

Jaakko Mäki

# Lämpökuvaaminen aluksen mekaanisessa kunnossapidossa

Opinnäytetyö  
Merenkulun koulutus

2020



**Kaakkois-Suomen  
ammattikorkeakoulu**

<b>Tekijä/Tekijät</b>	<b>Tutkinto</b>	<b>Aika</b>
Jaakko Mäki	Merenkulun insinööri (AMK)	Marraskuu 2020
<b>Opinnäytetyön nimi</b>		
Lämpökuvaaminen aluksen mekaanisessa kunnossapidossa		45 sivua 1 liitesivua
<b>Toimeksiantaja</b>		
Finnlines Oyj, Carolus Ramsay		
<b>Ohjaaja</b>		
Joel Paananen		
<b>Tiivistelmä</b>		
<p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia lämpökuvauksen mahdollisuuksia aluksen mekaanisessa kunnossapidossa sekä käsitellä kunnossapidon vaikutuksia ja merkitystä aluksen koneiden toimintavarmuuteen. Opinnäytetyössä käytettiin kvalitatiivista tutkimusmenetelmää. Tarkoituksena oli tehdä kartoittavaa tutkimusta, jossa etsitään uusia näkökulmia ja kerätään riittävästi teoriaa tutkimuksen pohjustukseksi.</p> <p>Opinnäytetyön teoriaosuudessa tarkasteltiin kunnossapidon eri lajeja, lämpökuvausta kunnonvalvonnan työkaluna sekä eri viranomaismääräyksiä, jotka määräävät alusten kunnossapitoon, katsastuksiin ja tarkastuksiin liittyvät toimenpiteet. Teoriaosuudessa käytiin läpi myös kunnossapidon määritelmää, vikaantumisen vaikutusta aluksen kunnossapidon kustannuksiin, tuottavuuteen sekä turvallisuuteen ympäristön ja ihmishengen suojelemiseksi.</p> <p>Opinnäytetyön toiminnallisessa osuudessa määriteltiin osallistuvan havainnoinnin sekä tutkimusjulkaisujen, artikkeleiden ja kirjallisuus lähteiden avulla, mahdollisia lämpökuvaukskohteita aluksella. Selvitettiin mahdollisuuksia liittää lämpökuvaus aktiiviseksi mittausvälineeksi kunnonvalvontaan, huoltoihin ja korjauksiin sekä tutkittiin sen vaikutuksia kustannussäästöihin ja turvallisuuteen. Havainnointi ja mittaukset suoritettiin Finnlinesin Finnfellow-nimisellä aluksella, joka operoi Saaristomerellä ja Ahvenanmerellä.</p> <p>Tutkimus antaa kattavan kokonaiskuvan lämpökuvauksen mahdollisuuksista aluksella sekä vahvistaa sen tosiasian, että se lisää turvallisuutta. Tutkimus osoitti että, lämpökuvaus tarjoaa tehokkaan apuvälineen osaksi mekaanista kunnossapitoa ja mikäli se liitetään osaksi huolto-ohjelmaa, voidaan sen avulla todentaa laitteen kunto luokituslaitokselle. Lämpökuvaus lisää tietoisuutta aluksen laitteistojen kunnosta, josta on apua huoltojen, varaosahallinnan ja telakoinnin suunnittelussa. Tutkimuksessa havaittiin myös, että lämpökuvauksen mahdollisuudet aluksen kunnossapidossa on laajat ja sitä voidaan hyödyntää kunnossapidon lisäksi muihinkin käyttötarpeisiin aluksella sekä sen hyödynnettävyys muissakin aluksissa on myös mahdollista.</p>		
<b>Asiasanat</b>		
Merenkulku, kunnossapito, lämpökamera, lämpökuvaus, NDT, luokituslaitos		

<b>Author</b>	<b>Degree</b>	<b>Time</b>
Jaakko Mäki	Bachelor of Engineering	November 2020
<b>Thesis title</b>		
Thermal imaging in the mechanical maintenance of a ship		45 pages 1 pages of appendices
<b>Commissioned by</b>		
Finnlines Oyj		
<b>Supervisor</b>		
Joel Paananen		
<b>Abstract</b>		
<p>The purpose of the thesis was to study the possibilities of thermal imaging in the mechanical maintenance of a ship, as also was concerned with the effects on a maintenance and its significance for the machinery operational reliability of the ship. The theoretical part of the thesis examined the different types of maintenance, thermal imaging as a tool for condition monitoring and various regulations that prescribe measures related to ship maintenance, inspections, and surveys. The theoretical part reviewed the definition of maintenance, the effects of mechanical failure on ship maintenance costs, productivity together with safety, to protect the environment and human life.</p> <p>In the functional part of the thesis, possible thermal imaging objects on board were defined by means of participatory observation and published researches. The possibilities of including thermal imaging as an active measuring instrument to condition monitoring, maintenances and repairs were investigated, as well its effects on cost savings and safety were studied. The observation and measurements were performed on Finnlines' vessel Finnfellow, which operates in the Archipelago Sea and the Åland Sea.</p> <p>The study provided a comprehensive overview of the possibilities of thermal imaging on board and confirmed the fact that it increases ship safety. The study proved that, thermal imaging provides an effective aid as part of mechanical maintenance and, if included as part of a maintenance program, can be used to verify the condition of the equipment to a classification society. Thermal imaging increases awareness of the condition of the ship's equipment, which helps planning maintenance, spare parts management and docking. The study also found that the possibilities of thermal imaging in ship maintenance are extensive and it can be utilized not only for maintenance but also for other operational needs on board, as well as the obtained results can be utilized in other ships.</p>		
<b>Keywords</b>		
Maritime, maintenance, thermal camera, thermal imaging, non-destructive testing, classification society		

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	OPINNÄYTETYÖN TARKOITUS JA TAVOITTEET .....	7
3	FINNLINES OYJ.....	7
4	KUNNOSSAPIDON MERKITYS .....	8
4.1	Kunnossapidon määritelmä .....	8
4.2	Vikaantuminen.....	9
4.3	Kunnossapidon lajit.....	12
4.4	Kunnossapitostrategiat .....	14
4.5	Kunnossapidon kustannukset ja tuottavuus.....	16
4.6	Kunnossapidon merkitys työturvallisuuteen ja ympäristön suojeluun aluksilla.....	18
4.7	Kunnonvalvontamenetelmät .....	18
5	LÄMPÖKUVAUS ALUKSELLA.....	19
5.1	Lämpökameratekniikka.....	20
5.2	Kohteen kuvaamisessa huomioon otavat asiat.....	21
5.3	Lämpökameran kalibrointi, säätö ja käyttö aluksella.....	22
5.4	Lämpökuvauksen edut aluksen kunnossapidossa.....	22
6	VIRANOMAISMÄÄRÄYKSET.....	23
6.1	SOLAS – Vaatimukset alukselle .....	23
6.2	ISM-säännöstö aluksen huoltovaatimuksista.....	25
6.3	Port State Control .....	25
6.4	Viranomaisten ja luokituslaitosten työnjako .....	26
7	LÄMPÖKUVAUSKOHTEET ALUKSELLA .....	27
7.1	Pakokaasu vuodot .....	28
7.1.1	Kuumakorroosio.....	29
7.1.2	Kylmäkorroosio .....	29
7.2	Lauhteenpoistajat .....	30
7.3	Pumppujen ja sähkömoottorien laakerit.....	31

7.4	Venttiilit .....	33
7.5	Putket .....	33
7.5.1	Eristämättömät putket .....	34
7.5.2	Eristetyt putket .....	34
8	TULOSTEN ANALYSOINTI .....	35
9	POHDINTAA JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	38
	LÄHTEET .....	42

KUVALUETTELO

LIITTEET

Liite 1.

## 1 JOHDANTO

Tutkimuksen aiheena on lämpökameran käyttö alusten kunnossapidossa. Lavaharjoitteluissa kiinnitin huomiota siihen, että lämpökameran käyttö aluksilla on paljon vähäisempää, kuin siihen liittyvät mahdollisuudet kunnossapidossa voisivat antaa olettaa. Maapuolella lämpökuvaustekniikkaa on käytetty laajemmin kunnossapidon apuvälineenä, mutta omien kokemusteni mukaan, aluksilla sen käyttö on hyvin vähäistä, jos ollenkaan. Lämpökuvaustekniikka mahdollistaa muun muassa käynninaikaisen ja ainetta koskemattoman mittausmenetelmän, joten jo pelkästään tämän vuoksi sen käyttö alusten kunnossapidossa, huolloissa ja vianetsinnässä on perusteltua.

Lämpökuvaustekniikka on kehittynyt hurjasti viimeisen kahdenkymmenen vuoden aikana. Laitteiden teknisten ominaisuuksien parantuessa, myös fyysinen koko on nykyään huomattavan paljon käyttäjäystävällisempi sekä kameramalleja löytyy moneen käyttötarkoitukseen. Lämpökameralla otettujen kuvien muokkaamiseen ja analysointiin tarkoitetut sovellukset ja ohjelmat tarjoavat kattavat apuvälineet kunnossapitoon sekä lämpökuvien analysoinnin lisäksi raportointia ja dokumentointia varten. (Flir 2020.)

Opinnäytetyön alun teoriaosuudessa käsitellään kunnossapidon määritelmää ja vikaantumisen vaikutusta aluksen kunnossapidon kustannuksiin, tuottavuuteen sekä turvallisuuteen ympäristön ja ihmishengen suojelemiseksi merellä. Lämpökuvaustekniikkaan tutustutaan teorian avulla ja tarkastellaan kuvaamisessa huomioitavia asioita sekä käyttöön ja etuihin aluksen kunnossapidossa.

Opinnäytetyön teoriaosuuden jälkeen käydään läpi alusten kunnossapidon perusvaatimuksia määrittelevät kansainväliset sopimukset ja määräykset. Näiden määräysten toteutuksista ja tarkastuksista, valvovan viranomaisen ja tarkastuslaitoksen roolit aluksen koneistojen kunnossapidon kannalta, otetaan myös tarkasteluun.

Opinnäytetyö tehtiin Finnlines Oyj:lle, tarkoituksena tutkia ja selvittää millaiset käyttömahdollisuudet lämpökuvaamisella on aluksen mekaanisessa kunnos-

sapidossa. Lämpökuvauksella voidaan esimerkiksi ennakoivasti havaita piileviä tai alkavia vikoja venttiileissä, pumpuissa, laakereissa, putkistoissa tai eristeissä (Mikkonen 2009, 178;456). Toiminnallisen ja havainnoivan osan opinnäytetyöstä tein Finnlinesin Finnfellow-nimisellä aluksella kesän 2020 aikana. Tarkoituksena oli määritellä mahdollisia kohteita, joiden kunnossapidossa lämpökuvauksesta olisi eniten hyötyä. Yhteyshenkilönä opinnäytetyössä toimi Carolus Ramsay

## **2 OPINNÄYTETYÖN TARKOITUS JA TAVOITTEET**

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia lämpökuvauksen mahdollisuuksia aluksen mekaanisessa kunnossapidossa. Selvittää ja määritellä koneet ja laitteet, joiden kunnossapidossa lämpökuvauksesta olisi eniten hyötyä aluksella. Aihevalintaan vaikutti oma kiinnostus lämpökuvaustekniikkaan sekä toimeksiantajan positiivinen suhtautuminen ja kiinnostuminen lämpökuvaamisen mahdollisista eduista.

Opinnäytetyön tavoitteena oli kirjallisuuslähteisiin ja tutkimusjulkaisuihin viitaten selvittää kunnossapidon ja lämpökuvaamisen teorian avulla lämpökuvaamisen hyödyt aluksen kunnossapidossa. Osallistuvan havainnoinnin keinoin tavoitteena on määrittää toimeksiantajalle kohteet aluksella, joissa lämpökuvausta voitaisiin hyödyntää sekä tutkia lämpökuvaamisen vaikutuksista mahdollisiin kustannussäästöihin ja turvallisuuteen (Vilkkä 2007; Hirsjärvi ym. 2007). Lisäksi tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, onko lämpökuvattavan koneen tai laitteen kunnan todentaminen luokituslaitokselle mahdollista sekä millaisia hyötyjä tästä on alukselle ja varustamolle.

## **3 FINNLINES OYJ**

Finnlinesin historia ulottuu yli 70 vuoden taakse, jolloin se aloitti kansainvälisen rahtiliikenteen Itämerellä, Pohjanmerellä, Biskajanlahdella sekä liikennöiden aina Yhdysvaltoihin saakka. Matkustajaliikenteen Finnlines aloitti vuonna 1962, ja vielä tänäkin päivänä matkustajarahtilaivat liikennöivät Suomesta Saksaan, Ahvenanmaalle ja Ruotsiin. Vuodesta 2005 alkaen italialainen Grimaldi-konserni on kasvattanut omistus osuuttaan ja vuonna 2016 Finnlines

siirtyi kokonaisuudessaan Grimaldi-konsernin omistukseen. Viime vuosina Finnlines on panostanut ympäristöteknologiaan ja laivaston kehittämiseen uusien päästörajoitusten toteuttamiseksi sekä hakee kannattavuuden kasvua lisäämällä tehokkuutta, tuottavuutta, turvallisuutta sekä henkilöstön osaamista. Vastuullisena yrityksenä se noudattaa kestävän kehityksen periaatteita, ottamalla huomioon ympäristövastuullisuuden ja turvallisuusnäkökohdat huomioon päivittäisessä toiminnassa. Finnlinesin voidaankin sanoa olevan edelläkävijä Itämerellä. Finnlinesin laivastoon kuuluu yli toistakymmentä alusta, jotka tarjoavat merikuljetuspalveluja sekä olemalla myös elintärkeä Suomen viennin ja tuonnin kannalta. (Finnlines 2020.)

## **4 KUNNOSSAPIDON MERKITYS**

Termodynamiikan toisen perussäännön mukaan prosessit muuttuvat ja etenevät kohti suurinta todennäköisyyttä eli tilaan, jossa entropia kasvaa (Lampinen, 2010. 103–104). Tuotanto-omaisuuden kannalta tämä tarkoittaa sitä, että koneen tai laitteen kunto muuttuu aina vähitellen huonompaan suuntaan kulumalla ja lopulta rikkoutuu (Järviö & Lehtiö 2012, 17).

Kunnossapidon tarkoituksena on tarjota henkilökunnalle erilaisia työkaluja, joilla tuotanto-omaisuutta voidaan oikeaoppisesti säilyttää, säätää, hoitaa, ylläpitää ja kehittää. Kunnossapidon tavoitteena on, että koneiden ja laitteiden kunto pysyy mahdollisimman pitkään hyvänä, eikä niiden anneta huonontua tai hajota. Tällöin niiden käyttö pysyy turvallisena, tuotantokyky pysyy tasalaa-tuisena ja laitteiden elinjakso pitenee. Tätä kautta päästään kustannustehok-kaaseen, luotettavaan ja ennakoitavaan liiketoimintaan, jolloin tuleviin inves-tointeihin ja huoltokustannuksiin voidaan ennalta varautua. Kunnossapidon seurannasta on myös paljon apua, kun pyritään seuraamaan kehitystä, tehokkuutta ja laatua sekä optimoimaan strategiset valinnat, kuten esimerkiksi va-rastohallinta, logistiikka ja alihankkijat. (Järviö & Lehtiö 2012, 13–20.)

### **4.1 Kunnossapidon määritelmä**

Kunnossapitoon liittyvät asiat on määritelty tarkasti eurooppalaisessa standar-dissa SFS-EN 13306, jossa on esitetty kunnossapidon keskeiset termit ja kä-



sitteet. Suomessa toimiva PSK Standardisointiyhdistys on laatinut suomenkielisen standardin PSK 6201, joka on harmoniassa standardin SFS-EN-13306 kanssa. (Järviö ym. 2007, 32.)

SFS-EN 13306 (2017, 5) -standardin mukaan kunnossapito määritellään seuraavanlaisesti: ”kaikki kohteen elinjakson aikaiset tekniset, hallinnolliset ja liikkeenjohdolliset toimenpiteet, joiden tarkoituksena on ylläpitää tai palauttaa kohteen toimintakyky sellaiseksi, että kohde pystyy suorittamaan vaaditun toiminnon.”

PSK 6201 (2011, 2) -standardin mukaan kunnossapito määritellään seuraavanlaisesti: ”Kunnossapito on kaikkien niiden teknisten, hallinnollisten ja johtamiseen liittyvien toimenpiteiden kokonaisuus, joiden tarkoituksena on säilyttää kohde tilassa tai palauttaa se tilaan, jossa se pystyy suorittamaan vaaditun toiminnon sen koko elinjakson ajan.”

Standardin SFS-EN 15341:2007 määrittelee kunnossapidon suorituskykyä, jonka perusteella saadaan myös käsitys siitä, mitä kunnossapito on. Sen mukaan kunnossapidon suorituskykyyn vaikuttaa useat sekä ulkoiset että sisäiset tekijät, kuten sijainti, koko, ikä ja käyttöaste. Käyttämällä eri kunnossapitola-jeja, jotka yhdistävät informaatiota, organisaation metodeja, työtä, materiaa- leja, työkaluja ja työntekotekniikoita saavutetaan kunnossapidon suorituskyky. (Järviö & Lehtiö 2012, 17.)

## **4.2 Vikaantuminen**

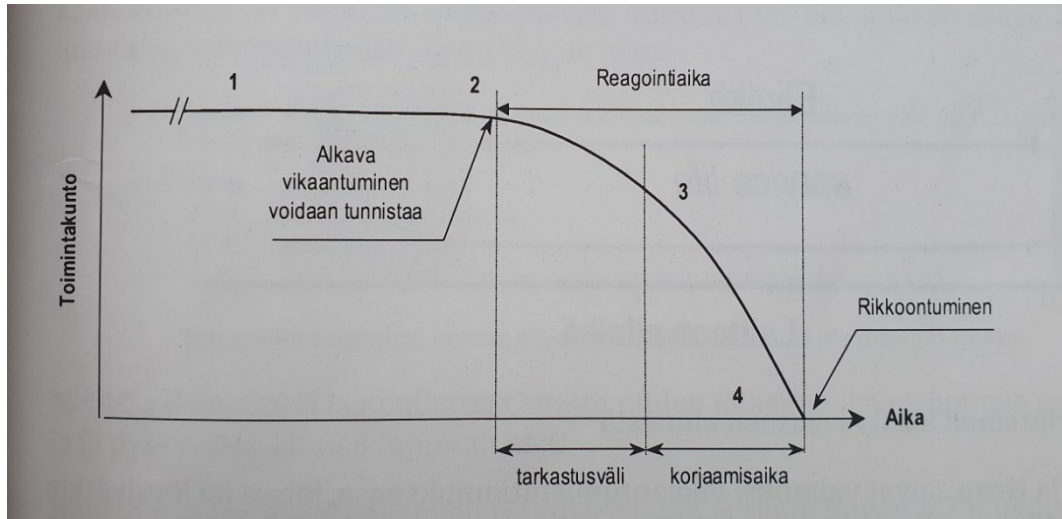
Vikatila on seurausta vikaantumisesta, joka voi olla joko häiriö tai vaurio. Vikaantuminen seurauksena koneelta tai laitteelta vaadittu toiminta häiriintyy tai loppuu. (Järviö ym. 2007, 34.)

Häiriön ilmentyessä kohde ei ole rikki, mutta se vaatii välitöntä huoltoa. Koh- teen toimintakyky voidaan palauttaa esimerkiksi säätämällä, puhdistamalla tai uudelleen käynnistämällä. Häiriöiden toistuvuuden tai säännöllisyyden perus- teella voidaan määritellä komponentin vikaantumisväli. (Järviö ym. 2007, 34.)

Vaurio voi olla seurausta häiriöstä, johon ei ole ajoissa puututtu. Vaurion seurauksena kohde on rikki. Aivan kuten häiriö -tapauksessa, niin tässäkin tapauksessa kohde korjataan korjaavan kunnossapidon menetelmillä. Vaurioiden perusteella pystytään määrittelemään kohteen vikaantumisväli ja sen käyttöikä. (Järviö ym. 2007, 34.)

Mikäli kone tai laite on suunniteltu ja valmistettu oikein ja sen oikeanlaisesta käytöstä ja huollosta pidetään huolta, ei rikkoontumista pitäisi tapahtua. Vika-tila on pitkän kehitysketjun lopputulos, ja se ei synny itsestään tyhjästä, vaikka siltä se vian ilmentyessä saattaa ensin vaikuttaa. Vikaantumisen syntymisen ja kehittymisen ymmärtäminen on tärkeä kunnossapitotaidon osa-alue. Kunnossapidossa on nykyään enemmän menty siihen suuntaan, että korjaavaa kunnossapitoa pyritään vähentämään ja lisäämään ehkäisevää, eli suunniteltua kunnossapitoa. (Järviö ym. 2007, 53–54.)

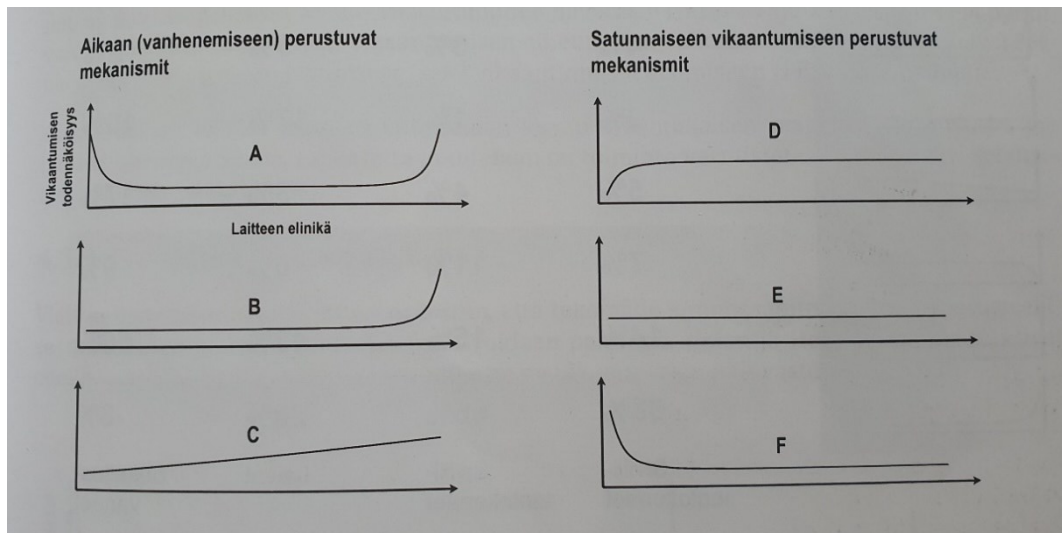
Vikaantumista ja sen eri vaiheita voidaan kuvata PF-käyrän avulla, jossa P tarkoittaa vikaantumisen alkamishetkeä ja F sitä hetkeä, kun kohde on vaurioitunut (Kuva 1). Pisteessä 1 vika kehittyy aluksi latenttina, eli sitä ei voi nähdä eikä tunnistaa. Pisteessä 2 tapahtuu jokin poikkeama, esimerkiksi ennalta arvaamaton tahaton ylikuormitus, jonka seurauksena latenttivika alkaa oireilla. Oirehtiminen voi vaikeuttaa koneen toimintaa, mutta se pysyy silti toimintakuntoisena. Poikkeama voi olla esimerkiksi laakerin kohonnut lämpötila ja sen voi tunnistaa tekemällä kunnonvalvontamittauksia säännöllisesti. Oirehtimisaika voi olla vuosia tai sekunteja, riippuen sen mekaniikasta. Tilanteen korjaamiseksi laakeri voidaan voidella uudelleen tai tarkistaa koneen kiinnitykset ja linjaus. Pisteessä 3 oireet ovat pahentuneet jo huomattavasti, jolloin laakerin vaihdon aikataulua aletaan suunnittelemaan. Mikäli mitään toimenpiteitä ei tehdä ennen pistettä 4 on seurauksena rikkoontuminen. Ensimmäisten oireiden ja rikkoontumisen väliin jäävää aikaa kutsutaan reagointiajaksi. Mikäli reagointiaikaa jää riittävästi, voidaan korjaavat toimenpiteet suorittaa ajoissa ja saattaa kone toimintakuntoon. Tarkastusväliä määritellään vikaantumistavan mukaan. (Järviö & Lehtiö 2012, 75; Ross 2019.)



Kuva 1. PF-käyrä (Järviö & Lehtiö 2012)

Kunnonvalvonnan avulla vikaantumisen löytäminen on haastavaa, mutta ei mahdotonta. Pääasia on, että pyritään havaitsemaan poikkeamia, jotka kertovat kohteen käynnissä muutoksen, kuten esimerkiksi kierrosluvun, paineen tai lämpötilan muutoksen. Ilman jatkuvaa poikkeamien havainnointia voidaan tehdä virheellisiä arvioita kohteen kunnosta. Poikkeamat ovat niitä tekijöitä, jotka saavat varsinaisen vikaantumisen käynnistymään (Promaint 2013).

Vikaantumisen todennäköisyyttä voidaan kuvata kuuden eri vikaantumismallin avulla (Kuva 2). Näistä mallit A, B ja C ovat aikaan perustuvia ja loput D, E ja F ovat satunnaisuuteen perustuvia. Mallissa A, on alkuun korkea vikaantuminen, eli niin kutsuttuja lastentauteja, jota seuraa tasainen vaihe ja eliniän loppussa vikaantuminen voimistuu. Mallissa B, ei ole lastentauteja, mutta muuten muistuttaa mallia A. Mallissa C, vikaantumista on alkuun vähän, mutta kasvaa tasaisesti loppua kohden. Mallissa D, vikaantuminen on alussa vähäistä, mutta nousee nopeasti tiettyyn tasoon. Mallissa E, vikaantuminen pysyy tasaisena koko elinkaaren. Mallissa F, on alkuun lastentauteja, mutta tasoittuu tiettyyn tasoon. Esimerkiksi laakereiden luotettavuutta kuvastaa mallin E kuvaaja. (Järviö ym. 2007, 57–58.)

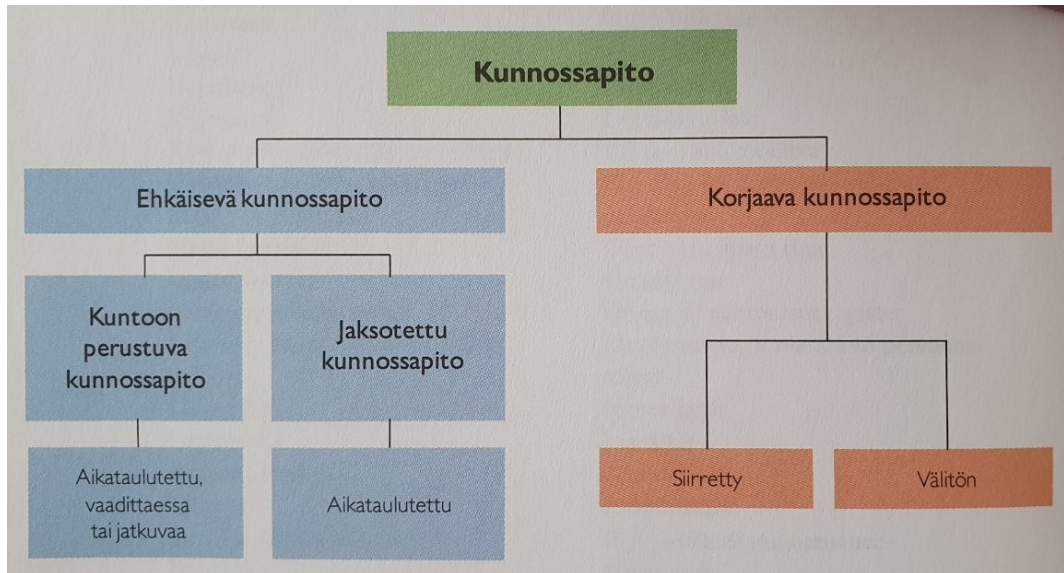


Kuva 2. Vikaantumismallit (Järviö ym. 2007)

Vikaantumisen syiden selvittämistä ei ole käsitelty kunnossapidon standardeissa. Vaikka sen tärkeys kyllä ymmärretään, ei monessakaan yrityksessä syiden selvittämiseen käytetä aikaa tai sitä ei ole mielletty kunnossapitoon kuuluvaksi. (Järviö ym. 2007, 51.)

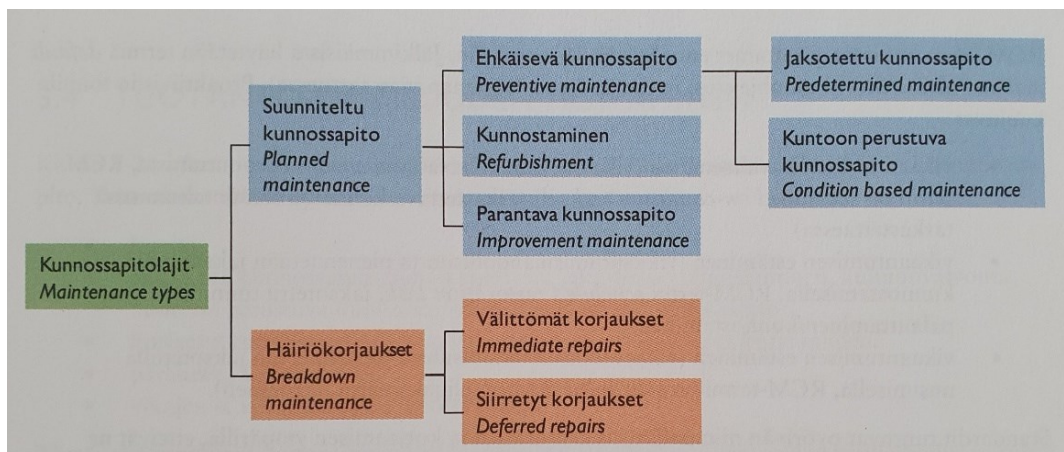
### 4.3 Kunnossapidon lajit

Standardi SFS-EN 13306 jakaa kohteen kunnossapidolliset toimenpiteet ehkäisevään kunnossapitoon ja korjaavaan kunnossapitoon (Kuva 3). Ehkäisevää kunnossapitoa tehdään säännöllisesti, ja sillä pyritään ehkäisemään kohteen toimintakyvyn heikkenemisen ja rikkoontumisen mahdollisuutta. Korjaavaa kunnossapitoa suoritetaan vikaantumisen ilmettyä, tarkoituksena palauttaa kohde toimintakuntoiseksi joko välittömästi tai tarkoituksellisesti viivästyttynä. (Mikkonen 2009, 98–99.)



Kuva 3. Kunnossapitolajit SFS-EN 13306 (Mikkonen 2009)

Standardi PSK 6201 jakaa kohteen kunnossapidolliset toimenpiteet suunniteltuun kunnossapitoon ja häiriökorjauksiin (Kuva 4). Siinä suunniteltu kunnossapito jaotellaan ehkäisevään kunnossapitoon, kunnostamiseen ja parantavaan kunnossapitoon. Parantavassa kunnossapidossa tarkoituksena on tehdä kohteesta luotettavampi tai helpommin kunnossapidettävä ilman, että kohteen toiminto muuttuu. Kunnostaminen on käytöstä pois otetun kohteen muuttamista toimintakuntoiseksi. Häiriökorjaus on vikaantuneen kohteen toimintakuntoon palauttamista, joko välittömästi tai tilanteen sen salliessa. (Mikkonen 2009, 96–97.)

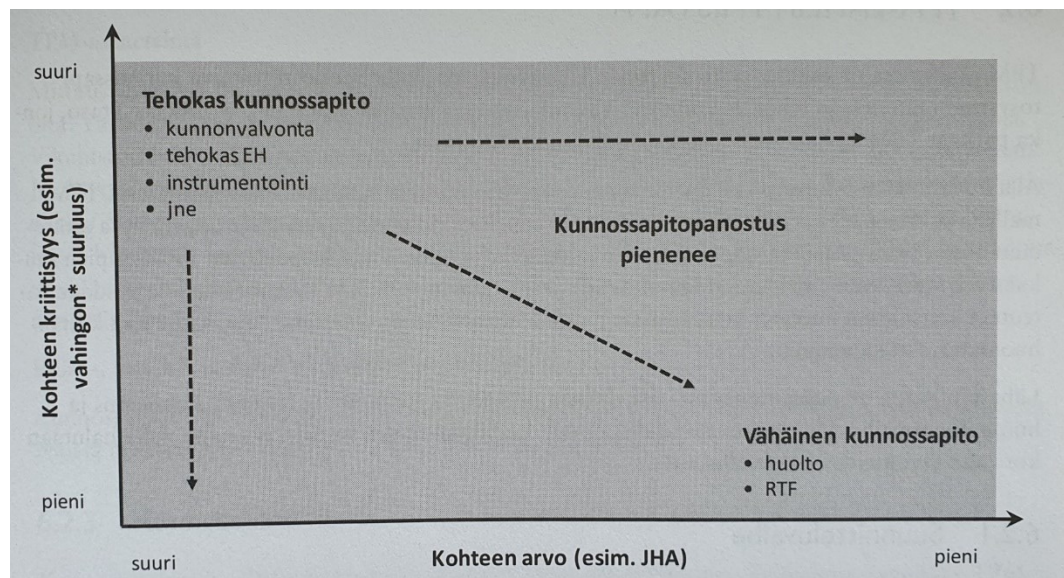


Kuva 4. Kunnossapitolajit PSK 6201 (Mikkonen 2009)

Standardeista ei löydy käsitteitä RTF (Run To Failure) tai OTF (Operate To Failure). Kummassakaan tapauksessa kohde ei kuulu ehkäisevään kunnossapitoon. Huoltotoimenpiteitä ei tällaiselle kohteelle juurikaan tehdä ja sen käyntitilaa ainoastaan seurataan. Vikaantunut kohde korjataan tai korvataan uudella. Yleensä tällaisen kohteen arvo on vähäinen, mikä tarkoittaa sitä, että sen korjaaminen ei ole järkevää. (Järviö & Lehtiö 2012, 48.)

#### 4.4 Kunnossapitostrategiat

Kunnossapitolajien ja toimintamenetelmien valintaan voidaan hyödyntää yksinkertaistettua kuvaa, jossa kohteen arvo on kuvattu suhteessa sen kriittisyyteen (Kuva 5) (Järviö & Lehtiö 2012, 113).



Kuva 5. Kunnossapitolajien ja toimintamenetelmien valinta (Järviö & Lehtiö 2012)

Kunnossapitoon on kehitetty erilaisia toimintamalleja ja menetelmiä, jotka tarjoavat työkalut kunnossapitostrategian luomiseen. Merkittävimpinä näistä voidaan pitää TPM (Total Productive Maintenance), RCM (Reliability Centered Maintenance) ja Asset Management. Menetelminä TPM ja RCM eroavat hieman toisistaan, mutta täydentävät toisiaan. (Järviö ym. 2007, 85;124.)

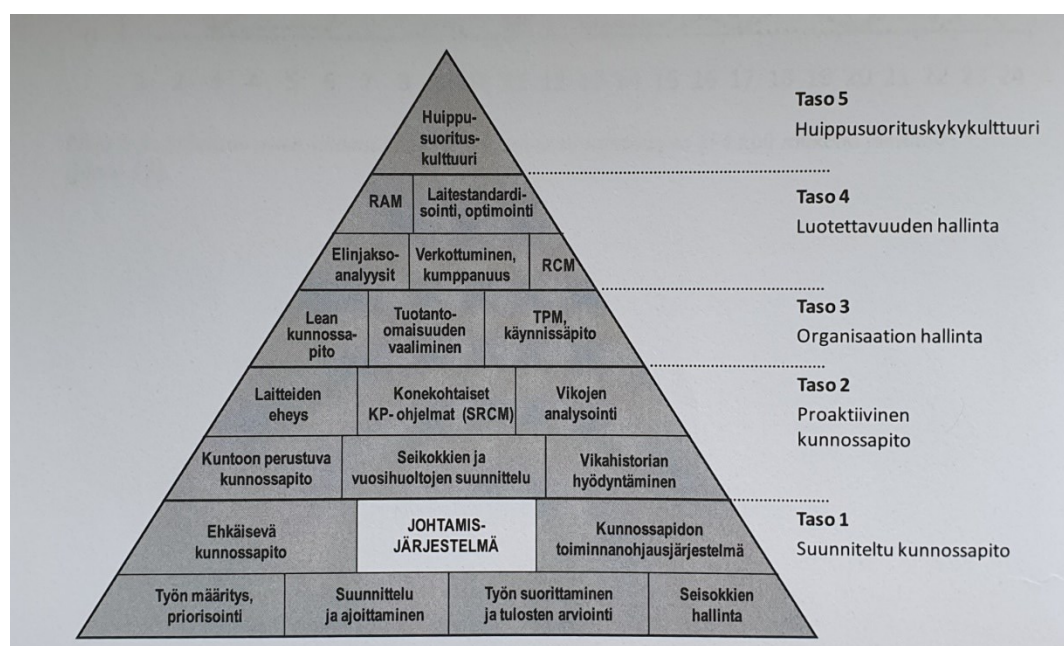
TPM-menetelmän päämäärät ovat taloudellinen kokonaistehokkuus. Sen avulla luodaan ehkäisevällä kunnossapidolla saavutettava koneen eliniän kattava kunnossapitosysteemi. Lisäksi sen tarkoitus on sitoa henkilökunnan yh-



teistyö kaikilla yrityksen tasoilla sekä siirtää kunnossapidon suunnittelu ja toteutus koneen huolto- ja käyttöhenkilöille. (Järviö ym. 2007, 111–112; Järviö & Lehtiö 2012, 144.)

RCM-menetelmän päämääränä on priorisoida koneet ja laitteet ja kohdistaa kunnossapito niihin kohteisiin, joissa tarve on suurin. RMC-päätöskaavion avulla selvitetään vikaantumismekanismit ja tehokkaat kunnossapitomenetelmät (Liite 1). Lisäksi sen avulla seurataan kriittisten komponenttien toimintaa sekä laaditaan toimintaohjeet kohteille, joihin ei löydy ehkäisevän kunnossapidon menetelmiä. (Järviö ym. 2007, 111–112; Järviö & Lehtiö 2012, 144.)

Asset Management esittää kunnossapidon vaiheet ja tavoitteet viisitason pyramidi-mallin mukaan, jonka huipulla on huippusuorituskykykulttuuri (Kuva 6). Pyramidi-mallista kunnossapito-osasto voi havainnollistaa, millä tasolla se tällä hetkellä on, ja minkälaisia keinoja sillä on nousta seuraavalle tasolle. Tasolla kolme malli pitää sisällään TPM-menetelmän ja tasolla neljä RCM-menetelmän. Asset Management -projekti jaotellaan viiteen eri vaiheeseen, joissa kohteet priorisoidaan luomalla laitehierarkia riskianalyysien avulla, valitaan kunnossapitomenetelmä, selvitetään kunnossapidon määrän ja laadun suhde sekä luotettavuuden vaikutus tuotantomääriin. (Järviö & Lehtiö 2012, 122–128.)



Kuva 6. Asset Management pyramidi-malli (Järviö & Lehtiö 2012)

Koneen toimintaan liittyvien riskien tunnistamisen ja todennäköisyyden sekä toimintavarmuuden ja laadun parantamisen työkaluina voidaan käyttää esimerkiksi erilaisia analysointitekniikoita, joista muutamia yleisimpiä ovat FMEA (Failure Modes and Effects Analysis), HAZOP (Hazard and Operability study), RBA (Risk Benefit Analysis), RBI (Risk Based Inspection) ja RCA (Root Cause Analysis). (Järviö & Lehtiö 2012, 176–177.)

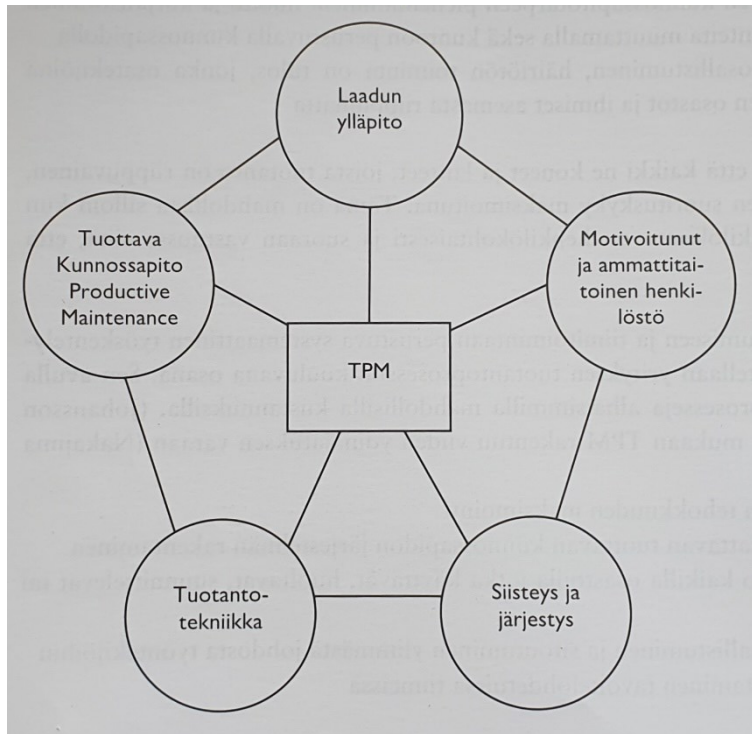
#### **4.5 Kunnossapidon kustannukset ja tuottavuus**

Kunnossapito on osa liiketoimintaa, jonka tulee olla järkevää ja mahdollisimman tuottavaa. Kunnossapidon kustannusrakenne voidaan tavanomaisimmin jakaa välittömiin ja välillisiin kustannuksiin sekä lisäksi tulee huomioida mahdolliset aineettomat menetykset ja kustannukset. (Järviö & Lehtiö 2012, 180–181.)

Välittömät kustannukset ovat toiminnan tekemisestä aiheutuvia kustannuksia, kuten esimerkiksi palkka-, varaosa-, varastointi-, materiaali- ja alihankintakustannukset. Välillisiä kustannuksia on hankala kohdistaa kunnossapidon eri toiminnoille. Välilliset kustannukset muodostuvat huonosta laadusta, uudelleen tekemisestä, ylisuurista varastoista, hallitsemattomasta resurssien käytöstä ja ylityökustannuksista. Huono laatu vaikuttaa luotettavuuteen, josta seuraa aineettomia kustannuksia, joita on esimerkiksi huonontunut turvallisuus, motivaatio ja oppimisprosessit sekä yrityksen imagon heikentyminen. (Järviö & Lehtiö 2012, 180–181.)

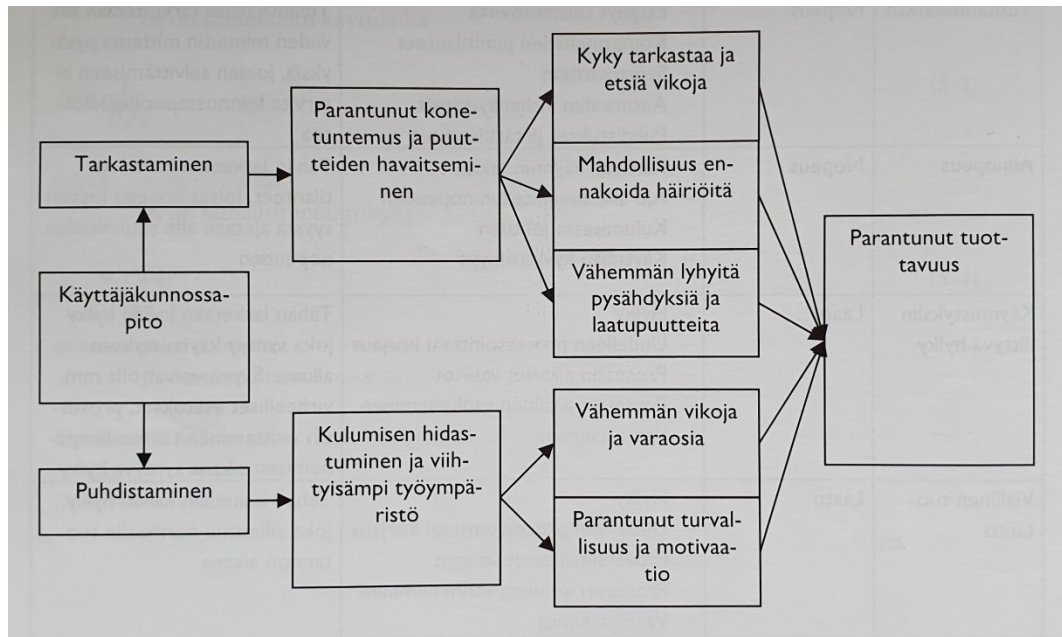
TPM:llä tavoitellaan vikojen osalta nollatoleranssia ja kunnossapidon optimointia. Sen mukaan kunnossapidolla on tärkeä merkitys pyrittäessä kustannustehokkaaseen tuottavuuteen. Kuvassa 7, TPM:n viisi osatekijää antaa hyvän kuvan sen pääperiaatteista kokonaisvaltaisessa tuottavassa kunnossapidossa. (Mikkonen 2009, 79–80.)





Kuva 7. TPM kunnossapidon osatekijät (Mikkonen 2009)

TPM-menetelmässä koneen käyttäjän tekemiä puhdistus ja tarkastus toimenpiteitä kutsutaan käyttäjäkunnossapidoksi. Kuva 8 osoittaa, miten käyttäjäkunnossapidolla pyritään tuottavuuden parantamiseen. (Mikkonen 2009, 84.)



Kuva 8. TPM käyttäjäkunnossapito (Mikkonen 2009)

#### **4.6 Kunnossapidon merkitys työturvallisuuteen ja ympäristön suoje- luun aluksilla**

Hyvin suunnitellun ja toteutetun kunnossapidon avulla vältetään ympäristö, henkilö ja omaisuusvahinkojen syntyminen (Järviö & Lehtiö 2012). Alukselle on asetettu ympäristövaatimuksia, joita toteutetaan erilaisilla teknisillä ratkaisuilla ja laitteilla. Laitteiden käyttö ja käyttövarmuus on taattava viranomaisten määräyksiä mukaisesti. Merenkulussa on useita viranomaistahoja, kuten esimerkiksi lippuvaltio, satamavaltio, IMO ja luokituslaitokset, joiden antamia määräyksiä sekä ohjeita tulee noudattaa ja huomioida myös aluksen kunnossapidon osalta.

Kaikilla aluksiin liittyvillä sidosryhmillä on suurin kiinnostus kerätä laivan koneita ja laitteita koskevia tietoja useista eri syistä. Laivan huoltohenkilökunnan, päälliköiden, omistajien, palveluntarjoajien näkökulmasta syyt alusten koneistojen kunnonvalvontaan ja tietojen keruuseen liittyvät ympäristönsuojeluun, ihmisten turvallisuuteen aluksella sekä liiketoimintariskien ja kustannusten minimoimiseen. (Lazakis ym. 2016.)

#### **4.7 Kunnonvalvontamenetelmät**

Kohteen kunnonvalvontaa suunniteltaessa tulee huomioida, halutaanko tehdä kohteen käynninaikaista- vai seisokkimittauksia. Seisokkimittauksiin soveltuu esimerkiksi paksuus-, vällys- ja toleranssimittaukset, magneettijauhe- ja tunkeumaneste tarkastukset, endoskopia sekä voiteluaine- ja nesteanalyysit. Käynninaikana valvomon mittareiden tarkkailun lisäksi henkilökunnan tulee tehdä säännöllisesti valvontakierroksia, joiden aikana tarkastuksia tehdään myös paikallisista mittauspisteistä. Käynninaikaisia mittausten menetelmiä ovat esimerkiksi lämpötila- ja painemittaukset, voiteluaine- ja nesteanalyysit, värähtelymittaukset ja lämpökuvaukset. (Mustajärvi 2002.)

Lisäksi kaikenlaista mittaamista ja tarkastamista on hyvä tehdä aistinvaraisin keinoin, kuten näkemällä, kuuntelemalla, tuntemalla ja haistamalla. Mittaajan täytyy kuitenkin ymmärtää kohteen toimintatapa, ja sovittaa aistien käyttö juuri tiettyyn kohteeseen. Esimerkiksi tulee tietää, onko tarkastettava kohde niin kuuma, että sitä ei voi koskettaa ilman suojavarusteita. Ihmisen aisteja voidaan siis hyödyntää kunnonvalvonnassa, mutta tulee huomioida, että aistien

herkkyys vaihtelee eri henkilöillä. Herkkyyteen puolestaan vaikuttaa vireystilan lisäksi ikä, sairaudet sekä ympäristöstä tulevat häiriöt. (Mikkonen 2009, 417–427.)

## 5 LÄMPÖKUVAUS ALUKSELLA

Lämpökuvaus on kunnonvalvonnan mittausmenetelmä, jolla voidaan tehdä koneen tai laitteen käynninaikaisia mittauksia. Se kuuluu NDT (Non Destructive Testing) mittausmenetelmiin, eli se on ainetta rikkomaton mittausmenetelmä. Kunnonvalvontamittaus on toimintaa, josta jää jonkinlainen dokumentti. Dokumentti voi olla esimerkiksi mittauspöytäkirja, raportti tai kuva. (Mustajärvi 2002.)

Pašagić ym. (2008) mukaan lämpökuvaus on erityisen hyödyllinen työkalu niin sähköisten kuin mekaanisten laitteiden tutkimisessa ehkäisevässä kunnossapidossa. Hänen mukaansa tyypillisimmät tarkastuskohteet aluksen mekaanisessa kunnossapidossa on laakerit, akselin suuntaus, höyrylinjat ja lauhteenpoistajat.

Esimerkiksi sähkömoottorin laakerin lämpökuvauksessa tulee verrata laakerin lämpötilaa moottorin koteloinnin lämpötilaan. Mikäli mittaus osoittaa laakerin lämpötilan olevan 5–10°C kuumempi kuin kotelo, saattaa laakeri olla kulunut, tai sen voitelussa on ongelmia. Kotelon ollessa kuumempi tai siinä näkyy kuuma piste verrattuna edelliseen mittaukseen saattaa vika olla käämityksessä tai jäähdytyksessä. (Fluke 2019a.)

NDT-menetelmänä lämpökuvauksella voidaan havaita särö, korroosio, vuoto sekä kerrostuman paksuus. Lämpökuvaus soveltuu kunnonvalvontamenetelmäksi, kun halutaan selvittää lämpövuotoa, laakerikuormitusta ja hukkatehoa. Kuvattavat kohteet voivat olla mm. laakerit, puhaltimet, kattilat, kompressorit, hissit, vaihteet, moottorit, paineastiat ja pumput. (Mikkonen 2009, 178;456.)

Fluke (2019b) muistuttaa, ettei kaikki ongelmat ole kuumia. Esimerkkinä se ottaa esille rajoitetun virtauksen jäähdytysjärjestelmässä. Toisena esimerkkinä se ottaa esille tiivisteissä kehittyvät vuodot. Tiivisteiden reunaa kuvaamalla etsitään lämpötilapoikkeavuutta, joka näkyy kuvassa joko kuumana tai kylmänä

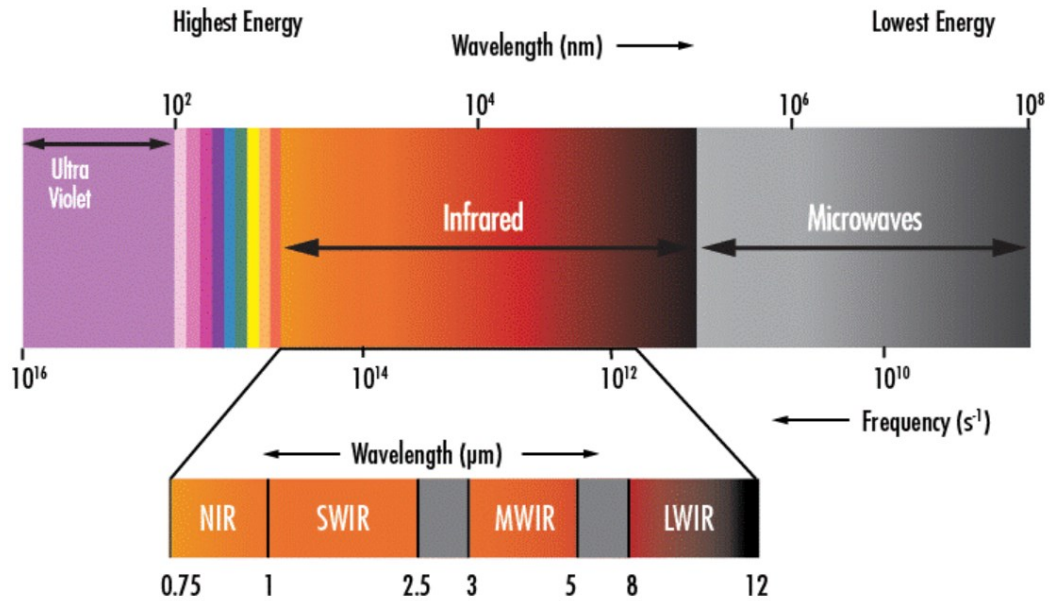
alueena. Lämpökameran käyttäjän on ymmärrettävä, kuinka kone tai laitteisto toimii, ja mitkä ovat sille ominaiset lämpötilat.

## 5.1 Lämpökameratekniikka

Yksinkertaisuudessaan lämpökamera on lämpösäteilyn vastaanotin. Se mittaa lämpösäteilyn eli infrapunasäteilyn voimakkuutta mitattavan kohteen pinnalta. Mitattu lämpösäteilyvoimakkuus muuttuu lämpötilatiedoksi, joka on digitaalisesti muodostettu lämpökameran näytölle.

Ihminen näkee esineet, jotka säteilevät aallonpituudella 400–700 nm. Sitä vastoin lämpökamerat mittaavat lämpösäteilyä infrapunaspektrissä aallonpituudella 3–12  $\mu\text{m}$  (Kuva 9). Infrapunavalon on pienten hiukkasten, nimeltään fotonien, sähkömagneettista säteilyä. Kaikki esineet yli absoluuttisen nollan ( $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) lämpötiloissa lähettävät infrapunasäteilyä, jonka infrapunakamera pystyy havaitsemaan lämpötilana. Sen vuoksi lämpökamera toimii jopa täysin pimeässä. Infrapunasäteilyä ei voi nähdä, mutta säteilyn voi tuntea esimerkiksi läheltä kuumaa pintaa, joka säteilee lämpöä. Lämpökamerat ”näkevät” tämän säteilyn ja muuntavat sen kuvaksi, jonka voimme siten nähdä silmillämme. (Opgal 2018.)

Infrapunaspektri muodostaa vain pienen osan koko sähkömagneettisesta spektristä (0,75–12  $\mu\text{m}$ ) (Kuva 9). Jäähdyttämättömät lämpökamerat käyttävät aallonpituuksia 7,5–12  $\mu\text{m}$  (LWIR-Low Wave Infrared). Jäähdytetyt lämpökamerat käyttävät aallonpituuksia 3–5  $\mu\text{m}$  (MWIR-Medium Wave Infrared). Lyhytaaltoista 1–3  $\mu\text{m}$  säteilyä käytetään lähinnä aktiivisenvalaistuksen yökuvaustekniikassa. (Opgal 2018.)



Kuva 9. Sähkömagneettinen säteily (Opgal 2018)

## 5.2 Kohteen kuvaamisessa huomioitavat asiat

Mitattavan kohteen pinnan materiaalilla on merkitystä mittaustuloksen luotettavuuden kannalta. Eri materiaaleilla on erilainen emissiokyky, eli säteilykyky, jolla se lähettää lämpösäteilyä. Emissiokyky määritellään materiaalin pinnalta säteilevän energian suhteesta täydelliseen säteilijään, eli mustaan kappaleeseen, jonka emissiivisyys  $\varepsilon=1$ . Täydellisen heijastimen emissiivisyys  $\varepsilon=0$ , mikä tarkoittaa sitä, että mitattavan kohteen emissiivisyys  $0 < \varepsilon < 1$ . Pinnan emissiokyky riippuu materiaalin lisäksi myös pinnan luonteesta. Esimerkiksi puhtaalla ja kiillotetulla metallipinnalla on alhainen emissiokyky, kun taas karhentulla ja hapettuneella metallipinnalla on korkea emissiokyky. Emissiokyky riippuu myös pinnan lämpötilasta sekä aallonpituudesta ja kulmasta. Jokaiselle materiaalille ominainen emissiivisyys tulee ottaa huomioon lämpökuvausta aloitettaessa tai kalibroitaessa mittalaitetta. Koska materiaalin pinnan emissiokyky riippuu monista kemiallisista ja fysikaalisista ominaisuuksista, sitä on usein vaikea tarkasti arvioida. (Pašagić ym. 2008.)

Salva (2004, 3) mukaan ehkäisevässä kunnossapidossa, kun mittaukset tehdään säännöllisin väliajoin kohteista, joissa voi olla useita eri materiaaleja ja pintoja, on emissiivisyydellä toissijainen merkitys. Riittää, kun on otettu ensimmäinen otos, johon sitten verrataan muita otoksia.

### 5.3 Lämpökameran kalibrointi, säätö ja käyttö aluksella

Pašagić ym. (2008) mukaan aluksella tulisi ajaa kolmesta neljään tuntia täydellä nopeudella ja täydellä kuormalla, jolloin on ihanteellisimmat olosuhteet saada selkeä kuva, koneistojen toiminnasta. Mittausolosuhteet tulee siis ottaa huomioon ja pyrkiä siihen, että ne ovat samanlaiset joka mittauskerralla. Lämpökameran sisäisellä lämpenemisellä sekä ulkoisen lämpötilan vaikutus mitaustuloksiin tulee huomioida, joten laitteen kalibrointi säännöllisesti tarkentaa mitaustuloksia. Muita kuvan säätämisen kannalta huomioitavia asioita on lämpötila-alueen ja väripaletin valinta, kuvausetäisyys ja tarkennus sekä mittavälineen puhtaus (Malmivirta ym. 2019).

Handlin (2004) on lämpökuvauksen ammattilaisena kokenut, että merenkäynnin takia mittausolosuhteet aluksella voivat muuttua hankaliksi tai jopa mahdottomaksi. Myös ahtaat tilat voivat muodostua ongelmaksi. Ison kameran kanssa ei pääse ahtaisiin väleihin tai kuvan kohdistus ei välttämättä onnistu. Kameran fyysinen koko voikin olla yksi valintakriteereistä, kun mietitään lämpökameran käyttöönottamista kunnossapidon tueksi.

Lämpökuvan ottamisen jälkeen on hyvä, jos sitä pystytään muokkaamaan eri tavoin, jolloin siitä saadaan mahdollisimman tarkkaa tietoa. Kuvan muokkamiseen kehitetyt ohjelmistot ovat tärkeä lisävaruste. Ohjelmiston tärkeimpiä ominaisuuksia ovat väriskaalojen valinta, kuvan siirto, kierto ja suurennus, alue-analyysi, kuvan tasoittaminen ja suodatus. Lisäksi voidaan kuunnella kuvaan liitettyjä äänikommentteja, mikäli sellaisia on kuvausvaiheessa tehty. (Promaint 2016; Allinson 2020.)

### 5.4 Lämpökuvauksen edut aluksen kunnossapidossa

Lämpökuvauksen erityisesti ehkäisevän kunnossapidon osalta, mutta myös korjaavassa kunnossapidossa erinomainen apuväline. Etuna on mitattavan kohteen lämpötilan vertaaminen, sitä ympäröivään materiaaliin. Esimerkiksi näytöltä voidaan havaita koko kohteen lämpötilaerot, tarkentaa mitattavaan kohtaan ja nähdä lämpötilat useasta pisteestä yhtä aikaa. Lämpökuvauksen soveltuu erityisen hyvin liikkuvan kohteen mitaamiseen. Mitattava kohde saattaa olla kuuma tai pyöriessään luoksepääsemätön ja vaarallinen, jolloin lämpöku-

vaus etäältä voi olla hyvä vaihtoehto tehdä kunnonvalvonta mittauksia häiritsemättä prosessia. Lämpökuvaus näyttää lämpötilat reaaliaikaisesti, eikä siinä esiinny samanlaista huojuntaa, kuin esimerkiksi koskettavissa mittauksissa. Lämpökameroiden tekniikan kehittyessä, niiden luotettavuus, mittaussnopeus ja edullisuus sekä pienentynyt koko on lisännyt käyttäjystävällisyyttä huomattavasti. Lämpökameran hankintakulu on hyvin edullinen verrattuna mahdollisiin menetyksiin vaurion sattuessa. Merenkulun kunnossapidossa tehtävät tarkastukset on tehtävä ripeästi, joten tämä tekee siitä aikaa säästävän ja edullisen tarkastustyökalun kunnossapitoon. (Pašagić ym. 2008.)

Lämpökuvaamisen etuna ehkäisevän kunnossapidon kannalta on ottaa kuvat laitteesta ja sen komponenteista silloin, kun se on toimintakuntoinen ja ehjä. Näin saadaan jokin vertailukohta, mihin myöhempiä kuvia voidaan verrata poikkeavuuksien havaitsemiseksi. Samaa vertailevaa menetelmää voidaan hyödyntää, mikäli samoissa olosuhteissa on identtisiä komponentteja samantlaisissa kuormituksissa. Komponenttien lämpöprofiilit tulisi olla samantlaiset, jolloin poikkeavuuden havaitseminen helpottuu. (Fluke 2019c.)

## **6 VIRANOMAISMÄÄRÄYKSET**

Alusten kriittisimmille koneistoille ja laitteille on olemassa eri viranomaisten määräyksiä, joilla varmistetaan ihmishengen, ympäristön ja omaisuuden turvaaminen. Viranomaismääräyksillä pyritään alusten ehdottomaan luotettavuuteen, johon pelkästään kunnossapidon keinoilla ei voida päästä. Käyttöön on otettu redundanttisuus eli varmentaminen. Varmentaminen on aluksilla toteutettu kahdentamalla kriittiset komponentit vikaantumisen varalta, kuten esimerkiksi jäähdytysjärjestelmä tai polttoaineen suodatus. Varmentamiseen voidaan myös käyttää erikois- ja vikasietoisia komponentteja sekä käytön jatkuvaa monitorointia kriittisten laitteiden osalta (Järviö ym. 2007, 133).

### **6.1 SOLAS-vaatimukset alukselle**

SOLAS (Safety of Life at Sea) on IMO:n (International Maritime Organization) määrittelemä Kansainvälinen yleissopimus ihmishengen turvallisuudesta merellä. Sopimuksen allekirjoittajamaissa rekisteröityjen laivojen tulee läpäistä tietyt vähimmäisvaatimukset. Tarkastettavia asioita on mm. palontorjunta ja

hengenpelastus välineet sekä kriittisimmät järjestelmät. Muun muassa SOLAS luku I, sisältää kolme osaa:

- A. Aluksia koskevat säädökset: Pääasiassa säädökset koskevat kansainvälisessä liikenteessä olevia aluksia sekä sitä, kuinka laivan luokitus määräytyy. Sisältää myös määritelmät niistä aluksista, joita säädökset eivät koske.
- B. Tutkimusten ja sertifiointien vaatimukset: Määritellään kuka saa tarkastaa/katsastaa laivoja. Vain lippuvaltion valtuuttamat luokituslaitoksen tarkastajat saavat tarkastaa laivoja. Epäkohdan ilmetessä, tarkastaja voi velvoittaa laivan suorittamaan korjaavia toimenpiteitä välittömästi. Tarkastaja raportoi myös laivan kunnan lippuvaltiolle. Luokituslaitoksella on mahdollisuus perua laivan sertifiointeja ja satamavaltio voi kieltää laivaa lähtemästä ennen kuin korjaukset on suoritettu.
- C. Toiminnasta vauriotilanteessa: Haaverin sattuessa, luokituslaitos suorittaa tutkimukset sekä antaa ehdotuksia, miten voimassa olevia määräyksiä tulisi muuttaa, että haavereilta voitaisiin jatkossa välttyä.

Pašagić (2008) ottaa artikkelissaan esille, että SOLAS yleissopimuksen mukaan koneiden, osien ja komponenttien enimmäispintalämpötila aluksen konehuoneessa ei tulisi nousta yli 220°C. Kaikkien pintojen, jotka ovat yli 220 °C, on oltava olla eristetty tai muuten suojattu. Tämän maksimiarvon perusteella käytetään seuraavanlaisia vakavuuskriteerejä:

- Vakavuus 0: OK, mitattu lämpötila <210°C
- Vakavuus 1: Vaatii tarkkailua, mitattu lämpötila >210°C ja <220°C
- Vakavuus 2: Ei hyväksyttävä, mitattu lämpötila >220°C

Mikäli esimerkiksi öljyputkisto on vakavuusluokan 1, havaitun pisteen vieressä, muuttuu vakavuus luokkaan 2. Vakavuuskriteerit ovat kuitenkin turhia ilman huolellista tarkkailua ja tietoa aluksen koneistojen tilasta. (Pašagić ym. 2008; SOLAS 2020.)



## 6.2 ISM-säännöstö aluksen huoltovaatimuksista

ISM-säännöstö (International Safety Management Code) on IMO:n määrittelemä kansainvälinen standardi alusten turvalliselle hallinnalle ja toiminnalle sekä ympäristön pilaantumisen ehkäisemiselle. ISM-säännöstön kohdassa 10 (Maintenance of the Ship and Equipment) määritellään, että yhtiön on kehitettävä prosessit, sen varmistamiseksi, että alusta huolletaan asiaankuuluvien sääntöjen ja määräysten sekä yhtiön mahdollisesti asettamien lisävaatimusten mukaisesti. Yritys varmistaa näiden vaatimusten täyttämisen siten, että: tarkastukset pidetään sopivin väliajoin; kaikista vaatimustenvastaisuuksista ilmoitetaan mahdolliset syyt, jos ne tiedetään; asianmukaiset korjaavat toimet toteutetaan ja näistä toiminnoista pidetään kirjaa. Yhtiön tulisi laatia SMS-menetelytavat (Safety Management System) laitteiden ja teknisten järjestelmien tunnistamiseksi, joiden äkillinen toimintahäiriö voi johtaa vaarallisiin tilanteisiin. Turvallisuusjohtamisjärjestelmässä olisi säädettävä erityistoimenpiteistä, joilla pyritään edistämään tällaisten laitteiden tai järjestelmien luotettavuutta. Näihin toimenpiteisiin tulisi kuulua valmiusjärjestelyjen ja laitteiden tai teknisten järjestelmien säännöllinen testaus, joita ei käytetä jatkuvasti. Kaikki nämä toimenpiteet tulisi sisällyttää aluksen operatiiviseen kunnossapitoon. (ISM 2020.)

## 6.3 Port State Control

Satamavaltio valvoo tarkastuksilla ulkomaisten alusten vaatimustenmukaisuutta. Varusteiden kunto tulee olla kansainvälisten määräysten (IMO) vaatimusten mukaisia, aluksen miehityksen tulee vastata ilmoitettua ja, että alusta käytetään näiden vaatimusten ja sääntöjen mukaisesti. Vaatimusten noudattaminen on varustamoiden ja alusten omistajien vastuulla, mutta vaatimusten noudattamista valvoo satamavaltion virkamiehet. Tarkastuksia pyritään koordinoimaan siten, että yhden maan satamaan menevää alusta ei heti naapurimaassa tarkastettaisi uudelleen, jotta voitaisiin keskittyä huonommassa kunnossa oleviin aluksiin ja välttää useita päällekkäisiä tarkastuksia hyväkuntoisissa aluksissa. Tarkastuksia toteuttava viranomaisella saa alusten riskiprofiiliin liittyvät tiedot THETIS-tietokannasta. Tietokannasta selviää, miten usein alus tulee tarkastaa. Korkean riskin alukset joutuvat tarkastuksiin kerran puolessa vuodessa, kun taas matalan riskin alukset tarkastetaan 2–3 vuoden välein. (IMO 2020.)

#### 6.4 Viranomaisten ja luokituslaitosten työnjako

Alusten katsastukset ovat viranomaisvaatimuksia, jotka pohjautuvat SOLASin, IMO:n ja Euroopan Unionin vaatimuksiin ja määräyksiin. Suomen viranomaisen Traficom (2020) on tehnyt sopimuksen alusten katsastamisesta, jossa on sovittu työnjaosta luokituslaitoksen ja Traficomien välillä. Sopimukset ovat identtisiä ja siinä on sovittu, että luokituslaitos voi suorittaa suomalaiselle alukselle SOLAS-yleissopimuksen, MARPOL-yleissopimuksen ja lastiviivayleissopimuksen mukaiset katsastukset sekä myöntää katsastusten perusteella turvakirjat. Melkein kaikki aluksen hyväksymistä vaativat dokumentit voi hyväksyttää luokituslaitoksella.

Luokituslaitokset, joiden kanssa Traficom on tehnyt sopimuksen ovat:

- American Bureau of Shipping
- Bureau Veritas
- Lloyd's Register
- RINA Services S.p.A.
- Russian Maritime Register of Shipping
- Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK)
- DNV GL AS

Viranomaisyhteistyön lisäksi luokituslaitokset tarjoavat muun muassa laatu- luokituksia ja sertifikaatteja aluksille ja niiden koneistoille. Pää- ja apukoneiden sekä hätätoimintojen ja järjestelmien osalta luokituslaitosten säännöt määrittelevät aluksissa käytettäviä rakennemateriaalien lisäksi niiden käyttö- ja huoltovaatimukset. Eri laivatyypeille kuten esimerkiksi kauppalaivoille, erikoisaluksille ja sotalaivoille on saatavissa omat säännöt. Luokitettu alus täyttää vähintään luokituslaitoksen säännösten minimivaatimukset, jolloin laiva voidaan vakuuttaa mahdollisten onnettomuuksien ja vahinkojen varalta. Luokitus voidaan poistaa, jos säännöstä rikotaan. Kaikki muutokset laivaan, niin runkoon kuin koneistoihinkin täytyy etukäteen hyväksyttää luokituslaitoksella. Luokkaa eli aluksen vaatimustenmukaisuutta valvotaan sen koko eliniän ajan. (IACS 2020.)

Aluksen luokituksen vuoksi, se on telakoitava kahdesti viisivuotiskauden aikana, jolloin tehdään muun muassa koneiden sekä laitteiden huolto ja kunnossapitoa. Telakoinnin yhteydessä luokituslaitos tekee vaadittavat luokitukset ja

viranomaisten toimeksiannosta katsastukset. Luokituslaitoksen sääntöjen mukaan luokan ylläpitämiseksi vaaditaan, että joko viiden vuoden välein kaikki koneistot avataan ja tarkastetaan kerralla tai sitten jatkuvana viiden vuoden luokitusjaksona, eli 20 % koneistoista avataan ja tarkastetaan vuodessa. Luokitus voidaan tehdä myös ilman koneiston avaamista, mutta tällöin koneistolle tulee olla suunniteltu ja dokumentoitu huolto-ohjelma, josta ilmenee koneen kunto koko tarkastelujakson ajalta. Dokumentointi voi olla esimerkiksi öljy ja vesinäytteiden kerääminen tai kunnonvalvonnan mittaukset, kuten esimerkiksi lämpökuvantaminen. Kunnonvalvontaan perustuva luokitus on nimeltään Machinery CM. (IACS 2020.)

Luokituslaitosten välillä säännöt poikkeavat joiltain osin toisistaan, mutta kattojärjestö IACS (International Association of Classification Societies) yhtenäistää keskeisimmät vaatimukset. Luokituslaitosten tulee huomioida lakisääteisiä vaatimuksia tarkastettaessa aluksen lippuvaltion viranomaisen sekä kansainväliset säädökset aluksen koneistoista ja rakenteista. Aluksen lippuvaltio hyväksyy luokituslaitoksen, jonka tehtävänä on toimia puolueettomana tarkastajana siten, että aluksen turvallisuusstandardit täyttyvät katsastusten ja tarkastusten aikana sekä myöntää alukselle todistus sen merikelpoisuudesta. (IACS 2020.)

## **7 LÄMPÖKUVAUSKOHTEET ALUKSELLA**

Tutkimuksessani käytin Flir One Pro -mallia, joka on puhelimeen liitettävä lämpökamera. Pienen kokonsa ansiosta se kulkee helposti taskussa mukana. Sillä voidaan kuvata lämpötila-alueella  $-20\text{ °C} - 400\text{ °C}$ . Flir One Pro mahdollistaa myös videolämpökuvauksen, jossa nähdään lämpötilaerojen vaihtelu reaaliajassa. Lämpökuvapalettien ja siirrettävät mittapisteet (3 kpl) helpottavat kuvaamista. (Flir 2020.)

Havainnoivan tutkimustyön aluksella aloitin tekemällä karkeaa selvitystä lämpökuvattavien kohteiden määrittelystä. Ihan kaikkea ei kannata kuvata, joten ensimmäiseksi tuli selvittää, mitkä ovat esimerkiksi kriittisiä kohteita propulsioon tai sähkön- ja lämmöntuotannon kannalta, jossa lämpökuvasta voitaisiin hyö-

dyntää. Toinen lähestymistapa asiaan on miettiä kohteita, joista löytyy jo valmiiksi suuria lämpötilaeroja. Kolmas keino on tutkia kohteita, joiden lämpötila normaaliolosuhteissa pysyy hyvin vakiona, jolloin vikaantumisesta aiheutuva muutos näkyy selvemmin kohonneena lämpötilana.

Ottaen huomioon edellä mainitut kolme tapaa määrittää kuvattava kohde, päädyin tutkimaan viittä kohdetta, jotka sopivat lämpökameralla kuvattaviksi. Työn tarkoituksena ei ollut löytää vikoja, mutta mikäli jotain poikkeavaa olisi löytynyt olisin siitä kertonut harjoittelustani vastaavalle ykkösmestarille. Kohteiden tarkempi kuvaus perustuu joko osittain tai kokonaan eri kirjallisuus- ja tietolähteisiin.

### **7.1 Pakokaasuvuodot**

Polttoaineen laadulla on merkitystä, kun tarkastellaan mahdollisimman tehokasta ja hyvää palotapahtumaa moottorin palotilassa, ja siitä syntyvien haitallisten yhdisteiden määrää sekä laatua. Palamistuotteena syntyy ihmiselle, ympäristölle sekä koneiston kunnolle haitallisia yhdisteitä. Haitalliset yhdisteet aiheuttavat korroosiota moottoriin sekä sen pakokaasujärjestelmälle. (Wankhede 2020.)

Menon (2020) mukaan moottorin tärinästä ja pakoputkiston lämpölaajenemisesta johtuen, pakokaasujärjestelmän komponentit, kuten tiivisteet, joustinosat ja pakosarja joutuvat erityisen suurelle rasitukselle, jolloin pakokaasuvuodot konehuoneeseen ovat mahdollisia.

Wankhede (2020) mukaan pakokaasujärjestelmä on propulsiotuotannon kannalta tärkeässä roolissa, joten siksi sen toimivuuteen tulisi panostaa kunnossapidon eri keinoin. Tärkeää olisikin huolehtia säännöllisestä turboahtimen pesusta ja pakoputkiston puhalluksesta. Käytön aikaisiin tarkastuksiin lämpökuvaukset soveltuvat erinomaisesti, sillä silloin pakoputkiston kunto voidaan todeta ilman eristeiden turhaa purkamista. Vaarana kuitenkin on, että pakokaasukanaavassa on jo vuotoja, joten erityisesti savupiippua lämpökuvattaessa tulee huomioida myrkyllisten palamisyhdisteiden vaikutukset hengitettäessä, jolloin on käytettävä happilaitteita.

### 7.1.1 Kuumakorrosio

Natriumia (Na) ja vanadiinia (V) esiintyy luonnostaan polttoaineessa, eikä niitä voida erotella polttoaineesta pois. Palamisprosessissa vanadiini hapettuu, jolloin syntyy vanadiinioksiedeja (VO ja VO<sub>2</sub>), joista edelleen muodostuu lämpötilan laskiessa polttoprosessissa divanadiinipentoksidia (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> on osittain nestemäistä, tahmeaa ja se tarttuu pintoihin, joihin se on kosketuksissa. Polttoprosessissa polttoaineessa oleva natrium puolestaan reagoi vesihöyryn kanssa muodostaen natriumhydroksidia (NaOH), joka rikkioksidin (SO<sub>2</sub>) kanssa muodostaa natriumsulfaattia (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Natriumsulfaatti kondensoituu pakokaasukanavien sisäpinnoille muodostaen yhdessä divanadiinipentoksidin kanssa pakokaasukanaviin kerrostumia ja syövyttäviä yhdisteitä. Vanadiinin ja natriumin seossuhteen ollessa 3:1, muodostuu kuuma korroosiota aiheuttavaa kerrostumaa jo 350–450 asteessa. Lisäksi tuhka- ja hiilikertymät lisäävät ja nopeuttavat kaasukanavien kertymiä, eroosiota ja korroosiota korkeissa lämpötiloissa. Kuumakorrosion vaikutukset näkyvät pakoventtiileissä, turboahtimen siivissä sekä pakokaasuvuotoina pakoputkistossa.

(Wankhede 2020.)

### 7.1.2 Kylmäkorrosio

Polttoaineen rikkipitoisuus vaihtelee 0,1–3,5 % välillä. MARPOL-sopimuksen liitteen VI mukaan polttoaineen rikkipitoisuus tulee olla 1.1.2020 alkaen 0,5 % m/m tai vaihtoehtoisesti aluksella tulee olla lippuvaltion hyväksymä pakokaasun puhdistusjärjestelmä (MARPOL 2020). Pumpun ja suuttimien läpi kulkevassa polttoaineessa oleva rikki tarjoaa luontaisen voiteluominaisuuden polttoaineelle. Palotapahtumassa happi (O) reagoi rikin (S) kanssa, muodostaen rikinoksiedeja (SO<sub>2</sub> ja SO<sub>3</sub>). Kun SO<sub>3</sub> poistuu pakokaasujen mukana, reagoi se ilmassa olevan kosteuden kanssa muodostaen voimakkaasti syövyttävää rikkihappoa H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. (Wankhede 2020.)

Mikäli moottori käy epätaloudellisesti matalilla kierroksilla, syövyttävät seokset kondensoituvat sylinteriputken seinämien lisäksi muuallekin pakoputkistoon aiheuttaen kylmäkorroosiota. Toinen kylmä korroosion syntyyn vaikuttava tekijä on typenoksidien (NO<sub>x</sub>) päästö rajoitukset. Sääntöjen täyttymiseksi moottorin on toimittava korkeammassa paineessa ja matalammassa lämpötilassa, mikä

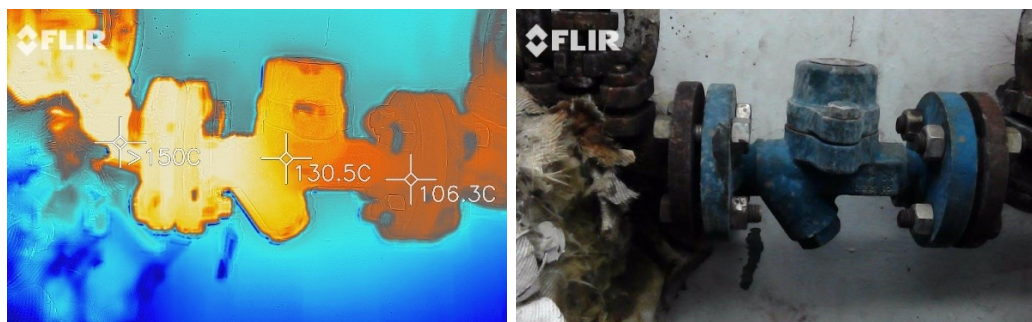
luo otolliset olosuhteet kosteuden kondensoitumiselle pakokaasujärjestelmässä, mikä puolestaan johtaa kylmäkorroosioon. (Wankhede 2020; MARPOL 2020.)

Vähärikkinen polttoaine puolestaan aiheuttaa myöhäisen ja hitaan palamisen, mikä näkyy ylikuumenemisena ja voiteluongelmina. Ylikuumeneminen nostaa pakokaasun lämpötilaa mikä puolestaan lisää kuumakorroosiota. (Wankhede 2020.)

## **7.2 Lauhteenpoistajat**

Aluksilla höyryä käytetään useiden eri laitteistojen ja kohteiden lämmittämiseen, mutta erityisesti apu- ja pääkoneiden polttoaineen, voiteluaineen ja jäähdytysveden lämpötilojen kannalta lämmityshöyryn tasainen tuotto on oleellista. Lauhteenpoistaja on pienehkö mekaaninen komponentti höyrylinjassa ennen kulutuskohdetta ja aluksella niitä on melko paljon. Kylläinen höyry sisältää kosteutta n. 5 %. Tiettyihin prosesseihin kosteaa höyryä ei voida ajaa, jolloin lauhteenpoistajan tehtävänä on poistaa höyrylinjoista, höyrytukeista sekä lämmönvaihtimista höyryn mukana kulkeutuva vesi. Lauhteenpoistajien toiminta luotettavan tuotannon kannalta on erittäin tärkeää. (Konwell 2020.)

Epäkuntoinen lauhteenpoistaja päästää vettä höyrylinjaan, mikä saattaa aiheuttaa suuren paineiskun. Paineiskun seurauksena on usein höyryvuoto, joka saattaa häiritä tai pysäyttää kokonaan höyryntulon, sitä tarvitsevalle kohteelle. Lauhteenpoistajan toimintakunto voidaan todeta lämpökuvaamalla se niin, että nähdään tulopuolen ja lähtöpuolen lämpötilat (Kuva 10). Lauhteenpoistaja kerää höyrylinjasta vettä, jolloin lähtöpuolen lämpötila on pienempi kuin tulopuolen lämpötila. Epäkuntoisen lauhteenpoistimen lämpötila on sama niin tulo kuin lähtöpuolellakin. (Konwell 2020.)



Kuva 10. Lauhteenpoistaja

Lauhteenpoistajien säännöllinen tarkastus lämpökuvaamalla esimerkiksi keran vuodessa auttaa todentamaan niiden sen hetkisen kunnan verrattuna edellisiin mittauksiin. Mikäli nähdään, että lauhteenpoistajassa on merkkejä vikaantumisesta, voidaan sen poistoa uusimista tai korjausta varten suunnitella sellaiseen ajankohtaan, jolloin siitä on vähiten haittaa järjestelmän toiminnan kannalta.

### 7.3 Pumppujen ja sähkömoottorien laakerit

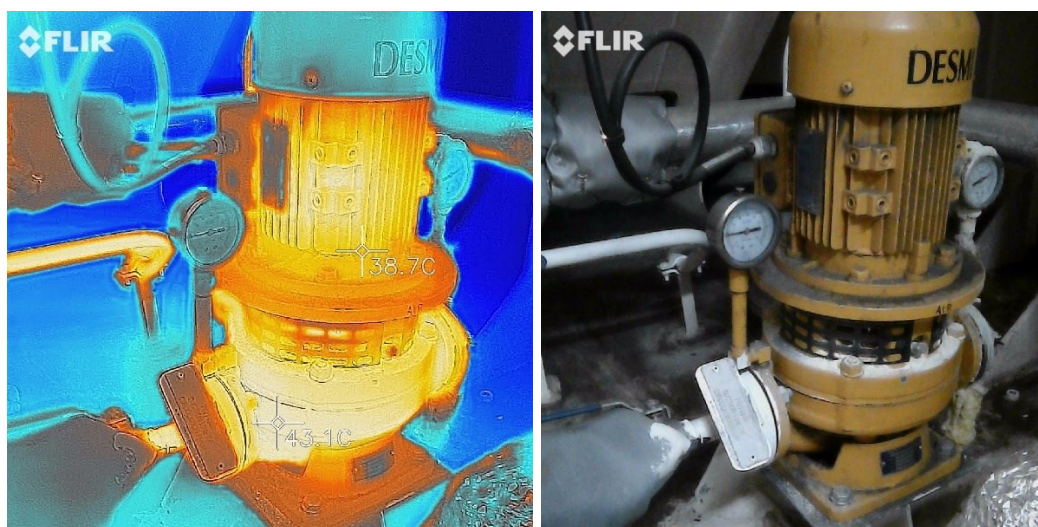
Lämpökuvaus on todettu erittäin tehokkaaksi menetelmäksi käynnissä olevien pumppujen ja sähkömoottorien laakereiden kunnan valvontamenetelmäksi, sillä sen avulla nähdään reaaliaikaisesti laitteen tila siihen koskematta. Laakereiden kuntoa mitattaessa tulisi laitteen olla normaali käyttöolosuhteessa tasaisella kuormalla. Mikäli laitetta joudutaan tarkastamaan matalammalla kuormituksella, on syytä pitää silmällä pieniä eroavaisuuksia. Kun kuormitus nousee, niin myös lämpötila nousee ja sitä kautta lämpötilaerojen havaittavuus paranee.

Sähkömoottorin laakereiden lämpötilaa kuvattaessa on hyvä samalla tarkastaa sen ulkopintaa kauttaaltaan, etsien kuumia pisteitä ja verrattava koko kotelon lämpötilaa edellisiin mittauksiin. Kohonnut lämpötila saattaa kertoa vikaantumisen alkamisesta ja moottoria on tarkasteltava tarkemmin. On myös syytä aina varmistaa, että jäähdytyspuhallin toimii. Paikallinen kuumapiste saattaa olla seurausta hetkellisen jännitteen muutoksesta tai yliaaltojen liiallisesta lämmöstä. Myös liitännätarasian sisällä olevien johtimien huonot liitokset voidaan

lämpökuvata samalla. Löysät liitokset tai katkenneet säikeet johtimissa aiheuttavat suuremman vastuksen, jolloin osa sähköenergiasta muuttuu lämmöksi ja näkyy näin ollen lämpökuvissa kohonneena lämpötilana.

Laakeriviat ovat kuitenkin varmasti niitä yleisimpiä vikoja sähkömoottoreissa. Tuuletus ja moottorin runko siirtävät lämpöä laakereista tehokkaasti pois, mutta laakerialueen lämpötilaa tulee verrata rungon lämpötilaan ja edellisiin mittauksiin. Mikäli muutos on noin 5–10 °C, voi kyseessä olla vikaantuva laakeri. Syytä laakerin vikaantumiseen voi olla virheellinen suuntaus tai häiriö laakerin voitelussa. Laakeria ei ole joko voideltu säännöllisesti tai sitten sitä on voideltu liikaa. (Fluke 2019a.)

Pumppujen laakereiden lämpökuvantamisessa on myös huomioitava lämmön siirtyminen runkoon ja sen läpi virtaavaan nesteeseen. Tällöin on syytä seurata pumppuun tulevan ja lähtevän nesteen lämpötilaeroa sekä verrattava rungon lämpötilaa laakerin kohdasta, edellisiin mittauksiin (Kuva 11).



Kuva 11. Pumppu ja sähkömoottori

Erityisen suositeltavaa olisi tehdä lämpökuvaukset ennen ja jälkeen, mikäli pumppu tai sähkömoottori on aukaistu tai vaihdettu. Tällöin saadaan selkeät vertailukohtat tuleville mittauksille, sekä havaitaan mahdollisesti asennuksen yhteydessä tapahtuneet asennusvirheet.



## 7.4 Venttiilit

Aluksella on käytössä montaa eri venttiilityyppiä riippuen käyttökohteesta. Venttiilit sekä niitä liikuttavat toimilaitteet joutuvat kestämaan kovaa päivittäistä käyttöä. Venttiiliin vuoden aikana osuvien paineiskujen määrä vaihtelee sadoista kymmeneen tuhansiin. Paineiskut aiheuttavat jousien heikkenemistä sekä ruuvien ja mekaanistenliitosten löystymistä. Venttiiliin istukka kuluu pelkästään jo venttiiliin mekaanisesta liikkeestä, mutta myös sen läpi kulkeva neste ja kaasu kuluttavat sitä. Venttiileillä säädetään, estetään tai sallitaan nesteiden ja kaasujen virtausta putkistoissa. Vuotavat venttiilit lisäävät energiahukkaa ja säätelyvirheet saattavat vaikeuttaa polttoaineiden tai voiteluaineiden siirtoja sekä aiheuttaa toimintahäiriöitä koneisiin ja laitteisiin. Suljetun venttiilin läpivuoto voidaan havaita lämpökuvaamalla venttiilit säännöllisesti esimerkiksi kerran vuodessa. Läpivuotavan venttiilin havaitseminen estää putkistossa liikkuvan aineen pääsyn väärään paikkaan, jolloin vähintäänkin vältytään turhalta siivoustyöltä tai estetään jonkin toisen laitteiston vikaantuminen tai pahimmassa tapauksessa vaurioituminen. (Wankhede 2019.)

## 7.5 Putket

Aluksella putkien yhteispituus voi olla useita kilometrejä. Putkistossa virtaa monia ominaisuuksiltaan erilaisia aineita, joista mainittakoon esimerkiksi polttoaine, jäähdytysvesi, merivesi, voiteluaine, pakokaasu, höyry ja mahdolliset lastina kuljetettavat aineet. Putkien kunnon havainnointi on hankalaa erityisesti, jos ne ovat eristetty tai niiden sisällä kulkeva aine aiheuttaa eroosiokulumista, korroosiota, pintaväsymismurtumista, tukkeutumista, turbulenssia tai paineiskuja. Edellä mainitut syyt kuluttavat putkiston sisäpintaa ja näin ollen heikentää sen kuntoa sisältä päin. Putkiston korroosiota aiheuttavat lisäksi hapettuminen ja sähkökemiallinen hajoaminen. Vuotava putkisto lisää energiahukkaa ja säätelyvirheet saattavat aiheuttaa toimintahäiriöitä koneisiin ja laitteisiin tai pahimmassa tapauksessa tulipalovaaran. Putkistoon saattaa myös kertyä likaa ja tukoksia joko putkiston sisäisen korroosion aiheuttamana tai putkistossa kulkevan epäpuhtaan aineen seurauksena. (Teräsrakenneyhdistys 2015; TUV 2019; DynaGard 2020.)

### 7.5.1 Eristämättömät putket

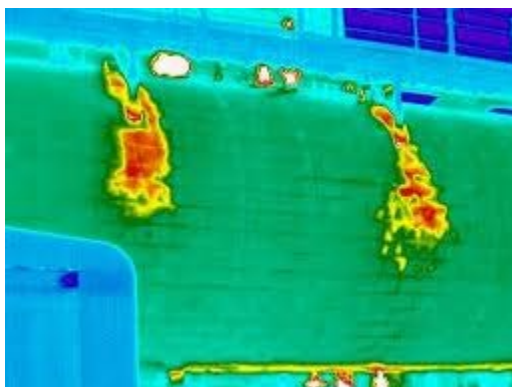
Eristämättömien putkien ulkoinen kunnon tarkastus silmämääräisesti on helppoa, mutta sisäinen tarkastaminen ilman, että järjestelmä kytketään pois käytöstä ja putkisto tyhjennetään, on mahdotonta. NDT-menetelmänä lämpökuvantaminen mahdollistaa käytön aikaisen putkien kunnon tarkastamisen. Lämpökuvantamisella nähdään laajempia alueita kerrallaan, jolloin voidaan havaita mahdollinen ongelma kohta ja tutkia ongelmakohtaa yksityiskohtaisemmin. Putkiston sisäpintaan muodostuu eroosion, korroosion ja tukkeumien vaikutuksesta pistemäisiä eroja lämpökuvaa tarkasteltaessa. Erityisesti merivesijäähdytysputkistot ovat riskialttiita sähkökemialliselle korroosiolle, johtuen meriveden suolapitoisuudesta. Meriveden suurempi natrium- ja kloridi-ioni pitoisuudet nopeuttavat sähkökemiallista korroosiota, aiheuttaen sähköjohtavuuden lisääntymisen nesteessä. Putkistoja lämpökuvattaessa kannattaa kiinnittää huomiota myös mahdollisiin hitsausaumoihin, liitoskohtiin ja supistuksiin. (DynaGard 2020; Teräsrakenneyhdistys 2015.)

### 7.5.2 Eristetyt putket

Solas (2020) mukaan kuumat pakoputket aluksen konehuoneessa on suojattava ja eristettävä tulipalon varalta. Myös kuumat höyryputket ovat yleensä eristetty mahdollisten palovammojen välttämiseksi kosketettaessa. Eristeen tarkoitus on suojata joko putkessa kulkevaa ainetta ulkoisilta tekijöiltä tai päinvastoin. Eristeen sisälle päätyvä kosteus, joka voi olla peräisin esimerkiksi joko putkivuodosta tai ulkoisesti muun vuodon seurauksena, saattaa aiheuttaa korroosiota putken pinnalle sekä heikentää eristeen kuntoa tai lisätä energiahukkaa. Korroosio eristeen alla on TUV (2019) mukaan hyvin vakava ja yleinen ongelma.

Lämpökuvattaessa eristettyjä putkia tavoitteena on selvittää eristeen kunnon lisäksi mahdolliset vauriot putkimateriaalissa eristeen alla. Mikäli lämpökuvauksen yhteydessä löydetään poikkeavuutta pistemäisenä lämpötilaerona (Kuva 12), voidaan havaittu kohta merkitä myöhempää yksityiskohtaisempaa tarkastelua varten. Tällöin eristettä voidaan purkaa ainoastaan havaitun ja merkatun kohdan alueelta, jolloin nähdään, onko vika eristeessä vai itse putkessa. Näin ollen säästetään purkamiseen käytettävää aikaa sekä uusittavan eristemateriaalin määrää. Mikäli todetaan eristeen olleen kunnossa, voidaan

tarvittaessa ottaa muita NDT-menetelmiä käyttöön putkimateriaalin paksuuden ja kunnan todentamiseksi. (Salva ym. 2004; TUV 2019.)



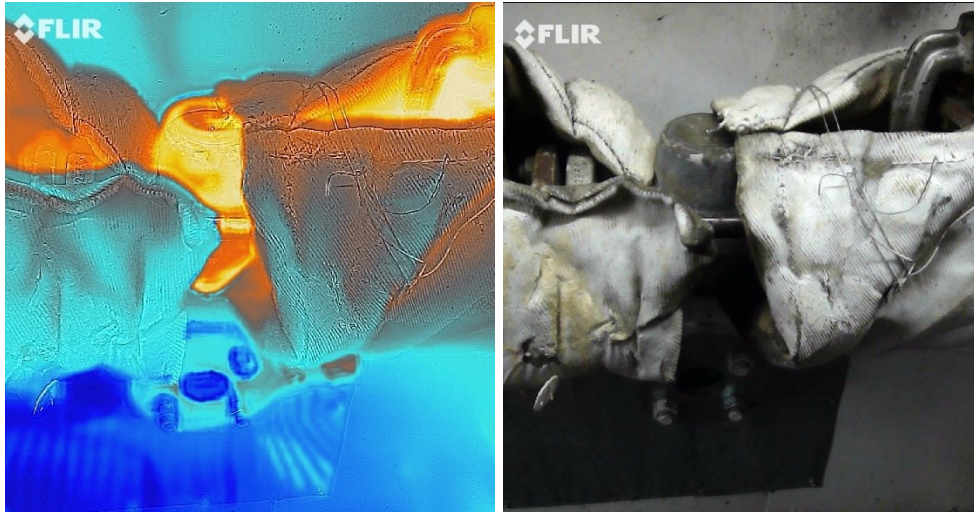
Kuva 12. Korroosioaurio eristeen alla (Thermal Imaging LTD 2020).

## 8 TULOSTEN ANALYSOINTI

Aluksella tekemissäni lämpökuvauksissa en havainnut poikkeavuuksia tai viikoja koneistojen toiminnoissa. Toisaalta, kun ei ollut mitään aiempaa vertailudataa, niin tutkimukseni painottui lähinnä pohtimaan eri laitteistoja tai komponentteja, joiden säännöllisestä lämpökuvaamisesta voisi olla hyötyä ennakoinvan kunnossapidon eri keinoin.

Kuvausolosuhteet saattavat olla aluksilla erilaiset, eikä kuvattavaa kohdetta aina pääse kuvaamaan juuri siten, kun olisi parasta. Tutkiessani kuvauskohteita havaitsin muutamia haasteita:

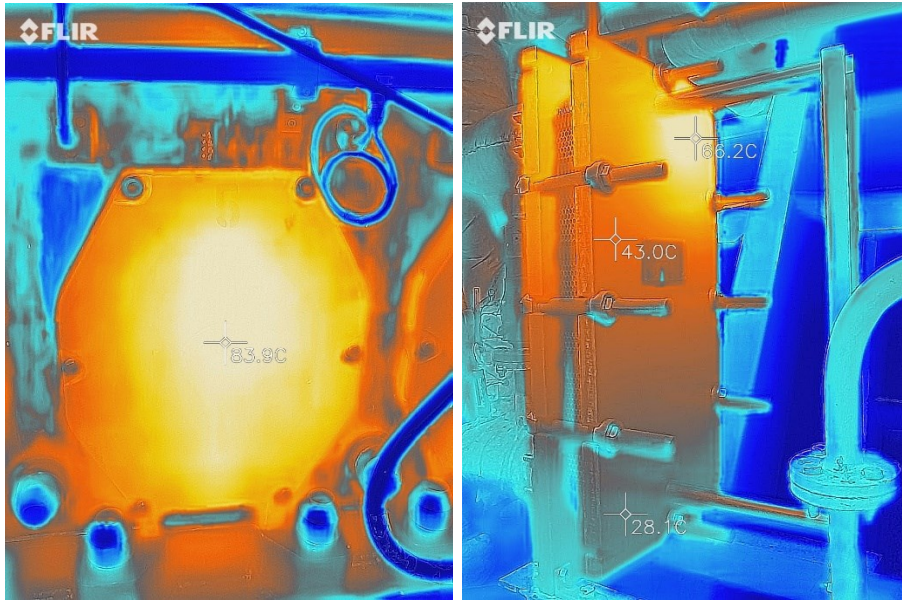
- Sähkömoottorin laakereita kuvattaessa tulisi jotenkin varmistua siitä, että joka kuvauskerralla kuormitus olisi sama, jolloin eri mittaustulokset olisivat verrattavissa keskenään.
- Hetkellisesti pyörivän pumpun laakereiden lämpökuvaus on haastavaa, ellei jopa mahdotonta.
- Järjestelmässä kiertävän nesteen lämpötilan tunteminen ja muuttumattomuus eri mittauskertojen välillä tekee haastavaksi myös pumpun laakereiden mittauksen, joka pyörii yhtäjaksoisesti.
- Eristetyn venttiilin tai lauhteenpoistajan toiminnan tarkastaminen toisinaan saattaa olla mahdotonta ilman, että purkaa eristettä pois edestä (Kuva 13).



Kuva 13. Lauhteenpoistin eristeen alla.

Vaikka aluksen kriittisimmät laitteet ovatkin kahdennettu, ei pidä liikaa turvautua ajatukseen, että onhan meillä tuossa varajärjestelmä, jos jotain sattuu. Kunnossapidon taloudelliset hyödyt tulevat siitä, että pystytään riittävän ajoissa havaitsemaan alkava vikaantuminen. Näin voidaan ajoittaa huolto ja korjaus toimenpiteet itselle sopivaan ajankohtaan, jolloin voidaan varmistua siitä, että tarvittavat varaosat ja henkilökunta on saatavilla juuri oikeaan aikaan. Lisäksi vikaantuva laite voidaan hallitusti vaihtaa varajärjestelmään, jolloin yksittäisen vikaantuneen komponentin aiheuttama häiriö muihin järjestelmiin jää pieneksi. Lämpökuvauksen kannalta kahdentaminen antaa loistavan mahdollisuuden vertailevaan mittaukseen kahden tai useamman samanlaisen laitteen oikeanlaisen toiminnan osalta, jolloin poikkeavuus käyntilämpötilassa havaitaan helpommin.

Tutkimuksessani käsiteltävien kohteiden lisäksi aluksella on useita kohteita, joissa lämpökuvausta voitaisiin hyödyntää, kuten esimerkiksi pää- tai apukoneen haalausta ennen ja jälkeen tehtävät kampikammioiden lämpökuvaukset tai lämmönvaihtimien tarkastukset (Kuva 14) (Monieta 2018).



Kuva 14. Lämpökuvissa vasemmalla kampikammion luukku ja oikealla lämmönvaihdin

Mekaanisen kunnossapidon isäksi lämpökameraa voidaan hyödyntää myös aluksen sähkölaitteiden kunnossapidossa, hitsaustöissä paloturvallisuuden varmistamiseksi sekä palo- ja pelastusharjoituksissa. Lämpökuvaus ei kuitenkaan mielestäni yksistään ole riittävä mittaustapa ehkäisevässä kunnossapidossa, vaan sen tueksi tulisi ottaa muitakin mittaamenetelmiä, kuten esimerkiksi ultraääniä tai värinämittaus.

Lämpökuvaus kohteita saattaa olla paljon, jolloin houkutus sisällyttää liian suuri määrä kuvattavia kohteita, voi muodostua ongelmaksi etenkin, mikäli työvoimaa on niukasti. Otettaessa lämpökuvaus käyttöön tulisi aloittaa pienesti ja laajentaa tarpeiden ja työvoiman käytettävyyden mukaan. Jonkinlaista priorisointia ja kriittisten laitteiden määrittelyä kannattaa hyödyntää kuvauskohteita määritettäessä tai lisättäessä kunnossapito-ohjelmaan. Aluksilla kriittisiä järjestelmiä ovat propulsio- ja sähköntuotantoon liittyvät laitteet. Kuvauskohteiden määrittelyn jälkeen tulisi suunnitella tarkastusreitit, tarkastusaikataulut ja tarkastustiheydet sekä lämpötilarajat, jossa laitteen toiminta on vielä hyväksyttävissä rajoissa. Lämpötilarajoja määritettäessä voidaan hyödyntää valmistajan antamia ohjearvoja, voitelutietoja tai työkokemukseen perustuvaa tietoa. Myös mittausten toistettavuuden tarkkuuteen tulisi erityisesti aluksilla kiinnittää huomiota, kun miehistö ja mittaajat saattavat vaihdella. Mittaustulokset tulisi dokumentoida sekä tehdä tarvittavat raportit katsastuksia ja luokitusta ajatellen.

Juurisyyanalyysin avulla saavutetaan havaitun ongelman perimmäinen syy, joka saattaa johtua suunnittelusta, valmistuksesta tai materiaalivirheestä. Tämän kaltaisella tiedolla saattaa olla huomattava vaikutus kustannuksiin, huoltosuunnitelmiin, materiaalihankintoihin tai huoltokäytäntöihin. Mikäli sillä saavutetaan laitteen pysyvä parantaminen, ovat taloudelliset vaikutukset vielä suurempia. (Seffrin 2019.)

Sen tarkemmin menemättä lämpökameran tarkempiin valinta kriteereihin, olen samaa mieltä Allisson (2020) kanssa siitä, että kunhan vaan on joku lämpökamera, jolla voidaan havaita oireita sekä puuttua ajoissa alkavaan vikaantumiseen. Varsinkin, jos sillä vianetsintätilanteessa voidaan havaita ongelma nopeammin, kuin pelkästään esimerkiksi visuaalisella tarkastelulla. Aluksella ajoittain vallitsevien äärimmäisten olosuhteiden vuoksi, mielestäni lämpökamera tulisi olla luotettava, toimintavarma ja tehokas. Tehokkuudella tarkoitetaan, että kuvat ovat korkealaatuisia ja sen mittaama lämpötila-alue soveltuu käyttötarkoitukseen.

Lämpökamerat ovat kehitetty pääasiassa ammattikäyttöön, jolloin iskunkestävyys, roiskevesisuojaus tai jopa hetkellinen upotus veteen, on otettu huomioon. Laitteet ovat kehittyneet helppokäyttöisiksi ja huokean hintaisiksi, mikä madaltaa hankintakynnystä. Kehittynyt akkuteknologia on mahdollistanut kompaktimpien lämpökameroiden rakenteen, jolloin laitteen fyysinen koko on saatu sellaiseksi, että sitä on helpompi kuljettaa mukana. Taskusta se on helppo ottaa käyttöön heti kun tilanne niin vaatii. Pelkästään jo edellä mainittujen syiden vuoksi mielestäni lämpökamera sopii erinomaisesti aluksen mekaaniseen kunnossapitoon. (Fluke 2020.)

## **9 POHDINTAA JA JOHTOPÄÄTÖKSET**

Onnistuin opinnäytetyöprosessin läpiviemisessä sovitussa aikataulussa, vaikka alkukesästä oli hyvin epävarmaa, milloin pääsen toteuttamaan opinnäytetyöhön liittyvää havainnoivaa tutkimusta. Käytössäni olevan lämpökameran vikaantuminen johti siihen, että lämpökuvaukset aluksella jäivät hyvinkin suppeaksi, joten tutkimuskohteita määriteltäessä jouduin turvautumaan enemmän aiemmin julkaistuihin artikkeleihin lämpökuvamisesta, kuin omiin mittauksiini.

Opinnäytetyöprosessin aikana opin paljon kunnossapidosta ja siihen liittyvistä käsitteistä sekä tietysti myös itse lämpökuvaamisesta. Fysikaalisten ja kemiallisten vaikutusten tunnistaminen tutkimissani kohteissa, opetti ymmärtämään vikaantumiseen johtavia periaatteita ja syitä. Lisäksi merenkulkua ja alusten katsastuksia määrittelevät säädökset sekä viranomaisten ja luokituslaitosten roolit liittyen määräaikaikatsastuksiin ja koneistojen luokituksiin tulivat paremmin tutuksi.

Opinnäytetyö ei varsinaisesti tuonut paljoakaan uutta tietoa lämpökuvauksen mahdollisuuksista, mutta mielestäni se ottaa kattavasti huomioon eri asioita, jotka tulisi ottaa huomioon, mikäli lämpökameran käyttöönottoa harkitaan tai halutaan laajentaa aluksen kunnossapidossa sekä se tukee aiheesta aiemmin tehtyjä tutkimuksia. Mielestäni aluksilla lämpökameran käyttö kunnossapidossa on edelleen hyvin vähäistä, vaikka jo vuonna 2004 Lloyd's Register teki ennusteen, että lähitulevaisuudessa lämpökuvaus alusten huolloissa, korjauksissa sekä esitelakointistrategiana tulee yleistymään (Pašagić ym. 2008).

Jatkotutkimusehdotuksena on tehdä yksityiskohtaisempia riski- ja vika-analyysijä sekä pidempiaikaisia mittauksia aluksen eri kohteista, jolloin selviäisi tarkemmin esimerkiksi sopivat mittausvälit, lämpötilojen nousun vaikutus prosessiin sekä vikaantumisen reagointiaika ennen rikkoontumista. Muita tutkimusehdotuksia voisi olla lämpökuvauskohteiden reittiohjelman suunnittelu tai yksittäisen laitteen lämpökuvaus- ja kunnossapito-ohjeen laatiminen sekä siihen liittyvä dokumentaatio.

Vika ei muodostu tyhjästä tai itsestään, vaan se on seurausta useasta erisyystä ja voi olla pitkän aikavälin syy-seurausketjun lopputulos. Lämpökuvauksella voidaan saavuttaa huomattavia säästöjä, mikäli alkavaan vikaan tai häiriöön ehditään puuttua riittävän ajoissa. Tietämällä tarkasti laitteistojen kunto, saadaan esimerkiksi huolto- ja varaosat tilattua ajoissa, ennen kuin laite vikaantuu tai pahimmassa tapauksessa aiheuttaa toimintahäiriöitä muihin laitteisiin. Vikojen korjaaminen ei tulisi olla kunnossapidon päämäärä, vaan kunnossapidon tehtävänä on vikaantumisen syiden havaitseminen ja poistaminen.

Laadukkaiden varaosien käyttö sekä käyttötarkoitukseen ja olosuhteisiin paremmin sopivan osan vaihtaminen, vähentää korjauskustannuksia ja vapauttaa henkilökunnan aikaa sekä resursseja, ennakoivaan kunnossapitoon.

Tutkimuksessani käsiteltävien kohteiden lisäksi lämpökuvaus mahdollistaa, minkä tahansa koneen tai laitteen oikeanlaisen toiminnan varmistamisen huoltoa ennen ja sen jälkeen. Näin varmistutaan koekäyttötilanteessa vähintäänkin siltä, että huollon yhteydessä ei ole tapahtunut virheitä. Promaint (2013) mukaan on hyvinkin yleistä, että huollossa tapahtuvat virheet, kuten akselien linjaukset tai väärään asentoon jäänyt venttiili, aiheuttavat turhaa rasitusta laitteistolle ja lyhentävät laitteiden käyttöikää tai pahimmassa tapauksessa korjaustoimenpiteet joudutaan tekemään uudestaan, mikä taas taloudellisesta näkökulmasta ei ole järkevää.

Ehkäisevän kunnossapidon kannalta lämpökuvaus mahdollistaa käynnin aikaisen mittaamisen, josta saatavien tallenteiden ja raporttien avulla, voitaisiin huoltovälejä pidentää osoittamalla luokituslaitokselle laitteen asianmukainen kunto. Tällöin myös minimoitaisiin laitteen tarpeeton purku ja kasaus sekä mahdolliset huolimattomuus- ja asennusvirheet. Myös tässä tapauksessa korjaavaa kunnossapitoa tarvittaisiin vähemmän ja siitä säästynyt aika ja resurssit voitaisiin käyttää ehkäisevään kunnossapitoon.

Tähänastisia tutkimustuloksia voidaan pitää vähintäänkin rohkaisevina. Lämpökuvaus antaa tehokkaan apuvälineen osaksi ehkäisevää kunnossapitoa ja sen vaikutusta turvallisuuteen on kiistämättä perusteltua. Lämpökuvaus lisää tietoisuutta aluksen laitteistojen kunnosta, josta on apua muun muassa huoltojen suunnittelua, varaosahallintaa ja tulevaa telakointia suunniteltaessa. Puhuttakaaan sen mahdollisuuksista estää kontrolloimattoman vikaantumisen aiheuttama tulipalo. Sen käyttökohteet kunnossapidossa on laajat ja sitä voidaan aluksella hyödyntää kunnossapidon lisäksi muihinkin käyttötarpeisiin.

Tutkimus antaa kattavan kokonaiskuvan lämpökuvauksen mahdollisuuksista aluksella sekä tarkastelee sen tarjoamia hyötyjä turvallisuuden lisäämiseksi ja liittämiseksi osaksi mekaanista kunnossapitoa. Tulosten hyödynnettävyys muissakin aluksissa on mielestäni mahdollista. Henkilökuntaa aktivoimalla ja lisäämällä tarpeen mukaan lämpökuvausteknistä koulutusta voitaisiin melko



pienellä investoinnilla ottaa lämpökuvaaminen osaksi aluksen kunnonvalvontaa.

## LÄHTEET

Allinson, J. 2020. The FLIR One Infrared Imaging Radiometer and Marine Surveying. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://irinfo.org/articles-2020/the-flir-one-infrared-imaging-radiometer-and-marine-surveying/> [viitattu 21.5.2020].

DynaGard. 2020. 5 things you should know about pipe corrosion. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.dynagard.info/5-things-you-should-know-about-pipe-corrosion/> [viitattu 1.10.2020].

Finnlines. 2020. Yritys. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.finnlines.com/fi> [viitattu 15.5.2020].

Flir. 2020. Thermal Analysis and Reporting. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.flir.com/products/flir-tools/> [viitattu 1.9.2020].

Fluke. 2019a. How to inspect a motor with a thermal imager. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.fluke.com/en-us/learn/blog/thermal-imaging/how-to-inspect-a-motor-with-a-thermal-imager> [viitattu 6.6.2020].

Fluke. 2019b. Thermal imaging in preventive maintenance programs. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.fluke.com/en-us/learn/blog/thermal-imaging/preventive-maintenance> [viitattu 2.6.2020].

Fluke. 2019c. Three ways to conduct thermal inspections. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.fluke.com/en-us/learn/blog/thermal-imaging/three-ways-to-conduct-thermal-inspections> [viitattu 5.6.2020].

Fluke. 2020. Four reasons a compact thermal camera is your secret weapon. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.fluke.com/en-us/learn/blog/thermal-imaging/compact-thermal-camera> [viitattu 4.6.2020].

Handlin, S. 2004. Infrared Thermography In The Marine Industry. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://irinfo.org/06-01-2004-handlin/> [viitattu 22.5.2020].

Hirsjärvi, S., Remes, P. & Sajavaara, P. 2010. Tutki ja kirjoita. 15.–16. painos. Helsinki: Tammi.

IACS. 2020. About IACS Documents. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.iacs.org.uk/> [viitattu 1.9.2020].

IMO. 2020. Port State Control. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.imo.org/EN/Pages/Default.aspx> [viitattu 1.9.2020].

ISM. 2020. Part A 10. Maintenance of the Ship and Equipment. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://safety4sea.com/cm-ism-code-latest-updates/> [viitattu 1.9.2020].

Järviö, J. & Lehtiö, T. 2012. Kunnossapito. Tuotanto-omaisuuden hoitaminen. 5. uudistettu painos. Helsinki: KP-Media Oy.

Järviö, J., Piispa, T., Parantainen, T. & Åström, T. 2007. Kunnossapito. 4. uudistettu painos. Helsinki: KP-Media Oy.

Konwell. 2020. Lauhteenpoisto. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.konwell.fi/fi/tuotteet/hoyry-ja-lauhde/teollisuusventtiilit/lauhteenpoisto> [viitattu 1.10.2020].

Lampinen, M. 2010. Termodynamiikan perusteet. 5. korjattu painos. Helsinki: Otatieto.

Lazakis, I., Dikis, K., Michala, A. & Theotokatos, G. 2016. Advanced ship systems condition monitoring for enhanced inspection, maintenance and decision making in ship operations. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.science-direct.com/science/article/pii/S235214651630134X> [viitattu 8.6.2020].

MARPOL. 2020. Sopimuksen liite VI, sääntö 14. WWW-dokumentti. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/329383051\\_Overview\\_of\\_MARPOL\\_ANNEX\\_VI\\_regulations\\_for\\_prevention\\_of\\_air\\_pollution\\_from\\_marine\\_diesel\\_engines](https://www.researchgate.net/publication/329383051_Overview_of_MARPOL_ANNEX_VI_regulations_for_prevention_of_air_pollution_from_marine_diesel_engines) [viitattu 1.10.2020].

Menon, A. 2020. Marine Insight. What Are Marine Exhaust Manifolds? WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/marine-exhaust-manifolds/> [viitattu 1.10.2020].

Mikkonen, H. (toim.) 2009. Kuntoon perustuva kunnossapito: käsikirja. Helsinki: KP-Media Oy.

Monieta, J. 2018. The use of thermography in the diagnosis of ship piston internal combustion engines. WWW-dokumentti. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/326686844\\_The\\_use\\_of\\_thermography\\_in\\_the\\_diagnosis\\_of\\_ship\\_piston\\_internal\\_combustion\\_engines](https://www.researchgate.net/publication/326686844_The_use_of_thermography_in_the_diagnosis_of_ship_piston_internal_combustion_engines) [viitattu 15.5.2020].

Mustajärvi, B. 2002. Kunnonvalvonnan menetelmiä. Lämpökamera kunnonvalvonnassa. Voimalaitosten kunnossapito 2002. Tampere: 16.-17.10.2002.

Opgal. 2018. The physics behind thermal imaging. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.opgal.com/blog/thermal-cameras/the-physics-behind-thermal-imaging> [viitattu 8.6.2020].

Pašagić, V., Mužević, M. & Kelenc, D. 2008. Infrared Thermography in Marine Applications. WWW-dokumentti. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/27209117\\_Infrared\\_Thermography\\_in\\_Marine\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/27209117_Infrared_Thermography_in_Marine_Applications) [viitattu 1.6.2020].

Promaint. 2013. Tehosta vikaantumisen seuranta. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://promaintlehti.fi/Kunnonvalvonta-ja-kayttovarmuus/Tehosta-vikaantumisen-seuranta> [viitattu 17.5.2020].

Promaint. 2016. Lämpökameroista on moneksi. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://promaintlehti.fi/Laite-ja-korjaustekniikat/Lampokameroista-on-moneksi> [viitattu 20.5.2020].

PSK 6201. 2011. Kunnossapito. Käsitteet ja määritelmät. 3. painos. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.

Ross, J. 2019. Condition-Based Maintenance. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://irinfor.org/articles-2019/9-1-2019-ross/> [viitattu 24.5.2020].

Salva, M., Hernández, R. & Sanz, C. 2004. Proposal of a Method for Implementing Infrared Scanning Inspection Programs in Merchant Vessels. *Marine Technology*, Vsk. 41 (1), 1-6.

Seffrin, J. 2019. Nine Steps to Setting Up an Infrared Inspection Program. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://irinfor.org/articles-2019/01-01-2019-seffrin/> [viitattu 23.5.2020].

SFS-EN 13306. 2017. Kunnossapito. Kunnossapidon terminologia. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS rty.

SOLAS. 2020. Chapter II-2. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.gov.uk/government/publications/solas-chapter-ii-2>. [viitattu 1.9.2020].

Teräsrakenneyhdistys. 2015. Korroosio. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/151/8ac778e/korroosio.pdf> [viitattu 5.10.2020].

Thermal Imaging LTD. 2020. Corrosion under insulation. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.thermalimaging.co.uk/corrosion-under-insulation/> [viitattu 6.10.2020].

Traficom. 2020. Luokituslaitokset. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.traficom.fi/fi/luokituslaitokset> [viitattu 6.6.2020].

TUV. 2019. Creating Value with NDT for Corrosion Under Insulation (CUI). WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://insights.tuv.com/blog/creating-value-with-ndt-for-corrosion-under-insulation-cui> [viitattu 1.10.2020].

Vilkka, H. 2007. Tutki ja havainnoi. 1.–2. painos. Helsinki: Tammi.

Wankhede, A. 2019. Marine Insight. Globe Valve Used on Ships: Design and Maintenance. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.marineinsight.com/tech/pipeing/globe-valve-used-on-ships-design-and-maintenance/> [viitattu 1.10.2020].

Wankhede, A. 2020. Marine Insight. Understanding hot and cold corrosion in marine engines. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.marineinsight.com/tech/understanding-hot-cold-corrosion-marine-engines/> [viitattu 1.10.2020].

## KUALUETTELO

Kuva 1. PF-käyrä (Järviö & Lehtiö 2012).....	11
Kuva 2. Vikaantumismallit (Järviö ym. 2007).....	12
Kuva 3. Kunnossapitolajit SFS-EN 13306 (Mikkonen 2009).....	13
Kuva 4. Kunnossapitolajit PSK 6201 (Mikkonen 2009) .....	13
Kuva 5. Kunnossapitolajien ja toimintamenetelmien valinta (Järviö & Lehtiö 2012).....	14
Kuva 6. Asset Management pyramidi -malli (Järviö & Lehtiö 2012) .....	15
Kuva 7. TPM kunnossapidon osatekijät (Mikkonen 2009).....	17
Kuva 8. TPM käyttäjäkunnossapito (Mikkonen 2009).....	17
Kuva 9. Sähkömagneettinen säteily (Opgal 2018) .....	21
Kuva 10. Lauhteenpoistaja .....	31
Kuva 11. Pumppu ja sähkömoottori.....	32
Kuva 12. Korroosioaurio eristeen alla (Thermal Imaging LTD 2020). .....	35
Kuva 13. Lauhteenpoistin eristeen alla.....	36
Kuva 14. Lämpökuvissa vasemmalla kampikammion luukku ja oikealla lämmönvaihdin .....	37

RCM Päätöskavio

