälytyksiä, vaikka itse valvottava laitteisto toimisikin moitteettomasti. Sisäänrakennettu kunnonvalvontajärjestelmä tulisikin toteuttaa mahdollisimman yksinkertaisesti ja sen tulisi valvoa ainoastaan kriittisten komponenttien kuntoa.

6.3.5 Ketjukäytöt ja hammashihnat

Ketjukäytöt ja hammashihnat on ryhmitelty niihin soveltuvien kunnonvalvontamenetelmien mukaan. Ketjukäytöt ja hammashihnat muodostavat uuden ryhmän, mikäli yksikin kunnonvalvontamenetelmä tai kunnonvalvonnan soveltuvuus eroaa oleellisesti olemassa olevista ryhmistä.

Karkaisutunnelin ja tuotantolinjan rakenteesta johtuen tuoteketjun virheetön toiminta on välttämätöntä tehokkaan tuotannon varmistamiseksi. Tuoteketjun tasainen liike ja rauhallinen nopeuden muutos ovat ensiarvoisen tärkeitä. Muuttujien, kuten tuotteiden määrän, lämpötilan, ajonopeuden ja tuotannonvaiheen johdosta tavanomaisilla kunnonvalvonnan mittauksilla ei saada varmuutta pääkäyttöjen virheettömästä toiminnasta. Tunnelin ollessa tuotantokäytössä, suojakuoren sisällä liikkuvat levyt ja erittäin alhainen lämpötila estävät myös kohteen silmämääräisen kunnonvannan. Ratkaisuehdotukseksi tutkimuksessa esitetään RFID-tunnisteiden hyödyntämistä pääkäyttöjen hammaspyörien ja tuoteketjun synkronoinnin valvonnassa. Ongelmat

synkronoinnissa indikoivat jonkin tunnelin komponentin virheellisestä toiminnasta. Tunnisteita kiinnitetään 120 asteen välein hammaspyöriin, jolloin tuoteketjun 180 asteen käännöksessä ainakin yksi RFID-tunnisteideon aina kontaktikohdassa. Ketjun ja hammaspyörän rakenteesta johtuen tunniste voidaan kiinnittää hampaan kärkeen, jolloin tunnisteella on normaalissa tilanteessa mekaanisesta rasituksesta vapaa sijainti. Normaalista poikkeava toiminta aiheuttaa joko yhden tai useamman RFID-tunnisteen vaurioitumisen. Määräajoin suoritettavan tunnisteiden lukemisen avulla mahdollinen vaurioituminen voidaan havaita. Vaurioituneiden tunnisteiden avulla vianetsintä ja tarkastustoimenpiteet voidaan kohdistaa tietylle alueelle ja viat voidaan havaita ennen tuotantoon vaikuttavan vaurion syntyä.

Ketjujen kunnonvalvonta on rajattua kehittyneille kunnonvalvontamenetelmillä ja näin ollen venymän valvonta on tehokkain ja luotettavin menetelmä. Venymän mittauksessa on tärkeää suorittaa mittaus riittävän monesta kohdasta, jolloin voidaan varmistua tasaisesta kulumisesta. Lisäksi paikallinen vaurio on helpompi havaita kun mittauksia suoritetaan koko ketjun matkalta. Täyttökoneen ja puskuriyksikön lamelliketjut on varustettu integroiduilla mittapisteillä ja niiden venymän valvonnan suorittaminen on yksinkertaista. Tunnelin tuoteketjun venymää voidaan valvoa ketjun kiristimen yhteyteen asennetusta mitta-asteikosta, lisäksi ketjun toiminnan kannalta vaarallisen suuren venymän tunnistus on liitetty karkaisutunnelin automaatiojärjestelmään. Tunnelin pääkäyttöjen ketjujen, taskukuljettimen ketjun ja tyhjälaatikkoradan ketjujen kuntoa voidaan valvoa lähinnä venymän mittauksella ja visuaalisella tarkastelulla.

Hammashihnojen kuntoa voidaan arvioida kireyden mittauksen avulla. Mittauksen luotettavuuden kanalta on tärkeää, että mittausolosuhteet ovat samanlaiset eri mittauskertojen suorittamisen aikana. Hammashihnojen venymä on hyvin vähäistä ja näin ollen kireydessä tapahtunut muutos indikoi kulumaa tai alkavaa vauriota. Lisäksi hammashihnojen kuntoa voidaan valvoa kovuusmittausten avulla, jossa hampaan pituus- ja leveyssuunnan keskikohdan kovuus mitataan Shore-kovuusmittausta käyttäen. Kyseisen mittaustapahtuman avulla tapahtuva kunnonmäärittely perustuu kumiseoksen elastisuuden muutokseen käytön aikana, tällöin kovuuden lisääntyminen kertoo hammashihna jäljellä olevan käyttöiän lyhenemisestä. Edellä mainittuja kunnonvalvontamenetelmiä voidaan soveltaa siirtoyksikön robotin hammashihnoille,

poistorobotin hammashihnoille ja laatikkoonpakkaajan robotin hammashihnoille. Luonnollisesti myös visuaalinen tarkastelu tulee suorittaa aina kunnonvalvonnan yhteydessä. Lisäksi visuaalisena kunnonvalvontamenetelmänä voidaan käyttää suurnopeuskameraa hammaskosketuksen virheettömyyden todentamiseen.

6.3.6 Rakenteet ja kiinteät prosessiosat

Rakenteet ja kiinteät prosessiosat on ryhmitelty niihin soveltuvien kunnonvalvontamenetelmien mukaan. Rakenne tai prosessiosa muodostaa uuden ryhmän, mikäli yksikin kunnonvalvontamenetelmä tai kunnonvalvonnan soveltuvuus eroaa oleellisesti olemassa olevista ryhmistä.

Karkaisutunnelin tuotelevyjen taipuminen aiheuttaa tuotantoprosessissa hävikkiä ja häiriöitä. Lisäksi taipuma saattaa aiheuttaa ketjureaktion, jonka seurauksena tunneli vikaantuu. Vauriot saattavat olla suuria ja niiden korjaamisesta aiheutuu pitkä tuotantoseisokki. Tuotelevyjen määrän ollessa yli tuhat, niiden kunnonvalvonta visuaalisesti tai mekaanisesti mittaamalla ei ole tarkoituksenmukaista. Tutkimuksessa ideoitiin menetelmä, jossa karkaisutunnelin työpöydän työpisteeseen asennetaan vertikaalisuunnassa liikkuva laakeroitu kelkka, jonka kelkkaosan pituus on hieman tuotelevyä lyhyempi. Tunnelin ollessa esimerkiksi pesussa tai muutoin poissa tuotannosta, voidaan irrotettava kelkka asentaa paikalleen. Tunnelin levyt etenevät kiinteän mittauspisteen läpi, jolloin kelkan vertikaalinen liike saadaan laakeroidun mekanismin ja induktiivisen anturin avulla tunnelin logiikalle. Tällöin taipunut levy aiheuttaa tunnelin pysähtymisen ja operaattorilla on mahdollisuus korjata tai vaihtaa vaurioitunut levy. Mittauskelkan tarkka asemointi mahdollistaa myös vaurioituneen tuotelevyn kiinnityksen havaitsemisen, jolloin havainnointi perustuu levyssä olevien reikien pokkauksen aiheuttamaan kelkan vertikaaliseen liikkeeseen. Levyn vaurioitunut kiinnitys estää levyn kulun kohtisuoraan kelkkaan ja tuoteketjuun nähden. Tällöin myös vaurioitunut kiinnike aiheuttaa tunnelin pysähtymisen ja tiedon vauriosta operaattorille.

Kausihuoltojen yhteydessä tunkeumaneste- ja magneettijauhetarkastusta voidaan käyttää täyttökoneen asemien lineaariakseleiden tarkempaan kunnonvalvontaan. Tällöin saadaan tietoa esimerkiksi akselin karkaistun liukupinnan väsymisvaurioista tai

lineaarilaakerien vierintäelementtien aiheuttamista kulumista. Myös robottiyksiköiden lineaari- ja vertikaalijohteiden kuntoa voidaan valvoa edellä mainituilla menetelmillä. Lisäksi jäljennemenetelmää voidaan käyttää kaikkien johteiden pinnankarheuden ja mahdollisten vaurioiden analysointiin.

Tunkeumanestetarkastuksilla sekä endoskopialla että fiberoskopialla voidaan valvoa jäätelön ja raaka-aineiden annosteluun ja siirtoon liittyvien komponenttien kuntoa. Näitä ovat esimerkiksi täyttökoneen prosessiputket, jakotukit, suuttimet sekä venttiili- ja suutinrungot. Tärkein peruste kyseisien kohteiden kunnonvalvontaan on tuoteturvallisuuden varmistaminen. Vaurioitunut ja epäpuhtauksia lopputuotteisiin aiheuttanut komponentti voi pahimmillaan aiheuttaa tuotteiden laajamittaisen hävikin tai takaisinvedon. Lisäksi edellä mainittujen komponenttien kuntoa voidaan valvoa myös ultraäänimittauksen avulla, jolla havaitaan myös pintaan ulottumattomia säröjä sekä huonoja että vaurioituneita hitsejä. Muilla menetelmillä luoksepääsemättömien kohteiden kunnonvalvonta on myös mahdollista ultraäänimittauksen avulla.

Karkaisutunnelin lämmönvaihtimien ja ammoniakkiputkien kunnonvalvontaa voidaan suorittaa useilla NDT-menetelmillä. Soveltuvina menetelminä voidaan pitää röntgenkuvausta, pyörrevitamittausta, tunkeumanestetarkastusta, magneettijauhetarkastusta sekä akustista emissiota. Edellä mainittujen kohteiden kunnonvalvontaa kannatta lähtökohtaisesti suorittaa viranomaismääräysten ja ohjeiden mukaisesti. Akustista emissiota voidaan käyttää myös reaaliaikaisena kunnonvalvontamenetelmänä, jolloin sillä on mahdollista havaita suuret ammoniakkinesteen tason tai paineen muutokset ja mahdolliset vierasesineet ammoniakkijärjestelmässä.

Värähtelymittausta voidaan käyttää kaikkien linjalla olevien putkistojen ja niihin liittyvien komponenttien kunnonvalvontaan. Tällöin värähtelymittauksen nopeuden huippuarvolla saadaan tietoa sekä paineiskujen että virtauksen muutoksista.

6.3.7 Muut komponentit

Linjalla käytetään lamelliketjukuljettimia raaka-aineiden, valmiiden tuotteiden ja viallisten tuotteiden kuljettamiseen. Näiden kuljettimien vikaantuessa linja joudutaan pysäyttämään hallitusti korjauksen ajaksi. Kuljettimien vaurioituminen kohdistuu poikkeuksetta veto- ja taittopäihin, joiden kuntoa voidaan nykyisin arvioida vain katkaisemalla ja poistamalla lamelliketju. Kunnonvalvonnan toteuttamisen näkökulmasta edellä mainittu toimintatapa on raskas ja johtaa käytännössä joko ennalta arvaamattomaan vikaantumiseen tai liialliseen kunnossapitoon. Tutkimuksessa ideoitiin mahdollisuutta lisätä RFID-tunniste lamelliketjukuljettimen kulutuslistan alle, tällöin kyseinen tunniste vaurioituu listan kuluessa loppuun. Listan pahimman kuluman paikka tiedetään pitkällisen kokemuksen tuloksena ja näin ollen sinne sijoitetun tunnisteen lukukelvottomuus kertoo kohtuullisella varmuudella kuljettimen lähestyvästä vikaantumisesta.

Laatikkoonpakkaajan alipainejärjestelmän kunnonvalvontaa voidaan suorittaa estämällä ilman virtaus tartuntaimukuppien kautta. Helpoin ja varmin toimintatapa ilman virtauksen estämiseksi on ajaa tartuntapää manuaalisesti kiinni taskukuljettimen taskuihin. Tällöin tulee kuitenkin muistaa sammuttaa alipaineyksiköt mittauksen suorittamisen jälkeen. Mittauksessa alipainetukkiin liitetty alipainemittari antaa järjestelmän toiminnasta luotettavan kuvan. Alipaineen pienentyessä mittauskertojen välillä, voidaan tutkia vaurion mahdollisuutta kahdessa kohteessa; joko tarttujan komponenteissa on vuoto tai alipaineyksiköiden toiminta on häiriintynyt.

Linjalla on käytössä useita erityyppisiä pumppuja, joiden kunnonvalvontaa voidaan suorittaa esimerkiksi värähtelyn ja lämpötilan mittauksen avulla. Tällöin tulee varmistua mittaustapahtuman aikana mahdollisimman tarkasti vakioiduista ulkoisista muuttujista. Edellä mainitut menetelmät soveltuvat esimerkiksi lohkoroottoripumpuille. Linjalla on käytössä myös kalvopumppuja, joiden kunnonvalvonnassa voidaan käyttää hyväksi RFID-tunnisteita. Kalvopumppu vikaantuu tyypillisesti kalvon rikkoutuessa, jolloin koko linjan tuoteturvallisuus saattaa vaarantua. RFID-tunnistetta voidaan käyttää kalvojen eheyden valvontaan. Tunniste voidaan kiinnittää huollon yhteydessä pumpun kalvotilan kohtaan, johon kalvo ei osu normaalitilanteessa. Kalvon vaurioituessa raaka-

ainetta tai pesuliuosta pääsee kalvotilaan, jossa RFID-tunniste sijaitsee. Tämän jälkeen RFID-lukija ei enää havaitse vaurioitunutta tunnistetta.

Kaikkien linjalla olevien sähkökomponenttien kunnonvalvontaan soveltuu luonnollisesti lämpötilan mittaus. Tyypillisesti mittaus tehdään lämpökameran avulla. Lisäksi osassa komponentteja on itsediagnostiikkaan perustuvia ominaisuuksia, jolloin laitteiden kuntoa voidaan valvoa erillisten mittareiden tai HMI:n välityksellä.

7 KUNNONVALVONTAHYPOTEESIT

Mahdollisia kunnonvalvonnan toteuttamismalleja on käsitelty kunnonvalvontahypoteesien avulla. Tavoitteena on ollut rakentaa toimivia ja tehtaan kunnossapitostrategian mukaisia kunnonvalvontakokonaisuuksia, jotka pitävät sisällään vaativuudeltaan samantasoisia ja laajuudeltaan toisiaan vastaavia menetelmiä. Tarkasteluun on otettu kaksi eritasoista kunnonvalvontakokonaisuutta. Näitä ovat perustason ja kehittyneen tason kunnonvalvontahypoteesit.

Hypoteesien luomisessa on käytetty hyväksi komponentti- ja menetelmäkohtaista analyysia ja linjan käyttöönotto- sekä toiminnanohjausjärjestelmätietoa. Lisäksi hypoteeseissa on huomioitu tehtaan laitekanta ja valmius kunnonvalvonnan toteuttamiseen. Hypoteesit toimivat osaltaan myös koko tehtaan kunnonvalvonnan suunnittelun ja käyttöönoton perustana.

7.1 Perustason kunnonvalvontahypoteesi

Perustasolla kunnonvalvonnan tarkoituksena on ehkäistä toimitusvarmuuteen ja linjatehokkuuteen merkittävästi vaikuttavia vaurioita. Tarkoituksena on löytää myös keinoja ennakkohuollon tehokkuuden parantamiseksi komponenttien eliniän määrittämisen avulla. Lisäksi pyritään estämään taloudellisilta vaikutuksiltaan suurten vaurioiden synty. Kunnonvalvonnan käyttöönottamisen tulee olla kustannuksiltaan kohtuullisen vähäinen. Koulutukseen ja kunnonvalvonnan suorittamiseen käytettävä kunnossapitohenkilöstön aika ei tulisi aiheuttaa merkittäviä muutoksia olemassa oleviin kunnossapitokäytäntöihin. Kunnonvalvonnan suorittaminen tapahtuu tyypillisesti jo olemassa olevan ennakkohuoltosuunnitelman puitteissa, tällöin toiminnanohjausjärjestelmään tehtäisiin vain päivityksiä.

Linjan ennakkohuolto-ohjelma perustuu kunnossapidon osalta neljään kunnossapidolliseen sykliin. Ensimmäinen sykli on vuoden mittainen ja pitää sisällään laajojen osakokonaisuuksien vaihtoja, lisäksi linjan kiinteitä rakenteita puretaan ja laitteiston kuntoa tutkitaan syvällisesti. Toinen sykli on kuuden kuukauden mittainen ja

pitää sisällään kevyemmän version vuosihuollosta. Käytännössä kuuden kuukauden välein tarkastetaan ja huolletaan tuotannon luotettavuuden ja tehokkuuden kannalta tärkeimmät komponentit. Ensimmäisen ja parillisten toisen syklin huollot suoritetaan pääsääntöisesti samaan aikaan. Kolmas sykli on kuuden viikon välein ja se pitää sisällään pääasiassa kuluvien kohteiden tarkastuksia ja säätöjä. Linja on poissa tuotannollisesta käytöstä huollon aikana, jolloin voidaan huoltaa myös tuotantoon vaikuttamattomia aiemmin ilmenneitä vikoja. Neljäs kunnossapidollinen sykli on viikon mittainen. Luonteeltaan sykli on voitelu- ja tarkastushuolto, jossa käydään läpi tuotannon kannalta kriittiset kohteet. Kyseisen huollon merkitys on suuri, koska osaavalla ja tarkalla asentajalla on mahdollisuus havaita myös muiden kuin huollettavien kohteiden alkavia vaurioita linjalla. Viides sykli eroaa periaatteellisesti edeltäjistään ja sitä ei ole esimerkiksi sisällytetty kunnossapidon toiminnanohjausjärjestelmään. Kyseiset tarkastukset suoritetaan tuotannon operaattorin toimesta ja niiden sisältö saattaa muuttua tarpeen mukaan hyvinkin nopeasti. Tyypillisesti tarkastukset tehdään joko tuotannon aloittamisen tai tuotevaihdon yhteydessä.

Perustason kunnonvalvontahypoteesi on rakennettu olemassa olevien ennakkohuolto- ja tarkastuskäytäntöjen pohjalle. Tällöin voidaan käyttää hyväksi huoltojen ajankohtia ja henkilöstöä. Hypoteesissa toiminnanohjausjärjestelmän ennakkohuolto-ohjelman rinnalle luodaan erillinen kunnonvalvontaohjelma, joka voidaan sisällyttää normaalien huoltosyklien yhteyteen. Käyttöönoton jälkeen järjestelyä tulee arvioida kriittisesti ja tarvittaessa päällekkäisyyksiä voidaan poistaa. Kunnonvalvontahypoteesissa on mukana myös kunnonvalvontaa, jota voidaan tarvittaessa suorittaa linja laatu- tai tehokkuusongelmien selvittämiseksi. Kunnonvalvontasyklien ajankohdat ovat yhtenevät ennakkohuoltosyklien kanssa.

Toinen kunnonvalvontasykli sisältää seuraavat komponenttikohtaiset kunnonvalvonnan sovellukset: voiteluaineanalyysi ja endoskopiatarkastus vaihteistoille ja tunnelin taittopään laakereille, tunkeumaneste- sekä endoskooppitarkastus täyttökoneen prosessiputkille, jakotukeille, suuttimille sekä venttiili- ja suutinrungoille. Paineilmakomponenteille suoritetaan kunnonvalvontaa erillisellä tehtaalle valmistetulla

tallentavalla mittalaitteella sekä paineilmajärjestelmä tarkastetaan myös ultraäänimittauksella mahdollisten vuotojen paikallistamiseksi.

Kolmannessa kunnonvalvontasyklissä suoritetaan servo- ja sähkömoottorikäyttöjen lämpötilan mittaus, lisäksi servo-ohjaimet, taajuusmuuttajat ja muut kriittiset sähkökomponentit tarkastetaan lämpökameralla. Täyttökoneen, karkaisutunnelin, puskurointiyksikön, taskukuljettimen ja tyhjälaatikkoradan ketjujen venymän mittaus ja visuaalinen tarkastus suoritetaan myös kuuden viikon välein. Lämpötilanmittaukseen soveltuvien laakerointien mittaus ja heittokelloon perustuva kunnonvalvonta suoritetaan edellä mainitussa syklissä. Robottiyksiköiden hammashihnojen kireyden ja kovuuden mittaus suoritetaan myös kyseisen huoltoseisokin aikana. Lisäksi tarkastetaan RFID-tunnisteiden toimivuus kuljettimissa.

Neljännessä kunnonvalvontasyklissä tarkastetaan laatikkoonpakkaajan alipainejärjestelmän toimivuus. Lisäksi täyttökoneelle suoritetaan kaikkien sähkömoottorikäyttöjen lämpötilan mittaus. Lämpökameramittauksella tarkastetaan paineilmajärjestelmän venttiililohkot ja paineilmasylinterit. Täyttökoneen täyttö- ja annosteluasemien paineilmasylinterit sekä venttiilien mäntien kunto tarkastetaan stroboskoopin avulla. Endoskoopilla suoritetaan visuaalinen tarkastus koneiden rakenteiden sisäpuolisille liikkuville osille sekä tiivisteille. Luonnollisesti visuaalinen tarkastelu suoritetaan myös muille koneenosille.

Viides kunnonvalvontasykli suoritetaan koneen operaattorien toimesta. Tällöin tarkastetaan RFID-tunnisteiden toimivuus tunnelin pääkäyttöjen hammaspyörissä sekä kalvopumpuissa. Lisäksi operaattori suorittaa linjalle pääpiirteisen visuaalisen tarkastuksen.

7.2 Kehittyneen tason kunnonvalvontahypoteesi

Kehittyneellä tasolla kunnonvalvonnalla tavoitellaan linjan käyttövarmuuden varmistamista, jolloin kunnonvalvonta vaikuttaa sekä kunnossapitoon että tuotantoon. Tuotannon suunnittelu perustuu linjan käytettävyyden osalta kunnonvalvonnan tuloksiin, joiden luotettavuus on korkealla tasolla. Komponenttien elinkaarta voidaan

ennustaa luotettavasti ja varaosien tilaus perustuu tarpeeseen. Lisäksi tavoitteena on satunnaisesti esiintyvien vaurioiden havaitseminen kunnonvalvontaohjelman avulla.

Kunnonvalvonnan perusteiden ja toimivuuden tulee olla hyvällä tasolla ennen siirtymistä kehittyneelle tasolle. Tehtaalla tulee olla myös tehokas ja luotettava toimintamalli kunnonvalvonnan toteuttamiseen. Jatkuva kehittäminen ja ennakkoluuloton asenne ovat ensiarvoisen tärkeitä toimivassa kunnonvalvonnassa, jonka eteenpäin vieminen vaatii tutkimusta saavutetuista hyödyistä sekä myös tulevien kehitystarpeiden tarkkaa analysointia. Edellä mainitun perusteella kehittyneen tason kunnonvalvontahypoteesi on vain suuntaa-antava ehdotelma kunnonvalvonnan toteuttamisesta tuotantolinjalla. Kunnonvalvonnan todellinen tarve ja suoritustapa voi poiketa huomattavasti hypoteesista.

Kehittyneen tason kunnonvalvontahypoteesiin on sisällytetty pääsääntöisesti kaikki perustason kunnonvalvontahypoteesin menetelmät ja toimintatavat. Tarvittaessa mittauslaajuuksia ja -tiheyttä on muutettu vastaamaan paremmin yhteistoimintaan uusien kunnonvalvontamenetelmien kanssa. Syklisestä kunnonvalvonnasta on hypoteesissa pyritty siirtymään mahdollisuuksien mukaan sekä integroituihin että reaaliaikaisiin kunnonvalvontamenetelmiin.

Kerran vuodessa suoritetaan karkaisutunnelin ammoniakkilämmönvaihtimien ja putkistojen röntgenkuvausta, pyörrevitamittausta, tunkeumanestetarkastusta, magneettijauhetarkastusta sekä akustista emissiota tarpeenmukaista laajuutta käyttäen. Menetelmien yhtäaikaista käyttöä tulee arvioida kriittisesti ja todennäköisesti kaikkia ei tarvita riittävän varmuuden saamiseksi laitteiston toimivuudesta. Värähtelymittaus tulee suorittaa prosessiputkien ja niiden kannakointien mekaanisessa kunnonvalvonnassa.

Kaksi kertaa vuodessa suoritetaan seuraavat komponenttikohtaiset kunnonvalvonnan sovellukset: voiteluaineanalyysi ja endoskopiatarkastus vaihteistoille ja tunnelin taittopään laakereille. Tunkeumaneste-, ultraääni- sekä endoskooppitarkastus täyttökoneen prosessiputkille, jakotukeille, suuttimille sekä venttiili- ja suutinrungoille. Paineilmakomponenteille suoritetaan kunnonvalvontaa erillisellä tehtaalle valmistetulla tallentavalla mittalaitteella sekä paineilmajärjestelmä tarkastetaan myös

ultraäänimittauksella mahdollisten vuotojen paikallistamiseksi. Jäljennemenetelmän, tunkeumaneste- ja magneettijauhetarkastuksien avulla voidaan varmistua sekä servokäyttöisten asemien johteiden, täyttöasemien sisäpuolisten osien pintojen että robottien liukujohteiden riittävistä pinnankarheuden ja säröytymisen raja-arvoista.

Kerran kuukaudessa suoritetaan servo- ja sähkömoottorikäyttöjen lämpötilan mittaus, lisäksi servo-ohjaimet, taajuusmuuttajat ja muut kriittiset sähkökomponentit tarkastetaan lämpökameralla. Täyttökoneen, karkaisutunnelin, puskurointiyksikön, taskukuljettimen ja tyhjälaatikkoradan ketjujen venymän mittaus ja visuaalinen tarkastus suoritetaan myös neljän viikon välein. Lämpötilanmittaukseen soveltuvien laakerointien mittaus ja heittokelloon perustuva kunnonvalvonta suoritetaan edellä mainitussa syklissä. Robottiyksiköiden hammashihnojen kireyden ja kovuuden mittaus suoritetaan myös kyseisen kunnonvalvontaseisokin aikana.

Viikoittain linjalla suoritetaan kaikkien sähkömoottorikäyttöjen sekä vaihteistojen lämpötilan mittaus puolikiinteän lämpötila-anturoinnin avulla. Värähtelymittaus suoritetaan kaikkien sähkömoottorikäyttöjen sekä vaihteistojen osalta puolikiinteällä värähtelyanturoinnilla. Lisäksi soveltuvat laakeroinnit otetaan värähtelymittauksen piiriin. Lämpökameramittauksella tarkastetaan paineilmajärjestelmän venttiililohkot ja paineilmasylinterit. Täyttökoneen täyttö- ja annosteluasemien paineilmasylinterit sekä venttiilien mäntien kunto tarkastetaan stroboskoopin avulla. Endoskoopilla suoritetaan visuaalinen tarkastus koneiden rakenteiden sisäpuolisille liikkuville osille sekä tiivisteille. Visuaalinen tarkastelu suoritetaan myös muille koneenosille. Viikoittaisista kunnonvalvontamittauksista operaattorien tulee suorittaa mahdollisimman suuri osa. Koulutuksen ja menetelmien kehittymisen myötä operaattorit voivat olla mukana myös haastavimmissa kunnonvalvonta mittauksissa.

Päivittäiset kunnonvalvontatarkastukset suoritetaan koneen operaattorien toimesta. Tällöin tarkastetaan RFID-tunnisteiden toimivuus tunnelin pääkäyttöjen hammaspyörissä, kuljettimissa sekä kalvopumpuissa. Laatikkoonpakkaajan alipainejärjestelmän toimivuus tarkastetaan myös päivittäin. Lisäksi operaattori suorittaa linjalle pääpiirteisen visuaalisen tarkastuksen.

Puolikiinteät lämpötilan ja värähtelymittauksen anturit voidaan käyttää hyväksi tosiaikaisen kunnonvalvontamittauksen toteuttamisessa. Tosiaikaisella mittauksella saavutetaan tarkin mahdollinen tilannekuva valvottavien kohteiden kunnosta. Tällöin kuitenkin vaaditaan huomattavia muutoksia jo olemassa olevaan kunnossapidon tietojärjestelmään tai kokonaan uuden tietojärjestelmän käyttöönottoa. Tosiaikaista mittausta voidaan käyttää myös karkaisutunnelin lämmönvaihtimien kunnonvalvontaan. Akustisen emissiomittauksen avulla voidaan valvoa lämmönvaihtimen kunnon lisäksi myös mahdollisien vierasesineiden liikkumista ammoniakkijärjestelmässä.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Uuden toimintamallin ideoinnissa ja käyttöönotossa pitää huomioida erityisesti tarkka ja oikein suunnattu pohjatyö. Erityisen haasteelliseksi kunnonvalvontasuunnittelun tekee aiempien kokemuksien puuttuminen jäätelönvalmistuksesta. Tällöin toimivan ja tehokkaan kunnonvalvonnan suunnittelu vaatii näkemystä laitteiden toiminnasta kokonaisuuden osana. Tuotantoprosessin kannalta sekä välttämättömien että hankalasti vaihdettavien komponenttien löytäminen oli ensiarvoisen tärkeää. Toiminta-analyysin avulla löydettiin tuotantolinjan toiminnan kannalta merkitykselliset koneenosat komponenttikohtaiseen analyysiin. Tärkeää oli myös tuotantolinjan käyttöönottotiedon ja tuotannonaikaisen vauriotiedon käsittely kunnonvalvontakohteiden määrittelyssä.

Kunnonvalvonta on tehtaan kunnossapitostrategiassa tärkeässä asemassa. Uusien kunnossapitotoimintojen käyttöönoton yhteydessä pitää strategian mukaan varmistua resurssien oikeasta suuntaamisesta. Näin ollen pilottilinjalla toteutettu rajattu kunnonvalvontaohjelman käyttöönotto vastaa hyvin asetettuihin tavoitteisiin. Edellä mainituilla perusteilla voidaan suosittaa perustason kunnonvalvontahypoteesin käyttöönottoa tutkimuksessa esitetyssä laajuudessa.

Kunnonvalvontahypoteesien ja komponenttikohtaisten analyysien käyttö antaa mahdollisuuden yksittäisten kunnonvalvontakohteiden valitsemiseen tehtaan kunnonvalvonnan toteutuksessa. Jokaiseen tutkimuksen komponenttikohtaisen analyysin kohteeseen löytyi yksi tai useampi kunnonvalvontamenetelmä, näin ollen voidaan päätellä kunnonvalvontaan soveltuvien menetelmien kirjon olevan riittävän laaja. Toisaalta tutkimuksessa havaittiin, että myös yksinkertaisilla kunnonvalvontasovelluksilla voidaan tutkia tuotantoon merkittävästi vaikuttavien komponenttien ja kokonaisuuksien tilaa. Esimerkiksi perustason kunnonvalvontahypoteesin käyttöönoton lopputuloksena on kohtuullisen pieni taloudellinen panostus sekä vähäinen henkilöstövaikutus.

Jäätelönvalmistuksen koneiden ja laitteiden kunnonvalvonnasta ei ollut saatavilla laajamittaisesti tutkittua tietoa. Tutkimuksen aikana selvitettiin laaja-alaisesti eri

kunnonvalvontamenetelmiä ja niiden erilaisia sovelluksia. Tällöin havaittiin, että kunnonvalvontaa voidaan suorittaa käytännössä myös kaikille elintarviketeollisuuden koneille sekä laitteille. Kuitenkin monimutkaisten kunnonvalvontamenetelmien käyttöönotto elintarviketeollisuudessa vaatii laajamittaista tutkimusta sekä isoja investointeja, ja voi olla näin ollen kannattamatonta.

Tutkimuksen teon yhteydessä kehitettiin uusia kunnonvalvonnan sovelluksia, jotka vastaavat epätyypillisten komponenttien kunnonvalvonnan tarpeisiin. Paineilmajärjestelmien, mekaanisten osien ja prosessilaitteiden kunnonvalvontaa helpottavien uusien menetelmien toimivuus on kuitenkin tutkittava huolellisesti käyttöönoton yhteydessä. Uusien kunnonvalvontasovelluksien avulla on luonnollisesti mahdollista saavuttaa kustannussäästöjä sekä tuoteturvallisuuden paranemista.

Käyttöönottotiedon ja toiminnanohjausjärjestelmän analysoinnin pohjalta määritetyt kunnonvalvontakohteet vaikuttavat suoraan tutkitun tuotantolinjan ja sen kautta koko tehtaan kannattavuuteen ja toimintavarmuuteen. Valittujen kunnonvalvontakohteiden odottamaton vaurioituminen aiheuttaa tuotantopysähdyksiä ja pahimmillaan tuoteturvallisuuden vaarantumista. Tutkimuksessa kehitettyjen kunnonvalvontasovelluksien sekä hypoteesien avulla kyseisien kohteiden vaurioituminen voidaan parhaassa tapauksessa ehkäistä.

Kunnonvalvontaa voidaan suorittaa alkuvaiheessa ennakkohuoltosuunnitelman mukaisien seisokkien aikana. Saatujen tuloksien ja kokemusten perusteella aikatauluja sekä toteuttamistapoja voidaan parantaa. Kehittyneen tason kunnonvalvontahypoteesissa ehdotettuja menetelmiä voidaan käyttää myös reaaliaikaisesti ja mahdollisesti myös etäkäytöllä. Tällöin kunnonvalvonnan suorittaminen voidaan sovittaa paremmin päivittäisen kunnossapidon osaksi.

Tutkimuksen tulokset soveltuvat komponentti- ja menetelmäkohtaisen analyysin osalta käytettäväksi koko tehtaalla. Lisäksi kunnonvalvontahypoteeseja voidaan käyttää soveltuvilta osin muille tuotantolinjoille ja koneille. Tehtaalla on mahdollisuus tehokkaaseen ja tarkoituksenmukaiseen kunnonvalvonnan käyttöönottoon tutkimuksen kohteena olleen linjan kunnonvalvonnan toimivuuden arvioinnin avulla. Pilottilinjalla

havaitut hyvät toimintatavat voidaan ottaa käyttöön tehdasmittakaavassa ja mahdolliset soveltumattomat kunnonvalvontasovellukset voidaan poistaa käytöstä. Henkilöstöön ja toiminnanohjausjärjestelmään tehdyt panostukset voidaan hyödyntää suoraan uusissa kohteissa.

Kunnonvalvontahypoteesin soveltuvuus linjan kunnossapitoon tulee arvioida kunnonvalvonnan käyttöönoton jälkeen. Tällöin kunnonvalvontasuunnitelmiin voidaan tehdä muutoksia tai uusia linjauksia. Jatkotutkimuksia tulee suorittaa valittujen kunnonvalvontasovellusten käyttöönoton ja tuotantolinjan tehokkuuden välisestä korrelaatiosta. Lisäksi kunnonvalvontaan tehtävien panostusten ja saatujen hyötyjen välistä suhdetta tulee arvioida laaja-alaisesti.

9 YHTEENVETO

Diplomityön aiheeksi valittiin kunnonvalvonnan kehittäminen, joka vastaa osaltaan hyvin tehtaan kunnossapitostrategian tulevaisuuden tarpeisiin. Kohteeksi valikoitui yksi tehtaan uusimmista ja tärkeimmistä tuotantolinjoista, jonka käyttöönoton aikataulu soveltui hyvin diplomityön alustavaan aikatauluun. Työn tekeminen alkoi jo linjan investointipäätöksen yhteydessä, jolloin käyttöönottotiedon kerääminen ja kunnonvalvonnan mahdollistavat ratkaisut voitiin sisällyttää tuotantolinjan hankintaprosessiin. Tavoitteena oli saada kokonaisvaltainen käsitys kunnonvalvonnasta ja mahdollisista soveltuvista menetelmistä linjalla. Työssä keskityttiin erityisesti käytännönläheisiin ja helposti käyttöönotettaviin menetelmiin.

Aiheen laaja-alaisuuden vuoksi kunnonvalvontamenetelmiä tutkittiin teoreettisesti ja verrattiin linjan käyttöönottotietoon. Lisäksi komponentti- ja menetelmäkohtaisen analyysin ja toiminnanohjausjärjestelmästä saadun tiedon pohjalta selvitettiin soveltuvia kunnonvalvontamenetelmiä ja kohteita. Yksittäisistä komponenteista muodostettiin ryhmiä, joihin voidaan soveltaa yhteneviä kunnonvalvontamenetelmiä. Varsinaisia kunnonvalvontamittauksia tai tuloksia ei tässä työssä käsitelty lainkaan. Lisäksi kunnonvalvontamenetelmien toimivuuden testaus jäi tehtaan kunnossapito-organisaation vastuulle.

Käyttöönotettaviksi ehdotetut kunnonvalvontamenetelmät ja niiden sovellukset ovat kohtuullisen yksinkertaisia ja soveltuvat osittain myös koko tehtaaseen. Työssä ideoitiin uusia kunnonvalvontasovelluksia ennakkoluulottomasti ja yksityiskohtaisesti. Komponenttikohtaisessa analyysissä löydettiin kunnonvalvontasovellus käytännössä jokaiseen tutkittuun kohteeseen. Mikäli toiminnanohjausjärjestelmän tunnuslukujen kautta havaitaan uusia tarpeita kunnonvalvontaan, voidaan kohteen valvonta aloittaa olemassa olevien ehdotelmien avulla.

Tutkimuksessa löydettyjä kunnonvalvontasovelluksia voidaan ottaa käyttöön tehtaalla toiminnanohjausjärjestelmään lisättävien määräaikaistarkastusten avulla. Työssä luotiin ehdotelma kunnonvalvontasuunnitelmasta tutkimuksen kohteena olleelle linjalle.

Nestlé:n kunnossapitostrategia ohjaa kunnonvalvonnan ja kunnossapidon suuntaa, minkä johdosta työssä keskityttiin kunnonvalvonnan toimintasuunnitelman rakentamiseen. Tutkimuksen edetessä toteutustyökaluiksi muodostuivat kunnonvalvontahypoteesit. Luotujen kunnonvalvontahypoteesien avulla tehdas pystyy päättämään käyttöönotettavan kunnonvalvonnan laajuuden ja toteutustavan sekä arvioimaan saavutettavia hyötyjä.

Diplomityön tuloksien avulla kunnonvalvontaa voidaan ottaa käyttöön ja kehittää tuotantolinjan kunnossapidossa. Löydettyjen menetelmien soveltuvuus ja luotettavuus kunnonvalvonnassa tulee arvioida käyttöönoton ja pilottijakson aikana. Tehtaan kunnonvalvonnan kehittämisen kannalta on tärkeää tutkia käyttöönotettujen menetelmien vaikutusta tuotantolinjan tehokkuuteen ja luotettavuuteen.

LÄHDELUETTELO

Aalto, H. 1997. Kunnossapitotekniikan perusteet. 4. p. Rajamäki: KP-tieto. 96 s.

Ansaharju, T. 2009. Koneenasennus ja kunnossapito. 1. p. Helsinki: WSOY Oppimateriaalit. 329 s.

Antila, K. 2013. Teollisuusvoitelu. 5. uud. p. Helsinki: KP-Media. 250 s.

Bagavathiappan, S. et at. 2013. B.B. Infrared thermography for condition monitoring – A review. Infrared Physics & Technology vol. 60 s. 35–55

Barck, H. 2004. Rikkomattomat aineenkoetusmenetelmät. Teoksessa Korroosiokäsikirja. 2. p. Rajamäki: KP-Media. 930 s.

Festo, 2013. Diagnosis management for maximum process reliability. Esite. 36 s.

Heinonkoski, R. 2004. Koneautomaation kunnossapito. 2. uud. p. Helsinki: Opetushallitus. 207 s.

Huda, N.A.S & Taib, S. 2013. Application of infrared thermography for predictive/preventive maintenance of thermal defect in electrical equipment. Applied Thermal Engineering, vol. 61, pp. 220–227

Järviö, J, Piispa, T, Parantainen, T & Åström, T. 2007. Kunnossapito. 4. uud. p. Helsinki: KP-Media. 212 s.

Järviö, J. & Lehtiö, T. 2012. Kunnossapito – tuotanto-omaisuuden hoitaminen. 5. uud. p. Helsinki: KP-Media. 288 s.

Kautto, J. 2011. Kunnonvalvonta haasteiden edessä. Promaint, 1/2011, s.11–15

Kolakowski, P, et al. 2008. VMD-based health monitoring of engineering systems. Teoksessa Holnicki-Szulc, J. Smart technologies for safety engineering. West Sussex: John Wiley & Sons. 332 s.

Laine, H. 2010. Tehokas kunnossapito – tuottavuutta käynnissäpidolla. 1. p. Helsinki: KP-Media. 275 s.

Lempinen, V, Jönkkäri, I & Järvelä, P. 2012 Selvitys NDT-menetelmistä. Mikkeli: Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisu 5/2012

Mikkonen, H. (toim.). 2009. Kuntoon perustuva kunnossapito. 1. p. Helsinki: KP-Media. 606 s.

Mobley, K. 2002. An introduction to predictive maintenance. 2. p. Woburn: Elsevier Science. 438 s.

Moore, R. 2006. Selecting the right manufacturing improvement tools. 1. p. Oxford: Butterworth-Heinemann. 416 s.

NEE, Council. 2013. Nestlé Engineering Excellence, GI-00.900 Vevey: NEE, Council. 62 s.

Nohynek, P. & Lumme, V. E. 2004. Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset. 2. täyd. p. Rajamäki: KP-Media. 146 s.

O'Connor, P.D.T. 2006. Practical reliability engineering. 4. p. West Sussex: John Wiley & Sons. 513 s.

PSK 5705, Kunnonvalvonta. Värähtelymittaus. Mittaustoiminnan suunnittelu. 5. p. 19 s. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys. 2006.

PSK 5708, Kunnonvalvonta. Värähtelymittaus. Rakenteelliset värähtelyominaisuudet 2. p. 5 s. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys. 2003.

PSK 6201, Kunnossapito. Käsitteet ja määritelmät. 3. p. 30 s. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys. 2011.

Rossi, A. 1993. Ennakoiva kunnossapito konepajassa. 1. p. Helsinki: Metalliteollisuuden Keskusliitto. 96 s.

SFS-ISO 18434-1, Koneiden kunnonvalvonta ja diagnostiikka. Lämpökuvaus. 1. p. 49 s. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 2011.

Voitelutekninen toimikunta, 2006. Teollisuusvoitelu. 4. täyd. p. Helsinki: KP-Media. 254 s.

Voitelutekninen toimikunta, 2010. Teollisuuden rasvavoitelu. 1. p. Helsinki: KP-Media. 48 s.

Wang, W. 2007. A two-stage prognosis model in condition based maintenance. European Journal of Operational Research, vol. 182, pp. 1177–1187