



## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto  
LUT School of Energy Systems  
LUT Konetekniikka

Anttoni Hirvonen

### **Kriittisten korkeapainelaitteiden kunnonvalvonnan kehitys**

Diplomityö

2019

87 sivua, 28 kuvaa, 14 taulukkoa ja 4 liitettä

Tarkastajat: Professori Harri Eskelinen  
Yliopisto-opettaja Kimmo Kerkkänen

Hakusanat: Kunnonvalvonta, Kunnossapito, Luotettavuuskeskeinen kunnossapito, Riskiperusteinen tarkastus, Painelaite

Tässä tutkimuksessa kartoitettiin UPM Lappeenrannan biojalostamon kriittiseen korkeapaineosaan menetelmiä, joilla kunnonvalvontaa voidaan kehittää. Tulokset jakautuivat osioihin, joita olivat vikaantumismekanismien ja sopivien kunnonvalvontamenetelmien valinta RBI -analysointimenetelmien avulla sekä toimenpiteet kriittisten korkeapainelaitteiden seurantasuunnitelman muodostamiseksi.

Vikaantumismekanismeiksi laitteissa havaittiin prosessikemikaaleista johtuvat korroosio ja jännityskorroosio, korkeista lämpötiloista johtuvat mekaaniset vikaantumiset ja ikääntymisestä johtuvat mekaaniset vikaantumiset, valmistusvirheet sekä inhimillisestä virheestä johtuvat vikaantumiset. Nämä vikaantumismekanismit olivat myös kirjallisuuden ja riskianalyysin mukaan kriittisimmät laitteiden vikaantumisen kannalta.

Tutkimusmetodina käytettiin asiantuntijahaastatteluja, kirjallisuuskatsausta sekä kokeellista osuutta. Asiantuntijahaastattelujen, kirjallisuuden ja kokeellisen osion perusteella esitetään jatkuvien akustisen emission mittausten sekä jatkuvien korroosiomittausten lisäystä kriittisiin korkeapainelaitteisiin. Kokeellisessa osiossa testatuista menetelmistä vaiheistettua ultraääntä sekä EMAT-ultraääntä esitetään jatkossa suoritettavaksi käynnin ja valmistuksen aikana varsinkin pinnoitetuille painelaitteille. Jatkuvan kunnonvalvonnan ja tarkastusten avulla voidaan kehittää merkittävästi kohdeyrityksen kriittisten korkeapainelaitteiden kunnonvalvontaa ja luotettavuutta.

Määräaikaisen painekokeen määräajan pidentämiseksi ehdotetaan seurantasuunnitelman tekemistä kriittisessä korkeapainekierrossa sijaitseville kuudelle reaktorille. Seurantasuunnitelma muodostetaan lisäämällä reaktorit jatkuvan kunnonvalvonnan piiriin ja käynnin aikana suoritetaan tarkastussuunnitelman mukaisesti NDT-tarkastuksia. Korroosion kontrollointi dokumentaatio -ohjelmaa esitetään aloitettavaksi prosessissa korrosoivien aineiden tunnistamiseksi.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta-Lahti University of Technology  
LUT School of Energy Systems  
LUT Mechanical Engineering

Anttoni Hirvonen

### **Condition monitoring development for critical high-pressure equipment**

Master's thesis

2019

87 pages, 28 figures, 14 tables and 4 appendices

Examiner: Professor Harri Eskelinen  
University teacher Kimmo Kerkkänen

Keywords: Condition monitoring, Maintenance, Reliability centered maintenance, Risk-based inspection, Pressure equipment

In this study possibilities for condition monitoring development was studied for UPM Lappeenranta biorefinery's maintenance team. Results were divided in different sections that were identifying failure mechanisms, selection of suitable condition monitoring methods for failure mechanisms by utilizing RBI-analytical tools and further actions for forming a monitoring plan.

Failure mechanisms for critical high-pressure equipment are corrosion and stress corrosion cracking due to process chemicals, mechanical failures due to high temperature, mechanical failures due to ageing, failures due to manufacturing errors and human errors. Literature review and risk analysis also showed that these mechanisms were the most critical.

Research methods of this study consists of literature review combined with interviews with experts from the field of inspections and failure mechanisms, and experimental case studies. Implementing online acoustic emission condition monitoring and online corrosion condition monitoring for critical high-pressure equipment is presented as a result of literature review and interviews. Results from experimental case studies shoes that phased array ultrasonic testing and EMAT-ultrasonic testing is relevant to be done during operation and during manufacturing phase especially for coated pressure equipment.

Forming a monitoring plan for rescheduling periodic pressure test is presented for six reactors that are located in critical high-pressure section of the target company. Monitoring plan is formed by implementing reactors to online condition monitoring circle and by NDT-inspections during operation. Corrosion control documenting program is presented to be started inside target company for establishing corrosion loops from the process.

## ALKUSANAT

Haluaisin kiittää kohdeyrityksenä toiminutta UPM Lappeenrannan biojalostamoaa tämän työn mahdollistamisesta. Biojalostamon kunnossapito-organisaation ymmärryksen ja tuen avulla työn kirjoittaminen hoitui muiden töiden ohella sujuvasti. Erityisesti kiitos työn ohjaajille Marko Leinoselle ja Markus Varikselle sekä kotkanpesän kollegoille.

Opintojeni aikana LUT-yliopisto on tarjonnut minulle ainutlaatuisen ympäristön toteuttaa ja kehittää itseäni niin akateemisesti kuin muidenkin elämän osa-alueiden osalta. Opintojen aikana olen kohdannut ylä- ja alamäkiä, mutta LUT-yliopiston professorien, henkilökunnan sekä opiskelukavereideni avulla kaikesta on opittu ja menty eteenpäin. Vaikka monia yliopistokavereitani voisi nostaa esille, haluan antaa erityisesti kiitokset Atte Heiskaselle, jonka pyyteettömän tuen ansiosta omat opiskeluni hoitui näinkin menestyksekkäästi.

Lopuksi haluan antaa kiitokset perheelleni Imatralla, Lappeenrannassa ja pääkaupunkiseudulla. Kukaan ei pysty huippusuorituksiin yksin. Menestykseen tarvitaan aina taustajoukot, joiden äärettömän suurta panosta ei huomaa ihmiset, jotka näkevät vain lopputuloksen.

Anttoni Hirvonen

Lappeenrannassa 18.9.2019

## SISÄLLYSLUETTELO

### TIIVISTELMÄ

### ABSTRACT

### ALKUSANAT

## SISÄLLYSLUETTELO

### SYMBOLILUETTELO

<b>1</b>	<b>JOHDANTO.....</b>	<b>8</b>
1.1	Tutkimuksen taustat ja tavoitteet .....	8
1.2	Tutkimusongelmat ja tutkimuskysymykset .....	10
1.3	Kohdeyritys.....	10
1.4	Tutkimusmenetelmät.....	12
1.5	Rajaukset.....	12
<b>2</b>	<b>KIRJALLISUUSKATSAUS .....</b>	<b>14</b>
2.1	Painelaitteet ja lainsäädäntö.....	14
2.2	Kunnonvalvontamenetelmät ja soveltuvuus .....	17
2.2.1	Riskiperusteinen tarkastus (RBI) .....	18
2.2.2	Rikkomattomat aineenkuormitus menetelmät .....	23
2.2.3	Analysointimenetelmät .....	25
2.3	Vikaantumismekanismit .....	27
2.3.1	Mekaaniset ja metallurgiset vikaantumiset.....	27
2.3.2	Yleinen ja paikallinen korroosio .....	32
2.3.3	Korkean lämpötilan korroosio .....	35
2.3.4	Ympäristön avustama säröytyminen.....	37
2.4	Teollinen internet (IoT) .....	40
<b>3</b>	<b>SEURANTASUUNNITELMAN MUODOSTAMINEN .....</b>	<b>41</b>
3.1	Vikaantumismekanismit laitteissa ja niiden odotettu sijainti .....	41
3.2	Vikaantumisnopeus ja käyttöikä.....	45
3.3	Tarkastusmenetelmien valinta .....	46
3.4	Tarkastusten vaikutus ja tehokkuus .....	46
3.5	Tarkastusten määrittäminen ja turvallinen suorittaminen .....	49
3.5.1	Ulkopuoliset tarkastukset.....	49

3.5.2	Sisäpuoliset tarkastukset .....	50
3.5.3	Kunnonvalvonta .....	50
<b>4</b>	<b>MITTAUSTEN SUORITTAMINEN (CASE STUDY) .....</b>	<b>51</b>
4.1	Mitattavat kohteet .....	51
4.2	Mittalaitteet .....	52
4.2.1	Vaiheistettu ultraääni .....	54
4.2.2	Liikkeen vahvistuskamera .....	55
4.2.3	Digitaalinen radiografia .....	57
4.2.4	IR-lämpökamerakuvaukset .....	57
4.2.5	EMAT-ultraääni .....	59
<b>5</b>	<b>TULOKSET .....</b>	<b>60</b>
5.1	Riskiperusteisen tarkastuksen analysointimenetelmät .....	60
5.2	Mittausten tulokset .....	64
5.3	Tulosten integrointi .....	69
<b>6</b>	<b>TULOSTEN POHDINTA JA JATKOTUTKIMUSAIHEET .....</b>	<b>70</b>
6.1	Johtopäätökset ja tulosten analysointi .....	70
6.1.1	Tulevaisuuden näkymät kohdeyrityksen kunnonvalvonnassa .....	75
6.1.2	Tutkimuskysymysten pohdinta .....	77
6.2	Tutkimuksen luotettavuus ja objektiivisuus .....	79
6.3	Tutkimuksen merkitys kohdeyritykselle ja tulosten yleistettävyys .....	80
6.4	Jatkotutkimusaiheet .....	81
6.4.1	Korroosion kontrollointi dokumentaatio .....	81
6.4.2	RBI-ohjelmisto .....	81
<b>7</b>	<b>YHTEENVETO .....</b>	<b>82</b>
	<b>LÄHTEET .....</b>	<b>83</b>
	<b>LIITTEET</b>	

## SYMBOLILUETTELO

AT	Akustinen Emissio
CCDs	Korroosion kontrollointi dokumentit, Corrosion Control Documents
CoF	Vikaantumisen seuraus, Consequence of Failure
CUI	Eristeen alainen korroosio, Corrosion Under Insulation
EMAT	Sähkömagneettinen akustinen anturi, Electromagnetic acoustic transducer
ET	Pyörrevirtatarkastus
EU	Euroopan Unioni
EY	Laitteiden tyyppitarkastus
IoT	Teollinen internet, Internet of Things
IR	Infrapuna
LT	Vuototarkastus
MT	Magneettijauhetaarkastus
NDT	Rikkomaton aineenkoetus, Non-Destructive Testing
PAUT	Vaiheistettu ultraäänitarkastus, Phased Array Ultrasonic Testing
PoF	Vikaantumisen todennäköisyys, Probability of Failure
PT	Tunkeumanestetaarkastus
QA	Laadunvarmistus, Quality Assurance
RBI	Riskiperusteinen tarkastus, Risk-Based Inspection
RCM	Luotettavuuskeskeinen kunnossapito, Reliability Centered Maintenance
RPN	Riskiprioriteettinumero, Risk Priority Number
RT	Radiografinen tarkastus
ST	Venymäliuskatarkastus
TOFD	Kulkuaikatekniikka, Time-of-Flight Diffraction
TT	Infrapunalämpökameratarkastus
TUKES	Turvallisuus- ja kemikaalivirasto
UT	Ultraäänitarkastus
VT	Silmänmääräinen tarkastus

## 1 JOHDANTO

Uusiutuvien biopolttoaineiden kysyntä lisääntyy jatkuvasti nykyisen ilmastopolitiikan sekä tieliikenteen kasvun takia. Vastatakseen poliittisiin vaatimuksiin sekä kysyntään, öljyteollisuuden täytyy pystyä tuottamaan laadukkaita tuotteita tehokkaasti ja turvallisesti. Riskialttiissa prosessiympäristössä ollaan päivittäin tekemisissä korkeiden paineiden, lämpötilojen sekä kemikaalien kanssa, jotka voivat olla myrkyllisiä, helposti syttyviä tai helposti räjähtäviä. Tämä asettaa prosessilaitteiden luotettavalle käytölle ja turvallisuudelle vaatimuksia. Teoriassa, jos kaikki laitteet toimivat täydellisesti, ei minkäänlaisia vikaantumisia pitäisi tapahtua. Tätä ei kuitenkaan pystytä saavuttamaan, mutta riskien tiedostamiseksi ja tunnistamiseksi voidaan käyttää erilaisia riskienhallintamenetelmiä. (Hauptmanns, U. 2013, s. 1.)

Biopolttoaineiden, kuten uusiutuvan biodieselin, valmistuksessa esiintyy aina prosessilaitteiden vikaantumisten riskejä. Vikaantuminen prosessilaitteissa voi vaikuttaa haitallisesti työntekijöihin ja ympäristöön. Prosessilaitteiden luotettavan ja turvallisen toiminnan varmistamiseksi on tehtävä toimenpiteitä, kuten kunnonvalvontaa ja tarkastuksia. (Hauptmanns, U. 2013, s. 1-8.) Prosessilaitteiden kuntoa arvioidaan ja valvotaan erilaisten mittausten, analyysien ja sensoreiden avulla.

### 1.1 Tutkimuksen taustat ja tavoitteet

Kohdeyrityksen prosessilaitoksen turvallisen operoinnin saavuttamiseksi ja ennenaikaisten vikaantumisten välttämiseksi tuotannossa olevia painelaitteita täytyy huoltaa ja korjata. Huoltojen ja korjausten turvallisen suorittamisen takia valmistusprosessi joudutaan ajoittain pysäyttämään. Aika, jolloin huoltoja ja korjauksia voidaan suorittaa, on rajallista ja huoltopysäytykset ovat poikkeuksia lukuun ottamatta ennalta suunniteltuja. Suunnittelemattomien tuotannon pysäytyksien ja huoltopysäytyksien välttämiseksi voidaan tehdä prosessilaitteiden kunnon jatkuvaa seurantaa ja tarkastustoimenpiteitä. Tällöin huoltopysäytyksessä suoritettavia tarkastus- ja korjaustoimenpiteitä voidaan arvioida ja niihin voidaan varautua ennalta.

Huoltopysäytyksien mahdollisimman tehokkaan ja huolellisen suunnittelun avulla voidaan minimoida seisontapäivät ja maksimoida tuotantopäivät. Ajallisesti suurimpia huolto- ja korjauskohteita kohdeyrityksen prosessilaitteissa ovat kriittiseen korkeapainekiertoön sijoitetut painelaitteet. Näiden tarkastukseen, korjaukseen ja huoltoon käytetään painelaitelaissa määritellyn neljän vuoden sisäpuolisen tarkastusvälin välein paljon aikaa. Kunnonvalvonnan ja riskianalyysien avulla voidaan säästää aikaa, jolloin saavutetaan myös taloudellisia hyötyjä.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on kehittää kohdeyrityksen kunnonvalvontaa sekä tuottaa oleellista tietoa prosessilaitteista ja niiden vikaantumismekanismeista huoltopysäytysten optimoimiseksi sekä riskienhallinnan parantamiseksi. Riskienhallinnan analysoimiseksi esitetään numeerisia arvoja käyttäen riskiperusteisessa tarkastuksessa, risk-based inspection (RBI), käytettäviä menetelmiä. Kirjallisuuskatsauksen ja asiantuntijahaastattelujen avulla muodostetaan kuva kriittisen korkeapainekierron mahdollisista vikaantumismekanismeista. Kirjallisuuskatsausta ja asiantuntijahaastattelujen tueksi tutkimuksen kokeellisessa osiossa hyödynnetään rikkomattomia aineenkoetus, non-destructive testing (NDT), -mittauksia todentamaan potentiaaliset vikaantumismekanismit.

Mittausten tulosten sekä kirjallisuuskatsauksen ja asiantuntijahaastattelujen perusteella analysoidaan eri vaihtoehdot korkeapainelaitteiden kunnonvalvontaan. Kunnonvalvonnan ja laitteiden tuntemuksen avulla saavutetaan hyötyjä prosessin turvallisuuden, luotettavuuden ja optimoidun käytön kannalta. Lisäksi hyötyjä saavutetaan huoltopysäytyksiin varautumisessa ja suunnittelussa.

Toissijaisena tavoitteena tutkimuksessa selvitetään, voidaanko kunnonvalvontaa ja riskiperusteisen tarkastuksen analysointimenetelmiä hyödyntää painelaitelaissa määritetyn määräaikaisen painekokeen ajankohdan uudelleenmäärittelyyn. Kunnonvalvonnan ja tarkastustoiminnan avulla voidaan arvioida määräaikaisen painekokeen tarve ja määrittellä ajankohta uudelleen. Riskien hallinnasta, kunnonvalvonnasta ja luotettavuuden lisäämisestä on kohdeyritykselle taloudellisesti suuria hyötyjä, joka asettaa tutkimukselle selvän tarpeen.

## 1.2 Tutkimusongelmat ja tutkimuskysymykset

Kohdeyrityksen prosessille kriittiset painelaitteet ovat normaaleissa olosuhteissa jatkuvasti käytössä, mikä asettaa tarkastukselle sekä kunnonvalvonnalle omat haasteensa. Painelaitelaissa määritellään painelaitteille sisäpuolisten tarkastusten ajanjaksoksi neljä vuotta. Sisäpuoliset tarkastukset määrittelevät kohdeyrityksen huoltopysäytyksille neljän vuoden aikavälin. Neljän vuoden välein suoritettavat tarkastukset, huollot ja korjaukset pyritään tekemään mahdollisimman lyhyen ajanjakson sisällä tuotantopäivien maksimoimiseksi, joten toimenpiteiden pitää olla mahdollisimman nopeita, tehokkaita ja samalla turvallisesti suoritettuja.

Tässä tutkimuksessa tarkasteltavat kriittiset painelaitteet sijaitsevat UPM Lappeenrannan biojalostamon vetykäsittelyosassa, jossa lämpötilat ja prosessipaineet ovat muuhun tuotantolaitteeseen verrattuna korkeita. Lisäksi prosessissa käytetään erilaisia kemikaaleja, kaasuja ja nesteitä. Tarkastettava laitteisto on tuotteena myytävän biodieselin valmistuksen kannalta kriittinen sekä lisäksi kunnossapidon ja tarkastustoiminnan kannalta haasteellinen. Haastavien olosuhteiden takia kohdeyrityksellä on tarve kehittää kunnonvalvontaa ja tarkastustoimintaa näissä laitteissa. Haasteiden pohjalta voidaan muodostaa tutkimuskysymykset tälle tutkimukselle. Tutkimuskysymykset ovat esitettynä alla:

- Mitä vikaantumismekanismeja kohdeyrityksen kriittisessä korkeapaineosassa esiintyy ja miksi?
- Millä menetelmillä voidaan todentaa kriittisten korkeapainelaitteissa esiintyneet vikaantumismekanismit ja miten vikaantumista voidaan ehkäistä?
- Miten kriittisten painelaitteiden kunnonvalvontaa voidaan kehittää kohdeyrityksessä?
- Miten seurantasuunnitelman muodostaminen kriittisille korkeapainelaitteille hyödyttää kohdeyritystä ja miksi?
- Miten seurantasuunnitelma kriittisille korkeapainelaitteille toteutetaan?

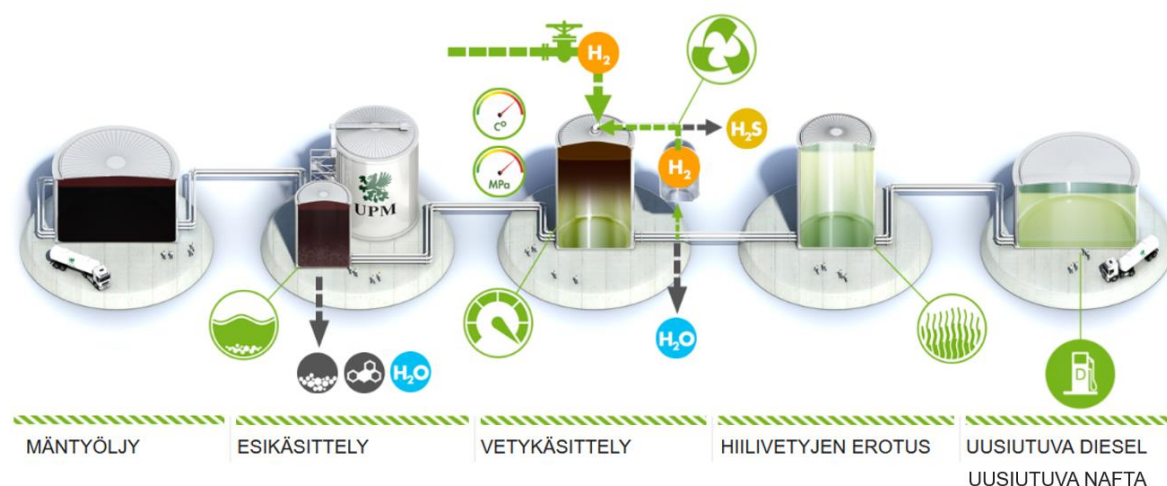
Tutkimuskysymyksiin vastaamalla muodostetaan kohdeyritykselle systemaattinen malli, jonka avulla voidaan laajentaa kunnonvalvonnan kehitystä myös prosessin muihin osiin.

## 1.3 Kohdeyritys

UPM Biopolttoaineiden strategiaan kuuluu vastata kysyntään tarjoamalla uusiutuvia ja kestäviä ratkaisuja petrokemiateollisuuden ja liikenteen tarpeisiin. Tuotteena liikenteeseen

ovat uusiutuva biodiesel sekä nafta. Kestävän kehityksen mukaisesti raaka-aineena tuotteiden jalostukseen käytetään selluntuotannon tähteenä syntyvää mäntyöljyä. Mäntyöljyn hyödyntämisellä pyritään kiertotalouteen, jossa hyödynnetään kaikki sellunkeittoprosesseista syntyvät aineet. (UPM Biofuels 2019.)

UPM Lappeenrannan biojalostamo on vuonna 2015 käyttöön otettu maailman ensimmäinen kaupallisen mittakaavan puupohjaista raaka-ainetta käyttävä biojalostamo. Lappeenrannan biojalostamo tuottaa 100 000 tonnia biopolttoaineita vuodessa. Jalostamon pääprosessi koostuu eri vaiheista, jotka ovat esitetty kuvassa 1. (UPM Biofuels 2019.)



Kuva 1. UPM biojalostamon jalostusprosessin vaiheet (mukaillen UPM Biofuels 2019).

Sellutehtaiden tähteenä syntyvä mäntyöljy kuljetetaan raaka-aineeksi UPM Lappeenrannan biojalostamolle, jossa sitä aletaan jalostamaan eteenpäin kohti uusiutuvaa biodieseliä ja naftaa. Esikäsitteilyosiossa mäntyöljystä puhdistetaan epäpuhtauksia, josta se siirtyy eteenpäin prosessissa vetykäsitteilyyn. Vetykäsitteilyssä prosessissa on korkeat paineet, lämpötilat ja erilaisia kemikaaleja, joilla raaka-ainetta käsitellään. Tässä tutkimuksessa keskitytään juurikin vetykäsitteilyosion korkeapainelaitteisiin. Loppuprosessissa käsitellystä raaka-aineesta erotetaan vielä hiilivedyt ja lopputuotteena saadaan uusiutuvaa biodieseliä ja naftaa. Prosessista saatava uusiutuva biodiesel soveltuu kaikenlaisille dieselmottoreille sellaisenaan (UPM Biofuels 2019).

#### 1.4 Tutkimusmenetelmät

Tämä tutkimus koostuu kahdesta erillisestä osiosta, jotka ovat kirjallisuuskatsaus sekä asiantuntijahaastattelut ja kokeellinen osio. Kirjallisuuskatsauksessa etsitään olemassa olevista tutkimuksista mahdollisia vikaantumismekanismeja, menetelmiä vikaantumisten tunnistamiseksi sekä analysointimenetelmiä vikaantumisesta johtuvien riskien hallitsemiseksi. Kirjallisuuskatsauksesta saatuja tuloksia pyritään varmentamaan asiantuntijoiden haastatteluilla. Asiantuntijoina pidetään tutkimuksessa tarkastuslaitoksen asiantuntijoita, prosessin asiantuntijoita ja muita henkilöitä, joilla arvioidaan olevan tarvittava ammattitaito. Haastattelut suoritetaan vapaamuotoisena suullisena keskusteluna.

Tämän tutkimuksen kokeellisessa osiossa testataan edistyksellisiä rikkomattoman aineenkoetuksen menetelmiä. Kirjallisuuskatsauksesta ja asiantuntijahaastatteluissa selvinneiden potentiaalisten vikaantumismekanismien perusteella valitaan kokeelliseen osioon sopivia rikkomattoman aineenkoetuksen menetelmiä, joilla vikaantumisten vaikutusta pyritään mittaamaan. Kirjallisuuskatsauksen ja kokeellisen osion perusteella esitetään kohdeyritykselle rikkomattomat aineenkoetusmenetelmät sekä jatkuvat kunnonvalvontamenetelmät vikaantumismekanismien havaitsemiseksi.

#### 1.5 Rajaukset

Prosessitarkastelu jaetaan kohdeyrityksen vetykäsittelyosioon ja siihen liittyviin korkeapainelaitteisiin. Vetykäsittelyosio valitaan tutkimukseen, koska laitteiden käyttölämpötilat ja -paineet ovat muihin prosessin osa-alueisiin verrattuna korkeimmat. Vetykäsittelyosiossa esiintyy myös erilaisia kemikaaleja, kemiallisesti korrosoivia kaasuja ja nesteitä, jotka voivat aiheuttaa laitteille kemiallista ja mekaanista vikaantumista. Vetykäsittelyvaihe on prosessille kriittinen, vikaantumiselle potentiaalinen sekä korjausten ja huoltojen kannalta haasteellinen.

Kirjallisuuskatsauksessa hyödynnetään LUT-yliopiston tiedekirjaston tietokantoja, joista etsitään mahdollisimman tuoreita, alle 10 vuotta vanhoja tutkimuksia. Poikkeuksena NDT-menetelmien perusteista kertovat standardit ja teokset, jotka ovat yli 10 vuotta vanhoja, mutta perusajatukseltaan vieläkin paikkansapitäviä. Tehdyistä tutkimuksista valitaan vertailukelpoiseksi tutkimuksia, joissa olosuhteet vastaavat mahdollisimman suurelta osin kohdeyrityksen olosuhteita. Vaikka UPM Lappeenrannan biojalostamo on maailman

ensimmäinen kaupallisen mittakaavan puupohjaista raaka-ainetta hyödyntävä biojalostamo, prosessin periaatteessa on yhtäläisyyksiä perinteiseen öljynjalostukseen. LUT-yliopiston tietokantojen lisäksi tutkimuksessa hyödynnetään kohdeyrityksen sisäisiä tietokantoja sekä laitteiden tarkastus- ja käyttöhistoriaa.

Kokeellisessa osiossa tarkasteltavat NDT-menetelmät valikoidaan kirjallisuuskatsauksesta löytyneiden vikaantumismekanismien, menetelmien soveltuvuuden, käytettävissä olevien resurssien ja aikataulun perusteella. Kokeellisessa osiossa käytetyt NDT-menetelmät valitaan tunnistettavan vikaantumismekanismien, aikataulun ja resurssien puitteissa. Kohteet valikoidaan mahdollisuuksien mukaan normaalia tuotantoa ja prosessia häiritsemättä.

## 2 KIRJALLISUUSKATSAUS

Kirjallisuuskatsauksessa tarkastellaan tämän tutkimuksen eri elementtejä kirjallisuuden näkökulmasta. Kirjallisuuskatsauksessa käydään läpi painelaitteita ja laidansäädäntöä, jossa painelaitteet luokitellaan niiden sisällön ja olosuhteiden perusteella. Luokittelun perusteella painelaitteille määräytyy määräaikaistarkastuksien ja koeponnistuksien aikavälit. Tämän jälkeen kirjallisuuskatsauksessa tarkastellaan kunnonvalvonta- ja tarkastusmenetelmiä sekä niiden soveltuvuutta juuri kohdeyrityksen painelaitteille. Kunnonvalvontaosiossa syvennyttään riskiperusteiseen tarkastukseen ja siinä käytettäviin analysointityökaluihin. Viimeisenä kirjallisuuskatsauksessa tarkastellaan yleisellä tasolla standardoituja painelaitteiden vikaantumismekanismeja öljynjalostamoilla.

### 2.1 Painelaitteet ja lainsäädäntö

Painelaitelaki säätelee Suomessa painelaitteiden suunnittelua, valmistusta sekä käyttöä. EU:n tasolla painelaitteiden yhdenmukaisuutta säädellään aerosoli-, painelaite- ja yksinkertaiset painesäiliöt direktiiveillä. Painelaitteiden käytön valvontaviranomaisena toimii Suomessa Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (TUKES). TUKES valvoo, että painelaitteita käytetään ja ne suunnitellaan painelaitelaissa määriteltyjen turvallisuussäädösten mukaisesti. Painelaitteiden turvallisen käytön vaatimuksena painelaitelaissa määritellään määräaikaistarkastusten sekä määräaikaisten painekokeiden aikavälit. Painelaitelaki 16.12.2016/1144 määrittelee pykälissä 57§ - 59§ rekisteröityjen painesäiliöiden sisäpuolisten tarkastusten tarkastusväliksi neljä vuotta. Painekokeen väliksi määritellään kahdeksan vuotta. Pykälissä 63§ - 69§ määritellään määräaikaisen painekokeen korvaaminen ja siihen vaadittavat toimenpiteet. (Finlex 2016.)

Painelaitedirektiivissä 2014/68/EU annetaan soveltamisohjeita rekisteröityjen painelaitteiden suunnittelulle ja valmistukselle. Rekisteröityjen painelaitteiden tyyppi, sisältö ja ominaisuudet määrittelevät painelaitteiden luokituksen. Painelaitedirektiivin luokittelutaulukot painelaitteille ovat esitettyinä liitteessä I. (CE marking Certification 2019.)

Luokituksen perusteella säädösvaatimukset määrittelevät tarvittavat suunnittelun ja valmistuksen aikaiset turvallisuusvaatimukset ja arviointimenettelyt eli moduulit.

Painelaitteiden valmistuksessa tyyppi, ominaisuudet ja sisältö vaikuttavat myös siihen, täytyykö suunnittelussa ja valmistuksessa olla arvioinnissa mukana kolmas osapuoli. Kolmas osapuoli on jäsenvaltion Euroopan komissiolle ilmoitettu taho, jolla on tarvittavat pätevyudet arviointien toteutukseen. Vaatimusten mukaisesti suunnitellut ja valmistetut rekisteröidyt painelaitteet saavat CE-merkinnän. CE-merkintä annetaan painelaitteille osoittamaan, että ne ovat Euroopan Unionin (EU) vaatimusten mukaisesti suunniteltu ja valmistettu. CE-merkityt painelaitteet luokitellaan luokkiin I-IV, josta luokka IV on vaativin. Luokan I alapuolelle jäävät painelaitteet eivät tarvitse CE-merkintää. (Finlex 2016.)

Riskiluokka määrittelee suunnittelussa ja valmistuksessa käytettävän moduulin. Painelaiteluokka määrittelee arviointimenettelyn laajuuden suunnittelu ja valmistusvaiheessa. Vähiten vaativalle, luokalle I, käytetään moduulia A, joka on menettelyistä kevein. Luokituksessa IV arviointi toteutetaan sopivan laadunvarmistus, quality assurance (QA), järjestelmän mukaan. Painelaitteiden riskiluokat ja vaadittu moduuli on esitetty taulukossa 1. Moduulien selitykset ovat esitetty taulukossa 2.

*Taulukko 1. Arviointimenettelyt (mukaillen painelaitedirektiivi 2014/68/EU).*

Riskiluokka	Ei QA systeemiä		ISO 9000 systeemi tai vastaava	
	Sarjatuotanto	Yksikkötuotanto	Sarjatuotanto	Yksikkötuotanto
<b>I</b>	Moduuli			
	<b>A</b>			
<b>II</b>	<b>A2</b>		<b>D1</b>	<b>E1</b>
<b>III</b>	<b>B + C1</b>	<b>B1 + F</b>	<b>B + E</b>	<b>B1 + D + H</b>
<b>IV</b>	<b>B + F</b>	<b>G</b>	<b>B + D</b>	<b>H1</b>

Taulukko 2. Moduulit ja kuvaukset (Mukaillen TUKES 2019).

Arviointimenettely (moduuli)		Kuvaus
A	Sisäinen tuotannonvalvonta	Valmistaja: tekniset asiakirjat ja loppuarviointi
A2	Sisäinen tuotannonvalvonta ja valvotut painelaitetarkastukset satunnaisin väliajoin	Valmistaja : tekniset asiakirjat ja loppuarviointi Ilmoitettu laitos: valvoo toteutusta
B	EU – tyyppitarkastus (tuotanto ja suunnittelu).	Ilmoitettu laitos: tarkastaa tyypin ja suunnitelman vaatimuksenmukaisuudet
C2	Sisäiseen tuotannonvalvontaan perustuva tyypinmukaisuus ja satunnaisin väliajoin suoritettavat valvotut painelaitetarkastukset.	Valmistaja: loppuarviointi Ilmoitettu laitos: valvoo toteutusta
D	Tuotantoprosessin laadunvarmistukseen perustuva tyypinmukaisuus	Valmistaja: laatujärjestelmän soveltaminen valmistuksessa, testauksessa ja loppuarvioinnissa. Ilmoitettu laitos: hyväksyy laatujärjestelmän ja valvoo noudattamista.
D1	Tuotantoprosessin laadunvarmistus	Valmistaja: tekniset asiakirjat sekä laatujärjestelmän noudattaminen valmistuksessa, testauksessa ja loppuarvioinnissa Ilmoitettu laitos: hyväksyy laatujärjestelmän ja valvoo sen noudattamista
E	Painelaitteiden laadunvarmistukseen perustuva tyypinmukaisuus	Valmistaja: laatujärjestelmän soveltaminen testauksessa ja loppuarvioinnissa. Ilmoitettu laitos: hyväksyy laatujärjestelmän ja valvoo sen noudattamista.

Taulukko 2 jatkuu. Moduulit ja kuvaukset (Mukaiillen TUKES 2019).

E1	Painelaitteiden lopputarkastuksen ja testauksen laadunvarmistus	Valmistaja: tekniset asiakirjat sekä laatujärjestelmän noudattaminen testauksessa ja loppuarvioinnissa. Ilmoitettu laitos: hyväksyy laatujärjestelmän ja valvoo sen noudattamista.
F	Painelaitteiden tarkastukseen perustuva tyypinmukaisuus	Ilmoitettu laitos: tuotekohtainen loppuarviointi
G	Yksikkökohtaiseen tarkastukseen perustuva vaatimuksenmukaisuus	Ilmoitettu laitos: tuotteen suunnitelma- ja loppuarviointi
H	Täydelliseen laadunvarmistukseen perustuva vaatimuksenmukaisuus	Valmistaja: laatujärjestelmän soveltaminen suunnittelussa, valmistuksessa, testauksessa sekä loppuarvioinnissa. Ilmoitettu laitos: hyväksyy laatujärjestelmän ja valvoo noudattamista.
H1	Täydelliseen laadunvarmistukseen ja suunnittelun tarkastukseen perustuva vaatimuksenmukaisuus	Valmistaja: laatujärjestelmän soveltaminen suunnittelussa, valmistuksessa, testauksessa ja loppuarvioinnissa. Ilmoitettu laitos: hyväksyy laatujärjestelmän ja valvoo sen noudattamista. Tekee suunnitelmatarkastuksen ja valvoo loppuarviointia

## 2.2 Kunnonvalvontamenetelmät ja soveltuvuus

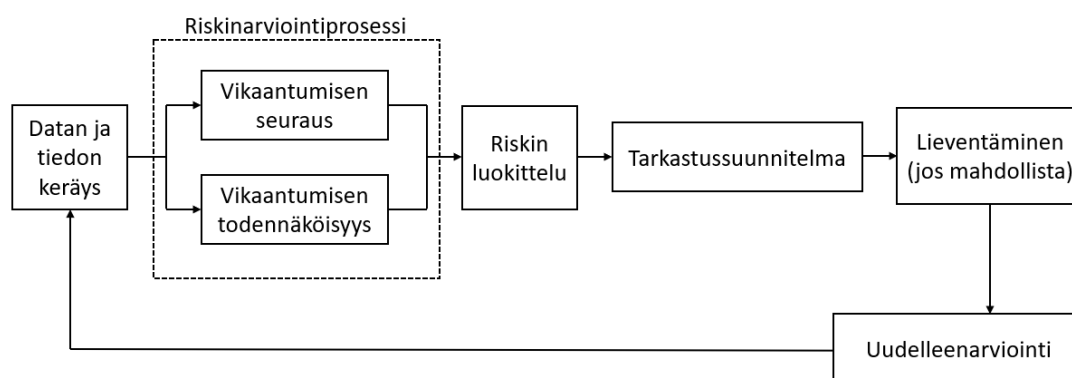
Laitteiden vikaantumiset voivat aiheuttaa henkilövahinkoja ja kunnossapito- sekä laatuksannuksia yrityksille. Tuottoa menetetään aina, kun tuotanto ei ole käynnissä. Tuotannon ollessa pysähdyksissä kustannukset kertautuvat, kun on korjaus- ja kunnossapitokustannuksia, mutta lopputuotetta ei synny. Laitteiden vikaantumista ei voi täydellä varmuudella estää, mutta sopivilla kunnonvalvontamenetelmillä voidaan välttää yllättävät ja enneaikaiset vikaantumiset. Ymmärrys siitä mikä vikaantuu ja milloin tarjoaa mahdollisuuden hallita laitteita ja minimoida vikaantumisesta johtuvat kustannukset. (Schenkelberg, F 2015.)

Maailmanlaajuisesti öljynjalostuksessa pyritään jatkuvasti kehittämään ja tuomaan käytäntöön tehokkaita sekä luotettavia menetelmiä, jotka perustuvat riskiperusteiseen tarkastukseen. Nämä menetelmät ovat kriittisiä lainsäädännön ja laitteiden luotettavuuden kannalta. Luotettavuuskeskeisen kunnossapidon, reliability centered maintenance (RCM), avulla voidaan hallita monipuolisten kokonaisuuksia yhdistelemällä riskiperusteisen tarkastuksen ja luotettavuuskeskeisen kunnossapidon työkaluja yhdeksi luotettavuuden hallinnan kokonaisuudeksi. (Sanford, W. 2015.)

Riskiperusteisen tarkastuksen ja luotettavuuskeskeisen kunnossapidon päätavoitteena on prosessilaitteiden turvallinen ja luotettava käyttö (Sanford, W. 2015). Tässä tutkimuksessa syvennyttään tarkemmin riskiperusteiseen tarkastukseen sekä sen yleisimpiin analysointimenetelmiin ja niiden hyödyntämiseen kohdeyrityksessä. Riskiperusteisen tarkastuksen analysointimenetelmät perustuvat riskien tuntemukseen ja niiden tehokkaan hyödyntämisen apuna käytetään tutkimuksessa API RP 571, API RP 572, API RP 580 ja API RP 581 standardeja.

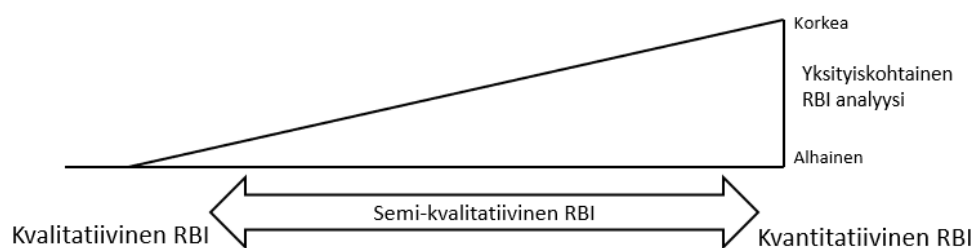
### 2.2.1 Riskiperusteinen tarkastus (RBI)

Luotettavuus määrittellään laitteen kykyä suorittaa haluttua toimintoa suunnitelluissa käyttöolosuhteissa tietyn ennalta määritellyn ajanjakson ajan (SFS ISO 14224 2016, s. 15). Riskiperusteinen tarkastus on tyypillisesti käytetty öljy- ja kaasuteollisuuden laitteiden riskinhallintatyökaluna (API RP 580 2016, s. 1). Riskiperusteisen tarkastusohjelman muodostamiseen liittyvät oleellisesti API RP 571, API RP 572, API RP 580 sekä API RP 581 standardit, joissa esitellään vikaantumismekanismia, riskiperusteista tarkastusta, sen toteuttamista ja erilaisia analysointimenetelmiä. Tyypillisen riskiperusteisen tarkastuksen suunnitteluprosessi on esitetty pääpiirteittäin kuvassa 2.



Kuva 2. Riskiperusteisen kunnossapidon prosessi (mukaiillen API RP 580 2016, s. 19).

Riskien mukaan voidaan arvioida myös, kuinka yksityiskohtaiseen tarkasteluun riskiperusteisella kunnossapidolla pyritään. Riskin kasvaessa myös yksityiskohtaisemmalle tarkastelulle on tarve. Riskiperusteiset kunnossapitomenetelmät voidaan jakaa kvantitatiiviseksi sekä kvalitatiiviseksi. Menetelmiä voidaan yhdistää, jolloin saadut tarkastelut eivät ole yksiselitteisesti kvalitatiivisia tai kvantitatiivisia, vaan mukana on elementtejä molemmista. Oikean menetelmän valinta riippuu arvioidusta riskistä ja sen mukana tulevasta tarkastelun tarpeesta. Menetelmän valinta yksityiskohtien kasvaessa esitetään kuvassa 3. (API RP 580 2016, s. 18-19.)



Kuva 3. Riskiperusteisen lähestymistavan valinta yksityiskohtaisuuden perusteella (mukaiillen API RP 580 2016, s. 16).

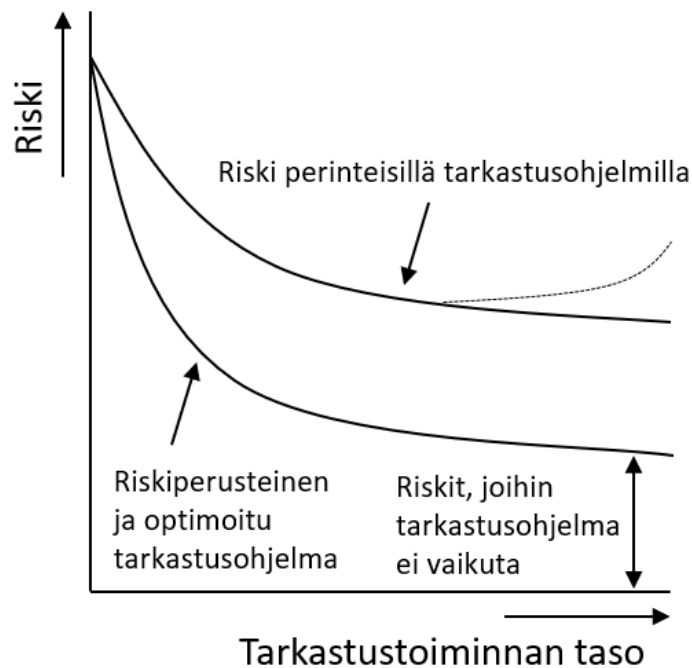
Kvalitatiivista RBI-ohjelmaa voidaan käyttää matalan riskin kohteisiin. Kvalitatiivisessa tarkastusohjelmassa riskit voidaan kuvata sanoin, kuten 'korkea', 'keskitaso' tai 'matala'. Kvalitatiiviseen RBI-ohjelmaan voidaan myös sijoittaa lukuarvoja, jolloin siirrytään yllä olevan kuvaajan mukaan yhdistelmään kvantitatiivisesta RBI-ohjelmasta. Kvalitatiivista

RBI-ohjelmaa tulisi tarkentaa lukuarvoilla, ennen kuin tehdään päätöksiä tarkastusohjelmista. (API RP 580 2016 s. 16-17.)

Kvantitatiivisella RBI-ohjelmalla saadaan yksityiskohtaisempaa tietoa fasilitteettien suunnittelusta, käytöstä, käyttöhistoriasta, komponenttien luotettavuudesta, inhimillisistä tekijöistä, tapaturmien fyysisestä etenemisestä sekä potentiaalisista terveys- ja ympäristövaikutuksista. Kvantitatiivinen RBI-ohjelma soveltuu kohteille, jossa riskit ovat korkeat ja yksityiskohtaisempaa tarkastelua vaaditaan. (API RP 580 2016, s. 16-17.)

Kvantitatiivisen ja kvalitatiivisen yhdistävät RBI-ohjelmat hyödyntävät ominaisuuksia molemmista lähestymistavoista. Yhdistelevien menetelmien tarkoituksena on hyödyntää molemmista lähestymistavoista saatavia hyviä puolia. Pyrkimyksenä on saada tarpeellinen tieto riskeistä tuotettua mahdollisemman yksinkertaisesti ja tehokkaasti. (API RP 580 2016, s. 16-17.)

Riskien perusteella tehdään päätöksiä jokapäiväisessä työelämässä. Päätöksiä tekemiseksi täytyy organisaation tasolla määrittellä riskeille eri tasot. Tasojen avulla voidaan määrittellä, minkä tasoisen riski on vielä siedettävä tai hyväksyttävä. Kokonaisriski koostuu tapahtuman taajuudesta, mahdollisesta seurauksesta ja havaitsemisen epävarmuudesta. Esimerkiksi tarkastustoiminnalla tai jatkuvalla kunnonvalvonnalla voidaan lisätä havaitsemisen varmuutta, jolloin kokonaisriski pienenee. Havaitsemisen varmuuden paranemisen vaikutus kokonaisriskiin on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Tarkastussuunnitelmien vaikutus tarkastustoiminnan tehokkuuteen sekä kokonaisriskiin (mukaillen API RP 580 2016, s. 13).

Kuvaajasta huomataan, että RBI-ohjelman toteutuksessa voidaan saada etuja riskien tunnistamiseen, niiden havaitsemiseen ja korjaukseen vain tiettyyn pisteeseen asti. Kun piste saavutetaan, kustannukset riskiin nähden kasvavat suuriksi. Riskit, jotka ovat tarkastustoiminnan ulottumattomissa ovat esimerkiksi inhimilliset virheet, luonnonkatastrofit, operointivirheet sekä sabotointi. (API RP 580 2016, s. 38.)

Matemaattisesti riski voidaan esittää yhtälössä tapahtuman todennäköisyyden sekä tapahtuman seurauksen kertomana. Riski,  $R$ , on yhdistelmä tietyn tapahtuman todennäköisyydestä,  $P$ , sekä mahdollisesta seurauksesta,  $C$ . Riski esitetään ajan,  $t$ , funktiona. Molemmat tekijät ajatellaan riskiä laskiessa negatiivisessa mielessä. Yhtälö on esitettyä kaavassa 1. (API RP 581 2019, s. 21.)

$$R(t) = P(t) \times C(t) \quad (1)$$

Riskit voidaan järjestää riskiprioriteettinumeron mukaisesti. Matemaattisesti riskiprioriteettinumero,  $RPN$ , saadaan tapahtuman todennäköisyyden,  $P$ , mahdollisten

seurausten,  $C$  sekä havaitsemisen epävarmuuden,  $D$ , kertomana. Yhtälö on esitettyä kaavassa 2.

$$RPN = P \times C \times D \quad (2)$$

RBI hyödyntää ennakoivan kunnossapidon analysointityökaluja, joista keskeisessä osassa ovat juurisyysanalyysit, riskimatriisit sekä syy - seuraus tarkastelut. Analysoitavat kohteet asetetaan eriarvoiseen asemaan riskiprioriteettinumeron perusteella. Jokaiselle tapahtumalle ja laitteelle voidaan muodostaa oma riskimatriisinsa, jossa muodostetaan kokonaiskuva laitteen tai toiminnan kokonaisriskistä. Riskimatriisi on esitettyä kuvassa 5.

	Tapauksia ei tiedossa	Mahdollisuus vikaantumiselle olemassa, mutta tapauksia ei tiedossa	On tapahtunut neljän vuoden ajojakson aikana	On tapahtunut kohdeyrityksessä kerran vuoden ajojakson aikana	On tapahtunut kohdeyrityksessä useita kertoja vuodessa
	1	2	3	4	5
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
Seuraus	Todennäköisyys				

*Vähäinen / matala riski*  
*Keskisuuri / kohtalainen riski*  
*Korkea / siteämätön*

Kuva 5. Riskimatriisi.

Riskimatriisissa seurauksen vakavuus arvioidaan asteikolla 0-5. Seurausten vakavuutta tarkastellaan henkilöiden, ympäristön, omaisuuden ja maineelle sattuneiden vahinkojen kannalta. Asteikolla 0 on alhaisin, jolloin vahingoilla ei ole juurikaan vaikutusta ja 5 on korkein arvo, jolloin seuraukset ovat merkittävät. Tapahtumien taajuutta arvioidaan asteikolla 1-5. Taajuuden pienin arvo 1 tarkoittaa, ettei tapauksia ole tiedossa ja suurin arvo 5, että tapahtumia on tapahtunut kohdeyrityksen sisällä useita kertoja vuodessa.

Seurausten vakavuuden ja todennäköisyyden perusteella sijoitetaan arvot riskimatriisin ruudukoihin. Riippuen paikasta riski voi olla vähäinen/matala (vihreä), keskisuuri/kohtalainen (keltainen) tai korkea/sietämätön (punainen). Punaiselle alueelle

asettavat riskit vaativat toimenpiteitä, joiden avulla riski saadaan hyväksyttävälle tasolle eli vähintään keltaiselle alueelle.

### 2.2.2 Rikkomattomat aineenkoetus menetelmät

Rikkomaton aineenkoetus on tuotteiden laadunvarmistusta valmistuksen jälkeen tai käytön aikana. Nimensä mukaisesti rikkomattomassa aineenkoetuksessa ainetta ei rikota testauksessa. Laadunvarmistuksen kannalta on olennaista, että tarkastuksissa käytetään standardin SFS-EN ISO 9712 mukaisia menetelmiä, tai standardoiduista menetelmistä sovellettuja edistyneempiä versioita. Tekijällä tulee olla riittävät pätevyudet tarkastusten suorittamiseksi. SFS-EN ISO 9712 standardin tueksi voidaan käyttää CEN/TR 14748:2004 standardia. Standardissa SFS-EN ISO 9712 määritellään NDT-menetelmiksi taulukon 3 mukaiset menetelmät.

*Taulukko 3. NDT-menetelmät ja prosessin kuvaus (SFS-EN ISO 9712, 2012, s. 10).*

NDT-menetelmä ja tunnus	Prosessin kuvaus
Akustinen emissio (AT)	Tarkasteltavan kohteen rakenteesta, tai sisällä olevasta nesteestä, leviää ääniaaltoja nopean energianpurkauksen seurauksena. Energianpurkaus tulkitaan muodonmuutoksena. Aaltoja mitataan lähettimellä ja vastaanottimella, jotka muuntavat elastisen aallon sähköiseksi signaaliksi. (SFS-ISO 22096 2007, s. 1-2.)
Pyörrevirtatarkastus (ET)	Menetelmässä hyödynnetään kappaleen elektromagneettista energiaa, jota mitataan kappaleessa kiinni olevilla pyörrevirta-antureilla. Mittauksen avulla saadaan luettua tarkasteltavan kohteen pinnoitteen paksuus. (SFS-EN ISO 21968 2005, s. 8.)

*Taulukko 3 jatkuu. NDT menetelmät ja prosessin kuvaus (SFS-EN ISO 9712, 2012, s. 10).*

Infrapunalämpökameratarkastus (TT)	Infrapuna (IR) kameran avulla mitataan kohteesta emittoitunutta energiaa, joka näkyy eroina kontrasteissa mittauslaitteiston näytöllä. Mittauksessa voidaan etsiä vuotokohtia tai epäjatkuvuuskohtia tarkasteltavasta kappaleesta emittoituneen energian perusteella. (SFS-EN 16714-1 2016, s. 4-8.)
Vuototarkastus (LT)	Vuototestissä tarkasteltava kohde täytetään nesteellä mahdollisten vuotojen löytämiseksi. Neste on yleensä eri kuin prosessissa testin herkkyyden lisäämiseksi, tai saasteiden ja riskien vähentämiseksi. (EN 1779 1999, s. 9-11.)
Magneettijauhetarkastus (MT)	Magneettijauhetarkastuksessa etsitään magneettisen jauheen avulla erityisesti tarkasteltavan kohteen pintojen halkeamia ja muita epäjatkuvuuskohtia. Tarkasteltavalla kohteella tulee olla magneettikenttä, joka on yleensä vähintään 2 kA/m. Jauhetta levitetään tarkasteltavan kohteen pinnalta ja ylimääräinen jauhe poistetaan, jolloin epäjatkuvuuskohtiin jäänyt jauhe jää jäljelle. (SFS-EN ISO 9934-1 2016, s. 5-8.)
Tunkeumanestetarkastus (PT)	Tunkeumanestetarkastusta käytetään tarkasteltavan materiaalin pinnalle muodostuneiden epäjatkuvuuskohtien, kuten saumojen, halkeamien, poimujen, liitosvirheiden tai huokoisuuden havainnointiin. Tunkeumaneste levitetään tarkastettavalle alueelle, josta se tunkeutuu kohteen pinnalla oleviin avoimiin epäjatkuvuuskohtiin. Ylimääräinen neste poistetaan ja tunkeutunut neste jää jäljelle. (SFS-EN ISO 3452-1 2013, s. 10-12.)

*Taulukko 3 jatkuu. NDT menetelmät ja prosessin kuvaus (SFS-EN ISO 9712, 2012, s. 10).*

Radiografinen kuvaus (RT)	Radiografisessa kuvauksessa käytetään joko röntgen- tai gammasäteitä, joilla läpivalaistaan kuvattava kohde. Röntgen- tai gammasäteet kehittävät kameran filmille kuvan kohteen sisäisestä rakenteesta ja mahdollisista poikkeamista. (SFS-EN ISO 5579 2014, s. 10-30.)
Venymäliuskatarkastus (ST)	Venymäliuskatarkastuksessa mitattavaan kohteeseen kiinnitetään venymäliuska-anturi, jonka ominaisuudet muuttuvat jännitysten seurauksesta. Antureiden avulla voidaan mitata kohteeseen kohdistunutta voimaa ja muodonmuutoksen määrää. (Keil, S. 2017, s. 17.)
Ultraäänitarkastus (UT)	Ultraäänitarkastus hyödyntää korkeataajuisia ultraääniaaltoja tunnistaa poikkeamia tarkasteltavasta kohteesta. Ultraäänitarkastukseen kuuluu olennaisesti lähetin ja vastaanotin, joiden avulla saadaan luettavia signaaleja. Tekniikasta riippuen signaali läpäisee tai heijastuu kohteesta vastaanottimeen ja signaalista saadaan luettua poikkeamat. (SFS-EN ISO 16810 2014, s. 14.)
Silmämääräinen tarkastus (VT)	Silmämääräinen tarkastus on NDT-menetelmistä yleisin ja vanhin. Silmämääräisellä tarkastuksella saadaan yleiskuva tarkasteltavan kohteen kunnosta. Silmällä pystytään havaitsemaan poikkeamia ja epäjatkuvuuskohtia. Silmämääräinen tarkastus voidaan laaja-alaisesti pinnoille, joko sellaisenaan tai käyttämällä apuna esimerkiksi optisia apuvälineitä. (Martikainen, J. & Niemi, E. 1993, s. 27-30.)

### 2.2.3 Analysointimenetelmät

Tässä tutkimuksessa käytetään erilaisia analysointimenetelmiä työkaluina, joiden avulla saadaan tarkka käsitys kohdeyritykselle vikaantumismekanismeista, niiden vaikutuksesta ja

siitä, miten niiden tuntemusta voidaan hyödyntää tarkastussuunnitelmissa ja seurantasuunnitelmissa. Osiossa 2.2.1 esitettyjen riskiperusteiseen tarkastukseen liittyvien analysointityökalujen lisäksi tässä tutkimuksessa käytetään integroitua vikaantumismekanismianalyysiä, jossa yhdistetään muista analysointimenetelmistä saadut tulokset. Esimerkki integroidun vikaantumismekanismitaulukkoa on esitetty taulukossa 4.

*Taulukko 4. Esimerkki integroidusta vikaantumismekanismitaulukosta.*

Laitte	Vikaantumismekanismi	Vian mahdollinen vaikutus	Vikaantumisen todennäköisyys	Kriittisyysluokka	Seuraukset	Potentiaalinen syy	Kuinka havaita	Havaitsemisen epävarmuus	Kuinka ehkäistä

Laitteita voidaan tarkastella yksitellen taulukossa täydentämällä vikaantumismekanismit, vikaantumisen mahdolliset vaikutukset, vikaantumisen todennäköisyys, kriittisyysluokka, potentiaalinen syy, havaitsemismenetelmät, havaitsemisen epävarmuus ja toimenpiteet vikaantumisen ehkäisylle. Taulukon sarakkeisiin saadaan arvot kappaleissa 2.2 ja 2.3 esitetyillä menetelmillä.

Kriittisissä korkeapainelaitteissa käytetyt materiaalit vaikuttavat oleellisesti esiintyviin vikaantumismekanismeihin. Materiaaliominaisuuksien vaikutusta vikaantumismekanismeihin voidaan tarkastella ja listata ominaisuudet, joita parantamalla voidaan varautua tunnistettua vikaantumista vastaan. Esimerkki vikaantumismekanismien listauksesta ja materiaaliominaisuuksista, joita parantamalla voidaan ehkäistä vikaantumista, on esitetty taulukossa 5.

*Taulukko 5. Materiaaliominaisuuden vaikutus vikaantumisen ehkäisemiseksi.*

Materiaaliominaisuus	Tyypilliset vikaantumismekanismit	
	Yleinen korroosio	Haurasmurtuma
Korroosiokestävyys		
Iskusitkeys		

### 2.3 Vikaantumismekanismit

API RP 571 standardissa öljynjalostusteollisuudessa yleisimmät vikaantumismekanismit voidaan jakaa neljään eri pääkategoriaan, jotka ovat:

- Mekaaniset ja metallurgiset vikaantumiset
- Yleinen ja paikallinen korroosio
- Korkean lämpötilan korroosio
- Ympäristön avustama säröytyminen

Tässä osiossa tarkastellaan vikaantumismekanismeja jaoteltuna pääkategorioihin ja niiden alalajeihin. Analyysi vikaantumismekanismien yksityiskohtaisesta löytymisestä on tämän tutkimuksen kannalta oleellisessa osassa vikaantumisen juurisyyanalyysien tekemiseksi.

#### 2.3.1 Mekaaniset ja metallurgiset vikaantumiset

##### **Grafitoituminen**

Grafitoituminen on metallin mikrorakenteessa tapahtuva muutos, joka seuraa jatkuvasta operoinnista lämpötila-alueella 427-594°C. Tietyt hiiliteräkset ja niukkaseosteiset C-Mo teräkset ovat karbidivaiheessa korkeissa lämpötiloissa epävakaaita ja saattavat muodostaa grafiittihuokosia mikrorakenteeseen. Tästä voi seurata lujuus-, sitkeys- ja/tai virumisominaisuuksien heikkenemistä. Tyypillisiä laitteita, joista grafitoitumista voidaan löytää ovat kuumaöljyputkistot, reaktorit sekä paikat, joissa katalyyttiä käsitellään. (API RP 571 2011, s. 3-6.)

##### **Pehmeneminen**

Pehmeneminen on metallin mikrorakenteessa tapahtuva muutos, joka seuraa jatkuvasta operoinnista lämpötila-alueella 440-760°C. Tietyt hiiliteräkset ja niukkaseosteiset Cr-Mo teräkset käyttäytyvät epävakaasti karbidivaiheessa korkeissa lämpötiloissa ja saattavat muodostaa pieniä pallomaisia muotoja mikrorakenteeseen. Tästä voi seurata lujuus- ja virumisominaisuuksien heikkenemistä. Tyypillisiä öljynjalostamon laitteita, joissa pehmenemistä voidaan löytää ovat putkistot, lämmönvaihtimet sekä laitteet, joissa käsitellään katalyyttiä. (API RP 571 2011, s.7-9.)

##### **Lämpöaurastuminen**

Lämpöaurastuminen on materiaalin sitkeysominaisuuksien heikkenemistä, joka johtuu metallurgisista muutoksista. Lämpöaurastumista tapahtuu niukkaseosteisilla teräksillä

jatkuvan altistuksen lämpötila-alueelle 343-577°C seurauksena. Seurauksena teräksen transitiolämpötila muuttuu suuremmaksi. Transitiolämpötilan muutos voidaan todeta Charpy -iskukokeella. Seuraus lämpöaurastumisesta voi olla haurasmurtuma, joka esiintyy ylösajon yhteydessä. Lämpöaurastumista havaitaan tyypillisesti vetykäsittely-yksiköissä, varsinkin reaktoreissa ja syötön lämmönvaihtimissa. (API RP 571 2011, s.10-13.)

### **Ikääntyminen**

Ikääntyminen on tyypillinen vikaantumismekanismi varsinkin vanhemmille hiiliteräksille ja niukkaseosteisille C-Mo teräksille. Ikääntymisen seurauksena on kovuus- ja lujuusominaisuuksien lisääntyminen sekä sitkeysominaisuuksien heikkeneminen. Väsymistä esiintyy tyypillisesti painesäiliöissä, joissa on suuri seinämävahvuus ja joita ei ole valmistusvaiheessa vapautettu jännityksistä. (API RP 571 2011, s. 14-15.)

### **475°C lämpötilassa tapahtuva haurastuminen**

Materiaalin haurastuminen tapahtuu yli 475°C lämpötilassa teräksissä, jotka sisältävät ferriittisiä osia. Lämpötila-alueelle 326-540°C altistumisen seurauksena voidaan havaita sitkeysominaisuuksien heikkenemistä. Haurastumista esiintyy ferriittisillä ruostumattomilla teräksillä sekä duplex-teräksillä. Tyypillisiä kohteita, joilla haurastumista esiintyy ovat esimerkiksi duplex-teräksestä valmistetut lämmönvaihtimet tai vakuumiyksiköt. Tyypillisesti seurauksena on hitsiliitosten repeämät ja halkeamat. (API RP 571 2011, s. 16-18.)

### **Sigma-haurastuminen**

Sigma-haurastuminen tapahtuu teräksen valmistusvaiheessa, jonka nimi on sigma-vaihe. Sigma haurastuminen voi johtaa materiaalin murtolujuusominaisuuksien heikkenemiseen. Sigma-haurastuminen vaikuttaa tiettyihin ruostumattomiin teräksiin, jotka altistuvat käytössä korkeille lämpötiloille. Sigma-haurastumista esiintyy tyypillisesti esimerkiksi lämmönvaihtimien tuubien tuubi-vaippaliitoksien hitseissä. (API RP 571 2011, s. 19-26.)

### **Haurasmurtuma**

Haurasmurtuma on äkillinen jännityksistä johtuva murtuma, jossa materiaalissa ei välttämättä ole ennalta havaittavissa merkkejä vikaantumisesta. Hiiliteräkset, niukkaseosteiset teräkset ja tietyt ruostumattomat teräkset ovat alttiita haurasmurtumille.

Potentiaalisia haurasmurtuman alkamiskohtia ovat muun muassa epäjatkuvuuskohdat tai olemassa olevat säröt. Haurasmurtumia esiintyy tyypillisesti vetykäsittelyosissa, korkeiden lämpötilojen alueilla ja paineastioissa. Haurasmurtumia löydetään tyypillisesti painekokeissa. (API RP 571 2011, s. 27-31.)

### **Virumis- ja jännitysrepeämät**

Korkeissa lämpötiloissa kuormitetut metallirakenteet muuttavat muotoaan ja venyvät. Korkeissa lämpötiloissa tapahtuvien muodonmuutosten ja jännitysten seurauksena voi syntyä repeämiä, joita kutsutaan virumis- ja jännitysrepeämiksi. Virumis- ja jännitysrepeämät voivat esiintyä kaikilla metalleilla ja seoksilla. Altistuneita laitteita ovat korkeissa lämpötiloissa toimivat laitteet, kuten öljynjalostamoiden vetykäsittely- ja reaktoriosien painelaitteet. (API RP 571 2011, s. 32-38.)

### **Terminen väsyminen**

Termistä väsymistä esiintyy laitteissa, jotka ovat vaihtelevan lämpötilakuormituksen alaisena. Vikaantumisen seurauksena voidaan löytää halkeamina ja säröjä. Termistä väsymistä voi tapahtua kaikilla konstruktiomateriaaleilla. Kohteet, jotka ovat erityisen alttiina termiselle väsymiselle ovat kohteet, jossa yhdistyvät kuuman ja kylmän nesteen virtaus. Esimerkiksi vetykäsittelyosien painelaitteissa, lämmönvaihtimien tuubeissa sekä lämmittimissä voidaan havaita termistä väsymistä. (API RP 571 2011, s. 39-45.)

### **Ylikuumeneminen – jännitysrepeämä**

Paikallisen ylikuumenemisen seurauksena voi aiheutua pysyvä plastinen muodonmuutos. Ylikuumenemisestä johtuvia plastisia muodonmuutoksia voidaan löytää kaikilta materiaaleilta, jos ylikuumenemisen seurauksena päädytään sallittujen käyttölämpötilojen yli. Tyypillisiä laitteita, joissa ylikuumenemisestä aiheutuneita muodonmuutoksia voidaan havaita ovat esimerkiksi lämmönvaihtimet, kattilat sekä vetykäsittelyosien reaktorit. (API RP 571 2011, s. 46-50.)

### **Höyrypeite**

Höyrypeite muodostuu, kun lämpöenergia muodostaa laitteiston seinämille virtauksen sekaan höyrykuplia. Virtaava neste työntää seinämille muodostuneet höyrykuplat eteenpäin, yksittäiset höyrykuplat yhdistyvät ja syntyy höyrypeite. Höyrypeite muodostaa nopean

paikallisen lämpötilan nousun, jonka seurauksena voi syntyä repeämä. Materiaaleja, joissa höyrypeitettä voi esiintyä ovat hiiliteräkset ja niukkaseosteiset teräkset. Öljynjalostamon laitteistoa, jossa höyrypeitteestä aiheutunutta vikaantumista voidaan löytää ovat lämmönvaihtimet, vetyä sisältävät painelaitteet sekä höyrykehittimet ja kattilat. (API RP 571 2011, s. 51-53.)

### **Eripari metallihitsien murtuminen**

Eripari metallihitsien murtuminen tapahtuu austeniittisten ja ferriittisten hitsien välillä korkeissa lämpötiloissa. Murtuminen tapahtuu aina eripari hitsin ferriittiseltä puolelta. Murtuminen tapahtuu virumisvaurion, väsymismurtuman, sulfiittijännitysmurtuman tai vedyn irtoamisen seurauksena. Vikaantuminen johtuu materiaalien lämpölaajenemisominaisuuksien eroista. Eripari metallihitsejä esiintyy öljynjalostamoilla esimerkiksi lämmönvaihtimissa sisääntulo- ja ulostuloputkistojen liitoksissa. (API RP 571 2011, s. 54-62.)

### **Lämpöshokki**

Lämpöshokki on lämpöaurastumisen muoto. Lämpöshokki voi esiintyä, kun korkeat ja epäyhtenäiset jännitykset muodostuvat lyhyessä ajassa laitteen osassa differentiaalisen laajenemisen tai supistumisen seurauksena. Jos laajenemista tai supistumista rajoitetaan, voi esiintyä jännityksiä, jotka ovat suurempia kuin sallittu myötöraja. Lämpöshokin seurauksena voi laitteistoon tai putkistoon syntyä halkeamia. Lämpöshokki esiintyy yleensä, kun kylmä neste kohtaa kuumaa metallipinnan. Lämpöshokkeja esiintyy tyypillisesti öljynjalostamoiden vetykäsittelyosioissa sekä putkistoissa. (API RP 571 2011, s. 63-64.)

### **Eroosio / Eroosiokorroosio**

Eroosio on normaalia nopeampaa materiaalin pinnankulumista, joka johtuu suhteellisesta liikkeestä, kiinteiden aineiden vaikutuksesta, nesteistä, höyrystä tai näiden yhdistelmästä. Eroosiokorroosio kuvaa vikaantumismekanismeja, joka esiintyy, kun korroosiolla on kontribuutiota eroosioon syövyttämällä materiaalin suojaimekanismit eroosion tieltä. Eroosiota ja eroosiokorroosiota esiintyy kaikkialla öljynjalostamoympäristössä, jossa esiintyy nesteiden tai höyryjen liikettä ja varsinkin putkissa, katalyyttiosissa, reaktoreissa sekä pyörivissä laitteissa. (API RP 571 2011, s. 65-69.)

### **Kavitointi**

Kavitointi on eroosion muoto, joka johtuu pienien höyrykuplien muodostumisesta ja puhkeamisesta. Puhkeavat kuplat aiheuttavat paikallisia iskuja, josta seuraa kavitointivaurioksi kutsuttua metallin ohenemista. Tyypilliset materiaalit, joissa kavitointivaurioita voidaan havaita ovat kupari, messinki, valurauta, hiiliteräkset, tietyt ruostumattomat teräkset sekä nikkelipohjaiset metalliseokset. Tyypilliset öljynjalostuksessa käytetyt laitteet, joissa havaitaan kavitointia ovat pumput, putkistot, lämmönvaihtimet ja muut kohteet, joissa esiintyy turbulenttista virtausta. (API RP 571 2011, s. 70-73.)

### **Mekaaninen väsyminen**

Mekaanista väsymistä tapahtuu, kun materiaali altistuu vaihtelevalle kuormitukselle suunniteltua käyttöikää pidemmäksi ajaksi. Seurauksena esiintyy tyypillisesti yllättävä ja äkillinen vikaantuminen, kuten halkeama tai vuoto. Mekaaniselle väsymiselle altistuu esimerkiksi öljynjalostamoiden vetylaitosten laitteisto, absorberit, höyryn reduktiolaitteisto sekä korkeapaineosien säätöventtiilit. (API RP 571 2011, s. 74-80.)

### **Tärinän aiheuttama väsyminen**

Tärinän aiheuttama väsyminen on mekaanisen väsymisen muoto, jossa halkeamat johtuvat dynaamisesta kuormituksesta ja sen aiheuttamasta tärinästä. Dynaaminen kuormitus voi johtua tärinästä tai nesteen epätasaisesta virtauksesta. Tärinän amplitudi ja frekvenssin synkronoiduttua komponentin ominaistaajuuden kanssa todennäköisyys halkeamalle kasvaa huomattavasti. Tärinän aiheuttamalle väsymiselle altistuu öljynjalostamoympäristössä esimerkiksi pienen halkaisijan putkistot, kompressorit, varoventtiilit, säätöventtiilit sekä lämmönvaihtimien tuubit. (API RP 571 2011, s. 81-83.)

### **Tulenkestävien rakenteiden rappeutuminen**

Lämpöä ja eroosiota kestävät rakenteet ovat herkkiä mekaanisille vaurioille, kuten halkeilulle, lohkeilulle ja eroosiolle. Mekaanisten vaurioiden lisäksi materiaalit ovat herkkiä myös hapettumisesta johtuvalle korroosiolle, sulfidoitumiselle ja muille korkean lämpötilan vikaantumismekanismeille. Tulenkestäviä materiaaleja ovat erilaiset keraamiset kuidut, tulenkestävät tiilet sekä tulenkestävät muovit. Tulenkestävän materiaalin hajoaminen on tyypillistä esimerkiksi reaktoreissa, putkistoissa sekä kattiloissa. (API RP 571 2011, s. 84-86.)

### **Uudelleenlämmityksestä johtuva halkeilu**

Uudelleenlämmityksessä johtuva halkeilu johtuu hitsauksen jälkeisten lämpökäsittelyjen aiheuttamien jännitysten purkautumisista tai materiaalin jatkuvasta käytöstä yli 399°C lämpötiloissa. Uudelleenlämmityksestä johtuvaa halkeilua voidaan usein havaita paksuissa seinämissä varsinkin Cr-Mo teräksissä, joihin on lisätty vanadiumia ja tietyissä ruostumattomissa teräksissä sekä nikkelpohjaisissa seoksissa. Tyypillisiä kohteita uudelleenlämmityksestä johtuvalle halkeilulle ovat kohteet, joissa on läpivientejä ja seinämävahvuus on suuri. (API RP 571 2011, s. 87-92.)

### **Kaasumaisen hapen rikastama syttyminen ja palaminen**

Monet metallit syttyvät hapessa ja rikastetussa ilmassa (>25% happea) jopa matalissakin paineissa. Spontaani metallien laajeneminen aiheuttavaa syttymiä ja räjähdyksiä tietyissä olosuhteissa, jos niitä ei ole asianmukaisesti kontrolloitu. Tyypillisiä materiaaleja kaasumaisen hapen rikastamalle syttymille ja palamiselle ovat hiiliteräkset, niukkaseosteiset teräkset, titaani ja alumiini. Helpoimmin syttyviä materiaaleja ovat muovit, kumit ja voiteluaineet. Kaikki alueet, jossa rikastettua ilmaa esiintyy, voivat olla alttiina kaasumaisen hapen rikastamalle syttymiselle ja palamiselle. (API RP 571 2011, s. 93-100.)

#### 2.3.2 Yleinen ja paikallinen korroosio

##### **Galvaaninen korroosio**

Galvaaninen korroosio on korroosion muoto, joka esiintyy, kun erilaiset metallit yhdistettynä sopivaan elektrolyyttiin reagoivat sähkökemiallisesti. Reaktio voi alkaa esimerkiksi paikoissa, joihin pääsee maaperän kautta kosteutta, vaikka kosteutta ei saisi olla. Kaikki metallit ovat alttiina galvaaniselle korroosiolle, pois lukien jalometallit. Varsinkin lämmönvaihtimissa, joissa vaipan materiaali eroaa tuubien materiaalista, voidaan havaita galvaanista korroosiota (API RP 571 2011, s. 101-104.)

##### **Ympäristöolosuhteista johtuva korroosio**

Ympäristöolosuhteista johtuva korroosio on korroosion muoto, joka johtuu kosteudesta ilmakehässä. Ympäristöstäolosuhteista johtuva korroosio on tyypillisintä rannikko-olosuhteissa. Varsinkin hiiliteräkset, niukkaseosteiset teräkset ja kupariseokset ovat alttiina ympäristöolosuhteista johtuvalle korroosiolle. Tyypillisiä kohteita, joissa

ympäristöolosuhteista johtuvaa korroosiota esiintyy, ovat vaihtelevan lämpötilakuormituksen alaiset laitteet, säiliöt, huonosti pinnoitetut laitteet, pitkään käyttämättömänä olevat laitteet sekä putkistot. (API RP 571 2011, s. 105-107.)

### **Eristeen alainen korrosio**

Eristyksen alainen korrosio, corrosion under insulation (CUI), johtuu putkistoiden, painelaitteiden ja rakenteellisten komponenttien eristyksestä tai suojauksesta. Hiiliteräkset, niukkaseosteiset teräkset, tietyt ruostumattomat teräkset ja duplex-teräkset ovat tyypillisesti alttiina eristeen alaiselle korroosiolle. Tyypillisiä kohteita eristeen alaiselle korroosiolle ovat kohteet, joissa eriste tai suojaus on paikallisesti vaurioitunut ja kosteus on päässyt eristeen ja prosessilaitteen väliin. Eristeen alainen korrosio on öljynjalostamoympäristössä yksi suurimmista korroosion aiheuttajista. (API RP 571 2011, s. 108-116.)

### **Jäähdytysveden aiheuttama korrosio**

Jäähdytysveden aiheuttama korrosio on varsinkin hiiliteräksillä esiintyvä korroosimuoto, jonka aiheuttaa jäähdytysveteen päätyneet suolat, kaasut, orgaaniset yhdisteet tai mikrobiologinen aktiivisuus. Hiiliteräksien lisäksi ruostumattomat teräkset, kupari, alumiini, titaani ja nikkelpohjaiset seokset ovat alttiita jäähdytysveden aiheuttamalle korroosiolle. Jäähdytysveden aiheuttamaa korroosiota voi esiintyä varsinkin lämmönvaihtimissa ja jäähdytysyksiköissä. (API RP 571 2011, s. 117-119.)

### **Kattilaveden kondensaatiosta johtuva korrosio**

Kattilan veden kondensaatiosta johtuva korrosio on kattilasysteemeissä sekä kondensaatioputkistossa yleisesti ja pistemäisesti esiintyvää korroosiota, joka johtuu liuenneista kaasuista, hapesta tai hiilidioksidista. Kriittisinä tekijöinä kattilaveden kondensaatiosta johtuvalle korroosiolle ovat liuenneiden kaasujen koostumus, pH sekä lämpötila. Hiiliteräkset, tietyt niukkaseosteiset teräkset, tietyt ruostumattomat teräkset sekä kupariseokset ovat tyypillisesti alttiina kattilaveden kondensaatiosta johtuvalle korroosiolle. (API RP 571 2011, s. 120-123.)

### **Hiilidioksidin aiheuttama korrosio**

Hiilidioksidin aiheuttama korrosio on korroosion muoto, joka aiheutuu, kun hiilidioksidi liukenee veteen muodostaen hiilihappoa. Hiilihappo madaltaa pH -arvoa, joka riittävästi

aletessaan aiheuttaa yleisestä korroosiota ja pistekorroosiota. Hiilidioksidikorroosiolle ovat alttiina hiiliteräkset sekä niukkaseosteiset teräkset. Hiilidioksidikorroosiota voidaan havaita esimerkiksi kattiloiden kondensaatiojärjestelmissä. (API RP 571 2011, s. 124-127.)

### **Savukaasun kastepisteen korroosio**

Savukaasun kastepisteen korroosiota muodostuu, kun rikki- ja kloorilajit polttoaineessa muodostavat rikkidioksidia. Matalissa lämpötiloissa nämä kaasut ja vesihöyry kondensoituvat ja muodostavat rikkihappoa ja suolahappoa, jotka aiheuttavat korroosiota. Savukaasun kastepisteen korroosiolle on alttiina hiiliteräkset, niukkaseosteiset teräkset sekä ruostumattomat teräkset. Tyypillisesti savukaasun kastepisteen korroosiota voidaan havaita lämmittimissä ja kattiloissa. Myös ruostumattomasta teräksestä valmistetut syötön lämmönvaihtimet ovat alttiina savukaasun kastepisteen korroosiolle. (API RP 571 2011, s. 128-129.)

### **Mikrobiologisesti indusoitunut korroosio**

Mikrobiologisesti indusoitunut korroosio on korroosion muoto, jossa elävät organismit, kuten bakteerit, levät tai sienet, erittävät orgaanisia aineita. Erilaisten orgaanisten eliöiden ominaisuuksien takia mikrobiologisesti indusoitunutta korroosiota voidaan havaita monissa eri ympäristöissä ja laajalla lämpötila-alueella (-17°C-113°C). Mikrobiologisesti indusoitunut korroosio vaikuttaa hiiliteräksiin, niukkaseosteisiin teräksiin, tiettyihin ruostumattomiin teräksiin, kupariseoksiin sekä tiettyihin nikkelseoksiin. Mikrobiologisesti indusoitunutta korroosiota voidaan löytää tyypillisesti lämmönvaihtimista, varastosäiliöiden pohjista sekä laitteista, jotka ovat suojaamattomina ulkoilmassa. (API RP 571 2011, s. 130-135.)

### **Maaperän aiheuttama korroosio**

Maaperästä aiheutuvaa korroosiota esiintyy, kun metalli pääsee altistumaan maaperässä oleville aineille. Eniten korrosoivaa maaperää on maaperä, jossa on paljon kosteutta, liuennaita happoja tai liuennutta suolaa. Maaperässä olevat aineet voivat altistaa hiiliteräkset, valuraudat ja pallografiittiraudan korroosiolle. Altistuneita kohteita ovat kaikki laitteet, jotka pääsevät maaperän kanssa kosketuksiin, mutta varsinkin maanalaiset putkistot ja säiliöt ovat alttiina maaperän aiheuttamalle korroosiolle. (API RP 571 2011, s. 136-139.)

**Kaustinen korroosio**

Kaustinen korroosio on yleistä korroosiota, joka johtuu emäksisten aineiden tai emäksisten suolojen pitoisuudesta. Kaustinen korroosio tapahtuu usein korkeissa haihdutus- tai lämmönsiirto-olosuhteissa. Kaustiselle korroosiolle ovat alttiina hiiliteräkset, niukkaseosteiset teräkset sekä tietyt ruostumattomat teräkset. Tyypillisiä kohteita, joista kaustista korroosiota voidaan löytää ovat kattilat, höyryn generointilaitteisto sekä lämmönvaihtimet. (API RP 571 2011, s. 140-142.)

**Uudelleen seostuminen**

Uudelleen seostuminen on valikoivan korroosion mekanismi, jossa korroosio vaikuttaa yhteen tai useampaan seosaineeseen korroosiolle edullisesti. Seurauksena altistuneiden kohteiden tiheys heikkenee ja mikrorakenteeseen voi tulla huokoisuutta. Tyypillisiä materiaaleja, joihin uudelleen seostuminen vaikuttaa ovat kupariseokset, valuraudat sekä Monel 400. Tyypillisiä kohteita, joista uudelleen seostumista voidaan havaita ovat maanalaiset teräsputket, jäähdytysveden laitteistot, messinkiset lämmönvaihtimien tuubit sekä kattiloiden syöttölinjat. (API RP 571 2011, s. 143-146.)

**Grafiittinen korroosio**

Grafiittinen korroosio on uudelleen seostumisen muoto, jossa tyypillisesti valurautojen materiaalmatriisi korrosoituu, jolloin tilalle jää korroosiotuotteita ja huokoista grafiittia. Huokoinen rakenne heikentää tiheys-, lujuus- ja sitkeysominaisuuksia. Grafiittiselle korroosiolle altistuu pääasiassa harmaat valuraudat sekä muut valurautatyypit pois lukien valkoiset valuraudat. Tyypillisiä kohteita, jotka voivat altistua grafiittiselle korroosiolle ovat maanalaiset putkistot, palovesijärjestelmät ja kattiloiden syöttölinjat. (API RP 571 2011, s. 147-152.)

**2.3.3 Korkean lämpötilan korroosio****Hapettuminen**

Hapettuminen tapahtuu, kun happi reagoi hiiliteräksen ja muiden seosten kanssa korkeissa lämpötiloissa muuttaen metallia oksidiksi. Hapettumista esiintyy, koska happea on ympäröivässä ilmassa, jota käytetään polttamiseen lämmittimissä ja kattiloissa. Hapettumiselle ovat alttiina kaikki rautapohjaiset materiaalit, kuten hiiliteräkset ja niukkaseosteiset teräkset sekä ruostumattomat teräkset ja nikkelseokset. Altistuneita

kohteita voivat olla myös kaikki putkistot ja laitteistot, joiden käyttölämpötila on yli 538°C. (API RP 571 2011, s. 153-158.)

### **Sulfidoituminen**

Sulfidoituminen on korroosiota, joka johtuu materiaalin reagoinnista rikkiyhdisteiden kanssa korkeissa lämpötiloissa. Samassa tilassa oleva happi kiihdyttää sulfidoitumista eli sulfidista korroosiota. Rautaperäiset materiaalit, kuten hiiliteräkset, niukkaseosteiset teräkset, tietyt ruostumattomat teräkset sekä nikkelseokset ovat alttiina sulfidoitumiselle. Sulfidoitumiselle ovat alttiina kaikki laitteet, joita käytetään korkeissa lämpötiloissa ja jotka ovat rikkiä sisältävissä ympäristöissä. Tällaisia laitteita ovat esimerkiksi vetykäsittelyn laitteet ja putkistot, kattilat ja lämmittimet. (API RP 571 2011, s. 159-165.)

### **Hiilettyminen**

Hiilettymistä tapahtuu, kun hiiltä absorboituu materiaalista toiseen korkeissa lämpötiloissa. Hiilettyminen vaatii hiilipitoisen materiaalin tai ympäristön, jotta hiiltä voi absorboitua. Hiilettymiselle alttiita materiaaleja ovat hiiliteräkset, niukkaseosteiset teräkset, tietyt ruostumattomat teräkset sekä rautapohjaiset nikkelseokset. Tyypillisiä kohteita, joissa hiilettymistä voidaan havaita ovat lämmittimien tuubit sekä katalyytin käsittelyyn liittyvät laitteistot. (API RP 571 2011, s. 166-168.)

### **Hiilikato**

Hiilikato tapahtuu, kun hiilihiukkaset irtoavat rautamatriisista korkeissa lämpötiloissa ja kaasumaisessa ympäristössä. Hiilikadosta seuraa rakenteen lujuusominaisuuksien heikkenemistä. Tyypillisiä materiaaleja, joissa voi esiintyä hiilikatoa ovat hiiliteräkset ja niukkaseosteiset teräkset. Öljynjalostamoympäristössä hiilikatoa voidaan löytää kaikista laitteista ja putkistoista, jotka ovat korkeissa lämpötiloissa ja sisältävät hiiltä. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi vetykäsittely- ja katalyyttiosat jalostamoilla. (API RP 571 2011, s. 169-171.)

### **Metallipöly**

Metallipöly on hiilettymisen muoto, joka johtuu kiihtyneestä paikallisesta pistekorroosiosta. Paikallista pistekorroosiota kiihdyttää hiilipitoiset kaasut sekä vetyä ja happea sisältävät virrat. Pistekorrosio muodostaa materiaalin pinnalle kuoppia, jotka voivat sisältää nokea ja

grafiittipölyä. Materiaalit, jotka voivat altistua metallipölylle ovat niukkaseosteiset teräkset, ruostumattomat teräkset, nikkelseokset ja lämmönkestävät metalliseokset. Metallipölyä voi esiintyä lämmittimien tuubeissa, uunien komponenteissa, reaktoreissa sekä reformerituubeissa. (API RP 571 2011, s. 172-174.)

### **Polttoainetuhkan aiheuttama korroosio**

Polttoainetuhkan aiheuttama korroosio on korkeissa lämpötiloissa kiihtyvä korroosio, joka tapahtuu, kun polttoaineen epäpuhtaudet kuluttavat lämmittimien, kattiloiden ja kaasuturbiinien metallipintoja. Korroosio esiintyy tyypillisesti polttoaineena käytetyn öljyn tai hiilen palamisesta aiheutuvista epäpuhtauksista. Epäpuhtaudet koostuvat pääasiassa rikistä, natriumista, kaliumista tai vanadiinista. Kaikki materiaalit, joita käytetään kattiloissa tai lämmittimissä ovat alttiita polttoainetuhkan aiheuttamalle korroosiolle. Tyypillisiä kohteita, joissa polttoainetuhkan aiheuttamaa korroosiota voi esiintyä ovat lämmittimien tuubiryhmät, kaasuturbiinit ja kattilat. (API RP 571 2011, s. 175-179.)

### **Typettyminen**

Typettymisessä typen yhdisteitä, kuten syanideja ja ammoniakkia, sisältävät korkean lämpötilan virrat muodostavat materiaalin pinnalle ohuen kovan pintakerroksen. Typettymiselle altistuvia materiaaleja ovat hiiliteräkset, niukkaseosteiset teräkset, ruostumattomat teräkset, sekä nikkelipohjaiset seokset. Typettyminen on harvinainen vikaantumismekanismi, mutta sitä voidaan tavata öljynjalostamoilla, jos sopivat olosuhteet ja lämpötilat kohtaavat. Esimerkiksi metaanin reformerit voivat altistua typettymiselle. (API RP 571 2011, s. 180-183.)

#### 2.3.4 Ympäristön avustama säröytyminen

### **Kloridin aiheuttama jännityskorroosiohalkeama**

Kloridin aiheuttama jännityskorroosiohalkeama esiintyy, kun oikea lämpötila ja kloridipitoinen ympäristö yhdistyvät. Seurauksena materiaalin pinnalle muodostuu säröjä ja halkeamia. Jos olosuhteissa esiintyy happia, halkeamien kasvu kiihtyy. Tietyt ruostumattomat terästyypit sekä nikkelipohjaiset seokset ovat alttiina kloridin aiheuttamalle jännityskorroosiohalkeamalle. Kloridin aiheuttamia jännityskorroosiohalkeamia voi esiintyä tyypillisesti putkistoissa, painelaitteissa, vetykäsittelyosien viemäreissä sekä kattiloiden viemäriinjoissa. (API RP 571 2011, s. 184-192.)

**Väsymiskorroosio**

Väsymiskorroosio on väsymisen muoto, jossa säröt kehittyvät kuormituksen ja korroosion seurauksena. Säröt lähtevät yleensä samanaikaisesti liikkeelle pinnalla olevista kuopista useista paikoista. Kaikki metallimateriaalit ovat alttiina väsymiskorroosiolle. Tyypillisesti väsymiskorroosiota voidaan havaita pyörivissä laitteissa, kaasunpoistimissa sekä kattiloissa. (API RP 571 2011, s. 193-198.)

**Kaustisen korroosion aiheuttama halkeilu**

Kaustisesta korroosiosta johtuva halkeilu on jännityskorroosion muoto, jossa korroosiosta johtuvien jännitysten takia materiaalin pinnalle muodostuu säröjä. Kaustisen korroosion aiheuttamat vikaantumiset ovat tyypillisiä putkistoissa ja erityisesti lämpökäsittelymättömissä hitseissä. Kaustisen korroosion aiheuttamalle halkeilulle ovat alttiina hiiliteräkset, niukkaseosteiset teräkset sekä ruostumattomat teräkset. Putkistojen ja lämpökäsittelymättömien hitsien lisäksi kaustisen korroosion aiheuttamaa halkeilua voidaan löytää kattiloiden tuubeissa. (API RP 571 2011, s. 199-205.)

**Ammoniakista johtuva jännityskorroosiohalkeama**

Vesipitoiset virtaukset, jotka sisältävät ammoniakkia voivat aiheuttaa jännityskorroosiohalkeamia tietyissä kupariseoksissa. Hiiliteräkset ovat alttiina ammoniakista johtuville jännityskorroosiohalkeamille, jos virtaus sisältää ammoniakkia ja on jossain muussa kuin nestemäisessä muodossa. Tyypillisesti ammoniakista johtuvia jännityskorroosiohalkeamia voi esiintyä kupari - sinkki seoksista valmistetuissa lämmönvaihtimien tuubiryhmissä, ammoniakkin varastosäiliöissä sekä amiiniyksiköiden laitteissa. (API RP 571 2011, s. 206-209.)

**Nestemäisen metallin aiheuttama haurastuminen**

Nestemäisen metallin aiheuttamassa haurastumisessa nestemäisessä muodossa olevat metallit ovat kontaktissa metalliseoksien kanssa. Seurauksena syntyvät halkeamat voivat olla luonteeltaan nopeasti syntyviä ja hauraita. Nestemäisen metallin aiheuttamalle haurasmurtumalle ovat alttiita hiiliteräkset, niukkaseosteiset teräkset, erittäin lujat teräkset, ruostumattomat teräkset, nikkelpohjaiset seokset, kupariseokset, titaani ja alumiiniseokset. Nestemäisten metallin aiheuttamia haurasmurtumia voidaan löytää esimerkiksi putkistoista

sekä painelaitteista, jotka ovat kontaktissa galvanoidun teräksen kanssa. (API RP 571 2011, s. 210-214.)

### **Vetyhaurastuminen**

Vetyhaurastumisesta seuraa materiaalin sitkeysominaisuuksien heikkenemistä. Sitkeyden heikentyminen johtuu vetyatomien seostumisesta materiaaliin. Vetyhaurastuminen esiintyy haurasmurtumina kohteissa. Materiaali on alttiina vetyhaurastumille esimerkiksi valmistusvaiheissa, hitsauksessa tai muissa vaiheissa, joissa vety pääsee altistamaan teräksen nestemäisessä, korroosio alttiissa tai kaasumaisessa ympäristössä. Vetyhaurastumiselle ovat alttiina hiiliteräkset, ruostumattomat teräkset ja nikkelpohjaiset seokset. Öljynjalostamoympäristössä vetyhaurastumista voi tyypillisesti esiintyä hiiliteräsputkistoissa sekä reaktoreissa ja lämmönvaihtimissa, joita käytetään vedyn käsittelyyn. Lisäksi pultit ja jouset ovat erityisen alttiina vetyhaurastumiselle. (API RP 571 2011, s. 215-219.)

### **Etanolin aiheuttama jännityskorroosiohalkeama**

Etanolin aiheuttamat jännityskorroosiohalkeamat aiheutuvat etanolin ja pintajännitysten yhdistelmästä tyypillisesti hiiliteräksillä. Ympäristössä, jossa etanoli pääsee syrjäyttämään hapen ja on väsyttävä kuormitus, halkeilu kiihtyy. Öljynjalostamoympäristössä etanolin aiheuttamia jännityskorroosiohalkeamia voidaan havaita varastosäiliöissä sekä putkilinjoissa, joissa säilytetään tai siirretään etanolia. (API RP 571 2011, s. 220-226.)

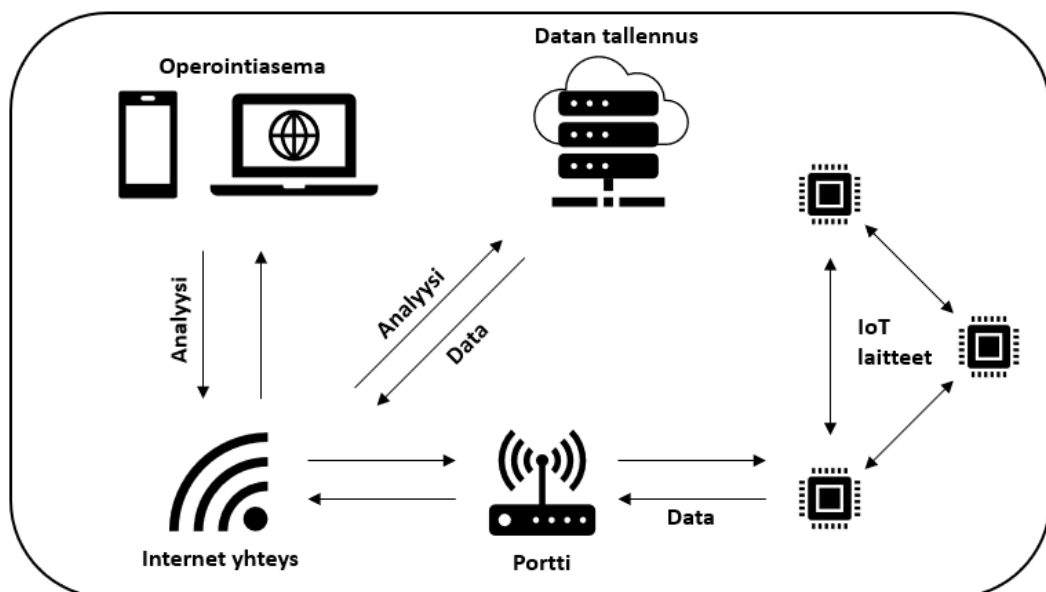
### **Sulfaattien aiheuttama jännityskorroosiohalkeama**

Sulfaattiyhdisteet aiheuttavat materiaalin pinnalle verkkomaisia säröjä, jotka lopulta yhdistyvät jännityskorroosiohalkeamiksi. Materiaalin pinnalle jääneet jäännösjännitykset kiihdyttävät jännityskorroosiohalkeamia. Tyypillisesti sulfaateista aiheutuille jännityskorroosiohalkeamille ovat alttiina ovat kupari- ja nikkelseokset. Öljynjalostamoilla sulfaatista aiheutuille jännityskorroosiohalkeamille ovat alttiina varsinkin lämmönvaihdintuubit erityisesti jäähdytysveden kierroissa. Lämmönvaihtimien tuubeissa vikaantuminen näkyy vuotoina ja repeäminä. (API RP 571 2011, s. 227-228.)

## 2.4 Teollinen internet (IoT)

Tässä tutkimuksessa teollisella internetillä, internet of things (IoT), tarkoitetaan koneita ja laitteita, jotka ovat yhteydessä keskenään internetin kautta. IoT antaa koneille ja laitteille alustan jakaa antureilla keräämäänsä dataa ja toimittaa ne analysoitavaksi. IoT soveltuu laajasti eri aloihin ja sovelluksiin. Nousevista teknologioista IoT:n ennustetaan olevan tärkein ja vaikuttavin yritysten keskuudessa sen laajojen käyttömahdollisuuksien ja potentiaalisten eri alojen takia. (Forbes Insights 2017, s. 4.) Kohdeyrityksen kriittisten korkeapainelaitteiden näkökulmasta IoT tarjoaa kunnonvalvonnan tiedon keräämiseen ja tehokkaaseen hyödyntämiseen uusia mahdollisuuksia. Langattomasti toimivia antureita ja mittauksia voidaan sijoittaa paikkoihin, joista on tärkeä saada tietoa, mutta jonne pääsy normaaleissa olosuhteissa on haastavaa.

IoT:n avulla voidaan muodostaa kriittisten korkeapainelaitteiden välille oma ekosysteeminsä, jossa koneet sekä laitteet ovat yhteydessä keskenään ja jakavat keräämänsä tietoa. Kun tietoa aletaan keräämään laitteista, on tärkeää olla asiantuntemus ja näkemys siitä, mitä tietoa on tarpeellista kerätä sekä mikä tieto on tärkeää. Anturit lähettävät laitteesta saamansa tiedon analysoitavaksi ja mahdollistavat käytön, valvonnan ja toimenpiteiden suorittamisen etäpisteistä. (Martinsuo, M. & Kärri, T. 2017, s. 87-88; Information Resources Association 2017, s. 477-478.) Kuvassa 6 on esitetty koneiden ja laitteiden muodostama ekosysteemi, jonka avulla saadaan laitteiden tuottamaa tietoa analysoitavaksi.



Kuva 6. IoT-ekosysteemi.

### 3 SEURANTASUUNNITELMAN MUODOSTAMINEN

Seurantasuunnitelma kriittisille korkeapainelaitteille voidaan muodostaa API RP 572 2016 standardia mukaillen. Standardissa esitettyjen vaiheiden avulla voidaan seurantasuunnitelmaa varten valita kymmenen vaihetta, jonka avulla seurantasuunnitelma kriittisille korkeapainelaitteille voidaan muodostaa. Vaiheet koostuvat seuraavasti:

1. Tunnistetaan tunnetut tai odotetut vikaantumismekanismit.
2. Tunnistetaan ensisijaiset alueet, joissa vikaantumista esiintyy.
3. Arvioidaan odotettu vikaantumisnopeus tai -herkkyys.
4. Arvioidaan jäljellä oleva käyttöikä.
5. Valitaan tarkastusmenetelmät, joilla voidaan tehokkaasti havaita vikaantuminen.
6. Varmistetaan, että tarkasteltavalle laitteelle on turvallinen pääsy tarkastuksia suorittaessa.
7. Arvioidaan mahdolliset tarkastuksen aiheuttamat negatiiviset vaikutukset laitteen eheyteen ja heikkenemiseen.
8. Arvioidaan riskit liittyen tarkastuksen tekemiseen.
9. Määritellään ulkoiset ja sisäiset tarkastukset.
10. Kunnonvalvontamenetelmän määrittely tunnetuille vikaantumismekanismeille.

Tässä kappaleessa tarkastellaan seurantasuunnitelman muodostamisen vaiheita ja vaatimuksia. Kappale on jaettu osioihin yllä olevan listauksen mukaisesti. (API RP 572 2016, s. 17.)

#### 3.1 Vikaantumismekanismit laitteissa ja niiden odotettu sijainti

Seurantasuunnitelman muodostamisessa oleellisessa osassa olevassa riskitarkastelussa saadaan tehokkaasti tuloksia hyödyntämällä RBI:n analysointimenetelmiä. RBI-tutkimusta tehtäessä ensimmäinen vaihe muodostuu vikaantumismekanismien tunnistamisesta, joka on merkittävässä roolissa laitteiden luotettavuuden parantamisen taustatietona. RBI-tutkimusta tehtäessä on tärkeää määritellä vikaantumiseen johtavat syyt, odotetut vikaantumismekanismit, todennäköisyys vikaantumiselle sekä seurausten vakavuus tulevaisuudessa mahdollisesti tapahtuvista vikaantumisista ja vikaantumisen etenemisestä (API RP 571 2016, s. 3). Tässä tutkimuksessa vikaantumismekanismeja tarkastellaan

kriittisen korkeapaineosan laitteissa laitekohtaisesti käyttäen apuna API RP 571 Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry standardia.

Tyypillisimmät vikaantumismekanismit jakautuvat useampiin alalajeihin riippuen kemikaaleista, lämpötiloista, prosessiarvoista ja ympäristöstä. Vikaantumismekanismit ovat esitettyinä numeroituna taulukossa 6. Vikaantumismekanismeille on annettu oma tunnus, jotta tutkimuksen muissa kohdissa viittaaminen vikaantumismekanismiin on sujuvampaa.

*Taulukko 6. Vikaantumismekanismit ja niille annetut tunnuksset (mukaillen API RP 571 2011, s. 95).*

Vikaantumismekanismi	Tunnus	Vikaantumismekanismi	Tunnus
Sulfidoituminen	1	Pehmeneminen	34
Märän rikkivedyn aiheuttama vaurio	2	Uudelleenlämmityksestä johtuva halkeama	35
Virumis- ja jännitysrepeämät	3	Rikkihapon aiheuttama korroosio	36
Korkean lämpötilan aiheuttama rikki/rikkivety korroosio	4	Fluorivetyhapon aiheuttama korroosio	37
Polytionihapon aiheuttama korroosio	5	Savukaasun kastepisteen korroosio	38
Nafteenihapon aiheuttama korroosio	6	Eripari metallihitsien murtuminen	39
Ammoniakkibisulfidin aiheuttama korroosio	7	Vetyjännityksistä johtuva halkeilu	40
Ammoniakkikloridin aiheuttama korroosio	8	Uudelleen seostuminen	41
Kloorivetyhapon aiheuttama korroosio	9	Hiilidioksidin aiheuttama korroosio	42
Korkean lämpötilan vetyhyökkäys	10	Korroosioväsyminen	43
Hapettuminen	11	Polttoainetuhkan aiheuttama korroosio	44
Terminen väsyminen	12	Amiinin aiheuttama korroosio	45

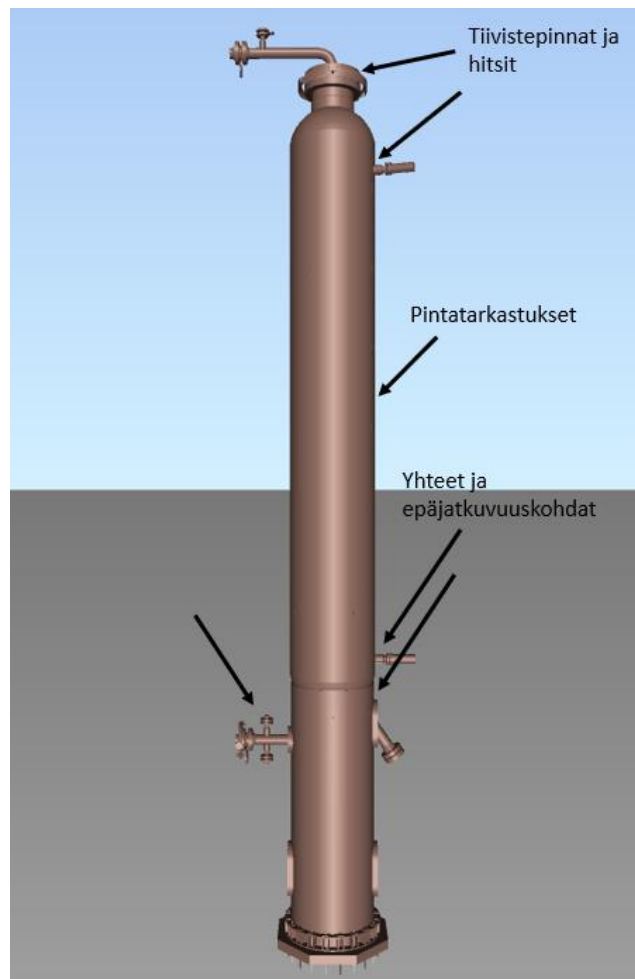
Taulukko 6 jatkuu. Vikaantumismekanismit ja niille annetut tunnuksset (mukaillen API RP 571 2011, s. 95).

Hapanveden aiheuttama korrosio	13	Eristeen alainen korrosio	46
Tulenkestävien rakenteiden rappeutuminen	14	Ilmasto-olosuhteista johtuva korrosio	47
Grafitoituminen	15	Ammoniakin aiheuttama jännityskorrosiohalkeama	48
Lämpöaurastuminen	16	Jäähdytysveden aiheuttama korrosio	49
Hiilikato	17	Kattilaveden aiheuttama korrosio	50
Kaustinen jännityskorrosiohalkeama	18	Mikrobiologisesti indusoitunut korrosio	51
Kaustinen korrosio	19	Nestemäisen metallin haurastuminen	52
Erosio / Eroosiokorrosio	20	Galvaaninen korrosio	53
Karbonaateista aiheutuva jännityskorrosiohalkeama	21	Mekaaninen väsyminen	54
Amiinista aiheutuva halkeilu	22	Typettyminen	55
Kloridista aiheutuva jännityskorrosiohalkeama	23	Tärinän aiheuttama väsyminen	56
Hiilettyminen	24	Titaanin hydridoituminen	57
Vetyaurastuminen	25	Maaperän aiheuttama korrosio	58
Höyrypeite	26	Metallipöly	59
Lämpöshokki	27	Ikääntyminen	60
Kavitointi	28	Sulfaatista aiheutuva jännityskorrosiohalkeama	61
Grafiittinen korrosio	29	Fosforihaposta aiheutuva korrosio	62
Ylikuumeneminen jännitysrepeämä	- 30	Fenolista aiheutuva korrosio	63

Taulukko 6 jatkuu. Vikaantumismekanismit ja niille annetut tunnuukset (mukaihen API RP 571 2011, s. 95).

Haurasmurtuma	31	Etanolista aiheutuva jännityskorroosiohalkeama	64
Sigma – haurastuminen	32	Hapen rikastama syttyminen ja palaminen	65
475 °C lämpötilassa tapahtuva haurastuminen	33	Orgaanisten happojen aiheuttama korroosio tislaukornien päällä olevissa laitteissa	66

Vikaantumisille otollisia paikkoja ovat hitsisaumat, pinnoitteen ja perusaineen väliset rajapinnat sekä yhteet ja muut epäjatkuvuuskohdat. Esimerkki prosessissa olevan painelaitteen vikaantumisten odotetusta sijainnista on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Esimerkki prosessissa olevan painelaitteen vikaantumisen odotetusta sijainnista.

### 3.2 Vikaantumisnopeus ja käyttöikä

Vikaantumismekanismien ja niiden odotetun sijainnin tunnistamisen jälkeen arvioidaan kriittisten korkeapainelaitteiden vikaantumisen todennäköisyys,  $P_f$ . Vikaantumisen todennäköisyys saadaan kertomalla vikaantumisen taajuus,  $g_{ff}$ , vikaantumistekijä,  $D_f$  sekä hallinnon vikaantumistekijä  $F_{ms}$ . Vikaantumisen todennäköisyyden laskenta on esitettyä yhtälössä 3. (API 581 2019. s. 10-17.)

$$P_f(t) = g_{ff} \times D_f(t) \times F_{ms} \quad (3)$$

Tässä tutkimuksessa vikaantumisen todennäköisyys lasketaan käyttämällä statistista mallia, joka perustuu yleiseen saatavilla olevaan dataan. Vikaantumismekanismien perusteella vikaantumistekijöiksi täytyy ottaa huomioon ainevahvuuden heikkeneminen, jännityskorroosio, ulkopuoliset vauriot, korkean lämpötilan vetyhyökkäys sekä haurasmurtumat. (API RP 581 2019, s. 10-17.)

Vikaantumisen seuraus,  $CA$ , muodostaa yhdessä vikaantumisen todennäköisyyden kanssa riskin. Muuttujat  $a$  ja  $b$  ovat referenssiarvoja laitteen sisällä virtaavalle aineelle ja nesteiden purkautumiskerroin,  $X$ , kuvastaa yhtälössä purkautumisen suuruutta. Referenssiarvot nesteiden ominaisuuksille ovat esitettyä liitteessä 2. Purkautumisen suuruus ajatellaan olevan tasaista ja jatkuvaa. Vikaantumisen seurauksen laskenta on esitettyä yhtälössä 4. (API RP 581 2019, s. 10-17.)

$$CA = a \times X^b \quad (4)$$

Riski saadaan kertomalla vikaantumisen todennäköisyys potentiaalisella seurauksella. Vikaantumisen riski voidaan esittää numeerisena arvona kertomalla vikaantumisen todennäköisyys sekä seuraus yhteen. Riskin laskemisen kaava on esitetty yhtälössä 1. Riski on tyypillisesti esitetty ajan  $t$  funktiona. (API RP 581 2019, s. 21.)

Prosessin operoinnin muutokset saattavat aiheuttaa ajan myötä muutoksia vikaantumisen todennäköisyydessä ja seurauksessa. Prosessin operoinnissa muutokset prosessin lämpötilaan, paineeseen sekä kemikaaliseen koostumukseen lisäävät vikaantumisen

todennäköisyyttä. Seurausten vakavuutta kasvattavat myrkyllisten kemikaalien lisäys sekä syttymisherkkyuden kasvattaminen prosessissa. (API RP 581 2019, s. 21.)

### 3.3 Tarkastusmenetelmien valinta

Sopivien tarkastusmenetelmien valitsemiseksi on tarkasteltava kohteista prosessiarvoja sekä laitteiden tietoja. Lämpötilat, prosessipaineet ja käyttöolosuhteet ovat prosessin puolesta oleellisia tietoja. Laitteen tyyppi, materiaali ja seinämävahvuudet ovat oleellisia tietoja laitteiden puolesta. Ennen tarkastusta on edellä mainittujen tietojen lisäksi tarkasteltava myös laitteiden käyttöhistoriaa häiriöiden sekä epänormaalien prosessiolosuhteiden varalta, koska ne saattavat paljastaa oleellista tietoa vikaantumismekanismeista ja vikaantumisten esiintymispaikoista. (API RP 572 2016, s. 24.)

Prosessiarvojen, laitteiden tietojen ja käyttöhistorian perusteella muodostetun kokonaiskuvan avulla voidaan valita sopivat tarkastusmenetelmät potentiaalisten vikaantumismekanismien tarkastukselle. Riippuen vikaantumismekanismeista, tarkastusmenetelmiä voidaan valita useampi. Eri menetelmiä käyttämällä voidaan varmistua, että tarkastuksen tehokkuudessa päästään vaaditulle tasolle. (API RP 572 2016, s. 24.)

Visuaalinen tarkastus on menetelmistä tärkein ja sen avulla voidaan saada laitteesta nopea yleiskuva, jonka perusteella voidaan määrittellä tarve lisätarkastuksille. Käytönaikaisten NDT-menetelmien lisäksi jatkuvaa kunnonvalvontaa voidaan hyödyntää varsinkin paikoissa, johon on vaikea pääsy, mutta tarve tarkastuksille esiintyy. Asianmukaiset valmistelut tarkastettavien kohteiden pinnalle on oleellisessa osassa tehokkaan tarkastuksen suorittamiseksi. Normaalin puhdistuksen lisäksi korkeapainepesuja, hiekkapuhalluksia tai hiontoja voi olla tarve suorittaa, että kohteita voidaan tarkastaa. (API RP 572 2016, s. 24.)

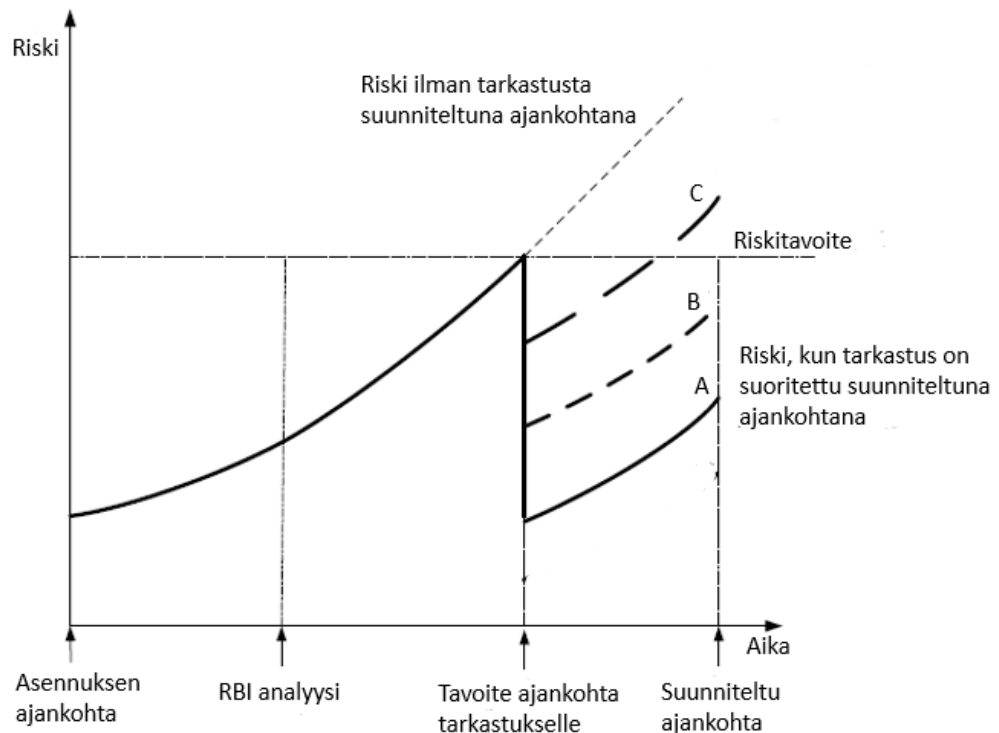
### 3.4 Tarkastusten vaikutus ja tehokkuus

Tarvittavan tehokas tarkastussuunnitelma määrittellään kohteen riskitason mukaan. Tarkastussuunnitelmassa määrittellään NDT-menetelmät, tarkastusten väli sekä tarkastettavat paikat ja tarkastettavan alueen laajuus. Tarkastussuunnitelman vaikutus riskitavoitteeseen voidaan esittää käyttämällä kolmea eri luokkaa:

- a) Luokka A – Riski pyritään saamaan tehokkaan tarkastusten avulla riskitavoitteen alle sisäpuolisen tarkastusvälin aikana.

- b) Luokka B – Riski pyritään saamaan riskitavoitteen alapuolelle RBI-analyysin päivityksen yhteydessä.
- c) Luokka C – Tarkastuksia ei suoriteta sisäpuolisten tarkastusten välillä, jolloin ulko- ja sisäpuoliset tarkastukset suoritetaan samaan aikaan tarkastussuunnitelman määräajan umpeutuessa.

Eri luokkien riskienhallinta on esitetty kuvassa 8. Kuvassa huomataan, miten sisäpuolisten tarkastusten välistä riskiä voidaan pienentää ulkopuolisten tarkastusten avulla ja voidaan saavuttaa ennalta määritelty riskitavoite. (API RP 581 2019, s. 25.)



Kuva 8. Tarkastussuunnitelman vaikutus kokonaisriskiin (mukaillen API RP 581 2019, s. 32).

Tarkastussuunnitelman tehokkuus voidaan luokitella viiteen eri kategoriaan, jotka ovat esitettyinä taulukossa 7.

Taulukko 7. Tarkastuksen tehokkuuden kategoriat (mukaillen API RP 581 2019, s. 3).

Kategoria	Tarkastuksen tehokkuuden kuvaus	Kuvaus
1	Erittäin tehokas	Tarkastusmenetelmillä tunnistetaan vikaantumisen todellinen taso lähes jokaisessa tapauksessa (tai 80% - 100% varmuudella).
2	Yleensä tehokas	Tarkastusmenetelmillä tunnistetaan vikaantumisen todellinen taso suurimmaksi osaksi (tai 60%-80% varmuudella).
3	Melko tehokas	Tarkastusmenetelmillä tunnistetaan vikaantumisen todellinen taso noin puolissa tapauksissa (tai 40%-60% varmuudella).
4	Huono tehokkuus	Tarkastusmenetelmät antavat vikaantumisen todellisesta tasosta vain vähän tietoa (tai 20%-40% varmuudella).
5	Tehoton	Tarkastusmenetelmät eivät tarjoa tietoa tai tarjoavat vain vähän tietoa vikaantumisen todellisesta tasosta (tai alle 20% varmuudella).

Taulukossa 7 esitetyt kategoriat asettavat suuntaviivat tarkastusten tehokkuudelle. Tarkastuksen tehokkuudella tarkoitetaan tasoa, jolla tietty yksittäinen vikaantumismekanismi voidaan havaita kohteesta. Useampia tarkastuksia voidaan suorittaa kohteille, jotta useampia vikaantumismekanismeja tunnistetaan tehokkaasti. (API RP 581 2019, s. 12).

API RP 581 2019 standardin mukaan tarkastuskategorioilla on seuraavanlainen yhteys:

- a) Kaksi yleensä tehokasta (luokka 2) tarkastusta = yksi erittäin tehokas (luokka 1) tarkastus.
- b) Kaksi melko tehokasta (luokka 3) tarkastusta = yksi yleensä tehokas (luokka 2) tarkastus.
- c) Kaksi huonon tehokkuuden (luokka 4) tarkastusta = yksi melko tehokas (luokka 3) tarkastus.

### 3.5 Tarkastusten määrittäminen ja turvallinen suorittaminen

Kohdeyrityksen tarkastussuunnitelmassa määritellään ulkopuoliset tarkastukset vähintään seuraavaan sisäiseen tarkastukseen asti eli neljän vuoden välein. Sisäpuolisista tarkastuksista löytyviä vikaantumisia tarkkaillaan käynnin aikana jatkuvan kunnonvalvonnan tai kentällä suoritettavien ulkopuolisten mittausten avulla. Vikaantumisten vakavuuden perusteella määritellään jatkotoimenpiteet vikaantumisen etenemisen seuraamiseksi.

Turvallisuuden varotoimet tulee ottaa huomioon ennen kuin painelaitteisiin mennään sisäpuolelle. Sisäpuolisissa tarkastuksissa tulee soveltaa turvallisuusmääräyksiä, jotka sisältävät mm. kohteen turvallistamisen ja turvalukitukset. Painelaite tulee olla erotettu kaikista nesteistä, kaasuista tai höyryistä käyttämällä sokeointiin tarkoitettuja oikean paine- ja kokoluokan laippoja. Painelaitteen tulee olla tyhjennetty, huuhdeltu, puhdistettu ja kaasumittaukset tulee olla suoritettu ennen sisälle menoa. Painelaitteen turvallistamisen lisäksi työn suorittajalla tulee olla asianmukaiset turvavarusteet. (API RP 572 2016, s. 21-24.)

#### 3.5.1 Ulkopuoliset tarkastukset

Käytön aikana suoritettavien mittausten mahdollisuudet ovat yleensä rajoitetut olosuhteiden takia. Prosessilaitteiden pinnat ovat tyypillisesti kuumia, sisältö on terveydelle vaarallista ja prosessipaineet ovat korkeita, nämä seikat asettavat vaatimuksia käytettäville mittaantureille tai mittalaitteille. Laitteet ovat tyypillisesti myös eristettyjä ja mittauskohtiin pääsy voi vaatia telineitä, kulkuväylän tai tason työskentelyä varten.

Normaalin prosessin aikana visuaalinen tarkastus on tärkein tarkastusten muoto. Laitteiden perustuksia, vaarvoja, teräsrakenteita, niittejä, suuttimia, hitsejä, instrumentointeja, pintaa sekä päällysteitä ja eristeitä tulee tarkkailla halkeamien, korroosion, pullistumien ja muiden poikkeamien varalta. Visuaalisten tarkastusten lisäksi ultraäänitarkastuksia voidaan suorittaa ulkopinnoille käynnin aikana, käyttäen edistyneitä ultraäänimenetelmiä kuten esimerkiksi vaiheistettua ultraääntä, EMAT-ultraääntä tai kulkuakatekniikkaan, Time-of-Flight Diffraction (TOFD), perustuvaa ultraääntä. (API RP 572 2016, s. 27-36.)

### 3.5.2 Sisäpuoliset tarkastukset

Painelaitelaisissa 1144/2016 pykälässä 56§ määritellään kuukauden tarkkuudella rekisteröityjen painelaitteiden sisäpuolisten tarkastusten aikaväliksi neljä vuotta. Sisäisten tarkastusten laajuus ja tarkastettavat kohteet määritellään kohdeyrityksen sisäisessä tarkastussuunnitelmassa. Jotta tarkastukseen käytettävä aika voidaan minimoida, tarkastusta varten tehtävät valmistelut, kuten esimerkiksi telineet ja valaistus kohteelle, tulee hoitaa etukäteen. Huolellisen tarkastuksen tekemiseksi tarkastajalla täytyy olla pätevyys sekä ymmärrys painelaitteen toiminnasta. Tarkastajan ymmärryksen ja pätevyyden pohjalta painelaitteet tulee tarkastaa korroosion, eroosion, vetyrakkuloiden, plastisten muodonmuutosten, halkeamien ja laminaarisuuden varalta. Kaikkia tarkastuksia ei kuitenkaan tarvitse suorittaa sisäpuolelta, jos on mahdollisuus hyödyntää jatkuvaa kunnonvalvontaa esimerkiksi akustisella emissiolla tai ulkopuolisia tarkastuksia ultraäänellä. (API RP 572 2016, s. 36-42.)

### 3.5.3 Kunnonvalvonta

Jatkuvaa kunnonvalvontaa suoritetaan yleisesti mittaamalla jatkuvasti prosessin tilaa. Prosessin muuttujia, kuten lämpötilaa, virtausnopeutta ja painetta mitataan prosessissa tai laitteissa sijaitsevilla antureilla. Prosessista kerättyä jatkuvaa tietoa verrataan odotettuun normaaliin tilaan. Muuttujien arvoista voidaan huomata poikkeamat prosessista ja kerättyä dataa voidaan hyödyntää kriittisten painelaitteiden ja prosessin sen hetkisen tilan arviointiin. Dataa hyödynnetään jokapäiväiseen raportointiin ja tarkkailuun, jonka avulla voidaan suorittaa tarvittaessa nopeita toimenpiteitä ja päätöksiä. Kunnonvalvonnan avulla voidaan myös ennakoida tai optimoida korjaavien toimenpiteiden ajankohta. (Walker, K. 2011, s. 27-28.)

Kunnonvalvontajärjestelmän avulla voidaan korvata määräaikaistarkastuksia, jos järjestelmä vastaa vaikutukseltaan määräaikaistarkastusta. Korvaamisesta on sovittava hyväksytyin laitoksen kanssa kirjallisesti suunnitelmalla, johon on määritelty kunnonvalvontajärjestelmä ja vastuhenkilöt sekä suunnitelma mittalaitteiden kunnossapidosta. Määräaikaistarkastuksien korvaamista tulee harkita vain, jos kunnonvalvontajärjestelmän avulla saaduista tiedoista voidaan todentaa, että painelaitteet täyttävät painelaitelain turvallisuusvaatimukset. (Finlex 2016.)

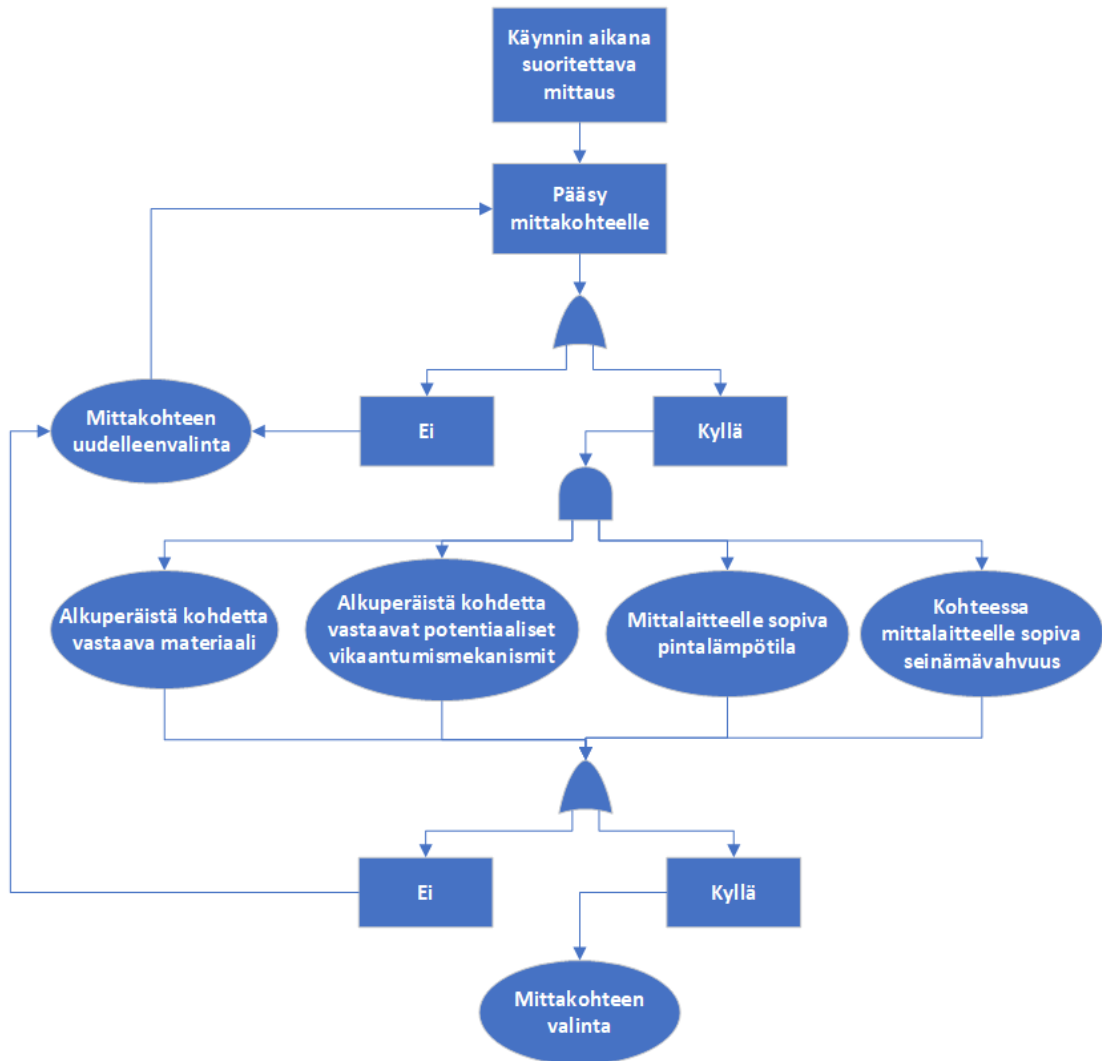
## 4 MITTAUSTEN SUORITTAMINEN (CASE STUDY)

Tutkimuksen kokeellisessa osiossa testattiin NDT-menetelmistä sopivia tekniikoita tunnistettujen ja odotettujen vikaantumismekanismien havaitsemiseksi. Kokeiden suorittamiseksi valitaan prosessialueelta laitteita, jotka ovat testiolosuhteisiin suotuisissa olosuhteissa. Prosessia ei pysäytetä testien tekemiseksi, joten mitattaviksi kohteiksi valitaan laitteita, joiden ominaisuudet vastaavat tutkimuksen kannalta oleellisia laitteita.

Kokeellisen osion menetelmät valittiin saatavilla olevien palvelutoimittajien, tutkittavien vikaantumismekanismien ja menetelmän tehokkuuden arvioinnin perusteella. Testattaviksi menetelmiksi kokeelliseen osioon valikoituivat vaiheistettu ultraääni, liikkeen vahvistuskamera, digitaalinen radiografia, infrapunalämpökamera sekä EMAT-ultraääni.

### 4.1 Mitattavat kohteet

Tässä tutkimuksessa tarkasteltavien painelaitteiden tarkastustoimintaa rajoittavat tekijät ovat korkeat pintalämpötilat ja vaikea pääsy mittauspaikoille prosessin normaalin käynnin aikana. Tästä syystä kokeelliseen osioon valittiin vaihtoehtoisia kohteita, joiden materiaali, paksuus- tai muut ominaisuudet vastasivat tutkimuksen kannalta oleellisia kriittisiä painelaitteita. Vaihtoehtoiset kohteet koostuivat erilaisista painesäiliöistä, joiden työkuuntoon valmistelu mittauksia varten pystyttiin toteuttamaan normaalia prosessia häiritsemättä. Mitattavien kohteiden valintaan käytettiin apuna kuvassa 9 esitettyä kaaviota.



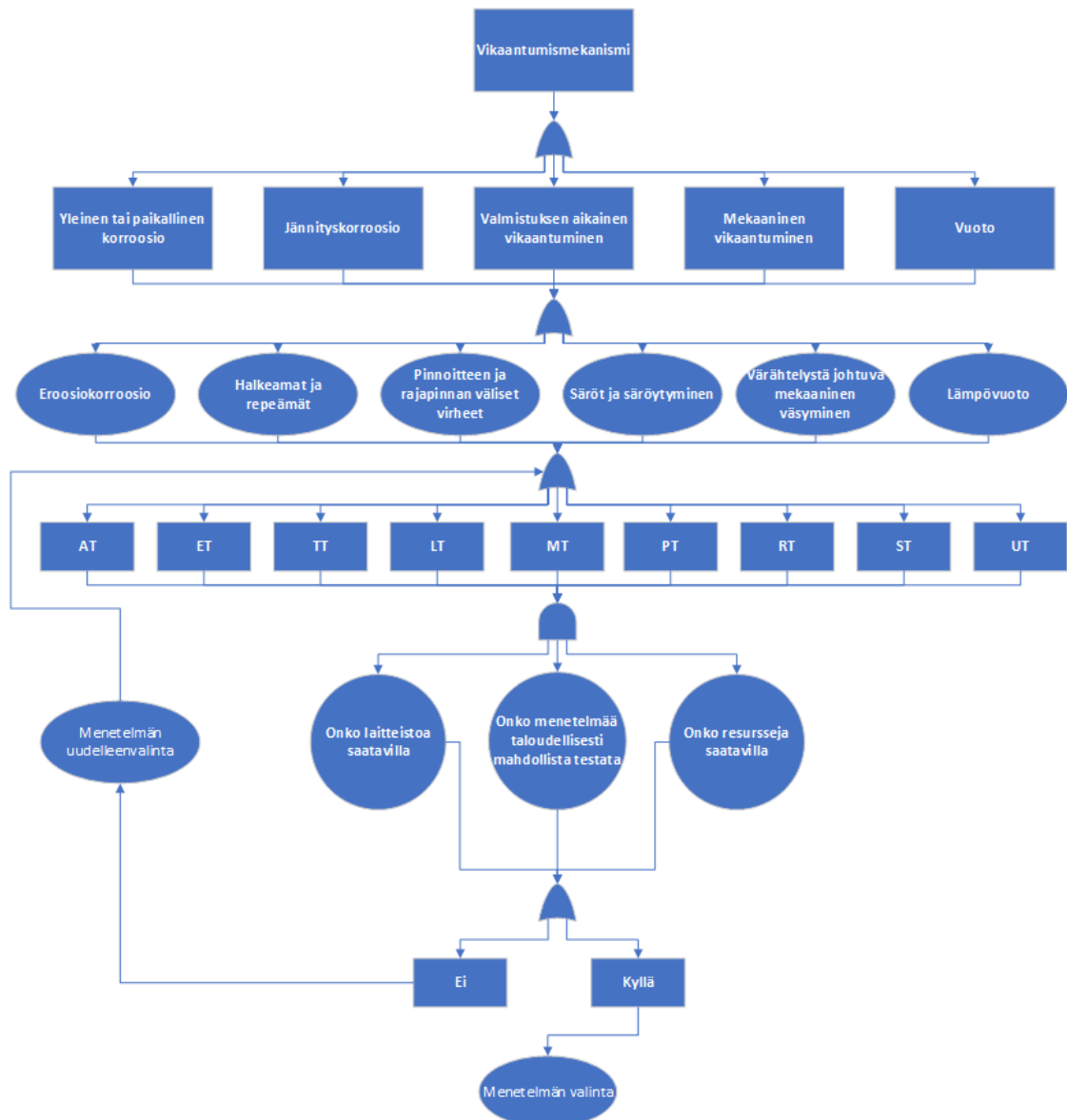
Kuva 9. Mittakohteiden valinnassa käytetty kaavio.

Kaavion mukaan tehdyn valinnan perusteella vaiheistetulle ultraäänelle valikoitui tarkastukseen pinnoitettu painesäiliö, liikkeen vahvistuskameralle osa korkeapaineputkistoa, digitaaliselle radiografialle pinnoitetun painesäiliön tyhjennysyhde, IR-lämpökamerakuvauksille savukaasukanava sekä EMAT-ultraäänelle pinnoitettu painesäiliö.

#### 4.2 Mittalaitteet

Mittalaitteet valittiin kokeelliseen osioon kuvan 10 mukaisella menetelmällä. Mittalaitteiden valintaa rajoittivat varsinkin laitteiden saatavuus, käytettävissä olevat resurssi sekä taloudelliset rajoitteet. Mittalaitteiden valinta aloitettiin tunnistamalla vikaantumismekanismit, valitsemalla NDT-menetelmä vikaantumisen tunnistamiseksi,

selvittämällä palveluntarjoajat mittauksille ja selvittelemällä aikataulut sekä resurssit, jonka puitteissa mittauksia päästään tekemään.



Kuva 10. Mittalaitteiden valinnassa käytetty kaavio.

Kun yllä olevat vaiheet olivat käyty läpi, valikoitui kokeelliseen osioon käytettäväksi laitteistoksi Zetec Paintbrush vaiheistettu ultraääni, IRIS M liikkeenvahvistuskamera, Teledyne ICM CP SERIES digitaalinen radiografia, FLIR T640 IR-lämpökamera sekä Innerspec Powerbox H EMAT-ultraääni.

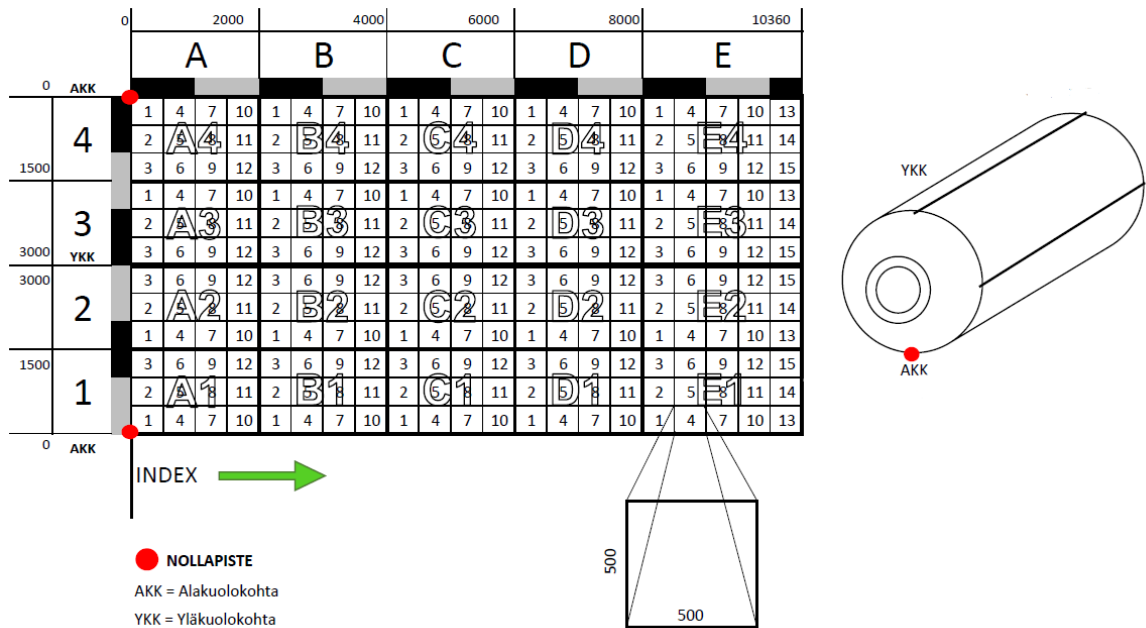
#### 4.2.1 Vaiheistettu ultraääni

Vaiheistetulla ultraäänellä, phased array ultrasonic testing (PAUT), tarkastettiin painelaitteita, joissa perusaineen lisäksi oli sisäpuolinen pinnoite. Tarkasteltavien kohteiden ainevahvuus oli mittalaitteelle sopiva. Vaiheistetun ultraäänen etuja ovat nopea ja tarkka mittausta verrattuna perinteisiin ultraäänimenetelmiin. Vaiheistetun ultraäänen etuja voidaan hyödyntää varsinkin hitsisaumojen ja perusaineen säröilyn, halkeilun ja aineenvahvuuden heikkenemisen havaitsemiseen. (Gan, W. S. 2012, s. 192-193.) Testaukseen käytettiin Zetec Paintbrush menetelmää, josta tiedot kerättiin TOPAZ 64 laitteistolla. Testilaitteisto on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. TOPAZ 64 ja Zetec paintbrush laitteisto (mukaillen ZETEC 2019).

Vaiheistetun ultraäänen hyöty perinteisiin ultraäänimenetelmiin verrattuna tulee sen mahdollisuudesta käyttää useita elementtejä ohjaukseen, kohdistukseen sekä skannaukseen hyödyntämällä vain yhtä lähetinkokoonpanoa. Menetelmässä käytettävä sektorinen skannaus mahdollistaa monimutkaistenkin geometrioiden tarkan skannauksen. (Gan, W. S. 2012, s. 193.) Mittauslaitteen ohjelmisto integroi sektorit yhteen mittauksen jälkeen, jolloin saadaan kohteen kunnosta kokonaiskuva. Kohteen jakaminen sektoreihin on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Kohteen jakaminen sektoreihin ennen skannausta.

#### 4.2.2 Liikkeen vahvistuskamera

Värähtely voi synnyttää rakenteissa kulumista, kiinnitysten löystymistä, materiaalin väsymistä, fyysistä siirtymää tai poikkeamat voivat synnyttää komponenttien välille magneettikenttiä (Kutz, M. 2015, s. 504-505). Liikkeen vahvistuskameraa käytettiin painelaitteiden putkistojen aiheuttamien värinöiden havaitsemiseksi. Putkiston värähtelyn aiheuttama rasitus kuormittaa varsinkin painelaitteiden yhteiden hitsejä, jolloin niihin voi muodostua värähtelystä aiheutuvaa säröilyä tai halkeilua. Värähtelyn etsimiseen käytettiin IRIS M liikkeen vahvistuskameraa. Kamera on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. IRIS M liikkeenvahvistuskamera (mukailien Machine & Laser Technology Oy).

Valaistus ja vakaa alusta on edellytyksenä kuvauksen onnistumiselle. Alustan värähdellessä samalla taajuudella kuin kohde, mittaustulokset voivat olla epätarkkoja. Kuvaustilannetta on esitettyä kuvassa 14.



Kuva 14. Esimerkki liikkeenvahvistuskameran kuvaustilanteesta.

Kameran kolmijalka on viritettyä tasaiselle ja värähtelemättömälle alustalle. Lisäksi kuvattavaan kohteeseen heijastetaan lisää valoa valonheittimellä, jotta kuvasta saadaan selkeämpi.

#### 4.2.3 Digitaalinen radiografia

Digitaalinen radiografia (DR) eroaa perinteisestä radiografiasta siten, että filmin tilalla käytetään digitaalisen radiografian antureita. Digitaalisen radiografian etuna perinteiseen radiografiaan verrattuna on nopeus. Digitaalinen radiografia soveltuu huokoisuuden, halkeilun sekä onteloiden havaitsemiseen kuvattavissa kohteissa. (Hobart Institute of Welding Technology 2013, s. 107-108.) Digitaalista radiografiaa käytettiin tämän tutkimuksen kokeellisessa osiossa yhteyden kuvaamiseen. Kuvauslaitteistona käytettiin Teledyne ICM SITEX CP200D laitteistoa, joka on esitettynä kuvassa 15.



Kuva 15. Teledyne ICM SITEX CP200D mittalaitteisto (Teledyne ICM).

#### 4.2.4 IR-lämpökamerakuvaukset

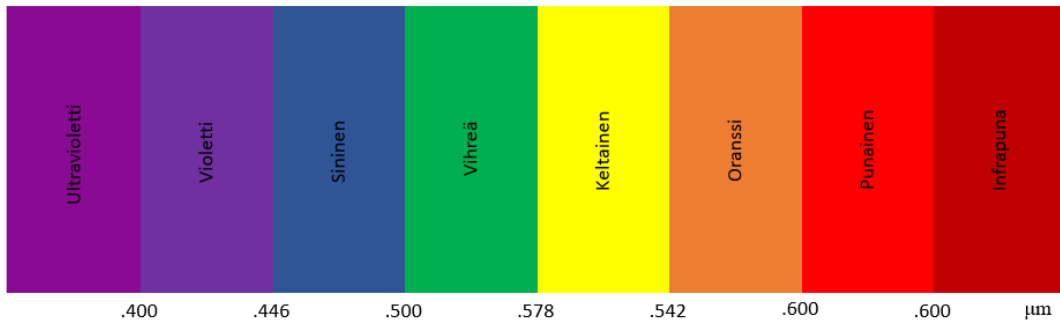
Infrapunaan perustuva lämpökamerakuvaus on tehokas tapa vuotojen, kuumien pisteiden, lämmön johtumisen sekä halkeamien ja epäkohtien tarkastamiseen. Lämpökamerakuvaus on

tarkka ja helposti toistettavissa. (Gianfrancesco, A. 2017, s. 238.) Tämän tutkimuksen kokeellisessa osiossa IR-lämpökamerakuvauksilla pyrittiin löytämään kuvattavista kohteista vuotoja ja lämmön johtumista. Paikalliset lämpötilapiikit ja kuumat alueet kohteissa antavat tietoa tiivisteiden toimivuudesta, korkean lämpötilan aiheuttamien vikaantumismekanismien paikasta sekä kohteiden rakenteiden yleisestä kunnosta. Kokeellisen osion kuvauksiin käytettiin FLIR T640 IR -lämpökameraa, joka on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. FLIR T640 IR-lämpökamera (FLIR 2019).

Kuvattavat kohteet heijastavat lämpötilansa mukaisesti eri aallonpituutta, jotka kamera esittää ruudullaan eri väreinä (Gianfrancesco, A. 2017, s. 238). Aallonpituuksien mukaan muodostuva väriasteikko on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. IR-lämpökameran väriasteikko aallonpituuksina (mukaillen Gianfrancesco, A. 2017, s. 238).

#### 4.2.5 EMAT-ultraääni

Tämän tutkimuksen kokeellisessa osiossa suoritettujen EMAT-ultraäänimittausten tavoitteena oli löytää mitattavista kohteista jännityskorroosiosta johtuvaa säröilyä ja halkeamia. Lisäksi EMAT-mittauksilla voidaan mitata kohteen seinämävahvuutta. (Tiratsoo, J. 2013, s. 119-121). EMAT teknologian etuna on, ettei sensori kiinnity konkreettisesti mitattavan kohteen pinnalle, joten se antaa mahdollisuuden mitata kuumia, jopa 650°C pintoja (Innerspec 2019). Mittauksissa käytettiin Innerspec PowerBox H mittauslaitteistoa, joka on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Innerspec PowerBox H mittauslaitteet (Innerspec 2019).

## 5 TULOKSET

Tämän tutkimuksen tulokset osiossa käsitellään RBI-analysointiin käytettyjen menetelmien tuloksia ja kokeellisen osion mittauksista saatuja tuloksia. Tässä osiossa esitellään saatuja tuloksia, joita myöhemmin analysoidaan ja pohditaan myöhemmin osiossa 6. Tutkimuksesta saadut tulokset esitellään seuraavassa järjestyksessä:

1. Riskiperusteisen tarkastusten analysointimenetelmät
2. Kokeellisesta osiosta saadut tulokset
3. Tulosten integrointi

Tulokset esitellään taulukoina ja diagrammeina. Tuloksia esitellään seuraaville prosessilaitteille:

- Reaktori tyyppi 1
- Reaktori tyyppi 2
- Lämmönvaihdin tyyppi 1
- Lämmönvaihdin tyyppi 2
- Lämmönvaihdin tyyppi 3
- Ilmajäähdytin

### 5.1 Riskiperusteisen tarkastuksen analysointimenetelmät

Tässä tutkimuksessa esiteltyjen vikaantumismekanismien perusteella vikaantumismekanismit, joita voidaan kirjallisuuskatsauksen ja soveltuvien prosessiolosuhteiden takia odottaa esiintyvän kohdeyrityksen kriittisessä korkeapaineosassa ovat jaoteltuna laitekohtaisesti taulukkoon 8. Taulukossa on esitettyä prosessilaitte ja taulukosta 6 otettu vikaantumisen tunnus.

*Taulukko 8. Vikaantumismekanismit esitettyinä laitekohtaisesti.*

Prosessilaitte	Vikaantumismekanismien tunnus
Reaktori tyyppi 1	8, 9, 12, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 30, 35, 36, 40, 43, 45, 53, 54, 56

*Taulukko 8 jatkuu. Vikaantumismekanismit esitettynä laitekohtaisesti.*

Reaktori tyyppi 2	3, 8, 9, 12, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 30, 35, 36, 40, 43, 45, 53, 54, 55, 56
Lämmönvaihdin tyyppi 1	2, 8, 9, 12, 18, 19, 20, 22, 23, 30, 32, 35, 36, 39, 40, 43, 45, 54, 55, 56
Lämmönvaihdin tyyppi 2	2, 8, 9, 12, 18, 19, 20, 22, 23, 30, 32, 35, 36, 39, 40, 43, 45, 54, 55, 56
Lämmönvaihdin tyyppi 3	2, 3, 4, 8, 9, 10, 12, 18, 19, 20, 22, 23, 30, 32, 35, 36, 39, 40, 43, 45, 48, 54, 55, 56, 63
Ilmajäähdytin	2, 8, 9, 12, 18, 19, 20, 22, 23, 30, 36, 40, 43, 45, 49, 54, 56

Taulukosta huomataan, että mahdolliset vikaantumismekanismit keskittyvät korroosioon sekä erilaisista korrosoivista kemikaaleista johtuvaan jännityskorroosioon, säröilyyn, halkeamiin ja vuotoihin.

Jokaiselle laitteelle voidaan vikaantumisten perusteella määritellä vikaantumisen todennäköisyys. Todennäköisyys on esitettynä laitteen vikaantumisen tarkasteltavana ajanjaksona, joka on tässä tutkimuksessa sisäpuolisten tarkastusten väli eli neljä vuotta. Todennäköisyys lasketaan vikaantumisten määränä suhteessa laitekohtaisiin neljän vuoden aikaisiin käyttötunteihin. Todennäköisyydet laitteiden vikaantumiselle on esitettynä taulukossa 9.

*Taulukko 9. Laitekohtainen vikaantumisen todennäköisyys.*

Laite	Vikaantumisen todennäköisyys
Reaktori tyyppi 1	0,000297
Reaktori tyyppi 2	0,000297
Lämmönvaihdin tyyppi 1	0,0002673
Lämmönvaihdin tyyppi 2	0,0002376
Lämmönvaihdin tyyppi 3	0,0000594
Ilmajäähdytin	0,0001188

Vikaantumisen taajuudelle saadaan numeerinen arvo asteikolla 1-5 vikaantumisen todennäköisyyden avulla. Taulukossa 10 on esitettyä taajuuden arvo, joka saadaan vikaantumisen todennäköisyydestä sekä kuvaus.

*Taulukko 10. Riskimatriisin vikaantumisen taajuuden arvot.*

Taajuus	Arvo	Kuvaus
1	$< 10e^{-4}$	Tapauksia ei tiedossa
2	$10e^{-2} - 10e^{-4}$	Mahdollisuus vikaantumiselle olemassa, mutta tapauksia ei tiedossa
3	$10e^{-1} - 10e^{-2}$	On tapahtunut neljän vuoden ajojakson aikana
4	$1 - 10e^{-1}$	On tapahtunut kohdeyrityksessä kerran vuoden ajojakson aikana
5	$> 1$	On tapahtunut toimipaikassa useita kertoja vuodessa

Vikaantumisen todennäköisyys asetetaan taajuuden mukaan riskimatriisin asteikolle, jolloin saadaan riskiä kuvastava numeerinen arvo 0-5. Vakavuuden ja seurauksen ollessa erittäin pieni arvo on nolla ja puolestaan, jos taajuus on erittäin suuri, saadaan arvo 5. Vakavuuden numeeriset arvot ja kuvaukset ovat esitettyä taulukossa 11.

*Taulukko 11. Riskimatriisin seurauksen arvot ja kuvaukset.*

Vakavuus (todellinen / potentiaalinen)	Kuvaus
0	Ei vahinkoa
1	Vähäinen materiaalivahinko (arvo $< 10\ 000\ €$ )
2	Pieni materiaalivahinko / Lyhyt tuotannonmenetys (arvo $< 100\ 000\ €$ )
3	Kohtalainen / huomattava materiaalivahinko / osittainen tuotannon menetys (arvo $< 1\ 000\ 000\ €$ )
4	Merkittävä materiaalivahinko / Laitoksen osittainen tuhoutuminen / Kuukauden tuotannonmenetys (arvo $< 10\ 000\ 000\ €$ )
5	Vakava materiaalivahinko / Laitoksen osittainen tai täydellinen tuhoutuminen / Alueen ulkopuolista vahinkoa (arvo $> 10\ 000\ 000\ €$ )

Riskiprioriteettinumeron laskennassa seurauksen, taajuuden ja havaitsemisen epätodennäköisyydestä lasketaan riskiprioriteettinumbero kaavan 2 mukaisesti, joka sijoitetaan riskimatriisiin. Riskiprioriteettinumeron laskenta on esitettyä taulukossa 12.

*Taulukko 12. Riskiprioriteettinumbero nykytilanteessa.*

C = vakavuusaste P = esiintymistodennäköisyys D = havaitsemisen epävarmuus				
Vikaantumismekanismi	C	P	D	Riskiprioriteettinumbero 1
Mekaaniset ja metallurgiset vikaantumiset	4	3	3	36
Yleinen ja paikallinen korroosio	3	4	3	36
Korkean lämpötilan aiheuttama korroosio	3	3	4	36
Ympäristön avustama säröytyminen	4	3	4	48
Valmistuksen aikainen vikaantuminen	4	4	4	64

Riskiprioriteettinumberot sijoitetaan riskimatriisiin, josta saadaan kuva kokonaisriskistä. Potentiaalinen riskimatriisi ennen korjaustoimenpiteitä on esitettyä kuvassa 19.

	Tapauksia ei tiedossa	Mahdollisuus vikaantumiselle olemassa, mutta tapauksia ei tiedossa	On tapahtunut neljän vuoden ajojakson aikana	On tapahtunut kohdeyrityksessä kerran vuoden ajojakson aikana	On tapahtunut kohdeyrityksessä useita kertoja vuodessa
	1	2	3	4	5
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	36	36	0
4	0	0	84	64	0
5	0	0	0	0	0
Seuraus	Todennäköisyys				

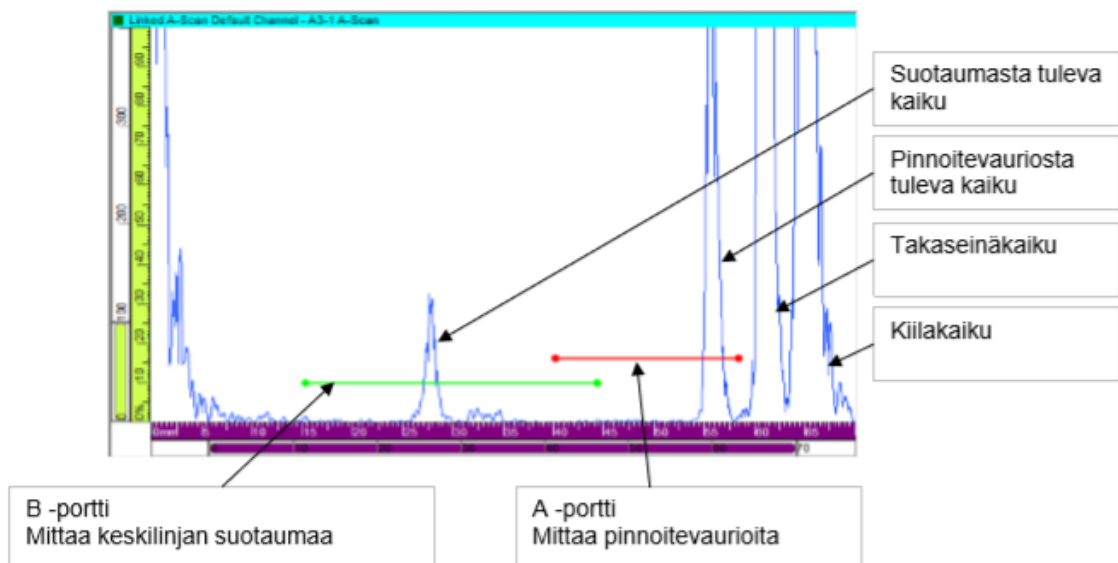
Kuva 19. Potentiaalinen riskimatriisi.

Riskimatriisista huomataan, että punaiselle alueelle jää kertoimia. Punaiselle alueelle jääneet lukemat esittävät riskiä, jotka eivät ole hyväksyttävällä tasolla. Riskien pienentämiseksi täytyy tehdä toimenpiteitä, jotta prosessia voidaan pitää käynnissä mahdollisimman riskittömästi.

## 5.2 Mittausten tulokset

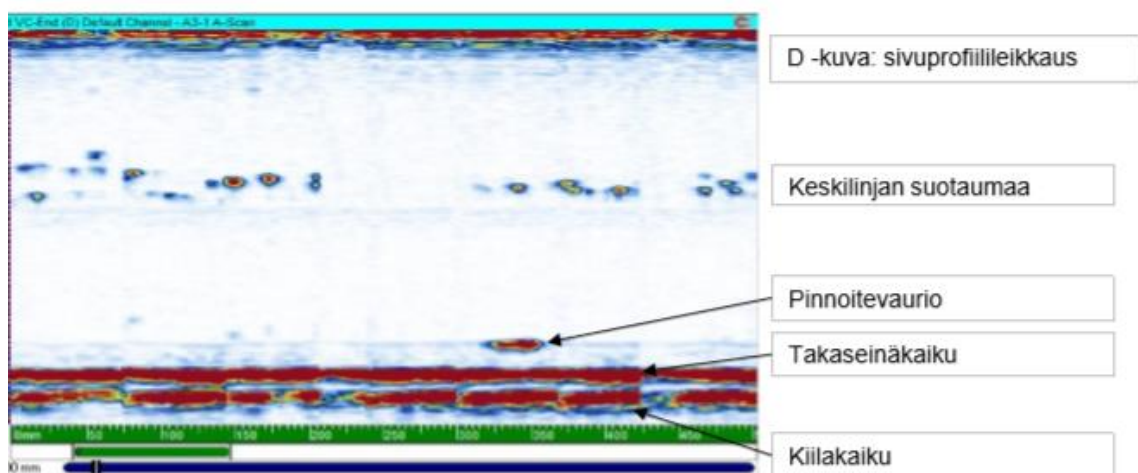
Kappaleen 4.2.1 kokeellisessa osiossa testatulla vaiheistetulla ultraäänellä tutkittiin mitattavasta kohteesta perusaineen ja pinnoitteen välistä rajapintaa sekä etsittiin jännityskorroosiosta aiheutuvaa säröilyä. Tuloksena kokeelliseen osioon valitusta mitattavasta kohteesta tunnistettiin sekä valmistuksen aikaista keskilinjan suotaumaa levyssä sekä pinnoitevaurioita.

Kuvassa 20 on esitettyä vaiheistetun ultraäänen antama raakasignaali. Raakasignaalista suodatetaan eri porteilla yksittäisiä signaaleja, joilla vikaantumiset tunnistetaan erilaisina piikkeinä. A-portin kautta suodatettiin signaalit pinnoitevaurioiden tunnistamiseksi ja B-portin kautta suodatettiin signaalit, joilla tunnistettiin levyjen rakenteellisia vikaantumisia. Signaalissa otetaan huomioon myös takaseinäkaiku ja kiilakaiku, jotka ovat menetelmälle ominaisia.



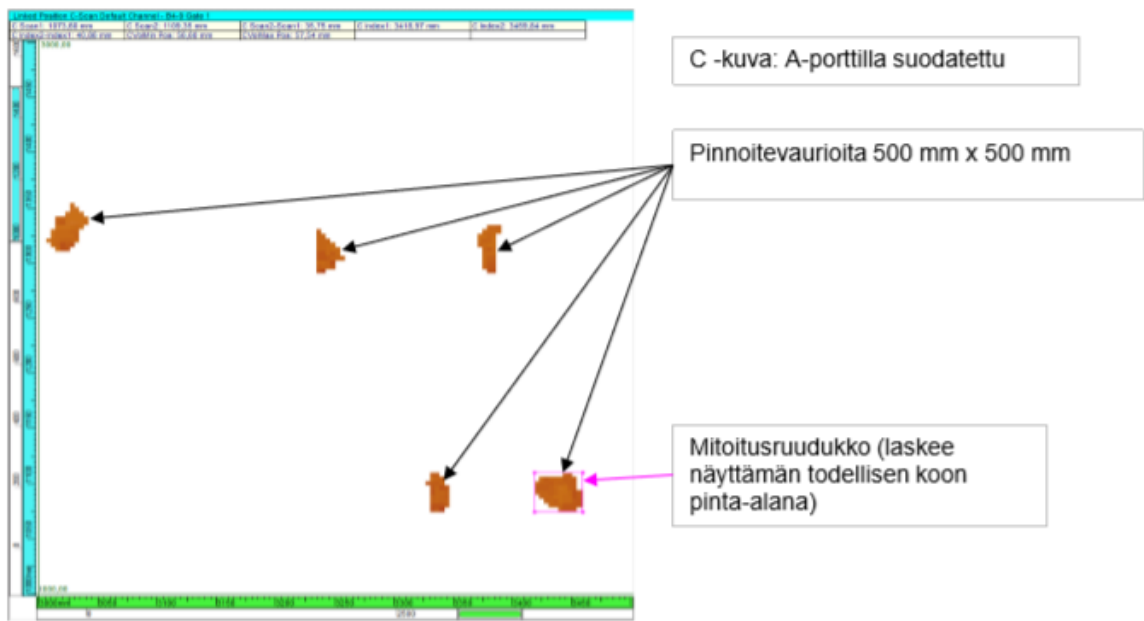
Kuva 20. Vaiheistetun ultraäänen raakasignaali.

Raakasignaalin ja ohjelmiston avulla saadaan esitettyä visuaalisesti vikaantumisten paikat. Kuvassa 21 on esitettyä yksittäiseltä ruudulta, A3, saatu sivuprofiilileikkaus, jossa näkyy keskilinjän suotaumaa sekä pinnoitevaurioita. Kuvassa pinnoite ei ole irti, koska signaali tavoittaa takaseinäkaulun. Pinnoitteen ollessa irti takaseinäkaiku jää havaitsematta ja kuvaan muodostuu takaseinän kohdalle lovi.



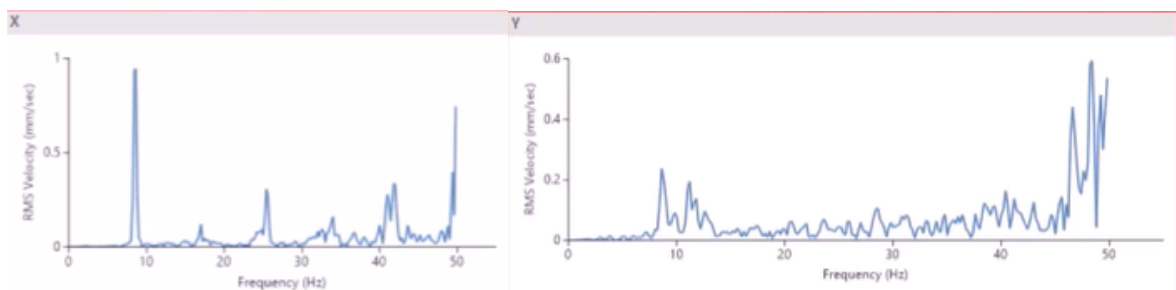
Kuva 21. Sivuprofiilileikkaus signaalista.

Porteilta suodattamalla saadaan eroteltua pisteet, jossa vaurioita esiintyy. Kuvassa 22 on esitettyä pinnoitevaurioiden kohdat suodatettuna alkuperäisestä signaalista. Suodatetusta kuvaajasta voidaan paikantaa jokaiselta ruudulta erikseen pinnoitevaurioiden paikat ja koko.



Kuva 22. Pinnoitevauriot suodatettuna A-portilta.

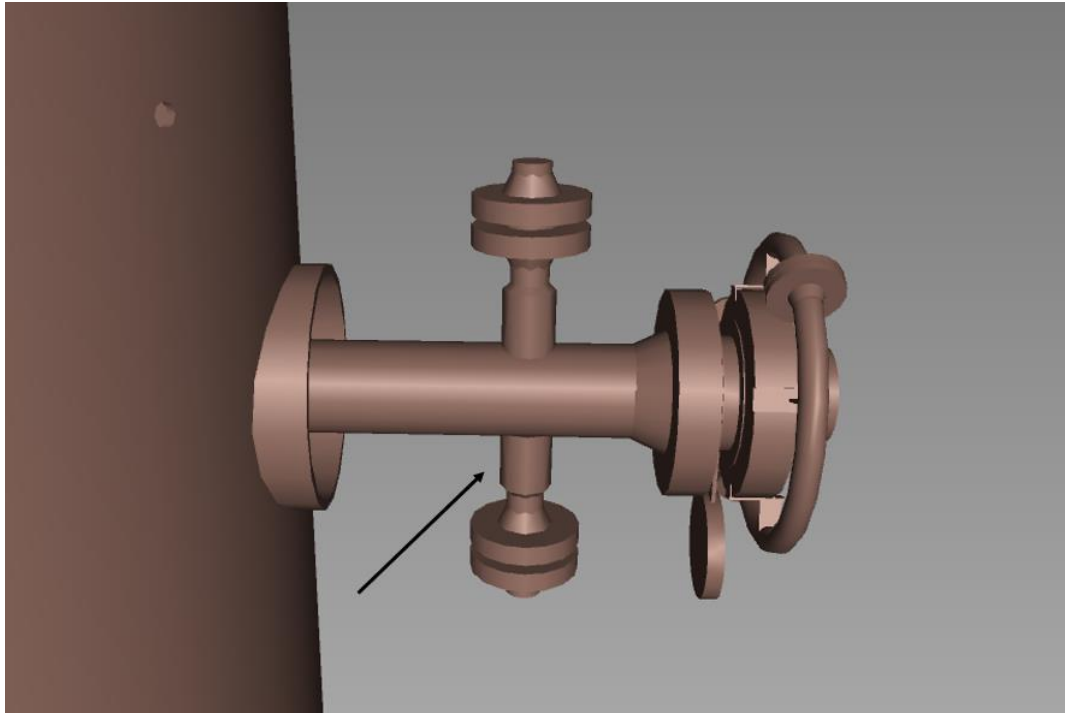
Kappaleessa 4.2.2 esitetyllä liikkeenvahvistuskameran tuloksina huomattiin putkiston kannakoinnin toimivan kuvattavassa kohteessa hyvin. Painelaitteisiin kiinni tulevien putkien värähtelystä voi aiheutua laippaliitoksiin ja yhteisiin väsyttävää kuormitusta, jonka seurauksena voi esiintyä vuotoja sekä jatkossa myös säröytymistä ja halkeamia. Liikkeenvahvistuskameralla kuvattiin korkeapaineputkistoa, joka liittyy tutkimuksessa tarkasteltavaan tyyppin 2 lämmönvaihtimeen. Putkiston värähtelyn siirtymä X- ja Y-akselilla sekä amplitudi on esitettyä kuvassa 23. Kuvassa 23 esitetyt siirtymät ovat sallitulla tasolla, joten voidaan todeta, että kannakointi toimii mitatussa putkistossa hyvin.



Kuva 23. Putkiston siirtymä ja värähtelyn amplitudi X- ja Y-akselilla.

Säröjä, halkeamia ja korroosiota voidaan tunnistaa kohteista käyttämällä kappaleessa 4.2.3 esiteltyä digitaalista radiografiaa. Digitaalista radiografiaa hyödynnetään tutkimuksessa

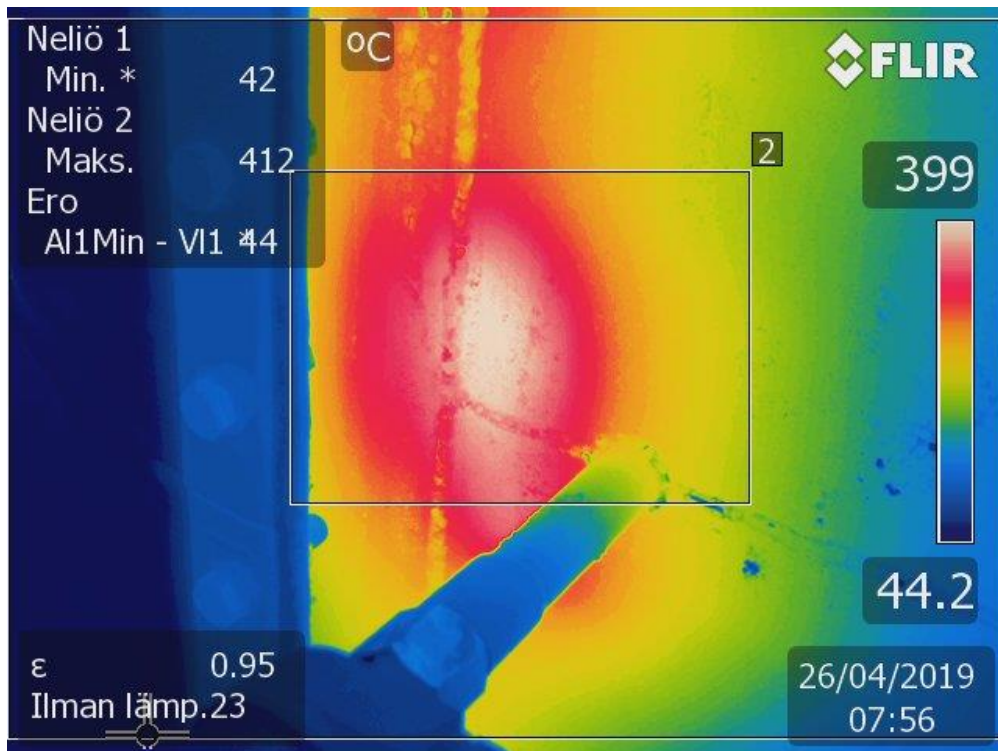
tarkasteltavien kriittisten painelaitteiden yhteiden kuvaukseen. Esimerkki paikka on esitetty kuvassa 24.



Kuva 24. Esimerkki sijainnista, jossa digitaalista radiografiaa voidaan hyödyntää.

Kuvaa 24 vastaava paikka kuvattiin kokeellisessa osiossa. Tuloksena kohteesta ei löydetty poikkeamia. Kuvatun yhteen seinämävahvuus oli lähellä alkuperäisiä arvoja, eikä säröytymistä kohteesta havaittu. Säröjen tunnistamiseksi kohteesta otettiin useita kuvia eri suunnista, jotta voitiin varmistua tulosten luotettavuudesta. Kentällä suoritetun kokeen perusteella digitaalinen radiografia soveltuu kuvaa 24 vastaavien paikkojen tarkastukseen korroosion, säröytymisen ja halkeilun varalta.

Vuotojen ja paikallisten kuumien pisteiden löytämiseksi käytettiin kappaleessa 4.2.4 esiteltyä IR-lämpökameraa. IR-lämpökameralla havaittiin kuvattavista kohteista lämpötilan johtumista, josta seurasi paikallisia kuumia pisteitä. Paikalliset kuumat pisteet aiheuttavat korkeasta lämpötilasta johtuvia vikaantumismekanismia ja ovat siksi tutkimuksen kannalta oleellisia. Kuva lämmönjohtumisesta tarkasteltavassa kohteessa on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Paikallinen kuuma piste IR-lämpökamerakuvauksissa.

Kuvassa 25 esitetyn paikallisen kuuman pisteen maksimilämpötila nousi 412 °C. Pintojen väliset lämpötilaerot kasvavat suureksi ja aiheuttavat paikallisia jännityksiä, joista voi seurata korkean lämpötilan aiheuttamaa korroosiota, termistä väsymistä sekä materiaalin ominaisuuksien heikkenemistä.

Kokeellisen osion kappaleessa 4.2.5 esitellyllä EMAT-ultraäänimittauksella havaittiin pinnoitetussa painelaitteessa pinnoitteen paikoittaista irtoilua perusaineesta. Pinnoitteen antaman signaalin ja asiantuntijan arvion perusteella todettiin, että vikaantumisen oli valmistuksen aikainen virhe. Pinnoitteen paikoittainen irtoaminen perusaineesta oli havaittu edellisessä sisäpuolisessa tarkastuksessa myös TOFD-mittauksella. EMAT-ultraäänellä havaittiin samassa paikassa pinnoitteen irtoaminen ja paksuusmittauksista saatiin aiempiin mittauksiin verraten vastaavia tuloksia.

EMAT-ultraääni soveltuu käynninaikana tehtäviin tarkastuksiin, koska laitteessa käytettävä mittauspää kestää korkeita, jopa yli 600°C pintalämpötiloja. Tasaisin väliajoin suoritettavilla EMAT-mittauksilla, voidaan seurata vikaantumisen etenemistä ja pinnoitteen kuntoa. Mittapistet, joissa on havaittu pinnoitteen irtoamista, voidaan merkitä suoraan laitteeseen

kunnon valvomiseksi. Merkintöjen avulla varmistutaan, että määräajoin suoritettavat mittaukset tehdään aina samoista kohdista. Mittapisteet ovat esitettyinä kuvassa 26.



Kuva 26. EMAT-ultraäänelle määritellyt pisteet tarkasteltavan laitteen pinnalla.

### 5.3 Tulosten integrointi

Tässä tutkimuksessa suoritetun kirjallisuuskatsauksen, kokeellisen osion ja kohdeyrityksen tarkastushistorian perusteella voidaan muodostaa integroitu vikaantumismekanismitaulukko, josta voidaan nähdä vikaantumismekanismit, seuraukset, vikaantumisen todennäköisyys, kriittisyysluokka, seuraukset, potentiaalinen syy, menetelmät havaitsemiseksi, havaitsemisen todennäköisyys ja kuinka vikaantumista voidaan ehkäistä. Tulokset ovat esitettyinä liitteessä 3.

## 6 TULOSTEN POHDINTA JA JATKOTUTKIMUSAIHEET

### 6.1 Johtopäätökset ja tulosten analysointi

Kappaleessa 5 käsiteltyjen tulosten perusteella huomataan, että kriittisten korkeapainelaitteiden vikaantumismekanismit liittyvät yleiseen ja paikalliseen korroosioon tai jännityskorroosioon, jotka johtuvat prosessissa esiintyvistä kemikaaleista sekä lämpötilasta. Vikaantumishistorian perusteella myös yksi suurimmista potentiaalisista vikaannuttajista on suurseisokkien aikaiset inhimilliset virheet sekä valmistuksen aikaiset virheet. Inhimillisten virheiden takia tutkimuksessa tarkasteltaville kriittisille korkeapainelaitteille on aiheutunut naarmuuntumista ja kolhuja, jossa äärimmäisessä tapauksessa on jouduttu tekemään korjaustoimenpiteitä. Valmistuksen aikaiset virheet puolestaan aiheuttavat kriittisille prosessilaitteille mahdollisuuden altistua vikaantumismekanismeille suunnitellun käyttöiän aikana.

Vikaantumismekanismeista yleinen ja paikallinen korroosio ei ole luonteeltaan niin nopeasti kehittyvä, kuin jännityskorroosiosta johtuvat vikaantumiset. Jännityskorroosio saattaa edetä äkillisesti ja aiheuttaa vakavia seurauksia. Jännityskorroosiosta johtuvat halkeamat ovat vikaantumismekanismeista kriittisimpiä ja niitä voidaan havaita kaikissa materiaaleissa. Mekanismina jännityskorroosio on monimutkainen ja vaikka monia halkeilumalleja on esitetty, ei mikään malli ole pystynyt ottamaan huomioon kaikkia ominaisuuksia. (Féron, D. & Staehle, R.W. 2016, s. 327-328.)

Saatavilla olevista kunnonvalvontamenetelmistä, joilla on mahdollista saada jännityskorroosiohalkeamat kiinni aikaisessa vaiheessa, ovat akustisen emission mittaukset. Jännityskorroosiohalkeamia tutkivissa tutkimuksissa laboratorio-olosuhteissa käytetyillä akustisen emission mittauksilla on pystytty havaitsemaan halkeama heti, kun syntyneestä säröstä emittoituu energiaa, joka aiheuttaa vertailukohtaan nähden muutoksen olosuhteissa. (Féron, D. & Staehle, R.W. 2016, s. 333-339.)

Akustisen emission mittausten lisäksi saavutetaan hyötyjä varsinkin kriittisen korkeapainekierron reaktoreissa. Jännityskorroosion etenemisen ja satunnaisen luonteen takia monitorointi ja tarkastusmenetelmiä on saatavilla rajallisesti. Jatkuvan

kunnonvalvonnan tarpeen sekä saatavilla olevien systeemien perusteella akustisen emission mittaukset sopivat kohdeyrityksen kriittiseen korkeapainekierto. Suurin varmuus ja tarkkuus vikaantumisen havaitsemiseksi akustisen emission mittauksilla saadaan sensorien määrää kasvattamalla ja ehdotuksena mittapisteitä kannattaisi sijoittaa kriittisessä korkeapainekierrossa sijaitsevien reaktoreiden lisäksi myös linjassa oleviin lämmönvaihtimiin. Ehdotus akustisen emission antureiden määrästä laitetta kohden on esitettyinä taulukossa 13.

*Taulukko 13. Akustisen emission antureiden määrä laitetta kohden*

Laite	Antureiden määrä
Lämmönvaihdin tyyppi 1	2
Lämmönvaihdin tyyppi 2	4
Reaktori tyyppi 1	4
Reaktori tyyppi 2	7

Akustisen emission mittauksia hyödyntämällä jatkuvassa kunnonvalvonnassa saadaan oleellista tietoa käynnin aikana mahdollisista jännityskorroosion aiheuttamista säröytymisistä tai laitteiden sisäisistä vuotoista. Käytönaikaisen tiedon sekä neljän vuoden välein suoritettavan laajemman sisäpuolisen tarkastuksen avulla voidaan varmistua laitteiden painerungon eheydestä.

Kriittisessä korkeapainekierrossa sijaitseville kuudelle reaktorille voidaan perustellusti esittää asennettavaksi akustisen emission mittauksia, koska niiden avulla voidaan parantaa laitteiden luotettavuutta sekä muodostaa seurantasuunnitelma. Linjassa olevat lämmönvaihtimet puolestaan kannattaa myös lisätä jatkuvan kunnonvalvonnan piiriin, mutta seurantasuunnitelman muodostamisessa niille ei saavuteta merkittäviä taloudellisia tai käytännöllisiä hyötyjä.

Akustisen emission mittausten lisäksi kunnonvalvonnan piiriin voidaan kriittisten korkeapainelaitteiden välisiin putkistoihin lisätä jatkuvia korroosiomittauksia. Jatkuvan korroosio-kunnonvalvonnan avulla saadaan selville yleistä ja paikallista korroosiota sekä sen avulla voidaan seurata alkaneen korroosion etenemistä. Jatkuvilla korroosiomittauksilla saavutetaan hyödyllistä tietoa myös prosessin käyttäytymisestä ja erilaisista ajotilanteista.

Esimerkiksi korroosiomittauksilla havaittua hetkellisesti kiihtyvää korroosiota voidaan verrata sen hetken prosessiarvoihin ja ajomalleihin.

Prosessilaitteissa esiintyi valmistuksen aikaisia virheitä varsinkin pinnoitetuissa laitteissa. Valmistusaikaiset virheet pinnoitteessa voivat johtaa vakavimmillaan kriittisten korkeapainelaitteiden enneaikaiseen vikaantumiseen, jonka seuraukset ovat merkittävät kohdeyritykselle. Kokeellisessa osiossa käytetyistä tarkastusmenetelmistä vaiheistettua ultraääntä hyödyntävällä paintbrush-menetelmällä voidaan ehkäistä valmistuksen aikaista vikaantumista suorittamalla tarkastus heti laitteen valmistuttua. Pohjautuen kriittisten korkeapainelaitteiden vikaantumishistoriaan sekä kokeellisessa osiossa saatuihin tuloksiin on johtopäätöksenä syytä ehdottaa vaiheistetun ultraäänen tarkastusta ennen laitteiden käyttöönottoa. Tarkastus tulee suorittaa laadunvarmistuskäynnin yhteydessä jokaiselle uudelle kriittiselle korkeapainelaitteelle, etenkin sellaisille, jossa on sisäpuolinen pinnoite. Ennen käyttöä tehdystä mittauksesta saadaan arvokasta tietoa laadunvarmistuksen kannalta. Lisäksi tulevaisuudessa suoritettaville tarkastuksille saadaan vertailukohta, kun tiedetään todelliset mitat ennen käyttöä. Ennen käyttöönottoa saatujen todellisten mittojen avulla voidaan laskea esimerkiksi korroosion kuluttaman pinnan määrä ajan funktiona ja saadaan näin muodostettua laitteelle korroosiokerroin (Sultan, M. 2019).

Prosessissa vaikuttavien kemikaalit, lämpötilat ja paineet aiheuttavat vaatimuksia etenkin laitteissa käytettäville materiaaleille. Materiaalivalinta onkin keskeisessä osassa vikaantumismekanismien pienentämiseksi. Materiaaliominaisuuksien vaikutus tyypillisiin vikaantumismekanismeihin kriittisessä korkeapainekierrossa on esitettyä liitteessä 4. Kriittisen korkeapainekierron luotettavuutta voidaan parantaa päivittämällä hiiliteräksestä valmistetut materiaalit esimerkiksi tyyppin EN 1.4401 tai EN 1.4536 luokkien ruostumattomaan teräkseen. Päivittämällä hiiliteräksestä valmistetut laitteet austeniittisiin ruostumattomiin teräksiin saadaan lisättyä laitteen korroosiokestävyyttä. Kappaleessa 5 esitettyjen tulosten perusteella voidaan huomata, että tyyppin 3 lämmönvaihtimella, joka on valmistettu hiiliteräksestä, on suurempi todennäköisyys vikaantua verrattuna tyyppin 1 ja 2 lämmönvaihtimiin.

Ikääntymistä ja materiaalien mikrorakenteen muutosta voidaan tutkia rikkovalla koetuksella neljän vuoden välein suoritettavien sisäpuolisten tarkastusten yhteydessä. Reaktoreiden

sisääntulojen kohdalla on asennettuna koekappaleita, joiden materiaalit ovat verrattavissa painelaitteiden materiaaleihin. Tutkimuksen tuloksien perusteella ehdotuksena esitetään, että koekappaleet lähetetään viimeistään 8 vuoden välein laboratoriokeiksiin, jossa tehdään isku- ja vetokokeet. Kokeista voidaan todeta materiaalien mekaanisten ominaisuuksien säilyminen.

Kunnonvalvonnan lisäämisen ja tarkastustoiminnan myötä vikaantumisen havaitsemisen tehokkuutta voidaan parantaa, jolloin kokonaisriski laskee. Taulukossa 14 on esitettyä kunnonvalvonnan lisäämisen vaikutus riskiprioriteettinumeroon ja prosentuaalinen parannus, joka saavutetaan tehtyjen toimenpiteiden myötä.

*Taulukko 14. Kunnonvalvonnan lisäämisen vaikutus riskiprioriteettinumeroon.*

C = vakavuusaste P = esiintymistodennäköisyys D = havaitsemisen epävarmuus									
Vikaantumismekanismi	C	P	D	RPN1	Parannukset	C	P	D	RPN2
Mekaaniset ja metallurgiset vikaantumiset	4	4	3	48	Akustisen emission mittaukset	3	4	2	24
Riskiprioriteettinumeron parannus uuden tarkastustoimenpiteen myötä									50 %
Yleinen ja paikallinen korrosio	3	4	3	36	Jatkuvat korrosiomittaukset	3	4	2	24
Riskiprioriteettinumeron parannus uuden tarkastustoimenpiteen myötä									33,3%
Korkean lämpötilan korrosio	3	3	4	36	EMAT-ultraäänimittaukset	3	3	2	18
Riskiprioriteettinumeron parannus uuden tarkastustoimenpiteen myötä									50%
Ympäristön avustama säröytyminen	4	3	4	48	Akustisen emission mittaukset	4	3	3	36
Riskiprioriteettinumeron parannus uuden tarkastustoimenpiteen myötä									25%

Taulukko 14 jatkuu. Kunnonvalvonnan lisäämisen vaikutus riskiprioriteettinumeroon.

Valmistuksen aikainen vikaantuminen	4	4	4	64	Valmistuksen ja käynnin aikaiset vaiheistetut ultraäänitarkastukset	4	1	1	4
Riskiprioriteettinumeron parannus uuden tarkastustoimenpiteen myötä									93,75%

Korroosion ja jännityskorroosion seurannan tehostamiseksi ehdotetaan kirjallisuuden perusteella korroosion kontrollointi -dokumentaatiojärjestelmän, corrosion control documents (CCDs), käyttöönottoa. Korroosion kontrollointi -dokumentaatiojärjestelmä on hyvin hoidetun mekaanisen eheyden hallinnan dynaamisia ja kriittisiä komponentteja. Korroosion kontrollointi -dokumentaatiojärjestelmää voidaan laajentaa tässä tutkimuksessa tarkastellun vetykäsittelyosion lisäksi kattamaan koko kohdeyrityksen prosessilaitoksen. Oikein toteutettuna korroosion kontrollointi -dokumentointijärjestelmään syötetään kaikki oleelliset prosessi-, laite- ja vikaantumistiedot koko prosessin alasysteemeistä ja kierroista. (Williamson, K. 2019, s. 14-17.) Lähtötiedot ja ulos saatavat tiedot CCD-järjestelmästä ovat esitettyinä kuvassa 27.



Kuva 27. CCD järjestelmän kehittäminen (mukaiillen Williamson, K. 2019, s. 16).

CCD -järjestelmän avulla prosessin turvallisen, luotettavan ja tehokkaan operoinnin tietoa voidaan esittää helposti ja ymmärrettävästi laajasti eri työryhmille, jotka eivät ole yleensä tekemisissä saman tyyppisten dokumenttien kanssa. Dokumentoinnin ja mekaanisen

eheyden hallinnan lisäksi järjestelmä edistää kohdeyrityksen tiedonkulkua. (Williamson, K. 2019, s. 17.)

Kunnonvalvontamenetelmiin investointi yleisen ja paikalliseen korroosion, jännityskorroosion, mekaanisen ja metallurgisen vikaantumisen, ympäristön avustaman säröytymisen sekä valmistuksen aikaisen vikaantumisen maksaa itsensä takaisin, jos kohdeyritys näkee potentiaalin ennakoivien kunnossapitostrategioiden toteuttamiseen. Vuotojen tai vikaantumisten myötä kustannukset konkretisoituvat ja jopa yksikin vakava tapaus voi olla huomattavasti arvokkaampi, kuin kunnonvalvontajärjestelmään tehdyt investoinnit.

Riskiprioriteettinumeroiden pienenemisen myötä potentiaalinen riskimatriisi voidaan päivittää. Päivittämisen jälkeen potentiaalisen riskimatriisin, jossa ei-sallitulle alueelle jäi tapahtumia, riskimatriisin painopiste saadaan sallituille alueille. Keltaisella ja vihreällä alueella riski on tiedostettu ja toimenpiteitä on suoritettu, jolloin riski hyväksytään. Päivitetty riskimatriisi on esitetty kuvassa 28.

	Tapauksia ei tiedossa	Mahdollisuus vikaantumislle olemassa, mutta tapauksia ei tiedossa	On tapahtunut neljän vuoden ajojakson aikana	On tapahtunut kohdeyrityksessä kerran vuoden ajojakson aikana	On tapahtunut kohdeyrityksessä useita kertoja vuodessa
	1	2	3	4	5
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	18	48	0
4	4	0	36	0	0
5	0	0	0	0	0
Seuraus	Todennäköisyys				

Kuva 28. Riskimatriisi toimenpiteiden suorittamisen jälkeen.

### 6.1.1 Tulevaisuuden näkymät kohdeyrityksen kunnonvalvonnassa

Perinteisesti kunnossapito-organisaatioissa laitteiden huolto ja korjaustarpeet ovat perustuneet pitkälti hiljaiseen tietoon. Kokemuspohjainen hiljainen tieto on kuitenkin aina

riippuvainen tietyistä avainhenkilöistä. Kehityspotentiaalia saadaan ulosmitattua kohdeyrityksessä ymmärtämällä ja käsittelemällä saatavilla olevaa tietoa toimintamallilla, joka vähentää henkilöriippuvuutta. (Martinsuo, M. & Kärri, T. 2017, s. 87.) Henkilöriippuvuuden vähentämiseksi kunnossapito-organisaatiossa IoT-perusteiset anturit ja mittaukset soveltuvat kohdeyrityksen kriittisiin painelaitteisiin erinomaisesti.

Jo olemassa olevilla mittauksilla saadaan langattomasti kriittisessä korkeapainekierrossa olevista laitteista tärkeää tietoa, joista voidaan oikealla asiantuntemuksella muodostaa johtopäätöksiä laitteiden kunnosta. Asiantuntemusta on mahdollista tuoda enemmän läpinäkyväksi esimerkiksi saatavilla olevilla kaupallisilla sovelluksilla, joiden avulla voidaan visualisoida tiettyjä tapahtumia siten, että kaikki ymmärtävät. IoT:n kehittämisen avulla saadun tiedon perusteella voidaan asettaa laitteisiin hälytysrajoja, jotka indikoivat laitteen vikaantumista. Hälytyksen tapahtuessa operointiaseman näytölle tulee ilmoitus laitteen ominaisuuksien kriittisestä muutoksesta, jolloin huoltotoimenpiteisiin ja korjauksiin osataan varautua. IoT-verkostoon antureiden lisäyksissä kannattaa ottaa huomioon yhteensopivuus muiden olemassa olevien mittausten kanssa. Mittapisteiden lisäyksen myötä luontaisesti myös käsiteltävän tiedon määrä kasvaa ja panostusta asiantuntemukseen lisääntyneen tiedon käsittelyyn tarvitaan. Tiedon tehokas käsittely sitoo kohdeyrityksessä resursseja, johon kannattaa varautua.

Kohdeyrityksen kannalta panostus digitalisaatioon ja IoT:n kehitykseen auttaa pysymään oman toimialansa keihäänkärkenä. IoT:n ennustetaan tulevaisuudessa tuovan maailmanlaajuisesti 11 triljoonan dollarin vuotuiset säästöt vuonna 2025. Yritysten vuotuisen tuoton on ennustettu kasvavan 21% vuoteen 2022 mennessä IoT-järjestelmiin panostamalla. (Forbes Insights 2017, s. 4.) IoT:n avulla saatuja tietoja voidaan tulevaisuudessa hyödyntää myös yli organisaation. Tiedon tehokkaaseen ja nopeaan käsittelyyn voidaan yhdistellä niin yrityksen sisäisiä kuin ulkoisiakin resursseja. Esimerkiksi yhdistelemällä yrityksen sisältä saatua tietoa, kentältä kerättyjä muistiinpanoja, yhteistyökumppaneita ja ulkoisia resursseja voidaan muodostaa verkosto tiedon käsittelyyn ja tiedon hyödyntämiseen mahdollisimman tehokkaasti. (Martinsuo, M. & Kärri, T. 2017, s. 89-90.)

### 6.1.2 Tutkimuskysymysten pohdinta

Tutkimuskysymyksiä asetettiin yhteensä viisi kappaletta. Ensimmäinen tutkimuskysymys: *''Mitä vikaantumismekanismeja kohdeyrityksen kriittisessä korkeapaineosassa esiintyy ja miksi?''* Kirjallisuuskatsaukseen ja kohdeyrityksen historiatietoihin perustuen vikaantumismekanismeina kriittisessä korkeapaineosassa esiintyy yleistä ja paikallista korroosiota, jännityskorroosiosta johtuvia halkeamia, ympäristöstä johtuvaa säröytymistä ja halkeilua, valmistuksen aikaista vikaantumista sekä inhimillisistä virheistä johtuvia vikaantumisia. Korroosiotyypit ja jännityskorroosiohalkeamat johtuvat kohdeyrityksen prosessivirrassa kulkevista kemikaaleista, kuten rikkivedystä, vedystä, suolahaposta, klorideista, karbonaateista ja amiinista. Ympäristöstä johtuva säröily ja halkeilu johtuu suurista lämpötilanvaihteluista sekä sisäpuolisesta paineesta. Valmistuksenaikaiset vikaantumiset ovat valmistusvirheestä johtuvia ja ne ovat prosessista riippumattomia, mutta mahdollisia ehkäistä tarkastustoiminnan avulla. Inhimillisestä virheistä johtuvat vikaantumiset ovat tapahtuneet huolimattomuuden takia ja ovat prosessista riippumattomia.

Toinen tutkimuskysymys oli: *''Millä menetelmillä voidaan todentaa kriittisissä korkeapainelaitteissa esiintyvät vikaantumismekanismit ja miten vikaantumista voidaan ehkäistä?''* Kirjallisuuskatsauksen ja kokeellisen osion perusteella kriittisten korkeapainelaitteiden vikaantumismekanismit voidaan havaita tehokkaasti yhdistelemällä jatkuvaa kunnonvalvontaa, kuten akustisen emission mittauksia sekä korroosiomittauksia, ja käynninaikana suoritettavia tarkastuksia. Käynninaikana suoritettavina tarkastuksina voidaan käyttää vaiheistettua ultraääntä, EMAT-ultraäänitarkastuksia sekä digitaalisen radiografian tarkastuksia. Neljän vuoden välein suoritettavat laitteen sisäpuoliset tarkastukset pyritään suorittamaan mahdollisimman laajasti ja tarkasti, koska silloin on tilaisuus päästä todentamaan laitteiden sisäpuolinen kunto.

Merkittävimmit ja helpoimmin toteutettavissa olevat vikaantumisia ehkäisevät menetelmät ovat valmistuksen aikana suoritettavan vaiheistetut ultraäänitarkastukset varsinkin pinnoitetuille painelaitteille. Pinnoitettujen painelaitteiden käyttöiän varmistamiseen pinnoitteen kiinnityksen toteaminen on ennaltaehkäisevä keino välttää vikaantumisia. Lisäksi merkittävässä osassa vikaantumisia olivat inhimilliset virheet, jotka tapahtuivat varsinkin huoltopysäytysten aikana. Näitä vikaantumisia voidaan ehkäistä tehostamalla valvontaa kriittisten painelaitteiden huollon aikana. Muita menetelmiä vikaantumisen

ehkäisemiseksi ovat jo suunnitteluvaiheessa tehtävät materiaalivalinnat kriittisille painelaitteille.

Kolmas tutkimuskysymys oli: *''Miten kriittisten painelaitteiden kunnonvalvontaa voidaan kehittää kohdeyrityksessä?''* Kohdeyrityksen kunnonvalvontaa voidaan kehittää lisäämällä kriittisessä korkeapainekierrossa sijaitsevat reaktorit sekä lämmönvaihtimet jatkuvan kunnonvalvonnan piiriin hyödyntämällä akustisen emission mittauksia. Lisäksi normaalin käynnin aikana tehtävien ulkopuolisten NDT-menetelmien avulla voidaan saada jatkuvan kunnonvalvonnan tueksi lisätietoja. Perusaineen ja pinnoitteen välistä kuntoa voidaan valvoa vaiheistetulla ultraäänellä tai EMAT-ultraäänellä. IR-lämpökameralla voidaan suorittaa ilmajäähdyttimelle tarkastuksia vuotojen varalta. Jatkuvia korroosiomittauksia kannattaa sijoittaa kriittiseen korkeapainekiertoonsa varsinkin laitteiden välisiin putkistoihin, joissa esiintyy yleistä ja paikallista korroosiota. Lisäksi kunnonvalvonnan dokumentointia voidaan kehittää aloittamalla korroosion kontrollointi dokumenttien ylläpito kohdeyrityksen sisäisissä tietojärjestelmissä. Korroosion kontrollointiin rikkovia aineenkoetusmenetelmiä voidaan hyödyntää sisäpuolisten tarkastusten yhteydessä tekemällä prosessivirrassa sijaitseville koepaloille vetokoe sekä iskukoe korkean lämpötilan korroosion aiheuttamien vikaantumisten varalle.

Neljäs tutkimuskysymys oli: *''Miten seurantasuunnitelman muodostaminen kriittisille korkeapainelaitteille hyödyttää kohdeyritystä ja miksi?''* Seurantasuunnitelman muodostaminen kriittisille korkeapainelaitteille hyödyttää kohdeyritystä taloudellisessa ja tuotannollisessa mielessä. Jatkuvan kunnonvalvonnan ja tarkastustoiminnan lisäämisen myötä kriittisten painelaitteiden eheydestä saadaan tietoa, jota voidaan hyödyntää huoltopysäytyksessä suoritettuihin huoltoihin ja korjauksiin varautuessa. Painelaitelaissa määritellyn määräaikaisen painekokeen ajankohtaa voidaan pidentää kaksinkertaiseksi, jolloin taloudellisia hyötyjä saadaan huoltopysäytyksien kestossa. Huoltopysäytyksien suunnittelu- ja korjaustoimenpiteisiin varautuminen helpottuu, kun mittausten avulla saadaan jatkuvasti tietoa laitteen eheydestä. Tällöin saadaan maksimoitua kohdeyrityksen tuotantopäivät ja minimoitua pysähdyksissä menevä aika.

Tutkimuksessa tarkasteltavista laitteista kriittisen korkeapainekierron reaktorit ovat laitteita, joihin kannattaa seurantasuunnitelma muodostaa. Pienemmille laitteille, kuten

lämmönvaihtimille, määräaikainen koeponnistus on reaktoreihin verrattuna nopea tehdä, eikä sen pois jättämisestä saada suuria hyötyjä. Lämmönvaihtimien luotettavuuden parantamiseksi niitä esitetään kuitenkin siirrettäväksi myös jatkuvan kunnonvalvonnan piiriin akustisen emission mittauksien ja jatkuvilla korroosiomittauksilla.

Viides tutkimuskysymys oli: *''Miten seurantasuunnitelma kriittisille korkeapainelaitteille toteutetaan?''* Seurantasuunnitelmaa kriittisille korkeapainelaitteille toteutetaan vaiheittain. Kohdeyrityksen kriittisen korkeapainekierron laitteista tunnistetaan mahdolliset vikaantumismekanismit, vikaantumisen todennäköisyys, seuraukset, miten vikaantumiset voidaan havaita tehokkaasti ja miten vikaantumisia voidaan ehkäistä. Seurantasuunnitelma toteutetaan yhdessä painelaitteiden käytönvalvojan, viranomaisen ja ulkopuolisen tarkastuslaitoksen välisenä sopimuksena.

Tutkimuksessa seurantasuunnitelman muodostamiseksi kriittisen korkeapainekierron reaktoreille sekä lämmönvaihtimille asennetaan akustisen emission mittaukset ja siirretään ne jatkuvan kunnonvalvonnan piiriin. Tämän lisäksi neljän vuoden välein suoritetaan laitteiden sisäpuolelta 100% laajuinen visuaalinen tarkastus, jonka lisäksi tarkastusohjelman mukaan tunkeumaneste-, röntgen- ja ultraäänitarkastuksia, joissa käydään läpi laitteiden kriittiset kohdat ja pinnoitteen kunto. Käynnin aikana suoritetaan vuosittain vaiheistetulla ultraäänellä mittaukset kohtiin, joissa on havaittu poikkeamia.

## 6.2 Tutkimuksen luotettavuus ja objektiivisuus

Tutkimuksen luotettavuus ja objektiivisuus todennetaan reliabiliteetin ja validiteetin avulla. Reliabiliteetin avulla tarkastellaan mittausten tarkkuutta ja sitä kuinka luotettavat mittaukset olivat. Validiteetilla todennetaan, että mitattava asia oli oikea. Kokeellisen osion reliabiliteettia tukevat tarkastushistoria ja eri menetelmillä saadut lähes samat tulokset. Vaiheistetulla ultraäänellä ja EMAT-ultraäänellä tunnistettiin oikeita vikaantumismekanismeja. Värähtelykameralla saadut värähtelytasot vastasivat olemassa olevien värähtelymittausten tasoa. Reliabiliteettia heikentävät tekijät ovat inhimilliset tekijät mittauksessa. Pieni virhemarginaali tuloksissa johtuu mittauslaitteista sekä mittauksen suorittajan vaihtumisesta. Varsinkin värähtelykameralla kuvatessa kuvaajan ammattitaito on tärkeä kohteen todellisen värähtelyn tunnistamiseksi.

Tutkimuksen validiteetti on todennettu varmistamalla haastateltavien asiantuntijoiden riittävä asiantuntemus ongelmaan nähden. Haastattelujen lisäksi kirjallisuuskatsauksessa tarkastellut tutkimukset ovat valittu tarkkaan ja luotettavista lähteistä. Kirjallisuuskatsauksesta löytyneet tiedot sekä asiantuntijoiden kanssa käydyt keskustelut tukivat toisiaan ja lisäsivät näin validiteettia.

Tutkimuksen objektiivisuutta heikentävinä tekijänä voidaan pitää kohdeyrityksen sisäisten laite- ja prosessitekniisten tietojen luottamuksellisuutta. Laite- ja prosessitekniisiä tietoja jouduttiin tutkimuksessa käsittelemään luottamuksellisesti ja esimerkiksi tarkat kemikaalit, prosessiarvot, laitteiden materiaalit ja laitteiden tyypit pyrittiin pitämään luottamuksellisena kohdeyrityksen vaatimuksesta.

### 6.3 Tutkimuksen merkitys kohdeyritykselle ja tulosten yleistettävyys

Tutkimuksesta saatavat tulokset ovat merkittävässä roolissa yrityksen toimintaan ja arkeen. Vikaantumismekanismien, menetelmien sekä luotettavuuskeskeisen kunnossapidon kannalta tutkimus pitää sisällään vikaantumisista sekä tarkastusmenetelmistä oleellista tietoa, jota ei aikaisemmin yrityksessä ole tutkittu. Vikaantumismekanismien ja kunnonvalvontamenetelmien tarkastelun ansiosta kohdeyritys voi kohdentaa tarkastustoimintaansa perusteltuihin kohteisiin sekä arvioida paremmin kohteista mahdollisesti löytyvät vikaantumismekanismit.

Kappaleessa 3 esitettyjen seurantasuunnitelman muodostamisen vaiheiden avulla voidaan muodostaa tulevaisuudessa systemaattinen malli, jota voidaan hyödyntää myös kohdeyrityksen muihin osiin. Mallia voidaan käyttää valmiina pohjana muita alueita tarkastellessa.

Tuloksien yleistettävyydessä täytyy ottaa huomioon jokaisen tuotantolaitoksen ja jalostamon yksilöllisyys. Painelaitteet ovat yksilöitä ja ne valmistetaan aina erikseen, joten vikaantumismekanismit voivat vaihdella eri ympäristöissä. Lisäksi prosessiarvot ja laitteiden käyttöaste voivat vaihdella, jolloin myös vikaantumismekanismit ja toimivat kunnonvalvontamenetelmät voivat vaihdella.

#### 6.4 Jatkotutkimusaiheet

Tämän tutkimuksen perusteella potentiaalisia jatkotutkimusaiheita nousi esille kolme kappaletta: vikaantumismekanismien selvittäminen kohdeyrityksen muilta alueilta, korroosion kontrollointi dokumentaation kehitys sekä sopivan RBI-ohjelmiston valitseminen. Kohdeyrityksen tuotannon eri osa-alueissa prosessiarvot, materiaalit, mahdolliset vikaantumismekanismit sekä laitetyypit eroavat toisistaan. Kokonaisuuden hallinnan ja oleellisen tiedon keräämisen puolesta jokaista osa-aluetta suositellaan tarkasteltavaksi erikseen, jonka takia alueet siirretään jatkotutkimusaiheisiin.

Tässä tutkimuksessa perehdyttiin kohdeyrityksen tuotannon kriittisimpään osaan, josta voidaan soveltaa mallia muiden osien analysoinnin tekemiseksi. Käyttöolosuhteista on mahdollista löytää myös yhtäläisyyksiä tässä tutkimuksessa tarkasteltuihin laitteisiin, jolloin jo olemassa olevaa tietoa voidaan hyödyntää myös prosessin muihin alueisiin.

##### 6.4.1 Korroosion kontrollointi dokumentaatio

Korroosion kontrollointi dokumentaation kehittäminen tulee jatkossa olemaan kohdeyrityksessä yhä tiiviimmin mukana kunnossapitoyksikön toiminnassa. Korroosion kontrollointi dokumentaation muodostamiselle on yrityksen vikaantumisen seurannassa selkeä tarve. Dokumentaation kehitykseen oleellisena osana on prosessin eri osa-alueilta kerättävä tieto korroosiota aiheuttavista tekijöistä. Tällä hetkellä kohdeyrityksessä korroosiota aiheuttavia tekijöitä alueittain ei ole dokumentoitu, joten tietotaito on yrityksen sisäisesti rajoittunut vain tietyille avainhenkilöille. Tulevaisuuden tavoitteena on listata prosessin eri osa-alueiden prosessiarvot, korroosiota aiheuttavat olosuhteet, putkimateriaalit ja suunnitellut toimenpiteet korroosion varalle.

##### 6.4.2 RBI-ohjelmisto

Riskiperusteisen tarkastuksen ja luotettavuuskeskeisen kunnossapidon toteuttamiseksi tarvitaan ohjelmisto, johon tietoa kerätään. RBI-ohjelmistoja on jo maailmalla valmiina ja jatkotutkimusaiheena olisi tarpeellista vertailla eri ohjelmistoja sekä niiden ominaisuuksia. Ohjelmistojen ominaisuuksia ja yhteensopivuuksia tulisi kartoittaa kohdeyrityksen tarpeiden kannalta ja niiden pohjalta valita sopiva. Jatkotutkimuksen perusteella pitäisi voida esittää perusteltu näkemys minkälainen ohjelma palvelisi kohdeyritystä parhaiten ja miksi.

## 7 YHTEENVETO

Tässä tutkimuksessa UPM Lappeenrannan biojalostamon kriittiseen korkeapaineosaan kartoitettiin menetelmiä, joilla laitteiden kuntoa voidaan seurata. Tutkimus tehtiin kohdeyrityksen kunnossapito-organisaation tarpeisiin. Tulokset jakautuivat osioihin, joita olivat vikaantumismekanismien ja sopivien kunnonvalvonta menetelmien kartoitus riskiperusteisen tarkastuksen analysointimenetelmien avulla sekä toimenpiteet kriittisten korkeapainelaitteiden seurantasuunnitelman muodostamiseksi.

Kohdeyrityksen kriittisen korkeapaineosion vikaantumismekanismeiksi havaittiin prosessikemikaaleista johtuva korroosio ja jännityskorroosio, korkeista lämpötiloista johtuva mekaaninen vikaantuminen, ikääntymisestä johtuva mekaaninen vikaantuminen, valmistuksen aikainen vikaantuminen sekä inhimillisestä virheestä johtuva vikaantuminen. Nämä vikaantumismekanismit olivat myös standardien, tutkimusten ja riskianalyyysien perusteella kriittisimmät laitteiden vikaantumisten kannalta.

Tutkimusmetodina käytettiin asiantuntijahaastatteluja, kirjallisuuskatsausta sekä kokeellista osuutta. Asiantuntijahaastattelujen, kirjallisuuden ja kokeellisen osion perusteella esitetään jatkuvien akustisten emission mittausten sekä jatkuvien korroosiomittausten lisäystä kriittisiin korkeapainelaitteisiin. Kokeellisessa osiossa testatuista menetelmistä vaiheistettua ultraääntä sekä EMAT-ultraääntä esitetään jatkossa suoritettavaksi varsinkin pinnoitetuille painelaitteille käynnin ja valmistuksen aikana. Jatkuvan kunnonvalvonnan ja tarkastusten avulla voidaan kehittää merkittävästi kohdeyrityksen kriittisten korkeapainelaitteiden kunnonvalvontaa ja luotettavuutta.

Määräaikaisen painekokeen määräajan pidentämiseksi ehdotetaan seurantasuunnitelman tekemistä kriittisessä korkeapainekierrossa sijaitseville kuudelle reaktorille. Seurantasuunnitelma muodostetaan siirtämällä reaktorit ja lämmönvaihtimet jatkuvan kunnonvalvonnan piiriin sekä käynnin aikana suoritetaan tarkastussuunnitelman mukaisesti NDT-tarkastuksia. Korroosion kontrollointi dokumentaatio -ohjelmaa esitetään aloitettavaksi prosessissa korrosoivien aineiden tunnistamiseksi.

## LÄHTEET

API RP 571. 2011. Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry. American Petroleum Institute. Second edition. 1-350 s.

API RP 572. 2016. Inspection of Pressure Vessels. American Petroleum Institute. Fourth Edition. 1-130 s.

API RP 580. 2016. Risk-Based Inspection. American Petroleum Institute. Third edition. 1-81 s.

API RP 581. 2019. American Petroleum Institute. Risk-Based Inspection Technology. Third edition. 1-600 s.

Féron, D. & Staehle, R.W. 2016. Stress Corrosion Cracking of Nickel-Based Alloys in Water-Cooled Nuclear Reactors - The Coriou Effect. Tests for Investigating Corrosion Initiation. Elsevier. 327-328 s.

Finlex. 2016. Painelaitelaki. [Finlex:n www-sivuilla]. [Viitattu 18.9.2019]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20161144>

FLIR T640 IR-lämpökamera. [FLIR:n www-sivuilla]. [Viitattu 25.6.2019]. Saatavissa: <https://www.flir.com/products/t640/>

Forbes Insights. 2017. The Internet of Things: From Theory to Reality. How Companies are leveraging the IoT to move their businesses forward. Forbes Insights. 4-22 s.

Gan, W. S. 2012. Techniques and Applications for Engineers. Acoustical Imaging. John Wiley & Sons. 192-193 s.

Gianfrancesco, A. D. 2017. Infrared Thermography. Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants. Elsevier. 238 s.

Hauptmanns U. 2013. Safe Design and Operation of Plants. Process and Plant Safety. Springer. Germany. 97-188 s.

Hobart Institute of Welding Technology. 2013. Welding Guide - Equipment., 2nd Edition. 107-108 s.

Information Resources Management Association. 2017. Materials Science and Engineering. Concepts, Methodologies, Tools, and Applications. Internet of Things (IoT). IGI Global. 477-478 s.

Innerspec PowerBox H mittauslaitteisto. [Innerspecin www-sivuilla]. [Viitattu 26.6.2019]. Saatavissa: <https://www.innerspec.com/portable/instruments/innerspec-powerbox-h/>

IRIS M liikkeenvahvistuskamera. Machine & Laser Technology. [MLT:n www-sivuilla]. [Viitattu 2.5.2019]. Saatavissa: <https://www.mltfinland.fi/iris-m/>

Keil, S. 2017. Technology and Practical Use of Strain Gages: With Particular Consideration of Stress Analysis Using Strain Gages - Basic Principles. John Wiley & Sons. 17 s.

Kutz, M. 2015. Mechanical Engineers' Handbook. Materials and Engineering Mechanics - Vibration. Volume 1. 4th Edition. John Wiley & Sons. 504-505 s.

Martikainen, J. & Niemi, E. 1993. NDT-tarkastus käsikirja: Yleinen osa. Suomen hitsaustieto. Helsinki. 27-30 s.

Martinsuo, M. & Kärri, T. 2017. Teollinen internet uudistaa palveluliiketoimintaa ja kunnossapitoa. Kunnossapitoyhdistys ProMaint. 8-232 s.

Pressure Equipment PED Category Calculator. PED taulukot [CE-marking Certificationin www- sivuilla]. [Viitattu 12.9.2019]. Saatavissa: <http://www.eucertification.com/ce-certification-2/ped/pressure-vessel-calculator>

Sanford, W. 2015. Achieve Comprehensive Reliability by Combining RBI and RCM. Inspectioneering Journal. [Inspectioneering www-sivuilla]. [Viitattu 9.7.2019]. Saatavissa: <https://inspectioneering.com/journal/2015-04-21/4539/achieve-comprehensive-reliabil>

Schenkelberg, F. 2015. Introduction to Reliability Engineering. Inspectioneering Journal. [Inspectioneering www-sivuilla]. [Viitattu 9.7.2019]. Saatavissa: <https://inspectioneering.com/journal/2015-02-25/4432/introduction-to-reliability-en>

SFS-EN 16714-1. 2016. Non-destructive testing. Thermographic testing. Part 1: General principles. European committee for standardization. 1-10 s.

SFS-EN ISO 16810. 2014. Rikkomaton aineenkoetus. Ultraäänitarkastus. Yleisperiaatteet. International Organization for Standardization. 4-22 s.

SFS-ISO 17359. 2010. Koneiden kunnonvalvonta ja diagnostiikka. Yleiset periaatteet. International Organization for Standardization. 1-55 s.

SFS-ISO 22096. 2007. Condition monitoring and diagnostics of machines – Acoustic emission. International Organization for Standardization. 1-7 s.

SFS-EN ISO 3452-1. 2013. Rikkomaton aineenkoetus. Tunkeumanestetarkastus. Osa 1: yleisperiaatteet. International Organization for Standardization. 4-48 s.

SFS-EN ISO 5579. 2014. Rikkomaton aineenkoetus. Metallisten materiaalien radiografinen kuvaus käyttäen filmitekniikkaa ja röntgen- tai gammasäteilyä. Perusohjeet. International Organization for Standardization. 4-30 s.

SFS-EN ISO 9712. 2012. Rikkomaton Aineenkoetus. NDT-henkilöiden pätevänti ja setifiointi. Yleisperiaatteet. International Organization for Standardization. 1-64 s.

SFS-EN ISO 9934-1. 2016. Rikkomaton aineenkoetus. Magneettijauhetarkastus. Osa 1: Yleisohjeet. International Organization for standardization. 1-21 s.

SFS-IEC 60300-3-9. 2000. Luotettavuusjohtaminen osa 3: Käyttöopas. Luku 9. Teknisten järjestelmien riskianalyysi. Suomen Standardoimisliitto. 1-47 s.

Sultan, M. I. 2019. Advantages of Performing Risk-Based Inspection Analyses During Project Design and Construction Stages. Inspectioneering Journal. [Inspectioneering www-sivuilla]. [Viitattu 5.8.2019]. Saatavissa: <https://inspectioneering.com/journal/2019-04-25/8409/advantages-of-performing-risk-based-inspection-analyses-during-p>

TOPAZ 64 testilaitteisto. [Topazin www-sivuilla]. [Viitattu 25.6.2019]. Saatavissa: <https://www.zetec.com/products/ultrasound/instrumentation/topaz64/>

Teledyne ICM SITEX CP200D digitaalinen radiografia laitteisto. [Teledyne ICM www-sivuilla]. [Viitattu 25.6.2019]. Saatavissa: <http://www.teledyneicm.com/products/ndt/cp200d/>

Tiratsoo, J. 2013. Pipeline Pigging and Integrity Technology - Conclusion. 4th Edition. Clarion Technical Publishers. 119-121 s.

TUKES. Painelaitteet. Moduulit ja kuvaukset. [TUKES:n www-sivuilla]. [Viitattu 28.1.2019]. Saatavissa: <https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/painelaitteet>

UPM Biopolttoaineet. Kehittyneiden biopolttoaineiden valmistus: Edistyksellinen biopolttoaineiden tuotantoteknologia. [UPM biopolttoaineiden www-sivuilla]. [Viitattu 16.1.2019]. Saatavissa: <https://www.upmbiofuels.com/fi/upm-biopolttoaineet/tuotanto/>

UPM Biopolttoaineet. UPM BioVerno -diesel sopii kaikkiin dieselmoottoreihin. [UPM biopolttoaineiden www-sivuilla]. [Viitattu 3.5.2019]. Saatavissa: <https://www.upmbiofuels.com/fi/tuotteet/upm-bioverno-diesel/>

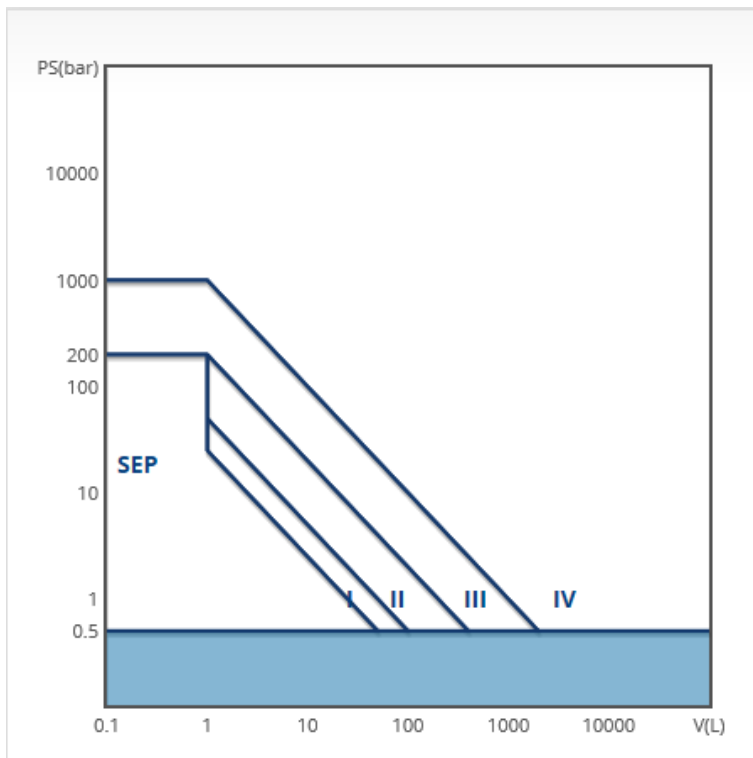
UPM Biopolttoaineet. Viisi syytä miksi UPM BioVerno on paras liikenteen polttoaine. [UPM biopolttoaineiden www-sivuilla]. [Viitattu 7.8.2019]. Saatavissa: <https://www.upmbiofuels.com/fi/liikennepolttoaineet/>

UPM Biopolttoaineet. UPM Lappeenrannan biojalostamo. [UPM biopolttoaineiden www-sivuilla]. [Viitattu 7.8.2019]. Saatavissa: <https://www.upmbiofuels.com/fi/upm-biopolttoaineet/tuotanto/upm-lappeenrannan-biojalostamo/>

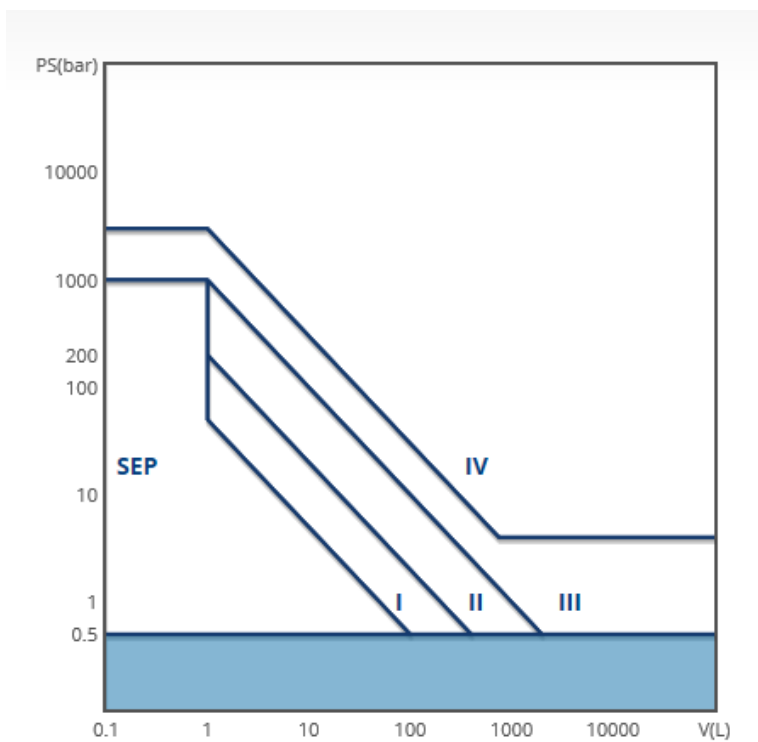
Walker, K. 2011. Process condition monitoring. Steel Times International. Vol 35. Redhill. 27-28 s.

Williamson, K. & White, J. 2019. Managing Reliability Of Ethane Crackers Using DMR, RBI, and IOWS. Getting the Most Out of Your Corrosion Control Documents. Volume 25. Is. 3. Inspectioneering Journal. 14-18 s.

Zetec NDT PaintBrush laitteisto. [Jess W. Jackson & Associates, Inc. www-sivuilla]. [Viitattu 25.6.2019]. Saatavissa: <https://www.jwjndt.com/product/zetec-ndt-paintbrush/>

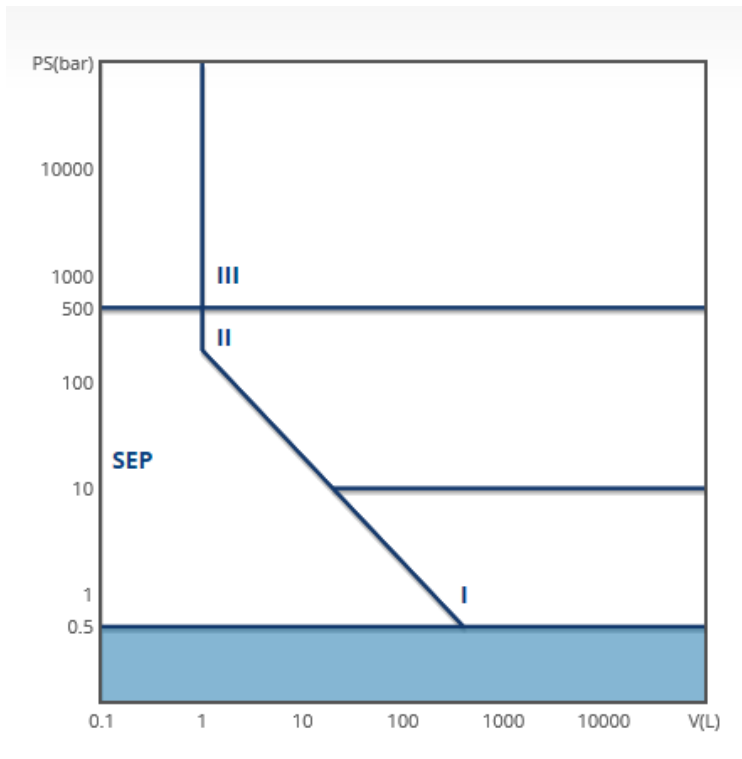


Luokka 1, sisältö: kaasu.

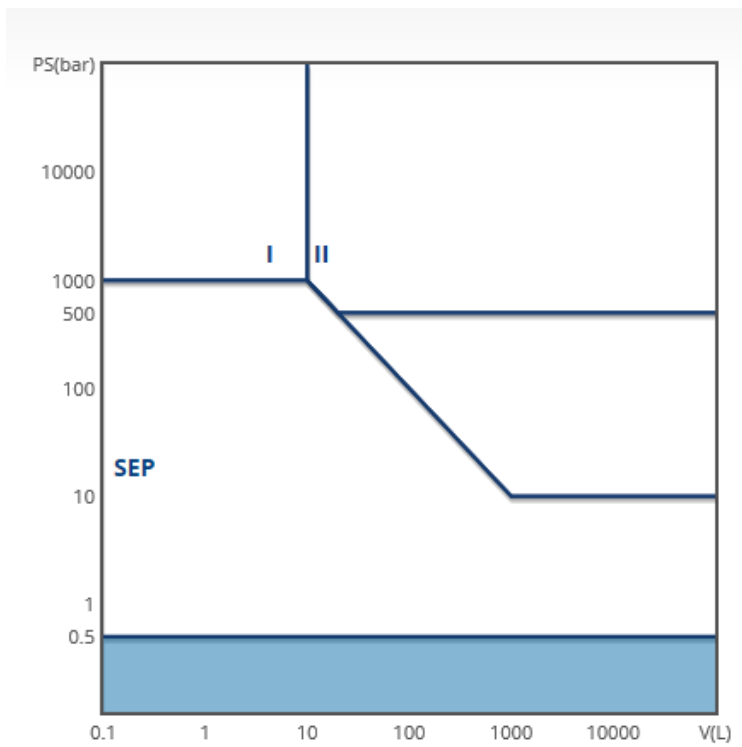


Luokka 2, sisältö: kaasu.

Liite 1, 2



Luokka 1, sisältö: neste.



Luokka 2, sisältö: neste

Table 4.8—Component Damage Flammable Consequence Equation Constants

Fluid	Fluid Type	Continuous Releases Constants								Instantaneous Releases Constants							
		Autoignition Not Likely (AINL-CONT)				Autoignition Likely (AIL-CONT)				Autoignition Not Likely (AINL-INST)				Autoignition Likely (AIL-INST)			
		Gas		Liquid		Gas		Liquid		Gas		Liquid		Gas		Liquid	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
C <sub>1</sub> -C <sub>2</sub>	TYPE 0	43.0	0.98			280.0	0.95			41.0	0.67			1079	0.62		
C <sub>3</sub> -C <sub>4</sub>	TYPE 0	49.48	1.00			313.6	1.00			27.96	0.72			522.9	0.63		
C <sub>5</sub>	TYPE 0	25.17	0.99	536.0	0.89	304.7	1.00			13.38	0.73	1.49	0.85	275.0	0.61		
C <sub>6</sub> -C <sub>8</sub>	TYPE 0	29.0	0.98	162.0	0.89	312.4	1.00	525.0	0.95	13.98	0.66	4.35	0.78	275.7	0.61	57.0	0.55
C <sub>9</sub> -C <sub>12</sub>	TYPE 0	12.0	0.98	130.0	0.90	391.0	0.95	560.0	0.95	7.1	0.66	3.3	0.76	281.0	0.61	6.0	0.53
C <sub>13</sub> -C <sub>16</sub>	TYPE 0			64.0	0.90			1023	0.92			0.46	0.88			9.2	0.88
C <sub>17</sub> -C <sub>20</sub>	TYPE 0			20.0	0.90			861.0	0.92			0.11	0.91			5.6	0.91
C <sub>21</sub> -	TYPE 0			11.0	0.91			544.0	0.90			0.03	0.99			1.4	0.99
Pyrophoric	TYPE 1	12.0	0.98	130.0	0.90	391.0	0.95	560.0	0.95	7.1	0.66	3.3	0.76	281.0	0.61	6.0	0.53
Aromatics	TYPE 1	17.87	1.097	103.0	0	374.5	1.055			11.46	0.667	70.12	0	512.6	0.713	701.2	0
Styrene	TYPE 1	17.87	1.097	103.0	0	374.5	1.055			11.46	0.667	70.12	0	512.6	0.713	701.2	0
Water	TYPE 0																
Steam	TYPE 0																
Acid/Caustic	TYPE 0																
Methanol	TYPE 1	0.026	0.909	1751	0.934					28.11	0.667	1.919	0.900				
H <sub>2</sub>	TYPE 0	64.5	0.992			420.0	1.00			61.5	0.657			1430	0.618		
H <sub>2</sub> S	TYPE 0	32.0	1.00			203.0	0.89			148.0	0.63			357.0	0.61		
HF	TYPE 0																
CO	TYPE 1	0.107	1.752							69.68	0.667						
DEE	TYPE 1	39.84	1.134	737.4	1.106	320.7	1.033	6289	0.649	155.7	0.667	5.105	0.919			5.672	0.919
PO	TYPE 1	14.61	1.114	1295	0.9560					65.58	0.667	3.404	0.869				
EEA	TYPE 1	0.002	1.035	117.0	0					8.014	0.667	69.0	0				
EE	TYPE 1	12.62	1.005	173.1	0					38.87	0.667	72.21	0				
EG	TYPE 1	7.721	0.973	106.0	0					6.525	0.667	69.0	0				
EO	TYPE 1	31.03	1.069							136.3	0.667						

Aineiden referenssiarvot.

Laite	Vikaantumismekanismi	Vikaantumisen potentiaalinen seuraus	Todennäköisyys	Kriittisyys luokka	Seuraukset	Potentiaalinen syy	Menetelmät havaitsemiseksi	Havaitsemisen epävarmuus	Kuinka ehkäistä
<b>Reaktori tyyppi 1</b>	8, 9, 12, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 30, 35, 36, 40, 43, 45, 53, 54, 56	Yleinen tai paikallinen korroosio, pintoavaurio, eroosiokorroosio, jännityskorroosioista johtuva halkeama, säröytyminen, vuoto, materiaalonnaisuuksien heikkeneminen, plastinen muodonmuutos	0,000297	4	4	Anmoniaakkloridi, vety, rikkivety, suolahappo, kloridi, amiini, ylikuumeneminen, valmistuksen aikaiset virheet, inhimilliset virheet	AT, MT, PT, RT, TT, UT, VT	3	Materiaalivalimat, prosessin operointi, valmistuksen aikaiset tarkastukset, jatkuva kunnonvalvonta, laitteen puhdistus avauksen yhteydessä
<b>Reaktori tyyppi 2</b>	3, 8, 9, 12, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 30, 35, 36, 40, 43, 45, 53, 54, 55, 56	Yleinen tai paikallinen korroosio, pintoavaurio, eroosiokorroosio, jännityskorroosioista johtuva halkeama, säröytyminen, vuoto, materiaalonnaisuuksien heikkeneminen, plastinen muodonmuutos	0,000297	4	4	Anmoniaakkloridi, vety, rikkivety, suolahappo, kloridi, amiini, ylikuumeneminen, valmistuksen aikaiset virheet, inhimilliset virheet	AT, MT, PT, RT, TT, UT, VT	3	Materiaalivalimat, prosessin operointi, valmistuksen aikaiset tarkastukset, jatkuva kunnonvalvonta, laitteen puhdistus avauksen yhteydessä
<b>Lämmönvaihtin tyyppi 1</b>	2, 8, 9, 12, 18, 19, 20, 22, 23, 30, 32, 35, 36, 39, 40, 43, 45, 54, 55, 56	Yleinen tai paikallinen korroosio, jännityskorroosioista johtuva halkeama, ssäinen vuoto, tukkeutuminen, säröytyminen, repeämä, haurasnurtuma materiaalonnaisuuksien heikkeneminen, plastinen muodonmuutos	0,0002673	4	4	Anmoniaakkloridi, vety, rikkivety, suolahappo, kloridi, amiini, ylikuumeneminen, valmistuksen aikaiset virheet, inhimilliset virheet	AT, ET, PT, RT, TT, UT, VT	3	Materiaalivalimat, prosessin operointi, valmistuksen aikaiset tarkastukset, jatkuva kunnonvalvonta, laitteen puhdistus avauksen yhteydessä
<b>Lämmönvaihtin tyyppi 2</b>	2, 8, 9, 12, 18, 19, 20, 22, 23, 30, 32, 35, 36, 39, 40, 43, 45, 54, 55, 56	Yleinen tai paikallinen korroosio, haurasnurtuma, jännityskorroosioista johtuva halkeama, säröytyminen, repeämä, vuoto, materiaalonnaisuuksien heikkeneminen, plastinen muodonmuutos	0,0002376	4	4	Anmoniaakkloridi, vety, rikkivety, suolahappo, kloridi, amiini, ylikuumeneminen, valmistuksen aikaiset virheet, inhimilliset virheet	AT, ET, PT, RT, TT, UT, VT	3	Materiaalivalimat, prosessin operointi, valmistuksen aikaiset tarkastukset, jatkuva kunnonvalvonta, laitteen puhdistus avauksen yhteydessä
<b>Lämmönvaihtin tyyppi 3</b>	2, 3, 4, 8, 9, 10, 12, 18, 19, 20, 22, 23, 30, 32, 35, 36, 39, 40, 43, 45, 48, 54, 55, 56, 63	Yleinen tai paikallinen korroosio, korkean lämpötilan vetyhyökkäys, haurasnurtuma, jännityskorroosioista johtuva halkeama, säröytyminen, repeämä, vuoto, materiaalonnaisuuksien heikkeneminen, plastinen muodonmuutos	0,0000594	4	4	Anmoniaakkloridi, vety, rikkivety, suolahappo, kloridi, amiini, ylikuumeneminen, valmistuksen aikaiset virheet, inhimilliset virheet	AT, ET, PT, RT, TT, UT, VT	4	Materiaalivalimat, prosessin operointi, valmistuksen aikaiset tarkastukset, jatkuva kunnonvalvonta, laitteen puhdistus avauksen yhteydessä
<b>Ilmajäähdytin</b>	2, 8, 9, 12, 18, 19, 20, 22, 23, 30, 36, 40, 43, 45, 49, 54, 56	Yleinen tai paikallinen korroosio, haurasnurtuma, jännityskorroosioista johtuva halkeama, säröytyminen, repeämä, vuoto, materiaalonnaisuuksien heikkeneminen, plastinen muodonmuutos	0,0001188	3	4	Anmoniaakkloridi, vety, rikkivety, suolahappo, kloridi, amiini, ylikuumeneminen, valmistuksen aikaiset virheet, inhimilliset virheet	ET, PT, TT, UT, VT	2	Materiaalivalimat, prosessin operointi, valmistuksen aikaiset tarkastukset, jatkuva kunnonvalvonta, laitteen puhdistus avauksen yhteydessä

Materiaaliominaisuus	Kriittisessä korkeapaineierrossa esiintyvät vikaantumismekanismit													
	Määrän rikkivedyn aiheuttama vaurio	Virumis- ja jännitysrepeämät	Ammoniakki kloridin aiheuttama korroosio	Korkean lämpötilan aiheuttama rikki/rikkivet ykorroosio	Kloorivetyhapon aiheuttama korroosio	Korkean lämpötilan vetyhyökkäykset	Terminen väsyminen	Kaustinen jännityskorrosio	Kaustinen korroosio	Erosio / Eroosio	Erosio / Eroosio	Karbonaateista aiheutuva jännityskorrosio	Aminista aiheutuva jännityskorrosio	Kloridista aiheutuva jännityskorrosio
Korroosiokestävyys														
Sähkönjohtavuus														
Hauraus														
Kimmokerroin														
Puristuslujuus														
Virumiskestävyys														
Sitkeys														
Väsymiskestävyys														
Murtolujuus														
Kovuus														
Plastisuus														
Leikkauslujuus														
Jäykkyys														
Pimankarheus														
Vetolujuus														
Iskusitkeys														
Myötölujuus														
Lämpölaajenemiskerroin														
Transiitolämpötila														
Lämmönjohtavuus														

Materiaaliominaisuuden vaikutus vikaantumismekanismiin.

Materiaaliominaisuus	Kriittisessä korkeapainekierrossa esiintyvät vikaantumismekanismit													
	Ylikuumentuminen - jännitysrepeämä	Sigman haurastuminen	Uudelleenlämmityksestä johtuva halkeama	Rikkihapon aiheuttama korrosio	Eriparimetallien murtuminen	Vetyjännityksestä johtuva halkeilu	Korroosio	Amiinin aiheuttama korrosio	Ammoniakin aiheuttama jännityskorroosio	Galvaaninen korrosio	Mekaaninen väsyminen	Typettyminen	Tärinän aiheuttama väsyminen	Fenolista aiheutuva korrosio
Korroosiokestävyys														
Sähkönjohtavuus														
Hauraus														
Kimmoerot														
Puristuslujuus														
Virumiskestävyys														
Sitkeys														
Väsymiskestävyys														
Murtolujuus														
Kovuus														
Plastisuus														
Leikkauslujuus														
Jäykkyys														
Pinnanarheus														
Vetolujuus														
Iskusitkeys														
Myötölujuus														
Lämpölaajenemiskerroin														
Transitiolämpötila														
Lämmönjohtavuus														

Materiaaliominaisuuden vaikutus vikaantumismekanismeihin.