



**TYPPIHAPPOTEHTAAN JA AMMONIAKKIVARASTON KRIITTISTEN
PUTKISTOJEN MÄÄRITTELY JA VALINTA RISKIPERUSTEISEEN
TARKASTUSOHJELMAAN**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan diplomityö

2022

Jukka Hiltunen

Tarkastajat: Professori Aki Mikkola

TkT Kimmo Kerkkänen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Konetekniikka

Jukka Hiltunen

Typpihappotehtaan ja ammoniakkivaraston kriittisten putkistojen määrittely ja valinta riskiperusteiseen tarkastusohjelmaan

Konetekniikan diplomityö

2022

73 sivua, 16 kuvaa, 7 taulukkoa

Tarkastajat: Professori Aki Mikkola ja TkT Kimmo Kerkkänen

Avainsanat: putkistovauriot, korroosio, riskiperusteinen tarkastus

Tutkimuksen tavoitteena oli määrittellä typpihappotehtaan ja ammoniakkivaraston kriittiset putkistot, joiden kunnonvalvonnan suorittaminen riskiperusteisesti olisi perusteltua. Työ jakaantui aiheeseen liittyvään teoritarkasteluun, tiedon keräämiseen ja putkistojen luokitteluun.

Korroosio on yleisin vaurion aiheuttaja putkilinjoissa. Teoritarkastelussa käsitellään yleisempiä korroosion vauriomekanismeja ja niiden todentamiseen soveltuvia NDT-menetelmiä. Lisäksi osiossa käsitellään kriittisyysmäärittelymenetelmiä, joiden avulla valitut kohteet voidaan luokitella kriittisyyden mukaan.

Tutkimuksessa päädyttiin jakamaan typpihappotehtaan ja ammoniakkivarastojen putkistot virtaavan aineen mukaan yhdeksään pääputkistoryhmään. Näihin putkistoihin kuuluvat kaikki prosessin kannalta tärkeät putkistot. Ryhmän putkistoilla oletetaan olevan samanlaiset prosessiolosuhteet ja näin ollen yhtäläiset korroosiomekanismit saman materiaalin putkistoissa. Jokaisesta pääryhmästä valitaan yksi tai kaksi referenssiputkea edustamaan putkistoryhmää, joiden tarkastustulosten perusteella voidaan arvioida koko putkiryhmän kuntoa. Valituista putkista kerätään tarvittavat lähtötiedot, jonka jälkeen ne voidaan perustaa ja ottaa mukaan riskiperusteiseen tarkastusohjelmaan.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Jukka Hiltunen

Definition and selection of the critical pipelines of the nitric acid plant and ammonia storage area for the risk-based inspection

Master's thesis

2022

73 pages, 16 figures, 7 tables

Examiners: Professor Aki Mikkola and D.Sc. (Tech.) Kimmo Kerkkänen

Keywords: pipeline damage, corrosion, risk-based inspection

The objective of this study was to define the critical pipelines of the nitric acid plant and ammonia storage area, whose condition monitoring would be justified on a risk basis. The work was divided into theory review related to the topic, data collection and classification of pipelines.

Corrosion is the most common cause of damage in pipelines. In the theory review, more common corrosion damage mechanisms and NDT methods suitable for their verification are discussed. In addition, the section discusses criticality definition methods, which can be used to classify the selected objects according to criticality.

In the study, it was decided to divide the pipelines of the nitric acid plant and ammonia storage area into nine main pipeline groups according to the flowing substance. These pipelines include all pipelines which are important for the process. The pipelines of the group are assumed to have similar process conditions and thus equal corrosion mechanisms in pipelines of the same material. From each main group, one or two reference pipes are selected to represent the pipeline group. Based on the inspection results of these reference pipelines, the condition of the entire pipeline group can be assessed. The necessary baseline data is collected from the selected pipes, after which it can be established and included in the risk-based inspection program.

KIITOKSET

Diplomityö tehtiin Siilinjärven Yara Suomi Oy:lle. Työ lisäsi tietoisuuttani putkistovaurioista ja niiden takana vaikuttavista korroosiomekanismeista.

Kiitän Yara Suomi Oy:tä diplomityön aiheesta, tuesta opiskelujen suorittamisessa ja mahdollisuudesta kehittää itseäni työn ohessa. Lisäksi kiitän työn tarkastajia professori Aki Mikolaa ja Tkt Kimmo Kerkkästä.

Opiskelu on vaatinut oman aikansa, joka on ollut poissa perheen yhteisestä ajasta. Tästä tuesta ja ymmärryksestä iso kiitos perheelleni.

Jukka Hiltunen

Lapinlahdella 1.11.2022

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

a	vuosi
AISI	amerikan rauta- ja teräsintituutti (american iron and steel institute)
Bar	paineen yksikkö
CL-SCC	kloridijännityskorroosiohalkeilu (chloride stress corrosion cracking)
CO ₂	hiilidioksidi
COF	vian seuraus (consequence of failure)
CUI	eristeen alainen korroosio (corrosion under insulation)
DN	nimellinen halkaisija millimetreissä (diameter nominal)
DT	rikkova testaus (destructive testing)
ET	pyörrevirtatarkastus (eddy current testing)
H ₂ O	vesi
H ₂ S	divetyysulfidi
Hz	taajuuden yksikkö
MT	magneettijauhetarkastus (magnetic particle testing)
N ₂	typpikaasu
Nb	niobiumin kemiallinen merkki
NDT	rikkomaton aineenkoetus (nondestructive testing)
NO _x	typen oksidit
Pa	Paineen yksikkö
pH	happamuustaso
PI-kaavio	putkitus- ja instrumentointikaavio
POF	vian todennäköisyys (probability of failure)

PSK	prosessiteollisuuden standardoimiskeskus
PT	tunkeumanestetarkastus (penetrant testing)
RBI	riskiaperusteinen tarkastus (risk-based inspection)
RT	radiografinen tarkastus (radiographic testing)
SAP	toiminnanohjausjärjestelmä
SCC	jännityskorroosio (stress corrosion cracking)
Ti	titaanin kemiallinen merkki
UT	ultraäänitarkastus (ultrasonic testing)
VT	visuaalinen tarkastus (visual testing)
°C	lämpötilan yksikkö

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	9
1.1	Työn tavoitteet	10
2	Putkistovauriot.....	12
2.1	Putkiston määritelmä.....	12
2.1.1	Putkiston materiaalit	13
2.1.2	Putkistovauriot.....	13
2.1.3	Tyypillisimmät vauriokohdat putkistoissa.....	17
2.2	Korroosio.....	18
2.2.1	Korroosiomekanismit.....	20
2.2.2	Yleinen korroosio	22
2.2.3	Paikallinen korroosio	22
2.2.4	Pistekorroosio	23
2.2.5	Rakokorroosio.....	24
2.2.6	Galvaaninen korroosio	25
2.2.7	Sulfidoituminen	26
2.2.8	Hapettuminen.....	27
2.2.9	Eristeen alainen korroosio, CUI.....	27
2.2.10	Eroosio- ja kavitaatiokorroosio.....	29
2.2.11	Raerajakorroosio	30
2.2.12	Jännityskorroosio	31
2.2.13	Korroosioväsyminen	33
2.2.14	Viruminen	35
2.3	Yleisimmät NDT-menetelmät korroosiotarkastuksissa	37
2.3.1	Visuaalinen eli silmämääräinen tarkastus.....	38
2.3.2	Tunkeumanestetarkastus	39

2.3.3	Magneettijauh tarkastus	39
2.3.4	Pyörrevirtatarkastus	40
2.3.5	Radiografinen tarkastus	41
2.3.6	Ultraäänitarkastus	41
2.4	Kriittisyysmäärittely	42
2.4.1	PSK 6800 Kriittisyysluokittelu	43
2.4.2	RBI- Risk Based Inspection	44
3	Tulokset	49
3.1	Putkistojen luokittelu	49
3.2	Typpihappotehtaan putkistojen jako virtaavan aineen mukaan	50
3.2.1	Ilmaputkistot	52
3.2.2	Ammoniakkiputkistot	52
3.2.3	Ammoniakin ja ilman seos	53
3.2.4	Prosessi NOx-kaasut	54
3.2.5	Typpihappo	55
3.2.6	Poistokaasut	56
3.2.7	Puhdas höyry ja lauhde	56
3.2.8	Prosessivesi	58
3.2.9	Jäähdytysvesi	58
3.3	Putkiston valinta RBI-ohjelmaan	58
3.4	Tarkastussuunnittelu RBI-ohjelmassa	61
4	Pohdinta	64
4.1	Avaintulokset	64
4.2	Tutkimuksen vertailu kirjallisuustutkimuksen havaintoihin	65
4.3	Tulosten uutuusarvo	66
4.4	Tulosten hyödynnettävyys ja yleistettävyys	66
4.5	Tutkimuksen objektiivisuus	66
4.6	Tutkimuksen reliabiliteetti ja validiteetti	67
4.7	Virhetarkastelu	67
4.8	Jatkotutkimusaiheet	68
5	Johtopäätökset	69
	Lähteet	71

1 Johdanto

Tässä tutkimuksessa selvitetään Yara Siilinjärven typpihappotehtaan ja ammoniakkivaraston kriittisimmät prosessiputkistot ja niiden yleisimmät vauriomekanismit. Yara on maailmanlaajuinen lannoitteiden ja teollisuuskemikaalien valmistaja. Suomessa Yaralla on tuotantopaikat Kokkolassa, Uudessakaupungissa ja Siilinjärvellä. Yara Siilinjärven päätuotteita ovat fosforihappo ja lannoitteet. Näissä valmistus- ja sivuprosesseissa siirretään toiminnan kannalta välttämättömiä raaka-aineita ja tuotteita erilaisissa putkistoissa. Putkistojen materiaaleina käytetään muun muassa metallia, muovia ja lasikuitua. Virtaavina aineina puolestaan ovat vesi, paineilma, höyry ja erilaiset kemikaalit. Putkistojen suunnitteluvaiheessa tehtäviin materiaalivalintoihin ja seinämän vahvuuteen on vaikuttanut putkistossa virtaava aine ja sen käyttöpaine. Vaikka putkisto on suunniteltu ja valmistettu oikeilla lähtöarvoilla, voi niissä kuitenkin tapahtua korroosiota ja mekaanista kulumista, jotka johtavat putkiston vaurioitumiseen. Tietyillä kemikaaleilla on jo suunnitteluvaiheessa tiedossa sen korrosoiva vaikutus käytettävään materiaaliin ja hitsisaumoihin.

Työn pohjalta kohdeyritys voi siirtyä näiden putkistojen osalta perinteisistä ennakkohuolto-tarkastuksista riskiperusteisen tarkastusohjelman käyttöön. Molemmissa menetelmissä putkistojen käytön aikaista kunnonvalvontaa suoritetaan NDT (Non- Destructive testing) -tarkastuksilla, mutta riskiperusteisessä tarkastusohjelmassa tehtävät tarkastukset ja tarkastusmenetelmät pohjautuvat riskin arviointiin ja riskiluokitukseen. Riskiperusteinen tarkastusohjelma on systemaattinen prosessi, jossa saatujen tulosten pohjalta riskit uudelleenarvioidaan ja sen pohjalta laaditaan uusi tarkastussuunnitelma. Ohjelman avulla putkistotarkastusten laajuus ja menetelmät saadaan optimoitua sekä kohdistettua käytettävissä olevat resurssit kohteisiin, joissa riski on suurin.

Työ jakaantuu teoriatarkasteluun, tiedon keräämiseen ja kriittisyysmäärittelyyn. Teoriaosuudessa käsitellään riskiperusteista tarkastusta, yleisimpiä vaurio mekanismeja putkistoissa ja soveltuvimpia NDT-tarkastusmenetelmiä niiden havainnointiin. Lisäksi tutkitaan eri

vaihtoehtoja kriittisyysmenetelmän toteuttamiseen. Putkistojen lähtötietojen selvittämisessä hyödynnetään toiminnanohjausjärjestelmän dokumentteja ja PI-kaavioita sekä fyysistä havainnointia kentällä. Kriittisyysmäärittelyssä luokitellaan putkistot tutkimuksessa aiemmin valitun menetelmän mukaan, jonka jälkeen lopputuloksena saadaan selville kyseessä olevien alueiden kriittisimmät putkistot.

1.1 Työn tavoitteet

Yara Siilinjärvellä iso päämäärä on kehittää prosessiputkistojen kunnonvalvontaa osana luotettavuuden ja turvallisuuden jatkuvaa parantamista. Tehtaiden käyntiastetta halutaan kasvattaa ja suunnittelemattomien kunnossapitoseisokkien määrää laskea. Tämän johdosta mietitään uusia tapoja myös prosessiputkistojen kunnonvalvontaan. Yhdeksi vaihtoehdoksi on noussut putkistojen tarkastaminen riskiperusteisesti. Tämän diplomityön tavoitteena on määrittellä Yara Siilinjärven typpihappotehtaan ja ammoniakivaraston kriittisimmät putkistot, joiden kunnonvalvonta olisi perusteltua suorittaa riskiperusteisesti. Kuvassa 1 on esitetty kohdelaitoksen typpihapon siirtoputkistoa.



Kuva 1. Typpihapon siirtoputkisto

Tutkimuksessa selvitetään ensin soveltuvin menetelmä putkistojen kriittisyysmäärittelyyn eli luokitellaanko ne esimerkiksi sisällön, korroosionopeuden vai materiaalin mukaan. Tätä kriittisyysmäärittelyä varten tarvitaan putkistojen lähtötiedot ja niiden todennäköisimmät rikkoontumis- ja vauriomekanismit. Tarvittavia lähtötietoja ovat muun muassa materiaali, prosessiarvot, koko, paineluokka ja virtaava aine. Koko työn tuloksena syntyy lopulta luettelo kriittisistä putkistoista, jotka kohdeyritys voi halutessaan siirtää RBI (Risk Based Inspection) -ohjelmaan ja ottaa riskiperusteisen tarkastuksen piiriin. Ohjelman käyttöönotossa tarvitaan myös putkistojen lähtötietodata perustettaessa niitä ohjelmistorakenteeseen.

Työn onnistumiseen ja tavoitteiden saavuttamiseen vaikuttaa, kuinka hyvin valittujen kohdealueiden putkistojen lähtötiedot saadaan kerättyä eri tietokannoista ja millä menetelmällä niiden todellinen kriittisyys saadaan todennettua. Tämä seulonta vaikuttaa suoraan putkistojen määrään riskiperusteisessa tarkastusohjelmassa, tehtäviin tarkastuksiin ja kustannuksiin.

2 Putkistovauriot

Tässä luvussa käsitellään metalliputkistojen tyypillisimpiä vaurioita kemian- ja öljynjalostusteollisuudessa sekä niihin vaikuttavia tekijöitä. Vauriot voidaan jakaa vauriotyypeittäin ja sen taustalta voidaan löytää yksi tai useampi vauriomekanismi. Putkistojen tietyt kohdat ovat alttiimpia vaurioille ja tyypillisimmin vaurion taustalla on jokin korroosiomekanismi. Luvussa esitellään myös menetelmiä teollisuuden laitteiden kriittisyyden määrittämiseksi, jotta kattavakin laitekanta saadaan luokiteltua vaikuttavuuden mukaan.

2.1 Putkiston määritelmä

Putkistolla tarkoitetaan sisällön siirtämiseen tarkoitettuja osia. Osat on liitetty toisiinsa paineelliseen järjestelmään yhdistämistä varten. Putkistoon kuuluu putki tai putkiverkko, putkijohto, putkiston lisäosat, tasaimet, letkut ja mahdolliset muut paineenalaiset osat. (1548/2016.)

Putkisto on kaasujen, nesteiden ja höyryjen kuljettamiseen tarkoitettu järjestelmä teollisuuslaitoksessa. Tämä sisältää kaasut, nesteet ja höyryt puhtaana faasina sekä niiden seokset. Putkistojärjestelmä voidaan ymmärtää yhtenä järjestelmänä, jos se kuljettaa aineita, joiden ominaisuudet ovat samat ja se on kokonaisuudessaan suunniteltu samalle sallitulle paineelle. Eri laitteiden, kuten pumppujen, koneiden, venttiilien ja säiliöiden lisääminen järjestelmään eivät estä sen pitämistä yhtenä putkistona. (SFS-EN 13480-1 2017, s. 6.)

Putkisto sanalla tarkoitetaan yleensä tehtaan sisäisiä putkistoja, kuten hyödyke- ja proses- siputkistoja. Putkilinja sanalla puolestaan viitataan pitkien siirtomatkojen putkiin, joissa kuljetetaan nesteitä tai kaasuja kaukana sijaitsevaan prosessilaitokseen tai jalostamoon. (Escoe 2006, s. 9.)

Putkisto voi myös olla painelaite, jolloin siihen sovelletaan painelaitteita koskevia suunnitelu-, korjaus- ja tarkastusmääräyksiä. Esimerkiksi putkistojen sallitut jännitykset luokitellaan eri tavalla putkisto- ja painelaitestandardaissa. (Escoe 2006, s. 9.)

2.1.1 Putkiston materiaalit

Putkia voidaan valmistaa mistä tahansa materiaalista, mitkä voidaan valssata, hitsata, valaa tai vetää muotin läpi muodostaen näin putkimaisen muodon. Tyypillisimpiä teollisuudessa käytettyjä putkimateriaaleja ovat hiiliteräs, ruostumaton teräs ja muovi. Ei metallisista materiaaleista valmistetuilla putkilla on tiettyjä etuja verrattuna metallimateriaaleihin, mutta niillä on myös erilainen rakenne sekä kulumismekanismit. (American Petroleum Institute 2009b. s. 8-12.)

Yleisin käytössä oleva materiaali putkistoissa petrokemian ja jalostusteollisuuden piirissä on hiiliteräs. Se on laajasti saatavissa, edullinen ja siitä on helppo valmistaa putkistoja. Austeniittisia ruostumattomia teräksiä käytetään erittäin korkeissa ja matalissa prosessilämpötiloissa. Kromi-nikkeli metalliseoksia käytetään olosuhteissa, joissa tarvitaan korroosiokestävyyttä korkeissa lämpötiloissa, kun taas kromi-molybdeeni metalliseoksia käytetään lämpötiloissa, joissa hiiliterästä ei enää pystytä käyttämään jopa 538 °C asti. Nikkeliseostetut teräkset kestävät hyvin emäksisiä liuoksia korkeissa lämpötiloissa. (Escoe 2006, s. 2-3.)

2.1.2 Putkistovauriot

Korroosio on putkilinjojen yleinen vaurion aiheuttaja, mikä vähentää putkilinjan staattista lujuutta ja toistuvan kuormituksen kestoa. Yleisimmät vauriot Länsi-Euroopan öljyn ja kaasun siirtolinjoissa ovat ulkoiset mekaaniset vauriot ja korroosio. Valmistettaessa uusia putkistoja ja putkilinjoja tuotannon laatua ja mahdollisia vikoja esimerkiksi hitsausvirheitä valvotaan ja analysoidaan. Jotta putkisto toimisi tarkoitetulla tavalla koko elinkaarensa ajan, on sen mahdolliset vikaantumismuodot tunnettava ja sen kuntoa seurattava myös käytön aikana sopivalla menetelmällä ja aikavälillä. Putkilinjojen viat liittyvät yleensä niiden

rikkoontumiseen. Rikkoontuminen on voinut johtua korroosiosuojauksen tai pinnoitteen huononemisesta tai aggressiivisesta ympäristöstä ja nopeasta korroosion kehityksestä. (Cosham & Hopkins & Macdonald 2007, s.1245-1246.)

Korroosio on elektrokemikaalinen prosessi ja se on aika riippuvainen mekanismi. Putkistojen korroosio riippuu olosuhteista ja ympäristöstä, niin putken sisällä kuin sen ulkopuolella. Korroosio esiintyy tavallisesti, joko yleisenä korroosiona tai paikallisena korroosiona, niin sanottuna pistekorroosiona. Putkistoissa esiintyviä korroosiotyyppejä on ovat muun muassa galvaaninen korroosio, mikrobiologinen korroosio ja halkeilu. Korroosio aiheuttaa metallihäviötä. Se voi esiintyä putken sisä- tai ulkopinnoilla, perusmateriaalissa, hitsisaumoissa tai hitsisaumojen lämpövaikutusalueilla. (Cosham et al. 2007, s.1248.)

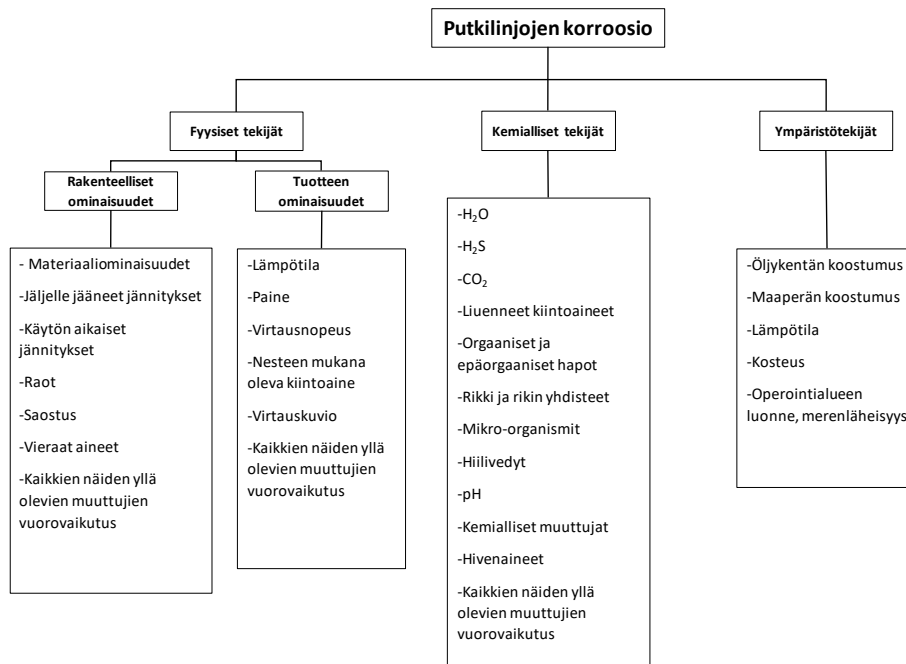
Sisäinen ja ulkoinen korroosio ovat yksi suurimmista syistä putkistovaurioihin. Ympäristövaikutteinen halkeilu, kuten jännityskorroosiohalkeilu, johon kuuluu matalan pH:n ja korkean pH:n halkeilutyypit, ja vety vaikutteinen halkeilu täytyy käsitellä eri lailla kuin perinteinen korroosio. Ne aiheuttavat muun muassa halkeilua ja rakkuloita, kun taas perinteinen korroosio aiheuttaa suoraa metallihäviötä. Putkilinjojen korroosiota on vaikea kategorisoida. Putkilinjojen korroosion tyypillisiä piirteitä on, että sillä on epäsäännöllinen syvyysprofiili ja korroosiokuva ulottuu epäsäännöllisenä kuviona sekä pituus- että kehäsuunnassa. Se voi myös esiintyä yksittäisenä vikana tai vikojen ryhmittymänä, joiden välissä on vioittumatonta perusmateriaalia. Eri korroosiovaurioille ei ole olemassa selkeää määritelmää, mutta ne voidaan jakaa seuraavasti:

- Pistekorroosio määritellään korroosioksi, jonka pituus ja leveys on pienempi tai yhtä suuri kuin kolme kertaa syöpymätön seinämän paksuus.
- Yleinen korroosio määritellään korroosioksi, jonka pituus ja leveys on yli kolme kertaa suurempi kuin syöpymätön seinämän paksuus.

(Cosham et al. 2007, s.1248.)

Väsymysrasitus putkistoissa on alkanut korroosiovaurioista, joiden kasvua on nopeuttanut virtaavien nesteiden käyttöpaineen syklistyyden aiheuttama kuormitus. Väsyminen voidaan määritellä rakenteelliseksi vaurioksi, jonka on aiheuttanut jännitys. Putkilinjoissa ihmisen toiminta ja luonnonilmiöt aiheuttavat väsymisrasitusta, mutta korroosion ja syklisen kuormituksen läsnäololla on suuri vaikutus väsymisrasituksen alkamisessa. Putkilinjojen väsymisrasitukseen vaikuttaa käyttöympäristö, geometria, korrosoituneiden alueiden koko, putkimateriaali, aika ja ajasta riippuva korroosion eteneminen. (Chinedu & Ossai & Boswell & Davies 2015, s. 36.)

Putkilinjojen korroosio voi johtua monista tekijöistä, kuten fyysisistä ja kemiallisista tekijöistä, ympäristöolosuhteista ja materiaalin ominaisuuksista. Divetyysulfidi H_2S (rikkivety), hiilidioksidi CO_2 , orgaaniset ja epäorgaaniset hapot voivat aiheuttaa putkilinjoissa erilaisia korroosiovaurioita. Rikkivety ja hiilidioksidi voivat muodostaa sulfidikalvoja teräksen pintaan. Tutkimuksissa on havaittu, että putkilinjat ovat alttiimpia korroosiolle virtaussuunnan ollessa ylöspäin, jonka vuoksi kaasunnostolinjojen ja merenalaisten nousuputkien materiaalina on käytetty muuta linjaa korroosion kestävämpää materiaalia. (Chinedu et al. 2015, s. 36.) Kuvassa 2 on esitetty putkilinjojen korroosioon vaikuttavia tekijöitä. Näitä vaikuttavia tekijöitä ovat fyysiset, kemialliset ja ympäristölliset tekijät.



Kuva 2. Syyt putkilinjojen korrosioon. Mukailten (Chinedu et al.2015, s. 39.)

Korrosion aiheuttaman metallihäviön ennustaminen on suhteellisen helppo lineaarisilla ja epälineaarilla malleilla silloin, kun putkistossa ei ole vikoja ja se on tasaisesti korrosoitunut. Vikojen, kuten kolhut, halkeamat ja uurteet esiintyminen korrosoituneen alueen ympärillä tekee arvioimisen paljon vaikeammaksi. Nämä viat lisäävät putkilinjan jännityskuormitusta ja vaikuttavat putkilinjan halkeamispaineeseen syöpyneissä osissa. Halkeamiskorrosiota voidaan kutsua hybridiviaksi, jossa syöpyneellä alueella on halkeamia ja syöpymäalueen syvyys on yli 10 % putken seinämän paksuudesta. Virtausolosuhteiden ja virtauskuvioiden on todettu vaikuttavan putkilinjojen korrosioon jopa enemmän kuin virtaavan nesteen sisältämien kuplien määrä. Pistekorrosion korrosionopeuteen on todettu vaikuttavan putkilinjojen sisähalkaisija. (Chinedu et al. 2015, s. 39-40.)

Putkistot ovat alttiina erilaisille vaurioille, koska niissä voi esiintyä useita vauriomekanismeja. Mahdolliset vauriot riippuvat muun muassa materiaalista, suunnitteluarvoista, valmistamisesta ja käyttöolosuhteista. Taulukossa 1 on esitetty yleisemmät putkistoihin liittyvät vauriotyypit ja mekanismit standardin API 570 mukaan. (American Petroleum Institute 2009a, s. 21.)

Taulukko 1. Tyypillisimpiä putkistojen vauriotyyppejä ja vauriomekanismeja. Mukailten (American Petroleum Institute 2009a, s. 21.)

Vauriotyyppi	Vauriomekanismi
Yleinen ja paikallinen metallin häviäminen	Sulfidaatio Hapettuminen Mikrobiologisesti vaikuttanut korroosio Orgaaninen happokorroosio Erosio-korroosio Galvaaninen korroosio Eristeen alainen korroosio (CUI)
Pintaan liittyvät halkeamiset	Väsyminen Syövyttävä jännityskorroosiohalkeilu Sulfidijännityshalkeilu Kloridijännityskorroosiohalkeilu Polythionihappo jännityskorroosiohalkeilu Muut ympäristöstä johtuvat halkeilumuodot
Pinnanalainen halkeilu	Vetyhaurasmurtuma
Mikrovoidien muodostuminen	Korkean lämpötilan vetykorroosio Viruminen
Metallurgiset muutokset	Grafititoituminen Karkaisu haurastumien
Rakkuloiden muodostumien	Vetyrakkuloiden muodostuminen
Mittasuhteiden muutokset	Viruminen ja jänitysmurtuma Lämpö
Muutokset materiaalin ominaisuuksissa	Haurasmurtuma

2.1.3 Tyypillisimmät vauriokohdat putkistoissa

Kemianteollisuuden putkistot ovat alttiina ulkoisille ja sisäisille vaurioille. Tyypillisesti näissä putkistoissa siirretään nesteitä, jotka voivat olla erittäin syövyttäviä, kuluttavia, ja altistavia jännityskorroosiolle. Ne voivat myös heikentää materiaalin ominaisuuksia käytön aikana. Lisäksi putkistot ovat alttiina ulkoiselle korroosiolle. Jokaisen putken mahdolliset vauriokohdat ovat yksilöllisiä ja riippuvat monesta tekijästä. On kuitenkin havaittu tehtyjen tarkastusten ja ilmenneiden vaurioiden pohjalta tiettyjä kohtia putkistoissa, joissa vauriot todennäköisemmin ilmenevät. Tyypillisimmät vauriokohdat putkistoissa ovat:

- Sekoituspisteet, joissa lisätään pieniä määriä toista materiaalia prosessivirtaan prosessimuuttujien säätämiseksi

- Prosessisekoituspisteet, joissa kaksi tai useampi prosessivirta sekoitetaan keskenään
- Kuolleet kohdat, osat putkistoissa, joissa ei normaalisti ole merkittävää virtausta.
- Putkistojen kannakointikohdat
- Rajapinnat, kuten läpiviennit maan sisästä ilmaan ja betonin sisältä ilmaan
- Putkienliitoskohdat: hitsausliitokset, kierreliitokset, joustavat liitokset
- Kuumalle ja kylmälle alttiit kohdat
- Käyrät, haaroitukset, supistukset
- Eri materiaalien liitoskohdat
- Vauriokohdat eristeessä, maalissa, pinnoitteissa.

(American Petroleum Institute 2009a, s. 5-22; American Petroleum Institute 2009b, s. 4-31.)

2.2 Korroosio

Korroosio voidaan määritellä materiaalin syöpymiseksi ympäristön vaikutuksesta. Näitä syövyttäviä ympäristön vaikutuksia ovat kaasut, nesteet ja kiinteät aineet. (Lukkari & Kyröläinen & Kauppi 2016, s. 109.) Korroosio aiheuttaa muutoksia metallin ominaisuuksiin, se on tyypiltään fysikaalis-kemiallinen reaktio ympäristön kanssa. Korroosio voi vaurioittaa metalleja ja siitä valmistettuja teknisiä järjestelmiä. (Promaint 2008, s. 4.) Korroosion vaikutuksesta metallin materiaaliominaisuudet muuttuvat, näitä ovat muun muassa mekaaninen lujuus ja ulkomuoto. Näiden muutosten vaikutuksesta metallin läpäisee kaasut ja nesteet. (Outokumpu 2015, s. 15.)

Metallien korroosio voidaan luokitella seuraavasti:

1. Kemialliset korroosioreaktiot
2. Sähkökemialliset korroosioreaktiot (Promaint 2008, s. 25).

Metallinpinta reagoi suoraan ympäristönsä kanssa kemiallisessa korroosiossa ja tällöin metallin pinnalle ei muodostu korroosiotuotekerrosta eikä tapahtumaan liity sähkövarausten liikettä. Tätä voi tapahtua metallien ja kaasujen välillä reaktiotuotteiden ollessa kaasumaisia.

(Promaint 2008, s. 25.) Kemiallista korroosiota kutsutaan myös kuiva korroosioksi, koska neste ei toimi tässä väliaineena (Promaint 2008, s. 29).

Sähkökemialliseen korroosioon liittyy ionien siirtyminen elektrolyyttiliuoksessa ja anodi-katodi pari. Elektrolyyttiliuoksen voi muodostaa suolat, hapot ja emäkset yhdessä veden kanssa. (Lukkari et al. 2016, s. 109.) Ilmiö tunnetaan myös märkäkorroosiona, koska siinä neste toimii väliaineena. Vesiliuoksessa tapahtuva metallin korroosio on sähkökemiallinen reaktio, siinä metalli hapettuu ja liuoksen elektrolyytti pelkistyy. Metallin ja elektrolyytin välillä on tietty sähköinen potentiaaliero. Sähkökemiallisen korroosion esiintyminen edellyttää korroosiparin muodostumista. Se muodostuu kahdesta elektrodista, jotka ovat elektrolyyttiin nähden eri potentiaalissa. Tämän lisäksi elektrodeilla on elektrolyyttinen ja elektroninen yhteys. Syntyy suljettu virtapiiri, jossa anodilla metalli liukenee ja luovuttaa elektroneja. Vapautuvat elektronit siirtyvät katodille, jossa ne reagoivat liuoksen positiivisten ionien kanssa. (Promaint 2008, s. 29.)

Metallin sähkökemiallisessa reaktiossa tapahtuu reaktio:

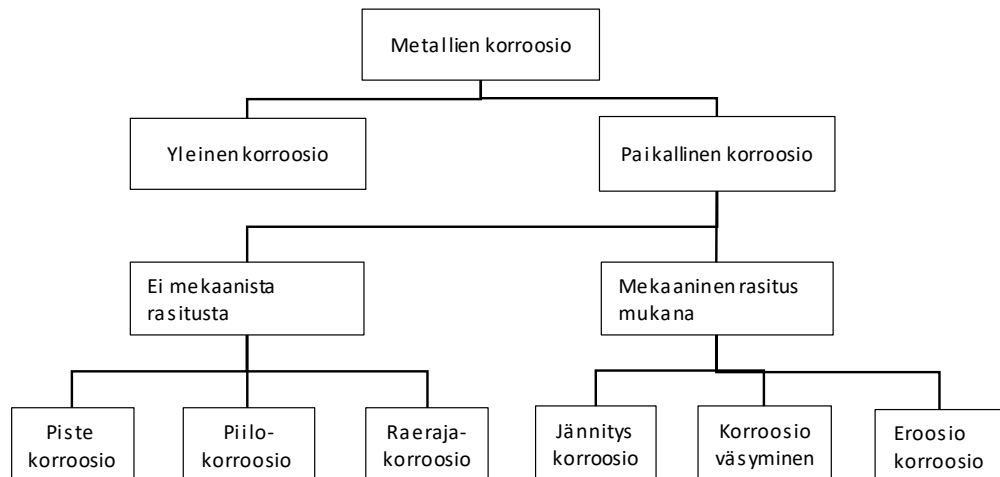


jossa $M +$ on metalli-ioni ja $e -$ on elektroni.

Metalli-ionin muodostumista kutsutaan anodiseksi ja elektronin vapautumista sekä siitä johtuvia sähkökemiallisia seurauksia katodiseksi prosessiksi. (Lukkari et al. 2016, s. 109.) Sähkökemiallinen korroosio siis vapauttaa elektroneja. Syy tälle korroosiolle on metallin ja alkuperäisen malmin välinen energiaero. Metallin valmistaminen malmista on nostanut sen energiatasoa ja korroosion myötävaikutuksesta se pyrkii hakeutumaan alkuperäiseen eli malmin energiatasolle. (Outokumpu 2015, s. 15.) Anodisen ja katodisen alueen pinta-aloilla on suuri vaikutus anodin korroosionopeuteen. Kaikkein nopeinta syöpyminen on silloin, kun anodin koko on pieni verrattuna katodin kokoon. (Promaint 2008, s. 31.)

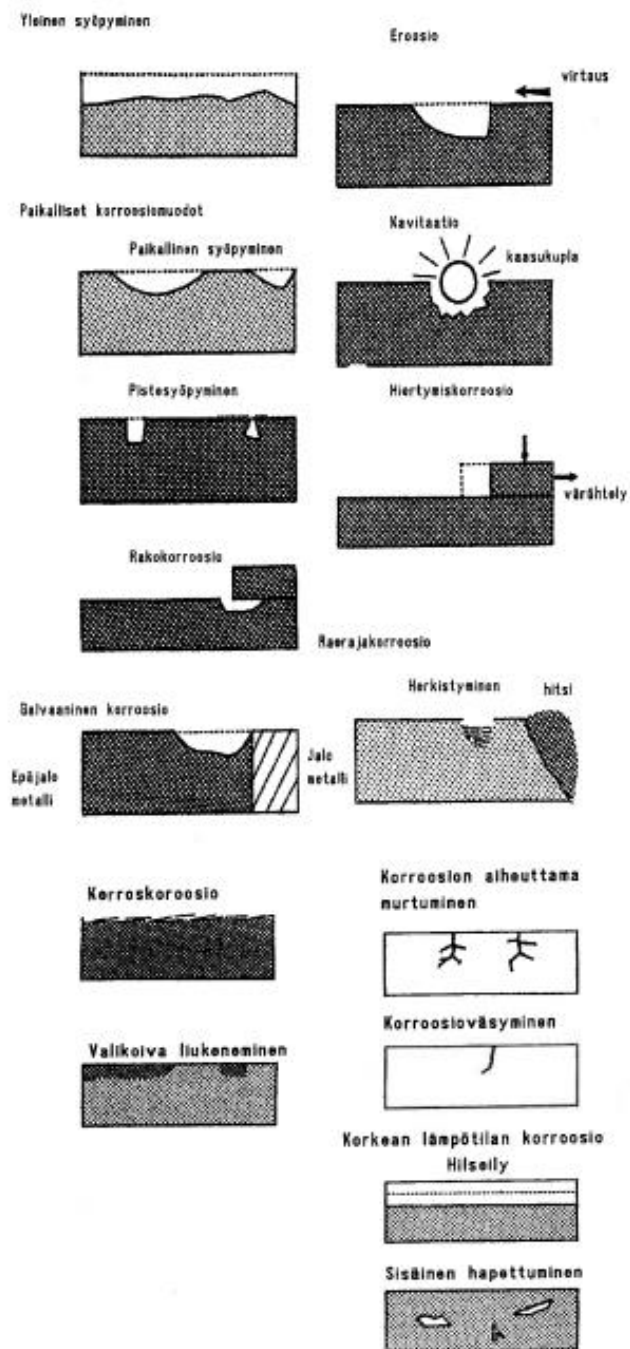
2.2.1 Korroosiomekanismit

Korroosion eri muodot voidaan jaotella niiden syntymekanismin mukaan. Korroosiossa on monesti kemiallisten ja lämpötilatekijöiden lisäksi mukana erilaisia mekaanisia tekijöitä. Vaurio on voinut syntyä syöpymisen tai mekaanisen rasituksen tuloksena tai näiden yhteisvaikutuksesta. (Lukkari et al. 2016, s. 112.) Kuvassa 3 on esitetty korroosion eri muodot syntymekanismin mukaan.



Kuva 3. Korroosion eri tyypit jaoteltuna mekanismin mukaan. Mukailten (Lukkari et al. 2016, s. 112.)

Kuvassa 4 on esitetty korroosion eri esiintymismuotoja havainnekuvin. Korroosion ryhmitely ja terminologia vaihtelee riippuen lähde-tekstistä (Promaint 2008, s. 100).



Kuva 4. Korroosimuotojen jaottelu havainnekuvin (Promaint 2008, s. 101.)

2.2.2 Yleinen korroosio

Metallin pinta syöpyy tasaisesti, koska anodiset ja katodiset alueet vaihtavat koko ajan paikkaa. Yleisesti tämä korroosio on suojaamattomien metallipintojen korroosionmuoto, niiden joutuessa ilmastokosketuksiin. Tätä korroosionmuotoa voi esiintyä myös metallipintojen joutuessa kosketuksiin eri kemikaalien kanssa. (Promaint 2008, s. 102.) Yleisen syöpmisen korroosio nopeus ruostumattomilla teräksillä on alle 0.1 mm vuodessa (Outokumpu 2015, s. 16). Kuvassa 5 on esitetty tyypillinen yleisen korroosion kohde, rakenneteräksestä valmistettu teräsrakenne, mikä on ympäröivän ilmastosta vaikutuksesta korrosoitunut.



Kuva 5. Yleinen korroosio teräsrakenteessa

2.2.3 Paikallinen korroosio

Paikallisen korroosion muotoja ovat paikallinen syöpyminen, pistesyöpyminen ja rakokorroosio. Paikallisessa korroosiossa erityisesti ruostumattomia teräksiä suojaava passiivikerros murtuu paikoitellen ja suojaamaton alue altistuu korroosiolle. Tämä korroosionmuoto on huomattavasti todennäköisempi vauriomuoto ruostumattomilla teräksillä, kuin yleinen korroosio. (Avesta Sheffield 1994, s. 11.)

2.2.4 Pistekorroosio

Pistesyöpymisessä metallin pintaan syöpyy hyvin paikallisesti kuoppamaisia syvänteitä. Pistesyöpymä ei yleensä etene paksujen metallirakenteiden läpi, vaan yleensä sen eteneminen loppuu, kun kuopat ovat tietyn syvyyisiä. Ohut seinämäisissä putkistoissa se saattaa kuitenkin rikkoa materiaalin ja aiheuttaa vuotoja. Pistekorroosio alkaa yleensä erilaisista pinnan eroavaisuuksista, kuten urista, pintakalvojen rakennevirheistä ja materiaalin törmäyskohdista. Pistesyöpyminen on tyypillinen korroosiomuoto metalleilla, joiden kestävyys korroosiota vastaan perustuu pintaa suojaavaan passiivikerrokseen, kuten alumiini ja ruostumaton teräs. (Outokumpu 2015, s. 103.) Kuvassa 6 on esimerkki paikallisesti esiintyvistä pistekorroosioista teräsrakenteessa.



Kuva 6. Paikallista pistekorroosiota jäykisteen alapinnalla

Pistekorroosion nopeus voi kiihtyä sen edetessä, koska sen aikaansaamassa onkalossa korroosio-olosuhteet voivat kehittyä yhä aggressiivisemmiksi. Kohteita, joista pistekorroosio voi alkaa ovat muun muassa metallin koostumuksen epätasaisuudet, erkaumat, suotautumat tai mekaaniset virheet, kuten murtumat ja jännitykset. (Lukkari et al. 2016, s. 113.)

2.2.5 Rakokorroosio

Rakokorroosioon kuuluvat samat syntymekanismit kuin pistekorroosioon, mutta yleensä se rajataan metallirakenteissa mekaanisista syistä johtuviin kohtiin. Näissä kohdissa happi ei pääse myötävaikuttamaan suojaavan passiivikerroksen syntyä ja sen korjautumiseen. (Lukkari et al. 2016, s. 113.)

Rakokorroosiolle tyypillisimpiä syntykohtia ovat noin 0,025–0,1 mm raot, jotka ovat liuoksen kanssa kosketuksessa. Nämä raot ovat seurausta valmistustekniikasta tai geometrisistä muodoista ja tällaisia rakoja esiintyy niitti-, pultti-, ja hitsausliitoksissa. Toinen kohta, johon rakokorroosio voi syntyä on metallin ja epämetallin kosketuspinnat, kuten tiivisteliitokset. Myös epäpuhtaudet metallin pinnalla voivat edesauttaa rakokorroosion synnyssä, kuten hiekka, kiinteä lika tai syntyneet korroosiotuotteet. (Promaint 2008, s. 107.) Kuvassa 7 on esitetty rakokorroosio, mikä on syntynyt akseliin soviteholkin alle.



Kuva 7. Rakokorroosiota akselissa, akselin päällä on ollut soviteholkki

2.2.6 Galvaaninen korrosio

Galvaaninen korrosio määritellään korroosioksi, jota kiihdyttävät eri metallien väliset potentiaalierot. Samalla eri metallit ovat sähköisessä kosketuksessa ja alttiina elektrolyyttille. Galvaanista korroosiota voi tapahtua myös metallin ja sähköä johtavan epämetallin, kuten grafiitin, välillä. Sähköinen kosketus voi syntyä erilaisten materiaalien välillä joko suoraan tai ulkoisen johtavan reitin kautta. Galvaanisessa korroosiossa yhden metallin tai lejeeringin korroosionopeus yleensä kiihtyy, kun taas toisen metallin korroosionopeus yleensä pienenee. Galvaaninen korrosio on usein voimakasta, kun erilaiset materiaalit ovat välittömästi vierekkäin, erityisesti niiden terävissä reunoissa tai kulmissa. (Yara International ASA 2022a, s. 3.) Kuvassa 8 on kahden eri metallin muodostama galvaaninen pari, jossa epäjalompi osapuoli syöpyy.



Kuva 8. Galvaaninen pari ruuvikiinnityksessä. (Teräsrakenne 2021, s. 42.)

Galvaanisessa korroosiossa korroosion nopeuteen ja laajuuteen vaikuttavat seuraavat tekijät:

- Potentiaaliero metallien tai metalliseosten välillä. Mitä suurempi potentiaaliero, sitä varmempi on toisen metallin syöpyminen

- Pinta-ala, etäisyys ja geometria. Vaarallisin tilanne on, jossa anodin pinta-ala on suhteellisen pieni verrattuna katodin kokoon.
- Elektrolyytin resistanssi. Mitä suurempi elektrolyytin johtavuus on, sitä tasaisemmin metalli syöpyy koko pinta-alalta. Vastaavasti pienen johtavuuden elektrolyytillä, korroosio vaikuttaa metallin rajapintojen lähistöllä.

(Yara International ASA 2022a, s. 9; Promaint 2008, s. 110.)

Galvaanisessa korroosiossa epäjalompi metalli muodostuu anodiksi, joka syöpyy. Kun taas jalompi metalli muodostuu katodiksi ja sen syöpyminen lähes pysähtyy täysin. Galvaanisen korroosion muodostumista ja syöpymiskäyttäytymistä voidaan tutkia eri metallien potentiaalisarjojen avulla. Potentiaalisarjassa olevien metallien etäisyys toisistaan vaikuttaa galvaanisen parin muodostumiseen. Mitä kauempana metallit sijaitsevat, sitä todennäköisempää on parin muodostuminen. (Promaint 2008, s. 109.)

2.2.7 Sulfidoituminen

Sulfidoituminen on hiiliteräksen ja muiden seosten korroosio, joka aiheutuu niiden reaktiosta rikkiyhdisteiden kanssa korkean lämpötilan ympäristöissä. Tämä vauriomekanismi tunnetaan myös sulfidikorroosiona, tässä korroosiotyypissä vety ei ole osallisena. Sulfidikorroosio tuottaa sileän ja suhteellisen tasaisen syöpyneen pinnan, jolloin se johtaa repeämätyyppiseen vikaan ennemmin kuin vuotavaan reikään. Sulfidikorroosiolle alttiita materiaaleja ovat kaikki rautapohjaiset materiaalit, mukaan lukien hiiliteräs ja niukkaseosteiset teräkset. Yli 645 °C lämpötilassa korkean nikkelpitoisuuden sisältävät seokset voivat sulfidoitua, mikä aiheuttaa metallihäviötä. Tällöin nikkelisulfidit muodostuvat metallipinnan alle. Tätä ilmiötä kutsutaan myös kuumakorroosioksi. Nikkelpitoisuuden kasvaessa sulfidoitumisen mahdollisuus kasvaa. Sulfidoitumiseen vaikuttavia tekijöitä ovat metallin kemiallinen koostumus, lämpötila ja syövyttävien rikkiyhdisteiden pitoisuus. Metalliseosten kestävyyttä sulfidoitumista vastaan lisätään seostamalla niitä kromilla. Sulfidoitumiskorroosio kannattaa ottaa huomioon yli 260 °C lämpötiloissa putkistoissa ja laitteissa, joissa on rikkipitoinen neste, höyry tai nesteseoksia. (American Petroleum Institute 2020, s. 305-306.)

2.2.8 Hapettuminen

Korkeassa lämpötilassa happi reagoi hiiliteräksen ja muiden seosten kanssa vähentämällä oksidikerroksen suojausta. Tämä johtaa metallin seinämäpaksuuden pienenemiseen. Hiiliteräksen hapettuminen alkaa 540 °C yläpuolella. Hapettuminen voimistuu lämpötilan noustessa. Metallin kestävyyttä hapettumista vastaan voidaan parantaa kromiseostuksella. Hapettumista voi tapahtua yli 540 °C yläpuolella hapetta sisältävissä ympäristöissä, kuten kattiloissa, polttolaitoksissa ja putkistoissa. (American Petroleum Institute 2020, s. 252.)

2.2.9 Eristeen alainen korroosio, CUI

Putkien, paineastioiden ja muiden rakenneosien korroosio, mikä johtuu eristeen alle jääneestä tai päässeestä vedestä. Veden lähteenä voi olla muun muassa sade, vesivuoto tai kondensio. Eristeen alaisella korroosiolla on kaksi muotoa, hiiliterästen paikallinen korroosio ja austeniittisten ruostumattomien terästen kloridijännityskorroosio. CUI korroosioon vaikuttavat lämpötila, kosteuden vaikutusaika, eristyksen materiaali ja ympäristö. Metallin korroosionopeus kasvaa metallin lämpötilan noustessa veden kiehumispisteeseen. Eristeen alla oleva vesi kiehuu ja eriste kuivuu, mutta se vie aikaa. Tänä aikana metalli ruostuu. Lisä kosteuden päästessä eristeeseen, tämä prosessi on lähes jatkuvaa. (American Petroleum Institute 2020, s. 111; American Petroleum Institute 2009b, s. 40.) Kuvassa 9 on esimerkki eristeen alaisesta korroosiosta hiiliteräksestä valmistetussa varoventtiilin ulospuhallusputkessa.



Kuva 9. Eristeen alainen korroosio varoventtiilin ulospuhallusputkessa

Hiiliteräksillä ja niukkaseosteisilla teräksillä CUI:n vaikutus lämpötila on $-12\text{ °C} - 175\text{ °C}$. Ruostumattomilla teräksillä, joissa kloridijännityskorroosio on mahdollinen, lämpötila alue on $60\text{ °C} - 175\text{ °C}$ ja kloridijännityskorroosion alaisten ruostumattomien duplex-teräksien lämpötila-alue on $140\text{ °C} - 175\text{ °C}$. (American Petroleum Institute 2020, s. 111.)

CUI aiheuttaa hiili- ja niukkaseosteisilla teräksillä tyypillisesti paikallista pistekorrosiota ja paikallista perusaineen ohentumaa. Vauriot näkyvät tyypillisesti eristeen poiston jälkeen löysänä korroosiohiutaleina, jotka peittävät syöpyneen alueen. Ruostumattomien terästen CUI:n aiheuttama vauriomekanismi ilmenee pistekorrosiona ja kloridijännityskorroosio-

halkeiluna (CI-SCC). Tässä mekanismissa ruostumattoman teräksen pinta altistuu kloridiympäristölle ja samaan aikaan siihen kohdistuu ulkoinen tai jäännösjännitys, mikä aiheuttaa vetojännitystä. Tyypillisesti kloridi on peräisin ympäröivästä ilmastosta ja jännitystila on seurausta kylmätyöstämisestä tai hitsauksesta. Nämä yhdessä aiheuttavat olosuhteen metallin pintaan, joka tarvitaan halkeilun alkamiseen. (Yara International ASA 2022b, s. 4-19.)

2.2.10 Eroosio- ja kavitaatiokorroosio

Nesteen liikenopeuden kasvaessa riittävän suureksi, neste kykenee irrottamaan metallin pinnassa olevia metalleja suojaavia kerroksia, aiheuttaen kiihtyneen korroosionopeuden. Tällöin puhutaan eroosiokorroosiosta, koska nesteen virtausnopeus vaikuttaa korroosionopeuteen. Eroosiokorroosiota ilmenee virtauksen epäjatkuuskohtissa, kuten putkistoissa, mutkat, haarat ja putkien suuaukot. Myös korkea hitsikupu putkiston liitoksissa voi aiheuttaa eroosiokorroosiota. Näissä kohdissa esiintyy pyöreistä virtausta, mikä aiheuttaa virtauksen kriittisen nopeuden ylittymisen. Kriittinen nopeus on ympäristö ja materiaalikohtainen suure, sitä voidaan kuitenkin arvioida siitä laadittujen tutkimusten ja taulukoiden avulla. Nestevirtauksen sisältämät kiinteät partikkelit voimistavat kulutusvaikutusta aiheuttaen partikkelieroosiota. Tällöin metallin suojaavat kerrokset voivat rikkoontua jo kriittistä nopeutta pienemmillä nopeuksilla. Jos virtausnopeus on riittävän suuri, voi partikkelieroosio aiheuttaa metallin voimakasta kulumista, jolloin vaurion syy ei juurikaan johdu korroosiosta. (Promaint 2008, s. 110-112; Lukkari et al. 2016, s. 119.) Kuvassa 10 on kuva eroosion kuluttamasta pumpun pesästä.



Kuva 10. Eroosion kuluttama pumpun pesä

Kavitaation aiheuttaa nestevirtaukseen syntyneet kaasukuplat. Tyypillisimmin ne syntyvät pyörteiseen virtaukseen. Kaasukuplat aiheuttavat voimakkaita paineiskuja luhistuessaan, jolloin ne rikkovat metalli suojaavan kerroksen, kuten passivaatiokalvon. Kavitaatiota esiintyy muun muassa pumppujen juoksupyörissä ja putkistoissa, joissa esiintyy painevaihteluja ja virtausnopeus on suuri. Kaasukuplia muodostuu nestevirtauksen paineen laskiessa paikallisesti, tällöin myös nesteen kiehumispiste laskee. Paineen taas noustessa syntynyt kaasukupla luhistuu aiheuttaen jopa tuhansien MPa suuruisia paikallisia paineiskuja ja voimakasta kuumenemistä. (Promaint 2008, s. 112-113; Lukkari et al. 2016, s. 120.)

2.2.11 Raerajakorroosio

Raerajakorroosio tarkoittaa metallin tai metalliseosten syöymistä materiaalin raerajoja pitkin. Tätä korroosiota aiheuttaa raerajoille suotautuneet epäpuhtaudet ja jonkin seosaineen rikastuminen tai vähentyminen raerajojen läheisyydessä. Raerajakorroosiolle altistaa metalliseosten jähmettyminen, lämpökäsittely, hitsaus tai korkean lämpötilan käyttöolosuhteet. Erityisesti ruostumattomilla teräksillä tämä korroosimuoto on merkittävä. Ruostumattomilla teräksillä hiili voi suotautua raerajoille muodostaen kromin kanssa karbideja. Kromin väheneminen raerajoilla aiheuttaa sinne kromiköyhän alueen, johon ei ruostumattomien terästen tapaan synny suojaavaa passiivikerrosta, joten nämä alueet syöpyvät. Syöpyminen on

seurausta anodi-katodi parista ja niiden pinta-ala suhteesta. Metallin perusaine muodostuu katodiksi ja kromista köyhtyneet raeraja-alueet anodiksi. Näin ollen syöpyminen voi olla erittäin voimakasta. Ruostumattomilla teräksillä ilmiöstä käytetään myös nimitystä herkistyminen. Ruostumattomien terästen herkistymislämpötila-alue on 550-850 °C, mutta siihen vaikuttaa suuresti materiaalin hiilipitoisuus. Ruostumattomilla teräksillä raerajoille muodostuu Cr₂₃C₆- karbidia. Hitsauksessa ruostumattomilla teräksillä herkistyminen voi tapahtua perusaineen lämpövyöhykkeessä. Ilmiötä voidaan pienentää käyttämällä niukkahiilisiä laatuja tai seostamalla terästä esimerkiksi titaanilla tai niobilla. Tällöin seosaineet muodostavat kromia herkemmin karbideja. (Outokumpu 2015, s. 23; Promaint 2008, s. 115-116; Lukkari et al. 2016, s. 114.)

Myös titaanilla ja niobilla stabiloiduilla teräksillä esiintyy raerajasyöpymistä, tällöin puhutaan sularajakorroosiosta (veitsenteräkorrosio, Knife line attack). Se on veitsenterän muotoinen, pinta-alaltaan hyvin kapea syöpymisalue ja se esiintyy heti hitsisauman reunoissa. Titaani- ja niobikarbidit muodostuvat 1010-1060 °C lämpötilassa ja liukenevat yli 1250 °C lämpötilassa. Ne pysyvät liuennaina teräksessä myös herkistymislämpötila-alueella, jolloin vapaa hiili voi muodostaa raerajoille kromikarbideja. Tätä ilmiötä esiintyy niobilla ja titaanilla seostettujen ruostumattomien terästen hitsauksessa, erityisesti korjaushitsauksessa ohuilla ainevahvuuksilla. Lämpötilaolosuhteista hitsin reunoilla johtuen Ti- ja Nb- karbideja ei muodostu, vaan hiili herkistyy ja syntyy kromikarbidia. (Promaint 2008, s. 184.)

2.2.12 Jännityskorroosio

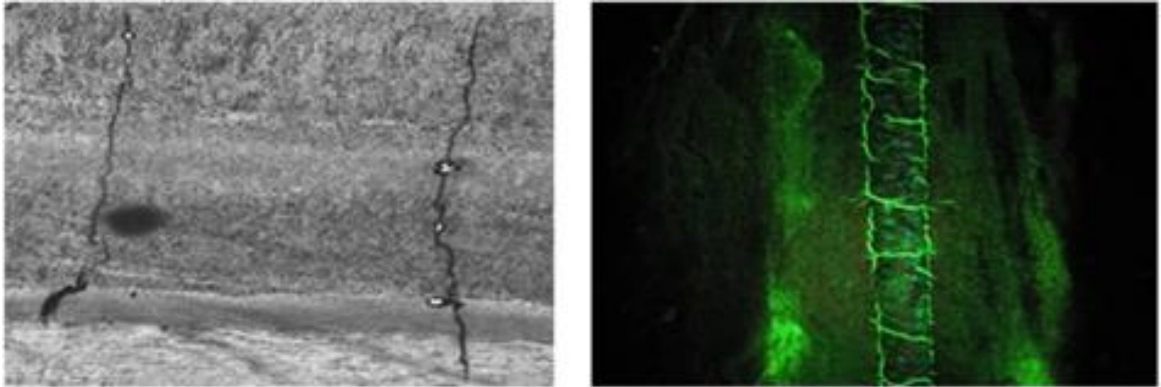
Jännityskorroosiota kutsutaan yleisesti myös jännityskorroosiohalkeiluksi (Stress Corrosion Cracking, SCC). SCC syntyy mekaanisen rasituksen ja korrosoivan ympäristön yhteisvaikutuksesta. Mekaaninen rasitus voi olla staattista tai vetojännitystä. Halkeilussa muodostuu halkeamia, mitkä johtuvat staattisesta vetolujuudesta ja korroosion samanaikaisesta vaikutuksesta. Vetojännitys voi olla peräisin ulkoisesta kuormituksesta, keskipakovoimista, lämpötilan muutoksista, ruuviliitoksen kiristysvoimasta, staattisesta paineesta ja värähtelystä. Kun taas sisäinen jännitys voi olla peräisin kylmätyöstöstä, lastuamisesta, leikkauksesta, hitsauksesta tai lämpökäsittelystä. Halkeamat muodostuvat yleensä vetojännityksen suhteen

normaalitasoissa ja ne etenevät raerajoja pitkin tai rakeiden läpi ja ne voivat olla haarautuneet. (Volkan 2014, s. 67; Promaint 2008, s. 117-118.)

Jännityskorroosio saa metallissa aikaan ohuista murtumista rakentuvan murtumakimpun, mikä etenee koko metalliseinämän läpi. Jotta jännityskorroosio alkaa, on jännityksen oltava suurempi kuin tietty rajajännitys. Rajajännityksen suuruus riippuu käytettävästä materiaalista ja ympäristön olosuhteista. Se voi olla tietyissä tapauksissa vain 10 % materiaalin myötörajasta. Murtopinta jännityskorroosion vauriossa muistuttaa haurasmurtumaa ja murtopinnasta on yleensä löydettävissä lohkomurtuman ja raerajamurtuman ominaispiirteitä. (Lukkari et al. 2016, s. 114-115.)

Jännityskorroosio pyrkii minimoimaan olemassa olevat jännitykset. Alueet, jotka ovat jännityksen alaisina toimivat anodina ja ilman jännitystä olevat alueet toimivat vastaavasti katodina. Anodiselle alueelle ydintyy jännityskorroosiomurtuma, josta murtuma etenee liukutasoja myöten. (Volkan 2014, s. 67; Lukkari et al. 2016, s. 115.)

Koska jännityskorroosioon vaikuttavat eri materiaalien ja ympäristön yhdistelmät, niin sen syntymekanismi ei ole vielä täysin selvitetty. Mekanismiin vaikuttaa oleellisesti onko korroosio tai jännitys määräävä tekijä. Sen syntymekanismeina kuitenkin tunnetaan galvaaninen jännityskorroosio, joka etenee raerajoilla, paikallinen korroosio, joka on muodonmuutoksen aikaansaama liukutaso ja oksidikalvon murtuminen jännityksen vaikutuksesta. Useimmat metalliseokset ovat alttiina jännityskorroosiolle. Hiiliteräkset ovat herkkiä jännityskorroosiolle vahvoissa emäksisissä liuoksissa ja kun ympäristössä on nitraatteja. Useimmat ruostumattomat teräkset ovat herkkiä kloridi-ioneja sisältäville liuoksille. Austeniittisella ruostumattomalla teräksellä jännityskorroosiota esiintyy vain hapettavissa kloridiliuoksissa. Happi lisää jännityskorroosion mahdollisuutta. Lämpötilan nouseminen nopeuttaa jännityskorroosiota. Puhtailla metalleilla jännityskorroosiota ei juurikaan ilmene. Ruostumattomien terästen lisäksi jännityskorroosiota ilmenee hiiliteräksillä ja niukkaseostesilla teräksillä, suurilujilla alumiiniseoksilla, titaaniseoksilla ja kuparilla sekä sen seoksilla. (Promaint 2008, s. 119-120; Volkan 2014, s. 68; Lukkari et al. 2016, s. 116.) Kuvassa 11 on esitetty jännityskorroosion aiheuttamia säröjä ammoniakivarastosäiliön hitsisaumaan.



Kuva 11. Jännityskorroosion aiheuttamia säröjä ammoniakivarastosäiliön hitsisaumassa. (Yara International ASA 2022d, s.15.)

Seostetuilla teräksillä esiintyy vetyhaurautta, jota voidaan pitää yhtenä jännityskorroosion muotona. Tässä rakenne haurastuu teräkseen diffundoituneesta vedystä. Vetyhaurautta esiintyy erityisesti ferriittisissä ja austeniittisissä teräksissä, joissa on jonkin verran ferriittiä. (Promaint 2008, s.120; Lukkari et al. 2016, s. 116.)

2.2.13 Korroosioväsyminen

Korroosioväsymisessä halkeamia kehittyi syklisen kuormituksen ja korroosion yhteisvaikutuksesta (American Petroleum Institute 2020, s. 105). Syklisen kuormituksen voi aiheuttaa värähtely, muu ulkoinen vaihtosuuntainen kuormitus tai lämpötilojen vaihtelut. Materiaalin väsymyslujuus heikkenee korroosioympäristöissä, toisin sanoen väsymisjännitysjaksojen lukumäärä vikaantumiseen vähenee syövyttävässä ympäristössä. Normaalioloissa materiaalilla havaitaan väsymisraja, jota pienemmät jännitysamplitudin arvot eivät aikaan saa murtumaa. Korroosion ollessa läsnä väsymisraja häviää ja hyvinkin pienet jännityksen vaihtelut aiheuttavat väsymismurtuman. Korroosioväsymistä voi esiintyä, vaikka metallin pinnalla ei ole näkyvissä selvää merkkiä korroosiosta. Käytännössä kuitenkin väsymishalkeilua esiintyy todennäköisemmin ympäristöissä, jotka edistävät pistesyöpymistä tai paikallista korroosiota. Halkeamat alkavat tyypillisesti jännityskeskittymistä, kuten korroosiokuopista, lovista, poikkileikkauksien muutoksista ja hitseistä, erityisesti pienahitseistä. (Promaint 2008, s.122; American Petroleum Institute 2020, s. 105.) Kuvassa 12 on syklisen kuormituksen johdosta katkennut akseli.



Kuva 12. Syklisen kuormituksen johdosta katkennut pumpun akseli

Korroosioväsymistä aiheuttavia tekijöitä ovat:

- sisäisen paineen vaihtelut putkistoissa ja säiliöissä
- paineiskut venttiilien käytöstä johtuen
- venttiileistä johtuva epätasainen virtaus höyry- ja nesteputkistoissa
- eroista lämpölaajenemiskäyttäytymisessä putkiston ja säiliöiden välillä
- prosessin ylös- ja alasajot
- muiden laitteiden aiheuttama värähtely
- paikalliset lämpötilavaihtelut

(Promaint 2008, s.123.)

2.2.14 Viruminen

Korkeissa lämpötiloissa metallikomponentit voivat muotoutua kuormituksen alaisena. Tuo muotoutumiseen tarvittava lämpötila on yleensä yli puolet metallin absoluuttisesta sulamispisteestä. Viruminen on ajasta, kuormituksesta ja lämpötilasta riippuvainen mekanismi. Metallin altistuminen kuormitukselle korkeassa lämpötilassa edistää onkaloiden muodostumista raerajojen liityntäkohtiin, ajan myötä nämä kasvavat säröiksi ja halkeamiksi. Kun säröt ja halkeamat yhdistyvät, vaurio voi tapahtua, vaikka vetojännityksen aiheuttamaa suurta muodonmuutos ei ole havaittavissa. Virumista voi tapahtua kaikissa metalleissa ja niiden seoksissa. (American Petroleum Institute 2020, s. 120.)

Viruminen etenee kolmivaiheisesti. Ensimmäisessä vaiheessa kimmoisen muodonmuutoksen jälkeen virumisnopeus laskee, koska materiaalin muokkauskovettuminen on suurempaa kuin myöstön vaikutus. Toisessa vaiheessa, jota myös vakaan tilan virumiseksi kutsutaan, viruminen etenee vakio nopeudella. Tällöin muokkauskovettuminen ja myöstö vastustavat toisiaan. Kolmannessa vaiheessa virumisnopeus kasvaa nopeasti. Lisääntynyt jännitystaso ilmenee nopeana muodonmuutoksena. Kolmas vaihe päättyy jännitysrepeämiseen, kun materiaalin poikkileikkauspinta-ala pienenee, jolloin jännitystaso kasvaa. (Yara International ASA 2022c, s.6.) Kuvassa 13 on virumisen vaikutuksesta särkynyt putki. Putkessa näkyy muodonmuutoksia ja jännityksen johdosta syntyneitä repeytymiä.



Kuva 13. Virumisen seurauksena särkynyt putki. (Yara International ASA 2022c, s.13.)

Eri materiaaleilla on olemassa kynnsarvot lämpötilan suhteen, joiden ylittyessä virumisvauriot ja halkeamat ovat mahdollisia. Hiiliteräksellä tämä lämpötila-arvo on noin 343-371 °C, riippuen jännityksestä. AISI 316 ruostumattomalla teräksellä tuo arvo on 540 °C. Jos lämpötila pysyy tuon kynnsarvon alapuolella ei virumisesta aiheutuvaa säröilyä ilmene, vaikka jännitykset olisivat korkeita. (Yara International ASA 2022c, s.9; American Petroleum Institute 2020, s. 123.)

Virumisvaurioita voi esiintyä korkean lämpötilan laitteista, jotka toimivat virumislämpötila-alueella. Näitä ovat muun muassa tulistimen putket, tuet, ripustimet, korkeapaineiset höyryputket ja polttouunien sisäosat. Eri materiaaleja hitsattaessa yhteen, kuten ferriittiset ja austeniittiset teräkset, voi liitoshitsi kärsiä virumisesta, johtuen erilaisista lämpölaajenemisjännityksistä. (American Petroleum Institute 2020, s. 121.)

2.3 Yleisimmät NDT-menetelmät korroosiotarkastuksissa

Aineiden koestusmenetelmät voidaan jakaa ainetta rikkoviin (DT Destructive Testing) tai ainetta rikkomattomiin (NDT Non-Destructive Testing) menetelmiin (Kauppi 2019, s. 6). Ainetta rikkovia menetelmiä käytetään muun muassa hitsausohjeen hyväksymistesteissä, kun hitsatulle koekappaleelle suoritetaan menetelmäkoet. Rikkovilla menetelmillä voidaan myös tutkia esimerkiksi jo vaurioituneen aineen ominaisuuksia, kuten iskusitkeyttä, kovuutta ja makrorakennetta. (Lukkari 2002, s. 58.)

NDT-tarkastuksia käytetään valmistuksen aikana tai sen jälkeen tehtäviin tarkastuksiin, kuten esimerkiksi korroosion kartoitukseen. Nimensä mukaisesti NDT-tarkastuksissa hitsiä tai kappaletta ei rikota, vaan se pystytään eri NDT-menetelmillä tarkastamaan valmiina komponenttina. (Kauppi 2019, s. 6; Promaint 2008, s. 824.) Korroosiotutkimuksessa käytettävät NDT-menetelmät jaotellaan pinta- ja volymetrisiin menetelmiin. Pintamenetelmät koostuvat visuaalisesta, tunkeumaneste-, magneettijauhe-, ja pyörrevirtatarkastuksesta, kun taas volymetriset menetelmät jaetaan radiografiseen ja ultraäänitarkastukseen. (Promaint 2008, s. 824.)

Pintatarkastusmenetelmillä voidaan havaita pintaan asti tai sen välittömässä läheisyydessä olevat viat. Poikkeuksena tästä määritelmästä on pyörrevirtamenetelmä, jolla voidaan havaita myös pinnan alaisia vikoja. Volymetriset tarkastusmenetelmät soveltuvat näkymättömissä olevien pintojen tarkastukseen, kuten tutkittavan kappaleen seinämien ja putkien sisäpuolisten pintojen kunnon arviointiin. Näitä menetelmiä käytetään laajasti korroosion tutkimukseen. (Promaint 2008, s. 826-832.) Taulukossa 2 on esitetty tarkastusmenetelmien soveltuvuus eri korroosionmuotojen havaitsemiseen.

Taulukko 2. Tarkastusmenetelmien soveltuvuus eri korroosimuotojen havaitsemiseen. Mu-
kaillen (Promaint 2008, s. 825.)

Korroosimuoto	Tarkastusmenetelmä					
	VT	PT	MT	ET	RT	UT
Yleinen syöpyminen	X	–	–	X	X	X
Pistesyöpyminen	X	○	○	●	X	X
Rakokorroosio	○	–	–	○	○	●
Galvaaninen korroosio	X	–	○	●	○	●
Eroosio- ja kavitaatiokorroosio	X	–	–	X	X	X
Raerajakorroosio	X	X	X	●	○	●
Jännityskorroosio	X	X	X	X	○	X
Korroosioväsyminen	X	X	X	X	●	X

Symbolien selitteet:

X = Soveltuu hyvin

● = Soveltuu tyydyttävästi

○ = Vähemmän käyttökelpoinen

– = Ei sovellu

VT = Visuaalinen tarkastus

PT = Tunkeumanestetarkastus

MT = Magneettijauhetaarkastus

ET = Pyörrevirtataarkastus

RT = Radiografinen tarkastus

UT = Ultraäänitarkastus

2.3.1 Visuaalinen eli silmämääräinen tarkastus

Visuaalinen tarkastus on yksinkertaisin ja halvin tarkastusmenetelmä ja se soveltuu hitsin ja kappaleen pintapuoliseen tarkastukseen. Apuna visuaalisessa tarkastuksessa voidaan käyttää suurennuslasia, rullamittaa, työntömittaa, a-mittatyökalua, rakotulkisarjaa ja endoskooppeja. (Kauppi 2019, s. 8; Lukkari 2002, s. 38-39.)

Visuaalinen tarkastusmenetelmä on yleisin ja laajasti käytetty menetelmä pinnan halkeamien havaitsemiseen ja tutkimiseen (Davis 1998, s. 1257). Optimaalisissa olosuhteissa ihmissilmän on mahdollista havaita pienetkin viivamaiset ja pyöreät virheet. Havaittavissa olevan

pyöreän virheen koon on oltava 0,10 mm ja vastaavasti viivamaisen virheen koon leveys-suunnassa 0,05 mm. (Lukkari 2002, s. 39.)

2.3.2 Tunkeumanestetarkastus

Tunkeumanestetarkastuksessa käytetään matalan pintajännitteen sisältävää nestettä, mikä imeytyy pintaan asti avautuviin vikoihin. Menetelmä soveltuu pintahalkeamien, painaumien, huokosten ja vuotokohtien todentamiseen. (Promaint 2008, s. 827.) Tunkeumaneste imeytymisen jälkeen pinta puhdistetaan ja pinnalle levitetään kehite. Tunkeumaneste jää hitsin avonaisiin vikoihin, jonka kehite imee viasta. Näin näkyviin saadaan vian muotoinen näyttämä. Näyttämä on leveyssuuntaan yleensä 50-500 kertaa suurempi kuin alkuperäinen vika. Näyttämä on yleensä punainen valkoista taustaa vasten. Näyttämiä arvostellaan heti kehiteen levittämisen tai kuivamisen jälkeen. Lopullinen kehittämisaika kestää noin 10-30 minuuttia, jonka jälkeen tehdään lopullinen arvostelu. Menetelmä on yksinkertainen ja halpa, mutta näyttämien arviointi vaatii kokemusta, esimerkiksi onko kyseessä halkeama vai huokonen. (Kauppi 2019, s. 8-9.)

Tunkeumanestetarkastusta voidaan suorittaa metallien lisäksi muoville, lasille ja keramiikalle. Ainoa rajoitteena on, ettei materiaali ole luonnostaan huokoista, jolloin syntyy materiaalin huokoisuuden perusteella valenäyttämiä. (Promaint 2008, s. 827-828.)

2.3.3 Magneettijauhetarkastus

Magneettijauhetarkastuksessa havaitaan kappaleiden pinnassa tai sen välittömässä läheisyydessä olevia epäjatkuvuuskohtia, kuten halkeamia ja sulkeumia. Menetelmässä viat, kuten halkeamat synnyttävät vuotokenttiä, kun tarkastettava kappale magnetoidaan. Tarkastuksessa kappaleen pintaan levitetään magneettijauhehiukkasia, mitkä kerääntyvät vuotokenttään kappaleen magnetoituessa. Näin viat saadaan paremmin näkyviksi ja näyttämän sijainnin, koon sekä muodon mukaan voidaan vikaa arvioida. (Promaint 2008, s. 828; Lukkari

2002, s. 39.) Tarkastettavan kappaleen magnetointi voidaan suorittaa ies-magneetilla tai virtamagnetoinnilla (Kauppi 2019, s. 9).

Magneettijauh tarkastuksella voidaan löytää luotettavasti 1 µm levyinen ja 25 µm syvyinen halkeama, kunhan sen pituus on ainakin 2 mm (Lukkari 2002, s. 39). Menetelmän rajoituksena on sen käyttökelpoisuus vain ferromagneettisille kappaleille. Lisäksi luotettavan tarkastustuloksen aikaansaamiseksi magneettikentän suunnan on oltava oikea suhteessa vikaan. Yleensä tarkastus suoritetaan magneetilla kappaleita eri suunnista. (Davis 1998, s. 1267.)

2.3.4 Pyörrevirtatarkastus

Pyörrevirtatarkastus on sähköinen tarkastusmenetelmä. Menetelmässä tutkitaan materiaalin sähkömagneettista vastetta ulkoisen magneettikentän avulla. Tarkastuksessa mitta-anturi viedään tarkastettavan pinnan lähelle, jolloin anturin ja tarkastettavan kappaleen pinta synnyttävät virtapiirin. Virtapiiri syntyy magneettikentän välityksellä. Epäjatkuvuuskohtien kohdalla pyörrevirtoihin tulee häiriö, jolloin pyörrevirtojen muutos havaitaan anturiin palaavassa signaalissa. (Kauppi 2019, s. 9.)

Pyörrevirtamenetelmää käytetään muun muassa putkien tarkastuksessa, jolloin anturi vedetään tarkastettavan putken läpi. Menetelmällä saadaan syöpyneen kohdan seinämäpaksuus noin 0,1 mm tarkkuudella. Pyörrevirtatarkastus sopii parhaiten epämagneettisille putkille, mutta myös ferromagneettisille putkille on kehitetty pyörrevirtatekniikoita. Menetelmä soveltuu myös pintojen tarkastukseen silloin, kun halutaan paikallistaa halkeamia. (Promaint 2008, s. 831.) Pyörrevirtatarkastuksen etuina on sen nopeus, tarkastustuloksista saadaan talenne ja vikojen sijainti sekä syvyys on tulosten perusteella mahdollista määrittellä (Kauppi 2019, s. 9).

2.3.5 Radiografinen tarkastus

Radiografinen tarkastusmenetelmä perustuu tunkeutuvan säteilyn erilaiseen imeytymiseen tarkastuskappaleessa. Säteily voi olla joko sähkömagneettista tai hiukkassäteilyä. Tarkastuskappaleen eri osat absorboivat erilaisia määriä läpäisevää säteilyä, nämä erot johtuvat kappaleen tiheuseroista, osan paksuuden vaihteluista tai erot johtuvat säteilyn imeytymisominaisuuksista, jotka johtuvat koostumuksen vaihteluista. Tarkastuskappaleen läpi kulkenut imeytymätön säteily voidaan tallentaa filmille, valoherkälle paperille tai fluorisoivalle näyttölle. Perinteisessä radiografiassa tarkastuskappale sijoitetaan röntgensäteeseen ja se osa säteilystä, jota kappale ei absorboi osuu kappaleen takana olevaan filmiin. Filmin kehityksen jälkeen saadaan kaksikulotteinen varjokuva tutkittavasta kohteesta. Tarkastettavan kappaleen tiheyden, paksuuden ja koostumuksen vaihtelut näkyvät valokuvatiheyden vaihteluina kehitetyssä filmissä. Erot näkyvät erilaisina harmaan sävyinä. Kuvan arviointi perustuu tiheuserojen eli harmaan sävyjen vertailuun kappaleen tunnettuihin ominaisuuksiin tai olemassa oleviin radiografisen tarkastuksen tarkastusstandardeihin. (Campbell 2013, s.233-234.)

Radiografisella tarkastuksella pystytään löytämään hyvin suurella todennäköisyydellä kaikki kolmiulotteiset virheet, kuten huokokset, mutta tasomaisten virheiden, kuten halkeamien löytäminen on epävarmempaa. Vikojen löytämiseen vaikuttaa kuinka vikojen orientaatio on suhteessa tulevan säteilyn suuntaan. (Lukkari 2002, s. 39.) Menetelmällä voidaan tutkia kappaleita aina 1000 mm ainepaksuuteen saakka, paksuimmilla kappaleilla käytetään gammasäteilyä. Menetelmän etuina on tarkastuksesta syntyvä pysyvä tallenne ja tarkastettavan kappaleen pinnanlaadulla ei ole juuri vaikutusta tuloksiin. (Kauppi 2019, s. 9).

2.3.6 Ultraäänitarkastus

Ultraäänitarkastuksessa materiaaliin johdetaan korkeataajuisia energiasäteitä pinnan ja pinnan alla olevien epäjatkuvuuskohtien havaitsemiseksi, materiaalin paksuuden tai löytyneen särön etäisyyden mittaamiseksi. (Campbell 2013, s.267.) Näitä energiasäteitä kutsutaan ultraääniksi, jotka siirtyvät tarkastusluotaimesta väliaineen kautta tarkastuskappaleeseen. Ultraäänien taajuus on yli 20 kHz. Ultraääni etenee kappaleessa, kunnes se törmää

epäjatkuvuuskohtaan, tällöin se heijastuu siitä takaisin. Heijastuneet signaalit eli kaiut havaitaan tarkastuslaitteessa. Signaalien etenemisajan perusteella voidaan määrittää vian sijainti ja koko. (Promaint 2008, s. 833.)

Ultraääni kulkee joko pitkittäisenä tai poikittaisena aaltona. Näitä molempia aaltomuotoja hyödyntäen on kehitetty erilaisia luotaintyyppisiä, kuten suora- ja kulmaluotain. Näillä voidaan mitata ainevahvuuksia ja ohentumia sekä etsiä materiaalissa olevia epäjatkuvuuskohtia, kuten halkeamia. Tarkastus vaatii mittalaitteiston kalibroinnin vastaavaan materiaaliin kuin tarkastettava kohde. (Promaint 2008, s. 833-834.) Ultraäänitarkastus on verrattain nopea tarkastusmenetelmä, mutta se vaatii suorittajalta ammattitaitoa, muun muassa hyvää laite- ja ääniopin tuntemusta (Kauppi 2019, s. 10).

2.4 Kriittisyysmäärittely

Kriittisyys määritellään ominaisuudeksi, mistä selviää kohteeseen kuuluvan riskin suuruus. Kohdetta pidetään kriittisenä, jos siihen kytkeytyvä riski ei ole hyväksyttävällä tasolla. Näitä riskejä voivat olla henkilövahinko, aineelliset ja tuotannolliset menetykset ja ympäristövahinko. Riskin suuruudella ymmärretään vikaantumisen välittömien vaikutuksien ja tapahtuman todennäköisyyden tuloa. (PSK 6800 2008, s. 2.)

Laitteistojen kriittisyysanalyysillä pyritään tunnistamaan ne laitteet, mitkä rikkoutuessaan aiheuttavat suurimman vaikutuksen yrityksen liiketoiminnan tulokseen. Tuloksena saatua laitteiston kriittisyyslukua käytetään, kun kunnossapitotoita priorisoidaan. Kriittisyysanalyysillä pyritään myös löytämään laitteet, mitkä todennäköisemmin vaikuttavat negatiivisesti liiketoimintaan, koska niiden rikkoontuminen aiheuttaa vakavia seurauksia ja ne rikkoontuvat liian usein. Tuloksena saatua suhteellista riskilukua käytetään tunnistamaan toimenpiteitä luotettavuuden parantamiseksi. (Smith & Mobley 2008, s. 69.)

Kriittisten laitteiden määrittely voi vaihdella organisaatioiden välillä, jos tämä valintaprosessi ei ole yhdenmukaistettu. Arvioitaessa laitteiden kriittisyyttä, olettamuksen on oltava

teknisesti perusteltuja. On arvioitava laitevikojen seurauksien vaikutuksia turvallisuuteen, ympäristöön ja talouteen. Kriittisten laitteiden on oltava sellaisia, joilla on suurin vaikutus liiketoiminnan tavoitteisiin. Laitevian ja siihen liittyvän liiketoiminnan välinen suhde on tärkeä parametri, kun mietitään kunnossapitostrategiaa. Laitteiden luotettavan suorituskyvyn ylläpitäminen edellyttää huoltotöiden oikea-aikaista suorittamista, toisin sanoen puututaan ennakoivasti laitevikojen syihin. Tehokas kunnossapitotöiden ajoitus edellyttää ymmärrystä laitteiden kriittisyydestä, jotta jokaiselle työlle voidaan määrittää prioriteetti ja vaadittu suoritusaste. Vian seurauksen ja vian todennäköisyyden yhdistelmästä saadaan laitteiston organisaatiolle aiheuttaman riskin suuruus. Riskienhallinnan peruseräkkeisiin kuuluu, että viat, joilla on suuret seuraukset tapahtuvat harvoin, kun taas viat, joilla on pienet seuraukset tapahtuvat useammin. (Smith et al. 2008, s. 69-70.)

Teollisuuden prosesseissa on laitteita, jotka toimivat silloin, kun tapahtuu laiterikko tai odottamaton prosessihäiriö. Tällaisia laitteita ovat muun muassa varoventtiilit ja sammutusjärjestelmät. Tällaisia laitteita kutsutaan turvallisuuskriittisiksi laitteiksi, koska niiden toimimattomuus aiheuttaa vielä suuremman onnettomuuden. Näiden laitteiden toimintakunto on taattava kaikissa mahdollisissa tilanteissa. (Tukes 2016, s. 11.)

2.4.1 PSK 6800 Kriittisyysluokittelu

PSK 6800 standardin mukaisesti voidaan arvioida teollisuuden eri kohteiden kriittisyyttä. Tämän pohjalta tehdyssä kriittisyysluokittelussa kriittisyyttä luokitellaan taloudellisten menetysten, ympäristön ja henkilöturvallisuuden näkökulmasta. Pääsääntöisesti menetelmää käytetään kunnossapitosuunnitelman pohjana. Standardin kriittisyysluokittelu toteutetaan pääsääntöisesti taloudellisten vaikutuksien pohjalta. Jos riski kuitenkin on turvallisuuteen tai ympäristöön liittyvä, sen suuruuden selvittämiseksi on käytettävä muita riskianalyysimenetelmiä. PSK 6800 standardin laitetaso kriittisyyslaskenta perustuu viiteen riskin osatekijään, turvallisuuteen, ympäristöön, tuotannon menetykseen, laatuun ja kunnossapito- tai seurauksenkustannukseen. Näillä riskien osatekijöillä on omat painoarvokertoimet. Kokonaiskriittisyys laitteelle saadaan laskemalla osatekijöiden arvoista kokonaisarvo standardissa esitetyn

kaavan mukaisesti. Taulukossa 3 on esitetty standardin mukainen taulukkopohja laitteen konaiskriittisyyden laskentaan. (PSK 6800 2008, s. 3-7.)

Taulukko 3. PSK 6800 Kriittisyyssluokitteluun käytettävä taulukkopohja (PSK 6800 2008, s. 14.)

PSK Standardisointi		LAITTEIDEN KRIITTISSYYSLUOKITTELU TEOLLISUUDESSA Criticality Classification of Equipment in Industry 2008-06-05						PSK 6800 Liite 1						
Laitos		Kriittisyyden raja-arvo						400						
Kriittisyyssluokittelun kohde		Tuotannon menetyksen painoarvo kerroin Wp						100						
Tekijät														
Versio														
Päiväys														
Toimintopaikan tunnus	Toimintopaikan nimitys	Vikaantumislävyllä (1...8)	Turvallisuus (0...16)	Ympäristö 0...16	Tuotannon menetykset (0...4)	Loppu-tuotteen laatu-kustannus (0...4)	Korjauk-sustannus (0...4)	Kriittisyy-sindeksi						
		Painoarvo W →	30	20	100	30	20	K	Ks	Ke	Kp	Kq	Kr	
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0
								0	0	0	0	0	0	0

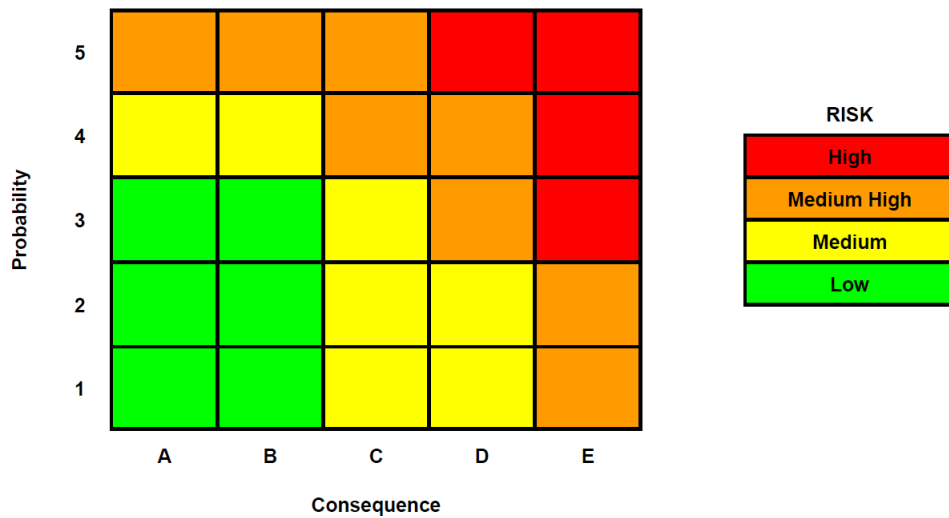
2.4.2 RBI- Risk Based Inspection

RBI on riskiperusteinen tarkastusmenetelmä, jonka avulla voidaan riskiin pohjautuen kohdentaa laitetarkastuksia. Menetelmää käytetään laajalti öljynjalostus- ja kemianteollisuuden laitoksissa ja se soveltuu hyvin lämmönvaihtimille, painelaitteille, säiliöille ja putkistoille. RBI:ssä riskin laskeminen sisältää vikaantumisen todennäköisyyden määrittämisen yhdistettynä vikaantumisen seuraukseen. Viaksi määritellään laitteiston särkyminen, jolloin tapahtuu paineellinen vuoto tai paineellinen komponentti halkeaa. Laitteistojen käytön aikana mahdolliset viat etenevät ja niiden kokoluokka kasvaa, jolloin myös riski kasvaa. Riittävän laajalla ja tehokkaalla tarkastuksella voidaan laitteen vika löytää, ennen sen rikkoontumista.

Tarkastaminen ei sinällään vähennä riskiä, mutta se mahdollistaa laitteen kunnan selvittämisen ja näin ollen vähentää epävarmuutta. (American Petroleum Institute 2016a, s. 12.)

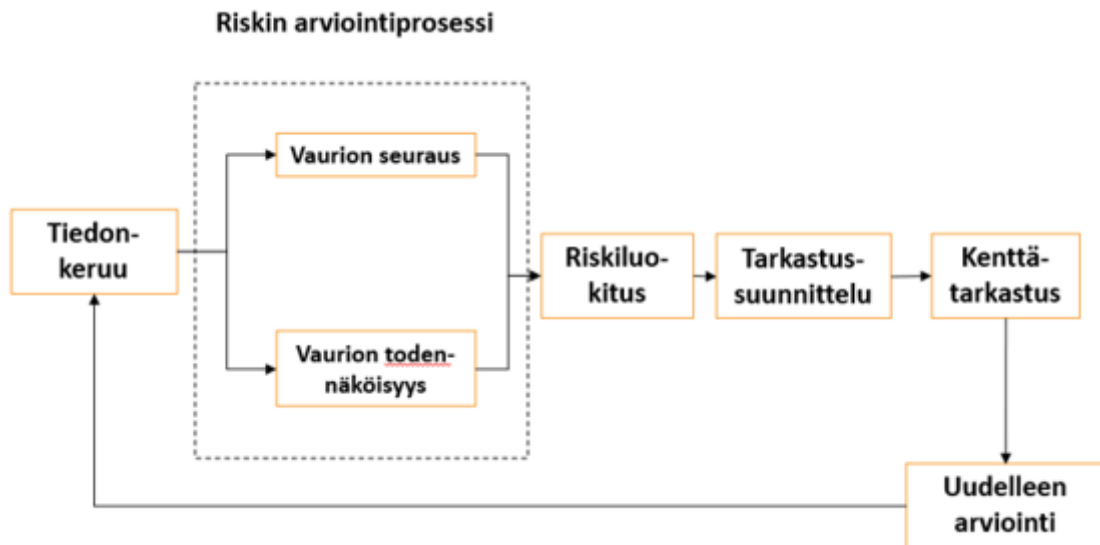
Useimmissa tapauksissa, kun riskit tunnistetaan, löytyy yleensä joitakin tapoja hallita ja vähentää niitä. Tuotantolaitosten kokonaisriskiä voidaan hallita, kun tarkastusten osalta keskittyy riskialttiimpiin prosessilaitteisiin. RBI-menetelmässä saadaan suositukset tarkastusten suoritusajavälistä, tarkastuslaajuudesta ja käytettävästä NDT-menetelmästä. Yleensä tuotantolaitosten kokonaisriski keskittyy suhteellisen pieneen määrään laitteita. Näihin korkean riskin laitteiden tarkastamiseen kannattaa panostaa, jopa toistuvilla tarkastuksilla. Tarkastusten prioriteetteja, laajuutta ja tiheyttä voidaan ohjata RBI-menetelmällä aiemmin tehtyjen tarkastusten tulosten perusteella. (American Petroleum Institute 2016a, s. 12.)

RBI-menetelmässä riskin arviointi perustuu riskimatriisiin, jonka muodostavat POF (Probability of failure) vian todennäköisyys ja COF (Consequence of failure) vian seuraus. Kuvassa 14 on esitetty peruseriaate RBI-menetelmän mukaisesta riskimatriisista, matriisin värien mukaan määräytyy laitteen kokonaisriski neliportaisesti, matala, keskitaso, keskikorkea ja korkea riski. POF-arvo voidaan laskea yleisellä vikataajuudella tai Weibullin jakomenetelmällä. Siihen vaikuttaa myös vauriotekijä, joka ottaa huomioon laitteen rakenteen, materiaalin ja näihin liittyvät tyypillisimmät vauriomekanismit. COF-arvo lasketaan ohjelman analyysitekniikalla ja siihen vaikuttaa muun muassa vaarallista ainetta olevan laitteen vaurion seurauksena olevan vuodon vaikutusalue, taloudelliset seuraukset ja henkilövahingot. Ajan myötä prosessin toiminnalliset muutokset voivat muuttaa näitä POF- ja COF-arvoja. Prosessiarvojen muutokset, kuten lämpötila, paine ja kemikaalin syövyttävyyys lisäävät ja nopeuttavat vauriotekijää ja vauriomekanismeja, joten myös vaurion todennäköisyys kasvaa (POF). COF- arvon oletetaan olevan muuttumaton, mutta tietyt prosessimuutokset voivat siihenkin vaikuttaa, kuten kemikaalin väkevyys. (American Petroleum Institute 2016a, s. 27-32.)



Kuva 14. RBI-menetelmän mukainen riskimatriisi. (American Petroleum Institute 2016a, s. 40.)

RBI-tarkastusprosessi on systemaattista työtä, jossa riskeihin perustuen suoritetaan laitteelle tietyllä aikavälillä määriteltyjä tarkastuksia. Prosessi vaatii uudelleensuunnittelua ja päivitystä, koska riskit muuttuvat ajan kuluessa. Riskiin perustuvan tarkastussuunnitteluprosessin yksinkertaistettu lohkokaavio selviää kuvasta 15. Kun käytetään täydellistä RBI-menetelmää, ovat kuvassa esitetyt kuusi vaihetta välttämättömiä. Prosessi koostuu tiedonkeruusta, riskin arviointiprosessista, riskiluokituksesta, tarkastussuunnittelusta, kenttätarkastuksesta ja uudelleen arvioinnista. (American Petroleum Institute 2016b, s. 18.)



Kuva 15. Riskiin perustuva tarkastussuunnitteluprosessi. Mukailten (American Petroleum Institute 2016b, s. 19.)

Tiedonkeruuvaiheessa laitteesta kerätään kaikki tarvittava lähtödata RBI-menetelmän käyttöönottoa varten. Näitä tietoja ovat muun muassa suunnitteluarvot, materiaali- ja prosessiarvot ja aiemmin tehdyt tarkastukset ja niiden löydökset. (American Petroleum Institute 2016b, s. 34.)

Riskin arviointiprosessissa määritellään vaurion seurauus (COF) ja vaurion todennäköisyys (POF). Vaurion seurauksia arvioitaessa otetaan huomioon muun muassa laitteen sisältämä materiaali, myrkyllisyys, vapautuneen sisällön leviäminen ja vaikutukset henkilöihin sekä ympäristöön. Myös taloudellisten menetysten suuruus vaikuttaa COF-arvoon. Vaurion todennäköisyys ilmaistaan yleensä taajuutena, tapausten lukumäärä tietyssä ajassa. POF-arvo määräytyy kahden tekijän vaikutuksesta. Ensimmäinen tekijä on laitteiston vauriomekanismit ja laitteiston valmistusmateriaalin kestävyys käyttöympäristössä, sisältäen laitteen sisäisen ja ulkoisen käyttöympäristön. Toinen tekijä on tarkastustoiminnan tehokkuus vauriomekanismien löytämiseksi ja tunnistamiseksi ennen laitteen pysyvää vauriota. (American Petroleum Institute 2016b, s. 39-53.)

Riskiluokituksessa edellä määritetyistä COF- ja POF-arvoista yhdistämällä saadaan laitteen kokonaisriski. Laitteen jokaiselle vauriomekanismille määritellään todennäköisyys ja sen vaurion seuraus. Toisin sanoen vauriot ja niiden todennäköisyydet voivat liittyä toisiinsa, esimerkiksi mikä todennäköisyys on, että laitteeseen tulee palavan nesteen vuoto ja toisaalta mikä todennäköisyys on, että palava kaasu syttyy palamaan. Laitteen riski voidaan esittää riskimatriisissa, mikä perustuu seuraus- ja todennäköisyysluokkiin. Riskimatriisin periaate on esitetty aiemmin kuvassa 14. Kuvassa seuraus- ja todennäköisyysluokat on järjestetty siten, että suurin riski sijoittuu oikeaa yläkulmaa kohti. (American Petroleum Institute 2016b, s. 55-59.)

Tarkastussuunnittelussa prosessilaitteiden tarkastukset suunnitellaan ja priorisoidaan riskiarvon perusteella. Tarkastussuunnittelussa määritellään tarkastettava laite, millä teknikalla tarkastus suoritetaan ja minkälaisella laajuudella sekä milloin tarkastus suoritetaan. Yrityksillä voi olla erilaisia riskikriteerejä, jotka määrittelevät hyväksyttävissä olevat riskitasot, joten riskienhallinta ja tarkastus päätökset voivat vaihdella yritysten välillä. (American Petroleum Institute 2016b, s. 57-58.)

Kenttätarkastuksessa laite tarkastetaan aiemmin RBI-ohjelman mukaisesti laaditun tarkastussuunnitelman mukaisesti. Monesti kenttätarkastuksen suorittaminen vaatii esivalmisteluja kohteelle, kuten puhdistusta, telinetöitä, eristeiden purkua ja tarvittaessa kiillotusta.

Uudelleen arvioinnissa käydään läpi ja analysoidaan suoritettujen tarkastuksien tulokset. Tarkastusten löydökset päivitetään RBI-ohjelmaan ja sen pohjalta suoritetaan riskien uudelleen arviointi. Tarkastustulosten lisäksi, muutokset prosessiolosuhteissa sekä kunnossapidon toteutuksessa voivat aiheuttaa muutoksia riskeihin ja tarkastussuunnitelmaan. Nämäkin muutokset on otettava huomioon uudelleen arvioinnissa. (American Petroleum Institute 2016b, s. 68.)

3 Tulokset

Yara Siilinjärven typpihappotehtaalla tuotetaan noin 60 prosenttista typpihappoa muun muassa lannoitetuotannon tarpeisiin. Typpihappoprosessissa käytetään pääkomponentteina ammoniakkia ja ilmaa. Ammoniakki hapetetaan katalyyttiverkkojen avulla prosessilämpökattilassa ja näin syntyneet typpikaasut imeytetään veteen, jolloin lopputuotteena saadaan typpihappoa. Prosessissa tarvitaan myös höyryä ammoniakkin höyrystämiseen ja jäähdytysvettä eksotermisen prosessin jäähdyttämiseen.

Typpihappotehtaalla on noin 450 eri putkilinjaa ja niihin liittyvää putkitunnusta. Määrä pohjautuu aiemmin Yaralla tehtyyn ja kerättyyn putkilinjaluetteloon. Tämän hetken tilanne voi olla hieman määrältään eri, koska kyseessä olevaan tehtaaseen on tehty prosessilaitte- ja putkistomuutoksia tuon datan keräyksen jälkeen. Tuossa lukumäärässä ovat mukana siis kaikki tehtaan putkistot aina sadevesiputkistoista väkevään tuotehappoon, eli typpihappoon. Tässä luvussa käsitellään putkistojen luokittelua ja sen pohjalta tehtävää putkistojen valintaa RBI-ohjelmaan.

3.1 Putkistojen luokittelu

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää typpihappotehtaan kriittiset putkistot, jotka olisi perusteltua ottaa riskiperusteisen tarkastuksen piiriin. Putkistodatan käsittelyyn on olemassa eri vaihtoehtoja. Yksi vaihtoehto on käydä koko putkistomäärä läpi ja asettaa ne tiettyin kriteerein kriittisyysjärjestykseen. Näitä kriteereitä voivat olla putkistoissa virtaava aine, putkimateriaali, paine, lämpötila ja historiatieto. Toisaalta myös kaikki putkistot voidaan perustaa RBI-ohjelmaan ja ottaa järjestelmän piiriin.

Jos kuitenkin lähestytään putkistomassaa käytännön läheisesti ja tiedossa olevat rajoitteet huomioiden, niin kaikkien putkistojen perustaminen RBI-ohjelmaan ei ole tarkoituksen mukaista. Putkistojen perustaminen ohjelmistoon on työlästä ja ohjelmisto vaatii siellä olevien

putkistojen jatkuvaa päivittämistä. Myös suoritettavista tarkastuksista syntyy kustannuksia. Lisäksi esimerkiksi sadevesijärjestelmän putkirikko ei suoranaisesti vaikuta tehtaan toimintoihin, vaikkakin rikkoutuessaan aiheuttaa korjaavia toimenpiteitä.

Yara Siilinjärvellä on tehty vuonna 2011 korroosiokartoitus typpihappotehtaaseen, jota on päivitetty vuonna 2017. Tuon kartoituksen tekemiseen on osallistunut tehtaan oma henkilöstö ja Yaran korroosio- ja materiaalispesialistit. Tuossa kartoituksessa on mietitty korroosio- ja rikkoontumismenetelmiä kyseessä olevan tehtaan laitekannalle, kun prosessi- ja materiaalitiedot ovat tiedossa. Kartoituksessa laitekanta on jaettu virtaavan aineen mukaan ryhmiin. Putkistojen tilanteesta keskusteltiin Yaran riskiperusteisen tarkastuksen asiantuntijoiden kanssa ja tultiin siihen lopputulokseen, että putkistoja kannattaa käsitellä saman ryhmäjaon perusteella.

Virtaavan aineen ryhmäjaon perusteella voidaan suuri määrä putkia luokitella ryhmiin, joista valitaan tietyt putket edustamaan kyseessä olevaa ryhmää. Valittu putkisto perustetaan RBI-tarkastusohjelmaan ja sille suoritetaan ohjelman mukaista systemaattista tarkastustoimintaa. Jos valitussa putkessa havaitaan poikkeamia, laajennetaan tarkastusta myös muihin saman putkiryhmän putkiin. Menetelmällä saavutetaan vain tietty otanta, mutta sen perusteella saadaan kuitenkin riittävä tieto putkiryhmän kunnosta. Putkien määrä ohjelmistossa saadaan pidettyä kohtuullisena, joten ohjelmiston päivitystyö ei kasva suhteettomaksi. Myös itse tarkastustoiminnan kustannukset pysyvät kohtuullisina.

3.2 Typpihappotehtaan putkistojen jako virtaavan aineen mukaan

Typpihappotehtaan prosessin pääputkistot koostuvat nestemäisen ja kaasumaisen ammoniakkin, jäähdytysveden, höyryn, ilman, lauhteen, typpikaasujen, typpihapon ja poistokaasujen putkistoista. Saman virtaavan aineen putkistoissa putkikoko voi vaihdella eri prosessin vaiheissa, esimerkiksi typpihapon putkistoja löytyy DN 15:stä DN 125:seen asti. Typpihappotehtaan prosessin pääputkistot voidaan jakaa virtaavan aineen mukaan ryhmiin, joissa on samanlaiset prosessiolosuhteet ja niillä voidaan olettaa olevan yhtäläiset

korroosiomekanismit saman materiaalin putkistoissa. Pääputkistoihin kuuluvat siis kaikki prosessin toiminnan kannalta tärkeät putkiryhmät, niissä virtaa prosessissa tarvittavia hyödykkeitä, joista jalostetaan tuotetta tai ovat seurausta valmistetusta tuotteesta. Näissä prosessiputkistoissa voidaan myös olettaa olevan korkeimmat korroosionopeudet, johtuen siirrettävistä aineista. Myös kyseisten putkistojen rikkoontuessa näistä putkistoista syntyy suurimmat vaikutukset talouteen, ympäristöön ja turvallisuuteen. Tämän jaon ulkopuolelle jäävät muun muassa palovesi-, paineilma-, sadevesi-, voiteluöljy- ja instrumentti-ilmaputkistot, jotka ovat kuitenkin tärkeitä tehtaan toiminnan kannalta, mutta niiden vaikutuksen esimerkiksi turvallisuuteen ovat vähäisemmät.

Eri korroosiomekanismit ovat materiaali ja prosessiolosuhteista riippuvaisia, joten niihin vaikuttaa käytössä oleva materiaali, virtaava aine, prosessin lämpötila ja paine. Typpihappotehtaan tehdyt korroosioanalyysit ovat pohjautuneet teoretiseen tietoon, vikahistoriaan, käytökokemuksiin ja aikaisemmin tehtyihin tarkastuksiin, joista on koostettu mahdolliset vauriomekanismit ja niiden nopeudet. Näitä tietoja ei voi yleistää yleiseksi ohjeeksi, koska pienikin muutos materiaalissa tai prosessiolosuhteissa voi johtaa toiseen lopputulokseen. Työn tulokset osiossa sovelletaan ja käytetään lähteenä putkistojen jaossa, vauriomekanismien määrittelyssä ja korroosionopeuksien arvioinnissa Yara Siilinjärvellä tehtyjä korroosiotutkimuksien tietoa typpihappotehtaan osalta. (Yara RBMI Corrosion Review- Yara Finland, Siilinjärvi nitric acid plant 2011 and update 2017.)

Typpihappotehtaan prosessiputkistojen pääryhmäjako:

1. Prosessi-ilma
2. Ammoniakki
3. Ammoniakin ja ilman seos
4. Prosessi NO_x-kaasut
5. Typpihappo
6. Poistokaasut
7. Puhdas höyry ja lauhde
8. Prosessivesi
9. Jäähdytysvesi

3.2.1 Ilmaputkistot

Prosessi-ilma imetään kompressoreilla ulkoilmasta, jota ennen se suodatetaan. Ilman lämpötila voi vaihdella -35 °C - 260 °C välillä, ja sen paine vaihtelee pienestä alipaineesta noin 6 bar paineeseen prosessin eri vaiheissa. Ilmaputkistoissa voidaan käyttää materiaaleina hiiliterästä, niukkaseosteisia tai ruostumattomia teräksiä. Typpihappotehtaan ilmaputkistojen koot vaihtelevat DN 10:sta aina DN 1000:en.

Hiiliteräksillä oletettavissa oleva vikaantumismuoto ilmaputkistoissa on yleinen korroosio. Korroosio kiihtyy, jos ilmaputkiin on mahdollista kondensoitua vettä. Lopulliseen korroosionopeuteen vaikuttaa myös lämpötila ja pahimmillaan se voi olla jopa 0,5 mm/a, mutta normaaliolosuhteissa korroosionopeus on huomattavasti tätä pienempi. Sama vikaantumismuoto on myös todennäköisin ruostumattomien terästen ollessa ilmaputkistojen valmistusmateriaalina, mutta prosessissa käytetään suodatettua ilmaa ja lämpötilat ovat verrattain matalat. Näin ollen voidaan olettaa, että ruostumattomien terästen ilmaputkistoissa ei tapahdu korroosiota. Typpihappotehtaalla ilmaputkistojen materiaalina käytetään AISI 304 ja AISI 321.

3.2.2 Ammoniakkiputkistot

Ammoniakki varastoidaan säiliöissä ammoniakiasemalla, josta se pumpataan typpihappotehtaalalle. Typpihappotehtaalla ammoniakki höyrystetään, tulistetaan ja suodatetaan, ennen sen jatkokäyttöä. Tuleva ammoniakki lämmitetään -33 °C noin 80 °C , jolloin ammoniakki-kaasun paine on noin 6 bar.

Ammoniakkiputkistoina voidaan käyttää hiiliterästä, niukkaseosteisia teräksiä tai austeniittisiä ruostumattomia teräksiä. Hiiliteräksillä ja niukkaseosteisillä teräksillä esiintyy mahdollisina vikaantumismuotoina yleinen korroosio, haurasmurtuma, jännityskorroosiohalkeilu ja eristeen alainen korroosio. Puhdas ammoniakki ei syövytä hiiliteräksiä, mutta ammoniakissa on aina mukana epäpuhtauksia, kuten hiilidioksidia ja vettä, mitkä voivat aiheuttaa

korroosiota. Hiiliteräsputkistojen osalta yleisen korroosion korroosionopeutena voidaan käyttää 0,01 mm/a.

Haurasmurtuma on mahdollinen hiiliteräsputkistoissa matalissa lämpötiloissa, kuten ammoniakkin varastointilämpötilassa -33 °C. Riski on kuitenkin pieni, jos käytetään mataliin lämpötiloihin tarkoitettuja materiaaleja tarvittavissa kohteissa. Ammoniakin jännityskorroosiohalkeilu on mahdollinen hiiliteräsrakenteissa, mutta pääsääntöisesti sitä esiintyy ammoniakkin varastosäiliöissä, joissa on suuria jännityksiä. Ammoniakin sisältämä happi lisää jännityskorroosion mahdollisuutta ja veden lisääminen ammoniakkin joukkoon puolestaan pienentää sen riskiä. Typpihappotehtaan ammoniakkiputkistoissa kyseessä oleva korroosiomuoto ei ole todennäköinen, koska siitä ei ole havaittu aiemmin Siilinjärvellä tai vastaavissa muissa tuotantolaitoksissa.

Hiiliteräsputkistoissa, joissa virtaa kylmä ammoniakki, on suuri riski eristeen alaiselle korroosiolle. Myös putkistojen jaksottainen käyttö lisää riskiä eristeen alaiselle korroosiolle, koska putken jäätyessä ja vastaavasti taas sulaessa, eristeen ja putken väliin muodostuu kosteutta. Eristetyypillä on myös vaikutusta korroosion todennäköisyydelle, erityisesti mineraalivillalla eristetyt putkistot ovat riskialttiimpia, koska mineraalivilla kostuessaan ei kuivu helposti. Käytettäessä austeniittisiä ruostumattomia teräksiä ammoniakkiputkistoissa kyseessä olevissa lämpötiloissa ei korroosiota tapahdu.

3.2.3 Ammoniakin ja ilman seos

Ammoniakkikaasu ja prosessi-ilma sekoitetaan putkisekoittimessa. Seoksessa ammoniakkia on noin 11 %. Sekoituksen jälkeen seos suodatetaan ennen kuin se menee prosessilämpökattilaan. Sekoitukseen tulevan ammoniakkin lämpötila on 70 °C ja ilma ammoniakkiseoksen lämpötila sekoituksen jälkeen noin 140 °C. Putkistossa oleva paine on noin 3,8 bar.

Kohteessa käytetään AISI 321 (1.4541) putkistoa, mutta siihen soveltuisi myös AISI 304L tyyppin materiaali. Oletettavissa olevat vikaantumismuodot kyseiselle seokselle ja

käytettävälle materiaalille ovat: yleinen korroosio ja ylikuumentuminen. Kuitenkin kyseisillä prosessiarvoilla AISI 321 materiaalilla ei esiinny yleistä korroosiota ammoniakkin ja ilman seoksessa. Ylikuumentuminen olisi mahdollista, jos putkistoon pääsisi vastavirtaan NO_x-kaasuja, jotka voisivat aiheuttaa kyseisen seoksen kanssa kuumia pisteitä putkistoon. Tämä on kuitenkin epätodennäköistä, koska joka vuosihuollon yhteydessä putkistoon liittyvät jätelämpökattilan osat puhdistetaan, mitkä voisivat aiheuttaa kaasujen takaisin virtauksen.

3.2.4 Prosessi NO_x-kaasut

NO_x-kaasuputkistot alkavat jätelämpökattilan jälkeen ja päättyvät imeytystornin alaosaan. Ilma ammoniakikseos poltetaan jätelämpökattilassa yhdessä katalyyttien kanssa. Palamistuotteina syntyy NO_x ja N₂O kaasuja. Nämä kaasut jäädytetään monivaiheisesti ennen imeytystorniin menoa. Kaasujen lämpötila alue on 50-900 °C ja paine noin 3,5 bar. Käytettäessä hiiliteräksiä ja muita niukkaseosteisia teräksiä oletettavissa oleva vikaantumismuoto on yleinen korroosio. Hiiliteräkset eivät kestä NO_x-kaasuja, jos putkistoon syntyy kondensivettä, tällöin muodostuu typpihappoa. Korroosionopeus voi silloin nousta jopa yli 100 mm/a.

Soveltuvia austeniittisiä ruostumattomia teräksiä ovat: AISI 304L, AISI 321 ja AISI 347 ja näiden mahdolliset vikaantumismuodot ovat: yleinen korroosio, kondensaatio korroosio ja veitsenteräkkorroosio. Yleisen korroosion nopeus on noin 0,01 mm/a, kunhan NO_x-kaasut pysyvät kaasumuodossa. Kondensaatiokorroosiossa syntyvä typpihappo syövyttää ruostumattomia teräksiä ja sen nopeus riippuu väkevyydestä ja lämpötilasta. Kaikista nopeinta korroosio on silloin, jos kondensaatiopisarat samalla kiehuvat. Tällöin korroosionopeus voi olla jopa 0,5 mm/a. Kondensaatiolle tyypillisimpiä esiintymiskohtia ovat putkistojen kuolleet kohdat, kannakointipisteet ja erilaiset mittausyhteet.

3.2.5 Typpihappo

Typpihappoputkistot koostuvat typpihapon siirtolinjasta tehtaalta varastosäiliöalueelle ja prosessin sisäisistä siirtolinjoista. Prosessin sisällä typpihappoa väkevöidään eri vaiheissa, joten tehtaan sisäisissä linjoissa typpihapon väkevyys vaihtelee 0:sta aina 64 %. Typpihapon paine on ylimmillään 5,2 bar.

Soveltuvia materiaaleja typpihapolle ovat austeniittiset ruostumattomat teräkset, kuten AISI 304L ja AISI 321. Oletettavissa olevia korroosionmuotoja ovat yleinen korrosio, veitsenteräkkorrosio ja raerajakorrosio. Näiden molempien korroosionmuotojen ilmenemiseen ja korroosionopeuteen austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä typpihapossa vaikuttavat typpihapon väkevyys ja lämpötila. Tästä syystä AISI 316L soveltuu käytettäväksi ainoastaan alle 50 °C lämpötiloissa. Taulukossa 4 on esitetty typpihapon väkevyyden ja lämpötilan vaikutus korroosionopeuteen austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä, kuten AISI 304L. Typpihapon väkevyyden ollessa 5 % ja sen lämpötilan yli 100 °C voi korroosionopeus suurimmillaan olla jopa 1,0 mm/a.

Taulukko 4. Typpihapon väkevyyden ja lämpötilan vaikutus korroosionopeuteen austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä

Typpihapon väkevyys %	Lämpötila °C	Korroosionopeus mm/a
5	100-150	0,1-1,0
	50-100	0,05-0,1
	25 -50	0,015- 0,05
60	100-121	0,1-1,0
	20-100	0,025- 0,1
65	90- 121	0,1- 1,0
	50-90	0,05-0,1
	25-50	0,025-0,05

3.2.6 Poistokaasut

Imeytystorneissa tapahtuvan imeytyksen jälkeen prosessikaasuja nimitetään poistokaasuiksi. Poistokaasuista otetaan lämpöä talteen lämmönvaihtimissa ja se puhdistetaan lisäämällä pieni määrä ammoniakkaa. Ammoniakki ja jäljellä oleva NO_x-kaasu reagoivat reaktorissa katalyyttien avulla. Reaktiossa syntyy N₂ ja H₂O. Ennen savukaasujen poistumista ilmakehään siitä otetaan energia talteen savukaasuturbiinissa. Poistokaasujen lämpötila vaihtelee 2-350 °C välillä ja suurimmillaan siinä on painetta 2,8 bar.

Soveltuvia materiaaleja poistokaasuille ovat austeniittiset ruostumattomat teräkset, kuten AISI 304 L ja AISI 321. Näissä olosuhteissa austeniittisten terästen oletettavissa olevat vauriomuodot ovat: yleinen korroosio, kondensaatiokorroosio ja mekaaninen väsyminen.

Yleisen korroosion korroosionopeus on noin 0,01 mm/a, kunhan poistokaasut pysyvät kaasumuodossa. Tilanne on toinen, jos poistokaasuputkistoihin muodostuu kondensaatiota, tällöin NO_x-kaasut ja vesi muodostavat typpihappoa. Ruostumattomilla teräksillä typpihapon aikaansaama korroosio muodostuu raerajoille ja on riippuvainen typpihapon väkevyydestä ja lämpötilasta. Kohdat, joissa kondensaatio on mahdollinen, kuten kannakoinnit ja mittanturiyhteet, voi korroosionopeus olla jopa 0,1 mm/a. Tällöin suurin korroosionopeus vähähiilisillä austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä ilmenee hitsin muutosvyöhykkeellä ja stabiloiduilla ruostumattomilla teräksillä korroosiotyypinä on veitsenterä korroosio. Myös tietyillä poistokaasun putkiston osilla mekaaninen väsyminen on mahdollista.

3.2.7 Puhdas höyry ja lauhde

Tämä ryhmä sisältää typpihappotehtaalla käytettävän korkeapaine- ja matalapainehöyryn sekä niiden lauhteen. Syöttövesi pumpataan voimalaitokselta ekonomaiserin kautta lieriöön, lieriöstä vesi pumpataan vaiheittain kattilan höyrystimiin ja tulistimiin. Tämän jälkeen korkeapainehöyry johdetaan takaisin voimalaitokselle. Matalapainehöyryllä puolestaan

tulistetaan ammoniakkikaasu. Tässä ryhmässä lämpötila vaihtelee 120-500 °C ja paine on ryhmän eri vaiheessa noin 60-90 bar. Syöttövetenä käytetään puhdistettua vettä.

Tämän ryhmän putkistot ovat olosuhteiden vuoksi mahdollisia kohteita eristeen alaiselle korroosiolle, CUI. Korroosio höyry- ja lauhdelinjoissa on riippuvainen syöttöveden puhtaudesta, epäpuhdas, esimerkiksi suoloja sisältävä syöttövesi voi aiheuttaa korroosiota järjestelmään. Epäpuhtauksia voi tulla myös itse prosessista, jos sen sisällä on vuotoja. Tätä edesauttaa prosessin suurempi paine, jolloin epäpuhtaudet pääsevät vuotokohdasta matalamman paineen höyry- tai lauhdejärjestelmään.

Soveltuvia materiaaleja tämän ryhmän aineille ovat hiiliteräkset ja ruostumattomat teräkset. Hiiliteräksillä oletettavissa olevat vikaantumismuodot ovat yleinen korroosio, eroosio ja viruminen. Teräksen pintaan syntyy höyryjärjestelmien korkeissa lämpötiloissa vedyn vaikutuksesta suojaava magnetiittikerros. Tämä kerros suojaa metallia kemialliselta korroosiolta. Suojakerros voi kuitenkin irrota osittain ja kertyä järjestelmän osiin, joissa muodostuu höyryä. Tällöin se heikentää metallin lämmönsiirtotehoa ja voi johtaa metallin virumiseen.

Eroosiokorroosio voi olla hyvin tyypillinen vikaantumismuoto höyry- ja lauhdejärjestelmissä. Korroosionopeus voi olla 0,1 mm -10 mm vuodessa ja siihen vaikuttaa muun muassa veden pH, materiaali, virtausnopeus ja lämpötila. Hiiliteräksen eroosiokorroosio on suurimmillaan veden pH:n ollessa 7-9. Hiiliterästen eroosiokorroosio kestävyyttä voidaan parantaa lisäämällä sen seostusta, esimerkiksi lisäämällä hiiliteräkseen molybdeeniä, kupari tai kromia. Virtausnopeuden kasvaessa kasvaa myös eroosiokorroosion korroosionopeus, erityisesti putkistojen mutkissa eroosio voi olla huomattavan nopeaa. Hiiliteräksillä myös lämpötila vaikuttaa eroosion nopeuteen, suurimmillaan se on 120-175 °C välillä.

Viruminen on lämpötilaan ja aikaan liittyvä vikaantumismuoto. Osa tämän ryhmän putkistoista toimivat materiaalilleen ominaisella virumislämpötila-alueella, joten putkistojen vanhentuessa riski virumisvaurioihin kasvaa. Ruostumattomat teräkset kestävät höyryn ja lauhteen vaikutukset, joten niillä ei havaita korroosiota tämän ryhmän aineissa.

3.2.8 Prosessivesi

Prosessivettä käytetään typpihapon valmistuksessa, kun typpikaasut imeytetään veteen. Kaasujen imeytys prosessiveteen tapahtuu absorptiotornissa. Prosessivetenä käytetään puhdistettua vettä, josta on poistettu suolat ja mineraalit. Vesi valmistetaan voimalaitoksella. Prosessiveden lämpötila on noin 20 °C ja siinä on noin 11 bar paine.

Yleinen korroosio olisi tämän ryhmän tyypillinen vikaantumismuoto, mutta prosessivesilinjoina käytetään ruostumattomasta teräksestä valmistettuja putkistoja ja itse prosessivesi on puhdistettua. Näin ollen voidaan olettaa, että prosessivesiputkistoissa ei esiinny korroosiota.

3.2.9 Jäähdytysvesi

Jäähdytysvedellä jäähdytetään typpihappotehtaan prosessia, sitä syötetään muun muassa imeytystornien jäähdytyskierukoihin, turbiinin öljyn lämmönvaihtimiin ja prosessilauhduttimiin. Jäähdytysvetenä käytetään järvivettä, mikä suodatetaan ennen käyttöä. Jäähdytysveteen lisätään klooria estämään mikrobiologista toimintaa. Jäähdytysveden lämpötila vaihtelee putkistoissa 0,5 °C - 40 °C. Painetta jäähdytysvesiputkistoissa on noin 6,1 bar.

Jäähdytysvesiputkistoissa käytetään ruostumattomasta teräksestä valmistettuja putkistoja, joten mahdollinen vikaantumismuoto olisi yleinen korroosio. Näissä olosuhteissa ruostumattomilla teräksillä ei kuitenkaan esiinny yleistä korroosiota.

3.3 Putkiston valinta RBI-ohjelmaan

Kaikista putkistojen pääryhmistä kerätään siihen ryhmään kuuluvat putkistot PI-kaaviosta ja luetteloidaan. Luettelointi toteutetaan materiaalin, eristyksen ja toimintalämpötilan suhteen. Luetteloinnissa otetaan huomioon, että saman putkiryhmän sisällä voi olla eri materiaalista

valmistettuja putkia. Samoin myös selvitetään, onko putkisto eristetty vai ei. Tämä jako materiaalin, eristyksen ja toimintalämpötilan suhteen on tärkeää, koska samoissakin olosuhteissa eri materiaalilla on erilaiset vikaantumismuodot. Putken eristystietoa puolestaan tarvitaan, kun mietitään eristeen alaisen korroosion mahdollisuutta ja toimintalämpötila vaikuttaa muun muassa virumisen mahdollisuuteen putkistossa. Alla esimerkki ryhmän 1 ilmaputkistoista luetteloituna, taulukko 5.

Taulukko 5. Putkistoryhmään 1 kuuluvat ilmaputkistot

Ryhmän nimi	Ryhmään kuuluvat putkistot	Toimintalämpötila
1-Y-304	210-IL-250 213-IL-250 211-IL-500 212-IL-250 208-IL-500 209-IL-250	240 °C
1-Y-321	201-IL-500 205-IL-600 206-IL-300 200-IL-1000 207-IL-300 204-IL-10 203-IL-200 202-IL-400	35- 265 °C

Ilmaputkistoissa käytetään materiaalina AISI 304 ja AISI 321, joten valitaan molemmista materiaaliryhmän putkistoista referenssiputkisto edustamaan kyseessä olevaa putkiryhmää. Tässä ilmaputkien ryhmästä valitaan riskiperustaisen tarkastuksen piiriin putkistot 208-IL-500 ja 205-IL-600. Putkistoilla on eri materiaali, mutta myös toimintalämpötila-alueessa on eroja. Ryhmän nimi kuvaa pääryhmäjakoja, eli 1 ilmaputkistot ja loppuosa kertoo materiaalin. Y tarkoittaa, että putki on eristetty. Jos se olisi eristämätön käytettäisiin N kirjainta.

Valittavien referenssiputkien määrä vaihtelee putkiryhmittäin. Jos pääryhmän sisällä on eri materiaalista valmistettuja putkia, valitaan referenssiputki jokaisesta materiaalista. Lisäksi, jos ryhmän sisältä löytyy eristettyjä ja eristämättömiä putkia, otetaan tämä huomioon valinnassa, jotta molemmat, niin eristetty, kuin eristämätön putkisto tulevat edustettuna

referenssiputkistoihin. Lisäksi valintaan vaikuttavat muun muassa aiemmin putkistoihin tehdyt tarkastukset ja niiden löydökset sekä vikahistoria.

Referenssiputkiston perustamisessa RBI-ohjelmaan tarvitaan putkistosta paljon taustatietoja. Ohjelma laskee näiden tietojen pohjalta referenssiputkistolle sen kriittisyyden. Tällä tavoin referenssiputken edustamalle putkiryhmälle saadaan kriittisyysarvo. Sisäisen ja ulkoisen korroosion osalta tarvitaan minimissään seuraavia lähtötietoja, jotka on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. RBI- ohjelmaan tarvittavat taustatiedot ulkoisen ja sisäisen korroosion osalta

RBI-ohjelmaan tarvittavat taustatiedot
Putkiston käyttöönotto päivämäärä, eli sen ikä
Halkaisija
Suunnittelupaine
Alkuperäinen seinämän paksuus
Korroosiovara
Korroosiotyyppi /mekanismi
Oletettu korroosionopeus
Materiaali
Suunnittelulämpötila
Minkälaisessa kosteusympäristössä putkisto on
Onko eristetty?
Onko maalattu?
Eristeen tyyppi
Eristeiden kunto
Operointilämpötila
Virtaava-aine
Operointipaine
Onko virtaava-aine nestettä vai kaasua
Tuotannon menetysluokka
Tehdyt tarkastukset ja niiden löydökset

Lisäksi ohjelmassa voidaan lisätä muita vauriomekanismeja, jos kyseessä olevaan kohteeseen niitä kuuluu.

Vaikka lopullinen kriittisyysarvo saadaan RBI-ohjelmasta, voidaan referenssiputkien määrän valinnassa ottaa huomioon pääryhmäputkistojen karkea kriittisyysjako. Tämä alla oleva pääryhmäputkistojen kriittisyysjako pohjautuu tämän tutkimuksen teoria- ja taustatietoihin ja niistä tehtyihin johtopäätöksiini. Kriittisyysjako on sovellettavissa kohde organisaation (Yara Siilinjärvi) toimintaympäristössä, eikä sitä voi soveltaa laajemmin. Taulukossa 7 on esitetty putkistojen pääryhmien jako kriittisiin ja vähemmän kriittisiin putkistoihin.

Taulukko 7. Prosessiputkistojen pääryhmien jako kriittisiin ja vähemmän kriittisiin putkistoihin

Prosessiputkistojen pääryhmät	
Kriittiset putkistot	Vähemmän kriittiset putkistot
Ammoniakki	Prosessi-ilma
Ammoniakin ja ilman seos	Prosessivesi
Prosessi NO _x -kaasut	Jäähdytysvesi
Typpihappo	
Poistokaasut	
Puhdas höyry ja lauhde	

Referenssiputkistojen määrä vaihtelee yhdestä kolmeen referenssiputkeen pääryhmän sisällä, riippuen materiaalieroista ja eristyksestä putkistossa. Edellä esitetyn taulukon pohjalta kriittisistä putkiryhmistä voidaan kuitenkin valita 3 kappaletta referenssiputkistojä, vaikka aiemmin esitetyn jaon perusteella niitä valittaisiin vain 1 kpl. Tällä tavoin niiden kriittisyys RBI-ohjelman perustamisvaiheessa otetaan huomioon ja niiden osalta saadaan suurempi otanta.

3.4 Tarkastussuunnittelu RBI-ohjelmassa

Referenssiputkien valinnan jälkeen ne voidaan perustaa RBI-tarkastusohjelmaan. RBI-ohjelman käyttöönotto putkistojen osalta ja sen jälkeinen riskiperusteinen tarkastustoiminta noudattaa aiemmin tässä työssä kuvattua riskiin perustuvan tarkastussuunnittelun prosessikaaviota.

RBI-ohjelmaan perustetuista putkistoista RBI-ohjelma laskee jokaiselle putkistolle oman kriittisyysarvon, mikä perustuu riskimatriisiin. Tämä kriittisyysarvo pohjautuu putkiston lähtötietoihin, kuten muun muassa vauriomekanismeihin, materiaaliin, ikään ja virtaavaan aineeseen. Kriittisyyden ja aiemmin tehtyjen tarkastustulosten pohjalta ohjelma luo tarkastussuositukset. Tarkastussuosituksista selviää käytettävä NDT-menetelmä ja sillä etsittävä vauriomekanismi. Lisäksi suosituksista selviää tarkastuksen laajuus ja suoritusväli. Tarkastussuositusten pohjalta laaditaan lopullinen tarkastussuunnitelma, toisin sanoen valitaan tarkastusmenetelmät kohteelle, joko kaikki tai osa suosituksista. Kuvassa 16 on RBI-ohjelman laatimat tarkastussuositukset järjestelmässä olevalle putkistolle ja siitä laadittu tarkastussuunnitelma. Kuvassa ylempänä on suositukset ja kuvan alaosassa tarkastussuunnitelma.

Recommendations

INCLUDE	MECHANISM	METHOD	FREQUENCY	INTERVAL	EXTENT
<input type="checkbox"/>	Combined	VI-Ext	10	Years	100% Coverage
<input type="checkbox"/>	Internal Corrosion	UT	10	Years	10% of Potential locations by Location Category by UT.

Mitigation Plan - Active

SEND TO ERP	MECHANISM	METHOD	FREQUENCY	INTERVAL	FREQUENCY SOURCE	EXTENT	INSPECTION PRIORITY	SOURCE	LAST INSPECTION DATE	INSTALL DATE	DUE DATE
<input type="checkbox"/>	Combined	VI Ext	10	Years	Recommendation	100% Coverage		Process Pipe	07/04/2016	07/04/2016	07/04/2026
<input type="checkbox"/>	Internal Corrosion	UT	10	Years	Recommendation	10% of Potential locati...		Process Pipe	07/04/2016	07/04/2016	07/04/2026

Kuva 16. RBI-ohjelman laatimat tarkastussuositukset ja sen pohjalta luotu tarkastussuunnitelma

Tarkastussuunnittelussa päätetään putkistosta tarkastettavat kohdat, joissa tyypillisimmin vaurio tai korrosio voi esiintyä, kuten sekoituspisteet, käyrät, haarat ja supistukset. Useasti, jotta nämä kohdat voidaan tarkastaa, vaaditaan esivalmisteluja kuten teline- ja eristetöitä. Tarkastussuunnittelussa myös mietitään tarkastuksen suoritusajan kohtaa, voidaanko tarkastus tehdä prosessin ajon aikana vai onko ne tehtävä päivä- tai vuosiseisokissa. Esimerkiksi höyrylinjojen paksuusmittaus ajon aikana on teknisesti vaikeaa sekä työturvallisuuden kannalta vaarallista. Määräajoin tehtävissä tarkastuksissa RBI-ohjelmaan on mahdollista lisätä putkistojen isometrejä, kuvia tai muita dokumentteja, kuten esimerkiksi putkistojen paksuusmittauksien mittalinjoja ja kohtia. Nämä helpottavat seuraavalla kerralla tarkastussuunnittelua ja mittaukset tehdään systemaattisesti samoista paikoista, jolloin ne ovat vertailukelpoisia keskenään.

Tehtyjen tarkastusten jälkeen tulokset siirretään ohjelmaan ja uusien tulosten pohjalta ohjelma päivittää kohteen kriittisyyden. Tulosten pohjalta arvioidaan putkiston kuntoa. Jos tulokset näyttävät huolestuttavilta tarkastuksia laajennetaan ja tarvittaessa putkisto korjataan tai uusitaan. Tulosten ollessa hyväksyttäviä, kohteelle luodaan uudet tarkastussuunnitelmat ja tarkastusajankohdat. Tässä vaiheessa riippuen referenssiputkien tarkastustuloksista, on arvioita myös tarvetta tarkastusten suorittamisesta myös referenssiputken edustamalle putkiryhmälle.

4 Pohdinta

Työn tavoitteena oli selvittää Yara Siilinjärven typpihappotehtaan ja ammoniakiaseman kriittisimmät putkistot, joiden kunnan seuranta on perusteltua suorittaa riskiperustaisen tarkastustoiminnan menetelmillä. Työhön kuului myös soveltuvimman menetelmän selvittäminen putkistojen kriittisyysluokitteluun. Työ koostui teoriatarkastelusta, tiedonkeräämisestä ja itse putkistojen kriittisyysluokittelusta. Teoriatarkastelussa keskityttiin korroosion aiheuttamiin putkistovaurioihin, koska korroosio on yleisin vaurion aiheuttaja putkistoissa. Putkistojen korroosio on riippuvainen käytetystä materiaalista, käyttöolosuhteista ja virtaavasta aineesta. Tämän vuoksi eri korroosiomekanismeja ja niiden jaottelutapoja on paljon ja ne eroavat hieman toisistaan. Teoriaosiossa käsiteltiin yleisempiä ja tunnetuimpia korroosimuotoja prosessiteollisuuden osalta sekä niiden havaitsemiseen soveltuvia NDT-tekniikoita. Tässä kappaleessa esitellään tutkimuksen avaintulokset, tarkastelen tutkimuksen luotettavuutta, niiden hyödynnettävyyttä ja uutuusarvoa.

4.1 Avaintulokset

Putkistotiedon keruuvaiheessa koottiin tietoa SAP toiminnanohjausjärjestelmästä ja Yaran sisäisistä verkkokansioista. Tiedonkeruuvaiheessa korostui havainto tiedon dokumentoinnin tärkeydestä, jotta tarvittava ja validitieto on löydettävissä. Tämä koskee muun muassa PI-kaavioiden päivittämistä, isometrien, suunnittelu- ja korjaus/muutosdatan dokumentointia oikeaan paikkaan.

Putkistojen kriittisyysmäärittelyssä luovuttiin jokaisen yksittäisen putkiston luokittelusta, koska putkistojen määrä on suuri ja millä argumenteilla samantyyppiset putkistot luokiteltaisiin. Lisäksi kun tiedossa oli, että riskiperustaiseen tarkastusohjelmaan haluttiin perustaa vain rajattu määrä putkistoja, jotta sen päivitystyö ei kasva kohtuuttomaksi. Lopputuloksena oli, että päädyttiin jakamaan ammoniakiaseman ja typpihappotehtaan prosessiputkistot virtaavan aineen mukaan yhdeksään ryhmään. Nämä yhdeksän putkiryhmää sisältävät typpihappotehtaan kriittiset putkistot. Jokaisesta ryhmästä valitaan 1-3 putkistoa

referenssiputkiksi, jotka on mahdollista ottaa riskiperustaisen tarkastuksen piiriin. Tällä menetelmällä putkiryhmän kunnosta saadaan riittävä otanta, jotta voidaan ennustaa koko putkiryhmän kuntoa. Tämän käytännön työn pohjana ja tietolähteenä käytettiin aiemmin Siilijärvellä tehtyjä korroosiotutkimuksia ja selvityksiä. Korroosiomekanismien ja korroosionopeuksien yhdistäminen vallitseviin prosessiolosuhteisiin ja käytettävään materiaaliin vaatii laajaa asiantuntemusta korroosiosta, metallurgiasta, kemiasta ja materiaalitekniikasta sekä aiempaa kokemusta vastaavanlaisista prosesseista. Tästä syystä tässä työssä tukeuduttiin näihin tehtyihin korroosiotutkimuksiin. Toinen vaihtoehto olisi ollut, että olisi lähdetty analysoimaan pelkän saatavissa olevan teorian tiedon varassa.

Tämän menetelmän pohjana on, että putkiryhmällä oletetaan olevan samanlaiset prosessiolosuhteet ja samat korroosiomekanismit saman materiaalin putkistoissa. Näissä olettamuksissa voi olla todellisuuteen nähden pientä eroa. Putkiryhmät ovat laajoja ja käsittävät koko typpihappotehtaan rakennuksen ja ulkoalueen. Näin ollen esimerkiksi ainakin ulkoisissa rasiutuksissa ja jännityksissä voi olla eroja putkiryhmän sisällä. Samoin pienetkin muutokset ja päivitykset prosessiarvoissa muuttavat korrosoivia olosuhteita putkistoissa. Jakoa, putkiryhmiä sekä referenssiputkistoja on mahdollista päivittää tarvittaessa myöhemmin, kun tarkastus- ja vikahistoriaa jatkossa kerätään ja analysoidaan.

4.2 Tutkimuksen vertailu kirjallisuustutkimuksen havaintoihin

Tutkimuksen teoriaosuudessa käsitellyt yleisemmät korroosiomekanismit toistuvat ja ovat havaittavissa myös tässä tutkimuksessa olleissa putkistoissa vauriomekanismeina. Tulevissa tarkastussuunniteluissa tarkastusten painopistealueet putkistoissa tulevat keskittymään teoriaosuudessa esitettyihin vauriokohtiin putkistoissa.

Samoin myös RBI-tarkastuksissa käytetään yleisesti korroosionmuotojen havaitsemiseen teoriaosuudessa esitettyjä tarkastusmenetelmiä, joilla vauriot havaitaan. Teoriaosuudessa esitelty RBI-prosessi voi erota eri käyttökohteittain. Usein RBI-prosessi räätälöidään

yrittäköhtaisesti, jolloin eroavaisuuksia voi olla painopistealueissa, laskennassa, vakioarvoissa ja esimerkiksi riskimatriisin rakenteessa.

4.3 Tulosten uutuusarvo

Tutkimuksessa ei löydetty uutta menetelmää teollisuusputkistojen luokitteluun ja kriittisyysmäärittelyyn. Valittu menetelmä muodostaa putkiryhmiä ja valita niistä referenssikappale on yleisesti käytetty menetelmä isojen kokonaisuuksien seurannassa. Putkistojen lopullinen kriittisyys määrytyy RBI-ohjelman käyttöönnoton jälkeen. Kun riskiperusteista tarkastusta on suoritettu riittävän kauan aikaa, voidaan arvioida kuinka hyvin valitut putkistot ovat edustaneet pääputkiryhmää. Vertailu voidaan suorittaa tarkastuslöydöksiensuhteessa pääputkiryhmän vikaantumistietoon.

4.4 Tulosten hyödynnettävyys ja yleistettävyys

Valitulla putkistojen luokittelumenetelmällä voidaan jakaa yleisesti putkistoja virtaavan aineen mukaan ja valita niistä referenssikappaleet edustamaan koko ryhmää. Putkistojen osalta käytettävät materiaalit, vikaantumismekanismit, prosessiolosuhteet ja käyttöarvot ovat tehdaskohtaisia, joten ne eivät ole yleistettävissä. Tätä tutkimusta pystytään kuitenkin hyödyntämään kohdeorganisaatiossa ja samoja periaatteita noudattaen voidaan myös hyödyntää toisissa Yara Siilinjärven toimintopaikoissa.

4.5 Tutkimuksen objektiivisuus

Työtä pyrittiin tekemään tieteellisen tutkimuksen periaatteiden mukaisesti ja tavoiteltiin objektiivisuutta. Työ pohjautuu laajaan ja kattavaan teoriatarkasteluun, jota on sovellettu työn empiirisessä osassa. On kuitenkin todettava, että objektiivisuutta heikentää tutkijan oma rooli ja pitkä työkokemus kohdeorganisaatiossa.

Näin ollen tausta ja käytännön asioiden etukäteistiedot ovat voineet vaikuttaa tutkimuksellisiin valintoihin ja tutkijalla on voinut olla valmiina osin tiedostamattomia olettamuksia.

4.6 Tutkimuksen reliabiliteetti ja validiteetti

Tarkasteltaessa tutkimuksen validiteettia, eli kuinka hyvin valittu mittari mittaa kyseessä olevaa ilmiötä, voidaan todeta, että tässä tutkimuksessa käytetyllä ja esitetyllä menetelmällä päästään putkistojen osalta käynnistämään riskiperusteinen tarkastustoiminta. Valitun menetelmän myötä putkistoihin liittyviä asioita on jouduttu yleistämään ja tekemään olettamuksia. Tästä johtuen käyttäen valittua menetelmää putkistojen tarkastuksella ja seurannalla saavutetaan tietynlainen otanta. Tutkimuksessa on käytetty luotettavia lähteitä sekä teoriataustassa, että käytännön tutkimusosassa.

Riskiperusteinen tarkastustoiminta on kuitenkin systemaattinen ja dynaaminen prosessi, jota pystytään ajan kuluessa muokkaamaan ja liittämään siihen tarvittaessa lisää tarkastettavia putkistoja, jos se kokonaisuuden hallinnan kannalta koetaan tarpeelliseksi. Käyttämällä valittua menetelmää ja yhdistettynä se RBI-ohjelmaan voidaan tarkastusresurssit kuitenkin tietyllä varmuudella kohdistaa kriittisimpien putkistojen seurantaan.

Tutkimuksen reliabiliteettia, eli tutkimuksen toistettavuutta tarkasteltaessa voidaan todeta, että putkistojen kriittisyysluokittelu voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Näin ollen eri menetelmää sovellettaessa lopputuloksissa voi olla eroavaisuuksia.

4.7 Virhetarkastelu

Virhetarkastelun näkökulmasta virhettä voi aiheuttaa lähtötietojen virheellisyys. Tämä voi vaikuttaa putkiston kriittisyyteen, jos esimerkiksi putkistoon kohdistuu muita vauriomekanismeja tai korroosionopeudet ovat suurempia kuin tutkimuksessa on oletettu.

4.8 Jatkotutkimusaiheet

Kun RBI-tarkastusprosessi putkistojen osalta on ollut käytössä useamman tarkastusfrekvenssin verran tulisi tämän menetelmän tuloksia verrata pääputkiryhmien kuntoon. Toisin sanoen, kuinka hyvin menetelmällä on pystytty hallitsemaan koko putkistomassan kuntoa. Ovatko vauriomekanismit ja korroosionopeudet olleet pääputkiryhmissä referenssiputkien mukaisia.

5 Johtopäätökset

Tämän diplomityön tavoitteena oli määritellä Yara Siilinjärven typpihappotehtaan ja ammoniakkivaraston kriittisimmät putkistot, joiden kunnonvalvonta olisi perusteltua suorittaa riskiperusteisesti. Tässä tutkimuksessa on esitetty yksi menetelmä, jolla kohdealueen putkistot voidaan kriittisyysluokitella ja ottaa riskiperusteisen tarkastuksen piiriin. Tutkimuksella saavutettiin tavoite, jolla päästään käynnistämään RBI-prosessi ja käytettävissä olevat resurssit saadaan kohdistettu kriittisiin putkistoihin.

Menetelmää on kuitenkin ajan kuluessa arvioitava, kuinka hyvin valittu menetelmä toimii koko putkistonmassan kunnon arvioinnissa. Tavoitteena oli myös pitää tarkastusohjelmaan tuotavien putkistojen määrä kohtuullisena ja tällä menetelmällä putkistojen määrä saadaan rajattua. Näin ollen voidaan todeta, että tutkimuksen tavoite täyttyy.

Tutkimuksessa typpihappotehtaan putkistot luokiteltiin virtaavan aineen mukaisiin ryhmiin. Putkistoryhmän sisältä valitaan referenssiputkisto, mikä on mahdollista ottaa tulevaisuudessa riskiperustaisen tarkastuksen piiriin. Tällä tavoin laaja tehtaan putkistoverkosto saadaan systemaattisen seurannan piiriin. Tarkastamalla referenssiputkistot voidaan näiden tulosten pohjalta analysoida kaikkien putkistojen kuntoa. Tarvittaessa tarkastuksia laajennetaan koko putkiryhmään, jos referenssiputki osoittaa sen tarpeelliseksi. Tutkimuksessa sovelletun luokittelumallin etuina on suhteellisen vähäinen putkistojen päivitystarve RBI-ohjelmassa ja vastaavasti heikkoutena tiettyjen asioiden yleistäminen koskemaan koko putkiryhmää.

Tutkimuksessa ei löydetty toista tarkempaa ja käyttökelpoista menetelmää luokitella putkistoja, kun kaikkia putkistoja ei käytännön syistä haluta liittää järjestelmään. Menetelmää on tulevaisuudessa mahdollista päivittää ja jakaa tarvittaessa pienempiin putkistoryhmiin virtaavan aineen lisäksi, jonkun toisen mitattavan suuren mukaan.

Jatkotutkimuksena voitaisiin tutkia näitä putkistoja tarkemmin, esimerkiksi niiden uusinnan yhteydessä, jolloin vanha putkisto voidaan rikkoo ja avata. Oletettavissa olevia korroosiomekanismeja ja korroosionopeuksia voisi verrata todelliseen tilanteeseen, kuinka lähelle arviot ovat osuneet ja onko niissä ollut muita kuin tiedossa olevia vauriomekanismeja. Näistä saaduilla tiedoilla voisi arvioida kuinka hyvin tehdyissä korroosioanalyyseissä ja tässä tutkimuksessa sovelletulla menetelmällä on saavutettu putkiryhmän korroosio- ja kuntosuoranta.

Lähteet

American Petroleum Institute. 2020. ANSI/API recommended practice 571. Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry. Third edition. American Petroleum Institute. 367 s.

American Petroleum Institute. 2009a. API 570. Piping Inspection Code: In-service Inspection, Rating, Repair, and Alteration of Piping Systems. Third edition. American Petroleum Institute. 61 s.

American Petroleum Institute. 2009b. API 574. Inspection Practices for Piping System Components. Third edition. American Petroleum Institute. 88 s.

American Petroleum Institute. 2016a. Risk-Based Inspection Methodology. API Recommended Practice 581. Third edition. American Petroleum Institute. 664 s.

American Petroleum Institute. 2016b. Risk-Based Inspection. API Recommended Practice 580. Third edition. American Petroleum Institute. 82 s.

Avesta Sheffield. 1994. Corrosion handbook for stainless steels. Sweden: Avesta Sheffield AB. 88 s.

Campbell, F., C. 2013. Inspection of Metals - Understanding the Basics. ASM International. [viitattu 5.10.2022]. 445 s. Saatavissa: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpI-MUB0003/inspection-metals-understanding/inspection-metals-understanding>. Palvelu on maksullinen ja vaatii käyttäjälisenssin.

Chinedu, I., Ossai, C., I., Boswell, B., Davies, I., J. 2015. Review Pipeline failures in corrosive environments - A conceptual analysis of trends and effects. Engineering Failure Analysis vol. 53 ss. 36-58.

Cosham, A., Hopkins, P., Macdonald. K., A. 2007. Best practice for the assessment of defects in pipelines – Corrosion. Engineering Failure Analysis vol. 14 ss. 1245-1265.

Davis, J.R. (toim.) 1998. Guide to Nondestructive Testing and Inspection Methods: Uses of NDT. Teoksessa: Metals Handbook. ASM International. [viitattu 4.10.2022]. 1435 s. Saatavissa: <https://libguides.lut.fi/terms/knovel>. Palvelu on maksullinen ja vaatii käyttäjälisenssin.

Escoe A. K. 2006. Piping and Pipeline Assessment Guide. Teoksessa: Piping and Pipeline Assessment Guide. Elsevier. 49 s.

Kauppi, T. 2019. Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Hitsaustekniikka. 3/19. Suomen hitsausteknillinen yhdistys r.y. Oriveden kirjapaino. 65 s.

Lukkari, J. & Kyröläinen, A. & Kauppi, T. 2016. Hitsauksen materiaalioppi Osa 1: Metallioopin perusteet, terästen luokittelu ja valmistus, rakenneterästen käyttäytyminen hitsauksessa, murtuminen ja korroosio. Orivesi: Suomen hitsausteknillinen yhdistys r.y. (SHY). 186 s.

Lukkari, J. 2002. Hitsaustekniikka. Perusteet ja kaarihitsaus. Opetushallitus. Helsinki. 292 s.

Outokumpu. 2015. Corrosion handbook. 11th ed. Sweden: Outokumpu Oyj. 217 s.

Promaint kunnossapitoyhdistys. 2008. Korroosiokäsikirja. 4. Painos. Anjalankoski: KP-Media Oy. 930 s. (Kunnossapidon julkaisusarja, n:o 12).

PSK 6800. 2008. Laitteiden kriittisyysluokittelu teollisuudessa. PSK Standardisointiyhdistys ry. 13 s.

SFS-EN 13480-1:2017. Metallic industrial piping. Part 1: General. 3rd edition. Finland: Finnish Standards Associations SFS. 18 s.

Smith, R., Mobley, K., R. 2008. Introduction- The Recommended First Step to Rules of Thumb in Reliability Engineering. Rules of Thumb for Maintenance and Reliability Engineers, p. xiii-xiii. Elsevier Inc.

Teräsrakenne. 2021. (Nro 2), Teräsrakenteiden ruuvikiinnitysten galvaaninen korroosio. Teräskanneyhdistys. s. 52.

Tukes. 2016. Prosessiturvallisuus ja sen mittaaminen. Opas. Helsinki. [viitattu 17.4.2022]. Saatavissa:

<https://tukes.fi/documents/5470659/6410641/Prosessiturvallisuus+js+sen+mittaaminen/e3bec3bb-2e96-4c33-8f21-f9e1787f8bf5/Prosessiturvallisuus+js+sen+mittaaminen.pdf?t=1530686489000>.

Volkan, C. 2014. Corrosion Engineering. John Wiley & Sons. [viitattu 10.4.2022]. Saatavissa: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCE00004B/corrosion-engineering/corrosion-engineering>. Palvelu on maksullinen ja vaatii käyttäjälisenssin.

Yara International ASA. 2022a. (26. March 2022). Yara internal material. E136, Galvanic corrosion. E13* Series, Fundamentals of Corrosion. Yara Inspection Academy

Yara International ASA. 2022b. (9. April 2022). Yara internal material. E1511, Corrosion Under Insulation. E13* Series, Fundamentals of Corrosion. Yara Inspection Academy.

Yara International ASA. 2022c. (11. April 2022). Yara internal material. E148, Creep. E14* Series, Static Equipment Design and Construction Codes. Yara Inspection Academy.

Yara International ASA. 2022d. (4. November 2022). Yara internal material. E137, Environmental cracking Part 1. E13* Series, Fundamentals of Corrosion. Yara Inspection Academy.

1548/2016. Valtioneuvoston asetus painelaitteista. [viitattu 1.4.2022]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/2>