



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

MARIA RAUTANEN
SÄHKÖLAITTEIDEN KORROOSIOKESTÄVYYS JA -SUOJAUS
OFFSHORE-OLOSUHTEISSA
Diplomityö

Tarkastaja: professori
Pekka Ruuskanen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 8. syyskuu-
ta 2010

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

RAUTANEN, MARIA: Sähkölaitteiden korroosiokestävyys ja –suojaus offshore-olosuhteissa

Diplomityö, 78 sivua, 5 liitesivua

Joulukuu 2010

Pääaine: Elektroniikan materiaalit

Tarkastaja: professori Pekka Ruuskanen

Avainsanat: Korroosio, offshore, inhibiittori, kuivausainepussi, öljyntuotantolautta, spar

Technip Offshore Finland Oy (TOF) valmistaa Porin Mäntyluodossa öljyntuotantolauttojen runkoja sekä muita meriteknillisiä rakenteita, joiden avulla voidaan hyödyntää meren pohjassa olevia öljy- ja kaasulähteitä. Mäntyluodossa valmistetut öljyntuotantolautat ovat enimmäkseen sijoittuneet Meksikonlahdelle. Meksikonlahdella offshore-olosuhteet ovat hyvin aggressiiviset ja korrodoivat, koska siellä on aina lämmintä. Meriilmaston haasteellisuutta lisäävät jatkuva kosteus ja suolaisuus. Nämä riskitekijät on otettava huomioon öljyntuotantolauttaa suunniteltaessa, rakentaessa sekä kuljetettaessa sitä määränpäähän.

Öljyntuotantolautan tyypillisempiä sähkölaitteita ovat PLC eli ohjelmoitavat logiikat, MCC, PC, kosketusnäytöt, tietoverkkoihin liittyvät komponentit ja virtalähteet. Virtalähteissä elektroniikka on toteutettu pääosin pintaliitostekniikalla ja laitteet ovat pitkälti ohjattavissa mikroprosessoripohjaisesti. Sähkölaitteiden suojauksessa käytetään suojausluokiteltuja kytkentäkoteloida ja -kaappeja. Suojakoteloinnin lisäksi on ollut tavallista käyttää kolmea eri korroosiosuojausmetodia, kuten inhibiittoreita, kuivausainepusseja ja laitteiden lämmittämistä vastuksilla. Sisätiloissa voidaan lisäksi käyttää kosteuden poistoon ilmastointia.

Tämä diplomityö käsittelee sähkölaitteiden korroosiosuojauksia erityisesti inhibiittoreiden ja kuivausainepussien avulla. Työssä halutaan kiinnittää erityisesti huomiota niihin tilanteisiin, jolloin lautan sähköt eivät ole toiminnassa. Normaalisissa tilanteissa sähköjen ollessa päällä, lämmitysvastukset toimivat ja sähkölaitteet tuottavat itse lämpöä eikä kondensiovettä kerry niin herkästi sähkölaitteiden pinnoille.

Tämän diplomityön tavoitteena on selvittää sähkölaitteiden eri korroosiosuojausmenetelmien teoreettinen toiminta ja arvioida suojausmenetelmien toimivuutta TOF:n valmistamalla öljyntuotantolautoilla. Diplomityössä tarkastellaan sähkölaitteissa käytettävien metallien korroosiota, Meksikonlahden ilmasto-olosuhteita, korroosion aiheuttamia ongelmia sähkölaitteissa sekä korroosion suojausmahdollisuuksia. Diplomityössä suoritettiin lisäksi sähkölaitteisiin muodostuneen kosteuden ja korroosioon liittyvät testit.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

RAUTANEN, MARIA: Corrosion resistance and corrosion protection of electrical equipment for offshore conditions

Master of Science Thesis, 78 pages, 5 Appendix pages

December 2010

Major: Materials in electronics

Examiner: Professor Pekka Ruuskanen

Keywords: Corrosion, offshore, inhibitor, desiccant bag, oil production platform, spar

Technip Offshore Finland Oy (TOF) manufactures offshore oil and gas production platforms in Pori, Finland. Oil and gas production platforms built in Mäntyluoto are mostly operating in the Gulf of Mexico. Offshore conditions in the Gulf of Mexico are very corrosive due to geographical location and climate. High salinity and humidity are typically always present in offshore areas. Consideration of these factors must be an important part of the design philosophy of the oil and gas production platform manufacturing process. These factors have to be carefully taken into consideration in the transportation phase from manufacturing yard to the final offshore site.

This thesis views humidity and corrosion problems in oil and gas production platforms. In particular electrical equipment installed on these platforms are reviewed. General electrical devices are programmable logic controllers, motor control center, personal computers, touch screens, networks related components and power supplies.

Electrical equipment is always protected by IP-code connection boxes and consoles. There are also three other different types of protective methods to protect electrical equipment against corrosion. These are inhibitors, desiccant bags and equipment with heating resistors. Air conditioning may also be utilized indoors.

The objective of this thesis is to examine the various methods of corrosion protections of electrical equipment, and to estimate the functionality of different kinds of protection methods in oil production platforms manufactured by TOF. Laboratory tests were also performed in this thesis. All tests were related to humidity and corrosion problems in electrical equipment.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Technip Offshore Finland Oy:lle Tampereen teknillisessä yliopistossa Porin yksikössä. Diplomityön aihe käsittelee spar-öljyntuotantolautoissa olevien sähkölaitteiden korroosiokestävyyttä hyvin korrodoivissa offshore-olosuhteissa Meksikonlahdella. Diplomityössä selvitetään myös sähkölaitteiden korroosiosuojaus mahdollisuuksia. Lopuksi tehdään 3 koetta liittyen kytkentäkaappien kosteuden suojaamiseen sekä logiikkapaneelien korroosiokestävyyteen.

Työn ohjaajana on toiminut DI Sami Ollila ja työn tarkastajana on toiminut professori Pekka Ruuskanen Tampereen teknillisen yliopiston Porin yksiköstä. Heitä molempia haluan kiittää työntarkastuksesta, tuesta ja kannustuksesta tämän diplomityön tekemiselle. Lisäksi haluan kiittää Satmatic Oy:n myyntipäällikkö Jarmo Salosta, Teknoma Oy:n Markku Väänästä ja Etra Oy:n Jukka Ollilaa materiaalilahjoituksista, jotka sain kosteus- ja korroosiokeiteita varten.

Rakkaimmat kiitokseni haluan antaa lapsilleni Matiakselle ja Mikaelille, jotka ovat jaksaneet kärsivällisesti seurata diplomityöni tekemistä ja olla tukenani koko opiskeluaikani. Nöyrimmät kiitokseni haluan antaa vanhemmilleni, Anjalle ja Matille, jotka ovat monin korvaamattomin tavoin tukeneet ja tehneet opiskeluni mahdolliseksi.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	KORROOSIO	4
2.1.	Yleistä metalleista	4
2.2.	Metallien sähkökemiallinen sarja.....	4
2.3.	Galvaaninen jännitesarja	5
2.4.	Metallien korroosio	6
2.5.	Kemiallinen korroosio.....	6
2.6.	Sähkökemiallinen korroosio	6
2.6.1.	Nernstin yhtälö.....	7
2.6.2.	Pourbaix-diagrammi	7
2.7.	Anodi- ja katodireaktiot	8
2.8.	Polarisaatio ja metallin passivoituminen.....	10
2.9.	Metallien diffuusio ja korroosion ilmenemismuodot.....	11
2.9.1.	Galvaaninen korroosio eli kontaktikorroosio	12
2.9.2.	Huokoskorroosio.....	14
2.9.3.	Raerajakorroosio	14
2.9.4.	Vesirajakorroosio.....	14
2.9.5.	Rako- eli piilokorroosio	15
2.9.6.	Pistekorroosio eli pistesyöpyminen	15
2.9.7.	Jännityskorroosio ja väsyminen.....	17
2.9.8.	Hiertymiskorroosio (fretting-korroosio).....	18
2.9.9.	Sinkki- ja tinakato	19
2.9.10.	Lankamainen korroosio (filiform-korroosio)	19
2.9.11.	Elektrolyyttinen korroosio ja ionien vaeltaminen (migraatio)	19
2.9.12.	Mikrobiologinen korroosio.....	19
2.10.	Ruosteen muodostuminen	20
2.11.	Korroosiotuotteiden ryömiminen	20
2.12.	Korroosionopeus	21
2.13.	Korroosion aiheuttamat ongelmat elektroniikassa	21
3.	SPAR-ÖLJYNTUOTANTOLAUTAN SÄHKÖTEKNIikka.....	23
3.1.	Yleistä öljyntuotantolautoista	23
3.2.	Öljyntuotantolautan rungon sähkö- ja automaatiotekniikka	24
3.3.	Sähkölaitteiden materiaalit.....	26
3.3.1.	IEC	27
3.3.2.	Kotelon suojaluokitus, IP-luokitus	27
3.4.	Sähkölaitteiden sijainti	28
3.4.1.	Tyypilliset elektroniikkaa sisältävät laitteet	34
3.5.	Sähkölaitteiden elinkaari	35
3.5.1.	Rakennusolosuhteet Mäntyluodossa.....	35

3.5.2.	Kuljetusolosuhteet Suomesta Meksikonlahdelle	35
4.	OFFSHORE-OLOSUHTEET	38
4.1.	Ilmasto.....	39
4.1.1.	Trooppiset hirmumyrskyt	40
4.1.2.	Auringon säteily (UV) ja lämpötila	41
4.2.	Kaasut ja ilmanpaine	41
4.2.1.	Kaasulait	43
4.2.2.	Ilmanpaineen vaihtelut.....	44
4.3.	Ilmankosteus ja vesi	44
4.3.1.	Kosteuden kondensoituminen laitteen pinnoille.....	46
4.4.	Suolat	47
4.5.	Pöly	48
5.	SUOJAUSMAHDOLLISUUDET KORROOSION VÄLTTÄMISEKSI.....	50
5.1.	Sähkölaitteiden sijoittelu.....	51
5.2.	Galvaaninen korroosiopari	51
5.3.	Korroosionestoaineet ja niiden koostumus	51
5.4.	Korroosioinhibiittorit	51
5.4.1.	Inhibiittien pitoisuus	52
5.4.2.	Aggressiivisten ionien vaikutus	52
5.4.3.	Metallipinnan luonne	52
5.4.4.	Lämpötilan vaikutus	52
5.4.5.	Mikro-organismien vaikutus.....	53
5.4.6.	Metallin luonne	53
5.4.7.	Yhdistelmäinhibiitit	53
5.4.8.	Inhibiittien luokittelu	53
5.4.9.	Kaasufaasi-inhibiittorit	54
5.5.	Silikageeli.....	57
5.6.	Muut suojauskeinot korroosion välttämiseksi.....	58
6.	KOKEELLINEN OSUUS.....	59
6.1.	Koemateriaalit ja laitteet	59
6.2.	Kokeiden suoritus	61
6.2.1.	Koe 1: kosteustesti	61
6.2.2.	Koe 2: korroosiotesti 1.....	62
6.2.3.	Koe 3: korroosiotesti 2.....	64
6.3.	Tulokset ja tulosten tarkastelu.....	65
6.3.1.	Kosteustestin tulokset	65
6.3.2.	Korroosiotestin 1 tulokset.....	69
6.3.3.	Korroosiotestin 2 tulokset.....	70
7.	JOHTOPÄÄTÖKSET	74
	Lähteet.....	77
	Liite 1: Tahiti-öljyntuotantolautan lämpötila- ja kosteusantureiden mittaustulokset	
	Liite 2: Öljyntuotannossa käytettävien laitteiden koteloinnin IP-luokitus	

Liite 3: Inhibiittien tehokkuus neutraalilla pH-alueella

Liite 4.1: Cortec Corporationin korroosionestoon käytettäviä tuotteita

Liite 4.2: Cortec Corporationin korroosionestoon käytettäviä tuotteita

Liite 5: Rittal-kytkentäkaappien tekniset tiedot

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

ϵ_r	Dielektrisyysvakio
E^0	Elektrodin standardiyksittäispotentiaali eli varauksen mitattu potentiaali standardivetyelektrodiin nähden
Ag^+	Hopeaioni
Al^{3+}	Kolmen arvoinen alumiini-ioni
Au^{3+}	Kolmen arvoinen kultaioni
Br^-	Bromi-ioni
Cl^-	Kloori-ioni
CO_2	Hiilidioksidi
CO_3^{2-}	Kahden arvoinen hiilitrioksidi-ioni
Cu^{2+}	Kahden arvoinen kupari-ioni
Fe^{2+}	Kahden arvoinen rautaioni
Fe_2O_3	Rauta(III)hydroksidi
$Fe(OH)_2$	Rauta(II)hydroksidi
H^+	Vetyioni
H_2O	Vesi
H_2S	Rikkivety
M	Metalliatomi
MCl	Metallikloridi
Mg^{2+}	Kahden arvoinen magnesiumioni
Mn^+	Metalli-ioni
$NaCl$	Natriumkloridi
$NaNO_2$	Natriumnitriitti
Ni^{2+}	Kahden arvoinen nikkeli-ioni
NH_4^+	Ammoniumioni
NO_2^-	Typpioksidi-ioni
O_2	Happimolekyyl
Pb^{2+}	Kahden arvoinen lyijyioni
$R-COO^-$	Karboksyyli-ioni
SiO_2	Piisilikaatti
Sn^{2+}	Kahden arvoinen tinaioni
SO_2	Rikkidioksidi
Zn^{2+}	Kahden arvoinen sinkki-ioni
BTA	Bentsotriatsoli
EMC	Sähkömagneettinen yhteensopivuus
IEC	International Electrotechnical Commission
IP	IP-code, Ingress Protection

ISO 9223	Standardi metallien ohjeellisista yleisen korroosion nopeuksista
F	Faradayn vakio (96500 C/mol)
MCC	Motor Control Center
NEMA	National Electrical Manufactures Association
PC	Personal Computer
pH	Logaritminen happamuusasteikko (0-14)
PLC	Programmable Logic Controller
R	Kaasuvakio ($8,3145 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$)
SFS 4596	Standardi korroosioympäristön räsitusluokista
S.H.E.	Saturated Hydrogen Electrode, normaalivetyelektrodi
UPS	Uninterruptible Power Supply
VCI	Volatile corrosion inhibitor
VPCI, VPI	Vapour-phase corrosion inhibitor
WLAN	Wireless Local Area Network

1. JOHDANTO

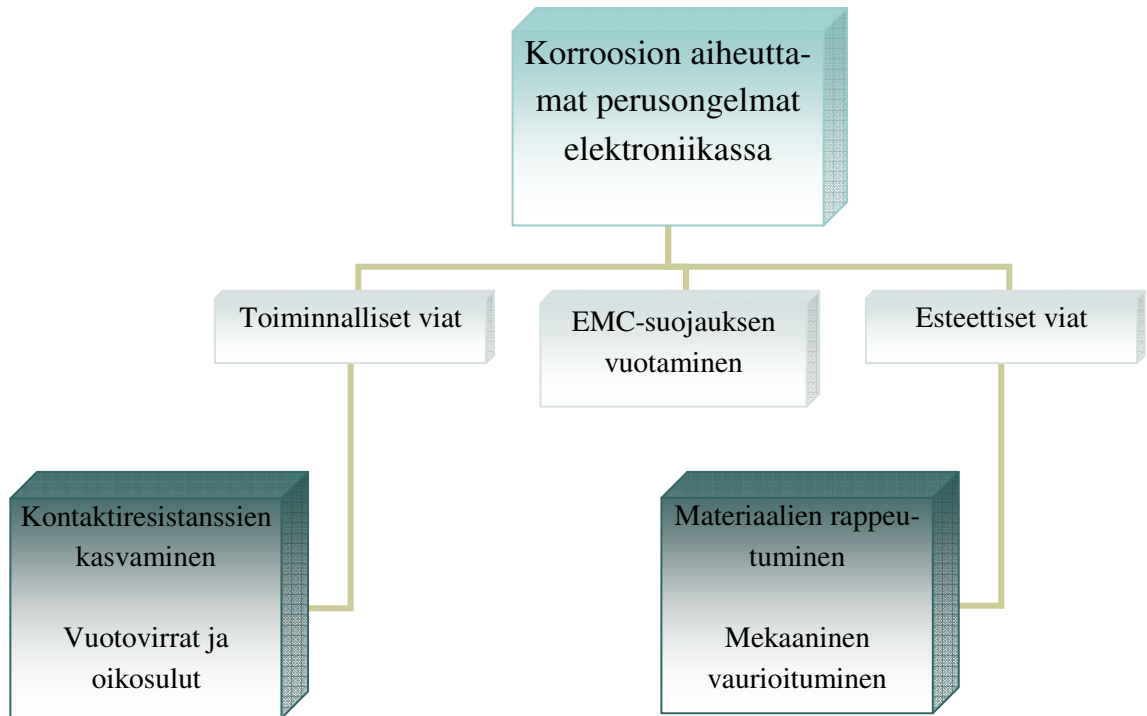
Lyhyesti sanottuna korroosiolla tarkoitetaan metallien syöpymistä hapettumisen seurauksena. Eri metalleilla ja metalliseoksilla on erilainen kestävyys korroosiota vastaan. Jalometalleja, joiden korroosionsietokyky on tyypillisesti epäjalompia metalleja parempi, käytetään elektroniikassa sähköjohtimina niiden erinomaisen sähköjohtokyvyn vuoksi. Toisaalta elektroniikassa käytetyt muut valmistusmateriaalit saattavat olla hyvinkin paljon herkempiä korroosiolle, mikä lisää korroosiosuojauksen haastetta.

Porin Mäntyluodossa rakennetaan öljyntuotantolautojen spar-tyyppisiä runkoja. Öljyntuotantolautan rungossa on paljon sähkötekniisiä toimilaitteita. Öljyntuotantolautan rungot sekä niihin asennetut sähkölaitteet joutuvat käymään läpi hyvin rajuja ympäristöolosuhteita elinkaarensa aikana. Öljyntuotantolautan valmistuksen aikana kaikki sähkölaitteet joutuvat tekemisiin Suomen vaihtelevan ilmaston kanssa, koska lauttaa rakennetaan ulkotilassa. Lämpötilan vaihtelut ja telakan merellinen ympäristö aiheuttavat suojaustarpeen kaikille kosteutta kestävämmille sähkölaitteille.

Öljyntuotantolautan runkoon asennetut elektroniikkaa sisältävät laitteet ovat sijoitettuna joko erilliseen kansimökkiin tai ne ovat vapaasti ulkotiloissa kytkentäkoteloiden ja -kaapeissa. Turvallisuus- ja käyttöominaisuuksien vuoksi kytkentäkoteloihin ja kytkentäkaappeihin vaaditaan IP-suojaluokitus. Ilmastointilaitte poistaa sisätiloista kosteutta silloin kun sähköt ovat päällä. Sähköt eivät ole päällä kuitenkaan kaikissa lautan elinkaaren vaiheissa, kuten kuljetusvaiheessa Suomesta Meksikonlahdelle, lautan käyttöönoton aikana ja vikatilanteissa.

Sähkötekniisissä laitteissa käytetään yhä enemmän integroitua elektroniikkaa. Elektroniikkaa käytetään sellaisenaan ulko-olosuhteissa, joissa korrosiivisuus on suuri. Lisäksi elektroniikan pakkaustiheys on kasvanut muun muassa tietotekniikassa ja automaatiassa. Korkea pakkaustiheys tekee elektroniikan entistä herkemäksi ympäristön korrodoiville vaikutuksille.

Elektroniikassa korrosio kasvattaa liitosten kontaktipintojen resistansseja ja johdinten välisiä vuotovirtoja sekä rappeuttavat materiaaleja. Muutokset näkyvät erilaisina toiminnallisina vikoina, sähkömagneettisen häiriintymisen lisääntymisenä ja ulkonäöltään rumina pintoina. Elektroniikassa hyvinkin vähäinen korrosio ja pintojen kontaminaatio aiheuttaa häiriöitä laitteen toimivuudelle. Laitteen normaali toiminta voi häiriintyä jo nanometrinen kokoisesta korroosioalueesta. Kuvassa 1.1. voidaan nähdä korroosion aiheuttamia perusongelmia.

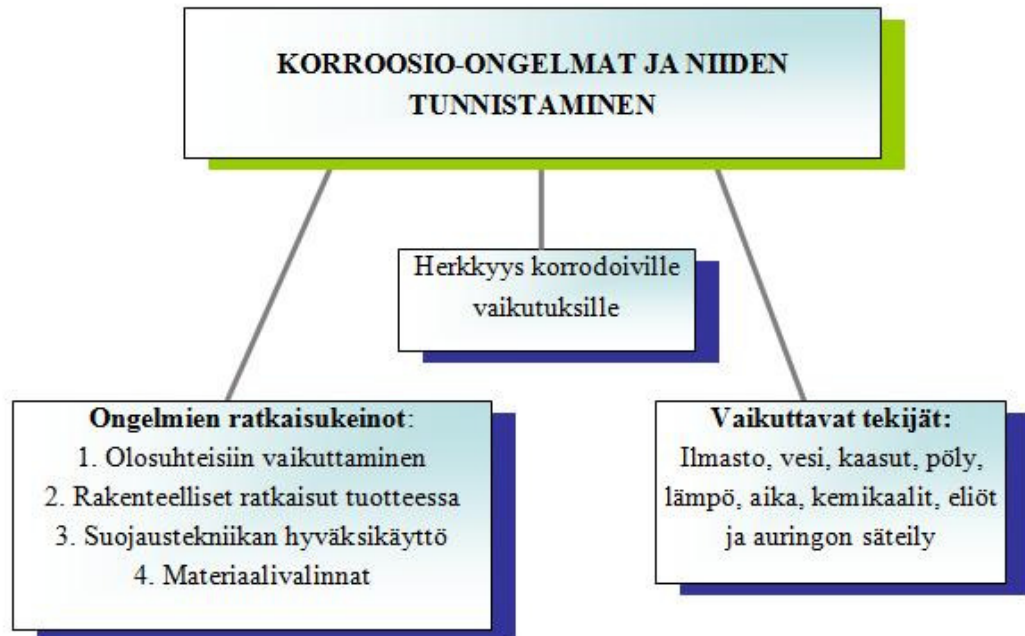


Kuva 1.1. Korroosion aiheuttamat perusongelmat elektroniikassa. [4]

Elektroniikassa valmistusmateriaali voi olla metallia, mineraalia tai orgaanista yhdistettä, kuten muovia. Kaikki mainitut materiaalit voivat tuhoutua korroosioreaktioiden vaikutuksesta. Korroosioreaktiot käynnistyvät jo melko matalissa lämpötiloissa. Pakkassessa korroosio on hidasta tai sitä ei juuri tapahdu. Ilmanlämpötila $+0^{\circ}\dots+40^{\circ}\text{C}$ on jo hyvin tavallisten korroosiohaittojen ilmenemisaika. Offshore-olosuhteet ovat hyvin korrooivaisia Meksikonlahdella, jossa ilmasto on läpi vuoden lämmin ja meren suolaisuus on korkea. Tuotantolaitosten ulkotiloissa olevat sähkölaitteet altistuvat voimakkaalle säätilan vaihteluille. Elektroniikan makrotason ilmasto-olosuhteisiin ei pystytä vaikuttamaan, mutta mikrotason kylläkin. Korroosiota voidaan vähentää rakenteellisin ratkaisuin, onnistuneella suojauksella ja materiaalien valinnoilla.

Ilmastolliset vaikutukset aiheuttavat veden ja epäpuhtauksien kertymistä elektroniikan pinnoille. Lisäksi lämpö ja auringonvalo edistävät korroosioreaktioita, materiaalien rappeutumista ja sitä kautta haittavaikutusten ilmenemistä. Vesi, kaasut, pöly ja orgaaniset yhdisteet aiheuttavat elektroniikkaan vuotovirtoja, oikosulkuja ja mekaanisia muutoksia. Vuotovirrat aiheuttavat muun muassa ylikuumenemista ja mikropiirien toimintahäiriöitä. Korroosiovaikutukset voivat olla hyvin radikaaleja ja nopeita ja siksi mahdollisiin vaikutuksiin pitää suhtautua vakavasti jo sähkösuunnittelun aikana. Laittevalinnoissa tulee huomioida laitteen mekaaninen konstruktiio niin, ettei se edistä korroosiota. Tyypillinen tilanne on veden kertyminen laitteen liitospinnoille tai sisäosiin. Laitteet eivät saisi altistua mekaanisten resonanssien aiheuttamille hiertymiselle tai liian runsaan puhdistamattoman jäähdytysilman puhaltamiselle. Lisäksi jokainen elektroniikan kuljetusvaihe lisää tuotteiden käsittelyä. Kuljetukset altistavat hallitsemattomille mekaanisille ja ilmastollisille rasituksille ja ennen pitkää pysyville vaurioille. Koko

elektroniikan logistiikkaketjun kattaen asennus- ja käyttöhenkilöstön on osallistuttava korroosiohallintaan tekemällä tarvittavat toimenpiteet korroosion estämiseksi. Kuvassa 1.2. on esitetty korroosio-ongelmien ja niiden tunnistamisen perusasia.



Kuva 1.2. Korroosio-ongelmat ja niiden tunnistaminen. [4]

2. KORROOSIO

2.1. Yleistä metalleista

Suurin osa metalleista on maaperässämme kemiallisina yhdisteinä, malmeina. Vain harvat metallit esiintyvät täysin puhtaina luonnossa. Puhdasta metallia saadaan pelkistämällä raakamalmia. Pelkistämiseen tarvitaan paljon energiaa. Pelkistämällä saadaan metallin sisäinen energia suuremmaksi. Luonto kuitenkin pyrkii pääsemään eroon ylimääräisestä energiasta. Metallien korroosio johtuu periaatteessa siitä, että puhdas metalli on termodynaamisesti kestävä, ja se pyrkii pääsemään ylimääräisestä energiasta eroon. [1]

Metalliatomit ovat metallisessa tilassaan kolmiulotteisena hilarakenteena. Metallin pinnassa olevien atomien energiatila on suurempi kuin sisällä olevien. Metallin sisällä olevat atomit ovat kauttaaltaan sitoutuneet naapuriatomeihin ja sidosvoimat ovat tasapainossa. Näin ei ole pinta-atomien osalta, koska sidoselektronit ovat epätasapainossa. Pinta-atomien energiatila on suuri ja ne ovat hyvin reaktioalttiita. Metallia hapettuu siksi helposti. [1]

Metalliesineistä rauta ei ole koskaan täysin tasalaatuista. Metallissa on myös jännityksessä olevia kohtia, epäpuhtauksia ja kidevirheitä, jotka saattavat vetää elektroneja pois raudan muilta alueilta. Elektroneja luovuttaneet kohdat ovat anodisia ja ne syöpyvät. Epätasalaatuisuuden vuoksi pinnan alueet voivat joko hapettua ja syöpyä tai pelkistyä. Rautaesineen pinnassa on paljon hyvin pieniä sähköpareja ja niitä kutsutaan paikallispareiksi. Parin hapettuvissa kohdissa eli anodialueilla vapautuneet elektronit siirtyvät rautametallin läpi pelkistymiskohtiin eli katodialueille. Kosteus toimii elektrolyytinä, jossa ionit kuljettavat sähkövarauksia raudan pinnalla. [1]

2.2. Metallien sähkökemiallinen sarja

Metallien jalousjärjestys eli sähkökemiallinen jännitesarja on puhtaiden metallien jännitteitä suhteessa standardivetyelektrodiin. Alkuaine on sitä jalompi, mitä muuttumattomampi se on kemiallisesti. Korroosion kannalta sähkökemiallinen jännitesarja ei ole niin merkittävä, koska se ei vastaa todellisia luonnon olosuhteita. [1]

Metallien sähkökemiallinen jännitesarja on esitetty kuvassa 2.1., jossa metallit on esitetty hapettumiskykynsä mukaisessa järjestyksessä. Jaloimmat metallit ovat vedyn (H) oikealla puolella.

Li, K, Ca, Na, Mg, Al, Mn, Zn, Cr, Fe, Co, Ni, Sn, Pb, **H**, Sb, Cu, Hg, Ag, Au

Kuva 2.1. Metallien sähkökemiallinen jännitesarja vety-atomiin H nähden. [2]

2.3. Galvaaninen jännitesarja

Todellisissa luonnonolosuhteissa olleiden metallien jännitesarjaa nimitetään galvaaniseksi jännitesarjaksi. Tässä jännitesarjassa metallit ovat olleet kosketuksissa ilman kansa ja todellisissa liuoksissa. Käytetyin galvaaninen jännitesarja on niin sanottu merivesisarja. Sähkökemialliseen potentiaaliin vaikuttavat metallien muokkaus, seossuhteiden erot ja erilaiset pintakäsittelyt. Metallit ovat epähomogeenisia, koska saman metallin pinnan eri kohdilla voi olla erilaiset potentiaalit. Nämä kaikki yhdessä lisäävät metallin korroosioherkkyyttä. [1]

Taulukossa 2.1. on esitetty muutamia elektroniikassa käytettävien metallien jännitesarja merivedessä. Mitä positiivisempi on metallin standardipotentiaali, sitä jalompi se on. Taulukosta voidaan havaita, että joidenkin metallien jalousjärjestys vaihtuu merivedessä normaaliin sähkökemialliseen jännitesarjaan nähden (vrt. kuva 2.1.).

Taulukko 2.1. Metallien galvaaninen jännitesarja merivedessä. [3; 4]

Metallien galvaaninen jännitesarja merivedessä, 25°C, pH 7,5			
Metalli	Elektrodireaktio	E ⁰ (mV)	Jalousaste
Kulta	$\text{Au}^{3+} + 3\text{e}^- = \text{Au}$	+420	<i>Jaloin</i>
Hopea	$\text{Ag}^+ + \text{e}^- = \text{Ag}$	+190	
Nikkeli 99 %	$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Ni}$	+46	
Kupari	$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Cu}$	+20	
Tina 98 %	$\text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Sn}$	-260	
Lyijy	$\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Pb}$	-310	
Alumiini 99,5 % Al	$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- = \text{Al}$	-510	
Sinkki 98,5 % Zn	$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Zn}$	-860	
Magnesium	$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Mg}$	-1 360	<i>Epäjaloin</i>

E⁰ on elektrodin standardiyksittäispotentiaali millivoltteina (mV) mitattuna.

2.4. Metallien korroosio

Korroosio on aineen vahingoittumista joko kemiallisen tai sähkökemiallisen muutoksen seurauksena. Yleisesti korroosio on ympäristöolosuhteiden aiheuttamaa metalliesineiden syöpymistä. Valtaosa luonnossa esiintyvistä metalleista ovat yhdisteitä, kuten oksidit, sulfidit ja silikaatit. Metallien erottaminen näistä yhdisteistä on endoterminen prosessi. Korroosiotuotteet ovat termodynaamisesti normaaliolosuhteissa vapaata metallia pysyvämpiä. Raudan hapettuminen spontaanisesti voidaan esittää kaavan 1 mukaisesti.



Jalometallit, joiden elektrodipotentiaali on positiivinen vetyelektrodin suhteen, eivät hahpetu helposti, ja siksi ne esiintyvätkin luonnossa vapaina metalleina. [6]

2.5. Kemiallinen korroosio

Aineiden kemiallista korroosiota aiheuttavat pääosin ilmassa olevat kaasut. Ilmassa oleva happi reagoi monien metallien kanssa muodostaen niiden pintaan oksidikerroksen. Tiivis oksidikerros suojaa metallia korroosiolta, mutta huokoinen kerros ei ja syöpyminen jatkuu. Tiiviiden oksidikerrosten ansiosta alumiini ja sinkki ovat hyvin kestäviä metalleja normaaliolosuhteissa, vaikka ovat elektronegatiivisuutensa perusteella hyvinkin reaktiivisia. Ilman korkeat CO₂- ja SO₂-pitoisuudet kiihdyttävät metalleiden korroosiota. [1]

2.6. Sähkökemiallinen korroosio

Sähkökemiallinen korroosio tapahtuu silloin, kun kaksi elektrodipotentiaaliltaan erisuurta metallifaasia ovat kosketuksissa keskenään kosteuden aiheuttamana. Metallifaasit muodostavat silloin keskenään sähkökemiallisen parin. Faasi, jonka elektrodipotentiaali on suurempi, toimii katodina ja toinen faasi anodina.

Anodilla metalli pyrkii liukenemaan kationina elektrolyyttiliuokseen seuraavan kaavan 2 mukaisesti:



Liukeneminen on spontaania vain, jos jokin aine vastaanottaa vapautuvat elektronit. Vastaanottajana on yleensä jalompi metalli, joka toimii katodina olevana faasina. Metallien normaalipotentiaalit eivät yksin kuvaa niiden korroosioherkkyyttä. Korroosiotapahduma on hyvin riippuvainen siitä, minkälaisessa ympäristössä metalliesineet ovat. [6]

2.6.1. Nernstin yhtälö

Normaalipotentialit eri elektrodireaktioille voidaan laskea olettamalla kaikkien reaktioon osallistuvien komponenttien olevan standarditilassa ($a_i = 1$ ja 25°C). Elektrodin standardipotentialin avulla voidaan laskea elektrodipotentiali myös muissa kuin standardiolosuhteissa. Elektrodipotentiali riippuu Nernstin yhtälön mukaisesti metallin ja liuoksessa esiintyvien ionien välisestä tasapainosta seuraavan kaavan 3 mukaisesti:

$$E = E^0 + \frac{RT}{zF} \ln \left(\frac{a_{\text{oxid}}}{a_{\text{red}}} \right), \quad (3)$$

missä E^0 = elektrodin (eli puolikennon) standardipotentiali

a_{oxid} = hapettuneen muodon aktiivisuus

a_{red} = pelkistyneen muodon aktiivisuus

R = kaasuvakio

T = lämpötila Kelvineinä

F = Faradayn vakio (96500 C/mol). [7]

Mikäli pelkistynyt muoto on neutraali metalliatomi M^0 , sen aktiivisuus $a_{M^0} = 1$. Tällöin Nernstin yhtälö supistuu kaavan 4 muotoon:

$$E = E^0 + \frac{RT}{zF} \ln a_{M^{z+}} \quad (4)$$

[7]

2.6.2. Pourbaix-diagrammi

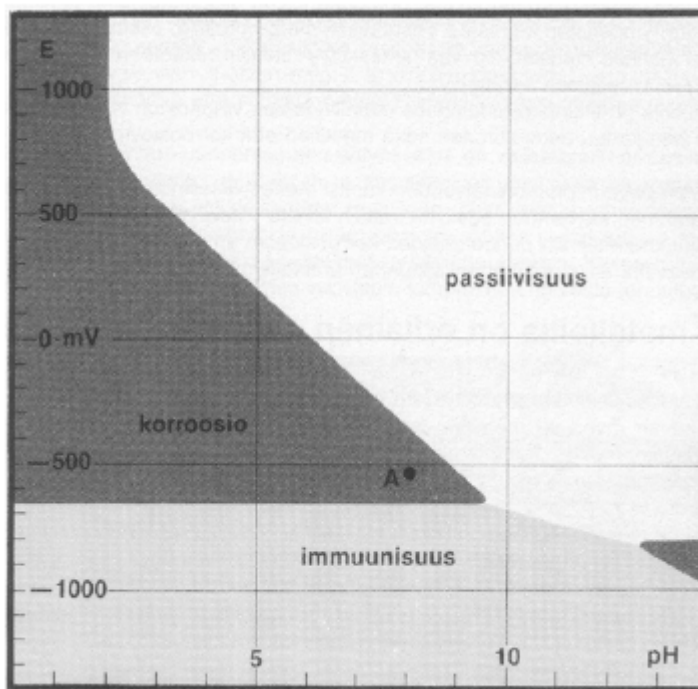
Pourbaix-diagrammit ovat stabiilisuusdiagrammeja, jotka tarkastelevat metallien eri osalajien stabiilisuuksia pH:n ja potentialin funktiona. Diagrammissa nollapotentialiksi on valittu vetyelektrodin 0 V potentiali. Diagrammin nimitys tulee esittäjänsä Marcel Pourbaix:n mukaan. Hän erotteli syövyttävät olosuhteet ei-syövyttävistä niin katsotun kynnyspotentialin avulla. Marcel Pourbaix määritteli metallin syöpymiselle seuraavan kynnysarvon:

Metalli on syövyttävissä olosuhteissa, kun sen ionien konsentraatio liuoksessa on $\geq 10^{-6}$. Jos taas konsentraatio on tätä kynnysarvoa pienempi, metallin katsotaan olevan immuunissa tilassa. [7]

Yksinkertaisesti Pourbaix-diagrammi tarkoittaa pH-potentialidiagrammia, joka on metallin sähkökemiallinen tasapainopiirros. Siitä voidaan erottaa kolme erilaista reaktioaluetta.

1. Varsinainen korroosioalue, jossa syöpyminen tapahtuu nopeasti
 2. Passiivisuusalue, jossa korroosio estyy jonkun ajan kulutta pintaan muodostuvan kalvon johdosta.
 3. Immuunisuusalue, jossa korroosio on kokonaan estynyt termodynaamisista syistä.
- [6].

Kuvassa 2.2. on esitetty raudan yksinkertaistettu Pourbaix-diagrammi. Piste A vastaa tilannetta normaalissa käyttövedessä. Korroosioalueella rauta syöpyy ja passiivisuus alueella se pyrkii suojautumaan hapettumiskerroksella. Immuunisuusalueella rauta on metallisessa muodossaan pysyvä eikä silloin ruostu. [4]



Kuva 2.2. Raudan yksinkertaistettu Pourbaix-diagrammi. [7]

2.7. Anodi- ja katodireaktiot

Neste-metallirajapintojen reaktiotyypit riippuvat vesiliuoksen happamuudesta. Metallin kannalta reaktio voi olla: korroosiota edistävä, syöpyvä, syöpymistuotteita muodostava, suojaava eli niin sanottu passiivitila tai inertti eli immuunitila. Liuoksen happamuus ja emäksisyys esitetään vety-ionikonsentraation ja pH-luvun avulla. Liuoksen pH on vetyionikonsentraation C_H^+ logaritmin vastaluku kaavan 5 mukaisesti:

$$pH = -\log C_H^+ \quad (5)$$

[1]

Liuos on hapan, kun pH on alle 7. Sadevesi on normaalisti hiukan hapanta siihen liuenneen hiilidioksidin vuoksi. Raudan anodireaktio tapahtuu seuraavan kaavan 6 mukaisesti:



[1]

Hapettumisen seurauksena rauta liukenee Fe^{2+} -ioneina, ja siitä vapautuneet elektronit kulkevat rautametallin läpi katodina toimivaan pisteeseen. Katodireaktio on vetyionien $H^{+}(aq)$ tai hapen $O_2(g)$ pelkistymistä riippuen siitä, minkälaiset sähköiset potentiaaliolosuhteet tilanteessa ovat. Katodireaktio voi tapahtua kolmella eri tavalla:

1. Katodireaktio (vetyionien pelkistyminen vetykaasuksi) selvästi happamassa liuoksessa tapahtuu seuraavan kaavan 7 mukaisesti:



2. Katodireaktio (hapen pelkistyminen) lievästi happamassa liuoksessa tapahtuu seuraavan kaavan 8 mukaisesti:



3. Katodireaktio (hapen pelkistyminen) neutraalissa tai lievästi emäksisessä liuoksessa tapahtuu seuraavan kaavan 9 mukaisesti:



Katodireaktion tapahtuminen tapauksien 2. ja 3. mukaisesti vaatii aina hapen läsnäolon. Elektrolyytin pH:n kasvaessa eli muuttuessa emäksiseksi, muuttuu O_2 :n pelkistyminen epäedullisemmaksi. Liuoksen pH:n ollessa noin 9 tai yli rauta ei enää ruostu. Rauta ei myöskään ruostu puhtaassa hapettomassa vedessä. Puhdas vesi on liian heikosti hapettava. [1]

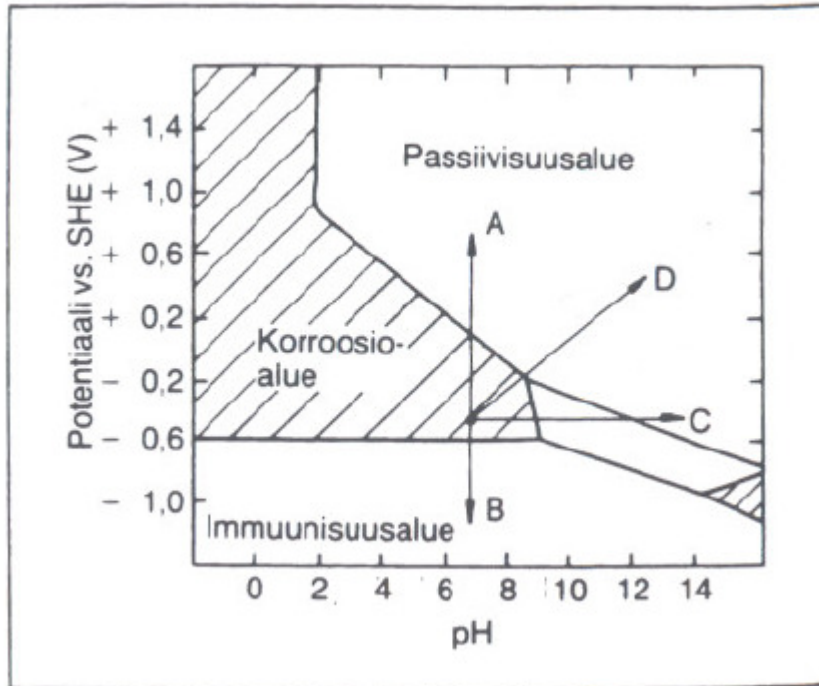
Anodi- ja katodikohtien syntyyn vaikuttavat metallin ja elektrolyytin ominaisuudet. Metallin tyypillisiä reaktioon vaikuttavia ominaisuuksia ovat: epähomogeenisuus, raerajojen erityisominaisuudet, sisäisen rakenteen virheet, paikallisesti vaihteleva lämpö- tai muu vastaava käsittely, oksidi- tai muun pintakalvon viallisuudet, pinnan epätasaisuus, kappaleen muoto sekä paikallisesti vaihtelevat mekaaniset rasitukset. Elektrolyytissä puolestaan vaikuttavat liuenneiden aineiden väkevyys ja sen vaihtelu. Lisäksi reaktioihin vaikuttavat kappaleessa olevat raot, kolot ja kuopat. Vaikuttavia ympäristötekijöitä ovat muun muassa virtausolosuhteet, kuumennus, valaistus ja haihtuminen. [8]

2.8. Polarisaatio ja metallin passivoituminen

Korroosio on luonnonilmiö ja luonnonilmiöille ovat tyypillisiä vastakkaisuuntaiset tai muutosta hillitsevät reaktiot. Polarisaatioilmiöt hillitsevät korroosioreaktioita ja ovat siten välttämätön edellytys metallien tekniselle käytölle. Polarisaatioilmiöt perustuvat metalliatomin vaikeuteen siirtyä ionimuotoon tai hitaasta diffuusiosta aiheutuvaan ioniruuhkaan joko anodin tai katodin välittömässä läheisyydessä. Polarisaatiossa metallin pintaan muodostuu kerrostumia, jolloin elektrolyytin vastus rajoittaa myös korroosiovirran kulkua. [3]

Metallin normaalipotentialia voidaan muuttaa. Kun potentiaalia nostetaan yli metallin ja sen jonkin hydroksidin tai oksidin välisen tasapainopotentialin, alkaa metallin pinnalle syntyä passivoivaa yhdistettä. Suotuisissa olosuhteissa ja potentiaalia edelleen kasvattamalla yhdiste muodostaa metallin pintaan tiiviin ja jatkuvasti uudistuvan ohuen kerroksen, niin sanotun passiivikerroksen. Passiivikerros estää käytännössä kokonaan metalliatomien liukenemisen ja korroosiovirta pienenee useita dekadeja. Metallien ja metalliseosten korroosiokestävyys perustuu pääasiassa passivoitumisilmiön muodostumiselle. Tärkeitä voimakkaasti passivoituvia metalleja ovat ruostumattomat teräkset, titaani, kupari ja sen seokset sekä alumiini. [3]

Kuvassa 2.3. on esitetty raudan suojaamismahdollisuudet eri potentiaaleissa ja pH-alueilla. Kun rauta syöpyy neutraalissa vesiliuoksessa, sen potentiaali eli nollapiste asettuu potentiaali-pH -piirroksessa korroosioalueelle. Kun potentiaali muutetaan positiiviseen suuntaan (A), muodostuu liukenemisreaktiota hidastava passivaatiokerros raudan pintaan. Potentiaalia voidaan kohottaa seostamalla rautaa passivoitumista edistävillä seosaineilla kuten kromilla tai nikkelillä. Sähköisesti nostettua potentiaalia kutsutaan anodiseksi suojaukseksi. Muuttaessa potentiaalia negatiiviseen suuntaan (B) rauta tulee immuuniksi ja korroosio estyy. Potentiaalinen alentaminen voidaan tehdä ulkoisen virtalähteen avulla, jolloin rauta kytketään sähköiseen kosketukseen epäjalomman metallin kanssa. Tätä kutsutaan katodiseksi suojaukseksi, ja yleisin siinä käytetty epäjalometalli on sinkki. Huolimatta sinkkipinnoitteen rikkoutumisesta raudan pinnalla pysyy rauta katodisesti suojattuna. Potentiaalimuutoksen lisäksi rautaa voidaan korroosiolta suojata kasvattamalla vesiliuoksen pH-arvoa, suunnat (C) ja (D). Tällöin raudan pintaa muodostuu myös suojaava passivaatiokerros. [3]



Kuva 2.3. Potentiaali-pH -piirros, jossa raudan korroosiosuojausta muutetaan pinnan potentiaalia tai liuoksen ominaisuuksia muuttamalla. [3]

2.9. Metallien diffuusio ja korroosion ilmenemismuodot

Metalliset materiaalit kuin myös metalliseokset muodostuvat hiloista, yleisemmin puhutaan rakeista. Rakeiden rajapinnoilla atomit kykenevät vaeltamaan matalissakin lämpötiloissa. Rajalämpötila on noin 400 °C, jonka yläpuolelle mentäessä vaeltaminen on lähinnä vain rakeiden sisäpuolella. Tätä sanotaan diffuusioilmioiksi. Diffuusiossa eri metallit sekoittuvat toisiinsa asteittain, esimerkiksi tinan ja kuparin sekoittuminen, joka tapahtuu jo alle 100 °C:n lämpötiloissa. Diffuusio muuttaa metallien alkuperäistä koostumusta muodostaen erilaisia faaseja. Faasit voivat olla hauraita tai muuten mekaanisesti heikkoja korroosiolle. [4]

Korroosiosta käytetty terminologia ja esiintymismuotojen ryhmittely vaihtelevat usein eri lähdeteoksissa. Tässä diplomityössä keskitytään erityisesti offshore-olosuhteissa ilmeneviin elektronisten laitteiden kannalta merkittävimpiin korroosion ilmenemismuotoihin. Yleinen korrosio on tavallisin korroosiota aiheuttava ja siinä materiaali korrodoituu koko pinnaltaan tasaisesti. [4]

Ilmassa metallin ja hapen välillä tapahtuu hapettumisreaktio. Hapettuessaan metallien pinnoille syntyy oksidikerros. Oksidikerroksen ominaisuudet vaihtelevat metallista riippuen. Oksidikerrokset voidaan jakaa seuraavasti:



- Huokoinen, esimerkiksi tantaalin oksidikerros.
- Puolitiivis, esimerkiksi kuparin, raudan ja tinan oksidikerrokset.
- Tiivis, esimerkiksi alumiinin oksidikerros. [4]

Huokoisilla kerroksilla hapettuminen jatkuu niin kauan kunnes metalli on kokonaan muuttunut oksidiksi. Puolitiiviillä kerroksella hapettuminen hidastuu vähitellen. Tiiviillä kerroksilla hapettuminen pysähtyy saavutettuaan tietyn kerrospaksuuden. [4]

2.9.1. Galvaaninen korroosio eli kontaktikorroosio

Kontaktikorroosio syntyy kahden erilaisen metallin liitoskohtaan. Liitoskohdassa metallit ovat sähköisessä kontaktissa toisiinsa kosteuden toimiessa elektrolyyttinä. Alhaisemman elektropotentiaalin omaava metalli on epäjalompi. Epäjalompi metalli muodostuu anodiksi ja syöpyy. Jalompi metalli ei syövy. Taulukossa 2.3. on esitetty metallien jännitesarja merivedessä. Taulukossa on väliviivoin merkitty materiaalityypit, joiden sisällä olevien metallien kesken ei tapahdu galvaanista korroosiota. Mitä kauempana kontaktissa olevat metallit ovat tässä esitettyssä sarjassa, sitä todennäköisempää on galvaanisen parin muodostuminen. Kontaktikorroosiota voi muodostua myös silloin, kun metalli on kosketuksissa jalomman ei-metallisen sähköä johtavan materiaalin kanssa. Näin voi käydä silloin, kun ruostumaton teräs, teräs tai kupari on kosketuksissa grafiitin kanssa. [3]

Taulukko 2.2. Metallien jännitesarja merivedessä. [3]

Platina	 Potentiaali kasvaa, Jalous lisääntyy
Kulta	
Grafiitti	
Hopea	
Hastelloy C passivoituneena	
Ruostumaton 18Cr-10Ni-3Mo-teräs passivoituneena	
Ruostumaton 18Cr-8Ni-teräs passivoituneena	
Titaani	
Ruostumaton 18Cr-teräs passivoituneena	
Ruostumaton 13Cr-teräs passivoituneena	
Inconel passivoituneena	
Nikkeli passivoituneena	
Hopeajuote	
Monel-metalli	
Kupronikkeli (70 Cu, 30 Ni)	
Kupronikkeli (90 Cu, 10 Ni)	
Alumiinipronssi (95 Cu, 5 Al)	
Kupari	
Messinki (85 Cu, 15 Zn)	
Alumiiniseosteinen messinki (76 Cu, 22 Zn, 2 Al)	
Admiraliteettimessinki (71 Cu, 28 Zn, 1 Sn)	
Messinki (65 Cu, 35 Zn)	
Hastelloy C aktiivisena	 Potentiaali laskee, Epäjalous lisääntyy
Inconel aktiivisena	
Nikkeli aktiivisena	
Tina	
Lyijy	
Lyijy-tina juote	
Ruostumaton 18Cr-10Ni-3Mo-teräs aktiivisena	
Ruostumaton 18Cr-8Ni-teräs aktiivisena	
Ni-Resist valurauta (14-30 Ni, 4-7 Cu+Cr+Mo)	
Ruostumaton 18Cr-teräs aktiivisena	
Ruostumaton 13Cr-teräs aktiivisena	
Niukkaseosteinen rakenneteräs	
Niukkaseosteinen hiiliteräs	
Duralumiini	
Kadmiumi	
Alumiini	
Sinkki	
Magnesium ja magnesiumseokset	

Korroosionopeuteen vaikuttavia tekijöitä galvaanisessa korroosiossa:

- a) Metallien elektrodipotentiaalit. Toisen metallin syöpyminen on sitä todennäköisempää, mitä suurempi on metallien keskinäinen elektropotentiaaliero. Sinällään potentiaaliero ei vaikuta korroosionopeuteen, vaan siihen vaikuttavat enemmänkin katodisen reaktion kinetiikka jalomman metallin pinnalla sekä anodisen reaktion kinetiikka epäjalomman metallin pinnalla. Lisäksi happamissa liuoksissa katodisen vedynkehitysreaktion nopeudet vaihtelevat suuresti eri metallien pinnalla.
- b) Metallien pinta-alojen suhde. Korroosionopeus kasvaa, kun anodi on pinta-alaltaan pienempi kuin katodi. Virrantiheys on silloin anodilla suuri, jolloin se johtaa metallin erittäin nopeaan korroosioon. Esimerkkinä niittiliitokset, joissa niitti on epäjalompi kuin liitettävät materiaalit.
- c) Elektrolyytin luonne ja johtavuus. Merivedessä elektrolyytin johtavuus on suuri ja siksi epäjalompi metalli syöpyy tasaisesti koko pinta-alaltaan. Elektrolyytin johtavuuden ollessa alhainen korroosio keskittyy metallin rajapinnan lähistölle. [3]

2.9.2. Huokoskorroosio

Jalometallipinnoitteissa huokoskorroosio on tyypillinen reikien, huokoisten ja virheiden kohdalle syntyvä korroosio. Se on periaatteessa metalliparikorroosiota, jossa epäjalompi metalli korrodoituu. Korroosiotuotteet kulkeutuvat kohti jalompaa pintakerrosta. Huokoskorroosiota esiintyy muun muassa kullalla, hopealla ja palladiumilla. Huokoskorroosion riski kasvaa alle 1 µm pinnoitevahvuuksilla. [4]

2.9.3. Raerajakorroosio

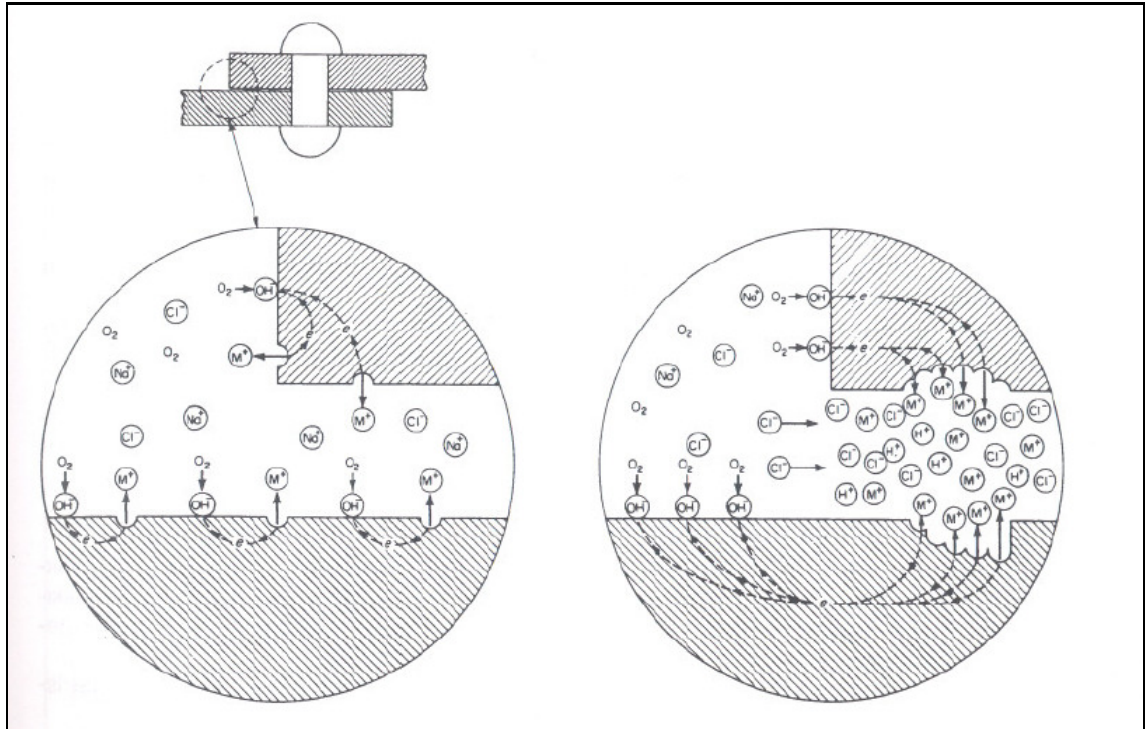
Sähkökemiallista korroosiota ilmenee teräksillä. Teräksen rakenne ei ole homogeeninen. Teräs sisältää faaseja, joiden välillä on jalouseroja. Jalouserot johtavat raerajakorroosioon. Lisäksi metalliseosten jähmettymisen tai korkeiden lämpötilojen yhteydessä raerajoille voi muodostua korroosionkestävyyttä heikentäviä yhdisteitä. Syövyttävissä olosuhteissa metalliseos syöpyy voimakkaasti raerajoja pitkin. Raerajakorroosiota aiheuttavat raerajoilla olevat epäpuhtaudet sekä tietyn seosaineen rikastuminen tai köyhtyminen matriisista raerajojen läheisyydessä raerajaerkaumien vuoksi. [3; 6]

2.9.4. Vesirajakorroosio

Veteen liuennut happi aiheuttaa korroosiota. Hapen konsentraatioerot metallipinnan eri kohdissa aiheuttavat potentiaalieron. Se osa metallinpintaa, jossa hapen konsentraatio on pieni, toimii anodina ja syöpyy. Hieman veden pinnan alapuolella hapen konsentraatio on pienempi kuin veden pinnalla. Tästä syystä syöpyminen tapahtuu veden pinnan alapuolella. [6]

2.9.5. Rako- eli piilokorroosio

Piilokorroosiota esiintyy metallikappaleiden välisissä raoissa ja halkeamissa. Korroosiolle alttiimpia alueita ovat ahtaat raot, joihin liuos pääsee tunkeutumaan, mutta ei sieltä vaihtumaan samalla nopeudella kuin muilla metallipinnan alueilla. [6] Kuvassa 2.4 on esitetty rakokorroosion mekanismia kloridiliuoksessa.



Kuva 2.4 Rakokorroosion muodostuminen, kun metallien väliseen koloon pääsee kloridipitoista liuosta. [3]

Yleisemmin rakokorroosio syntyy seuraavien tekijöiden vaikutuksesta:

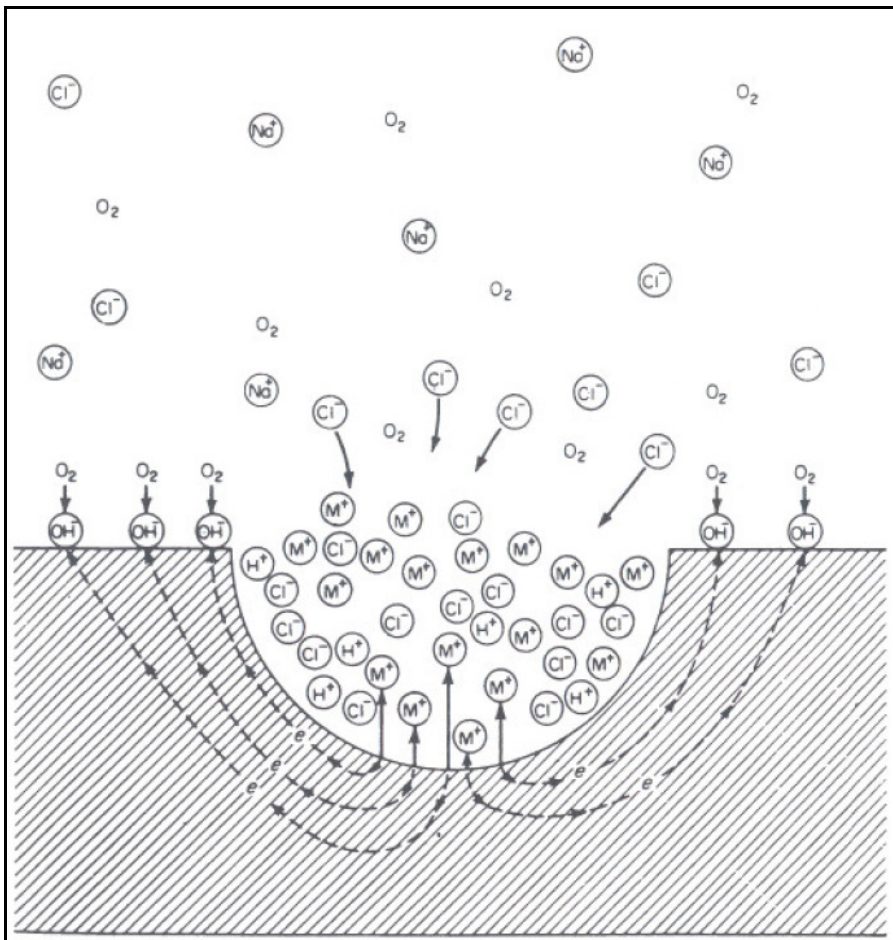
- Rakenne on valmistustekniikaltaan tai geometrisilta muodoiltaan sellainen, että liuos pääsee kosketuksiin noin 0,025 – 0,1 mm:n rakoihin. Tyypillisesti tällaisia rakoja muodostuu erilaisiin niitti-, pultti- ja hitsausliitoksiin.
 - Epämetallien ja metallien kosketuspinnat. Tavallisempia kohteita ovat tiivisteliitokset, joissa käytetty tiivistemateriaali on vettä absorboivaa tai materiaali ei täysin peitä tiivistepintaa.
 - Metallin pinnalla olevat kiinteät partikkelit. Yleensä tällaisia partikkeleja ovat hiekka ja metallin pinnalle muodostuneet lika- tai korroosiotuotteiden saostumat.
- [3]

2.9.6. Pistekorroosio eli pistesyöpyminen

Pistekorroosio keskittyy pienille alueille metallin pinnalle synnyttäen kuoppamaisia syvänteitä. Pistekorroosio on yleistä passivoituvissa metalleissa, mutta sitä esiintyy myös muissa metalleissa. Pistesyöpyminen etenee harvoin massiivisten rakenteiden läpi, ja py-

sähtyykin normaalisti silloin, kun kuopat ovat saavuttaneet tietyn syvyyden. Pistesyöpymistä ilmenee, kun metallia suojaava passivoitunut oksidikalvo rikkoutuu. Näin syntyy sähköpari, jossa katodina toimii koko passiiviseksi jäänyt ympäröivä oksidipinta ja anodina pieni aktivoitunut alue. Pistekorrosio voi saada alkunsa erilaista pinnan heterogeenisuuksista. Pinnankarheidet, urat, pintakalvojen rakennevirheet tai pinnalla olevat elektrolyyttipisarat ovat tyypillisiä pistekorrosion edistäjiä. Liuosten sisältämät aggressiiviset anionit, kuten Cl^- , Br^- , hypokloriitti- tai tiosulfaattianionit edesauttavat syöpymistä. Hyvänä esimerkkinä on ruostumattoman teräksen syöpyminen pistemäisesti merivedessä. [3; 6]

Kuvassa 2.5. on esitetty positiivisten metalli-ionien liukenemisen vuoksi syntynyt syöpymä metallissa. Syöpymän alueella on positiivinen varaus, jolloin negatiiviset kloridi-ionit pyrkivät sähköisen neutraalisuuden säilyttämiseksi siirtymään syöpymän alueelle. Kyseessä olevien ionien kesken muodostuu metallikloridi (MCl), joka edelleen reagoidessaan veden kanssa muodostaa saostuvan metallihydroksidin. Metallihydroksidin reaktiossa vapautuu H^+ - ja Cl^- -ioneja, jotka pyrkivät lisääntymään syöpymän alueella lisäämällä reaktionopeutta. Hapen liukoisuus on pieni verrattuna syöpymässä olevaan elektrolyyttiin. Tämän ansiosta tapahtuu katodisena reaktiona hapen pelkistyminen vierisillä alueilla, joten pistesyöpymä tavallaan suojaa ympäristöään katodisesti. [3]



Kuva 2.5. Kloridi-ionien aiheuttaman pistekorrosion mekanismi ilmastetussa liuoksessa. [3]

Taulukossa 2.3. on esitetty metallien ja metalliseosten pistesyöymäpotentiaaleja NaCl-liuoksessa. Esitetyistä metalleista ainoastaan alumiinilla on negatiivinen potentiaali. Kromilla ja titaanilla potentiaali on yli yhden.

Taulukko 2.3. Materiaalien pistesyöymäpotentiaalın arvoja 0,1 N NaCl-liuoksessa 25 °C:ssa. [3]

Metalli, metalliseos	Potentiaali (V, vs. S.H.E.)
Al	-0,37
Ni	0,28
Zr	0,46
Fe-18Cr-8Ni ruostumaton teräs	0,26
Fe-30Cr	0,62
Fe-12Cr	0,20
Cr	> 1,0
Ti	> 1,0 (1 N NaCl) noin 1,0 (1 N NaCl 200°C:ssa)

2.9.7. Jännityskorroosio ja väsyminen

Jännityskorroosio ilmenee raerajoja pitkin etenevinä murtumina ja tarvitsee jännityksen ja korroosion yhteisvaikutuksen. Syöpyneet kohdat heikentävät metallin väsymiskestävyyttä. Metallin korroosioväsyminen aiheutuu puolestaan jaksottaisista jännitystiloiista. Jännityskorroosiomurtoamat riippuvat korroosioympäristöstä ja se on kullakin materiaalilla spesifinen. Metalliin kohdistuvat vetojännitykset voivat olla ulkoisia tai sisäisiä. [3, 6]

Ulkoista kuormitusta aiheuttavat vetojännitykset:

- Staattinen kuorma
- Terminen mittamuutos
- Ruuviliitoksen kiristysvoima
- Staattinen paine
- Pyörimisliikkeen hitausvoima
- Värähtelyt [3]

Sisäistä kuormitusta aiheuttavat jännitykset:

- Kylmämuokkaus
- Lastuminen
- Leikkaus, lävistäminen
- Lämpökäsittely
- Hitsaus [3]

Sisäinen jännitys on ongelmallista, koska sen suuruutta on vaikeaa ennustaa. Usein ne ovat jopa metallin myötölujuuden suuruisia. Vaikein tilanne on silloin, kun sisäiset ja ulkoiset jännitykset vaikuttavat samanaikaisesti. Jännityskorroosio on hyvin yleinen ja haitallinen vaurioita aiheuttava korroosionmuoto. [3]

Metallin väsymistä ilmenee elektroniikassa erityisesti juotosliitoksissa. Juotosliitoksiin saattaa kohdistua suuria staattisia voimia. Staattiset voimat voivat johtua liitinrungon, metallijohdinten ja piirilevyn erilaisista lämpölaajenemiskertoimista. [4]

2.9.8. Hiertymiskorroosio (fretting-korroosio)

Hiertymiskorroosiota ilmenee kahden toisiaan vasten puristetun pinnan välissä. Hiertymistä tapahtuu, kun pinnat värähdellessään pääsevät liikkumaan hieman toisiaan vasten. Kahden pinnan kosketuskohdissa on profiilihuippuja, joiden kosketusjännitykset nousevat hyvin suuriksi. Hiertymiskorroosiosta on esitetty monta teoriaa, koska varmuutta sen syntymekanismista ei ole. Yhden teorian mukaan profiilihuiput hitsautuvat yhteen värähtelyn ansiosta ja murtuvat. Metallista irtoaa tällöin hiukkasia, jotka hapettuvat edelleen oksidihiuksiksi. Pintojen välissä nämä hiukkaset aiheuttavat hiertymiskulumista. [3]

Toisessa teoriassa profiilihuippujen luontainen oksidikerros murtuu pintojen värähdellessään toisiaan vasten, jolloin irronneet partikkelit jäävät pintojen väliin. Samalla murtunut pinta hapettuu edelleen, ja kuluminen jatkuu profiilihuipussa. Käytännössä nämä molemmat esitetyt teoriat vaikuttavat samanaikaisesti ja aiheuttavat hiertymiskorroosiota. Hiertymässä syntyneet korroosiotuotteet eivät pääse poistumaan pintojen välisistä, koska toisiaan vasten liikkuvat pinnat värähtelevät vain hyvin vähän ($\geq 10^{-7}$ mm). Tyypillisiä riskialttiita hiertymiskorroosiokohteita ovat pinnat, joita ei ole tarkoitettu liikkuviksi. Esimerkiksi liitoksissa kiristyksen löystyessä toisiaan vastaan olevat pinnat pääsevät liikkumaan, jolloin hiertyminen alkaa. Hiertymiskorroosiolle tyypillisiä rakenteita ovat pultti-, niitti-, kitka- ja kiilaliitokset. [3]

Muita tyypillisiä hiertymiskorroosiota aiheuttavia tilanteita ovat voimakas värinä, sähkövirran mekaaninen voima tai ympäristölämpötilan vaihteluista aiheutuva lämpölaajeneminen. Periaatteessa hiertymiskorroosiota tapahtuu kaikissa avattavissa kontakteissa, kuten liittimissä, kytkimissä ja releissä, jos kontaktipinnat pääsevät liukumaan ja hankautumaan toisiaan vasten. Pintojen mekaaninen kuluminen on riippuvainen materiaalin kovuudesta, pintoja yhteen puristavasta voimasta, kitkakertoimesta, liikkeen amplitudista ja liikenopeudesta. Tinapinnoitteet kärsivät erityisen herkästi hiertymiskorroosiosta, koska tina on pehmeää ja hapettuu helposti. Tinan pinnalle muodostuva tinaoksiidi on kovaa ja haurasta. Se tunkeutuu hankauksessa tinan sisään kasvattaen pintaresistanssia. [4]

2.9.9. Sinkki- ja tinakato

Sinkkikato on tyypillinen messingissä ilmenevä korroosioilmiö. Messinki on kuparin (Cu) ja sinkin (Zn) seos. Sinkkikatoa esiintyy erityisesti niissä messingeissä, joiden sinkkipitoisuus on korkea. Sinkkikadossa sinkki liukenee pois messingistä. Sinkkirakeista tulee anodipintoja ja ne syöpyvät, kuparirakeista tulee katodipintoja ja ne jäävät huokoiseksi massaksi. Ilmiötä esiintyy kuumaan tai suolaiseen veteen kosketuksissa olleessa messingissä. Sinkkikatoa voidaan messingissä estää seostamalla siihen arseenia (As), antimonia (Sb), booria (B) tai fosforia (P). Tinakatoa esiintyy tinapronssilla. Siinä epäjalompana metallina olevat tinarakeet toimivat anodeina ja syöpyvät. [4]

2.9.10. Lankamainen korroosio (filiform-korroosio)

Lankamaista korroosiota ilmenee maalatun metallipinnan alla. Korroosio etenee lankamaisena kohoumina maalipinnan alla satunnaisesti suuntiin. Maalatun metallipinnan rikkoutuessa esimerkiksi suolavesi pääsee kosketuksiin suojaamattoman metallin kanssa. Lankamainen korroosio voi irrottaa pitkälle kehittyessään laajojakin maalikerrosalueita metallin pinnasta. [4]

2.9.11. Elektrolyyttinen korroosio ja ionien vaeltaminen (migraatio)

Elektrolyyttistä korroosiota ja ionien vaeltamista esiintyy elektroniikassa muun muassa piirilevyllä sähköjohdinten välissä, jos johtimia yhdistää hygroskooppinen elektrolyytti. Tavallinen 2-5 V jännite johdinten välillä riittää käynnistämään elektrolyysin ja ionien vaeltamisen. Kapeat johdinvälit lisäävät sähkökentän voimakkuutta ja ionien vaeltamisen todennäköisyys kasvaa. Ionit vaeltelevat kohti negatiivista johdinta, jolloin positiivisempi johdin liukenee ja korrodoituu. Kokonaisuudessaan elektrolyyttinen korroosio voi jopa katkoa ohuempia johtimia. Lisäksi ionien vaeltaminen saattaa aiheuttaa oikosulkua johdinten välille. Katodisen johtimen puolelle muodostuu metallisia sähköjohtavia kuvioita, kun taas anodisen johtimen puolelle muodostuu suoloja. Muodostuneiden johdinkuvioiden koostumus ja esiintymismuodot vaihtelevat pintojen epäpuhtauskonsentraation ja jännitteen suuruuden mukana. Ilmasta johdinten päällä olevaan veteen liukenevat kaasut, kuten typpi- ja rikkiyhdisteet, hiilidioksidi sekä pinnan yleinen kontaminaatioaste lisäävät elektrolyyttisen korroosion muodostumista ja ionien vaeltamista. [4]

2.9.12. Mikrobiologinen korroosio

Mikrobiologinen korroosio vaikuttaa kaikilla veden kanssa kosketuksilla olevilla pinnoilla. Erityisesti se vaikuttaa ei-metallisiin materiaaleihin. Laitteissa olevia ei-metallisia materiaaleja ovat teipit, tiivisteet, maalit, pinnoitteet, kumit, muovit ja puu. Korroosion aiheuttajina toimivat mikrobiologiset eliöt. Näistä esimerkkinä voidaan mainita bakteerit, levät, homeet, sienet, jäkälät, sammaleet, erilaiset eläimet sekä niiden jätökset. Eliöistä syntyneet kemikaalit, vesi sekä ilmasta aiheutuva kontaminaatio kor-

rodoivat yhdessä niihin kosketuksissa olevia pintoja. Mikrobiologinen korroosio on paikallista, ja siihen liittyvät monet muut korroosimuodot, kuten esimerkiksi pistekorroosio. Eliöiden aiheuttamaa korroosiota esiintyy usein olosuhteissa, joissa vettä on jatkuvasti läsnä joko sateen, kosteuden tai kondensoitumisen vuoksi. Trooppiset ja merelliset ympäristöt ovat hyvin tyypillisiä ilmenemisalueita. [4]

2.10. Ruosteen muodostuminen

Rautaesineen ruosteen muodostuminen tapahtuu seuraavasti. Anodilla syntyneet kationit (Fe^{2+} -ionit) siirtyvät raudan pinnalla olevaa vettä pitkin katodia kohti. Katodilla syntyneet anionit (OH^- -ionit) siirtyvät samanaikaisesti kohti anodia. Jossakin näiden kahden alueen välissä ionit kohtaavat toisensa muodostaen rauta(II)hydroksidia $\text{Fe}(\text{OH})_2$. Rauta(II)hydroksidi ei ole pysyvä yhdiste ja siksi se hapettuu edelleen kosteuden ja hapen läsnä ollessa hydratoituneeksi rauta(III)oksidiksi $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot X \text{H}_2\text{O}$ (X = määrittelemätön lukumäärä vesimolekyylejä). Rauta(III)oksidi on ruostetta ja sen koostumus vaihtelee olosuhteiden, kuten happipitoisuuden, mukaan. Ruosteen tilavuus on suurempi kuin raudan, ja sen vuoksi se lohkeilee irti raudan pinnasta. [1]

Anodisilla alueilla tapahtuu varsinainen ruostesyöpyminen, jossa Fe^{2+} -ionit liukenevat. Katodiset alueet joutuvat reaktioyhtälönsä mukaisesti enemmän alttiiksi kosteudelle (H_2O) ja ilman (O_2 (g)) vaikutukselle. Varsinainen ruosteyhdiste muodostuu siis näiden alueiden välimaastoon. Maalattun rautaesineen ruostuminen tapahtuu siten, että katodi-alue muodostuu pintaan, jossa maali on vaurioitunut. Anodinen alue syntyy jonnekin maalin alle, maali menettää näin pohjakiinnityksensä ja alkaa hilseillä pois. [1]

2.11. Korroosiotuotteiden ryömiminen

Korroosioilmion ulkoisesti näkyvät seuraukset ovat korroosiotuotteita, ja ne voivat ryömiä pitkin metallipintoja. Korroosiotuotteet saostuvat tyypillisesti anodin ja katodin välimaastoon korroosiovirran kuljettamana. Elektrolyyttiin liuenneet ionit ovat vesiliukoisia ja ne voivat kulkeutua pitkällekin syntymäpaikastaan reagoimaan. Raoissa ja koloissa syntyvät korroosiotuotteet työntyvät ulos ahtaasta paikasta, jolloin ne kasaantuvat reikien edustalle. Sähkökentät ja vuotovirrat kiihdyttävät korroosiotuotteiden kulkeutumista. Jännitteisissä tiloissa ne voivat aiheuttaa oikosulun.

Eri metallien korroosiotuotteita ovat muun muassa:

- Rauta -> rautahydroksidi, ruoste (keltainen/ruskea)
- Sinkki -> karbonaatti/hydroksidi, valkoruoste (valkoinen)
- Kupari -> karbonaatti/hydroksidi, patina (vihreä) [4]

2.12. Korroosionopeus

Metalleille voidaan määritellä ilmastollisen korroosion nopeusluokat. Standardissa ISO 9223 on annettu ohjeelliset korroosion nopeusluokat muutamille metalleille. Tässä standardissa korroosionopeudet ilmaistaan mikrometreinä (μm) vuotta kohden. Nopeusluokat tarkoittavat oikeastaan korrosiivisuusluokkia, jotka kuvastavat korroosion yleistä määrää. Ilmastollinen korroosio on yleensä nopeampaa alkuvaiheessa. Korrosiivisuus tasoittuu kymmenen vuoden sisällä lähes vakionopeudeksi. Standardissa ISO 9224 korroosionopeudet ovat 10 vuoden keskiarvoja. Taulukossa 2.4. on esitetty korroosionopeudet standardin ISO 9223 mukaan.

Korrosiivisuusluokat ISO 9223 mukaan:

- C1 Hyvin vähäinen korrosiivisuus
- C2 Vähäinen korrosiivisuus
- C3 Kohtalainen korrosiivisuus
- C4 Korkea korrosiivisuus
- C5 Hyvin korkea korrosiivisuus

Taulukko 2.4. Muutamien metallien ohjeelliset yleisen korroosion nopeudet muutamilla metalleilla standardin ISO 2993 tarkoittamissa mittausluokissa. [4]

Metalli	Korroosionopeuden r_{corr} keskiarvo ($\mu\text{m/a}$) altistuksen ensimmäisen vuoden aikana korrosiivisuusluokissa C1...C5				
	C1	C2	C3	C4	C5
Hiiliteräs	$\leq 1,3$	1,3...25	25...50	50...80	80...200
Sinkki	$\leq 0,1$	0,1...0,7	0,7...2,1	2,1...4,2	4,2...8,4
Kupari *)	$\leq 0,1$	0,1...0,6	0,6...1,3	1,3...2,8	2,8...5,6

*) Arvot pätevät myös kupariseoksille, joissa Cu-pitoisuus on $\geq 60\%$.

Taulukosta voidaan havaita, miten rajusti hiiliteräs korrodoituu ilmasto-olosuhteissa jo ensimmäisen vuoden aikana. Kuparin korrodoituminen on huomattavasti maltillisempaa.

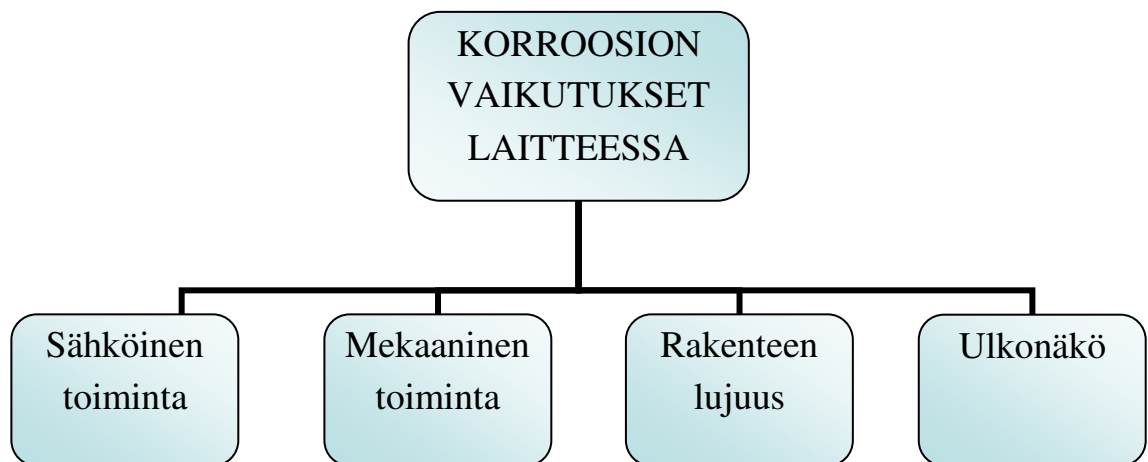
2.13. Korroosion aiheuttamat ongelmat elektroniikassa

Korroosio aiheuttaa elektroniikassa yleensä ensin lieviä, asteittain eteneviä pieniä muutoksia. Pienet muutokset aiheuttavat kuitenkin laitteeseen vähitellen toimintahäiriöitä ja epäluotettavuutta. Erityisen herkkiä korroosiolle ovat laitteet, joiden sähköinen tai mekaaninen toiminta edellyttää hyvin pieniä toleransseja esimerkiksi signaaleissa, vuotovirroissa tai piirien impedanssien suuruudessa. Kosteus vaikuttaa materiaalin dielektrisyysvakioon (ϵ_r), ja siksi eristeetkin ovat alttiita korroosion, kontaminaation ja kostumisen kautta sähköisille muutoksille. Korroosioriskin kannalta laitteen ongelmallisim

alue on sähkömekaniikka. Herkimpiä vaurioituvia osia ovat liittimet, kytkimet, releet sekä komponenttien liitännät ja piirilevyn johdinkuviot. [4]

Ilmastollisten vaikutuksien lisäksi myös mekaaniset rasitukset lisäävät korroosioherkkyyttä. Mekaaninen värinä sekä lämpötilojen vaihtelut aiheuttavat liittimien uros- ja naaraskoskettimien hieroutumista toisiansa vasten. Hierova liike kuluttaa kosketinpintoja ja aiheuttaa hiertymäkorroosiota. Pakkaus- ja tehotiheyksistä johtuen jäähdystystä tarvitaan enemmän, jolloin myös lisääntyneen ilman myötä pintojen kontaminaatio ja kaasukontaktit kasvavat. Liian suuri virta aiheuttaa sähköistä rasitusta ja samalla myös korroosiota. Juotosliitokset lämpenevät ja rappeutuvat asteittain. Tiheissä johdinkuvioissa kentänvoimakkuus johdinten välillä on suuri, mikä edistää vuotovirtoja ja kontaminoituneella pinnalla korroosiota. [4]

Tyypillisiä korroosion aiheuttamia vikoja sähkölaitteissa ovat pintaresistanssin pieneneminen, vuotovirtojen kasvaminen, kontaktien ja materiaalien rappeutuminen sekä laitteen sähköinen ja mekaaninen toimimattomuus. [4] Kuvassa 2.6. on esitetty sähkölaitteen neljä osa-aluetta, joihin korroosio erityisesti vaikuttaa.



Kuva 2.6. Korroosion vaikutukset sähkölaitteessa. [4]

3. SPAR-ÖLJYNTUOTANTOLAUTAN SÄHKÖTEKNIikka

3.1. Yleistä öljyntuotantolautoista

Porin Mäntyluodossa on 70-luvulta asti rakennettu öljynetsintälauttoja ja -laivoja. Joskus puhutaan myös öljynporauslautoista. Öljynetsintälautalla (tai -laivalla) tehdään merellä koeporauksia paikoissa, joissa oletetaan olevan öljyä. Ennen koeporauksia tehdään yleensä seismisiä tutkimuksia, joilla yritetään todentaa mahdollisia öljy- tai kaasulähteitä. Kuitenkin vasta koeporauksella voidaan varmistua siitä, löytyykö öljyä vai ei. Olennaista tässä on huomata se, että vaikka öljylähteessä on yleensä sekä kaasua että öljyä, voidaan puhua pelkästään öljynetsintä- tai tuotantolautoista. [9]

Kun öljylähde on löydetty, niin sen koko kartoitetaan ja arvioidaan. Öljylähteen löytäjien on mietittävä, onko lähteen koko sellainen, että löytöpaikalle on taloudellisesti kannattavaa investoida myös öljyntuotantolautta. Öljynetsintälautalla ei ole yleensä sellaista laitteistoa, että sillä voitaisiin tuottaa varsinaisesti öljyä meren pohjasta. Öljyntuotantoon tarvitaan siis lisäksi erillinen öljyntuotantolautta, jossa on siihen tarvittava prosessilaitteisto. Prosessilaitteistoilla pystytään erottelemaan toisistaan öljy, kaasu ja vesi, joita kaikkia yleensä esiintyy öljylähteissä. Erilaisia öljyntuotantolauttoja voidaan valmistaa, mutta yhteinen tekijä niissä on se, että kaikissa pitää olla prosessilaitteisto. Offshore-olosuhteissa pitää olla lisäksi alusta, jolle prosessilaitteisto asennetaan. Valittavana on joko laivan tapainen ratkaisu, kelluva lautta tai pohjassa seisova rakenne, jonka päälle prosessilaitteisto asennetaan. [9]

Mäntyluodossa on rakennettu spar-tyyppisiä öljyntuotantolautan runkoja, joissa runko on eräänlainen meressä kelluva lieriö. Runko on terästä ja sen paino vaihtelee 10 000 – 25 000 tonnin välillä. Kokonaispaino riippuu siitä, kuinka suuri öljyn- tai kaasuntuotantomoduuli rungon päälle asennetaan. Tuotantomoduulin koko määräytyy puolestaan sen mukaan, minkälainen öljy- ja kaasuesiintymä on kyseessä ja kuinka nopealla ajalla lähde halutaan hyödyntää. Tuotantomoduuliyksikköä kutsutaan topsideksi ja siellä sijaitsevat muun muassa varsinainen prosessilaitteisto, asunto-osasto ja helikopterikenttä. Tuotantomoduuli rakennetaan yleensä USA:ssa. Lautan runko ankkuroidaan mereen ja se koostuu Hard Tank -osasta, ristikkorakenteisesta Truss-osasta sekä Soft Tank -osasta. Soft Tank -osassa sijaitsee tuotantolautan kiinteä painolasti. Kuvassa 3.1. on öljy-yhtiö Chevronin Tahiti-niminen spar-öljyntuotantolautta. Tuotantolautan tuotantomoduuli on rakennettu Yhdysvalloissa ja runko Porin Mäntyluodossa. [9]



Kuva 3.1. Öljy-yhtiö Chevronin Tahiti-niminen spar-öljyntuotantolautta.

Kelluvia lauttoja käytetään yleensä silloin, kun veden syvyys on suurempi kuin 500 m. On melko mahdotonta tehdä sitä korkeampia rakenteita, jotka seisovivat meren pohjassa. On myös huomioitava se, että vedenpäällisen osan päälle pitää voida asentaa myös tuotantomoduuli. Kelluvat ratkaisut ovat aina kalliita, joten pohjassa seisovia ratkaisuja pidetään parempina matalammissa vesissä. Tällä hetkellä maailmanlaajuinen ongelma on se, että öljy alkaa vähitellen loppua matalista vesistä. [9]

Viimeisen 15 vuoden aikana Mäntyluodossa on tehty spar-tyyppisiä öljyntuotantolauttojen runkoja. Spar-tyyppisiä tuotantolauttoja on viety paikkoihin, joissa meriveden syvyys on jopa 2500 m. Tuotantolautoissa on paljon sähkölaitteita, joista suurin osa liittyy tuotantomoduulin prosessilaitteisiin. Myös lautan rungossa on jonkin verran sähkö- ja automaatiolaitteita. Tässä diplomityössä sähkötekniikan alle kuuluvat kaikki spar-rungon sähköelektroniset laitteet, sähköjohdot ja laitekotelot. Elektronisiin laitteisiin sisältyvät ohjelmoitavat logiikat, anturit ja sähkökeskukset. Lisäksi otetaan huomioon sähkölaitteiden kytkentäkaapit ja -kotelot sekä niiden kiinnitykset. [10]

3.2. Öljyntuotantolautan rungon sähkö- ja automaatiotekniikkaa

Spar-öljyntuotantolautan rungossa on yleensä 4 kpl painolastitankkeja eli ballast-tankkeja, joissa olevan veden määrää muuttamalla voidaan säädellä lautan syvyyttä. Ballast tankkien lisäksi lautassa on 12 – 16 kpl tyhjiä ilmatiloja eli void-tankkeja, joiden avulla lautta saa nostetta, toisin sanoen lautta kelluu meressä. Lautan syvyyttä siis lisätään pumppaamalla lisää vettä ballast-tankkeihin ja syvyyttä vähennetään pumppaamalla vettä pois. Pumppujärjestelmään liittyy jonkin verran putkistoa, sähkökäyttöisiä ballast-pumppuja, sähköisesti kauko-ohjattuja venttiilejä, virtausantureita, paineantureita ja

pinnankorkeustutkia. Void-tankit ovat pääsääntöisesti kuivia tiloja ainakin lautan ollessa valmis. Void-tiloja valvotaan vuotojen varalta joko paineantureilla tai pintakytkimillä (vuotoanturi). Lautan vuotaessa seuraa hälytys. [10]

Sähkökäyttöisiin pumppuihin syötetään teho MCC:n (Motor Control Center) eli moottorikeskuksen kautta. Pumput voidaan käynnistää erikseen, ja siksi jokaista ballast-tankin pinnankorkeutta voidaan säätää erikseen. MCC on myös liitetty Ballast PLC:iin eli logiikkakaappiin, jonka avulla voidaan ohjelmallisesti hoitaa venttiilien avausta, käynnistää pumppuja, monitoroida pinnankorkeuksia, virtauksia putkissa, paineita, vuotohälytyksiä. Tässä Ballast PLC:ssa on kosketusnäyttö, jolla operaattori voi monitoroida ja ohjata toimintaa. Ballast PLC liitetään vasta tuotantomoduulin asennuksen jälkeen tuotantomoduulin valvomoon. Valvomon operaattorit voivat siten lautan ollessa valmiina operoida ja monitoroida myös lautan runkoa. [10]

Lautan rungossa on hydrauliiikkäyttöinen ankkurointijärjestelmä. Spar-lautta on kelluva rakenne, mutta se ankkuroidaan 9 – 14 ankkurilinjalla meren pohjaan. Jokaisen ankkurilinjan pituutta ja jännitystä voidaan säädellä antamalla lisää ankkuriketjua tai tunkkaamalla ketjua sisään lautan ketjulokeroihin. Ankkurilinjat sijaitsevat eri puolilla lautaa säteittäisesti, joten eri linjojen jännityksiä säätelämällä lautaa voidaan hieman siirrellä meressä. Ankkurikoneisto on hydrauliikkäyttöinen ja hydrauliikkapaine tuotetaan sähkökäyttöisten hydrauliikkapumppujen avulla. Jokaista ankkurilinjaa kohden on yksi ankkurivinssi, jolla pystytään tunkkaamaan ketjua sisään lauttaan tai löysentämään ankkurilinjaa. Koko järjestelmä on automaatio-ohjattu ja sitä varten lautan rungossa on Mooring PLC. Sähkökäyttöisiä hydrauliikkapumppuja syötetään samasta MCC:sta kuin ballast-pumppuja, joten Mooring PLC on liitetty myös MCC:hen. Ankkurivinsseissä on paljon antureita, kuten induktiivisia raja-antureita, painelähtimiä. [10]

PLC-kaapin sydän on ohjelmoitava logiikka eli PLC (Programmable Logic Controller). Laite on käytännössä tietokonepohjainen yksikkö, jossa on prosessori, muistia ja I/O-kortteja (input/output). I/O-korttien avulla PLC saadaan kommunikoidaan ulkomaailman kanssa. Mikrokorttien avulla voidaan lukea sähköisiä suureita eli mitta-arvoja, kuten virtaa ja jännitettä tai diskreettejä tilatietoja (1=24VDC ja 0=0VDC). Lisäksi korteilla voidaan ohjata muita laitteita eli antaa signaaleja ulospäin. Yksinkertaisten I/O-korttien lisäksi PLC:ssa on tietoliikenneportteja, kuten Ethernet, Profibus, DeviceNet, ControlNet tai RS-485. Näiden korttien avulla PLC:t voivat tietoverkkojen välityksellä keskustella toistensa kanssa, toimittaa tietoa monitoireille tai nykyään myös ohjata ja monitoroida jotain sähkölaitteita, kuten taajuusmuuttajaa. Periaatteessa PLC voidaan liittää ihan samaan Ethernet-verkkoon kuin toimistotietokone. Automaatiojärjestelmiin liittyvissä verkoissa käytetään samoja komponentteja kuin toimistoverkoissa eli kytkimiä, reitittäjiä ja WLAN-lähtimiä. Aiemmin mainitut PLC:t kommunikoiivat lisäksi tuotantomoduulin valvomoiden kanssa Ethernet-verkon välityksellä. Siirrettävä tieto eli data voi kulkea kuparikaapelin sijasta myös valokaapelia pitkin. Sähkölaitteet ovat kuitenkin paremmin teollisuus- ja meriympäristöön soveltuvia esimerkiksi koteloinnin ja häiriösiedon kannalta. [10]

Offshore-öljyntuotanto perustuu ympäri maailman paljolti yhdysvaltalaisen kehittämään tekniikkaan. Tästä syystä öljy-yhtiöt haluavat käyttää amerikkalaisia laitteita, varsinkin silloin, kun lautta on tilattu Meksikonlahdelle ja kyseessä on keskeinen komponentti. PLC:t ovat tyypillisesti Allen-Bradley -merkkisiä ja tarkempi tyyppi on ControlLogix. Kansimökissä olevat PLC:t ovat varustettuja kosketusnäytöllä ja usein Allen-Bradleyn valmistamia. Automaatioon liittyvien tietoverkkojen komponentit, kuten Ethernet-kytkimet, reitittimet, WLAN-lähettimet ja mediamuuntimet ovat yleensä joko Phoenix- tai Hirschmann-merkkisiä. Lisäksi kaappeihin voidaan lisätä tiedonkeruujelmia samalla periaatteella kuin lentokoneen musta laatikko on toteutettu. Tallennetut tapahtumat taltioidaan teollisuuskäyttöön tarkoitettujen tietokoneiden avulla. [10]

3.3. Sähkölaitteiden materiaalit

Elektroniikassa käytetään paljon erilaisia materiaaleja. Metallit ovat niistä tärkeimmät sähkönjohtavuutensa vuoksi. Taulukossa 3.1 on esitetty tyypillisiä elektroniikassa käytettäviä metalleja.

Taulukko 3.1. Elektroniikassa käytettäviä metalleja. [4]

Osa, komponentti	Metalli
Kotelot, tukirakenteet, jouset, jäähdytysriivat	Alumiini, teräs, messinki, pronssi, kupari, pinnoitteet (mm. sinkki, nikkeli, kupari)
Piirilevy	Kupari, kupariseokset, pinnoitteet (tina, tina-lyijy, kulta)
Sähköiset kontaktit ja maadoitukset	Kupariseokset, teräs, alumiini, kontaktipinnoitteet (kulta, palladium, hopea-palladium, hopea, nikkeli, tina tina-lyijy)
Liittimet	Messinki, beryllium-kupari, fosforipronssi, ruostumattomat teräkset, kulta, kontaktipinnoitteet
Kytkimet ja releet	Kupariseokset, teräkset, ruostumattomat teräkset, kontaktipinnoitteet
Passiiviset komponentit, puolijohdekomponentit, mikropiirit, yms.	Kulta, kupariseokset, nikkeli (mm. välikerroksissa), hopea, alumiini, Kovar (nikkelirautaseos), tina-lyijy, volframi

3.3.1. IEC

IEC (International Electrotechnical Commission) on kansainvälinen sähköalan standardoimisjärjestö. Jäsenistöön kuuluu 67 eri maan kansallista komiteaa, jotka edustavat 85% maailman väestöstä ja 95% maailman sähköenergian tuotannosta. Suomi kuuluu IEC:iin täysjäsenenä ja Suomen edustajana siellä toimii SESKO (Sähkö- ja elektroniikka-alan standardoimisjärjestö). [4]

3.3.2. Kotelon suojaruokitus, IP-luokitus

Elektroniikkalaitteen suojaruokelon tiivyyden valinnassa käytetään suojaruokitusta eli IP-koodia. IEC 60529 (Degrees of protection provided by enclosures) -standardin mukaan erilaiden ruokeloiden suojaruokka ilmaistaan neli-/kuusikirjaimisella koodilla. Suojaruokituksen avulla ilmaistaan sähkölaitteen suojaruusta mekaanisia esineitä (ensimmäinen numero) ja veden haitallisia (toinen numero) vaikutuksia vastaan. Tyypillisiä IP-luokituksia kytkentäkaapeilla ovat muun muassa IP66, IP56 ja IP55. Vastaava suojaruokitus USA:n NEMA järjestelmän mukaan ovat NEMA 12 ja NEMA 4. [4]

Koteloiden suojaruokka ilmaistaan IEC:n IP-koodin avulla seuraavasti:

esim. IP56CH

- IP** Tunnuskirjaimet (Ingress Protection)
- 5** Ensimmäinen numero (suojaruokka esineitä varten)
- 6** Toinen numero (suojaruokka vettä vastaan)
- C** Tarkennuskirjain (tarkentava henkilöturvallisuuden suojaruokka)
- H** Lisäkirjain (lisätietoja varten, esim. suurjännitelaitte)

Taulukko 3.2. IP-luokituksen suojaruokat mekaanisia esineitä vastaan. [4]

Ensimmäinen numero	Suojaruokustason kuvaus
0	Ei suojaruusta
1	Suojattu yli Ø 50 mm esineitä vastaan
2	Suojattu \geq Ø 12,5 mm esineitä vastaan
3	Suojattu \geq Ø 2,5 mm esineitä vastaan
4	Suojattu \geq Ø 1,0 mm esineitä vastaan
5	Pölysuojattu
6	Pölytiivis

Taulukko 3.3. IP-luokituksen suojausluokat vettä vastaan. [4]

Toinen numero	Suojaustason kuvaus
0	Ei suojausta
1	Suojattu pystysuoraan tippuvalta vedeltä
2	Suojattu pystysuoraan tippuvalta vedeltä, kun koteloa on kallistettu 15°
3	Suojattu pystysuoraan tippuvalta vedeltä, kun koteloa on kallistettu 60°
4	Suojattu vesiroiskeilta
5	Suojattu joka suunnalta tulevalta vesisuihkulta
6	Suojattu voimakkaalta vesisuihkulta
7	Suojattu tilapäistä veteen upottamista vastaan
8	Suojattu jatkuvaa veteen upotusta vastaan

Suojakoteloiden ja kytkentäkaappien tehtävänä on:

- Vähentää mekaanista rasitusta
- Minimoida kaasu- ja pölykontaktit
- Estää veden pääsyä ja kondensoitumista
- Vähentää lämpötilanvaihteluita

MCC:n IP-luokitus on yleensä IP22 ja PLC-kaappien (Mooring ja Ballast PLC) IP54. Itse kaapit ovat tyypillisesti Rittalin TS8-sarjan kaappeja. Pääsääntöisesti ulkotiloissa käytettävä kotelointiluokka on yleensä vähintään IP56. [10] Liitteessä 2 on taulukoitu öljyntuotantoon liittyvien sähkölaitteiden kotelointiin liittyvä IP-luokitus.

3.4. Sähkölaitteiden sijainti

MCC, Mooring PLC ja Ballast PLC ovat sijoitettuina tilaan, jota kutsutaan kansimökiksi. Tilassa on tyypillisesti ilmastointikone, joka poistaa tilasta kosteutta ja jäähdyttää silloin, kun sähköt ovat päällä. Sähköt eivät ole päällä kuitenkaan kaikissa lautan elinkaaren vaiheissa, kuten kuljetuksen ja käyttöönoton aikana sekä vikatilanteissa. Kansimökissä olevat sähkölaitteet ovat IP-luokitusten mukaisissa kaapeissa.

Kuvassa 3.2. näkyy tuotantolautan kannella oleva kansimökki. Kansimökki on pinta-alaltaan tyypillisesti 40 - 60 m². Kuva 3.3. on otettu kansimökin sisätiloista. Vasemalla kaapin ovessa näkyy Allen-Bradleyn kosketusnäyttö ja edessä ylhäällä näkyy tuuloilmapuhallin. Kuvan oikealla puolella näkyvät MCC sähkökeskuskaapit, joiden suojausluokitus on IP22.



Kuva 3.2. Lautan kannella oleva kansimökki, jonka sisällä ovat MCC, PLC ja virtalähdekotelo.

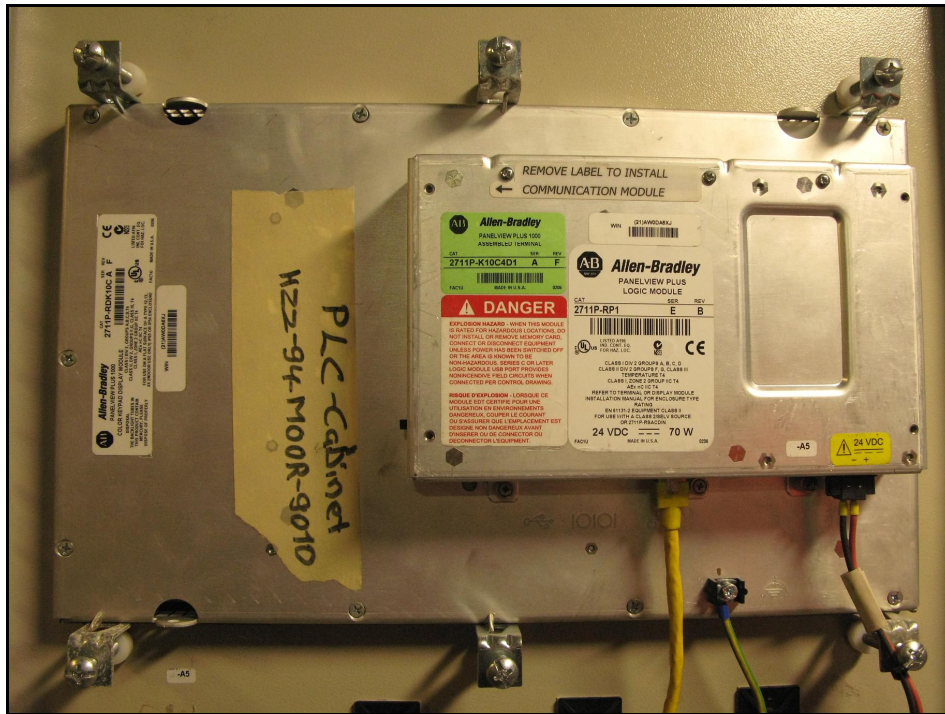


Kuva 3.3. Kansimökki sisältä kuvattuna, edessä ylhäällä näkyy tuuletuskone. Kansimökin katolla sijaitsee ilmastointilaite.

Kuvissa 3.4. – 3.6. ovat näkymät PLC:n kaapit sisältä, Allen-Bradleyn kosketusnäytön takakannesta ja hakkurivirtalähdekotelosta. Hakkurivirtalähteet muuttavat 480 VAC:n jännitteen 24 VDC:n jännitteeksi, joka on muun muassa PLC:n käyttöjännite. Lisäksi kaappeihin on kytketty UPS (Uninterruptible Power Supply) eli keskeytymättömän virransyöttö. UPS on laite, jonka tehtävä on taata tasainen virransyöttö lyhyissä katkoksissa ja syöttöjännitteen epätasaisuuksissa. UPS pystyy syöttämään suojaamilleen laitteille sähköä lyhyiden verkkokatkoksien ajan akustaan.



Kuva 3.4. Kansimökin sisällä oleva PLC-kaappi. Kaapin suojaluokitus on IP54.



Kuva 3.5. Allen-Bradleyn kosketusnäytön takakansi. Kosketusnäytön oma suojausluokitus on IP22. Kaappi, jonka ovessa näyttö on kiinni, on luokitukseltaan IP54.



Kuva 3.6. Kolme kappaletta hakkurivirtalähdekoteloita sekä UPS.

Öljyntuotantolautan kannen ulkotiloissa on myös runsaasti sähkölaitteita. Ulkotiloissa laitteet tulee koteloida vettä pitäviin, IP-luokitukseltaan riittäviin suojakoteloihin korroosion estämiseksi. Kuvat 3.7. – 3.12. on otettu tuotantolautan kannen ulkotiloista.



Kuva 3.7. Kansimökin seinällä olevia kytkentäkoteloita, joiden suojaluokitus on IP56. Kaappien ovissa ja kansimökin seinällä näkyy jo runsaasti ruostetta.



Kuva 3.8. Norjalaisten toimittama ankkurivinssin kytkentäkotelo (IP68), joka on normaalisti tuotantolautan kannen päällä eikä vedessä. Kuljetuksen aikana kytkentäkotelo saattaa kuitenkin olla veden alla pitkäänkin. Tämä kotelo oli vedessä 9 kuukautta. Valkoiset jäljet kytkentäkotelossa ja seinillä ovat ostereiden ja muiden merenelävien osia ja jätöksiä.



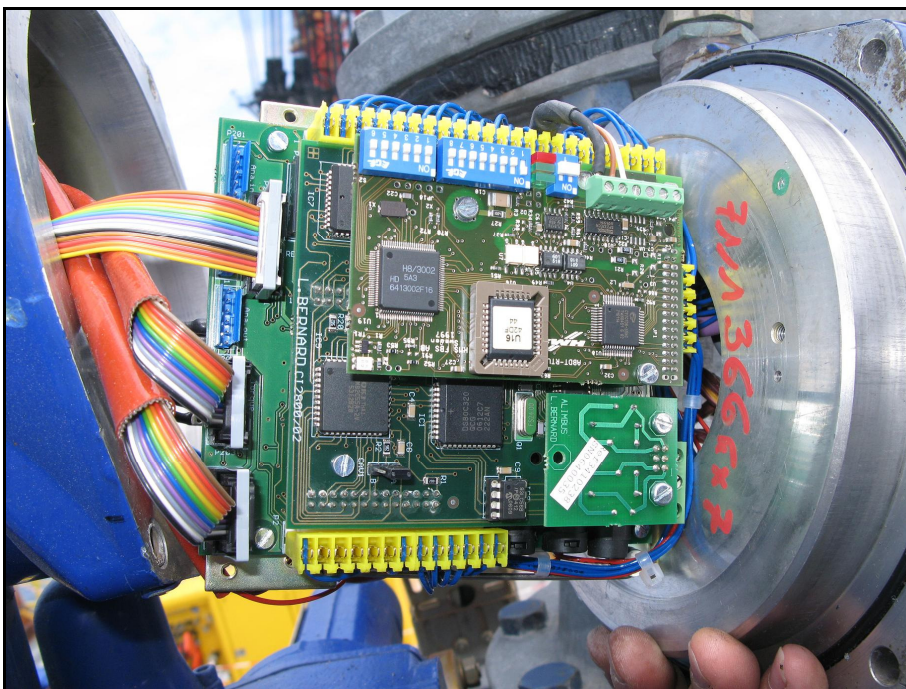
Kuva 3.9. Kytentäkotelon suojaluokitus on IP56. Sen sisällä, erityisesti pohjalla, näkyy runsaasti kosteutta. Lisäksi kotelon pohjalla on havaittavissa jo selvää ruuvien ja muttereiden ruostumista.



Kuva 3.10. Ankkurointijärjestelmän Allen-Bradley:n ohjauspulpetti, jossa on kosteusnäyttö. Näytön sisällä näkyy kosteutta.



Kuva 3.11. Ballast-järjestelmän kauko-ohjattu venttiilin toimilaite, jonka suojakoteloitiluokka on IP68.



Kuva 3.12. Sama kytkentäkotelo aukaistuna. Sisältä löytyy paljon korroosiolle altista elektroniikkaa.

3.4.1. Tyypilliset elektroniikkaa sisältävät laitteet

Taulukossa 3.4. on taulukoituna muutamia tyypillisiä öljyntuotantolautan kansimökissä olevia elektroniikkaa sisältäviä laitteita sekä niiden toimialueiden sietokykyjä.

Taulukko 3.4. Tyypillisiä sähkölaitteita öljyntuotantolautalla. [11; 12; 13; 14]

Laite	Valmistaja	Ympäristössä olevan suhteellisen kosteuden sietokyky	Käyttölämpötila-alue	IP-luokitus
Virtalähde	Phoenix Contact	95 %, ei kondensiota	-25°C...+70°C	IP20
Ethernet-kytkin	Phoenix Contact	5 – 95 %, ei kondensiota	-25°C...+70°C	IP20
Kosketusnäyttö	Rockwell Automation	–	0°C...+55°C	IP54, IP65
PLC (ohjelmoitava logiikka)	Rockwell Automation	5 – 95 %, ei kondensiota	0°C...+60°C	–

3.5. Sähkölaitteiden elinkaari

Tuotantolauttaan asennettavat sähkölaitteet ovat elinkaarensa aikana hyvin erilaisissa olosuhteissa. Siihen sisältyvät kuljetukset, varastointi, kokoonpano ja käyttöaika. Tyypillisesti spar-öljyntuotantolautta suunnitellaan ja rakennetaan toimimaan 25 vuotta. Tuotantolautan tulee siis kokonaisuudessaan kestää 25 vuoden korrodoivat ympäristöolosuhteet. 25 vuoden jälkeen rungon teräksen korroosiosuojaukseen käytetyt sinkkianodit ovat yleensä kuluneet loppuun ja korrodoitumista on mahdotonta enää välttää. [10]

3.5.1. Rakennusolosuhteet Mäntyluodossa

Spar-lautan runko rakennetaan Mäntyluodossa. Koko rakentamisprojekti sekä sähkölaitteiden kokoonpano tehdään kokonaan rungon ollessa vaakatasossa. Vaakatasosta johtuen rakentaminen ja kokoonpano aiheuttavat haasteellisia asennusratkaisuja.

Sähkölaitteiden varastointi- ja asennusolosuhteet poikkeavat itse käyttöolosuhteista huomattavasti. Asennusta ja kokoonpanoa odottavat logiikkakaapit voivat olla useita viikkoja ulkovarastoissa myös talvella. Varastoinnin ajan ne ovat suojattuina muovilla kosteuden eristämiseksi. Asennuksen aikana laitteet ovat harvoin riittävästi suojattuna. Tällöin laitteiden kontaminoitumisriski kasvaa, koska aivan lähetyvillä voidaan samanaikaisesti maalata tai jopa hiekkapuhaltaa spar-lautan muita osia. Merkittävin laitteisiin kohdistuva uhka asennuksen aikana on kosteus. [10]

3.5.2. Kuljetusolosuhteet Suomesta Meksikonlahdelle

Spar-lautta kuljetetaan Meksikonlahdelle kuljetuslautan päällä vaakatasossa. Päästyään Meksikonlahdelle lautta uitetaan pois osittain upotetun kuljetusaluksen päältä ja hinataan tuotantopaikalleen, kuten kuvassa 3.14. Spar-lautta nostetaan vasta merellä pysty- asentoon, minkä jälkeen se ankkuroidaan lopulliselle sijoituspaikalleen, kuten kuvassa

3.15. Ankkuroimisen jälkeen rungon päälle asennetaan tuotantomoduuli. Kuvasta 3.16. voidaan nähdä, kuinka paljon kaikenlaista merenelävää on tarttunut lautan siihen osaan, joka on ollut merenpinnan alapuolella. Kokonaisuudessaan tuotantolautan kuljettaminen ja asentaminen lopulliselle sijoituspaikalleen kestää yleensä 3 – 12 kk. [10]



Kuva 3.14. SPAR-lautan rungon kuljetus Mäntyluodosta Meksikonlahdelle.



Kuva 3.15. SPAR-lautan rungon nosto paikoilleen Meksikonlahdella.



Kuva 3.16. Spar-lautan runko paikoillaan ja odottaa tuotantomoduulin asentamista.

Tuotantolautan kuljetus aiheuttaa hyvin suuren korroosioriskin sähkölaitteille. Kuljetuksen aikana lautalla ei ole sähköjä päällä eivätkä laitteet tuota silloin lämpöä. Myöskään sisätilojen ilmastoinnit eivät ole silloin toiminnassa, ja siksi huoneissa ja kaapeissa esiintyy käyttöolosuhteisiin nähden poikkeavia lämpötilanvaihteluita. Merellä ilmankosteus ja suolapitoisuus ovat korkealla tasolla. Yhdessä ilman kaasujen ja epäpuhtauksien kanssa sähkölaitteiden pinnoille muodostuu syövyttäviä yhdisteitä, kuten rikki-, typpi- ja suolahappoja. Myös mekaaninen tärinä saattaa rikkoa laitteita. Laitte tulisi suojata hyvin koko kuljetuksen ajaksi, jotta se kestäisi kuljetuksen aikana esiintyvät rasitukset. Laitteen kannalta olisi parasta, jos se pysyisi kuivana ja vapaana ilman epäpuhtauksilta koko kuljetuksen ajan. [10]

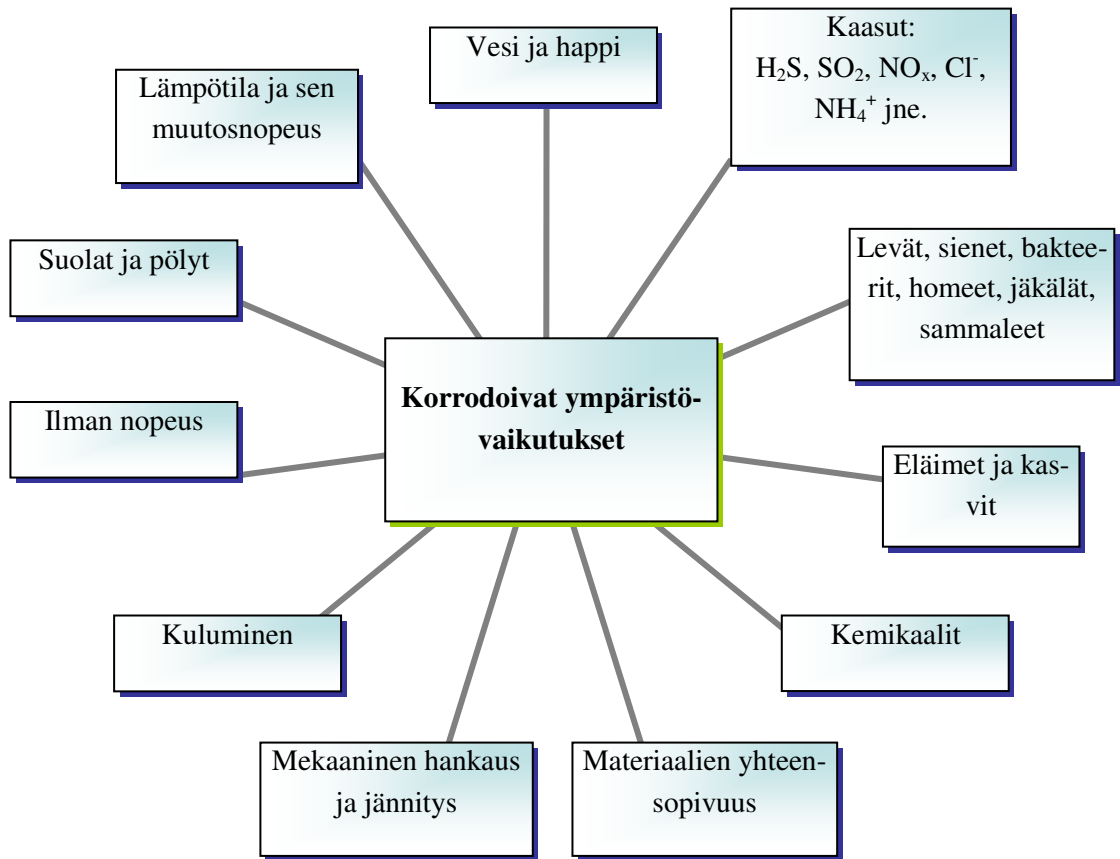
Öljy-yhtiö Chevronin tilaama Tahiti-niminen spar-öljyntuotantolautta valmistettiin Mäntyluodossa, kuva 3.1. Tahiti on ankkuroitu noin 300 km päähän New Orleansista etelään. Se tuottaa tälläkin hetkellä 125 000 barreilia öljyä ja 2 miljoonaa kuutiometriä kaasua joka päivä. [9]

Tahitin kuljetuksen ajaksi sen mukaan kiinnitettiin lämpötilan ja kosteuden mittausanturit. Anturit mittasivat tunnin välein lämpötilaa, kosteutta ja kastepistettä. Liitteessä 1 on esitetty kaavio antureiden mittaustuloksista matkan ajalta. Matka kesti yli 30 vuorokautta ja mittaustuloksia on yli 700. Kaaviosta huomaa, että lämpötilakäyrä myötäilee suhteellisen kosteuden käyrää päinvastaisesti. Suhteellinen kosteus on suurimmillaan lämpötilan ollessa alimmillaan ja päinvastoin. Kastepistekäyrä mukaillee lämpötilakäyrän kulkua. Suhteellinen kosteus vaihteli kuljetusmatkan aikana 22 – 78 % välillä, lämpötila 17 – 36 °C ja kastepiste 6 – 24 °C välillä.

4. OFFSHORE-OLOSUHTEET

Korroosion hallinnassa ympäristörasituksien tunteminen on olennainen osa suojausta. Ympäristöolosuhteet merellä ovat yleisesti hankalia, koska merivettä roiskuaa aaltojen ja tuulen mukana lähes kaikkialle. Kovien tuulien vuoksi sadekin voi tulla aivan vaakatasossa. Offshore-olosuhteet luovat siis sähkölaitteille hyvin korroidoivan toimintaympäristön.

Meksikonlahdella merellinen ilmasto on haastava, koska siellä on läpi vuoden lämmintä ja meren suolapitoisuus korkea. Elektronisten laitteiden kannalta pahimmat uhat ovat ilmasta tiivistyvä tai tippuva vesi, happi sekä epäpuhtaudet. Korroosio- ja kontaminaationopeuteen vaikuttavat mm. ilman virtausnopeus ja lämpötilan sekä suhteellisen kosteuden muutosnopeus. Ulkoilmassa erityisesti muovi- ja maalipinnoille ilman epäpuhtauksien lisäksi korroosioriskiä aiheuttaa auringon säteily. Myrskyt aiheuttavat ilmanpaineen vaihteluita ja voimakasta suolan leviämistä. Ilman mukana kulkeutuu tuhansittain erilaisia aineita, jotka voivat esiintyä kaasuina, nesteinä, ioneina tai suspensioina. Lisäksi kiinteät kappaleet, kuten hiekkapöly ja suolat, aiheuttavat korroosioriskiä. Korroosioon vaikuttavat lämpötilan lisäksi mekaaninen hankaus ja metallin jännitystilat. Ikävän lisänsä tuovat myös kasvit, biologiset eliöt kuten levät, homeet, bakteerit, sienet, eläimet ja niiden jätökset. Kuvassa 4.1. on nähtävissä tyypillisimmät korrodoivat ympäristövaikutukset. [4]



Kuva 4.1. Korrodoivat ympäristövaikutukset. [4]

4.1. Ilmasto

Maapallo on jaettu ilmastovyöhykkeisiin. Oleellisia ilmastotekijöitä ovat lämpötila ja sademäärä sekä niiden vuotuiset vaihtelut. Merellä lämpötila riippuu ensisijaisesti leveysasteesta, mutta myös pituusasteesta lämmön kulkeutumisen vuoksi. Leveysasteesta riippuvat myös sademäärät ja vuodenaikojen vaihtelut. Eri tuulivyöhykkeillä ilmassa kiertää erilaisia määriä kosteutta. Meret sitovat runsaasti lämpöä ja siksi vuodenaikojen vaihtelu ei ole merellä niin voimakasta. [15]

Kaukaisimmat öljyntuotantolautat sijaitsevat Meksikonlahdella muutaman sadan kilometrin etäisyydellä Yhdysvaltojen rannikosta. Meksikonlahteen rajoittuu 5 osavaltiota, Texas, Louisiana, Mississippi, Alabama ja Florida. Näihin osavaltioihin mahtuu 3 erilaista ilmastoa. Ensimmäinen on trooppinen ilmasto. Trooppisessa vyöhykkeessä kylmimmänkin kuukauden keskilämpötila on yli 18 °C. Vuodenaikojen vaihtelu liittyy enemmän sademäärään kuin lämpötilojen vaihteluun. Toinen on kuiva ilmasto. Kuiva vyöhyke on alue, jossa lämpenevän ilman suhteellinen kosteus on pieni. Sademäärä on vähäinen ja sää on yleensä selkeä. Kolmas ilmastotyyppi, joka rajautuu Meksikonlah-

teen, on kosteanlauhkea ilmasto. Kosteanlauhkeassa ilmastossa sataa melko runsaasti kaikkina vuodenaikoina. Meksikonlahden ilmasto-olosuhteisiin vaikuttavat monet erilaiset ilmastotyypit sekä Atlantin valtamerestä johtuvat merituulet ja virtaukset. [15]

Suomessa korroosioympäristöjen rasitusluokat ovat SFS-standardoituja. Taulukon 4.1. mukaan voidaan arvioida ilmaston aiheuttamaa ympäristörasitusta eri materiaaleihin.

Taulukko 4.1. Erilaisten korroosioympäristöjen rasitusluokat standardin SFS 4596 mukaan. [4]

Rasitusluokka	Korroosiorasitus	Ympäristö
M0	Rasitteeton	Kuivat, lämmitetyt ja ilmastoidut sisätilat
M1	Lievä ilmasto-rasitus	Lämmittämättömät sisätilat, joissa ilman lämpötila ja kosteus vaihtelevat
M2	Kohtalainen ilmasto-rasitus	Puhdas maaseutuilmasto, lämmitetyt sisätilat, joissa kondenssivaara
M3	Voimakas ilmasto-rasitus	Epäpuhdas ulkoilma <ul style="list-style-type: none"> • kaupunki-ilmasto • teollisuusilmasto • meri-ilmasto
M4	Erikoisrasitukset	Teollisuuslaitoksissa, kaivoksissa, maan- ja vedenalaisissa rakenteissa, joissa korroosiorasituksen aiheuttajia ovat: <ul style="list-style-type: none"> • syövyttävät kaasut • kemikaalipölyt • roiskeet • upotusrasitukset • mekaaninen rasitus • lämpörasitus • biologinen rasitus

4.1.1. Trooppiset hirmumyrskyt

Öljytuotantolautan kannalta erityistä tarkastelua vaativat trooppiset hirmumyrskyt. Hirmumyrskyt ovat voimakkaita matalapaineita, joissa tuulen nopeus on suuri. Atlantin alueella hirmumyrskyjä kutsutaan hurrikaaneiksi.

Trooppiset hirmumyrskyt kehittyvät usean ukkospilven rykelmistä, jotka alkavat kiertää kehää lämpimän meren päällä. Myrsky syntyy, kun meren pintalämpötila on vähintään 26 °C ja ukkospilvien nousuliikkeessä vapautuu veden tiivistyessä riittävästi lämpöenergiaa. Myrsky liikkuu virtauksien mukana, pasaatituulien alueella, yleensä länteen tai luoteeseen päin. Kehittyvän trooppisen myrskyn tuulet ovat kovia, ja matalapaineen halkaisija on yleensä 300 km. Jos nuori myrsky pysyy pidemmän aikaa lämpimän

meren päällä, siitä kehittyy hirmumyrsky. Hirmumyrskyn ytimen halkaisija kutistuu 50 kilometriin, samoin paine laskee rajusti sen sisällä. Paine voi ytimen sisällä olla vain 900 hPa, kun normaali ilmanpaine on 1013 hPa. Tuulen nopeus voi kasvaa jopa 60 metriin sekunnissa. Tuuli, aallokko ja sade ovat pahimmillaan myrskyn silmän edessä. Kokonaisuudessaan hirmumyrskyn ohi menemiseen voi kulua jopa yli 18 tuntia. [15]

4.1.2. Auringon säteily (UV) ja lämpötila

Auringonvalo lisää pintojen korrodoitumista merkittävästi. Ultraviolettisäteily (UV) rappeuttaa kaikkia pinnoitteita ja materiaaleja. Auringon säteilyteho on vuodenaikasta ja paikasta riippuen noin $1\,000\text{ W/m}^2$. Se lämmittää tehokkaasti kaikkia säteilylle alttiita pintoja. Säteilylämpö aiheuttaa veden kondensoitumista laitteen tai kotelon sisäpinnoille. Tyypillinen tilanne on sellainen, että ulkotiloissa oleva laitekaappi lämpenee vain auringon puoleiselta sivultaan. Silloin laitteen sisällä oleva vesi haihtuu lämpimän seinän puolelta nostaen ilman vesipitoisuutta. Haihtunut vesi kondensoituu kylmemmälle pinnalle, ja tästä syystä varjoon jäävän seinän korrodoituminen on nopeampaa kuin auringon puoleisen sivun. Lämpötilalla on myös suuri vaikutus laitekotelon ilmanvaihtoon. Ilma vaihtuu jo hyvin aivan tavallisilla lämpötilan muutoksilla, jos laitekaapissa on avoimia aukkoja. Lämpötilan muutokset aiheuttavat laitekaapin sisällä ilmanpaineen vaihteluita, mistä on kerrottu enemmän kohdassa 4.2.2. Ilmanpaineen vaihtelut. [4]

4.2. Kaasut ja ilmanpaine

Elektroniikan kestävyys on hyvin riippuvainen ympärillä olevasta ilmasta. Laitteet ovat sitä alttiimpia ilmassa olevien kaasujen kosketukselle, mitä suurempi on kaasujen pitoisuus ja mitä nopeampi on ilmavirtaus.

Maapallon ilmakehän paine on merenpinnan korkeudella noin 1,013 bar. Ilmakehä koostuu typestä (78,08 %), hapestä (20,95 %), argonista (0,93 %) ja hiilidioksidista (0,03 %). Lisäksi ilma sisältää vähäisiä määriä typen ja rikin oksideja sekä vetyä. Luonnossa ilma ei kuitenkaan koskaan ole täysin kuivaa, vaan vesihöyryn osuus voi olla kuumassa tropiikissa jopa 7 %. Myös ilmassa olevien kiinteiden hiukkasten osuus vaihtelee suuresti. Ilma on useiden kaasujen seos. [16] Taulukosta 4.2. voidaan tarkastella puhtaan kuivan ilman koostumusta merenpinnan tasolla.

Taulukko 4.2. Puhtaan kuivan ilman koostumus merenpinnan tasolla. [16]

Alkuaine	Pitoisuus (til.-%)
typpi N ₂	78,08
happi O ₂	20,94
argon Ar	0,93
hiilidioksidi CO ₂	0,03
neon Ne	0,002
helium He	0,0002
krypton Kr	0,0001

Kaasut koostuvat toisistaan etäällä olevista molekyyleistä, jotka ovat erillään toisista ja nopeassa liikkeessä. Kaasuja voidaan puristaa kokoon, jolloin kaasumolekyylit pakotetaan lähemmäksi toisiaan. Kaasu vastaavasti laajenee täyttäen minkä tahansa astian, johon sitä tuodaan. Koska kaasumolekyylit ovat jatkuvassa ja nopeassa liikkeessä, kaasut diffundoituvat. Diffuusio on ilmiö, jossa molekyylit pyrkivät siirtymään väkevämmästä pitoisuudesta laimeampaan tasoittaan mahdolliset pitoisuuserot ajan mittaan. Kaasumolekyyliden satunnaisen liikkeensä takia ne törmäilevät ympärillään oleviin seinämiin. Näiden törmäyksien johdosta syntyy ilmiö, jota voidaan mitata kaasun paineena. [16]

Kaasun paine mitataan voimalla, jonka kaasu kohdistaa astian seinämiin jaettuna astian pinta-alalla seuraavan kaavan 10 mukaisesti:

$$p = \frac{F}{A}, \quad (10)$$

missä F on kaasun astian seinämiin kohdistama voima ja A astian pinta-ala.

Paineen SI-yksikkö on *pascal* [Pa], joka vastaa yhden *newtonin* [N] painetta ($1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2$) neliömetriä kohti seuraavan kaavan 11 mukaisesti:

$$1 \text{ Pa} = \frac{1 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2}{1 \text{ m}^2} = 1 \text{ N} / \text{m}^2 \quad (11)$$

Tekniikassa käytetään paineen yksikkönä myös *baaria* (lyhennettynä bar), joka on 10^5 Pa. [16]

Ilmanpaine vaihtelee jatkuvasti ja siksi se on eri paikoissa ja eri päivinä erisuuruinen. 1 ilmakehän paine (1 atm) merenpinnan korkeudella 0 °C:ssa on elohopeapylvään 760 mm korkeus (torr). Normaali ilmanpaine määritellään pascal-yksiköiksi seuraavalla tavalla:

$$1 \text{ atm} = 1,01325 \text{ bar} = 760 \text{ torr} = 101,325 \text{ kPa}. [1]$$

4.2.1. Kaasulait

Jotta pystytään ymmärtämään, miten ilma käyttäytyy laitekotelossa ja sen ulkopuolella, on kaasulakien tarkastelu perusteltua. Ensimmäinen on Boylen laki. Boylen lain mukaan vakioämpötilassa kaasun tilavuus (V) on kääntäen verrannollinen kaasun paineeseen (p) seuraavan kaavan 12 mukaisesti:

$$V = \frac{k}{p} \text{ eli } pV = k, \quad (12)$$

missä k on verrannollisuuskerroin riippuen kaasun määrästä ja lämpötilasta. [1]

Kun kaasu lämpenee vakioaineessa, se laajenee. Paineen ollessa vakiona jokaista celsiusasteen lämpötilan nousua kohti kaasun tilavuus kasvaa $\frac{1}{273}$ siitä arvosta, joka sillä oli 0 °C:ssa. Tilavuus kasvaa säännöllisesti lämpötilan noustessa, mutta tilavuus ei ole suoraan verrannollinen celsiuslämpötilaan. Termodynaamisessa lämpötila-asteikossa lämpötilat esitetään kelvineinä (K), jolloin lämpötiloista käytetään tunnusta T eikä t, kuten celsiusasteikossa. Gay-Lussacin lain mukaan minkä tahansa kaasun tilavuus on suoraan verrannollinen termodynaamiseen lämpötilaan, kun paine pysyy vakiona seuraavan kaavan 13 mukaisesti:

$$V = k'T, \quad (13)$$

missä k' on verrannollisuuskerroin, joka riippuu paineesta ja kaasun määrästä. [1]

Suljetussa tilassa olevan kaasun paine kasvaa, kun kaasua kuumennetaan. Amontoinin lain mukaan kaasun paine on suoraan verrannollinen termodynaamiseen lämpötilaan, kun tilavuus on vakio seuraavan kaavan 14 mukaisesti:

$$p = k''T, \quad (14)$$

missä k'' on verrannollisuuskerroin, joka riippuu kaasumäärästä ja sen tilavuudesta. [1]

Edellä mainitut lait voidaan yhdistää siten, että saadaan ihannekaasujen tilayhtälö seuraavan kaavan 12 mukaisesti:

$$pV = nRT, \quad (12)$$

missä n on kaasumoolien lukumäärä ja R yleinen kaasuvakio $8,3145 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$. Kaasuvakiota kutsutaan myös Avogadron vakioksi. [1]

4.2.2. Ilmanpaineen vaihtelut

Kytkenäkaappien ja sähkölaitteiden sisällä tapahtuu ilmanpaineen vaihteluita. Paineen vaihtelut johtuvat lämpötilan muutoksista koteloiden sisällä ja ulkona. Vaikka IP-luokitettuja kaapit ja kotelot suojaavat sähkölaitteita vesiroiskeilta, ne eivät ole ilmatiiviitä. Sisä- ja ulkoilmat ovat yhteydessä toisiinsa siten, että kotelon ilman lämmitessä ilmanpaine kasvaa ja ilma pyrkii tulemaan sieltä ulos. Vastaavasti kotelon ilman jäähtyessä ympäröivää ilmaa alemmaksi ilmanpaine laskee ja kotelon sisään alkaa imeytyä ympäröivää ilmaa. Kotelon sisällä käynnissä oleva sähkölaitte lämmittelee kotelon sisäilmaa, jolloin lämmin ilma pyrkii ulos. Vastaavasti sähkölaitteen sammuaessa ilma alkaa jäähtyä kotelon sisällä, jolloin sisäilma alkaa ”imemään” ulkoilmaa sisäänsä. Alipaineen vuoksi ulkoilmasta saattaa tulla ilman mukana kosteutta ja epäpuhtauksia. [17]

4.3. Ilmankosteus ja vesi

Ilmaa voidaan tarkastella kuivan ilman ja vesihöyryn seoksena, koska ilmakehän alaosissa kaasujen seossuhteet pysyvät suunnilleen vakioina, vain vesihöyryn osuus vaihtelee. Vesihöyryn määrää voidaan ilmassa kuvata usealla eri tavalla käyttötarkoituksen mukaan. Kaikissa kuvauksissa otetaan huomioon vain todellinen vesihöyry. Veden muita olomuotoja ei oteta huomioon. Absoluuttinen kosteus ilmoittaa, kuinka monta grammaa vettä on esimerkiksi kuutiometrissä ilmaa. Huoneilmassa on vettä tyypillisesti noin 10 grammaa kuutiometrissä. Absoluuttisella kosteudella on yläraja, niin sanottu kyllästyskosteus. Kyllästyskosteus määrittelee, paljonko vesihöyryä ilmassa voi olla kussakin lämpötilassa. Lämmin ilma voi sisältää enemmän vesihöyryä kuin kylmä ilma. Vesihöyry alkaa tiivistyä pisaroiksi, jos ilmaan haihtuu väkisin vettä yli kyllästyskosteuden. Samoin käy ilman jäähtyessä, jolloin myös kyllästyskosteus laskee. Suhteellinen kosteus puolestaan ilmoittaa, montako prosenttia absoluuttinen kosteus on vallitsevan lämpötilan kyllästyskosteudesta. Kastepistelämpötila eli kastepiste on lämpötila, johon ilman pitää jäähtyä kyllästystilan saavuttamiseksi. Jos laitekotelo on kylmempi kuin kastepiste, sen pintaan muodostuu kastetta. Absoluuttinen kosteus ja kastepiste ovat ominaisuuksia, jotka riippuvat vain vesihöyryn osuudesta ilman kaasuseoksessa. Suhteelliseen kosteuteen vaikuttaa myös lämpötila. [15] Kuva 4.2. on otettu heinäkuussa 2008 keskipäivällä Tahiti-lautan kannella Meksikonlahdella. Mittarin mukaan suhteellinen kosteus on 79,5 % ja lämpötila 26,3 °C.



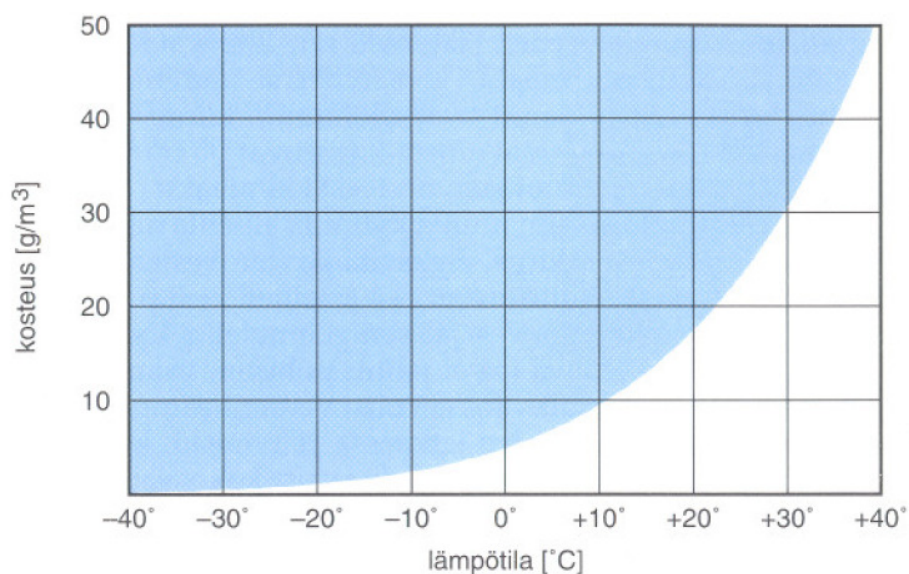
Kuva 4.2. Kosteus- ja lämpömittarin lukemat lautan kannella keskipäivällä.

Esimerkki

Sähköhuoneen ilman lämpötila on 30 °C ja kyllästyskosteus $30,0\text{ g/cm}^3$. Ilmassa on kosteutta 10 g/cm^3 . Ilman suhteellinen kosteus voidaan laskea kaavan 13 mukaan seuraavasti jakamalla ilmankosteus kyllästyskosteudella:

$$\frac{10}{30} \approx 0,33333 = 33\% \quad (13)$$

Kuvasta 4.3. nähdään, että 11-asteisen ilman kyllästyskosteus on 10 g/cm^3 . Tämä tarkoittaa, että jos ilmaa jäädytetään 30 asteesta 11 asteeseen, kosteus alkaa tiivistyä. [15]



Kuva 4.3. Veden kyllästyskosteus eri lämpötiloissa mitattuna. [15]

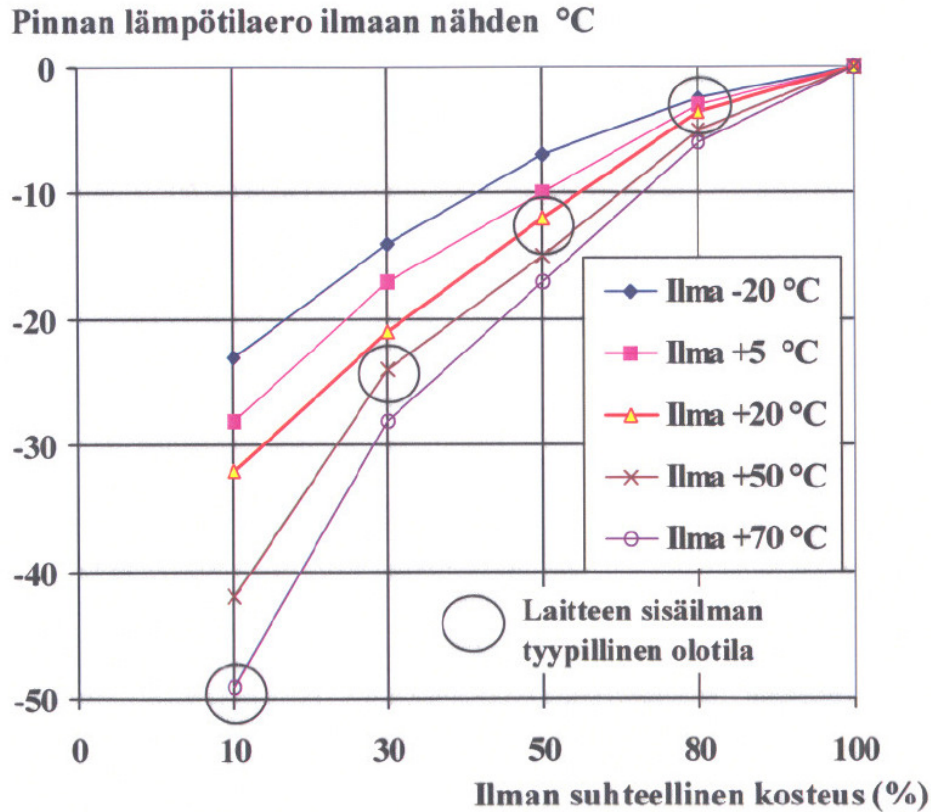
Kosteus ja vesi vaikuttavat sähkölaitteisiin tuotantolautalla seuraavilla tavoilla:

- Ilman kosteus absorboituu materiaaleihin. Esimerkiksi 25 °C:n lämpötila ja 61 %:n suhteellinen kosteus 200 tunnin vaikutusajan verran ajaa vettä IC-kotelomuoviin 0,15 % sen painosta.
- Laitteisiin absorboitunut vesi muuttaa materiaalin johtavuutta ja dielektrisyysvakiota ϵ_r sekä kasvattaa häviötä materiaalissa.
- Komponenttien kotelot turpoavat ja niissä olevat epäpuhtaudet irtoavat.
- Lämpötilan vaihtelut mahdollistavat veden kondensoitumisen, jolloin ilman kosteus kondensoituu vedeksi ilmaa kylmemmille pinnoille.
- Kosteus diffundoituu materiaalien läpi ilman paineen sekä kosteus- ja lämpötilaerojen vaikutuksesta.
- Valuva vesi kertyy rakenteiden väliin ja koloihin sekä pintojen epätasaisuuksiin.
- Sade tunkeutuu laitteiden ja koteloiden sisään.
- Aurinko lämmittää laitteen toista sivua, jolloin laitteen kylmälle sivulle kondensoituu vettä.
- Laite joutuu veden alle tai sitä käytetään kokonaan veden alla.
- Ihmisen toimesta aiheutuvat vesivahingot. [4]

4.3.1. Kosteuden kondensoituminen laitteen pinnoille

Korroosio kiihtyy huomattavasti jo ilman yli 50 %:n suhteellisilla kosteuksilla. Tämä merkitsee sitä, että laitteen sisäosien pintojen pitäisi olla ainakin 10 – 20 °C tai jopa enemmän ympäristöään lämpimämpiä. Tällä voitaisiin varmistaa, että pintoja pyyhkivän ilman kosteus pysyisi alle 50 %:n suhteellisen kosteuden. Käytännössä tämä voidaan tehdä lisäämällä lämmittimiä laitteiden sisään. Kuvasta 4.4. käy ilmi, että suhteellisella kosteudella 80 % tapahtuu kondensoituminen vain 2 – 6 °C ilmaa viileämmillä pinnoilla. Vastaavasti suhteellisen kosteuden ollessa 50 % vesi kondensoituu vasta 7 – 16 °C ilmaa viileämmillä pinnoilla. [4]

Kytkenäkaappien sisällä olevan kosteuden vähentäminen ei ole aivan yksinkertaista ainakaan jäähdytyksen yhteydessä. Jäähdytettävien laitteiden ympärillä olevan ilman suhteellinen kosteus jää yleensä melko korkeaksi, koska puhallettava jäähdytysilma ehtii harvoin nousta yli 10 °C kulkiessaan laitteiston läpi. Mikäli laitteen sisälle imetään tai puhalletaan ulkoilmaa, jonka vesipitoisuus on 10 g/m³ ja nopeus kohtuullinen (~0,3 m/s), kohtaavat sisääntulokohdan läheisyydessä olevat pinnat ulkoilman sellaisenaan. Ulkoilman suhteellinen kosteus on sisään tullessa vielä noin 80 %, koska sisään tuleva ilma ei ole ehtinyt vielä yhtään lämmentä. Kun suhteelliselta kosteudeltaan suuri ja viileä tuloilma osuu lämpöä tuottamattomiin osiin, kuten piirilevyliittimiin, se aiheuttaa niiden pinnoille melko suuren korroosioriskin. Lisäksi piirilevyn toimintaan saattaa muodostua toimintahäiriöitä, kun tuloilman kosteus tiivistyy vedeksi piirilevyn pintaan. [4]



Kuva 4.4. Laitteessa mitatun pinnan lämpötilaero ilmaan nähden, kun saavutetaan ilman kastepiste eri lämpötiloilla ja kosteuksilla. [4]

4.4. Suolat

Merivesi on suolaliuos, johon on pääasiassa liuennut natriumkloridia (NaCl). Atlantin valtamerellä Meksikonlahdella meren suolapitoisuus on 2,8 – 3,6 % vaihdellen vuodenajan mukaan. NaCl on merkittävin kaikista korroosiota aiheuttavista aineista. Suolavedessä on paljon ioneja, jotka lisäävät veden sähkönjohtokykyä. Hyvä sähkönjohtokyky parantaa sähkövirran kulkua metallin pinnalla olevissa mikroskooppisissa sähköpareissa. Merivedessä on runsaasti Cl⁻-ioneja, ja niiden on todettu jopa kiihdyttävän elektrodi-reaktiota katalyyttisesti. [3; 18] Merestä suola kulkeutuu sumun tai aaltojen mukana tuotantolautan kannelle ja sisätiloihin. Taulukossa 4.3. on esitetty meriveden pääaineosat ja koostumus.

Taulukko 4.3. Meriveden pääaineosat ja koostumus. [3]

Meriveden pääaineosat, suolaisuus = 19 ‰		
Anionit	ppm	mEkv
Kloridi	18980	535,3
Sulfaatti	2649	55,2
Bikarbonaatti	142	2,3
Bromidi	65	0,8
Fluoridi	1,4	0,07
Boraatti	24,9	0,58
		594,25
Kationit	ppm	mEkv
Natrium	10561	459
Kalium	380	9,7
Magnesium	1272	104,4
Kalsium	400	20,0
Strontium	13	0,3
		593,8

ppm = parts per million: suhteellinen pitoisuusmitta, joka ilmaisee, kuinka monta miljoonasosaa jokin on jostakin

mEkv = milliekvivalentti: yksikkö, joka kertoo liuoksessa olevien varausten määrän litraa kohden

4.5. Pöly

Öljyntuotantolauttaa rakennettaessa sekä myös tuotantovaiheessa sähkölaitteiden ympäristössä on paljon erilaisia pölylähteitä. Puhutaan aerosoleista, jotka ovat kaasun ja hiukkasten seoksia. Aerosoleja ovat ilmassa leijuvat pölyt, sumut, savut ja huurut. Pölyllä on useita eri käyttötarkoituksiin luotuja määritelmiä, kuten ISO 4225 ja IUPAC. Pölyt ovat kiinteitä hiukkasia, joiden koko vaihtelee alle 1 µm:stä vähintään 100 µm:iin. Niiden kulkeutuminen ja pysyminen ilmassa riippuu niiden alkuperästä, fysikaalisista ominaisuuksista ja muista ympäristöehdoista. [19]

Tyypillisimpiä hiukkasia, jotka saattavat esiintyä tuotantolautan rakennus- ja tuotantovaiheessa ovat:

- mineraalipölyt
- metallipölyt, lyijy-, kadmium- ja berylliumpöly
- kemikaalipölyt, kemikaalit irtotavarana, maalit, torjunta-aineet
- orgaaniset ja kasviperäiset pölyt, puu
- home ja siitepöly
- hiekka
- tulipalosta syntyvä savu ja noki

Kaikki ilmassa olevat hiukkaset pystyvät kulkeutumaan sisälle sähkölaitteisiin ilmavirran mukana. Hiukkasten osuminen laitteeseen on sitä tiheämpää, mitä kovempi on ilmavirtaus. Hiukkaset aiheuttavat laitteisiin kontaminaatiota, jonka seurauksena ilmenee käyttöhäiriöitä sekä mekaanista rikkoutumista.

5. SUOJAUSMAHDOLLISUUDET KORROOSION VÄLTÄMISEKSI

Sähkölaitteen toimivuuden kannalta on tärkeää, että korroosioon johtavien ympäristö-
rasitusten määrää pystyttäisiin vähentämään erilaisin suojauskeinoin. Ilmaston aiheut-
tamaa korroosiota voidaan estää monin tavoin. Oleellista on tunnistaa, minkälaiset il-
mastolliset olosuhteet ovat. Elektroniikan suojaamisessa olisi ensisijaisesti minimoitava
ne korroosiota aiheuttavat tekijät, joita voidaan ilmastollisesti hallita, esimeskiksi sisäti-
loissa käytettävä ilmastointi. Toiseksi merkittävin suojausmenetelmä on laitevalinnat ja
kolmanneksi suojaustekniikka.

Laitteen ympärillä oleva mikroilmasto hallitsee korroosion muodostumisnopeutta.
Mikroilmastoon kuuluvat laitteen sijaintipaikka (ulko- vai sisätila), lähiympäristö ja lait-
teen sisällä oleva ilmatila. Korroosiosuojausta suunniteltaessa olisi hyvä huomioida seu-
raavia laitevalintoihin ja niiden ympäristöön liittyviä seikkoja:

- Laitteen mekaaninen kotelointi ja tiiveysluokka
- Avoin tai suljettu ilmankierto
- Saastuneen ilmankierron ja kulun vähentäminen
- Jäähdytystä vaativat laitteet eri tiloissa

Laitteiden sijoittelu pitää tehdä siten, että kondenssivesi ei pääse tippumaan suoraan
liittimiin ja piirilevyihin. Liitosmateriaalien tulee olla yhteensopivia, koska pienin kor-
roosioriski on metalleilla, joiden sähköinen pintajännite on lähellä toisiaan. Vaikka kor-
kea lämpötila ja kosteus kiihdyttävät galvaanista korroosiota, sen riski kuitenkin piene-
nee, kun käytetään liitoksissa samoja metalleja. Oikeat laitevalinnat ovat osa kor-
roosiosuojausta. Piirilevyjen johdinkuvio pitää olla suojattu esim. pinnoitteilla. Pinnoit-
teet suojaavat elektroniikkaa myös kokoonpanon ja huoltojen yhteydessä. Offshore-
olosuhteet ovat niin ankaria, että olisi aiheellista käyttää sellaisia komponentteja sisältä-
viä piirilevyjä, jotka on upotettu kokonaan suojaavaan lakkaan. [4]

Suunnittelijalla, alihankkijalla, laitteen tilaajalla tai ostajalla pitää olla tietoa ja
osaamistasoa korroosion suhteen. Tuotantolauttaan valittu tuote ja laite pitää olla laadu-
kas ja korroosiokestävyydeltään hyvä. Laitteiden pitää olla korroosiosuojattuja logistii-
kan, asennusajan ja myös asennusajan jälkeenkin, jotta laitteet toimivat hyvin vielä
määränpäässään merellä. Laitteiden pitää olla hyvin spesifioituja korroosionsieto-
muksiltaan. Hyvä yhteistyö kaikkien toimijoiden kesken lisää tietoisuutta ja oikeita lai-
tevalintoja. Laitevalinnoissa voi käyttää apuna erilaisia standardeja, joissa määritellään
laitteen käyttöluokat. Lisäksi valmistajat toimittavat yleensä preservation-dokumentin
eli ohjeen, jossa kerrotaan, miten laite pitää suojata ja säilyttää mm. kuljetuksen ja va-

rastoinnin aikana. Ohjeissa on yleensä myös maininta siitä, tarvitaanko suojaukseen esimerkiksi kuivausainepusseja. [4]

5.1. Sähkölaitteiden sijoittelu

Sähkölaitteiden korroosiota voidaan minimoida huolellisella laitteiden sijoitussuunnittelulla. Kytkenäkaappien sijoitussuunnittelussa voidaan vaikuttaa sähkölaitteiden läheisyydessä olevaan ilman laatuun seuraavilla tavoilla:

- Sijaintipaikan valitseminen: sisä-/ulkotilat
- Lähiympäristön olosuhteet
- Sisäosien olosuhteet

Spar-lautan kytkentäkaappien laitetilän korrosioherkkyyteen voidaan vaikuttaa vähentämällä pöly- ja suolakontaminaatiota, estää kostuminen ja minimoida kaasukontakteja.

5.2. Galvaaninen korroosiopari

Korroosionestossa voidaan hyödyntää galvaanista korroosioparia. Tätä kutsutaan niin sanotusti katodiseksi suojaukseksi. Katodisessa suojauksessa suojattava metalli kytetään epäjalompaan metalliin. Merivedessä teräs voidaan suojata magnesium- tai sinkkianodeilla. Ilmastollisessa rasituksessa teräs tai vastaava metalli voidaan suojata pinnoittamalla se epäjalommalla metallilla, kuten sinkillä. [3]

5.3. Korroosionestoaineet ja niiden koostumus

Korroosionestoaineet voivat muodostua hyvin erilaisista komponenteista. Tyypillisimpiä ovat kalvon muodostavat aineet, korroosionestoinhibiitit, liuottimet, vettä syrjäyttävät aineet sekä neutraloivat aineet. Varsinainen korroosionesto saadaan muodostettua mineraaliöljyistä, rasvoista, vahoista, bitumista, vaseliinista tai muovista muodostuvalla kalvolla. Aineet vaikeuttavat kosteuden, hapen ja epäpuhtauksien pääsyä metallipinnalle. Muodostunut suojakalvo on harvoin täysin tiivis, joten korroosionestokykyä parannetaan inhibiiteillä. Ohuen ja tasaisen suojakalvon saamiseksi korroosionestoaineisiin lisätään orgaanisia liuottimia. Lisäksi niihin voidaan lisätä vettä syrjäyttäviä aineita, jotta levitys onnistuu myös kosteille pinnoille. Neutraloivia aineita käytetään puolestaan sitomaan korroosiota aiheuttavia aineita, kuten suoloja ja heikkoja happoja. Liitteessä 3 on taulukoitu eri inhibiittien suojaustehokkuutta tyypillisillä elektroniikkaan käytettävillä metalleilla. [4]

5.4. Korroosioinhibiittorit

Korroosioinhibiitti on korroosionsuojauksessa käytettävä aine, joka jo alhaisinakin pitoisuuksina pienentää metallien korroosionopeutta. Inhibiittoreita lisätään korroosioym-

päristöön joko kaasuun tai nesteeseen. Korroosioinhibiittejä luokitellaan eri tyyppeihin. Muutamia yleisempiä ovat adsorptioinhibiitit, kalvonmuodostajat ja hapettavat inhibiitit. Inhibiitit soveltuvat vain tietyille metalleille, koska ne ovat toiminnaltaan valikoivia. Vääränlaisen inhibiitin valinta voi olla jopa haitallista metallille. Inhibiittien valinnassa on otettava huomioon monta eri asiaa, jotka esitellään seuraavissa kappaleissa. [3]

5.4.1. Inhibiittien pitoisuus

Inhibiittien tehokkaan toiminnan varmistaminen edellyttää tiettyä minimipitoisuutta korroosioympäristössään. Jos tätä minimipitoisuutta ei täytetä, korroosio voi olla paikallisesti jopa voimakkaampaa kuin ilman inhibiittiä. Inhibiittejä kuluu koko käytön aikana. Tämän vuoksi alkuannostus ei pelkästään välttämättä riitä parhaimman tuloksen saavuttamiseksi. Inhibiitin määrää vähenee monestakin syystä. Suojaavan kerroksen lisäksi kohteen ympäristöön voi tulla vuotoja, jolloin inhibiittien suojaus teho menetetään. Lisäksi metallin pinnalla voi jo olla korroosiotuotteita, jolloin inhibiitit adsorboituvat sen pintaan. Myös veden biologiset ympäristötekijät, kuten levä-, bakteri- ja sienikasvillisuus kuluttavat inhibiittejä. Riittävän korroosionsuojan saamiseksi inhibiittejä on käytettävä alkutilanteessa minimipitoisuutta enemmän. Lisäksi inhibiittien pitoisuutta eli tehokkuutta on aina ajoittain lisättävä suojattavaan kohdeympäristöön. [3]

5.4.2. Aggressiivisten ionien vaikutus

Aggressiivisista ioneista tunnetuimpia ovat kloridit ja sulfaatit. Muita samaan ryhmään kuuluvia ioneja ovat halidit, sulfidit ja nitraatit. Neutraalissa vesiliuoksessa, jonka pH-luku on suurempi kuin 5,5, aggressiiviset ionit jopa vastustavat inhibiittien tehoa. Korroosiosuojaukseen vaadittava inhibiittipitoisuus kasvaa aggressiivisen ionipitoisuuden mukana. Kiinteät ja kaasumaiset epäpuhtaudet liukenevat kondensoituvaan veteen muuttaen sen pH-lukua korroosiolta suojattavassa ympäristössä. Veden pH-luvun kasvassa myös tarvittava inhibiittien määrä kasvaa. [3]

5.4.3. Metallipinnan luonne

Metallipinnan laadusta riippuu, kuinka paljon inhibiittiä tarvitaan suojaustehon ylläpitämiseksi. Puhdas ja kiiltävä pinta vaatii alhaisen inhibiittipitoisuuden. Karkean ja epätasaisen pinnan suojauksen määrä kasvaa monin kerroin. Myös metallin pinnalla olevat epäpuhtaudet, ruoste yms. kerrostumat lisäävät tarvittavaa inhibiittipitoisuutta. Saostumat estävät inhibiittien pääsyn metallin pinnalle. Kontaminaatiot tulisi poistaa aina ennen inhibiittien laittamista, koska niiden pitoisuus voi laskea radikaalisesti kontaminaation ja inhibiittien välisen reaktion vaikutuksesta. [3]

5.4.4. Lämpötilan vaikutus

Useimmiten lämpötilan nousu vaikuttaa edullisesti metallipinnan ja inhibiittien välisessä kemiallisessa vuorovaikutuksessa. Niissä tapauksissa, joissa lämpötilan kasvu paran-

taa kemisorptiota ja inhibointia, tarvitaan matalampia inhibiittipitoisuuksia. On olemassa inhibiittejä, joiden teho laskee lämpötilan noustessa, mutta niitä ei tarkastella tässä diplomityössä sen tarkemmin. [3]

5.4.5. Mikro-organismien vaikutus

Mikro-organismit vaikuttavat inhibiittien tehokkuuteen seuraavasti:

- Bakteerit osallistuvat suoraan metallin korroosioon vastustaen samalla inhibiittien toimintaa.
- Sieni- ja leväihmaston kasvu suojattavilla pinnoilla.
- Inhiibitit saattavat toimia ravinteina joillekin mikrobiologisille organismeille. [3]

5.4.6. Metallin luonne

Inhibiittien tehokkuus vaihtelee eri metalleilla ja metalliryhmillä. Natriumnitriitti (NaNO_2) on tehokas suojaamaan rautametalleja, mutta ei sinkkiä. Natriumbentsoaatti suojaa tehokkaasti korroosiolta hiiliteräksiä, mutta ei valurautaa. Vaikea suojausyhdistelmä on kupari ja alumiini. Kuparin suojaaminen epäonnistuneesti inhibiiteillä voi johtaa alumiinin lisääntyvään korroosioon sillä seurauksella, että kupari-ionit kulkeutuvat kosteuden mukana ja saostuvat alumiinin pinnalle. [3]

5.4.7. Yhdistelmäinhiibitit

Nykyään käytetään enää harvoin inhibiittejä yksittäisinä yhdisteinä. Kahden, kolmen tai useamman inhibiitin yhdistelmät ovat käytetyimpiä. Vain yhden metallin suojaamiseen yksittäinen inhibiitti on tehokas ratkaisu. Monimetallisysteemit vaativat kuitenkin useamman kuin yhden inhibiitin läsnäolon. Useista inhibiittityypeistä koottua yhdistelmäsuojaa kutsutaan synergistiseksi käsittelyksi. Sinkki-kromaatti -inhibiitin yhdistelmässä sinkki suojaa materiaalia katodisesti ja kromaatti anodisesti. Sinkki-fosfonaateilla suojataan erityisesti kuparimetallia. Natriumbentsoaatin ja bentsotriatsolin (BTA) yhdistelmä suojaa sekä terästä että kuparimetallia. [3]

5.4.8. Inhibiittien luokittelu

Inhibiittien luokitteluun eri tyyppeihin ja ryhmiin on monta eri tapaa. Tässä diplomityössä ryhmittely on ensin jaettu korroosio-ajattelun mukaan seuraavasti:

- Anodiset inhibiitit
- Katodiset inhibiitit

Luokittelu perustuu siihen, polarisoiko inhibiitti anodista tai katodista reaktiota. Sähkölaitteiden osalta anodinen suojaus on merkittävämpi. Anodisessa suojauksessa estetään metallin liukenemista, kun taas katodisessa estetään liuoksissa tapahtuvaa hapen pelkistymistä tai veden kehittymistä. [3]

Anodisia inhibiittejä käytetään hidastamaan metallin korroosionopeutta. Toimintatapa perustuu siihen, että inhibiitit kasvattavat anodista liukenemisprosessin polarisatiota. Ne ovat usein hapettavia anioneja. Hapettavat anionit kulkeutuvat anodipinnoille ja muodostavat siihen liuenneen hapen kanssa passiivifilmin. Liian pieninä pitoisuuksina anodiset inhibiitit voivat pahentaa korroosiota. On tärkeää, että korroosion estossa inhibiittejä annostellaan riittävästi. Liian vähän annosteltu inhibiitti suojaa vain osittain anodipintaa, jolloin suojaamattomaan alueeseen syntyy pistekorroosiota. Tärkeimpiä anodisia epäorgaanisia inhibiittejä ovat:

- Kromaatit. Ne ovat erittäin tehokkaita, mutta myrkyllisiä.
- Nitriitit. Käytetään rautametallin suojaukseen.
- Liukeneva natriumsilikaatti eli vesilasi ($\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$). Turvallinen ja halpa inhibiitti. Suojaa rautametallia, lyijyä, kuparia ja sen seoksia.
- Natriumbentsoaatti. On karboksyylihapon suola ja estää tehokkaasti hiiliteräksen korroosiota. [3]

Katodiset inhibiitit ovat useimmiten kationeja. Kationit vaeltavat katodipinnoille alentaen katodista virrantiheyttä, korroosipotentialia ja korroosiovirtaa. Katodiset inhibiitit ovat tehokkaita, koska ne pienentävät korroosioreaktiolle välttämätöntä katodista pintaa. Katodiset inhibiitit eivät myöskään aiheuta pistekorroosiota. Katodisia inhibiittejä ei käytetä suoraan elektroniikan suojaukseen käyttöominaisuuksiensa vuoksi, koska inhibiitit lisätään liuokseen. Tyypillisiä vesiliukoisia katodisia inhibiittejä ovat polyfosfaatit ja kalsiumbikarbonaatit.

- Mono-, di-, tri- ja polyfosfaatit ja orgaaniset fosfaatit. Käytetään pääasiassa teräksen, raudan ja sinkin suojaukseen.
- Booriyhdisteet ovat halpoja ja myrkyttömiä. Käytetään teräksen ja sinkin suojaukseen.
- Kalsium-, nikkeli-, mangaani- ja sinkkisuolat ovat neutraalien liuosten inhibiittejä. [3]

Inhibiitit voidaan luokitella muillakin tavoilla, kuten orgaaniset ja epäorgaaniset inhibiitit, joiden jako perustuu inhibiittien kemialliseen luonteeseen. Epäorgaanisia inhibiittejä ovat muun muassa kromaatit, nitriitit, fosfaatit, silikaatit ja boraatit. Lisäksi inhibiitit voidaan luokitella hapettaviin ja ei-hapettaviin inhibiitteihin. Jako perustuu kykyyn passivoida metallia. Elektroniikan kannalta merkittävä inhibiittien jako on liuoksessa ja kaasufaasissa toimivat inhibiittorit. [3] Seuraavassa kappaleessa kerrotaan enemmän sähkölaitteiden suojaukseen käytettävistä kaasufaasi-inhibiittoreista.

5.4.9. Kaasufaasi-inhibiittorit

Kaasufaasi-inhibiittoreita käytetään suojaamaan elektroniikkaa varastoinnin ja kuljetuksen ajaksi, mutta tietyissä olosuhteissa niitä pystytään käyttämään myös laitteiden käytön ja huollon aikana. Kaasufaasi-inhibiittoreita käytetään vähentämään metallipintojen

korroosiota, kun ilmassa on kosteutta, happea tai korrodoivia aineita. Inhibiittoreiden vaikuttavat materiaalit ovat selektiivisiä, eli ne suojaavat vain tietyn tyyppisiä metalleja sekä tietynlaisia kemikaaleja, kuten rikkiyhdisteitä, vastaan. Nykyään kaasufaasi-inhibiittorit ovat hyvin tuotekehiteltyjä ja käyttöominaisuuksiltaan aikaisempia tyyppisiä parempia. Uudemmissa tuotteissa voidaan vaikuttaviksi aineiksi valita laajavaikutteisia kemikaaleja, käyttää useampaa kemikaalia yhdessä sekä lisätä vielä kosteutta imeviä ainesosia. Suojaava kalvo muodostuu suljetussa tilassa 1 – 2 vuorokaudessa, joidenkin valmistajien mukaan jopa muutamassa tunnissa. [4]

Haihtuvia kaasufaasi-inhibiittoreita on kahta eri tyyppiä: VCI (Volatile corrosion inhibitor) ja VPCI, VPI (Vapour-phase corrosion inhibitor). Nämä inhibiittorityyppien suoja-aineet ovat kiinteässä olomuodossa olevia kemikaaleja (inhibiittejä), jotka haihtuvat ja leviävät ilmatilaan. Ilmatilasta inhibiittorit adsorboituvat ympärillä oleville pinnoille. Korroosiota hidastava suojamekanismi perustuu inhibiittien liukenemiseen ja sekoittumiseen kaikissa pinnoissa olevaan hyvin ohueen molekylaariseen vesikerrokseen. Inhibiittorit eristävät pinnoille kertyvän veden inhibiittorin alla olevasta metallipinnasta. Kosteus ei pääse silloin suoraan kosketuksiin metallin kanssa, jolloin korrosio hidastuu. Kaasumaisten inhibiittoreiden etuina ovat kyky tunkeutua kaikkiin pienimpiinkin koloihin, rakoihin ja pinnoitteen aukkoihin. [4]

Korroosioinhibiittoreiden valinnassa ja käytössä on huomioitava seuraavia asioita:

- Kyseessä olevan suojauskohteen (sähkölaite, kytkentäkaappi) herkkyys korroosiolle.
- Todelliset ympäristöolosuhteet (lämpötila, kosteus, epäpuhtaudet, sisä- tai ulkokuva).
- Muut korroosiota estävät toimenpiteet (ilmastointi, kosteutta poistavat aineet).
- Suojattavien kohteiden ja materiaalien sopivuus käytettäviin inhibiittoreihin.
- Inhibiittien riittävä ja tarpeellinen määrä, myös alkuvaiheen jälkeen.
- Inhibiitin kantoaine, kuten paperi tai muovi toimii toivotulla tavalla, eikä päästä esimerkiksi kosteassa syövyttäviä yhdisteitä suojattavaan tilaan.
- Inhibiitti ei vaikuta haitallisesti liitinkoskettimien toimintaan. [4]

Korroosioinhibiittorit eivät muodosta sähköisesti eristävää kalvoa liitospinnoille eivätkä aiheuta oikosulkuja eristepinnoilla olevien johdinten väliin. Tästä syystä niitä voidaan käyttää sähkölaitteiden korroosiosuojaukseen, kunhan materiaalivalinta on tehty oikein. Korroosioinhibiittoreiden käytössä on kuitenkin haittavaikutuksia. Ne saattavat rappeuttaa muovimateriaaleja, huonontaa piirilevyjen eristeominaisuuksia, muodostaa häiritsevän kalvon optisille pinnoille, värjätä orgaanisia materiaaleja, tehdä ohuen eristävän kerroksen kontaktikerrokselle tai lisätä korroosiota toisella metallityypillä. [4]

Inhibiittorituotteita on saatavilla monenlaisissa pakkauksissa. Käyttökohteen perusteella voidaan valita sopivimmat tuotteet. Tyypillisimmät tuotteet ovat: jauheet, pussit, kalvot, kapselit ja tabletit. Lisäksi pakkausmateriaaleihin voidaan suoraan sisällyttää inhibiittejä esimerkiksi papereihin tai aaltopahveihin. VCI-inhibiittorit ovat perusraken-

teeltaan kohtalaisen voimakkaasti haihtuvan orgaanisen emäksen (perusaine) ja heikosti haihtuvan hapon suoloja.

Tavallisimmat perusaineet ovat:

- Sykloheksylamiini (cyclohexylamine)
- Disykloheksylamiini (disyclohexylamine)
- Guanidiini (guanidine)

Tavallisimmat hapot ovat:

- Hiilihappo (CO_3^{2-} -ioni)
- Typpihapoke (NO_2^- -ioni)
- Karboksyylihapot (R-COO^- -ioni) [4]

Kaasufaasi-inhibiittorimateriaaleista käytetään tyypillisesti kolmea seuraavaa:

Benzotriazole (BTA) on orgaaninen aine, joka soveltuu kuparin ja sen seosten suojaamiseen. BTA suojaa hyvin H_2S - ja COS -kaasuilta ja estää siten kuparin sulfidoitumisen. BTA:n kaasunpaine on $25\text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa n. 10^{-5} mmHg (10^{-3} Pa), mikä tarkoittaa aluksi hidasta, mutta pitkäaikaista vaikutusta. [4]

Dicyclohexylammonium nitrite (DICHAN) sopii teräksen suojaamiseen, mutta korrodoi sinkkiä. Lisäksi se on tehoton tai korrodoiva kuparille ja alumiinille. DICHAN:ia voidaan käyttää joko yksin tai yhdessä muiden VCI-tuotteiden kanssa. Se on yhtä myrkyllistä kuin natriumnitraatti. DICHAN:in kaasunpaineet vaihtelevat seuraavasti eri lämpötiloissa:

-1 °C	7×10^{-6} mmHg
21 °C	10^{-4} mmHg
60 °C	7×10^{-3} mmHg [4]

Cyclohexylamine carbonate (CHC) suojelee hyvin terästä ja monia ei-rautametalleja. Se korrodoi voimakkaasti kuparia ja kuparilejeerinkejä. CHC:n leimahduspiste on $49\text{ }^\circ\text{C}$ ja sen kaasunpaine on paljon suurempi kuin DICHAN:in. CHC:n kaasunpaineet vaihtelevat seuraavasti eri lämpötiloissa:

25 °C	0,4 mmHg
21 °C	7,58 mmHg [4]

Inhibiittorivalmisteita tekevät Contract Chemicals Ltd, Corrosion Inhibitors Inc., Grofit Plastics, Northern Technologies International Corporation Zerust™, EXCOR GmbH ja CORTEC® Corporation. Edellä mainituista yrityksistä CORTEC® on patentoinut (US Patent 5324448) inhibiittorivalmisteen, johon on yhdistetty vettä absorboivaa materiaalia. Tällaisten inhibiittoreiden kanssa ei ole suotavaa käyttää kosteutta kuivavia aineita, kuten silikageeliä, koska ne adsorboivat veden lisäksi myös VCI-kaasuja. [4]

CORTEC® valmistaa monia erilaisia korroosion suojaukseen tarkoitettuja tuotteita. Liitteessä 4 on muutamia CORTEC® tuoteperheeseen kuuluvia erityisesti elektroniikan suojaukseen tarkoitettuja tuotteita. [20; 21] Kuvassa 5.1. on esitetty CORTEC®:n valmistamia VpCI (Vapor phase Corrosion Inhibitor) -tuotteita. Vasemmalla 105 Emitter -

nappi, jonka korroosiosuoja riittää 142 litran tilavuuteen. Oikealla on 111 Emitter -nappi, jonka korroosiosuoja riittää 311 litran tilavuuteen. Edessä on 101 Device, jonka korroosiosuoja riittää 28,3 litran tilavuuteen.



Kuva 5.1. CORTEC[®]:n valmistamia VpCI Vapor phase Corrosion 105 ja 111 Emitter-nappit sekä 101 Device -inhibiittorit.

5.5. Silikageeli

Silikageelit eivät suoranaisesti estä korroosionmuodostumista, mutta niitä käytetään erilaisissa kuivausainepusseissa imemään ympäristöstä liiallista kosteutta. Silikageeli eli piihappogeeli on vettä adsorboiva materiaali. Ilman suhteellisen kosteuden ollessa 80 % se pystyy adsorboimaan vettä parhaimmillaan yli 35 % painostaan. Silikageeli on kolloidista piioksidia (SiO₂), ja se on valmistettu natriumsilikaatista (sodium silicate). Se on kemiallisesti epäaktiivinen ja myrkytön. Silikageeli on ominaisuudeltaan raemaista. Huokoisen rakenteen ominaispaino on noin 2,2 kg/dm³. Rakeet sisältävät mikrohuokosia, joihin vesi adsorboituu ja kondensoituu kapillaarisesti. Huokoisten halkaisija on noin 15 nanometriä ja niiden sisäinen pinta-ala on 600 – 700 m² grammaa kohden. Silikageelin erinomainen vedenpidätyskyky perustuu tähän suureen sisäiseen pinta-alaan. Se pystyy adsorboimaan kosteutta kyllästystilaan asti. Vesi sitoutuu huokosiin lähes pysyvästi. Huokokset pitävät ilmatilan kosteuden tietyn rajan alapuolella, jolloin vesi ei pääse vapautumaan ilmatilaan takaisin. Liian suuressa ilmatilassa silikageeli adsorboi itseensä vettä ilmatilan suhteellista kosteutta vastaavan määrään, jonka jälkeen se on pian toimintakyvytön kyseessä olevan olosuhdetta alemmissa kosteuksissa. Silikageelipusseihin voidaan lisätä myös indikaattoriväriainetta kosteuden adsorboitumisen havaitsemiseksi. Taulukossa 5.1 on esitetty silikageelin tasapainokosteus eli suurin adsorboituva vesimäärä ilman suhteelliseen kosteuteen nähden. [4]

Taulukko 5.1. Silikageelin tasapainokosteus ja ilman suhteellinen kosteus. [4]

Ilman suhteellinen kosteus (%)	10	20	40	60	80
Adsorboitunut vesimäärä tasapainotilassa (paino-%)	8	15	27	33	35

Levosil-kuivausainepusseja (Desiccant Bags) käytetään adsorboimaan kosteutta koteloiden ja kaappien sisältä. Se suojaa kosteudelta herkkiä laitteita myös kuljetuksen ja varastoinnin aikana. Tyvek® koostuu suurtiheyspolyeteenistä, jonka kuidut ovat kosteutta läpäisevä ja pölyttömiä. [22]

Muita kuivausainepussituotteita ja niiden valmistajia ovat mm.

- Packmittel GmbH TROBACK
- ESD ELFA
- Merck VWR

5.6. Muut suojauskeinot korroosion välttämiseksi

Kosteuden poistolla on tärkeä merkitys elektroniikan suojauksessa korroosiota vastaan. Inhibiittoreiden lisäksi elektroniikan korroosion suojaukseen voidaan käyttää spraytuotteita. Liitteessä 4 on esitetty CORTEC® tuoteperheeseen kuuluva ElectricCorr VpCI-248 Cleaner, joka on tarkoitettu sähkölaitteiden suojaukseen. Lisäksi silika- ja piigeelien lisäksi on olemassa muita hieman vähemmän käytettyjä kosteutta poistavia aineita. Näitä ovat absorbentit ja muut adsorboivat luonnon mineraalit.

Kaasuabsorbentteja käytetään poistamaan erilaisia kaasujätteitä suljetuista tiloista. Absorbentit absorboivat ja sitovat kemiallisesti itseensä korrodoivia kaasuja, kuten rikkidioksidia (SO₂), rikkivetyä (H₂S) ja typpidioksidia (NO₂). Absorbentit ovat papereja, joiden suojauskeino soveltuu kaikenlaisille komponenttien kuljetuspakkauksille. Suojapaperi suojaa kuparia, tinaa, juotostinaa, kultaa, nikkeliä ja messinkiä. Muita vedenpoistoaineita ovat silikageelin kaltaiset absorbentit ja suolat. [4]

Molekyyliseula (Molecular Sieve) on zeoliitin kidemäinen ja huokoinen muoto. Se voi olla joko natrium (Na), kalium (K) tai kalsium (Ca) alumina-silikaattina. Zeoliitti on adsorbenteista nopein ja tehokkain adsorboimaan vettä, ja lisäksi se toimii muita aineita korkeammassa lämpötiloissa. Zeoliitti on kallein adsorbenteista, mutta se voidaan valmistaa siten, että se adsorboi vain vettä eikä muita aineita. Tämä perustuu zeoliitin huokosten tasakokoisuuteen, joita kuitenkin voidaan säädellä. [4]

Bentoniittisavi (Montmorillonitiittisavi) on kidevesipitoinen luonnon mineraali sisältäen kalsium- ja natriumalumiinisilikaattien lisäksi kymmeniä kolloidisia silikamineeraaleja. Bentoniittisaven ominaispaino on noin 2 – 2,7 kg/dm³ ja sen sisäinen pinta-ala on noin 74 m²/kg. Bentoniittisavi sopii ominaisuuksiltaan veden poistoon, ja se on myös halpaa. [4]

6. KOKEELLINEN OSUUS

Diplomityöhön liittyvä kokeita tehtiin kolme erilaista. Kokeet suoritettiin ulkotiloissa, jotta saatiin mahdollisimman todenmukaiset testiolosuhteet. Kokeet tehtiin elosyyskuun aikana. Ensimmäisenä tehtiin kosteuteen liittyvä testi. Tavoitteena oli selvittää, miten hyvin korroosionestoaineet suojaavat laitteita myös kosteudelta. Toisena testinä tehtiin korroosion muodostumiseen liittyvä testi. Myös kolmannessa testissä tutkittiin korroosion muodostumista, mutta eri menetelmin.

6.1. Koemateriaalit ja laitteet

Kokeissa käytettiin lahjoituksena saatuja testimateriaaleja. Satmatic Oy:ltä saatiin Siemensin I/O-kortteja, Rittal-kytkentäkoteloita ja Levosil-kuivausainepusseja. Teknoma Oy:ltä saatiin CORTEC-inhibiittoreita sekä suojaspraytä. Etra Oy:ltä saatiin muovilaatikoita kosteusolosuhteiden luomiseksi.

Käytetyt koemateriaalit:

- 4 kpl kannellisia muovilaatikoita mitoiltaan 400x300x200 mm. Yhden laatikon tilavuus oli noin 24 dm³.
- 4 kpl Rittal AE 1032 200x300x120 RoHS -kytkentäkoteloita. [23] Yhden kytkentäkotelon tilavuus oli noin 7,2 dm³. Liitteessä 5 on esitetty tarkempia tuotespesifikaatioita Rittalin kytkentäkoteloista.
- Siemens SIMATIC S7 I/O-kortteja. [24]
- 1 pkt merisuolaa
- 1 kpl Cortec Outdoor ElectriCorr VpCI -239 -spray. (Liite 4)
- Levosil-kuivausainepusseja
- Cortec 101 VCI Device -inhibiittoreita (Liite 4)
- Ilmastointiteippiä muovilaatikoiden tiivistämiseen
- Kaksipuolista teippiä logiikkapaneelien kiinnittämiseen kytkentäkaapin pohjalle.

Käytetyt laitteet:

- Kirjevaaka
- Vision Engineering LYN X -mikroskooppi, Tampereen teknillinen yliopisto, Porin yksikkö, elektroniikan laboratorio

Muut aineet:

- Elektrolyytinä käytettiin 3,5 % suolaliuosta. Suolavesiliuos valmistettiin vesi-johtovedestä ja hienosta merisuolasta. Liuossuhde oli 1 litra (noin 1 kg) vettä ja 35 grammaa merisuolaa.

Kuvissa 6.1. – 6.2. on esitetty erilaisia testimateriaaleja sekä koejärjestelyjä.



Kuva 6.1. Koemateriaalit: Cortec ElectriCorr, Merisuola, Levosil ja Cortec 101.



Kuva 6.2. I/O-kortti on kiinnitettyä kaksipuolisella teipillä kytkentäkotelon taustalevyyn.

6.2. Kokeiden suoritus

Kokeiden suorittaminen on jaettu kolmeen eriin testimenetelmään: kosteustesti, korroosiotesti 1 ja korroosiotesti 2.

6.2.1. Koe 1: kosteustesti

Kosteustesti suoritettiin elokuun alussa ja se kesti viikon. Viikon aikana vuorokauden alin lämpötila oli noin 11 °C, korkein lämpötila oli noin 20 °C ja sademäärä oli keskimäärin 0,12 cm. [25] Kosteustestin tarkoituksena oli selvittää, voidaanko myös korroosioestomenetelmin suojata kytkentäkoteloa liialliselta kosteudelta. Kytkentäkotelon sisälle laitettiin Siemensin I/O-kortti viikoksi. Kytkentäkotelossa oli 1 cm halkaisijaltaan oleva ilmanvaihtoreikä, muutoin kotelo oli suljettu ja lukittu. Kosteuden oli mahdollista päästä tästä reiästä koteloon sisään ja ulos.

Taulukko 6.1. Koe 1: kosteustesti.

Koe 1: kosteustesti (1 viikko)	
Kytkentäkotelo	Korroosiosuojaus
1.	ei mitään
2.	Levosil
3.	Cortec 101 VCI Device
4.	Cortec 101 VCI Device+Cortec -spray

Neljä I/O-korttia laitettiin valittujen korroosiosuojausaineiden kanssa erillisiin, numeroituihin kytkentäkoteloihin. Taulukossa 6.1. on esitetty kaikkien neljän kytkentäkotelon sisällöt. Kytkentäkotelot suljettiin ja lukittiin. Jokainen kytkentäkotelo laitettiin omaan muoviastiaan, jossa oli noin 2 litraa 3,5 % suolavettä pohjalla. Kytkentäkotelo asetettiin laatikon pohjalla olevan tiilen päälle, jotta se ei kosketanut alapuolella olevaa veden pintaa. Testin tarkoituksena oli selvittää, pääseekö kosteus kytkentäkotelon sisään viikon aikana lämpötilavaihtelujen seurauksena. Normaaleissa ilmasto-olosuhteissa yöllä on viileämpää kuin päivällä. Laatikot sijaitsivat ulkona siten, että niihin paistoi vaihtelevasti päivä- ja ilta-aurinko. Laatikot olivat myös sateelta suojassa ja niiden kannet oli teipattu huolellisesti ilmastointiteipillä. Viikon jälkeen I/O-kortit otettiin pois kytkentäkotelosta ja niiden kannet rikottiin. Sisällä ollutta piirilevyä tutkittiin Tampereen teknillisen korkeakoulun Porin yksikön elektroniikkalaboratoriossa Vision Engineering LYN X -mikroskoopilla. Kuvat 6.2 ja 6.3. ovat testilaatikoista, joissa kytkentäkotelaita säilytettiin viikon ajan.



Kuva 6.3. Kytentäkotelot muovilaatikoissa.



Kuva 6.4. Ilmastointiteipillä suljetut muovilaatikat ulkona.

6.2.2. Koe 2: korroosiotesti 1

Korroosiotesti 1 suoritettiin elokuun lopulla ja se kesti viikon. Viikon aikana vuorokauden alin lämpötila oli noin 9 °C, vuorokauden korkein lämpötila oli noin 18 °C ja sademäärä oli keskimäärin 0,14 cm. [25] Korroosiotestin 1 tarkoituksena oli selvittää, korrodoituvatko I/O-korttien sisällä olevat piirilevyt rajuisissa kosteus- ja kloridiolosuhteissa viikon aikana.

Korroosiotestin 1 alkuvalmistelut suoritettiin siten, että yksi I/O-kortti laitettiin kytkentäkoteloon Cortec 101:n kanssa vuorokautta ennen testin aloittamista, jotta vaikuttavat inhibiittorit ehtisivät suojata piirilevyn. Taulukossa 6.2. on esitetty molempien kytkentäkoteloiden sisällöt. Muut tarvittavat testivalmistelut suoritettiin samoin kuin kokeessa 1.

Varsinainen testi suoritettiin siten, että molempia I/O-kortteja ruiskutettiin viiden päivän ajan sumutepullolla, joka sisälsi 3,5 % suolaliuosta. Suihkauksia oli 5 kpl/vrk/I/O-kortti. Suihkauksien jälkeen kytkentäkotelot suljettiin ja lukittiin. Muoviasiat, joiden pohjalla oli edelleen noin 2 litraa 3,5 % merivesiliuosta, suljettiin ilmastointiteipillä. Viiden suihkutus vuorokauden jälkeen odotettiin vielä 2 päivää ennen kuin I/O-kortit otettiin pois kytkentäkotelosta. Piirilevyt tutkittiin mikroskoopilla samalla tavalla kuin kokeessa 1. Kuvat 6.5. ja 6.6 on otettu kytkentäkotelon sisältä viikon kestäneen testin jälkeen.

Taulukko 6.2 Koe 2: korroosiotesti 1.

Koe 2: korroosiotesti 1 (1 viikko)	
KytKentäkotelo	Korroosiosuojaus
1.	ei mitään
2.	Cortec 101 VpCI Device



Kuva 6.5. I/O-kortti kytkentäkotelossa 1.



Kuva 6.6. I/O-kortti + Cortec 101 kytkentäkotelossa 2.

6.2.3. Koe 3: korroosiotesti 2

Taulukko 6.3. Koe 3: korroosiotesti 2.

Koe 3: korroosiotesti 2 (2 viikkoa)	
Kytkentäkotelo	Korroosiosuojaus
1.	ei mitään
2.	ei mitään
3.	Levosil + Cortec 101
4.	Levosil + Cortec 101

Korroosiotesti 2 suoritettiin syyskuun alussa ja se kesti 2 viikkoa. Kahden viikon aikana vuorokauden alin lämpötila oli noin 7 °C, vuorokauden korkein lämpötila oli noin 16 °C ja sademäärä oli keskimäärin 0,14 cm. [25] Korroosiotestin 2 tarkoituksena oli selvittää, häiritseekö Levosilin samanaikainen käyttö Cortec 101:n kanssa inhibiittoreiden suojusmekanismia hyvin korrodoivissa olosuhteissa.

Korroosiotestissä 2 kaikista I/O-korteista otettiin kannet pois korroosiotulosten nopeuttamiseksi. Alkuvaihe valmistelut suoritettiin siten, että I/O-kortit laitettiin kytkentäkoteloihin (3 ja 4) Cortec 101 kanssa vuorokautta ennen testin aloittamista, jotta vaikuttavat inhibiittoriaineet ehtisivät suojata piirilevyt. Seuraavana päivänä kytkentäkoteloihin (1

ja 2) laitettiin myös I/O-kortit sekä kytkentäkoteloihin (3 ja 4) Levosil-kuivausainepussit. Muut tarvittavat testivalmistelut suoritettiin samoin kuin kokeissa 1 ja 2.

Kaikkien I/O-korttien päälle ruiskutettiin yhden kerran 3,5 % suolaliuosta sumutepullolla. Sen jälkeen kytkentäkotelo suljettiin ja lukittiin. Muoviastiat, joiden pohjalla oli edelleen noin 2 litraa 3,5 % merivesiliuosta, suljettiin ilmastointiteipillä. Ruiskutusta toistettiin viiden päivän ajan saman kaavan mukaisesti. Tämän jälkeen testilaatikoiden annettiin olla rauhassa yhden viikon ennen tulosten tarkastelua. Piirilevyt tutkittiin mikrokoopilla samoin kuin Kokeessa 1 ja 2. Kuvassa 6.7. näkyy kytkentäkotelon 3 sisällä olevat korroosiosuojausaineet.



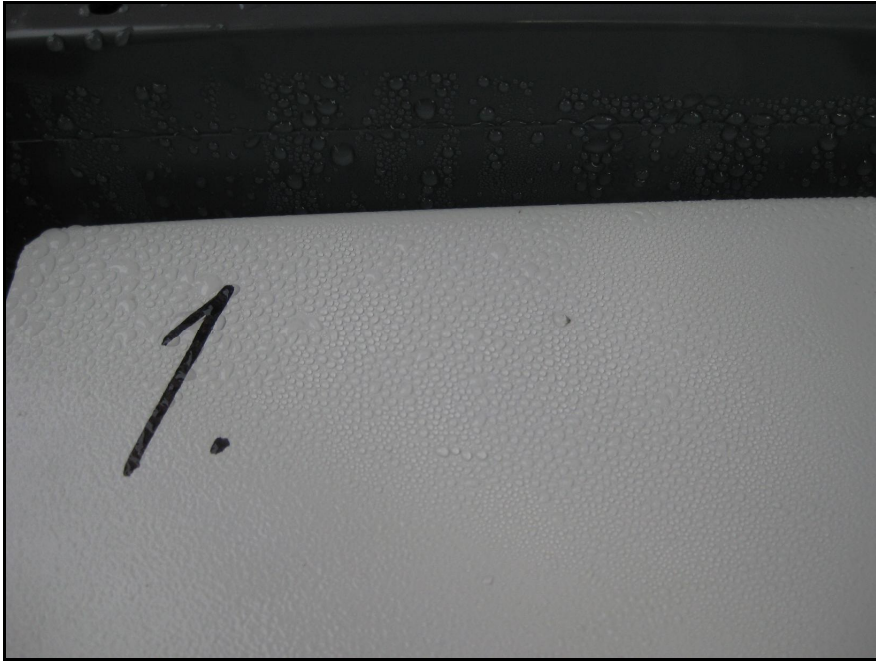
Kuva 6.7. Kytkentäkotelon 3 sisällä on Levosil ja Cortec 101.

6.3. Tulokset ja tulosten tarkastelu

Kaikki kokeet onnistuivat teknisesti. Ilman lämpötila elo-syyskuussa oli vielä kesäinen. Päivät olivat lämpimiä ja yöt vähän viileämpiä.

6.3.1. Kosteustestin tulokset

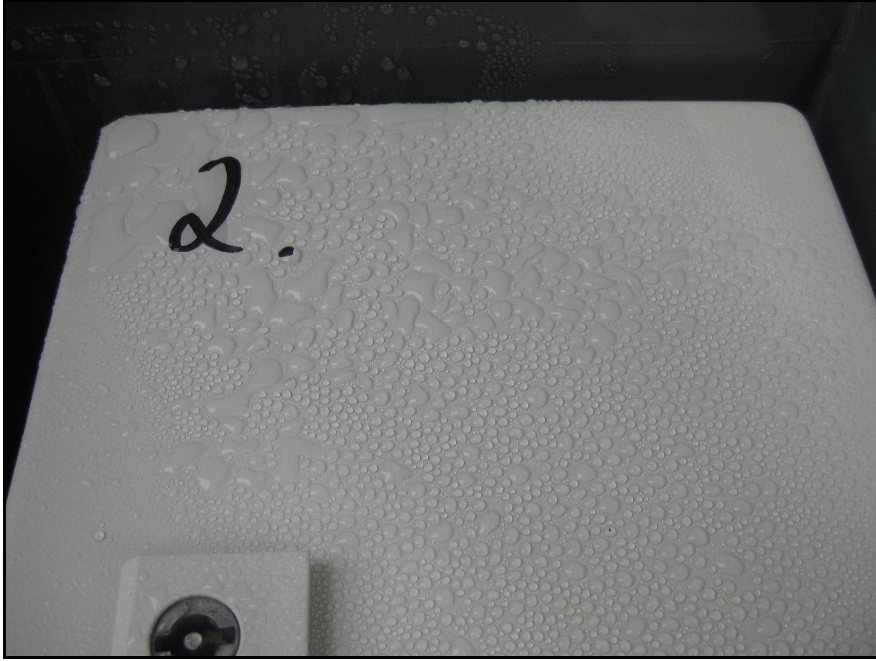
Viikon jälkeen kaikkien kytkentäkoteloiden päällä oli runsaasti kosteutta. Lämpötilan muutosta oli tapahtunut ja kosteus oli tiivistynyt pisaroiksi. Kytkentäkoteloiden kannen alla oli selvästi kosteutta erityisesti muovilaatikossa 1, jossa ei ollut minkäänlaista korroosiosuojausta. Kytkentäkoteloiden 2, 3, ja 4 sisäpuolella ei silmin nähden näkynyt kosteutta. I/O-korttien piirilevyt olivat kaikissa vaurioitumatta. Kuvat 6.8. – 6.15. on otettu kytkentäkoteloiden päältä ja sisältä viikon kuluttua testin alkamisesta.



Kuva 6.8. Kytentäkotelon 1 päällä olevia kosteuspisaroita, vertaa kuva 6.3.



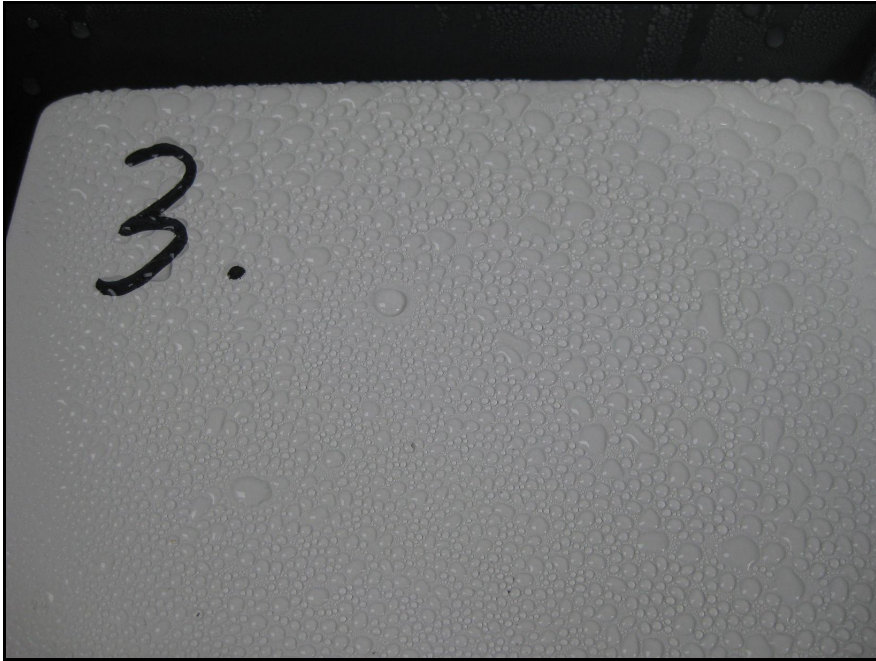
Kuva 6.9. Kytentäkotelo 1, kosteuden havaitsi kokeilemalla sormella pohjalevyn pinnasta.



Kuva 6.10. Kytentäkotelon 2 päällä olevia kosteuspisaroita, vertaa. kuva 6.3.



Kuva 6.11. Kytentäkotelon 2 sisältä, ei havaittavaa kosteutta.



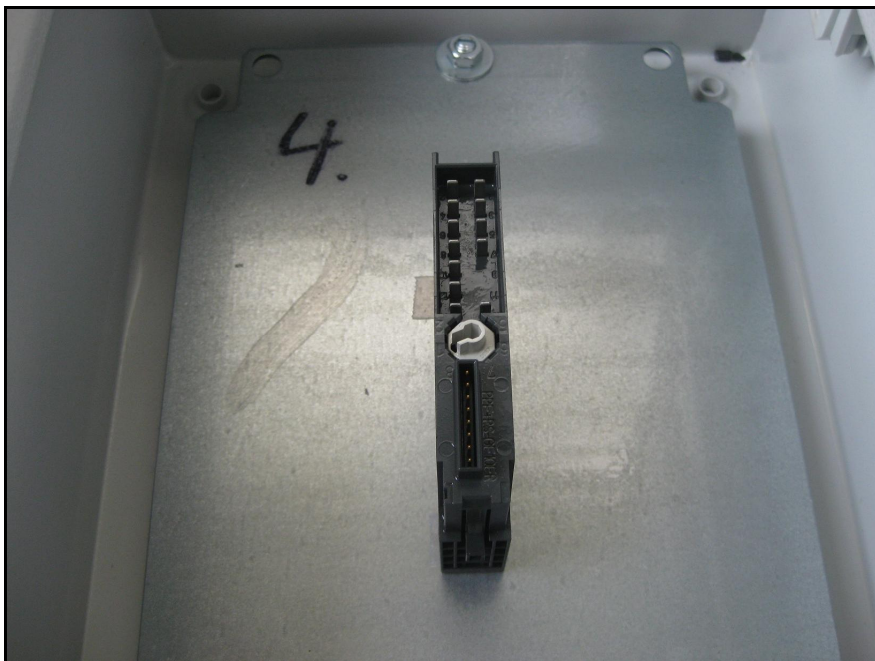
Kuva 6.12. Kytentäkotelon 3 päällä olevia kosteuspisaroita, vertaa kuva 6.3.



Kuva 6.13. Kytentäkotelon 3 sisältä, ei havaittavaa kosteutta.



Kuva 6.14. Kytentäkotelon 4 päällä olevia kosteuspisaroita, vertaa kuva 6.3.

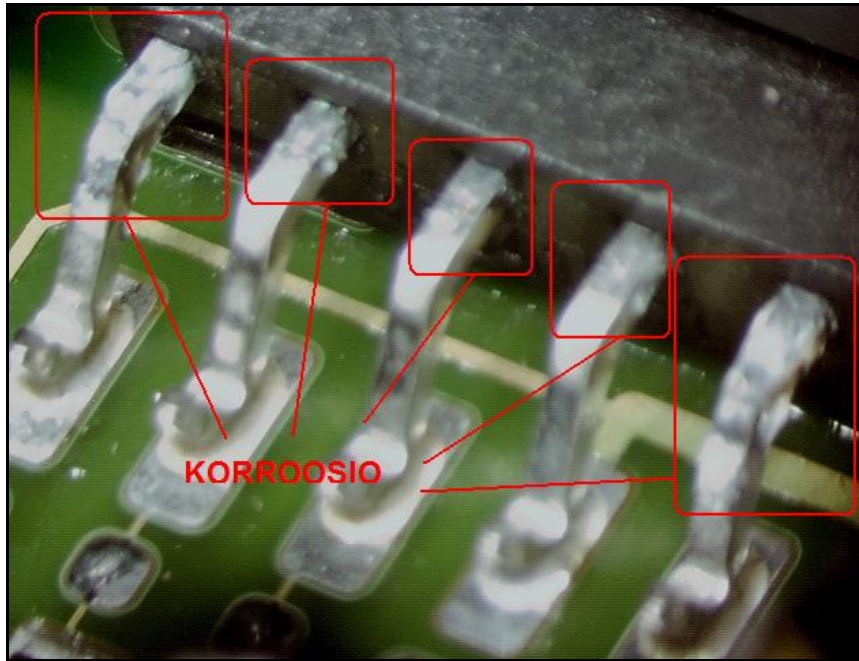


Kuva 6.15. Kytentäkotelon 4 sisältä, pohjalla näkyy Cortec:n spray-pullosta suihkuttua öljyistä korroosiosuoja-ainetta. Varsinaista kosteutta ei näkynyt.

6.3.2. Korroosiotestin 1 tulokset

Viikon jälkeen molempien kytentäkoteloiden päällä oli runsaasti kosteutta. Lämpötilan muutosta oli tapahtunut ja kosteus oli tiivistynyt pisaroiksi. Kytentäkoteloiden kannen alla oli selvästi kosteutta molemmissa testikoteloissa. Kytentäkotelon 1 I/O-kortin pii-

rilevy oli vaurioitunut, mutta kytkentäkotelon 2 ei ollut. Kuva 6.16. on mikroskooppikuva kytkentäkotelon 1 sisällä olleesta piirilevystä.

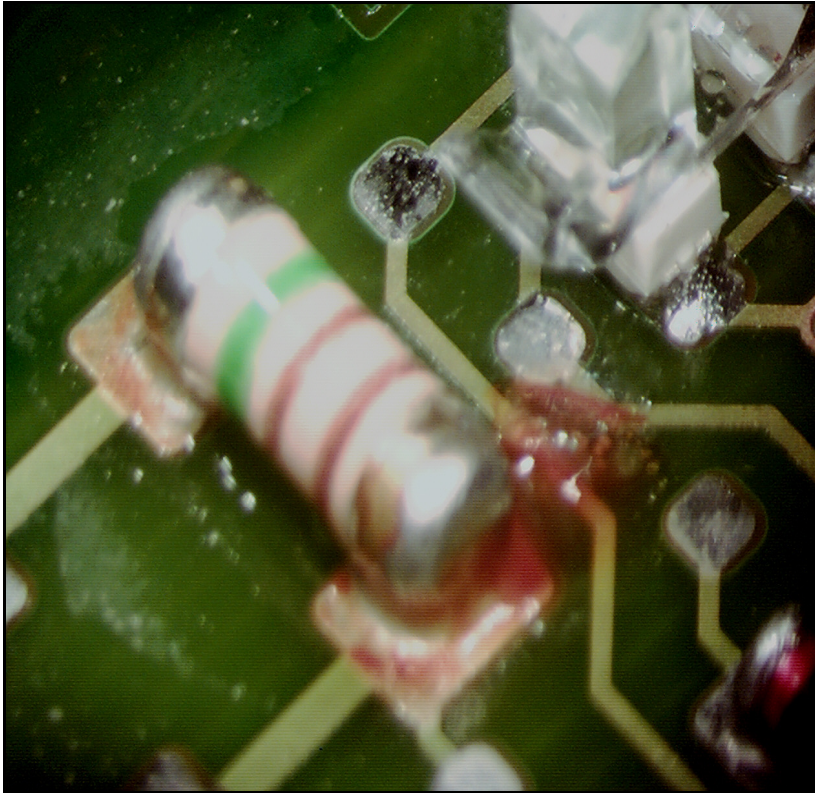


Kuva 6.16. Korroosiovaurioita kytkentäkotelon 1 sisällä olleessa I/O-kortin piirilevyssä.

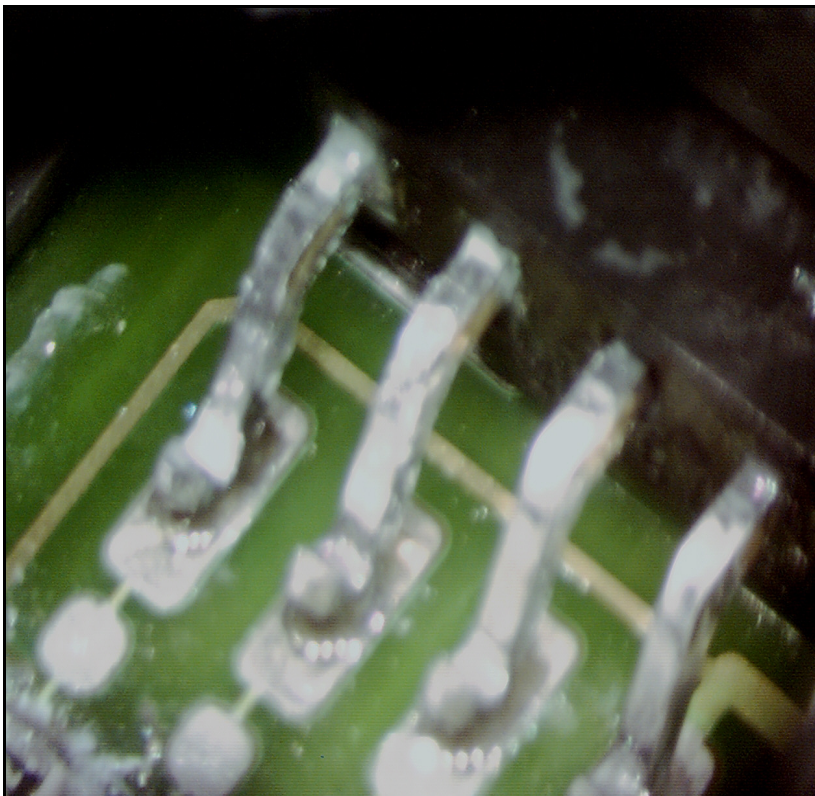
Viikon kestäneen testin aikana kytkentäkotelon 1 sisällä olleessa piirilevyssä näkyi korroosiovaurioita. Komponentin nastat olivat selvästi korrodoituneet kokeen aikana. Kytkentäkotelossa ei ollut minkäänlaista korroosiosuojausta. Korroosio-olosuhteet olivat rajut, koska 3,5 % suolavettä ruiskutettiin suoraan piirilevyn pintaan. Kytkentäkotelossa 2 oli korroosiosuojaus tehonnut, piirilevyssä ei näkynyt minkäänlaista korroosiovauriota, vaikka se oli testin päättyessä märkä. Cortec 101 VCI Device -inhibiittori oli toiminut moitteettomasti.

6.3.3. Korroosiotestin 2 tulokset

Kahden viikon jälkeen kaikkien kytkentäkoteloiden päällä oli runsaasti kosteutta. Lämpötilan muutosta oli tapahtunut ja kosteus oli tiivistynyt pisaroiksi. Myös kaikkien kytkentäkoteloiden kannen alla oli selvästi kosteutta. Kytkentäkoteloiden 1 ja 2 sisällä ei ollut ollenkaan korroosiosuojausta. Molemmissa piirilevyissä näkyi korroosiovaurioita, kuvat 6.17. ja 6.18.



Kuva 6.17. Kytentäkotelon 1 sisällä olleen piirilevyn korroosiovaurioita.



Kuva 6.18. Kytentäkotelon 1 sisällä olleen piirilevyn korroosiovaurioita komponentin nastoissa.

Myös kytkentäkoteloiden 3 ja 4 sisällä näkyi korroosiovaurioita, kuva 6.19. Tällä perusteella voidaan todeta, että Levosil adsorboi itseensä Cortec 101:n luovuttamia inhibiittoreita eikä näin ollen korroosionesto ollut onnistunut. Vuorokautta ennen laitettu Cortec 101 ei riittänyt antamaan riittävää korroosiosuojaa kahdelle viikolle, kun samaan kytkentäkoteloon laitettiin Levosil-kuivausainepussi. Mielenkiintoista oli myös huomata, että kytkentäkotelossa 1, jossa ei ollut kertaakaan korroosiosuojausta kolmen testin aikana, oli sisäpuolelta ruostunut. Rittalin kytkentäkotelon sisäosat kärsivät ilman korroosiosuojausta ruostevaurioita rajuissa ympäristöolosuhteissa, kuten kuvassa 6.20. nähdään.

Testejä analysoidessa on hyvä huomioida myös mahdolliset virhearviot. Virhettä I/O-korttien korrodoitumiseen saattoi aiheuttaa se, että normaaliin lautalla olevaan tilanteeseen verrattuna kytkentäkotelot eivät olleet täysin suljettuja. Kytkentäkoteloihin jätetystä ilma-aukosta saattoi inhibiittoreita karata ympäröivään ilmaan, jolloin tehoa ei enää riittänyt kunnolla I/O-kortin suojaamiseen. Lisäksi reilun kuukauden aikana vuorokausien keskilämpötila hieman laski, joka saattoi vaikuttaa hidastavasti korroosionopeuteen.



Kuva 6.19. Kytkentäkotelon 3 sisällä olleen piirilevyn korroosiovaurioita.



Kuva 6.20. Kytentäkotelon 1 sisäosissa näkyi reilun kuukauden jälkeen ruostevauriota. Pohjapellin reunoilla näkyi myös suolamuodostumia.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Porin Mäntyluodossa rakennettu öljyntuotantolautan runko joutuu kestävänsä elinkaarensa aikana hyvin korrodoivia offshore-olosuhteita. Öljyntuotantolautan rungon rakentaminen ja kokoonpano tapahtuu pääosin ulkotiloissa, talvella. Suomen kylmä ja kostea talvi luovat merkittävää rasitusta sähkölaitteiden kestävyydelle. Myös Meksikonlahdella ympäristöolosuhteet ovat sähkötekniikalle laitteille hyvin haastavia Atlantin valtamerestä kulkeutuvan suolan sekä lämpimän ja trooppisen ilmastovyöhykkeen sääoloista johtuen. Öljyntuotantolautassa tarvitaan paljon sähkökäyttöisiä laitteita. Tyypillisimpiä sähkölaitteita ovat PC:t, PCL:t, MCC:t, virtalähteet ja kosketusnäytöt. Sähkölaitteet sisältävät paljon elektronista nykytekniikkaa, jossa komponenttien ja johdinkuvioiden pakkaustiheys on suuri. Suuri pakkaustiheys lisää sähkölaitteiden korrosioherkkyyttä.

Korroosio aiheuttaa elektroniikassa yleensä ensin lieviä, asteittain eteneviä pieniä muutoksia, jotka kuitenkin pahenevat ajan myötä. Öljyntuotantolautalla sähkölaitteiden toiminnan ja käyttöiän kannalta haasteellisin uhkatekijä on merellisistä olosuhteista syntyvä ilmastollinen korroosio. Ilmastollisessa korroosiossa korroosionopeuteen vaikuttaa eniten metallin pinnan oloaika märkänä. Metallin pinnan ollessa märkä sitä peittää hyvin ohut näkyvä tai näkymätön vesikalvo. Lisäksi offshore-olosuhteissa veteen on usein liuennut ilmasta rikkidioksidia ja kloridia, jotka molemmat vaikuttavat kiihdyttävästi korroosionopeuteen.

Korroosion esiintymismuotoja on syntymekanismien ja esiintymisalueiden perusteella useita. Merkittävimpiä sähkölaitteisiin kohdistuvia korroosionmuotoja ovat galvaaninen korroosio, rako- eli piilokorroosio, pistekorroosio sekä jännitys- ja hiertymiskorroosio. Trooppinen ja merellinen ympäristö luovat lisäksi otolliset kasvuedellytykset mikrobiologisen korroosion syntymiselle. On myös hyvä huomioida, että kytkentäkoteloiden ja kaappeja sekä niiden kiinnitysmateriaaleja uhkaa hyvin korrodoivissa olosuhteissa nopea ruostuminen.

Sähkölaitteiden korroosion suojaamiseksi on käytettävä oikeanlaista suojaustekniikkaa. Sähkölaitteiden käyttöiän kannalta on merkittävää, että jo kokoonpanon yhteydessä huolehditaan riittävästä suojaamisesta. Öljyntuotantolautan pitkän kuljetusmatkan aikana on huolehdittava laitteisiin kohdistuvasta kosteusrasituksesta. Kuljetuksen aikana öljyntuotantolautalla ei ole sähköjä päällä, jolloin normaalin tuotantotoiminnan aikana toimiva ilmastointijärjestelmä ei ole käytössä. Normaalisti sähkölaitteiden käytön aikana laitteet tuottavat itse lämpöä ja siten vähentävät samalla kosteuden tiivistymistä laitepinnoille. Kytkentäkoteloiden tiiviysluokat vaihtelevat IP22:n ja IP55:n välillä. Öljyntuotantolautan ulkotiloissa olevat sähkölaitteet on koteloitu yleensä vähintään IP56-

suojausluokan mukaisesti. Ilmastoiduissa sisätiloissa suojausluokka koteloissa on yleensä tasolla IP22.

Sähkölaitteiden suunnittelu ja sijoittelu pitää tehdä siten, että kondenssivesi ei pääse tippumaan suoraan piirilevyihin eikä liittimiin. Liitosmateriaalit pitää olla yhteensopivia korroosioriskien minimoimiseksi. Oikeilla laitevalinnoilla pystytään merkittävästi vähentämään korroosion esiintymistä. Lisäksi piirilevyt tulisi olla suojattu pinnoitteilla.

Korroosionestoaineita käytetään suojamaan sähkölaitteita säilytyksen, kuljetuksen ja käytön aikana. Korroosionestoaineet voivat muodostua hyvin erilaisista komponenteista. Offshore-olosuhteissa käytetyimpiä ovat yhdistelmäinhibiitit, kosteutta poistavat kuivausainepussit sekä elektroniikan suojaukseen tarkoitetut spraysuihkeet. Korroosioinhibiitit pienentävät jo alhaisinakin pitoisuuksina metallien korroosionopeutta. Elektroniikan suojauksessa käytetään erityisesti anodisia inhibiittoreita, jotka lisätään korroosioympäristöön kaasun mukana. Inhibiittien käytössä on kuitenkin oltava huolellinen, jotta haluttu korroosion suojaustaso saavutetaan. Inhibiitit soveltuvat vain tietyille metalleille, koska ne ovat toiminnaltaan valikoivia. Vääränlaisen inhibiitin valinta voi olla jopa haitallista metallille. Valinnassa on myös tärkeää huomioida se, että metallipinnan laatu vaikuttaa inhibiittien kulumiseen. Karkea ja epätasainen pinta tarvitsee suojausta monin kerroin enemmän kuin kiiltävä ja sileä pinta. Metallin pinnalla olevat kontaminaatiot ja mikro-organismit heikentävät inhibiittien tehoa, ja siksi ne tulisi aina poistaa suojattavilta pinnoilta. Kuivausainepussit voivat olla esimerkiksi silikageeliä, joka ei suoranaisesti estä korroosionmuodostumista, mutta sitä käytetään adsorboimaan ympäristöstä liiallista kosteutta. Kuivausainepusseja sekä inhibiittoreita ei tule käyttää samanaikaisesti, koska kuivausainepussien materiaalit adsorboivat myös inhibiittejä.

Suoritettujen kokeiden perusteella voidaan todeta, että Levosil-kuivausainepussi, Cortec 100 Device VpCI -kaasufaasi-inhibiittori sekä Cortec Outdoor Electricorr VpCI-239 -spray estivät kosteuden tiivistymistä vedeksi kytkentäkoteloiden sisällä. Cortec 100 VpCI Device suojasi hyvin yksinään käytettynä piirilevyjä korroosiolta. Viimeisessä testissä tuli todettua se, että kuivausainepusseja ei tule käyttää samassa tilassa samanaikaisesti inhibiittorituotteiden kanssa korroosionestokeinona. Inhibiittorin suojausteho laski merkittävästi eikä korroosiosuojaus ollut odotusten mukainen. Kokeiden perusteella voidaan myös sanoa, että suojaamaton kytkentäkotelo alkoi ruostua sisäosistaan jo kuukauden korrodoivien olosuhteiden jälkeen. Mekaaniset vauriot olivat selkeitä. Tämä olisi hyvä huomioida kunnossapitosuunnittelua tehdessä, jotta kytkentäkoteloiden ja -kaappien käyttöikä olisi mahdollisimman pitkä. Korroosiotesteissä todetut korroosio-ongelmat antavat aiheutta mahdollisille jatkotutkimuksille.

Huomioitavaa on myös, että korrodoivissa olosuhteissa toimivien yritysten on syytä suojata korroosiolle alttiit sähkölaitteet nykyaikaisin suojausmenetelmin. Inhibiittoreiden käyttö antaa kattavimman korroosiosuojan sähkölaitteille, koska ne suojaavat sähkölaitteita sekä kosteudelta että korroosiolta. Kuivausainepussit suojaavat vain kosteudelta, ja siksi niiden korroosiosuoja ei ole yhtä tehokasta kuin inhibiittoreilla. Puhtaissa tiloissa, joissa ei ole kontaminoitumisen vaaraa, voidaan kuivausainepusseja käyttää sähkölaitteiden kosteuden suojaamiseen. Tiloissa, joissa on kosteuden lisäksi kon-

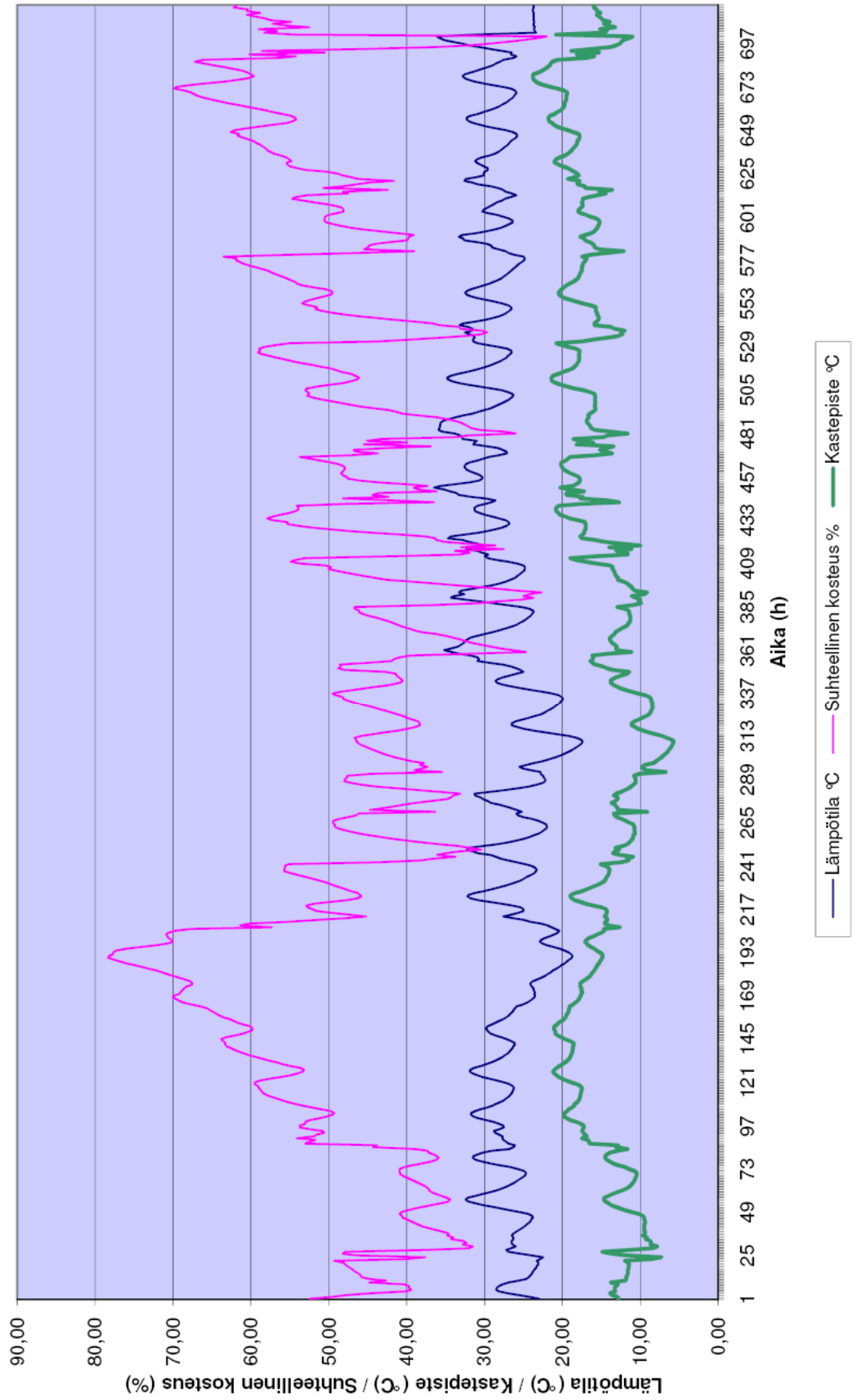
taminoitumisen vaara esimerkiksi kloridien suhteen, on inhibiittoreiden käyttö suositeltavampaa. Kaikkien korroosiosuoja-aineiden käytössä on syytä noudattaa valmistajien antamia ja suosittamia käyttöohjeita, jotta korroosiosuojaus oli odotusten mukainen. Tuotespesifikaatioista ilmenee kuinka suuriin tilavuuksiin kyseessä olevan korroosiosuoja-aineen teho riittää. Lisäksi tulee huomioida korroosiosuoja-aineen tehon kesto ajallisesti.

LÄHTEET

- [1] Hakkarainen, M. 2001. Kemia (Charles E. Mortimer). 3. painos. Opetushallitus. Gummerus Kirjapaino Oy. Jyväskylä. 408 s.
- [2] Antila, A-M., Karppinen, M., Leskelä, M., Mölsä, H. & Pohjakallio, M. 2002. Tekniikan Kemia. 6. uudistettu painos. Helsinki, Edita Prima Oy. 303 s.
- [3] Kunnossapitoyhdistys ry. 2004. Korroosiokäsikirja. 2. painos. Hamina, Oy Kotkan Kirjapaino Ab. 930 s.
- [4] Hienonen, R & Lahtinen, R. 2007. Korroosio ja ilmastolliset vaikutukset elektroniikassa, VTT. Helsinki. Edita Prima Oy. 243 s.
- [5] ABS Rules for buildings and classing mobile offshore drilling units, ABS. [Viitattu 08.10.2010.] Saatavissa: http://www.eagle.org/eagleExternalPortalWEB/ShowProperty/BEA%20Repository/Rules&Guides/Current/6_MobileOffshoreDrillingUnits%282008%29/Pub06_MODU_Part4.
- [6] Laitinen, R. & Toivonen, J. 2001. Yleinen ja epäorgaaninen kemia. 14. muuttamaton painos. Hakapaino Oy. Helsinki. 339 s.
- [7] Elektroniikan integrointi ja luotettavuus. Elektroniikan laitos. Otaniemen teknillinen korkeakoulu. [Viitattu 02.06.2010.] Saatavissa: https://noppa.tkk.fi/noppa/kurssi/s-113.2110/luennot/S-113_2110_18.2110_luento8.pdf.
- [8] Koukkari, H. 2003. VTT. Teräsrakenteiden käyttöikäsuunnittelu.
- [9] Ollila, S. 2010. Sähkölaitteiden soveltuvuus öljyntuotantolauttojen räjähdysvaarallisiin tiloihin. Sähkötekniikka Pori. Julkaisu – Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisu 76. 71 s.
- [10] Ollila, Sami. 2010. Projekti-insinööri, Technip Offshore Finland Oy. Pori. Haastattelu 15.07.2010.
- [11] Interface Data Sheet QUINT-PS-100-240AC/24DC/20. ©Phoenix Contact – 12/2005.
- [12] Automation Data Sheet FL SWITCH SFN... ©Phoenix Contact – 12/2009.
- [13] FactoryTalk View Machine Edition. Publication FTALK-PP012B-EN-P - July 2009. Copyright ©2009 Rockwell Automation.

- [14] Technical Data 1756 ControlLogix Controllers Specifacaton. Publication 1756-TD001A-EN-E - May 2009. Copyright ©2009 Rockwell Automation.
- [15] Karttunen, H., Koistinen, J., Saltikoff, E. & Manner, O. 2000. Ilmakehä ja sää. 3. tarkistettu painos. Ykkös-Offset OY. Vaasa. 365 s.
- [16] Ilmakehän rakenne ja koostumus. [Viitattu 06.03.2010.] Saatavissa: <http://www.edu.fi/oppimateriaalit/ymparistokemia/ilmarak.html>.
- [17] Heinrich, G. 2004. Explosion Protection. Electrical Apparatus and Systems for Chemical Plants, Oil and Gas Industry, Coal Mining. ISBN 0-7506-4777-9.
- [18] Gulfbase.org. General Facts about the Gulf of Mexico. [Viitattu 12.11.2010.] Saatavissa: <http://www.gulfbase.org/reef/>.
- [19] Tietoverkko pölyntorjunnan avuksi. [Viitattu 08.10.2010.] Saatavissa: <http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/polyverkko/index.htm>.
- [20] Cortec Corporation. VpCI protection system for electrical/electronic enclosures. [Viitattu 08.10.2010.] Saatavissa: http://www.cortecvci.com/Products/Electronic_Products/Emitting%20Guide.pdf.
- [21] Cortec® Corporation. Total Corrosion Control. [Viitattu 15.10.2010.] Saatavissa: http://www.cortecvci.com/Publications/Brochures/General/Cortec_GenBroch.pdf.
- [22] Levosil. [Viitattu 15.10.2010.] Saatavissa: <http://www.levosil.com/english/sacchetti-disidratanti.php>.
- [23] Rittal. [Viitattu 12.10.2010.] Saatavissa: <http://datasheet.octopart.com/AE1032-Rittal-datasheet-516138.pdf>.
- [24] Siemens. [Viitattu 12.10.2010.] Saatavissa: <http://www.automation.siemens.com/mcms/programmable-logic-controller/en/simatic-s7-controller/Pages/Default.aspx>.
- [25] Sään keskiarvot, Länsi-Suomi, Pori 2010. [Viitattu 14.10.2010.] Saatavissa: http://saa.fi.msn.com/daily_averages.aspx?wealocations=wc:FIXX0026&q=Pori%2c+L%C3%A4nsi-Suomi+forecast:averagesd&weai=8.

LIITE 1: Tahiti-öljyntuotantolautan lämpötila- ja kosteusantureiden mittaustulokset



LIITE 2: Öljyntuotannossa käytettävien laitteiden koteloinnin IP-luokitus [24]

Part 4 Machinery and Systems
 Chapter 3 Electrical Installations
 Section 3 Drilling Unit Installation

4-3-3

TABLE 1
Minimum Degree of Protection [See 4-3-3/3.1.1] (2006)

Example of Location	Condition of Location	Switchboards, distribution boards, motor control centers & controllers (See 4-3-3/3.9 to 4-3-3/3.13)						
		Generators (See 4-3-3/3.3)						
		Motors (See 4-3-3/3.5)						
		Transformers, Converters						
		Lighting fixtures (See 4-3-3/3.17)						
		Heating appliances (See 4-3-3/3.19)						
		Accessories ⁽²⁾						
Dry accommodation space	Danger of touching live parts only	IP20	-	IP20	IP20	IP20	IP20	IP20
Dry control rooms ⁽⁴⁾ (1999)		IP20	-	IP20	IP20	IP20	IP20	IP20
Control rooms (1999)	Danger of dripping liquid and/or moderate mechanical damage	IP22	-	IP22	IP22	IP22	IP22	IP22
Machinery spaces above floor plates ⁽⁵⁾		IP22	IP22	IP22	IP22	IP22	IP22	IP44
Steering gear rooms		IP22	IP22	IP22	IP22	IP22	IP22	IP44
Refrigerating machinery rooms		IP22	-	IP22	IP22	IP22	IP22	IP44
Emergency machinery rooms		IP22	IP22	IP22	IP22	IP22	IP22	IP44
General store rooms		IP22	IP22	IP22	IP22	IP22	IP22	IP22
Pantries		IP22	-	IP22	IP22	IP22	IP22	IP44
Provision rooms		IP22	-	IP22	IP22	IP22	IP22	IP22
Bathrooms & Showers		Increased danger of liquid and/or mechanical damage	-	-	-	-	IP34	IP44
Machinery spaces below floor plates	-		-	IP44	-	IP34	IP44	IP55 ⁽³⁾
Closed fuel oil or lubricating oil separator rooms	IP44		-	IP44	-	IP34	IP44	IP55 ⁽³⁾
Ballast pump rooms	Increased danger of liquid and/or mechanical damage	IP44	-	IP44	IP44	IP34	IP44	IP55
Refrigerated rooms		-	-	IP44	-	IP34	IP44	IP55
Galleys and Laundries		IP44	-	IP44	IP44	IP34	IP44	IP44
Open decks	Exposure to heavy seas	IP56	-	IP56	-	IP55	IP56	IP56
Bilge wells	Exposure to submersion	-	-	-	-	IPX8	-	IPX8

Notes

- 1 Empty spaces shown with “-” indicate installation of electrical equipment is not recommended.
- 2 “Accessory” includes switches, detectors, junction boxes, etc. Accessories which are acceptable for use in hazardous areas are limited by the condition of the areas. Specific requirements are given in the Rules. See 4-3-3/3.23.
- 3 Socket outlets are not to be installed in machinery spaces below the floor plates, enclosed fuel and lubricating oil separator rooms or spaces requiring certified safe type equipment.
- 4 (1999) For the purpose of this Table, the wheelhouse may be categorized as a “dry control room”, and consequently, the installation of IP20 equipment would suffice therein, provided that: (a) the equipment is located as to preclude being exposed to steam, or dripping/spraying liquids emanating from pipe flanges, valves, ventilation ducts and outlets, etc., installed in its vicinity, and (b) the equipment is placed to preclude the possibility of being exposed to sea or rain.
- 5 (2006) See 4-3-3/3.1.1(b) where the equipment is located within areas protected by local fixed pressure waterspraying or water-mist fire extinguishing system and its adjacent areas.

LIITE 3: Inhibiittien tehokkuus neutraalilla pH-alueella [4]

Taulukko 1. Yleinen luettelo eri inhibiittien tehokkuudesta neutraalilla pH-alueella

Inhibiitti								
Metalli	kromaattit	nitriitit	bentsoeaaatit	boraatit	fosfaatit	silikaatit	tanniinit	
hiiliateräs	tehokas	tehokas	tehokas	tehokas	tehokas	tehokas	kohtalaisen tehokas	
valurauta	tehokas	tehokas	tehoton	vaihteleva	tehokas	tehokas	kohtalaisen tehokas	
sinkki ja sinkkiseokset	tehokas	tehoton	tehoton	tehokas	--	kohtalaisen tehokas	kohtalaisen tehokas	
kupari ja kupariseokset	tehokas	osittain tehokas	osittain tehokas	tehokas	tehokas	kohtalaisen tehokas	kohtalaisen tehokas	
alumiini ja alumiiniseokset	tehokas	osittain tehokas	osittain tehokas	vaihteleva	vaihteleva	kohtalaisen tehokas	kohtalaisen tehokas	
lyijy-tina juotokset	--	aggressiivinen	tehokas	--	--	kohtalaisen tehokas	kohtalaisen tehokas	

LIITE 4.1: Cortec Corporationin korroosionestoon käytettäviä tuotteita [20]



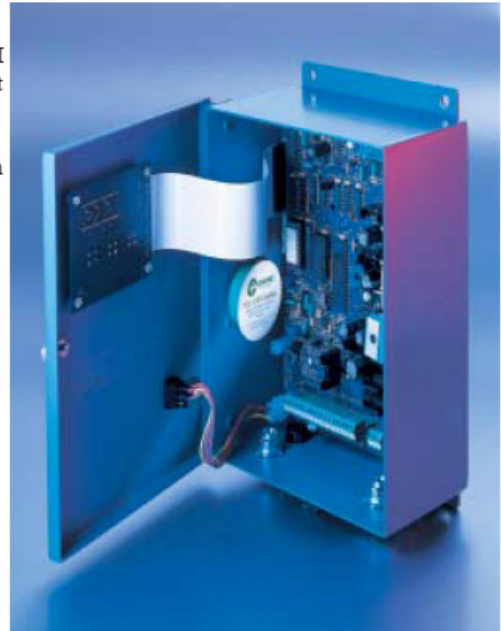
**VpCI PROTECTION
SYSTEM FOR ELECTRICAL/
ELECTRONIC ENCLOSURES**

VpCI SYSTEM APPLICATIONS

Cortec Electricorr™ VpCI aerosol products and Cortec VpCI emitting devices are designed for use in interior enclosures that are covered, closed or sealed. Cortec's VpCI technology provides multi-metal protection against rust, corrosion, oxidation, and tarnishing. Cortec's VpCI Protection system can be used in both indoor and outdoor confined space applications. Length of protection depends on integrity of sealing and atmospheric conditions.

VpCI SYSTEM PRODUCTS

- **ElectriCorr™ VpCI-248 Spray** (Non flammable Inhibitor/Cleaner Antistat CFC Free)
- **VpCI-101 Emitter Strip** (protects 1 Cubic Foot Enclosure)
- **VpCI-105 Emitter Cup** (protects 5 Cubit Foot Enclosure)
- **VpCI-111 Emitter Cup** (protects 11 Cubit Foot Enclosure)
- **Corrosorber** (Hydrogen Sulfide scavenger)



ElectriCorr VpCI-248 Cleaner

- Non-flammable
- Does not alter electrical resistance
- Protects electronic/electrical contacts
- Fast drying
- Non-conductive
- Excellent cleaning action



VpCI Emitter Cup 105/111

- One way Tyvek release membrane
- Nitrite, silicone, and phosphate free
- Economical protection
- Long-lasting protection
- Non-toxic
- Easy installation
- No residue



Corrosorber Cup

- Absorbs corrosive gases
- Irreversible reaction
- Non-toxic
- Superior performance against Hydrogen Sulfide
- Changes color as it is used up
- Quick installation



VpCI Foam Emitter 101

- Patented VpCI impregnated foam
- Continuous corrosion protection
- Non-toxic
- NSN #6850-01-338-1392
- MIL-B-81705C
- FDA & USDA Approved

VpCI Field Application Recommendations

Electricorr™ VpCI-248 Method of Application -

- Apply Electricorr™ VpCI-248 by lightly misting the entire interior surface or surfaces to be protected.
- Apply in a “Z” pattern while misting to avoid running or sagging.
- It is recommended to apply 30 cc of Electricorr™ VpCI-248 per cubic foot (1,059 cc/m³) of interior space to be protected. Coat product to a film thickness of 0.25-0.5 mils (6.25-12.5 microns).
- Allow 15 minutes dry time before affixing emitters.
- Protected surfaces should be contained in a way that prevents direct exposure to rain water spray, etc. Occasional opening of enclosure for brief periods will not adversely affect protection.
- Record date when products were treated with Electricorr™ VpCI-248 and emitter products and attach dated marker to protected enclosure, box or container. Depending on atmospheric conditions and integrity of sealing, check condition of product at intervals of 6 and 12 months. Reapply as conditions warrant.

VpCI Emitters Method of Application -

Ensure the surface to which the device will be affixed is clean and free of debris.

- Peel off the protective peel strip from the bottom of the device and attach it to the clean surface.
- Install emitters per specification:
VpCI-101 – 1 cubic foot protection
VpCI-105 – 5 cubic feet protection
VpCI-111 - 11 cubic feet protection
- Devices can be installed in any position.
- If the enclosure is not totally airtight, or if the access doors are opened frequently, replace the emitter devices as needed.
- Under periods of heavy maintenance it is recommended to spray the enclosure very lightly with Cortec® Electricorr™ VpCI-248.
- After application, cover, close, or seal the opening to the interior of the panel or enclosure. An airtight seal is not necessary.

Corrosorber Method of Application -

- In environments where Hydrogen Sulfide is present, use Corrosorber in addition to emitters to absorb and scavenge corrosive gases.
- Peel the protective strip from the bottom of the Corrosorber and affix to clean surface.
- When Corrosorber needs to be replaced, the powder inside the cup will appear brown.

Removal Method:

Unless stated in the procedural steps, Electricorr™ VpCI-248 and emitting products typically do not require removal prior to product use. If removal is desired, remove with solvent suitable for electronics.

Precautions:

While applying Electricorr™ VpCI aerosol product, observe the accepted good practices for working with chemical liquids. Maintain adequate ventilation in work areas; wear suitable respirator, and hand and eye protection. Do not use on energized equipment