

SAVONIA

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

ULTRAÄÄNIKAMERAN KÄYTTÄMINEN KUNNONVALVONNAN TUTKIMUKSISSA

Stora Enso Oyj

TEKIJÄ Jiri Leppänen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma			
Työn tekijä(t) Jiri Leppänen			
Työn nimi Ultraäänikameran käyttäminen kunnonvalvonnan tutkimuksissa			
Päiväys	30.9.2023	Sivumäärä/Liitteet	53/0
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Stora Enso Oyj			
Tiivistelmä Tässä opinnäytetyössä käsiteltiin uuden teknologisen laitteen, ultraäänikameran käyttämistä kunnonvalvonnan tutkimuksissa. Tarkoituksena oli löytää uusia käyttökohteita ultraäänikameralle sekä vahvistaa jo tunnettujen vikatyyppeiden havainnointia. Ennen opinnäytetyön aloittamista ultraäänikameralla oli havaittu todistettavasti paineilmavuotoja. Työn tilaajan asettama tavoitteena oli tutkia uusia, ennestään tuntemattomia käyttökohteita ultraäänikameralle esimerkiksi laakeri- tai sähkövikojen havaitsemista. Työn tilaajana toimiva Stora Enso Oyj on yksi metsäteollisuuden edelläkävijöistä ja yhtiön slogan on mikä tänään valmistetaan uusiutumattomista materiaaleista, voidaan huomenna valmistaa puusta. Opinnäytetyö aloitettiin solmimalla yhteistyösopimus työn tilaajan ja työn suorittajan välillä. Kameran käyttöä harjoiteltiin erikoistumisprojektikursseilla ja tästä edettiin varsinaisen opinnäytetyön tekemiseen. Ultraäänikameralle suoritettiin konttorille rakennetussa testiympäristössä kokeita ennen varsinaisten vikojen tutkimista. Kokeissa testattiin kameran mittaustarkkuutta sekä vuodon fyysisen sijainnin vaikuttavuutta mittaustulokseen. Kameralla tutkittiin seitsemää erilaista sovelluskohdetta, joissa jokaisessa saavutettiin luotettavia mittaustuloksia ja lopputuloksia. Opinnäytetyön lopputulemana voitiin todeta, että kamera on luotettava työkalu paineilmavuotojen ja niihin verrattavien vikojen havainnointiin. Kamera soveltuu myös laakerivikojen havainnointiin ja täsmentämiseen, mutta huonosti laakerivian tyyppin tunnistamiseen. Kameralla voitiin luotettavasti tunnistaa kamerasta pois päin kohdistuvia heijastuvia paineilmavuotoja virheen ollessa pienimmillään noin 7 % verrattuna kameraan suoraan kohdistuvaan vuotoon. Kaikista paras lopputulos saatiin, jos mittaustarkkuus tiedettiin ja kamera saatiin kohdistettua suoraan vuodon juureen. FLIR Acoustic Camera Viewer raportointityökalun avulla voitiin helposti ja visuaalisesti näyttää millaisia vuotoja tai vikoja kuvatessa kohteessa oli. Opinnäytetyössä tutkittiin muutamia sähkövikoja, mutta jatkossa on tarpeellista tutkia laajemmin kameran käytettävyyttä sähkövikojen ja erityisesti piirikorttivikojen havainnointiin, koska sähkövikojen tutkiminen on haasteellista ja niistä voi aiheutua suuria henkilö- ja omaisuusvahinkoja. Opinnäytetyössä saavutetut tulokset olivat käyttökelpoisia materiaalia työn tilaajalle ja niillä pystyttiin rajaamaan havaittavia vikatyyppejä, jotta tulevaisuudessa pystytään keskittymään oikeisiin vikoihin, joita kameralla pystytään havaitsemaan.			
Avainsanat FLIR Si124, kunnossapito, paineilmavuoto, ultraäänikamera			

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Energy Engineering	
Author(s) Jiri Leppänen	
Title of Thesis Using an acoustic imaging camera in condition monitoring applications	
Date September 30, 2023	Pages/Appendices 53/0
Client Organisation /Partners Stora Enso Oyj	
<p>Abstract</p> <p>In this thesis, the use of a new technological device, an acoustic imaging camera, was examined for condition monitoring research. The aim was to discover new applications for the acoustic imaging camera and to enhance the detection of known fault types. Before the writing of the thesis, pressurized air leaks had been verifiably detected using the acoustic imaging camera. The objective set by the client was to explore new, previously unknown applications for the acoustic imaging camera, such as the detection of bearing or electrical faults. The client, Stora Enso Oyj, is a leading company in the forest industry, and its slogan is "What is produced today from non-renewable materials can be made from wood tomorrow."</p> <p>The thesis was initiated by entering into a collaboration agreement between the client and the executor of the work. The use of the camera was practiced during a specialized project course, which then led to the actual thesis work. Experiments were conducted on the acoustic imaging camera in a test environment set up in the office before investigating actual faults. The experiments tested the camera's measurement accuracy and the impact of the physical location of the leak on the measurement result. The camera was used to investigate seven different application areas, each yielding reliable measurement results and outcomes.</p> <p>As a result of the thesis, it can be concluded that the camera is a reliable tool for detecting pressurized air leaks and similar faults. The camera is also suitable for detecting and specifying bearing faults but is not well-suited for identifying the specific type of bearing fault. The camera reliably identified reflected pressurized air leaks when directed away from the camera, with the error being at its smallest, approximately 7%, compared to a leak directed straight at the camera. The best results were obtained when the measurement distance was known, and the camera was aimed directly at the source of the leak. The FLIR Acoustic Camera Viewer reporting tool made it easy to visually display the leaks or faults in the captured area. The thesis also examined a few electrical faults. In the future, it is necessary to investigate more extensively the usability of the camera for detecting electrical faults, especially circuit board faults. Electrical faults can lead to significant personal and property damage. The results obtained in the thesis provided valuable material for the client and allowed for the restriction of detectable fault types so that in the future, the emphasis can be placed on the correct faults detectable with the camera.</p>	
<p>Keywords acoustic imaging camera, compressed air leak, FLIR Si124, maintenance</p>	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO.....	8
2	STORA ENSO OYJ	9
2.1	Stora Enso Oyj esittely	9
2.2	Varkauden tehtaan esittely	9
3	FLIR SI124 ULTRAÄÄNIKAMERA	10
3.1	Kameran valmistajasta	10
3.2	Ultraäänikameran mallit.....	10
3.3	FLIR Si124 ultraäänikameran teoreettiset tiedot ja toimintaperiaate	11
4	FLIR ACOUSTIC CAMERA VIEWER ANALYSOINTITYÖKALU.....	13
4.1	Tietojen lataaminen FLIR Acoustic Camera Viewer pilvipalveluun	13
4.2	Analysointityökalun toiminta ja sen luotettavuuden arviointi	13
5	OPINNÄYTETYÖN KESKEISIMMÄT KÄSITTEET	16
5.1	Mekaaniset tekijät.....	16
5.1.1	Paineilma	16
5.1.2	Ultraääni	19
5.1.3	Kunnossapitolajit PSK standardin mukaan	19
5.2	Sähköiset tekijät	21
5.2.1	Osittaispurkaus.....	21
5.2.2	Koronapurkaus	21
5.2.3	Valokaaripurkaus	21
5.2.4	Pintapurkaus	21
5.2.5	Tyhjiöpurkaus (sisäinen)	22
6	TUTKIMUKSEN TOTEUTTAMINEN, LIIKUTELTAVA TESTILAITTEISTO.....	23
7	TUTKIMUKSIEN TOTEUTTAMINEN, KAMERAN LUOTETTAVUUDEN ARVIOINTI.....	24
8	SOVELLUSKOHTEIDEN TUTKIMINEN.....	32
8.1	Sprinklerilinjan paineilmavuoto.....	32
8.2	Pituusleikkurin pätkätelan epänormaali ääni.....	33
8.3	Pituusleikkurin loppuliimauslaitteen ohjainyksikön paineilmavuoto.....	35
8.4	Soodakattilan varoventtiilin läpivuoto	37
8.5	Pajaniemen kytkinasema	38
8.6	Taajuusmuuttajien tutkiminen	40

8.7 Jännitemuuntajan epänormaalien äänen tutkiminen.....	43
9 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	46
10 POHDINTA	49
LÄHTEET.....	52

KUVALUETTELO

KUVA 1. Kuva FLIR Si124 ultraäänikamerasta (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)	10
KUVA 2. Kuva ultraäänikameran toiminnasta (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)	11
KUVA 3. Äänilähteen esimerkkikuva (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)	12
KUVA 4. Suodattamaton äänilähde (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND).....	14
KUVA 5. Suodatettu äänilähde (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)	14
KUVA 6. Esimerkki koronapurkauksesta analysointityökalussa (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND).....	15
KUVA 7. Atlas Copco ZH 630-7 keskipakokompressori (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)	17
KUVA 8. Paineilman suodattimia kuvan etualalla (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)	17
KUVA 9. FST DTS 1470 V H paineilmakuivain (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND).....	18
KUVA 10. Eri kunnossapitolajien suhde toisiinsa PSK 7501 mukaan. (Kunnossapitoyhdistys Promaint ry, 2023).....	20
KUVA 11. Liikuteltava testauslaitteisto (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND).....	23
KUVA 12. Konttorille rakennettu testiympäristö (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND).....	24
KUVA 13. Paineilmavuoto kohtisuoraan kameraan nähden (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND).....	25
KUVA 14. Paineilmavuoto kohtisuoraan kameraan nähden FLIR pilvipalvelussa (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)	26
KUVA 15. Paineilmavuoto kamerasta poispäin (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND).....	27
KUVA 16. Paineilmavuoto kamerasta poispäin FLIR pilvipalvelussa (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND).....	28
KUVA 17. Vuotoa heijastava kaappi (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND).....	29
KUVA 18. Vuotoa heijastava kaappi FLIR pilvipalvelussa (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND).....	30
KUVA 19. Dimensiohallin paineilmavuoto (merkattu liukuväripisteellä), sprinklerilinja AV8 (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND).....	33
KUVA 20. Vaurioitunut pätkätela (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND).....	34
KUVA 21. Leikkurin pätkätelan laakeripukki ultraäänikameralla kuvattuna (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND). 35	
KUVA 22. Loppuliimauslaitteen keskusyksikön vuotava painemittari (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)	36
KUVA 23. Loppuliimauslaitteen keskusyksikön vuotava liitin (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND).....	37
KUVA 24. Soodakattilan vuotava varoventtiili (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND).....	38
KUVA 25. Spektrogrammi erottimen äänilähteestä (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)	38

KUVA 26. Äänilähteen antava erotin (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND).....	39
KUVA 27. Osittaispurkauksen luokittelu FLIR analysointityökalun mukaan (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND).....	40
KUVA 28. Kaappimallin taajuusmuuttaja ABB ACS880 (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND).....	41
KUVA 29. Muu äänilähde taajuusmuuttajan rakenteessa (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND).....	42
KUVA 30. FLIR Acoustic Camera Viewer sovelluksen analyysi edeltävästä kuvasta (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)	42
KUVA 31. Verkköjännitemuuntaja 690/400 V (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)	43
KUVA 32. Äänilähde verkkomuuntajana sivulla (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND).....	44
KUVA 33. Osittaispurkauksen luokittelu FLIR analysointityökalun mukaan (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND).....	44
KUVA 34. Analysointityökalun tunnistama signaali verkköjännitemuuntajasta (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND).....	45
KUVA 35. FFT-muunnos verkköjännitemuuntajan signaalista (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)	45
KUVA 36. FLIR Acoustic Camera Viewer sovelluksen spektrogrammi (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)	47

LYHENTEET JA KÄSITTEET

Amplitudi	Aaltoliikkeen voimakkuutta esittävä fysikaalinen käsite
AR	Augmented Reality, eli lisätty todellisuus
ATEX	Räjähdyksivaarallinen tila esimerkiksi kaasujen tai pölyn takia
AV 8	Asennusventtiili numero 8
Dimensiohalli	Sahojen prosessissa laudan lajitteluun käytettävä tila
FFT	Fast Fourier Transform, eli nopea Fourier muunnos on algoritmi, jolla aikatasossa esitetty signaali muutetaan spektrogrammiksi
FLIR Acoustic Camera Viewer	Pilvipalvelupohjainen analysointityökalu
MEMS	Micro Electro-Mechanical Sensor. MEMS sensorit ovat hyvin pieniä, usein 1–2 mm läpimitaltaan olevia sensoreita, jotka voivat tunnistaa esimerkiksi ääntä tai mekaanista liikettä
PRPD- kuvio	Phase Resolved Partial Discharge pattern, eli vaiheerotettu / vaihekohtainen osittaispurkaukuskuvio. Tällä voidaan visuaalisesti esittää osittaispurkauksen aktiivisuus jännitteen ajanjaksolla
Spektrogrammi	Visuaalinen esitys signaalin taajuusspektristä
STSF	Spatial Transformation of Sound Fields, eli äänikenttien tilamuunnos on tapa, jolla voidaan tehokkaasti suorittaa laskentaa äänikentistä kerätystä datasta
Teledyne FLIR (FLIR)	Ulträänikameran valmistaja

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä käsitellään uuden teknologian, ultraäänikameran käyttöä teollisuuden kunnonvalvonnassa erilaisissa tutkimuksissa. Työn tilaajana toimiva Stora Enso Oyj on yksi innovatiivisen metsäteollisuuden edelläkävijöistä ja yhtiöllä on useita kehitysprojekteja käynnissä niin paikallisella kuin globaalilla tasolla.

Opinnäytetyön tarkoituksena on löytää uusia ennen tiedostamattomia käyttökohteita ultraäänikameralle ja samalla vahvistaa jo tunnettujen käyttökohteiden havaitsemista. Ultraäänikameralla voidaan havaita tiedettävästi paineilmuvoitoja ja sähköisten laitteiden sähköisiä vikoja, osittaispurkauksia.

Opinnäytetyössä käsitellään muiden muassa ultraäänikameran perusteita, kameran toimintaa ja siihen liittyviä rajoituksia, teoreettisia käsitteitä, FLIR analysointiohjelman luotettavuuden arviointia sekä useita sovelluskohteiden tutkimuksia eli case-tutkimuksia. Case-tutkimuksissa tutustutaan tarkemmin siihen, miten erilaisia vikoja saadaan ultraäänikameralla havaittua. Opinnäytetyössä käsitellään myös ultraäänikameran mittaustarkkuuden luotettavuutta sekä paineilmuvoitoissa vuodon suunnan fyysisen sijainnin merkitystä kameraan nähden. Näitä tutkimuksia varten rakennetaan testauslaitteisto, jolla saadaan testattua kameran luotettavuutta paineilmuvoitojen havainnoinnissa.

Opinnäytetyössä perehdytään syvällisellä tasolla kameran käytettävyyteen erilaisissa teollisuuden sovelluskohteissa. Opinnäytetyössä tutkitaan myös hyvin laaja-alaisesti mihin kaikkiin vikatyyppeihin ultraäänikameraa voidaan käyttää sekä perehdytään FLIR Acoustic Camera Viewer analysointityökalun käyttöön ja tietoturvalliseen tapaan siirtää tietoa kameran ja analysointityökalun välillä. Teoriaosuudessa perehdytään ultraäänikameran perusteisiin. Lisäksi tarkastellaan muiden muassa miten mekaaniset ja sähköiset tekijät vaikuttavat ultraäänikameraan. Kunnossapidon näkökulmasta perehdytään siihen, miten ultraäänikameraa voidaan käyttää osana ennakoivan ja suunnitellun kunnossapidon toteuttamista.

2 STORA ENSO OYJ

Kahdessa seuraavassa alaluvussa esitellään opinnäytetyön tilaaja sekä Varkauden tehdasintegraatti, jossa opinnäytetyön datakeräysvaihe suoritettiin.

2.1 Stora Enso Oyj esittely

Stora Enso on biomateriaali-, pakkaus-, puutuote- ja paperiteollisuuden uusiutuvien tuotteiden globaali toimittaja osana biotaloutta. Stora Enso on yksi maailman suurimmista yksityisistä metsänomistajista. Stora Enson visio on, että kaikki, mikä tänään valmistetaan uusiutumattomista materiaaleista, voidaan huomenna valmistaa puusta. Keskeisenä osana Stora Enson strategiaa ja liiketoimintakäytäntöjä on vastuullisuus. Kuitupohjaiset, vähähiiliset tuotteet ovat kierrätettäviä ja uusiutuvia. Ne edistävät positiivisia ympäristövaikutuksia, tarjoavat ratkaisuja ilmastonmuutokseen ja auttavat Stora Enson asiakkaita tekemään ympäristöystävällisiä valintoja.

Yhtiön tavoitteena on olla alan suosituin kumppani, johtava toimija ja kunnioitettu jäsen yhteisöissä, joissa he toimivat sekä tuovat lisäarvoa asiakkaille, työntekijöille, sijoittajille ja toimittajille. Kaikessa Stora Enson toiminnassa näkyy vastuullinen suhtautuminen luontoon ja toiminta-alueiden yhteisöihin. Huolehtimalla puuviljelmien ja metsien vastuullisesta hoitamisesta puuta kasvatetaan enemmän kuin korjataan. Jatkuvasti kehittämällä prosesseja, säästetään energiaa sekä hyödynnetään raaka-aineita mahdollisimman tehokkaasti.

Yhtiö on julkisesti noteerattu Helsingin ja Tukholman pörseissä. Konsernissa työskentelee noin 22 000 työntekijää. Vuoden 2021 liikevaihto oli 10,2 miljardia euroa ja operatiivinen liiketulos 1 568 miljoonaa euroa. (Stora Enso Oyj, 2023a.)

2.2 Varkauden tehtaan esittely

Varkauden tehdas on monipuolinen biotuoteintegraatti. Varkauden tehdas koostuu pakkauskartonkitehtaasta, sahasta ja LVL-tehtaasta. Pakkauskartonkitehtaaseen kuuluvat puunkäsittelylaitos, sellutehdas, kierrätyskuitulaitos ja yksi kartonkikone, PK3. Pakkauskartonkitehdas vastaa myös integraatin energia- ja ympäristöpalveluista sekä sisäisestä kuljetuksesta ja turvallisuuspalveluista. Varkauden tehdasintegraatti työllistää noin 400 vakituista työntekijää tuotannossa ja kunnossapidossa.

Varkauden tehtaan vuosittainen puun (mänty ja kuusi) kulutus on noin 2 miljoonaa kuutiota vuodessa. Puunhankinta tapahtuu pääosin 100 kilometrin säteeltä tehtaan ympäriltä. Varkauden tehdas on energiaomavarainen. Lämpö- ja voimalaitoksissa käytetään 95 prosenttisesti bio- ja kierrätyspolttoaineita maksimoimalla energiatehokkuus ja minimoimalla fossiiliset hiilidioksidipäästöt. (Stora Enso Oyj, 2023b.)

3 FLIR SI124 ULTRAÄÄNIKAMERA

Tässä kappaleessa kerrotaan ultraäänikameran valmistajasta, kameran ominaisuuksista ja kameran mittausprosessin perusteista. Alla on yleiskuva FLIR Si124 ultraäänikamerasta.



KUVA 1. Kuva FLIR Si124 ultraäänikamerasta (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

3.1 Kameran valmistajasta

FLIR SI124 Acoustic Imaging Camera, ultraäänikamera on Teledyne FLIR yhtiön valmistama ultraäänitekologiaan perustuva kuvantamislaitte, jolla pystytään tiedettävästi havaitsemaan paineilma-
vuotoja sekä osittaispurkauksia. Teledyne FLIR on perustettu vuonna 1978. Yhtiön alkuperäisenä perustamistarkoituksena oli tuottaa matalalla kustannuksella korkealaatuisia lämpökameroita ilmailun tarpeisiin. Yhtiö on maailman laajuinen ja se työllisti yli 3000 työntekijää vuonna 2021. (FLIR 2023a.)

3.2 Ultraäänikameran mallit

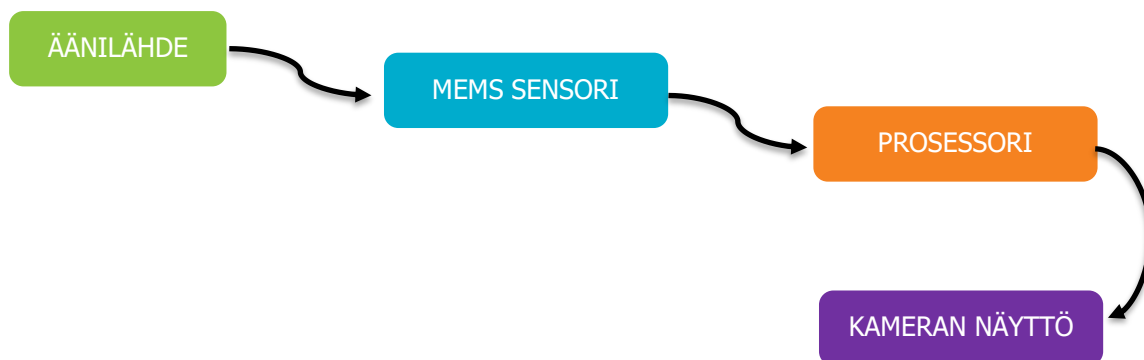
Tätä opinnäytetyötä tehdessä ultraäänikameraa oli saatavilla neljää erilaista mallia, jotka olivat FLIR verkkosivustoon perustuen seuraavat. FLIR Si124 -malli soveltuu paineilma-
vuotojen ja osittaispurkauksien havainnointiin. FLIR Si124-LD -malli soveltuu vain paineilma-
vuotojen havainnointiin. FLIR Si124-LD PLUS -malli soveltuu vain paineilma-
vuotojen havainnointiin. PLUS-malli on varustettu automaattisella etäisyyden tunnistuksella sekä automaattisella ympäristön asetusten asettamisella. Automatiikka helpottaa kameran käyttöä. FLIR Si124-PD -malli soveltuu vain osittaispurkauksien havainnointiin. (FLIR 2023b.)

Opinnäytetyössä käytettiin FLIR Si124 mallista ultraäänikameraa, joka oli hankittu opinnäytetyön tilaajalle loppuvuodesta 2021.

3.3 FLIR Si124 ultraäänikameran teoreettiset tiedot ja toimintaperiaate

FLIR Si124 ultraäänikameraan on asennettu 124 kappaletta äänilähteen tunnistavia MEMS sensoreita, joiden taajuusvaste on 2–35 kHz. Kameran mittausetäisyys on 0,5–130 metriä. Kameran paino on noin 980 grammaa ja akun paino on noin 985 grammaa. Käyttövalmiin kameran paino on noin 2,9 kilogrammaa sisältäen kameran, akun ja välilyhdon. Kamera on varustettu 5" kokoisella kosketusnäytöllä, josta kameran toimintoja ohjataan. Kamerassa on Wi-Fi verkkoyhteys, jolla kamera voidaan yhdistää internetiin kameralla kuvattujen kuvien lähettämistä varten FLIR Acoustic Camera Viewer pilvipalveluun. Kameran muistikapasiteetti on 32 GB ja sen muistiin mahtuu 2000 kappaletta kuvia. Kameraa käytettäessä suhteellinen ilmankosteus tulee olla 0–90 % välillä, jotta kameran toiminta ei häiriinny. Käyttölämpötila tulee olla -10–50°C välissä. Ultraäänikameraa ei saa käyttää ATEX-tiloissa, koska se ei ole ATEX hyväksytty. (FLIR Si124 datalehti 2023, 2.)

Kameran tunnistama äänilähde kulkee alla olevan kuvan osoittaman prosessin läpi, ennen kuin se päätyy kameran näytölle visuaalisena esityksenä:

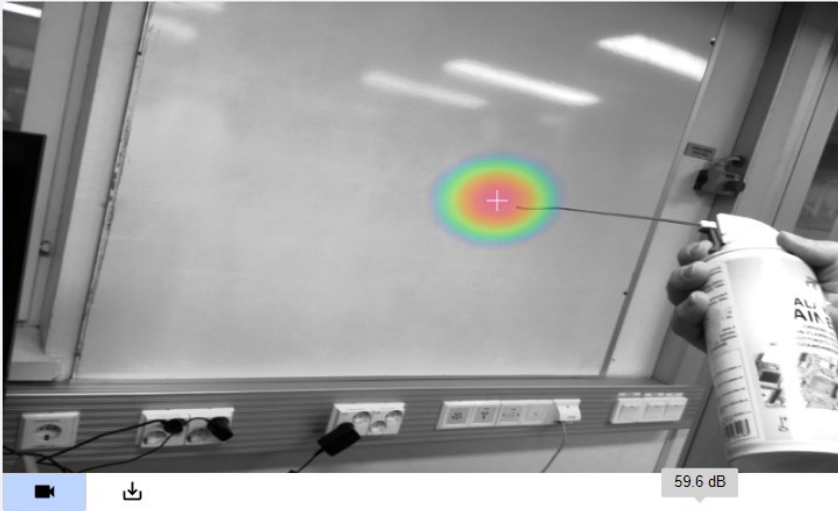


KUVA 2. Kuva ultraäänikameran toiminnasta (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

Jokainen kameran MEMS sensori havaitsee ympäristön äänilähteistä aiheutuvaa äänenpainetta ja lähettää tätä tietoa ultraäänikameran prosessorille. Prosessori muodostaa jokaisen MEMS sensorin tuottaman tiedon perusteella ultraäänikameran näytölle visuaalisen esityksen siitä, missä kohtaa kamera havaitsee äänilähteen. Kameran näytöllä oleva liukuväripiste kertoo missä kohtaa kameran kuvaamaa kuvaa äänilähde sijaitsee. (Stjernberg 2023.)

Esimerkkikuvassa (kuva 3) kamera on tunnistanut äänilähteen aerosolipullon suuttimen päässä.

< Etusivu < EDELLINEN SEURAAVA > POISTA ?



Tiedot

Nimi: TESTI ÄÄNILÄHDE TALLENNAMUUTOKSET

Sarjanumero: AC13F194

Tunniste: 232999

Taso: 71.2 dB

Luontipvm: 2023-04-18 15:04:57 GMT+0300

Synkronointipvm: 2023-04-18 15:11:55 GMT+0300

-12.4 dB 59.6 dB 71.2 dB

KUVA 3. Äänilähteen esimerkkikuva (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

4 FLIR ACOUSTIC CAMERA VIEWER ANALYSOINTITYÖKALU

Tässä osiossa käsitellään FLIR Acoustic Camera Viewer pilvipalvelun ja analysointityökalun toimintaperiaatetta, käyttöä ja luotettavuutta itse hankittujen käyttökokemusten perusteella.

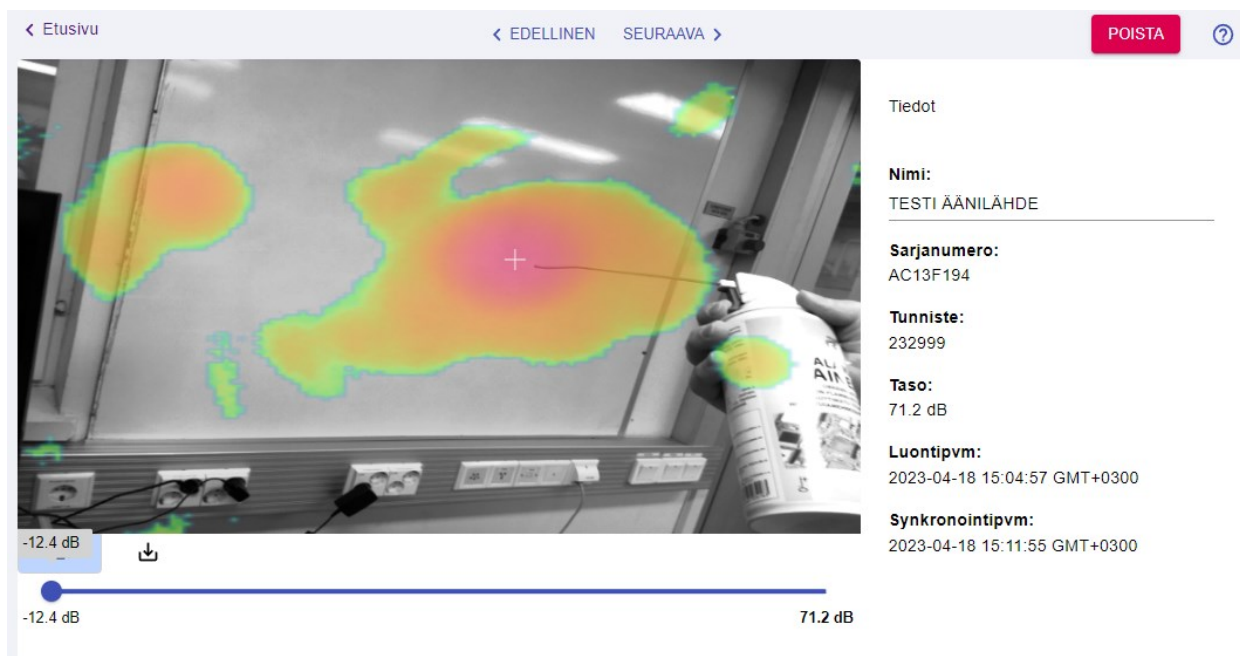
4.1 Tietojen lataaminen FLIR Acoustic Camera Viewer pilvipalveluun

Ultraäänikameran tallentamia kuvia voidaan ladata pilvipalveluun kahdella eri tavalla. Ensimmäinen vaihtoehto on ladata kuvat suoraan ultraäänikamerasta Wi-Fi verkkoyhteyden avulla. Tätä toimintoa varten ultraäänikamera on yhdistettävä Wi-Fi verkkoon esimerkiksi älypuhelimien verkkoyhteyden jakamalla. Kamera tulee olla rekisteröity tietylle käyttäjätunnukselle ennen kuvien lataamista. Käyttäjän rekisteröinnin voi suorittaa FLIR:n verkkosivustolla. Kun käyttäjätunnus on luotu, kamera on yhdistetty tähän käyttäjään ja kamera on yhteydessä verkkoon, kuvat latautuvat automaattisesti aina kuvan ottamisen jälkeen. Kuvat tallentuvat FLIR Acoustic Camera Viewer pilvipalveluun aikaleimalla.

Toinen tapa on ladata kuvat verkkoon tietokoneen ja USB-tikun avulla. Kuvien ottamisen jälkeen ultraäänikameraan kiinnitetään USB-tikku, johon ultraäänikamerassa olevat kuvat siirretään. USB-tikku kiinnitetään tietokoneeseen ja tietokoneen avulla kuvat ladataan FLIR Acoustic Camera Viewer pilvipalveluun. Tämä vaihtoehto ei ole niin tietoturvallinen, kuin ensimmäinen vaihtoehto, koska USB-tikkuihin on helppo kätkeä haittaohjelmia. Tähän perustuen suosittelen ensisijaisesti Wi-Fi yhteyttä tietojen siirtoon. Lisäksi se on huomattavasti helpompi tapa siirtää tietoa, koska mitään ylimääräisiä toimenpiteitä ei vaadita.

4.2 Analysointityökalun toiminta ja sen luotettavuuden arviointi

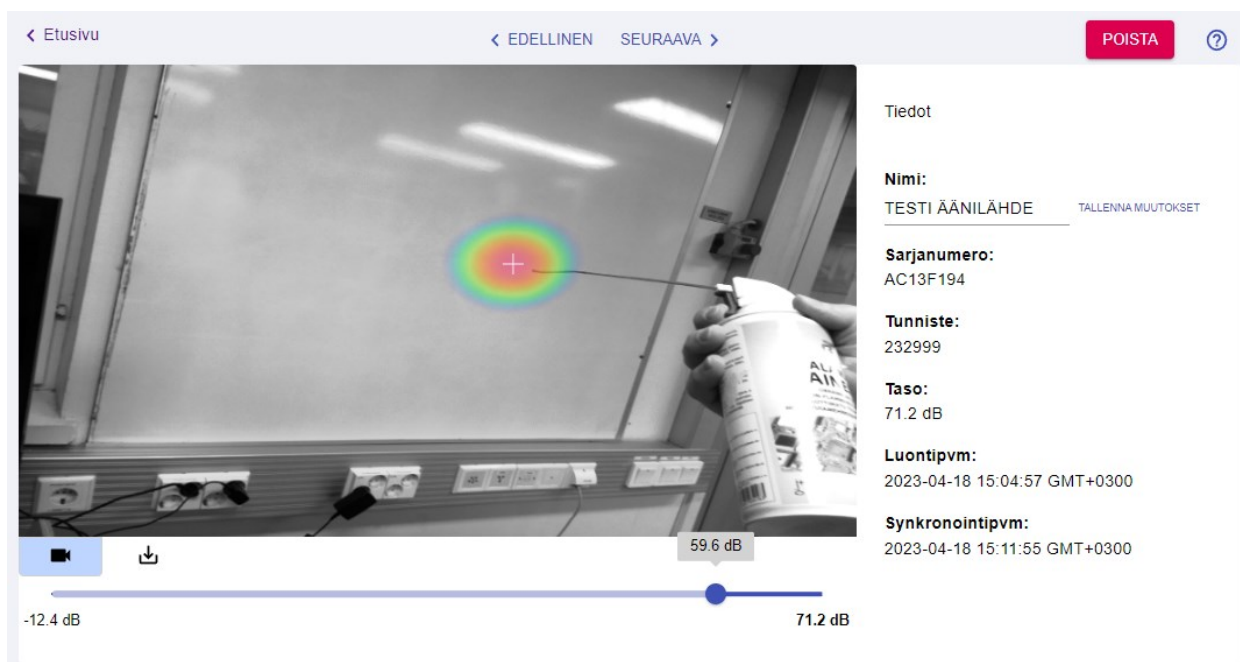
FLIR Acoustic Camera Viewer pilvipalvelun analysointityökalun avulla voidaan analysoida kameran kuvaamia kuvia. Analysointiohjelmassa voidaan esimerkiksi muuttaa ympäristön äänenpaineen suodatusta, jotta kameran kuvaama varsinainen äänilähde saadaan eroteltua ympäristön aiheuttamasta äänilähteestä esimerkiksi heijastuksista. Analysointityökalussa voidaan tehdä äänenpaineen suodatuksen lisäksi muiden muassa kuvien kommentointia, uudelleen nimeämistä ja mittausetäisyyden muokkaamista.



KUVA 4. Suodattamaton äänilähde (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

Ylemmässä kuvassa on suodattamaton äänilähde. Alemmassa kuvassa on sama kohde kuin ylempi kuva, mutta äänenpaineen suodatus on erilainen.

Alemmasta kuvasta on huomattavasti helpompi tehdä päätelmä äänilähteen todellisesta sijainnista.

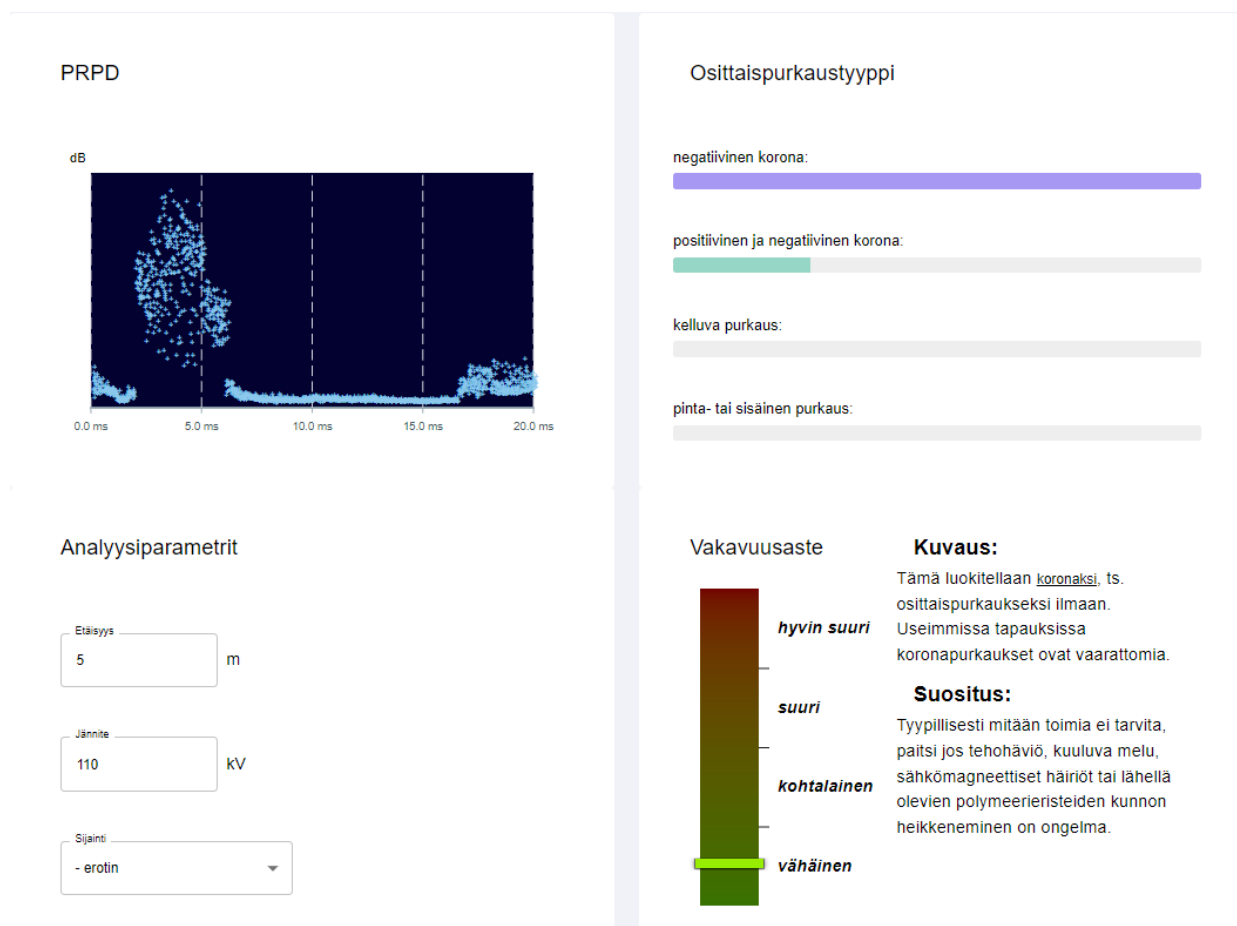


KUVA 5. Suodatettu äänilähde (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

Kuvattaessa paineilmapuotoja on todella tärkeää, että kameraan on asetettu mittausetäisyys oikein. Jos mittausetäisyys on asetettu kameraan väärin, eli mittausetäisyys on epätodellinen, kamera näyttää joko liian suurta tai pientä vuotomäärää verrattuna oikein asetettuun, eli todelliseen mittausetäisyyteen. Esimerkiksi, jos paineilmaputkessa vuodon suuruus on X ja kameraan asetettu todellinen mittausetäisyys, eli todellinen matka kameran ja vuotavan kohteen välillä on 1 m on kameran tulkitsema vuodon suuruus tässä tapauksessa 32 l/min. Jos vuodon suuruus on edelleen paineilmaputkessa X ja kamera on todellisuudessa 1 m päässä vuotavasta kohdasta, mutta kameraan asetettu epätodellinen mittausetäisyys olisi 10 m on kameran tulkitsema vuodon suuruus 173 l/min. Toisin sanottuna kamera reagoi herkemmin pienempiin vuotomääriin (äänilähteisiin) suuremmalla mittausetäisyyden asetuksella, sama teoria pätee myös toisinpäin.

Osittaispurkauksia analysoitaessa analysointityökalu tekee analysoinnin valmiiksi ja kertoo analytiikan perusteella tunnistetun vikatyypin. Tässä opinnäytetyössä ei pystytty kyseenalaistamaan analysointityökalun luotettavuutta osittaispurkauksien analysoinnissa, joten on oletettava työkalun olevan luotettava.

Alla olevassa kuvassa on esimerkki osittaispurkauksen analysointityökalusta.



KUVA 6. Esimerkki koronapurkauksesta analysointityökalussa (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

5 OPINNÄYTETYÖN KESKEISIMMÄT KÄSITTEET

Tässä osiossa käsitellään paineilmaan liittyvät keskeisimmät käsitteet, osittaispurkauksien tyypit ja niihin liittyvät käsitteet sekä esitellään Varkauden pakkauskartonkitehtaan paineilmajärjestelmä.

Tämän osion käsitteet liittyvät työhön oleellisesti, koska kameran toiminta ja käyttäminen perustuu niihin. Tässä osiossa esitetyt sähköiset vikatyypit ovat tiedostettuja vikatyyppejä, jotka ultraääni-kameralla voidaan tunnistaa. Ultraäänikameraa käytetään erityisesti ennakoivan ja suunnitellun kunnossapidon alueella sekä kunnonvalvonnassa, koska ultraäänikameralla tuetaan näiden toimintojen toteutumista.

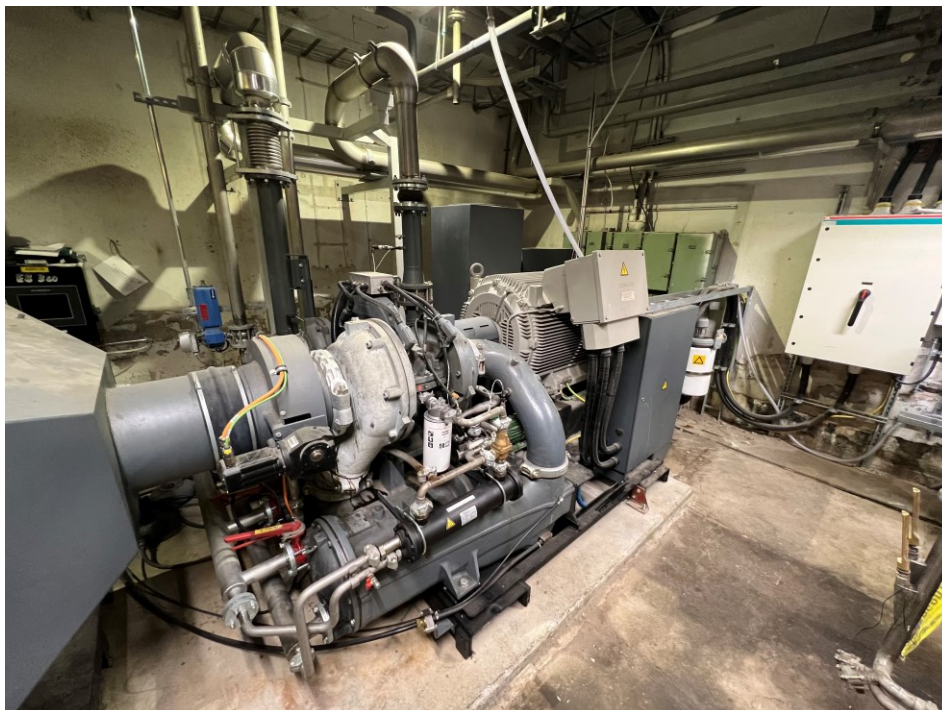
5.1 Mekaaniset tekijät

Mekaanisessa osiossa käsitellään paineilmaan liittyviä käsitteitä, ultraäänen perusteita sekä kunnossapitolajien merkitystä ultraäänikameran näkökulmasta.

5.1.1 Paineilma

Yksinkertaisuudessaan paineilma on kokoon puristettua ilmaa. Paineilmaa tuotetaan teollisessa ympäristössä yleensä mäntä-, ruuvi-, tai keskipakokompressoreilla. Paineilma kuivataan ennen paineilmaverkkoon syöttämistä, jotta putkistoon ja sen päässä olevaan toimilaitteeseen ei pääse kosteutta. Paineilmaan voidaan lisätä voiteluöljyä erityisellä sumuvoitelulaitteella, joka lisää öljysumua paineilman sekaan ja täten voitelee toimilaitetta, esimerkiksi paineilmasylinteriä. Teollisessa ympäristössä paineilma on helpoiten kuljetettavissa käyttökohteeseen paineilmaverkoston avulla, koska paineilmaa tarvitaan hyvin monessa eri kohteessa ja sen kulutus on kohtuullisen suurta. (Räisänen 2023.)

Stora Enson Varkauden pakkauskartonkitehtaalla paineilma tuotetaan pääasiassa kahdella Atlas Copco ZH 630-7 keskipakokompressorilla, joista toinen kuvattu alla.



KUVA 7. Atlas Copco ZH 630-7 keskipakokompressori (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

Varalaitteina on muutamia TamRock 1250 EWNA ruuvikompressoreita. Kompressoreilta lähtevä paineilma kulkee ensin kahteen 6 m³ paineilman varastosäiliöön ja sieltä useiden esisuodattimien (kuva 8) läpi Sarlin Oy Ab:n toimittaman FST DTS 1470 V H paineilmaquivaimen (kuva 9) kautta paineilmaquerkkoon.



KUVA 8. Paineilman suodattimia kuvan etualalla (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

Paineilmakuivaimilla kuivataan paineilmaista vesihöyryä, jotta sen kastepiste olisi mahdollisimman matala, kun se päätyy putkistoon. Kun kastepiste on riittävän matala, paineilma voi kulkea myös ulkotiloissa olevissa paineilmaputkistoissa ilman huolta kosteuden tiivistymisestä putkiston sisäpin-
nalle. (Sarlin 2023a.)



KUVA 9. FST DTS 1470 V H paineilmauivain (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

Paineilma on kallista tuottaa. Turha paineilmauoto voi aiheuttaa suuria, jopa kymmenien tuhansien eurojen turhia kustannuksia vuodessa. Joissain kohteissa, esimerkiksi pneumatiikkakaapeissa on normaalia, että paineilmaa jätetään vuotamaan erillisen venttiilin avulla, jotta pneumatiikkakaapin sisälle muodostuu ylipaine ja täten epäpuhtaudet pysyvät pneumatiikkakaapin ulkopuolella. Kun tutkitaan pneumatiikkakaappien vuotoja ultraäänikameralla, tämä on otettava huomioon. (Immonen 2023.)

Paineilmalle on olemassa erillinen laatustandardi ISO 8573-1:2010 (taulukko 1), jossa määritetään paineilman laatuluokka ja laatuluokan sallimat kiinteät partikkelit sekä veteen ja öljyyn liittyvät ominaisuudet.

TAULUKKO 1. Paineilman laatustandardi ISO 8573-1:2010 (Sarlin 2023b)

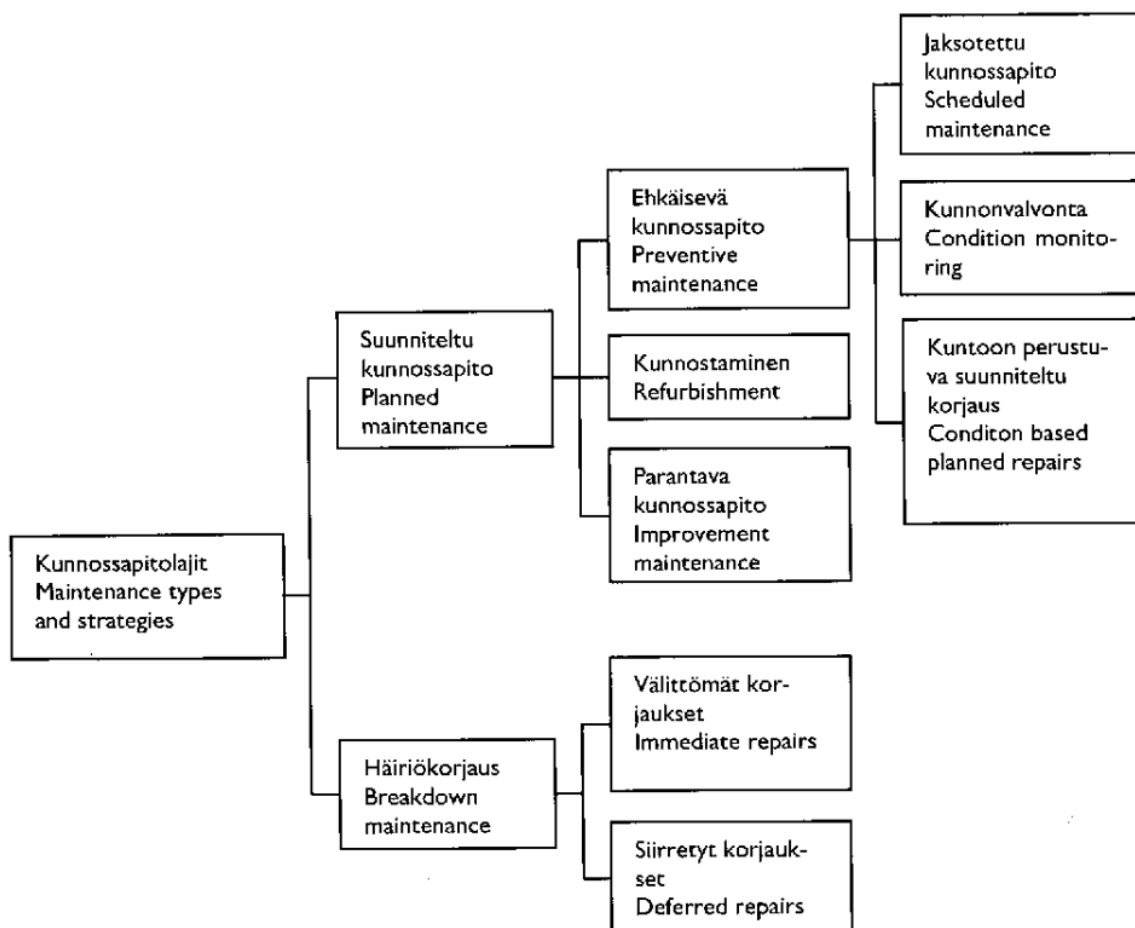
PAINEILMAN LAATU ISO 8573-1:2010 STANDARDIN MUKAAN							
Paineilman laatuluokka	KIINTEÄT PARTIKKELIT			Massapitoisuus mg/m ³	VESI		ÖLJY Öljysumu, -neste ja -höyry mg/m ³
	Partikkeleiden maks. määrä/m ³				Paineenalainen kastepiste	Neste g/m ³	
	0,1...0,5 µm	0,5...1 µm	1...5 µm				
0	Laitteiden käyttäjän tai toimittajan määrittelemä ja tiukempi kuin luokka 1.						
1	≤ 20.000	≤ 400	≤ 10	-	≤ -70 °C	-	0,01
2	≤ 400.000	≤ 6.000	≤ 100	-	≤ -40 °C	-	0,1
3	-	≤ 90.000	≤ 1.000	-	≤ -20 °C	-	1
4	-	-	≤ 10.000	-	≤ +3 °C	-	5
5	-	-	≤ 100.000	-	≤ +7 °C	-	-
6	-	-	-	≤ 5	≤ +10 °C	-	-
7	-	-	-	5 ... 10	-	≤ 0,5	-
8	-	-	-	-	-	0,5...5	-
9	-	-	-	-	-	5...10	-
x	-	-	-	> 10	-	> 10	> 10

5.1.2 Ultraääni

Ultraääni on ääntä, jonka taajuus on ihmisen normaalin kuuloalueen yläpuolella (> 20 000 Hz). Ultraääntä käytetään tyypillisesti teollisuudessa NDT-tutkimuksissa ja lääketieteessä ihmisen kehon kuvantamiseen. Ultraääni tarvitsee aina jonkun väliaineen, jossa edetä. Väliaine voi olla nestettä, kaasua tai kiinteää ainetta. (Oulun Ultra 2023.)

5.1.3 Kunnossapitolajit PSK standardin mukaan

Kunnossapidolla tarkoitetaan toimenpiteitä, joilla todetaan kohteen toimintakunto, pidetään kohde halutussa toimintakunnossa tai saatetaan se haluttuun toimintakuntoon (Mikkonen 2009, 96–97). Alla olevassa kuvassa on esitetty PSK standardin 7501 mukaan eri kunnossapitolajien suhde toisiinsa.



KUVA 10. Eri kunnossapitolajien suhde toisiinsa PSK 7501 mukaan. (Kunnossapitoyhdistys Pro-maint ry, 2023)

PSK standardilla 7501 kuvataan eri kunnossapitolajeja ja niiden suhdetta toisiinsa. Suunnittelun kunnossapidon alalajeja ovat parantava kunnossapito, kunnostaminen ja ehkäisevä kunnossapito. Parantavan kunnossapidon tarkoituksena on parantaa laitteen luotettavuutta ilman laitteen muuttamista. Kunnostamisella tarkoitetaan vioittuneen komponentin palauttamista sallittua käyttökuntoon vastaavaan kuntoon. Ehkäisevä kunnossapito tarkoittaa kohteen käyttöominaisuuksien säilyttämistä, heikentyneen toimintakyvyn palauttamista tai vaurion syntymisen estämistä.

Ehkäisevä kunnossapito sisältää seuraavat alalajit: jaksotettu kunnossapito, kunnonvalvonta ja kuntoon perustuva suunniteltu korjaus. Jaksotettu kunnossapito tarkoittaa toimenpidettä, joka suoritetaan suunnitelluin jaksotuksin. Esimerkiksi käyttötuntien, kalenteriajan, tuotantomäärän tai energian kulutuksen mukaisesti. Kunnonvalvonnan tarkoituksena on määrittää kohteen toimintakunnon nykytila ja arvioida mahdollisten vikojen kehittyminen sekä huolto- ja korjaustarpeet. Kunnonvalvontaa voidaan suorittaa aistinvaraisesti sekä kannettavien värähtelyanalysaattoreiden ja visuaalisten tarkastuksien avulla. Kunnonvalvonta tuottaa lähtötietoä ehkäisevän kunnossapidon ja korjauksen suunnitteluun. Kuntoon perustuva suunniteltu korjaus tarkoittaa kunnonvalvonnan lähtötiedon perusteella havaittujen kohteiden suunniteltua korjausta. (Mikkonen 2009, 96–97.)

Nykypäivän modernissa teollisuusympäristössä tavoitetilana on suunnitellun kunnossapidon tila. Kun suunniteltua kunnossapitoa voidaan toteuttaa täysimääräisesti, korjausvelka on minimaalinen ja yllättävät laiterikot ovat vähäisiä. Työympäristö on siisti, viihtyisä ja kiireen tuntua ei ole. Näiden seurauksena työtapaturmia sattuu vähän. Häiriöprosentti on tässä tavoitetilassa lähellä nollaa. Jos teollisuusympäristössä vallitsee häiriökorjauksen tila, korjausvelkaa on paljon ja käyttövarmuus on matalalla tasolla. Laiterikkoja on huomattavasti ja tämän seurauksena työhyvinvointi kärsii ja työtapaturmia sattuu paljon. (Mikkonen 2009, 96–97.)

5.2 Sähköiset tekijät

Tässä osiossa käsitellään sellaisia sähköisiä ominaisuuksia, joita ultraäänikameralla voidaan havaita. Sähköisten ominaisuuksien ja vikojen havaitseminen ultraäänikameralla on avain asemassa käyttövarmuuden ja suunnitellun kunnossapidon kannalta.

5.2.1 Osittaispurkaus

Osittaispurkauksella (PD) tarkoitetaan tavallisesti sähköpurkausta, joka ei täysin täytä kahden johtavan elektrodin välistä tilaa. Osittaispurkauksia tapahtuu erilaisissa paikoissa sekä suurjännitelaitteiden väliaineissa. Vaikka termit vaihtelevat, osittaispurkauksen tyyppisiä on yleensä neljä, joista jokainen tapahtuu eri syistä ja joista jokainen on taipuvainen aiheuttamaan eritasoisia vahinkoja. Osittaispurkauksen syynä on yleensä vähäinen vika, joka aiheuttaa tuhansia pieniä toistuvia purkauksia. Osittaispurkaus lisääntyy ja kasvaa ajan myötä. Tämä voi johtaa katastrofaalisiin vikoihin, jotka aiheuttavat laitteiston toimintahäiriöitä ja vaarallisia valokaaria. Turvallisuus on erityinen huolenaihe. (Fluke 2023a.)

5.2.2 Koronapurkaus

Koronapurkaus on yleinen osittaispurkaus, joka syntyy, kun purkautuminen tapahtuu suoraan johtimen terävästä pinnasta ilmaan. Tämä aiheuttaa äänipäästöjä ja radiotaajuussäteilyä. Vahinkojen tai turvallisuuden kannalta korona ei yleensä ole suuri huolenaihe. (Fluke 2023b.)

5.2.3 Valokaaripurkaus

Valokaaripurkaus on pitkäaikainen sähköpurkaus, joka aiheutuu kaasun sähköhajoamisesta. Plasmaa syntyy, kun virta virtaa ilman läpi tai minkä tahansa muun normaalisti johtamattoman aineen läpi. (Fluke 2023b.) Valokaaripurkaus voi pahimmillaan johtaa kuolemaan.

5.2.4 Pintapurkaus

Pintapurkaukseksi kutsutaan ilmiötä, jossa purkaus kulkee eristeen pintaa pitkin. Se voi olla yksi tuhoisimmista osittaispurkauksen tyypeistä. Kaksi yleisintä pintapurkauksen syytä ovat eristyspinnan likaantuminen ja kuluminen. Keski- ja korkeajännitteisissä laitteissa tällainen purkaus tapahtuu, kun eristys katkeaa. Tämä aiheutuu yleensä korkeasta kosteudesta tai huonosta kunnossapidosta. Kosteuden pääsy eristeisiin on myös yleinen pintapurkauksen syy. (Fluke 2023b.)

5.2.5 Tyhjiöpurkaus (sisäinen)

Tyhjiöpurkaus aiheutuu useimmiten kaapeleiden, holkkien, GIS-liitoseristeiden ja vastaavien eristysviasta. Tyhjiöpurkaus on erittäin tuhoisaa eristeille, ja se jatkaa yleensä laajenemistaan, kunnes se aiheuttaa täydellisen vikaantumisen. (Fluke 2023b.)

6 TUTKIMUKSEN TOTEUTTAMINEN, LIIKUTELTAVA TESTILAITTEISTO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli löytää uuden teknologian laitteelle, ultraäänikameralle, uusia ennestään tuntemattomia käyttökohteita ja samalla vahvistaa jo ennestään tunnettujen vikojen havaitsemista.

Ennen opinnäytetyön tekemistä kameraan ja sen käyttämiseen perehdyttiin työn vaatimalla tasolla. Lisäksi opinnäytetyön tutkimuksia varten rakennettiin liikuteltava testauslaitteisto (kuva 11), jolla pystyttiin testaamaan ultraäänikameran mittausten luotettavuutta erilaisissa mittausympäristöissä. Laitteisto rakennettiin pakkauskartonkitehtaalla yhdessä paikallisen tehdaspalokunnan/suojeluosaston kanssa. Laitteisto koostuu yhdestä 4 l / 200 bar paineilmapullosta ja pulloon kiinnitettävästä paineenalentimesta. Paineenalentimella saadaan säädettyä pullosta lähtevän paineilman virtauksen määrää ja paineen suuruutta. Paineenalentimeen liitettiin pneumatiikkaletku, jolla ilma saatiin ohjattua haluttuun paikkaan.

Opinnäytetyön tekeminen aloitettiin elokuussa 2021 opinnäytetyösopimuksen tekemisellä ja työn tilaajan toimesta aihealueen määrittämisellä. Työn datankeräysvaihe on tarkoituksella ollut pitkä, koska teollisessa ympäristössä testikohteita on vaihtelevalla taajuudella ja laitteiden korjaaminen saattaa viedä aikaa jopa vuoden. Ennen opinnäytetyön kirjoittamista haluttiin saada kerättyä luotettavaa ja vertailukelpoista dataa.



KUVA 11. Liikuteltava testauslaitteisto (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

7 TUTKIMUKSIEN TOTEUTTAMINEN, KAMERAN LUOTETTAVUUDEN ARVIOINTI

Ultraäänikameralle suoritettiin ensin mittauksia testiympäristössä käyttäen ultraäänikameraa ja testausta varten rakennettua liikuteltavaa testauslaitteistoa. Varkauden tehtaan konttoriin rakennettiin turvallinen testiympäristö, jossa suoritettiin testauksia ultraäänikameralla (kuva 12.)

Testiympäristössä ultraäänikamera oli kiinnitetty kolmijalkaan ja sillä kuvattiin määrättyllä etäisyydellä liikuteltavan testilaitteiston simuloimaa paineilmavuotoa. Tällä testillä haluttiin todentaa ultraäänikameran luotettavuutta ja paineilmavuodon kohdan sijainnin merkitystä kameraan nähden.

Testeissä paineilmapullon paineenalentimen jälkeiseksi paineeksi asetettiin 3 bar. Paineenalentimen jälkeisen paineen määrää ei muutettu testien aikana vaan se kesti koko ajan vakiona.



KUVA 12. Konttorille rakennettu testiympäristö (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

Ultraäänikameran ja simuloitun paineilmavuodon etäisyyden mittaukseen käytettiin Leica Geosystems AG CH-9435 Heerburgg etäisyysmittalaitetta. Etäisyysmittalaitteen mittaustarkkuus on +/- 1,5 mm.

Ensimmäisessä vaiheessa mittaus toteutettiin siten, että paineilmavuoto kohdistettiin kohtisuoraan kameraa kohti.

TAULUKKO 2. Mittaustuloksia kohtisuoraan kohdistuvasta vuodosta

Etäisyys kamerasta mitta- pisteeseen	Kameran mittaamaa ää- nenvoimakkuus	Kameran mittaama vuo- don suuruus
4,7 m	26,9 dB	5,6 l/min

Yllä olevassa taulukossa on esitetty mittaustulokset kohtisuoraan kohdistuvasta vuodosta. Tässä testissä vuotokohdan ja ultraäänikameran välinen etäisyys oli 4,7 m. Taulukko esittää ultraäänikameran mittaaman äänenpaineen voimakkuutta suhteessa vuotokohdan etäisyyteen. Oikeanpuoleisessa sarakkeessa on ilmoitettu kameran tunnistama vuodon suuruus litroina minuutissa.



KUVA 13. Paineilmavuoto kohtisuoraan kameraan nähden (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

Ylemmässä kuvassa osoitetaan vuodon suunnan olevan kameraan päin. Alla on kuva FLIR Acoustic Camera Viewer analysointityökalusta, jossa vuotokohdan äänilähde on osoitettu liukuväripisteellä. Mitä tummempi väri on, sitä suurempi vuoto on kyseessä.

Tiedot

Nimi:
TESTI 1 KOHTI

Sarjanumero:
AC13F194

Tunniste:
214387

Taso:
26.9 dB

Luontipvm:
2023-03-08 12:59:03 GMT+0200

Synkronointipvm:
2023-03-08 13:18:50 GMT+0200

Vuotoanalyysi

Etäisyys: 4,7 m etäisyydellä

Käyttötunnit: 24

Käyttöpäivät: 7

Käyttöviikot: 52

Arvioitu vuodon koko: 5,6 l/min

KUVA 14. Paineilmavuoto kohtisuoraan kameraan nähden FLIR pilvipalvelussa (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

Seuraavassa testissä haluttiin verrata kuinka epäsuorasti kohdistuva paineilmavuoto vaikuttaa mit-taustarkkuuteen. Kameraa pidettiin määritetyllä etäisyydellä vuodosta, mutta vuodon suunta kää-nettiin 180 ° kamerasta pois päin.

TAULUKKO 3. Mittaustuloksia epäsuorasti kohdistuvasta vuodosta

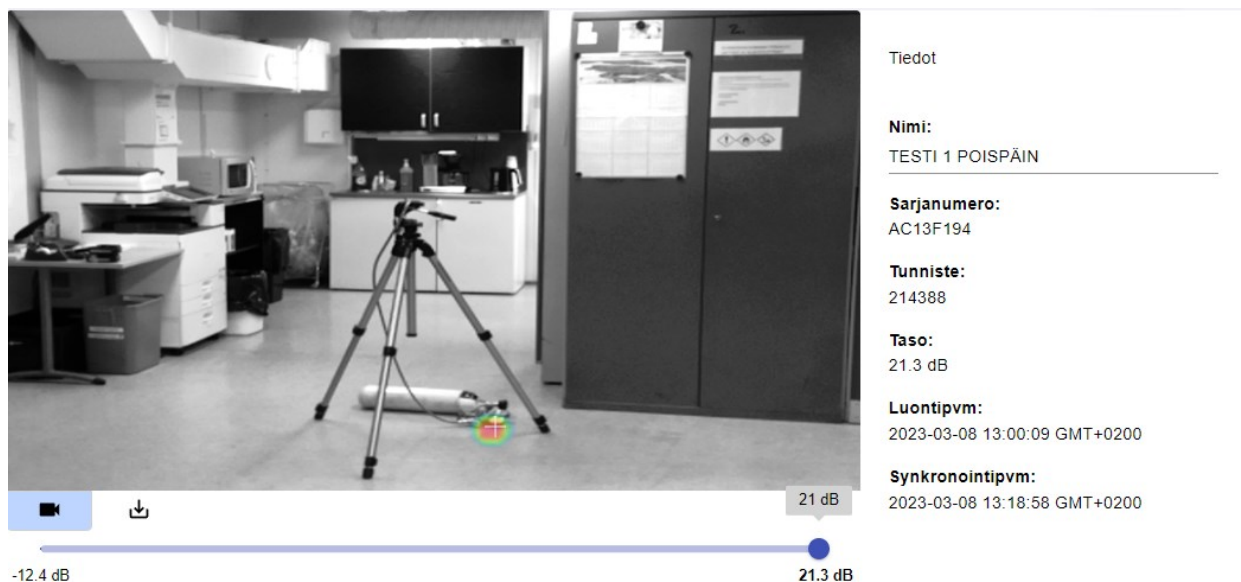
Etäisyys kamerasta mitta-pisteeseen	Kameran mittaamaa ää-nennoimakkuus	Kameran mittaama vuo-don suuruus
4,7 m	21,3 dB	3,9 l/min

Yllä olevassa taulukossa on esitetty mittaustulokset epäsuorasti kohdistuvasta vuodosta. Tässä testissä vuotokohdan ja ultraäänikameran välinen etäisyys oli 4,7 m. Taulukko esittää ultraäänika-meran mittaaman äänenpaineen voimakkuutta suhteessa vuotokohdan etäisyyteen. Oikeanpuolei-nessä sarakkeessa on ilmoitettu kameran tunnistama vuodon suuruus litroina minuutissa.



KUVA 15. Paineilmavuoto kamerasta poispäin (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

Ylemmässä kuvassa osoitetaan vuodon suunnan olevan kamerasta poispäin. Alla on kuva FLIR Acoustic Camera Viewer analysointityökalusta, jossa vuotokohdan äänilähde on osoitettu liukuväripisteellä. Mitä tummempi väri on, sitä suurempi vuoto on kyseessä.



Vuotoanalyysi

Etäisyys	Käyttötunnit	Käyttöpäivät	Käyttöiikot
4,7	24	7	52

Arvioitu vuodon koko: 3.9 l/min

KUVA 16. Paineilmavuoto kamerasta poispäin FLIR pilvipalvelussa (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

Kamerasta poispäin suuntautuvan vuodon suurin äänilähde syntyi testilaitteiston paineenalentimen jälkeiseen pneumatiikkaputkeen. Tämä siksi, koska kamera ei pystynyt havaitsemaan pneumatiikkaputken päästä aiheutuvaa äänilähdettä, koska se oli suunnattu kamerasta poispäin.

Viimeisessä testiympäristössä suoritetussa kokeessa testattiin kuinka epäsuorasti kohdistuvan vuodon heijastuminen jostain kiinteästä kappaleesta vaikuttaa mittauksiin. Tässä tapauksessa heijastava kappale oli metallinen työkalukaappi 40 cm etäisyydellä vuodosta.

TAULUKKO 4. Mittaustuloksia epäsuorasti heijastuvasta vuodosta

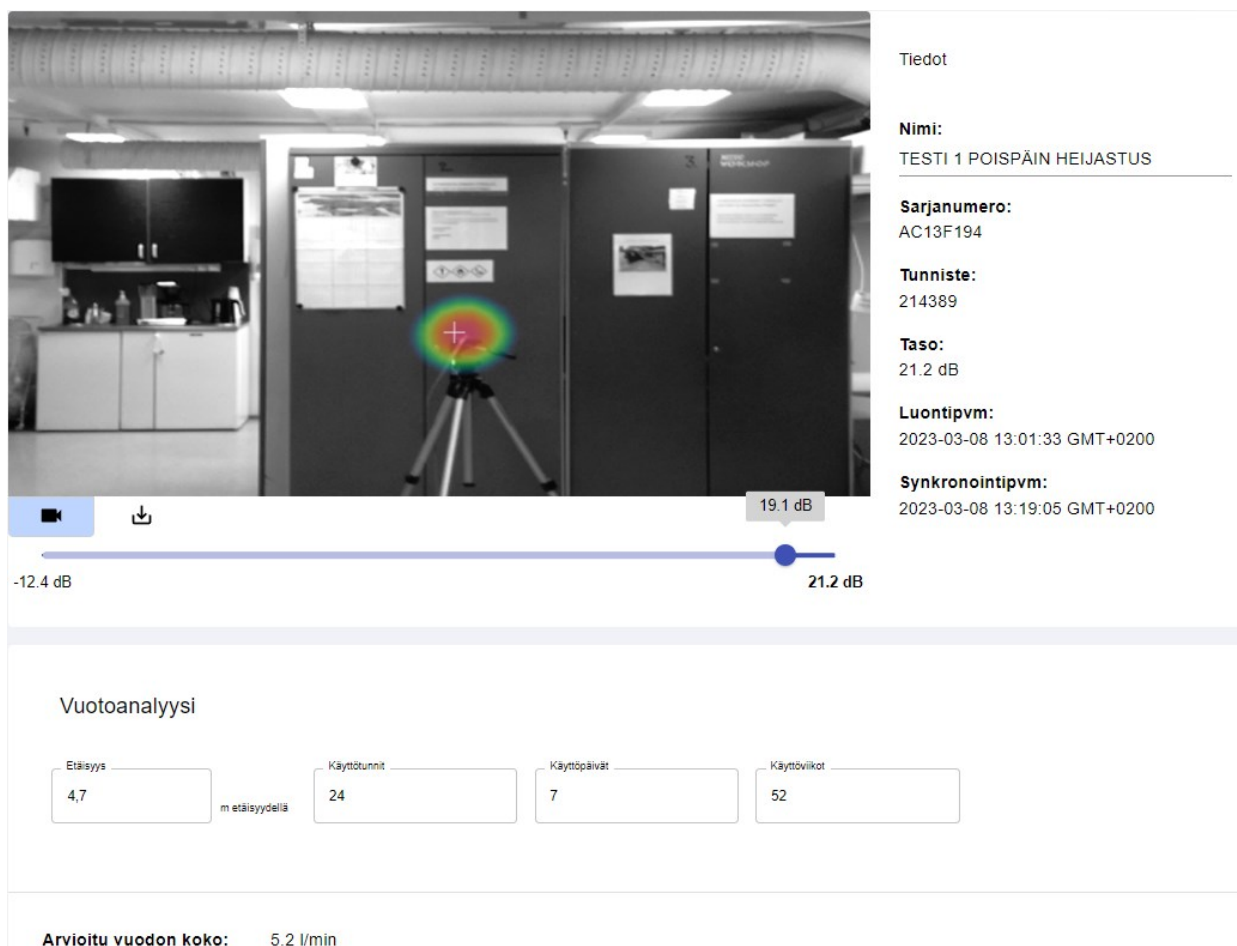
Etäisyys kamerasta mitta-pisteeseen	Kameran mittaamaa äänenvoimakkuus	Kameran mittaama vuodon suuruus
4,7 m	21,2 dB	5,2 l/min

Yllä olevassa taulukossa on esitetty mittaustulokset epäsuorasti kohdistuvasta, heijastuvasta vuodosta. Tässä testissä vuotokohdan ja ultraäänikameran välinen etäisyys oli 4,7 m. Taulukko esittää ultraäänikameran mittaaman äänenpaineen voimakkuutta suhteessa vuotokohdan etäisyyteen. Oikeanpuoleisessa sarakkeessa on ilmoitettu kameran tunnistama vuodon suuruus litroina minuutissa.



KUVA 17. Vuotoa heijastava kaappi (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

Ylemmässä kuvassa on osoitettu vuodon suunnan olevan kamerasta poispäin, mutta vuoto heijastuu kiinteästä kappaleesta kameraan päin. Alla on kuva FLIR Acoustic Camera Viewer analysointityökalusta, jossa vuotokohdan äänilähde on osoitettu liukuväripisteellä. Mitä tummempi väri on, sitä suurempi vuoto on kyseessä.



KUVA 18. Vuotoa heijastava kaappi FLIR pilvipalvelussa (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

Testien viimeisessä vaiheessa tehtiin yhteenveto kaikista mittaustuloksista seuraavan taulukon avulla ja verrattiin ultraäänikameran tunnistamia vuotomääriä toisiinsa:

TAULUKKO 5. Yhteenveto konttorin mittaustuloksista

Vuodon suunta	Etäisyys kamerasta mittapisteeseen	Kameran mittaama äänenpainepaine	Kameran mittaama vuodon suuruus
Kohtisuoraan	4,7 m	26,9 dB	5,6 l/min
Poispäin	4,7 m	21,3 dB	3,9 l/min
Heijastuva	4,7 m	21,2 dB	5,2 l/min

Kuten edeltävästä taulukosta voidaan todeta, suurimman vuotomäärän ja äänenpaineen ultraäänikamera tunnisti kohtisuoraan kohdistuvasta paineilmuvuodosta. Seuraavaksi suurin vuotomäärä ja äänenpaine syntyi heijastuvasta vuodosta. Pienimmät lukemat kamera havaitsi poispäin kohdistuneesta vuodosta. Poispäin kohdistuneessa vuodossa ultraäänikameran tunnistama äänilähteen sijainti ei kohdistunut pneumaattikaletkun päähän. Muissa testeissä kamera tunnisti onnistuneesti vuodon todellisen sijainnin, eli pneumaattikaletkun pään.

Seuraavissa laskutoimituksissa käytämme kohtisuoraan kohdistuneen vuodon määrää vertailuarvona. Laskutoimituksissa käytämme apuna vertailuprosentin kaavaa (kaava 1).

$$x = (A - B)/A * 100 \quad (1)$$

missä x on todellinen erotus, A on alkuperäinen luku, B on verrattava

Kun sijoitetaan kaavaan (1) haluamme luvut, saamme tulokseksi todellisen erotuksen määrän.

Käytetään tätä kaavaa laskussa, kun haluamme verrata, kuinka paljon pienempi on poispäin suuntautunut vuoto verrattuna kohtisuoraan kohdistuvaan vuotoon. Sijoitetaan kaavaan ja lasketaan laskutoimitus $x = (5,6 - 3,9)/5,6 * 100$, saamme x arvoksi 30,4 %. Eli poispäin kohdistuva vuoto on 30,4 % pienempi verrattuna kohtisuoraan kohdistuvaan vuotoon.

Tehdään sama laskutoimenpide heijastuvalle ja kohtisuoraan kohdistuvalle vuodolle. Sijoitetaan kaavaan ja lasketaan laskutoimitus $x = (5,6 - 5,2)/5,6 * 100$, saamme x arvoksi 7,1 %. Eli heijastuva vuoto on 7,1 % pienempi verrattuna kohtisuoraan kohdistuvaan vuotoon.

Testiympäristössä suoritettujen testien ja laskutoimituksien perusteella voidaan arvioida kameran olevan luotettava, jos vuoto kohdistuu kohtisuoraan tai heijastuksen kautta kameraan. Jos vuoto kohdistuu kamerasta poispäin vuodon suurus on haasteellista ja epäluotettavaa arvioida.

Myös kameraan asetettu mittausetäisyys vuotokohtaan nähdessä vaikuttaa vuodon suuruuden arviointiin merkittävästi. Jos vuotokohdan etäisyys on ilmoitettu virheellisesti, kamera näyttää joko liian suurta tai liian pientä vuotomäärää, kuten aikaisemmin kohdassa 4.2 käsiteltiin.

8 SOVELLUSKOHTEIDEN TUTKIMINEN

Tässä kappaleessa tutustutaan erilaisiin sovelluskohteisiin, joita tutkittiin opinnäytetyön tekemisen aikana.

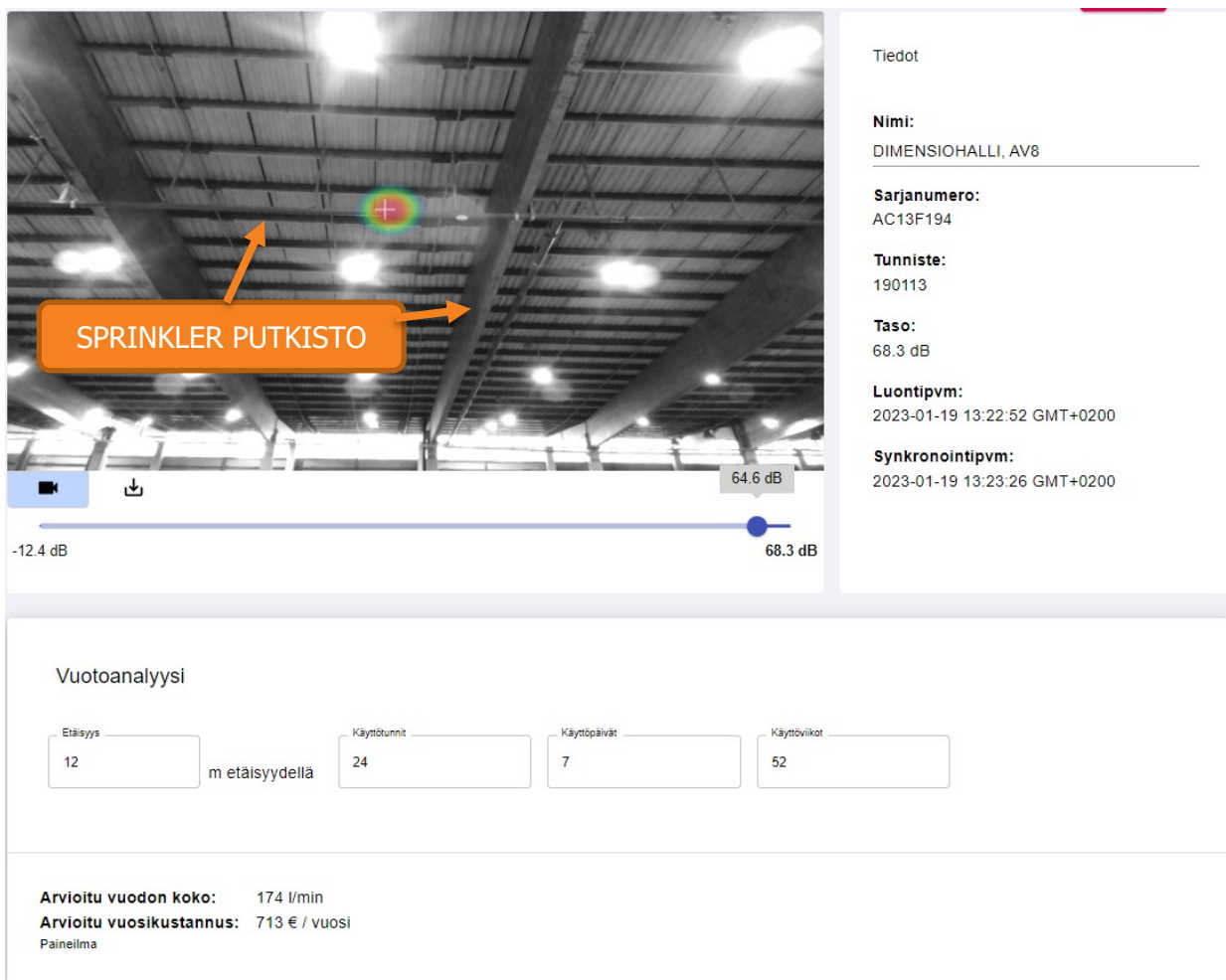
8.1 Sprinklerilinjan paineilmavuoto

Tehtaan suojeluosasto ilmoitti, että sahalli dimensiohallin sisätiloissa oli Avarn Securityn vartija havainnut yöllä rakennuksen yläpohjassa sijaitsevilta putkilta suhinaa. Vartija ei onnistunut paikantamaan vuotavaa kohdetta tarkemmin, koska putkisto oli korkealla rakennuksen yläpohjassa.

Kohteessa on tilan kylmyyden takia asennettuna paineilmätäytteiset sprinkler putkistot. Putkiston toiminta perustuu siihen, että putkistossa olevat sprinklerin kapselit eli sulakkeet rikkoutuvat tietyn lämpötilan ylittyessä, jolloin paineilma tyhjenee putkistosta. Paineilman paineen lasku putkistossa avaa sprinkleriasemalla olevan kiihdyttimen venttiilin ja putkisto alkaa täyttymään vedellä. Putkistoa voi täyttää pienten vuotojen aiheuttaman paineen laskun takia tähän tarkoitukseen asennetulla mäntäkompressorilla. Linjaston virheellinen täytyminen aiheuttaa pakkasella riskin linjaston jäätymiselle ja täten huomattavan omaisuusvahingon. (Kettunen 2022.)

Kun dimensiohallille saavuttiin, oli tuotanto käynnissä ja tutkimuksia haittaavaa taustamelua oli paljon. Korvakuulolla ei havaittu mitään poikkeavaa. Kohteessa oli myös Caverion Oy:n paloilmointin asentaja tutkimassa kohdetta. Tarkastus aloitettiin dimensiohallin sprinkleriasemalta, jossa tehtiin turvallisuuden arviointi ja suunnitelma kuvantamisen toteuttamisesta. Kuvantaminen aloitettiin loogisessa järjestyksessä sprinkleriasemalta kohti putkiston päätepistettä. Noin dimensiohallin puolivälissä ultraäänikameralla havaittiin huomattavan paineilmavuoto AV 8 sprinklerilinjassa (kuva 19). Vuodon suuruus oli 174 l/min. Muita paineilmavuotoja linjastossa ei havaittu.

Havainnosta tehtiin raportti FLIR Acoustic Camera Viewer raportointityökalulla ja se lähetettiin tehtaan suojeluosastolle toimenpiteitä varten. Vuoto oli todellinen ja se korjattiin väliaikaisesti vuodon päälle asennetulla kiristyspannalla.



Tiedot

Nimi:
DIMENSIOHALLI, AV8

Sarjanumero:
AC13F194

Tunniste:
190113

Taso:
68.3 dB

Luontipvm:
2023-01-19 13:22:52 GMT+0200

Synkronointipvm:
2023-01-19 13:23:26 GMT+0200

Vuotoanalyysi

Etäisyys m etäisyydellä Käytötunnit Käyttöpäivät Käyttöviikot

Arvioitu vuodon koko: 174 l/min
Arvioitu vuosikustannus: 713 € / vuosi
Paineilma

KUVA 19. Dimensiohallin paineilmaavuoto (merkattu liukuväripisteellä), sprinklerilinja AV8 (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

8.2 Pituusleikkurin pätkätelan epänormaali ääni

Kunnonvalvonta sai työpyynnön kartonkikoneen pituusleikkurilta pätkätelan epänormaalista äänestä. Kunnonvalvonta otti yhteyttä työpyynnön tekijään ja meni tutkimaan kohdetta. Pätkätela on pituusleikkurin osa, joka ohjaa pituusleikattavaa materiaalia leikkurin teriä vasten. Pätkätelat ovat yleensä 800–1200 mm leveitä.

Pituusleikkuri on haasteellinen kohde suorittaa kunnonvalvontaa, koska liikkuvia osia on paljon ja leikkurin ajonopeus vaihtelee hyvin paljon riippuen pituusleikattavan materiaalin neliöpainosta. Kunnonvalvonnan värähtelymittauksien suorittamiseksi laitteen pitää pyöriä tasaista ajonopeutta riittävän pitkään, jotta värähtelymittaukset saadaan suoritettua. Mittauksia ei voi suorittaa, jos laitteen ajonopeus on epätasainen.

Saavuttaessa kohteeseen tehtiin oman työn vaarojenarviointi ja tunnistettiin työkohteen vaaratekiäjät. Leikkurin pyörivät pituusleikkausterät aiheuttivat merkittävää häiriötä astinvaraiseen tutkimukseen. Astinvaraisesti epänormaalia äänilähdettä ei pystytty paikantamaan. Ultraäänikameralla tehtyjen tutkimusten perusteella pystyttiin kohdentamaan äänilähteen yhteen pätkätelaan. Kyseinen kohde oli ainoa pätkätela, joka antoi poikkeuksellisen voimakkaan äänilähteen.

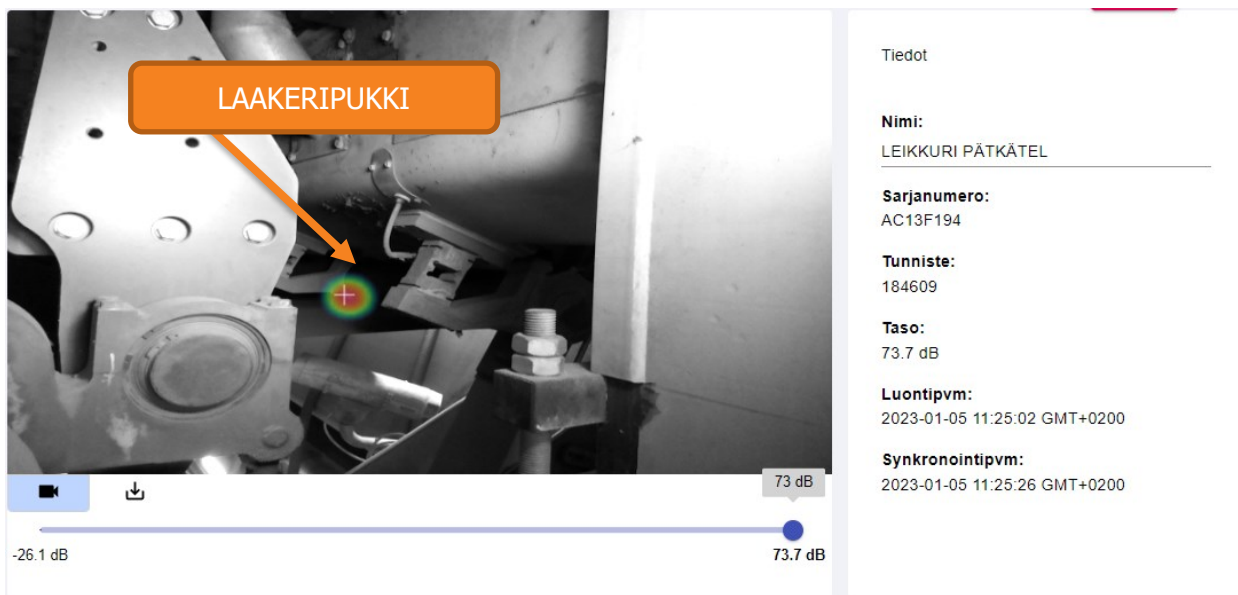
Tehtyjen tutkimusten perusteella annettiin huoltosuositus vaihtaa pätkätela seuraavassa seisokissa. Pätkätela vaihdettiin suunnitellusti ja esitarkastuksen perusteella telan laakeri todettiin kuivaksi sekä hieman väljäksi. Tässä tapauksessa laakerin vikaantumisen alkoi, kun laakerin vierintäpinnoille ei muodostunut voitelukalvoa, joka erottaisi metalliset pinnat toisistaan. Metallipintojen kosketus aiheutti ultraäänikameran havaitseman äänilähteen.

Telan laakeria ei pystytty purkamaan Varkauden tehtaalla, koska kunnossapidolla ei ollut tarpeeksi pitkiä laakerin ulosvetimiä. TELA lähetettiin huoltoon Valmetille ja sieltä pyydettiin vaurioraportti. Raportti ei ollut saapunut tehtaalle tätä opinnäytetyötä kirjoittaessa.



KUVA 20. Vaurioitunut pätkätela (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

Ylemmässä kuvassa on vaurioitunut pätkätela, oranssilla nuolella on osoitettu vaurioitunut laakeri. Alemmassa kuvassa on FLIR Acoustic Camera Viewer analysointityökalun kuva, jossa on liukuväripisteellä osoitettu äänilähde. Äänilähde oli ylemmässä kuvassa oleva vaurioitunut laakeri.



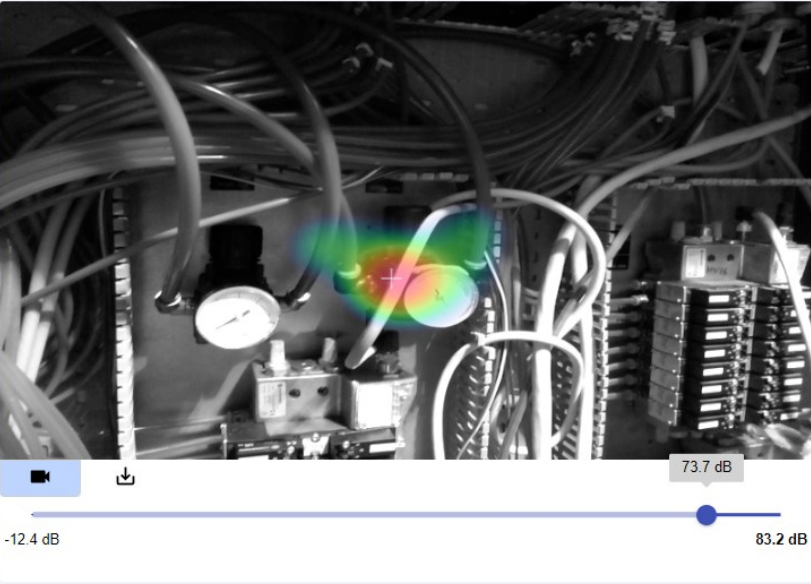
KUVA 21. Leikkurin pätkätelan laakeripukki ultraäänikameralla kuvattuna (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

8.3 Pituusleikkurin loppuliimauslaitteen ohjainyksikön paineilmaavuoto

Kartonkikoneen kunnossapitoasentaja soitti puhelimella ja kertoi, että pituusleikkurin loppuliimauslaitteen keskusyksiköllä on paineilmaavuoto, koska kaapista kuuluu epänormaalia suhinaa.

Saavuttaessa kohteeseen tehtiin oman työn vaaranarviointi ja tunnistettiin työssä ilmenevät riskit. Sitten avattiin keskusyksikön kytkentäkaapin ovet ja alkuun tutkittiin logiikan toimintaa. Järjestelmään ja pneumatiikkaletkuihin tulee paine, kun loppuliimaus käynnistyy. Liima suihkutetaan liimatavaan kohteeseen paineilman avulla. Järjestelmän ollessa neutraalissa tilassa eli paineistettuna, mutta liimaus ei ole käynnissä, järjestelmän letkuissa oli havaittavissa muutamia pieniä vuotoja. Kun loppuliimaus käynnistyi, kaapista kuului huomattavaa suhinaa. Kameralla vuoto saatiin paikannettua painemittarin juureen, josta paineilmaa vuoti järjestelmästä 46 l/min. Vuoto oli merkittävä, koska normaalissa tilanteessa järjestelmässä ei ole yhtään vuotoa.

Kunnonvalvonnan huoltosuosituksena oli vaihtaa painemittari ja korjata pienemmät vuodot seuraavassa seisokissa. Valmet tuli huoltamaan laitteiston seuraavassa seisokissa. Painemittari vaihdettiin uuteen ja vuotaneet liitokset korjattiin. Huoltotoimenpiteiden jälkeen epänormaalit suhinat hävisivät ja laitteiston toiminta palautui normaaliksi.



Tiedot

Nimi:
A1402 MITTARI

Sarjanumero:
AC13F194

Tunniste:
184614

Taso:
83.2 dB

Luontipvm:
2023-01-05 11:49:18 GMT+0200

Synkronointipvm:
2023-01-05 11:49:55 GMT+0200

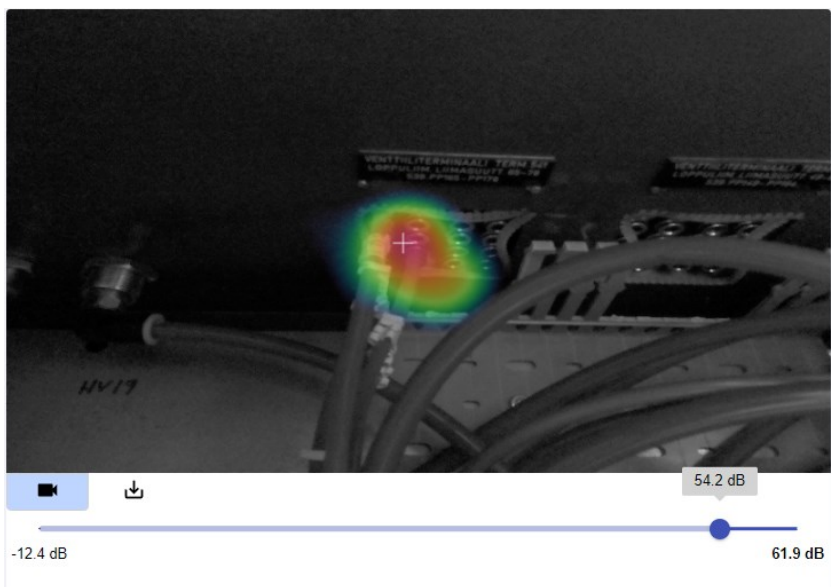
Vuotoanalyysi

Etäisyys m etäisyydellä Käyttötunnit Käyttöpäivät Käyttöviikot

Arvioitu vuodon koko: 46 l/min
Arvioitu vuosikustannus: 189 € / vuosi
Paineilma

KUVA 22. Loppuliimauslaitteen keskusyksikön vuotava painemittari (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

Ylemmässä kuvassa on vuotava painemittari, joka vaihdettiin huoltosuosituksen jälkeen uuteen. Alemmassa kuvassa on vuotava paineilma-itiin. Vuotojen korjauksen jälkeen suhinat hävisivät ja laitteiston toiminta palautui normaaliksi.



Tiedot

Nimi:
A1402 "VAS" LIIT

Sarjanumero:
AC13F194

Tunniste:
184613

Taso:
61.9 dB

Luontipvm:
2023-01-05 11:48:02 GMT+0200

Synkronointipvm:
2023-01-05 11:48:25 GMT+0200

Vuotoanalyysi

Etäisyys m etäisyydellä Käyttötunnit Käyttöpäivät Käyttöviikot

Arvioitu vuodon koko: 12 l/min
Arvioitu vuosikustannus: 50 € / vuosi
Paineilma

KUVA 23. Loppuliimauslaitteen keskusyksikön vuotava liitin (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

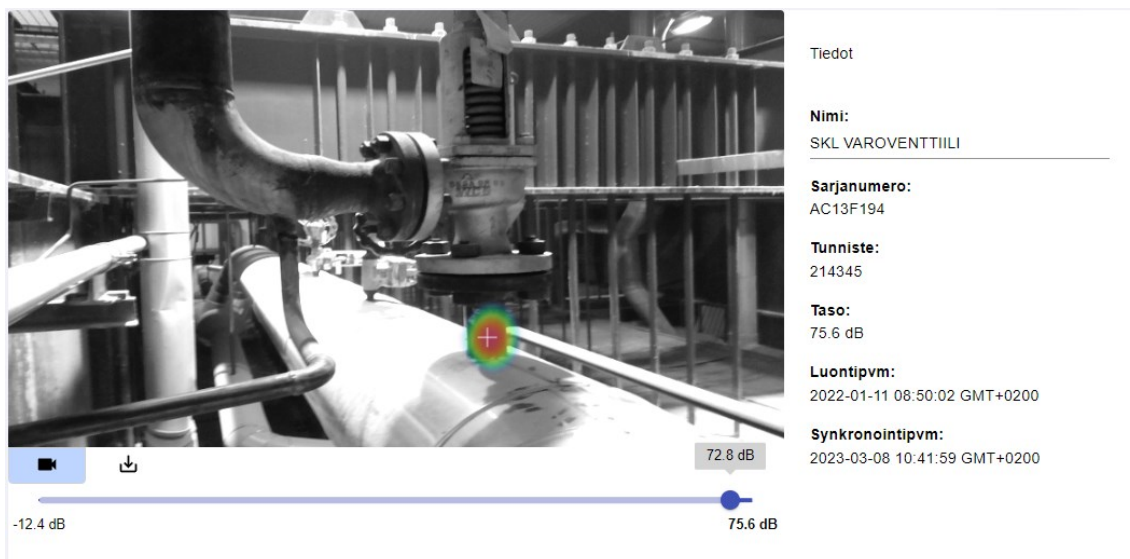
8.4 Soodakattilan varoventtiilin läpivuoto

Kunnonvalvonta sai työpyynnön soodakattilan varoventtiilin vuotoepäilyn takia. Varsinainen työpyyntö oli kuvata lämpökameralla varoventtiilin ulospuhallusputkisto ja tällä tavalla selvittää vuotaako varoventtiili läpi. Saavuttaessa kohteeseen teimme työn vaaranarvioinnin ennen tutkimusten aloittamista. Putkistoa tutkittiin ensin lämpökameralla ja vuotoepäily paljastui todelliseksi, koska ulospuhallusputkisto oli lämmin kaikilta osin mistä pystyi lämpökuvaamaan.

Seuraavaksi tutkittiin varoventtiilin aluetta ultraäänikameralla ja kamera havaitsi heti äänilähteen varoventtiilin kohdalla (kuva 24). Kameralla pystyttiin havaitsemaan myös putkiston sisäisiä, virtauksesta aiheutuvia ominaisuuksia, jotka aiheutuvat esimerkiksi ilmavirran pyörteilystä suuren paineen vaikutuksessa. Tässä tapauksessa varoventtiili oli jäänyt hieman vuotamaan käynnistyksen yhteydessä tehtyjen kokeiden jälkeen ja höyryn virtaus aiheutti äänilähteen varoventtiilin painepuolelle.

Tutkimustuloksista raportoitiin soodakattilan käyttöinsinöörille. Käyttöinsinööri teki päätöksen, että varoventtiiliä on hieman avattava mekaanisesti testauskavasta. Näin toimittuna varoventtiili avau-

tuu ja sulkeutuu tiiviimmin, jolloin venttiili toimii normaalisti. Käyttöhenkilöstö teki suositellut toimenpiteet. Kun ultraäänikameralla ja lämpökameralla suoritettiin uusintamittaukset toimenpiteiden jälkeen, vuotoa ei enää ollut havaittavissa.

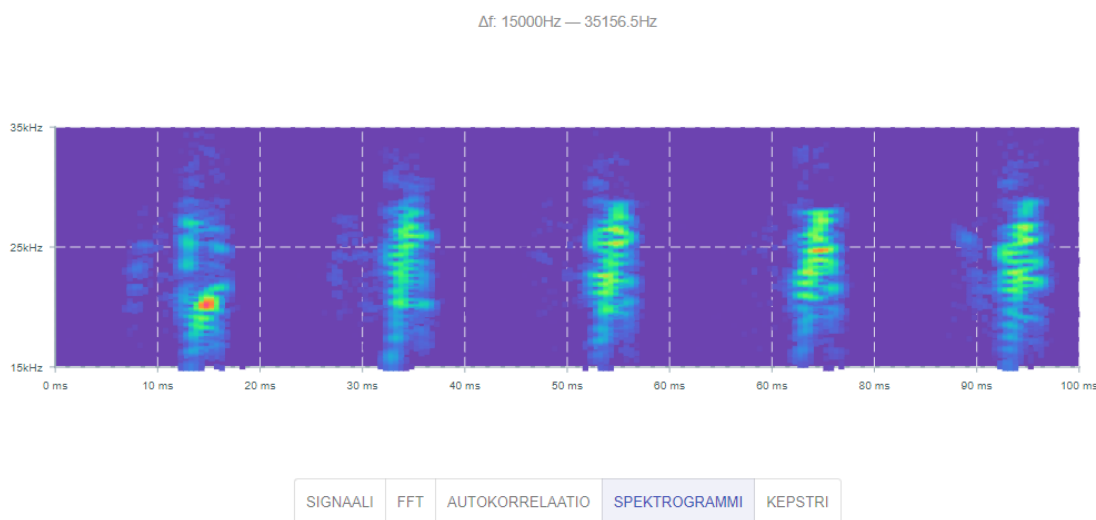


KUVA 24. Soodakattilan vuotava varoventtiili (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

8.5 Pajaniemen kytkinasema

Tutkimme tehtaalla muutamia potentiaalisia kohteita sähkövikojen löytämiseksi. Kävimme tehtaalla erilaisissa sähkötiloissa, sekä Pajaniemen kytkinasemalla. Pajaniemeen tuleva kantaverkon jännite on 110 kV, pajaniemessä jännite muutetaan 6 kV:iin, joka jaetaan tehtaan eri sähkötiloihin ja sieltä edelleen sähköä käyttäville laitteille.

Pajaniemen kytkinaseman pihalla havaittiin korvilla kuultavaa säännöllistä vaimeaa napsumista, joka kuului auki olevan erottimen päästä. Kohde kuvattiin ultraäänikameralla ja tulokset analysoitiin FLIR Acoustic Camera Viewer pilvipalvelun analysointityökalulla.

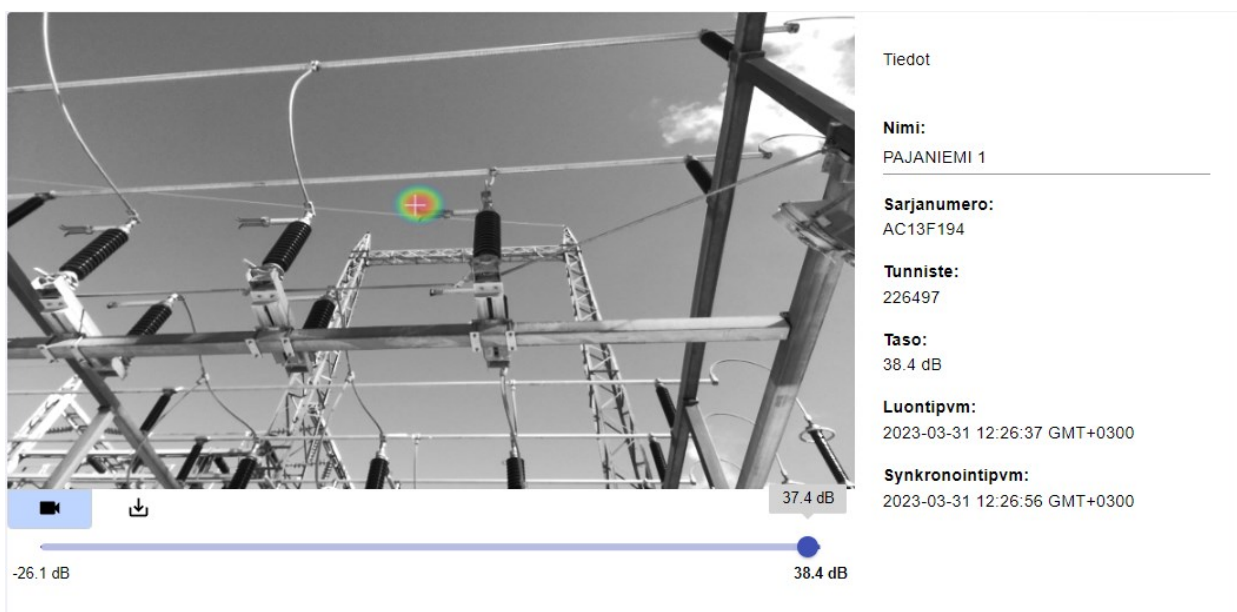


KUVA 25. Spektrogrammi erottimen äänilähteestä (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

Suurimmat äänilähteen signaalit ovat 18–27 kHz taajuudella ja niiden esiintymissykli on säännöllinen. Tämä spektrogrammi kuvastaa korvakuulolla kuultua ääntä Pajaniemen kytkinaseman pihalla (kuva 25.)

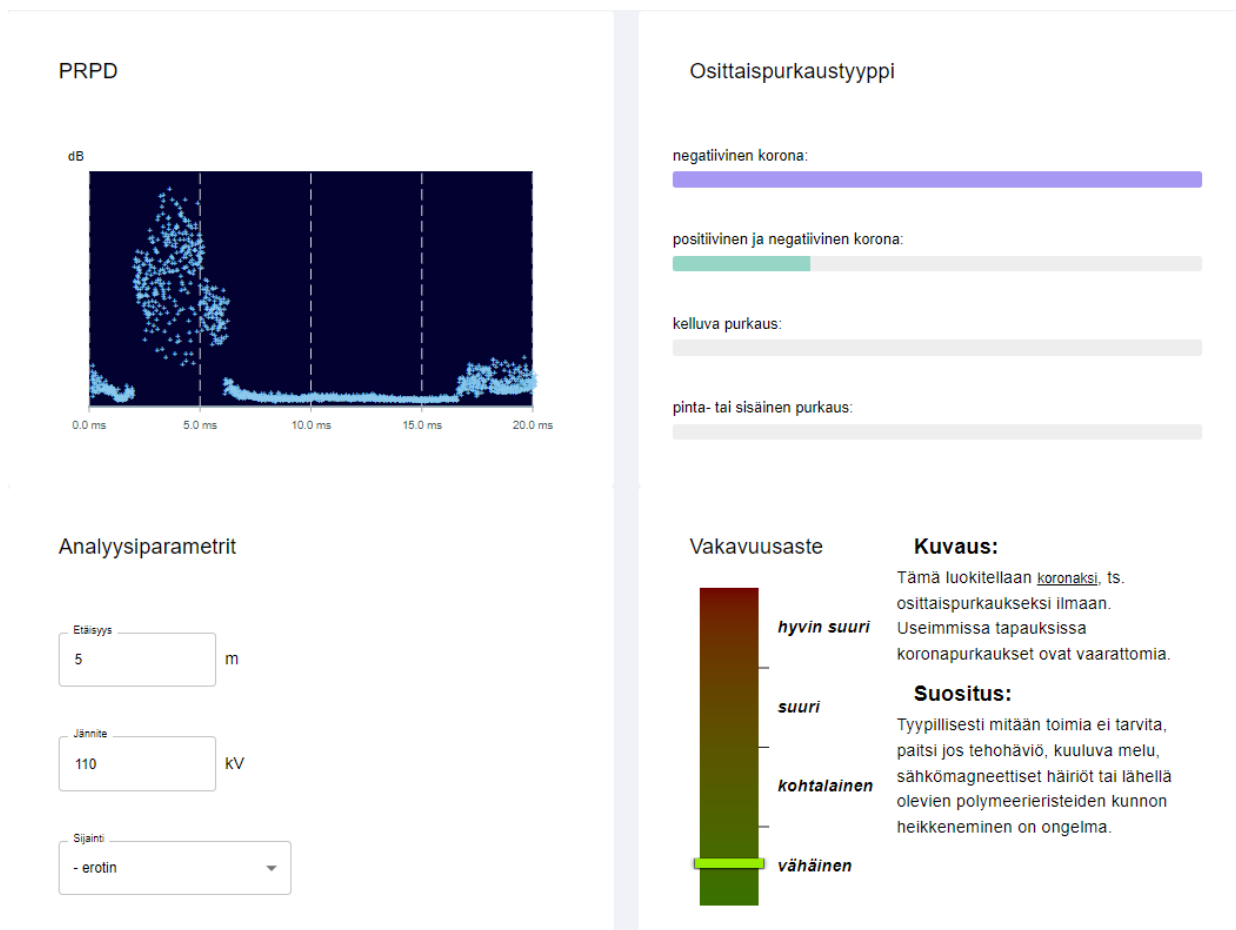
Kuvattu äänilähde luokiteltiin koronapurkaukseksi analysointityökalulla. Koronapurkaus on osittaispurkauksen tyyppi, joka kohdistuu ilmaan. Usein koronapurkaukset ovat vaarattomia. Myös tässä tapauksessa koronapurkauksen kriittisyysluokittelu oli vähäinen ja se ei edellytä mitään normaalia poikkeavia toimenpiteitä.

Yleisesti koronapurkaus aiheuttaa kuitenkin tehohäviöitä, sähkömagneettisia häiriöitä ja ääntä, mikä saattaa muodostua ongelmaksi joissakin tapauksissa. Usein pahin koronapurkaukseen liittyvä ongelma on se, että se muodostaa otsonia ja syövyttäviä kemiallisia yhdisteitä, jotka vahingoittavat lähellä olevia orgaanisia materiaaleja, kuten polymeerieristeitä. (FLIR 2023.)



KUVA 26. Äänilähteen antava erotin (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

Ylemmässä kuvassa on äänilähteen antava eristin. Alemmassa kuvassa on esitetty kyseisen kohteen PRPD-kuvio, joka ilmaisee kyseessä olevan koronapurkaus.



KUVA 27. Osittaispurkauksen luokittelu FLIR analysointityökalun mukaan (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

Tässä tapauksessa koronapurkauksen PRPD-kuvio, eli vaihe erotettu osittaispurkaukkuvio on erittäin epäsymmetrinen. Negatiivisen koronapurkauksen tapauksessa negatiivisen jännitepiikin ympärillä on yksi yksittäinen pulssiryhmä. Mikäli osittaispurkaus on voimakkaampi, negatiivisen koronan lisäksi voidaan havaita myös positiivista koronaa. Positiivinen koronapurkaus voidaan nähdä pulssiryhmänä, joka esiintyy positiivisen jännitepiikin ympärillä. Positiivisen koronapurkauksen amplitudi on tyypillisesti suurempi kuin negatiivisen koronan, kun taas pulssien lukumäärä on pienempi. (FLIR 2023.)

8.6 Taajuusmuuttajien tutkiminen

Tutkimme sähköasentajan kanssa harjoitusmielessä taajuusmuuttajia. Yritimme etsiä taajuusmuuttajien komponenteista sähkövikoja ja niistä aiheutuvia äänilähteitä. Tutkimme kaappimallin taajuusmuuttajia sekä seinämällin taajuusmuuttajia. Molemmat olivat taajuusmuuttajan tyyppiltään ABB ACS880, mutta teholuokka niissä oli erilainen. Taajuusmuuttajien kuvantaminen osoittautui hyvin haasteelliseksi, koska taajuusmuuttajien kotelot ovat hyvin suojattuja ja piirikortit sijaitsevat suojien ja peltirakenteen sisällä. Rakenteita ei pysty purkamaan enempää, kun laite on jännitteinen. Se hankaloittaa ultraäänikameralla kuvaamista ja signaalin kohdistumista kameraan. Alla on esimerkkikuva kaappimallin taajuusmuuttajasta, jota on avattu sen verran mitä jännitteisenä ohjeistuksen mukaan pystytään.

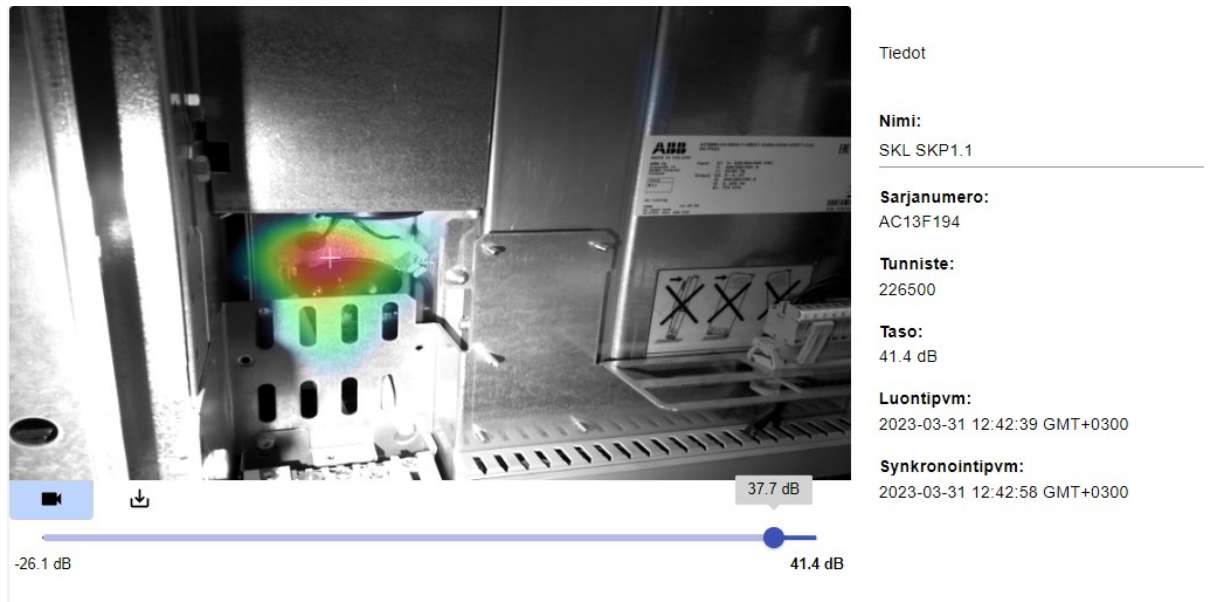


KUVA 28. Kaappimallin taajuusmuuttaja ABB ACS880 (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

Ultraäänikameralla onnistuttiin havaitsemaan äänilähteitä kaappimallin taajuusmuuttajan komponenteista, mutta FLIR Acoustic Camera Viewer analysointityökalulla tarkasteltuna äänilähteistä ei tunnistettu osittaispurkauksia. Voimme olettaa laitteen olevan normaalia käyttökuntoa vastavassa kunnossa. Komponenttien epäsuora kohdistuminen kameraan voi aiheuttaa virhettä ultraäänikameran mittaukseen.

Kameralla pystytään havaitsemaan taajuusmuuttajista äänilähteitä, mutta ne eivät aina suoraan tarkoita varsinaista vikaa. Tulokset on aina analysoitava FLIR Acoustic Camera Viewer analysointityökalulla, jotta voidaan varmistua äänilähteen merkityksestä.

On normaalia, että ultraäänikamera havaitsee myös merkityksettömiä heijastuksia sekä muita äänilähteitä ja merkkää ne virheellisesti äänilähteeksi. Muita äänilähteitä voivat olla esimerkiksi värähtely, kaasuvuodot tai elektroniikka. Esimerkiksi muuntajien ja reaktorien humina voi saada erilaiset komponentit värähtelemään. Tämäntyyppinen värähtely ei tuota PRPD-kuviota, ja se on siksi helppo erottaa osittaispurkauksista. Kaasu- ja paineilmuuodot synnyttävät suurienergisen ja korkeataajuisen sihisevän äänen. Kamera paikantaa tämäntyyppiset vuodot, mutta ne eivät tuota PRPD-kuviota. Jotkin pienjännitteiset elektroniset komponentit tuottavat ääntä 50 tai 60 hertsin taajuudella. Tämäntyyppinen ääni saattaa tuottaa PRPD-kuviota muistuttavan kuvion, mutta se voidaan helposti erottaa suur- tai keskijännitteisistä osittaispurkauksista sijainnin perusteella. Näissä tapauksissa kannattaa aina ottaa useampia kuvia eri kulmista ja eri kellonaikoihin, jotta mahdollinen kuormitustilanne vaihtelee. (FLIR 2023.)



KUVA 29. Muu äänilähde taajuusmuuttajan rakenteessa (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

Ylemmässä kuvassa on esitetty muu äänilähde kaappimallin taajuusmuuttajan sisällä. Ääni voi aiheutua esimerkiksi rakenteen resonoinnista. Alla on FLIR Acoustic Camera Viewer analysointityökalun analyysi muusta äänilähteestä.

Kuviota ei havaittu

Analyysiparametrit

Etäisyys m

Jännite kV

Sijainti

Osittaispurkaustyyppi

negatiivinen korona:

positiivinen ja negatiivinen korona:

kelluva purkaus:

pinta- tai sisäinen purkaus:

Vakavuusaste

Kuvaus:

Havaittu äänilähde ei muistuta osittaispurkausta. Se voi olla muuntityyppinen äänilähde tai heijastus muuntityyppisestä äänilähteestä. Jos et ole varma, ota lisää kuvia kohteesta eri kulmista ja eri aikoina. Varmista myös, että vaihtovirtataajuus on oikea. Osittaispurkauksen analysointi epäonnistuu, jos vaihtovirtataajuus on väärä.

Suositus:
Yleensä mitään toimia ei tarvita.

hyvin suuri

suuri

kohtalainen

vähäinen

KUVA 30. FLIR Acoustic Camera Viewer sovelluksen analyysi edeltävästä kuvasta (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

8.7 Jännitemuuntajan epänormaalin äänen tutkiminen

Tehtaalle oli hankittu erään projektin yhteydessä verkkojännitemuuntaja (kuva 31), joka muuntaa verkkojännitteen 690 voltista 400 volttiin. Muuntajan käyttöönoton jälkeen muuntaja alkoi pitää hyvin voimakasta, säännöllistä, korkeataajuista ja huojuvaa ääntä. Muuntaja on erään prosessin kannalta välttämätön. Laitetoimittaja oli suorittanut muuntajalle tutkimuksia ja tehnyt syötökaapeleiden pulttiliitoksien tiukkuuden tarkastuksen. He tarkastivat myös muuntajan suojakuoren rakenteet mahdollisten laatupoikkeaminen varalta. Laitetoimittajan suorittamista toimenpiteistä huolimatta muuntajan epänormaali toiminta jatkui. Alueen sähköinsinööri pyysi kunnonvalvontaa tutkimaan kohdetta ultraäänikameralla. Kunnonvalvonta suoritti kohteeseen tutkimuksia ultraäänikameralla sekä aistinvaraisten tutkimusten perusteella.

Tutkimusten perusteella voitiin paikantaa voimakkain äänilähde muuntajan oikeanpuoleiselle sivustalle, suojakotelon alalaitaan. Analysointiohjelmalla analysoidessa äänilähde osoittautui osittaispurkaukseksi, tarkemmin pinta- tai sisäiseksi purkaukseksi. Analyysityökalun mukaan kyseessä oli vakavuudeltaan hyvin vakava vika ja se edellytti välittömiä toimenpiteitä. Kuten aikaisemmin mainittiin, laitetoimittaja oli tehnyt muuntajalle tarkastukset ja toimenpiteet, jotka on mahdollista tehdä tehtaalla paikan päällä. Seuraava vaihtoehto oli lähettää muuntaja jatkotutkimuksiin valmistajalle.

Kunnonvalvonta suositteli, että muuntaja lähetetään huoltoon. Toimenpiteet ja laitetoimittajan vahvistamat epänormaalin toiminnan aiheuttamat syyt olivat vielä avoimna tätä opinnäytetyötä kirjoittaessa.



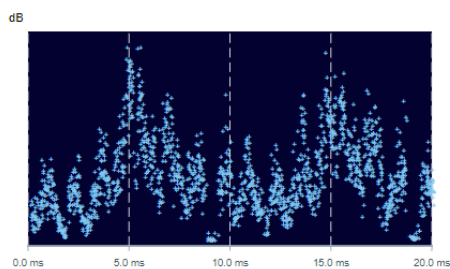
KUVA 31. Verkkojännitemuuntaja 690/400 V (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)



KUVA 32. Äänilähde verkkomuuntajana sivulla (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

Ylemmässä kuvassa on ultraäänikameran tunnistama äänilähde merkattu liukuväripisteellä verkkojännitemuuntajan sivulla. Alemmassa kuvassa äänilähde on tunnistettu pinta- tai sisäiseksi purkaukseksi FLIR Acoustic Camera Viewer analyysityökalussa.

PRPD



Analysiparametrit

Etäisyys m

Jännite kV

Sijainti

Lämpötila (ympäristö) °C

Kosteus (ympäristö) %

Osittaispurkaustyyppi

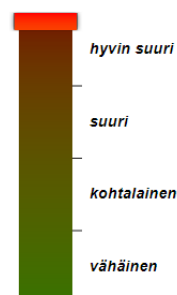
negatiivinen korona:

positiivinen ja negatiivinen korona:

kelluva purkaus:

pinta- tai sisäinen purkaus:

Vakavuusaste



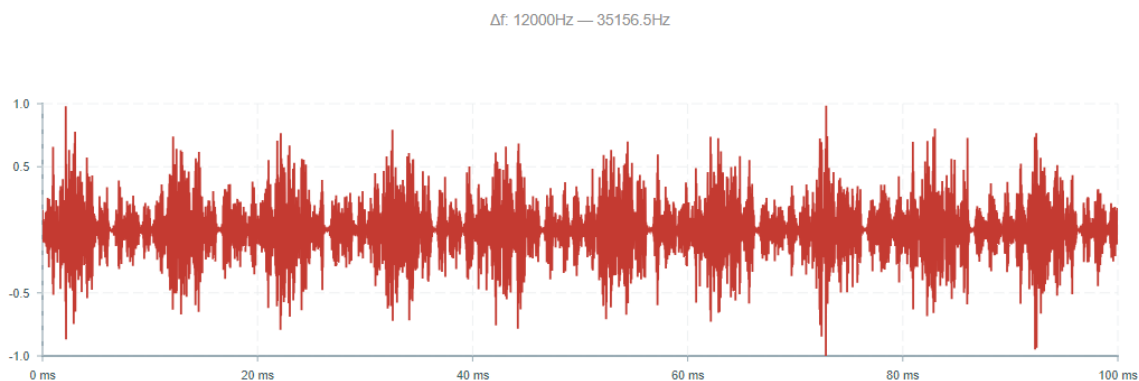
Kuvaus:

Tämä luokitellaan pinta- tai sisäiseksi purkaukseksi. Purkaus näyttää olevan voimakasta ja saattaa johtaa nopeasti eristeen täydelliseen hajoamiseen.

Suositus:

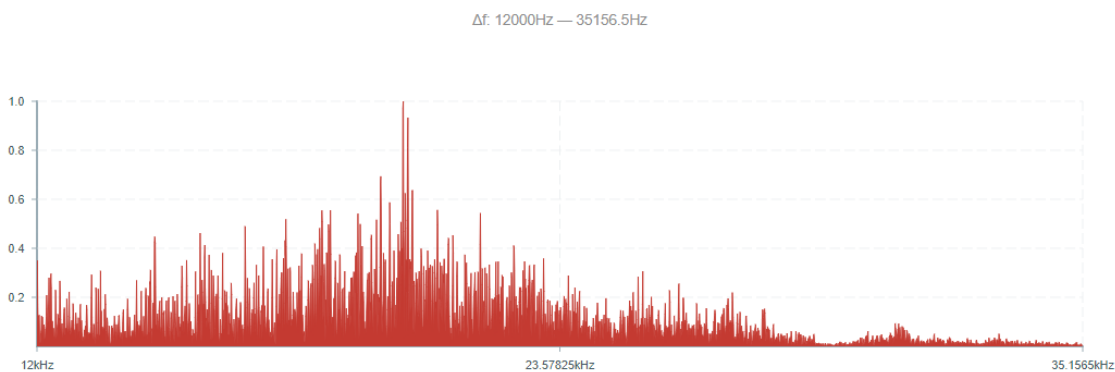
Edellyttää välittömiä toimia. Visuaalinen tarkastus. Likaantuneiden pintojen puhdistus. Komponenttien korjaus tai vaihto.

KUVA 33. Osittaispurkauksen luokittelu FLIR analysointityökalun mukaan (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)



KUVA 34. Analyysityökalun tunnistama signaali verkkojännitemuuntajasta (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

Ylemmästä kuvasta voidaan todeta ultraäänikameran tunnistaman äänilähteen olleen jaksottainen ja säännöllinen, koska signaalin amplitudi voimistuu ja heikkenee säännöllisesti. Alemmasta kuvasta voidaan todeta, että ultraäänikamera on havainnut taajuuksia erityisesti 12–26 kHz taajuudella. Suurimmat amplitudit ovat havaittavissa noin 20 kHz taajuudella.



KUVA 35. FFT-muunnos verkkojännitemuuntajan signaalista (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

9 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Kuten konttorille rakennetussa testiympäristössä pystyttiin toteamaan, ultraäänikameran mittaustarkkuus on hyvä. Kamera kykenee tunnistamaan vuotoja myös silloin, kun vuoto ei ole kohtisuoraan kameraan päin. Myös putkiston sisäisiä ominaisuuksia pystytään havaitsemaan, jos niiden synnyttämä äänilähde on riittävän suuri. Mittavirheen suuruus kamerasta poispäin kohdistuvasta vuodosta verrattuna suoraan kameraan kohdistuvaan vuotoon on noin 30,4 %, kun taas kamerasta poispäin suuntautuvan, ääniaaltoja absorboimattoman ja kiinteästä kappaleesta heijastuvan vuodon suhde suoraan kameraan kohdistuvaan vuotoon on noin 7,1 %. Voidaan todeta, että jos vuoto on epäsuorassa linjassa kameraan nähden, mittaustulos on lähtökohtaisesti pienempi kuin kohtisuoraan kohdistuvassa vuodossa. Tämä aiheutuu äänen vaimenemisesta etenevässä väliaineessa. Parhaan mittaustarkkuuden kameralla saa, kun sillä mitataan kohtisuoraan vuotoa kohti. Kuitenkaan kaikissa tapauksissa tämä ei ole mahdollista esimerkiksi tilan ahtauden, kohteen luoksepäästävyuden tai työympäristön olosuhteiden takia.

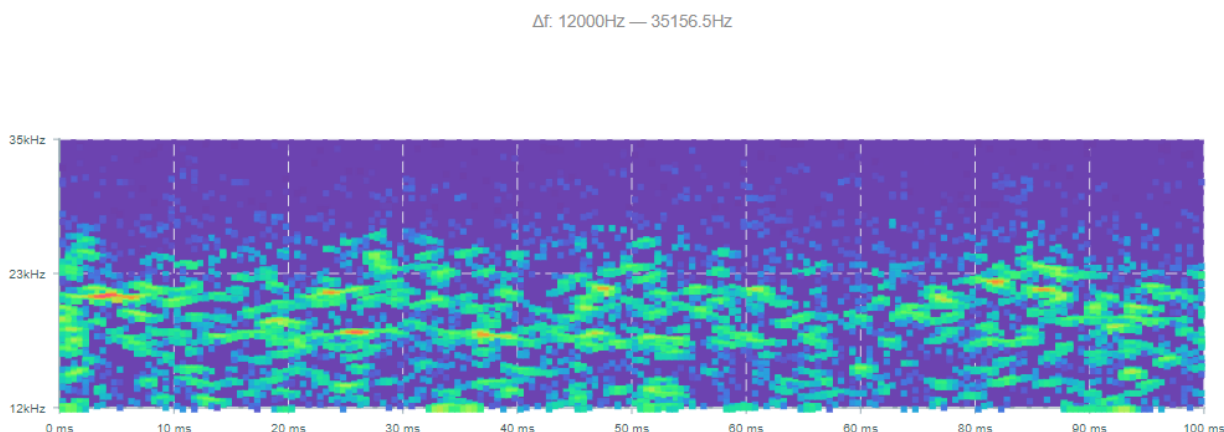
Sovelluskohtien tutkimuksissa oli esitetty muutamia konkreettisia esimerkkejä siitä, mitä vikoja ultraäänikameralla voidaan havaita. Ultraäänikamera on todella monipuolinen työkalu erilaisten vikatyypin havaitsemiseen, jotka synnyttävät riittävän suuren äänilähteen. Ultraäänikameralla ei kuitenkaan välttämättä voida havaita kaikkia vikatyyppejä niiden fysikaalisista ominaisuuksista aiheutuen. Edellä mainittu fysikaalinen ilmiö voi olla esimerkiksi maanalaisen vesiputkiston vuoto, koska pienen vesivuodon aiheuttama äänilähde ei ole riittävän suuri ja maaperä vaimentaa äänilähteen syntymistä tehokkaasti.

Opinnäytetyön tavoitteena oli löytää uusia ennestään tuntemattomia käyttökohteita ultraäänikameralle. Opinnäytetyössä tutkittiin kolmea erilaista paineilmaavuotoon verrattavaa vikatyyppeä: sprinklerilinjan vuotoa, loppuliimauslaitteen keskusyksikön paineilmaavuotoa sekä soodakattilan varoventtiilin läpivuotoa. Lisäksi tutkittiin kolmea osittaispurkauksiin liittyvää ilmiötä: pajaniemen kytkinasemaa, taajuusmuuttajia sekä verkkojännitemuuntajaa. Yhtenä uutena sovellutuksena oli laakerivaurion paikallistaminen. Laakerivaurioita on mahdollista havaita ultraäänikameralla, jos laakeri synnyttää riittävän suuren äänilähteen. Kameralla pystytään helposti tunnistamaan laajalta alueelta äänilähdettä synnyttävät kohteet.

Esimerkiksi laakerin metallikosteuksesta ja erityyppisissä voiteluvioissa syntyy riittävän korkeita taajuuksia, jotka ultraäänikameralla pystytään havaitsemaan. Metallikosketuksen tyypillisin aiheuttaja on riittämätön voitelu, liiallinen kuormitus tai virheellinen laakerin asennus. Nämä vikatyypit näkyvät kunnonvalvonnan värähtelymittauksissa tyypillisesti korkeataajuisena värähtelynä yli 2000 Hz taajuudella. (PSK Standardisointiyhdistys ry, 2022.)

Ultraäänikameralla ja FLIR Acoustic Camera Viewer analysointityökalulla ei ole mahdollista analysoida laakerivikoja, koska analysointiohjelmassa ei ole mahdollista analysoida spektriä. Analysointiohjelmassa voidaan tutkia raakasignaalia, FFT spektriä, autokorrelaatiota sekä spektrogrammia, mutta näille ei voida syöttää harmonisia kerrannaisia tai muutenkaan käsitellä spektriä laakereiden kunnonvalvontaa ajatellen. Ultraäänikamera asettaa mittaushetkellä automaattisesti käytettävän taajuusalueen, jolla havaitaan taajuuksia. Nämä taajuudet tallentuvat kuvan ottamisen yhteydessä

kameran tallentamiin tietoihin. Jos kameran analysointisovellusta haluttaisiin käyttää kunnonvalvonnan tutkimuksiin ja esimerkiksi laakerivikojen havainnointiin, siihen vaaditaan vähintään tieto laitteen pyörintäaajuudesta sekä laakerin eri komponenttien sysäystaajuudet. Pyörintänopeus on helpoin todeta erikseen mittaamalla, mutta toisaalta se voidaan selvittää myös laskennallisen algoritmin avulla kameran mittauksien perusteella muodostetusta spektrogrammista (kuva 36).



KUVA 36. FLIR Acoustic Camera Viewer sovelluksen spektrogrammi (Leppänen 2023, CC BY-NC-ND)

Äänenpaineeseen perustuvia mittausantureita on maailmalla käytössä ja todistettavasti niillä on saatu erityyppisiä vikoja kiinni sellaisista kohteista, joissa normaalia kiihtyvyyssanturia ei voida käyttää. Näissä tapauksissa anturi perustuu äänenpaineeseen ja mittausalue on tyypillisesti 3,15 Hz–20 kHz. Anturi mittaa äänenpainetta ja luo laskenta-algoritmin avulla spektrogrammin sekä luo siitä FFT muunnetun spektrin, jota voidaan analysoida. Yksi tyypillisimmistä ääniantureista on GRAS 146AE, jota voidaan käyttää monipuolisesti erilaisissa ja haastavissa käyttöolosuhteissa. Esimerkiksi Brüel & Kjær (2023) on kehittänyt erityisesti autoteollisuuden tarkoitettua STSF eli Spatial Transformation of Sound Fields menetelmän, jolla voidaan tehokkaasti suorittaa äänikenttien mitausta ja analysointia. Erityisesti saksalaiset ovat hyödyntäneet edellä mainittua menetelmää autoteollisuudessa.

Periaatteen tasolla FLIR ultraäänikameraa voidaan käyttää luotettavasti vierintälaakereiden vikojen havainnointiin, jos FLIR Acoustic Camera Viewer sovelluksessa olisi analysointityökalu tähän tarkoitukseen. Tällä hetkellä se ei kuitenkaan ole tarkoituksenmukaista, koska ultraäänikameraa ei ole ensisijaisesti tarkoitettu laakerivikojen havainnointiin vaan paineilmapuotojen ja osittaispurkauksien havaitsemiseen. Jatkoa ajatellen kannattaisi miettiä yhteistyössä ultraäänikameran valmistajan kanssa mahdollisesti kamerassa ja analysointityökalussa olevaa laajennuspotentiaalia muidenkin vikatyypin analysointiin. Ultraäänikamera soveltuu tämänhetkisen sovelluksen avulla pääasiassa vikaantuneen laakerin kohdistamiseen. Kameralla voidaan kuvata useita laakereita esimerkiksi kartonkikoneen pituusleikkurilta ja täten täsmentää vikaantunut laakeri ennakkoon hyvin tarkasti. Kameran äänenpaineen suodatus mahdollistaa myös mittauksen meluisassa ympäristössä ja antaa mahdollisuuden kohdentaa liukuväripiste tarkasti äänilähteen syntykohtaan.

Kameralla on mahdollista löytää myös sähkövikoja (osittaispurkauksia) esimerkiksi rikkoutuvasta eristeestä tai kytkinlaitteistoista. Sähkövikoja etsittäessä on otettava huomioon tutkittavan kohteen jännite ja mistä vikaa halutaan etsiä. Eri sijainneissa viat näkyvät eri tavalla. Jos ultraäänikameralla havaitaan sähkövika, vian todellisuus on aina varmistettava FLIR Acoustic Camera Viewer analysointityökalulla. Usein ultraäänikamera havaitsee kohteissa myös muita äänilähteitä tai heijastuksia, joten nämä on suljettava pois virheellisten tulkintojen estämiseksi.

Sähkövikojen etsimisessä on muistettava se, että sähköviat yleensä etenevät nopeasti ja siksi niiden havaitsemiseen sekä tutkimiseen on rajallinen määrä aikaa. Sähköviat yleensä aiheuttavat suuria omaisuus, ympäristö tai henkilövahinkoja. Näistä syistä sähkövikojen havaitseminen ennakkoon on hyvin haasteellista ja usein jopa mahdotonta. Sähkövikojen tutkimisessa on muistettava sen hetkessä työpaikassa vallitseva pysyvääsmääräys, joka luokittelee ne asiat ja toimenpiteet mitä saa tehdä ja mitä ei saa tehdä. Esimerkiksi Stora Enso Oyj Varkauden pakkauskartonkitehtaan alueella on pysyvääsmääräyksellä kielletty jännitetöiden tekeminen (Tyrväinen 2023).

10 POHDINTA

Ultraäänikameraa voidaan käyttää tehokkaaseen paineilmavuotojen havainnointiin. Kameralla saadaan tarkastettua nopeasti ja tehokkaasti suuria alueita, unohtamatta kuitenkaan pieniä yksittäisiä kohteita. Kamera on kohtuullisen kallis laite, mutta uskon sen maksavan itsensä kohtuullisen nopeasti takaisin. Tämän toteamuksen perustan siihen, että jo pieni turha paineilmavuoto voi maksaa useita satoja euroja. Jos vuotoja on kymmeniä, saavutettu vuotuinen säästö on tuhansia, jopa kymmeniätuhansia euroja. Tämä siksi, koska mitä enemmän vuotoja laitteella saadaan havaittua ja havaittuja vuotoja korjataan, sen vähemmän paineilmaa menee hukkaan. Ultraäänikameran käyttöikä huomioiden sen investointi katetaan noin viidessä vuodessa, jos kameraa käytetään aktiivisesti ja vuotavia kohteita löytyy. Jos kameralla löydetään ennakkoon sähkövikoja kriittisistä kohteista, saatetaan parhaimmassa tapauksessa estää mahdolliset henkilövahingot sekä aineelliset ja rahalliset menetykset.

Jos turhia paineilmavuotoja on tehtaalla paljon, pahimmassa tapauksessa saattaa paineilmakompressorien tuotto olla riittämätön. Sen takia voidaan harkita uuden kompressorin investointia, vaikka varsinainen vika saataisiin korjattua paljon halvemmalla, eli turhat paineilmavuodot korjaamalla. Tutkimuksissa on kuitenkin otettava huomioon, että kaikki paineilmavuodot eivät ole turhia ja osa kohteista on voitu jättää vuotamaan tarkoituksella.

Ultraäänikameran saa liitettyä suoraan esimerkiksi matkapuhelimesta jaettuun WI-FI verkkoon ja kameran saa yhdistettyä suoraan FLIR Acoustic Camera Viewer pilvipalveluun, johon kamera siirtää automaattisesti sillä otetut kuvat. Kuviin pystyy pilvipalvelussa lisäämään kommentteja ja muuttamaan kameran tallentaman ympäristön äänenpaineen suodatusta, jotta ympäristön muiden äänilähteiden aiheuttama ääni/heijastus saadaan kuvassa vaimennettua ja näin korostettua varsinaista tutkittavaa äänilähdettä.

Ultraäänikameralla kuvatuista kuvista on hyvin helppoa luoda FLIR Acoustic Camera Viewer pilvipalvelulla raportti, jossa ilmenee vuotojen suuruus, sähköisen vian tyyppi ja arvioitu turhan paineilmavuodon aiheuttama kustannus. Tällä hetkellä työn tilaajan palveluksessa olevista henkilöistä vain muutamat tekevät raportteja raportointiohjelmalla. Tämä aiheutuu osittain siitä, että raportointia ei ole pystytty kouluttamaan vielä riittävän laajasti. Tulevaisuudessa olisi erityisen tärkeää, että kaikki kameralla kuvatut kuvat vietäisiin vähintään pilvipohjaiselle alustalle ja ihannetapauksessa niistä tehtäisiin myös raportit. Raporttia voidaan jakaa kaikille sitä tarvitseville henkilöille esimerkiksi kunnossapidon toimihenkilöille ja työntekijöille sekä tuotannon toimihenkilöille ja henkilöstölle. Raportit auttavat henkilöitä ymmärtämään laitteiden tilaa ja mahdollisia huoltotarpeita. Paineilmavuotoraporttia voidaan käyttää esimerkiksi kunnossapidon ja tuotannon välisissä neuvotteluissa, kun mietitään esimerkiksi tulevaisuuden investointitarpeita.

Haluan nostaa raportoinnin erityiseen asemaan tulevaisuutta ajatellen. Tulevaisuudessa varmasti on tarkoituksena hyödyntää enenevässä määrin digitalisaatiota ja mahdollisesti myös automaatiota. Jos saisimme rakennettua jonkun systeemin, joka tekisi kameralla kuvatusta kuvasta automaattisesti analyysin ja tekisi autonomisesti vikailmoituksen kunnossapitojärjestelmään, saisimme vähen-

nettyä välivaiheita kuvauksen ja raportoinnin välillä. Tämä omalta osaltaan nopeuttaa vikojen korjaamiseen kuluva vasteaikaa. Järjestelmä myös loisi automaattisesti raportin vuodoista ja veisi ne kunnossapidon tietojärjestelmään laite/toimintopaikan alle liitteeksi, jotta tulevaisuudessa voidaan hyödyntää historiadataa tehokkaasti. Tulevaisuuden kunnossapidon ammattihenkilö voisi tarkastaa AR-teknologiaan perustuvalta älyvisiiriltä vuodon kohdan ja suuruuden, joka löytyy kunnossapidon tietojärjestelmään viedystä raportista. Älyvisiiri on suojakypärään kiinnitettävä teknologinen henkilökohtainen suojain. Älyvisiiriin voidaan heijastaa haluttua dataa, esimerkiksi 3D mallinnus putkilinjasta tai ohjeita laitteiden huolloista. Älyvisiiriä voidaan hyödyntää myös kunnossapitoilmoitusten tutkimiseen kentällä ja näin vapauttaa molemmat kädet käytettäväksi varsinaiseen työhön. Tämä helpottaisi korjauskohdan löytämistä ja nopeuttaisi korjaustoimenpiteitä. Tämä edellyttäisi FLIR Acoustic Camera Viewer pilvipalvelun kehittämistä yhteistyössä toimittajan kanssa asiakkaan tarpeita vastaavaksi.

Jatkossa kannattaisi tutkia lisää ultraäänikameran soveltuvuutta taajuusmuuttajien ja piirikorttien vikojen tutkintaan sekä ylipäätään sähköisten vikojen tutkintaan. Tällä hetkellä piirikorttien vikoja voidaan havaita ennakkoon oikeastaan vain lämpökameralla ja tiedostettuun käyttöikään perustuen. Ennustamattomat sähköviat aiheuttavat usein merkittäviä tuotantoon, tuotteen laatuun, omaisuuteen tai terveyteen kohdistuvia haittoja. Omaisuuteen ja tuotantoon kohdistuneet kustannukset ovat yleensä suuria sekä niiden korjaaminen on hidasta, jos varaosaa ei löydy tehtaan varastosta. Usein varaosia säilytetään toimittajan varastossa, koska komponentit ovat kalliita ja niitä tarvitaan suhteellisen harvoin. Myös järjestelmien vanheneminen aiheuttaa sen, että varaosia ei välttämättä ole enää saatavilla ollenkaan. Tämä aiheuttaa merkittävän riskin pitkäaikaiselle tuotannonmenetykselle. Sähkövikojen havainnoinnissa on kiinnitettävä erityistä huomiota mitattavan kohteen tyyppiin ja käyttöjännitteeseen. Erityisesti sähkövioissa on riskinä tehdä virheellinen tulkinta pelkästään kameran kuvaaman kuvan perusteella. Kameran kuvaamaan kuvaan on mahdollista tulla heijastuksia jostain toisesta äänilähteestä tai kameran tunnistaman äänilähteen voi aiheuttaa esimerkiksi värähtely, ei varsinainen vika. Sähkövikoja tutkittaessa on aina käytettävä FLIR Acoustic Camera Viewer analysointityökalua vikojen oikeellisuuden tarkistamiseksi. Sähkövikoja tutkittaessa on muistettava, että sähköviat kehittyvät yleensä todella nopeasti ja niiden havaitseminen on hankalaa.

Tähän opinnäytetyöhön käytetty aika oli huomattavan suuri ja se piti sisällään erilaisia tutkimuksia, kokeita, oppimista ja verkostoitumista. Opinnäytetyö alkoi jo erikoistumisprojektiurssilla kameran käytön opettelulla ja laajeni sieltä varsinaiseen opinnäytetyöhön, jossa perehdyttiin kameran käyttöön ja sillä havaittaviin vikoihin. Opinnäytetyötä oli todella mielenkiintoinen ja mukava tehdä. Työtä tehdessä opin paljon uutta.

Opinnäytetyön tilaajan asettamana tavoitteena oli tutkia ultraäänikameralla havaittavia vikoja mahdollisimman laajasti. Pääsin tämän opinnäytetyöprojektin aikana tutkimaan muiden muassa paineilmauotoja, höyryuotoja, epäiltyjä sähkövikoja, höyrynuohtimen kulmaventtiilin läpivuotoja ja laakerivikoja. Omasta mielestäni olen täyttänyt työn tilaajan asettamat tavoitteet erilaisten vika-

tyyppien kartoittamisessa siinä laajuudessa, mitä se on Varkauden tehdasintegraatissa mahdollista. Työ antaa vahvan pohjan tehdä jatkotutkimuksia sekä kouluttaa ultraäänikameran käyttöä henkilöstölle.

LÄHTEET

Brüel & Kjær, julkaisuajankohta tuntematon. Acoustical testing in the automotive industry using STSF. Esite. Tuloste. Viitattu 30.3.2023.

FLIR Si124 datalehti 2023. Teledyne FLIR verkkosivusto, FLIR Si124 datalehti. Pdf-tiedosto. Julkaisuajankohta tuntematon. <https://www.flir.eu/products/si124/?vertical=condition%20monitoring&segment=solutions>. Viitattu 7.5.2023.

FLIR 2023a. Tietoa yhtiöstä. Verkkojulkaisu. Teledyne FLIR Company History, julkaisu käännetty suomeksi. <https://www.flir.eu/about/company-history/>. Viitattu 7.5.2023.

FLIR 2023b. Tuotteet. Verkkojulkaisu. Teledyne FLIR verkkosivusto, Acoustic Imaging Camera. <https://www.flir.eu/browse/industrial/acoustic-imaging-cameras/>. Viitattu 7.5.2023.

FLIR System 2023. Tietoa koronapurkauksesta. Verkkojulkaisu. FLIR Acoustic Camera Viewer analysointityökalun materiaalipankin julkaisu. <https://si124viewer.flir.com/>. Viitattu 31.3.2023.

Fluke corporation 2023a. Osittaispurkauksen tärkeimmät syyt ja tyypit. Verkkojulkaisu. Fluke vuodontunnistus. <https://www.fluke.com/fi-fi/lue-lisaa/blogi/vuodontunnistus/osittaispurkaus>. Viitattu 28.1.2023.

Fluke corporation 2023b. Osittaispurkauksen tyypit. Verkkojulkaisu. Osittaispurkauksen tärkeimmät syyt ja tyypit. <https://www.fluke.com/fi-fi/lue-lisaa/blogi/vuodontunnistus/osittaispurkaus>. Viitattu 28.1.2023.

Immonen, Sami 2023. Tuotepäällikkö. Sarlin Oy Ab. Haastattelu 4.5.2023.

Kettunen, Jani 2022. Turvallisuus- ja kunnossapitoinsinööri. Stora Enso Oyj. Haastattelu 14.11.2022.

Kunnossapitoyhdistys Promaint ry 2023. Eri kunnossapitolajien suhde toisiinsa PSK 7501 mukaan. Valokuva. 29.3.2023. Joroinen: Kuntoon perustuva kunnossapito, käsikirja. 1. painos, lokakuu 2009.

Leppänen, Jiri 2023. Opinnäytetyön kuvakokoelma. Kotialbumi 2023.

Mikkonen, Henry 2009. Kunnossapitolajit. Teoksessa Kuntoon perustuva kunnossapito, käsikirja. Kunnossapitoyhdistys Promaint ry. Kerava: Savion Kirjapaino Oy, 96–97.

Oulun Ultra Oy. Ultraääni: mitä se on ja mihin sitä käytetään. Verkkojulkaisu verkkosivulla. <https://oulunultra.fi/ultraaani/#ultra>. Viitattu 13.5.2023.

PSK Standardisointiyhdistys ry, 2022. Vierintälaakeriviat. Teoksessa PSK-käsikirja 3, Kunnonvalvonnan värähtelymittaus, 20. painos. Helsinki: Copy-Set Oy, 92–93.

Räisänen, Mikko 2023. Kunnossapitoasentaja. Stora Enso Oyj. Haastattelu 2.3.2023.

Sarlin Oy Ab 2023a. Paineilmakuivaimet. Verkkojulkaisu Sarlin tuotesivulla. <https://www.sarlin.com/tuotteet/paineilmakuivaimet/>. Viitattu 4.4.2023.

Sarlin Oy Ab 2023b. Paineilman laatustandardi ISO 8573-1:2010. Verkkojulkaisun kuvakaappaus. Sarlin.com verkkopalvelun julkaisu paineilman laatuoluokista ja standardista. <https://www.sarlin.com/paineilman-laatustandardi-iso-8573-12010/>. Viitattu 23.3.2023.

Stjernberg, Timo 2023. Koulutus- ja palvelupäällikkö. Infradex Oy. Haastattelu 3.5.2023.

Stora Enso Oyj 2023a. Tietoja Stora Ensosta. Verkkojulkaisu. Tietoja Stora Ensosta verkkojulkaisu. <https://www.storaenso.com/fi-fi/about-stora-enso>. Viitattu 28.1.2023.

Stora Enso Oyj 2023b. Varkauden tehdas. Verkkojulkaisu. Tietoja Varkauden tehtaasta verkkojulkaisu. <https://www.storaenso.com/fi-fi/about-stora-enso/stora-enso-locations/varkaus-mill>. Viitattu 28.1.2023.

Tyrväinen, Antti 2023. Sähköasentaja. Stora Enso Oyj. Haastattelu 31.3.2023.