

SAVONIA

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

LIIKKEENVAHVISTUSKAMERAN HYÖDYNTÄMINEN VÄRÄHTELY- ANALYSOINNISSA

Yara Suomi Oy, Siilinjärven toimipaikka

TEKIJÄ Henry Heikkinen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Tutkinto-ohjelma Konetekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä(t) Henry Heikkinen	
Työn nimi Liikkeenvahvistuskameran hyödyntäminen värähtelyanalysoinnissa	
Päiväys 16.10.2022	Sivumäärä/Liitteet 48/1
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Yara Suomi Oy:n Siilinjärven toimipaikka	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyö toteutettiin Yara Suomi Oy:n Siilinjärven toimipaikan luotettavuustoiminnon toimeksiannosta, jonne IRIS M liikkeenvahvistuskamera hankittiin vuonna 2022. Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää liikkeenvahvistuskameran hyödyntämistä värähtelyanalysoinnissa teollisuustiloissa sijaitseville laitteille, jotka tässä työssä rajattiin teollisuuden keskipakoispuhalmiin. Liikkeenvahvistuskamera on suhteellisen uusi työkalu värähtelyanalysoinnissa, joten opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää kameran käyttämisen mahdollisuudet sekä rajoitteet, jotta liikkeenvahvistuskameraa voitaisiin hyödyntää parhaalla mahdollisella tavalla tulevaisuudessa.</p> <p>Opinnäytetyö toteutettiin case-tyyppisenä tutkimuksena, jossa yhdistettiin teoria ja käytäntö. Teoriaosuudessa käsiteltiin liikkeenvahvistuskameran keskeisimmät ominaisuudet, jotka vaikuttavat hyvän videomateriaalin hankkimiseen. Lisäksi teoriassa käsiteltiin keskipakoispuhalmien toimintaperiaate ja niiden yleisimpiä värähtelyjen aiheuttajia. Case-tutkimukset suoritettiin Yara Suomi Oy:n Siilinjärven tehtailla kahdelle eri tavalla alustansa kiinnitetyle ja eri pyörintänopeudella pyörivälle teollisuuspuhalmelle. Puhaltimet kuvattiin liikkeenvahvistuskameralla myöhemmin suoritettavaa värähtelyanalysointia varten. Teollisuuspuhalmien videomateriaalit käsiteltiin ja analysoitiin värähtelyn aiheuttajan selvittämiseksi, jotta saatiin käsitys liikkeenvahvistuskameran hyödyntämisestä värähtelyanalysoinnissa.</p> <p>Case-tutkimuksista saatujen tulosten perusteella voitiin todeta, että liikkeenvahvistuskamera soveltui tietyin rajoituksin värähtelyanalysointityökaluksi teollisuuspuhalmien värähtelyongelmien selvityksessä. Tuloksista kävi hyvin ilmi liikkeenvahvistuskameran käytön rajoitteita nopeammin pyörivän puhaltimen tapauksessa, jossa kuvauksen lisähaasteena oli lattian pystysuuntainen värähtely. Saaduista tuloksista voitiin myös tehdä johtopäätös, että liikkeenvahvistuskameraa voidaan käyttää tulevaisuudessa monenlaisien pyörivien laitteiden sekä staattisten rakenteiden värähtelyongelmien selvityksessä. Tutkimusten perusteella voitiin myös todeta, että liikkeenvahvistuskamera ei tule korvaamaan perinteistä kiihtyvyyssanturilla tehtävää värähtelyanalyysiä, vaan nämä kaksi erilaista menetelmää tukevat toisiaan.</p>	
Avainsanat liikkeenvahvistus, teollisuuspuhallin, vaihe-ero, värähtelyanalyysi, värähtelyspektri	

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering	
Author(s) Henry Heikkinen	
Title of Thesis Utilizing a Motion Amplification Camera in Vibration Analysis	
Date 16 October 2022	Pages/Appendices 48/1
Client Organization /Partners Yara Suomi Oy's Siilinjärvi plant	
<p>Abstract</p> <p>The thesis was implemented for the reliability team of Yara Suomi Oy's Siilinjärvi plant, where an IRIS M motion amplification camera was acquired in 2022. The goal of the thesis was to study utilization of the motion amplification camera in vibration analysis for apparatuses that operate in industrial facilities, which in this thesis was limited to centrifugal blowers. Motion amplification camera is a relatively new tool in vibration analysis, so the goal of the thesis was to find out the possibilities and limitations of using the camera, so that the motion amplification camera could be utilized in the best possible way in the future.</p> <p>The thesis was implemented as a case-type study that combined theory and practice. In the theory part, the most important features of the motion amplification camera, which affect the acquisition of good video material, were discussed. In addition, the theory discussed the operating principle of centrifugal blowers and their most common causes of vibrations. The case studies were implemented at Yara Suomi's Siilinjärvi factories for two industrial blowers attached to their base in different ways and rotating at different speeds. The video footage of the industrial blowers was processed and analyzed to find out the cause of the vibration and to get an idea of the use of the motion amplification camera in the vibration analysis.</p> <p>Based on the results obtained from the case studies, it could be concluded that the motion amplification camera was suitable, with certain limitations, as a vibration analysis tool for investigating vibration problems in industrial blowers. The results clearly showed the limitations of using a motion amplification camera in the case of a faster rotating blower, where the vertical vibration of the floor was an additional challenge for acquiring video footage. From the obtained results, it was also possible to conclude that the motion amplification camera can be used in the future in the investigation of vibration problems of many kinds of rotating apparatuses and static structures. Based on the study, it could also be concluded that the motion amplification camera will not replace the traditional vibration analysis performed with an accelerometer, but that these two different methods support each other.</p>	
<p>Keywords</p> <p>industrial blower, motion amplification, phase difference, vibration analysis, vibration spectrum</p>	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	7
1.1	Opinnäytetyön rajaukset.....	7
1.2	Lyhenteet ja määritelmät.....	8
2	YARA.....	9
2.1	Yara Suomi Oy.....	9
2.2	Siilinjärven toimipaikka	9
2.3	Luotettavuustoiminto	10
3	IRIS M LIIKKEENVAHVISTUSKAMERA.....	11
3.1	Liikkeenvahvistuksen käytön höydyt.....	11
3.2	Värähtelydata	12
3.3	Kuvan laatu	13
3.4	Liikkeenvahvistus	16
3.5	Videon analysointi.....	17
4	TEOLLISUUSPUHALTIMET	20
4.1	Keskipakoispuhaltimet.....	20
4.2	Yara Siilinjärven teollisuuspuhaltimet.....	21
5	TEOLLISUUSPUHALTIMIEN VÄRÄHTELY JA SEN AIHEUTTAJAT	22
5.1	Värähtelyrasitusrajat	22
5.2	Epätasapaino.....	24
5.3	Linjausvirhe.....	25
5.4	Mekaaninen väljyys	26
5.5	Resonanssi	27
5.6	Taipunut akseli	28
6	PUHALLIN CASE 1: RIKINPOLTTOLOITOKSEN PALAMISILMAPUHALIN	29
6.1	Tutkimus.....	30
6.2	Analysointi ja tulokset	31
6.3	Yhteenveto.....	34
7	PUHALLIN CASE 2: FOSFORIHAPPOTEHTAAN JÄTEKAASUPUHALLIN	35
7.1	Tutkimus.....	36
7.2	Analysointi ja tulokset	37
7.3	Yhteenveto.....	41

8	POHDINTA.....	42
8.1	Tulosten vertailu ja yhteenveto.....	42
8.2	Loppupäätelmät.....	43
8.3	Jatkokehitysmahdollisuudet	45
8.4	Lopuksi	46
	LÄHTEET	47
	LIITE 1. LASKENNALLISET SIIRTYMÄN MINIMIRESOLUUTIOT MIKRONEISSA.....	49

KUVALUETTELO

KUVA 1.	Tarkastus- ja luotettavuustoiminto sekä toimintojen pääasiallinen toimenkuva ja tehtävä.	10
KUVA 2.	IRIS M liikkeenvahvistuskamera (Noria Corporation 2022)	11
KUVA 3.	Objektiivin polttovälin vaikutus näkymäkenttään (Mukaillen RDI Technologies 2019, 19).	14
KUVA 4.	Himmenninaukon aukkosuhteet IRIS M kameran objektiiveissa (Mukaillen RDI Technologies 2019, 20).	14
KUVA 5.	Objektiivin polttoväli ja himmenninaukko (Mukaillen RDI Technologies 2019, 21).	15
KUVA 6.	Objektiivin aukkosuhteen vaikutus syväterävyyteen (Hue & Hatchet 2022).	15
KUVA 7.	50 Hz vaihtovirtajännitteen siniaalto ja 100 Hz valon intensiteetti (Mukaillen RDI Technologies 2019, 48).	16
KUVA 8.	Kuvataajuus ja vaihtovirtavalaistuksen pulssinopeus epätahdissa ja samassa tahdissa (RDI Technologies 2019, 48).	17
KUVA 9.	Keskipakoispuhaltimen toimintaperiaate (Republic Manufacturing 2022)	20
KUVA 10.	Suora- hihna- ja kytkinkäyttöinen keskipakoispuhallin (Mukaillen Dust Control Systems Oy julkaisuaika tuntematon, 6).	21
KUVA 11.	Yhdeltä puolelta tuetun roottorin epätasapaino (PSK 5707, 2019, 87).....	24
KUVA 12.	Säteislinjausvirhe (PSK 5707, 2019, 90).....	25
KUVA 13.	Kulmalinjausvirhe (PSK 5707, 2019, 89)	25
KUVA 14.	Rakenteellinen väljyys (PSK 5707, 2019, 90).....	26
KUVA 15.	Pyörinnällinen väljyys (PSK 5707, 2019, 91).....	26
KUVA 16.	Resonanssi (Fernandez 2022a).....	27
KUVA 17.	Taipunut akseli (PSK 5707, 2019, 88)	28
KUVA 18.	Rikinpolttolaitoksen palamisilmapuhallin (Heikkinen 2022a).....	29
KUVA 19.	Palamisilmapuhaltimen laakerointiyksikön kohtisuora liikkeenvahvistuskuvaus 6 millimetrin polttovälillä olevalla objektiivilla kahden metrin etäisyydeltä ja X- ja Y-suuntaisen värähtelyn spektrit.	31
KUVA 20.	Palamisilmapuhaltimen takaviisto liikkeenvahvistuskuvaus 6 millimetrin polttovälillä olevalla objektiivilla neljän metrin etäisyydeltä ja X-suuntaisen värähtelyn spektrit.	32

KUVA 21. Palamisilmapuhaltimen takaviisto liikkeenvahvistuskuvaus 12,5 millimetrin polttovälillä olevalla objektiivilla neljän metrin etäisyydeltä ja X-suuntaisen värähtelyn spektri.	33
KUVA 22. Fosforihappotehtaan jätekaasupuhallin (Heikkinen 2022b)	35
KUVA 23. Jätekaasupuhaltimen kohtisuora liikkeenvahvistuskuvaus 12,5 millimetrin polttovälillä olevalla objektiivilla kolmen metrin etäisyydeltä ja X- ja Y-suuntaisen värähtelyn spektrit.	37
KUVA 24. Jätekaasupuhaltimen kohtisuora pyörintätaajuudelle suodatettu liikkeenvahvistuskuvaus 12,5 millimetrin polttovälillä olevalla objektiivilla kolmen metrin etäisyydeltä ja X- ja Y-suuntaisen värähtelyn spektrit.	38
KUVA 25. Jätekaasupuhaltimen takaviisto liikkeenvahvistuskuvaus 12,5 millimetrin polttovälillä olevalla objektiivilla kolmen metrin etäisyydeltä ja X- ja Y-suuntaisen värähtelyn spektrit.	39
KUVA 26. Jätekaasupuhaltimen takaviisto pyörintätaajuudelle suodatettu liikkeenvahvistuskuvaus 12,5 millimetrin polttovälillä olevalla objektiivilla kolmen metrin etäisyydeltä ja X- ja Y-suuntaisen värähtelyn spektrit.	40

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää liikkeenvahvistuskameran käyttämistä teollisuusolosuhteissa toimivien teollisuuspuhaltimien värähtelyongelmien selvitystyökaluna. Liikkeenvahvistus on vielä suhteellisen uusi työkalu värähtelyanalysoinnissa, joten opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää liikkeenvahvistuskameran mahdollisuudet ja rajoitukset. Opinnäytetyö koostuu teoriaosuudesta ja kahdesta case-tutkimuksesta, joihin valitaan eri pyörintänopeudella pyörivät sekä jäykästi ja joustavasti alustaansa kiinnitetyt teollisuuspuhaltimet. Case-tutkimuksissa kohteena olevat puhaltimet kuvataan ja videomateriaaliin tehdään värähtelyanalyysi ja liikkeenvahvistus sekä pyritään selvittämään kohteena olevan puhaltimen värähtelyongelma.

Toiseksi tutkimuskohteeksi valitaan jäykästi alustaansa kiinnitetty rikinpolttolaitoksen palamisilmapuhallin, jonka nimellispyörintänopeus on 3000 rpm ja toiseksi 1500 rpm nimellispyörintänopeudella pyörivä joustavasti värähtelyn vaimennustyynyjen avulla alustaansa kiinnitetty fosforihappotehtaan jätekaasupuhallin. Yara Siilinjärven teollisuuspuhaltimet ovat suurimmaksi osaksi tämän tyyppisiä ratkaisuja, joten näiden kahden tutkimuksen tuloksia vertailemalla saadaan hyvä käsitys liikkeenvahvistuskameran käytöstä teollisuuspuhaltimien värähtelyanalysoinnissa.

Opinnäytetyö etenee liikkeenvahvistuskameran keskeisimpien ominaisuuksien esittelystä teollisuuspuhaltimien, jotka tässä opinnäytetyössä ovat keskipakoispuhaltimia, toimintaperiaatteen esittelyn ja yleisimpien värähtelyn aiheuttajien kautta case-tutkimuksiin. Case-tutkimusten yhteydessä käsitellään tutkimustapaa, miten tutkimus on suoritettu ja millaisia tuloksia tutkimuksesta saadaan sekä analysoidaan saatuja tuloksia. Pohdintaosuudessa laaditaan yhteenveto tutkimuksen tuloksista, vertaillaan case-tutkimuksia ja esitetään loppupäätelmät tutkimuksista sekä jatkokehitysmahdollisuuksia, joita opinnäytetyön edetessä havaittiin.

Opinnäytetyö suoritetaan Yara Suomi Oy:n Siilinjärven toimipaikan luotettavuustoiminnon toimeksiannosta, jonne IRIS M liikkeenvahvistuskamera on hankittu.

1.1 Opinnäytetyön rajaukset

Opinnäytetyössä keskitytään liikkeenvahvistuskameran käyttöön värähtelyn analysoinnissa ja värähtelyliikkeen havainnollistamisessa, jotta värähtelyongelmat voidaan havaita ja paikallistaa. Opinnäytetyön tutkimus rajataan teollisuuden keskipakoispuhaltimiin ja niiden yleisimpiin matalataajuisiin värähtelyongelmiin, koska ne ovat mahdollista selvittää liikkeenvahvistuskameran avulla. Liikkeenvahvistuskameran värähtelymittaukset suoritetaan siirtymämittauksina, jotka soveltuvat parhaiten matalataajuisiin värähtelyihin. Jotkin teollisuuspuhaltimien värähtelyongelmista esiintyvät erittäin korkeilla värähtelytaajuuksilla, kuten esimerkiksi laakerivauriot, ja tämän takia ne jätetään tutkimuksen ulkopuolelle.

Liikkeenvahvistuskameran ominaisuuksista käsitellään teoriassa keskeisimmät ominaisuudet, jotka vaikuttavat hyvän videomateriaalin hankkimiseen, josta värähtelyanalyysi ja liikkeenvahvistus myöhemmin suoritetaan värähtelyongelmien selvittämiseksi.

1.2 Lyhenteet ja määritelmät

AIKATASO	Värähtelyn esitystapa ajan funktiona.
AMPLITUDI	Valitun taajuuskomponentin tai värähtelysignaalin voimakkuus esitetynä kulloinkin valitulla ilmaisumuodolla.
FPS	(Frame per Second) videon kuvataajuus, joka ilmaisee videossa olevien kuvien määrän sekunnissa.
F _{MAX}	Värähtelyspektrin ylärajataajuus.
RATAKÄYRÄ	X- ja Y-suuntaisen liikkeen kuvaaja.
ROI	(Region of Interest) videotallenteeseen piirrettävä mittausalue, josta siirtymämittaus suoritetaan.
RPM	(Revolutions Per Minute) pyörimisnopeuden yksikkö, joka ilmaisee kierosten määrän minuutissa.
SPEKTRI	Matemaattisen menetelmän avulla toteutettu värähtelyn esitystapa taajuustasossa.
VAIHE-ERO	Kahden jaksollisen samalla taajuudella tapahtuvan värähtelyn jakson kohtien ero. Siniaallon muotoisessa värähtelyssä vaihe-ero on vaihekulmien erotus, jotka on mitattu samasta vertailukohdasta.
VÄRÄHTELYN NOPEUS	Värähtelyn siirtymännopeus ajan suhteen, yksikkö mm/s.
VÄRÄHTELYN SIIRTYMÄ	Värähtelyhuippujen välinen etäisyys, yksikkö μm tai mm.
X-SUUNTA	Videokuvan näkymäkenttään nähden vaakasuunta.
Y-SUUNTA	Videokuvan näkymäkenttään nähden pystysuunta.

2 YARA

Yara-konsernin historia ulottuu vuoteen 1905, jolloin Sam Eyde ja Kristian Birkeland perustivat yrityksen nimeltä Norsk Hydro. Norjan teollistuminen oli tuolloin nousussa ja yritykselle ominaista oli edistynyt tutkimus, tutkiminen, innovaatiot ja elinvoimaisuus. (Yara International ASA 2022.) Yara on saavuttanut ainutlaatuisen aseman alan ainoana globaalina satoravintoyhtiönä. Yaralla on integroitu liiketoimintamalli, jossa on noin 17 800 työntekijää ja toimintaa yli 60 maassa. (Yara 2021.)

2.1 Yara Suomi Oy

Yara Suomen historia ulottuu vuoteen 1920, jolloin valtion Rikkihappo- ja Superfosfaattitehtaat perustettiin tuottamaan väkilannoitteita. Tehtaiden nimi vaihtui vuonna 1961 Rikkihappo Oy:ksi ja lopulta Kemira Oyj:ksi vuonna 1972. 1970-luvun lopulla Kemira erkautti lannoiteliiketoiminnan ja kemianteollisuuden toisistaan ja lannoitetoiminta nimettiin Kemira Agroksi. Vuonna 2004 Kemira Agro irtautui Kemira Oyj:stä ja muutti nimensä Kemira GrowHow:ksi sekä listautui Helsingin pörssiin. Vuonna 2007 Suomen valtio myi osuutensa Kemira GrowHow:sta Yaralle, jolloin siitä tuli Yara International ASA:n tytäryhtiö. (Yara 2022a.)

Yara Suomi Oy:lla on kolme toimipaikkaa, jotka sijaitsevat Uudessakaupungissa, Kokkolassa ja Siilinjärvellä. Tutkimuslaitos sijaitsee Vihdin Kotkanniemessä ja myyntikonttori Espoossa. Uudenkaupungin tehtaiden päätuotteita ovat lannoitteet ja typpihappo. Uudenkaupungin tehtaiden yhteydessä oleva syväsatama mahdollistaa merkittävän lannoiteviennin niin lähi- kuin kaukomarkkinoille. Kokkolan tehtaiden päätuotteita ovat rehufosfaatit ja kaliumsulfaatti, ja lisäksi tehtailla varastoidaan ja toimitetaan ammoniakkia sekä fosforihappoa. Siilinjärven tehtaiden päätuotteita ovat lannoitteet ja fosforihappo, ja lisäksi Siilinjärvellä toimii EU-alueen ainoa fosfaattikaivos, josta on peräisin Yara Suomen lannoitteiden puhdas fosfori. (Yara 2022b.)

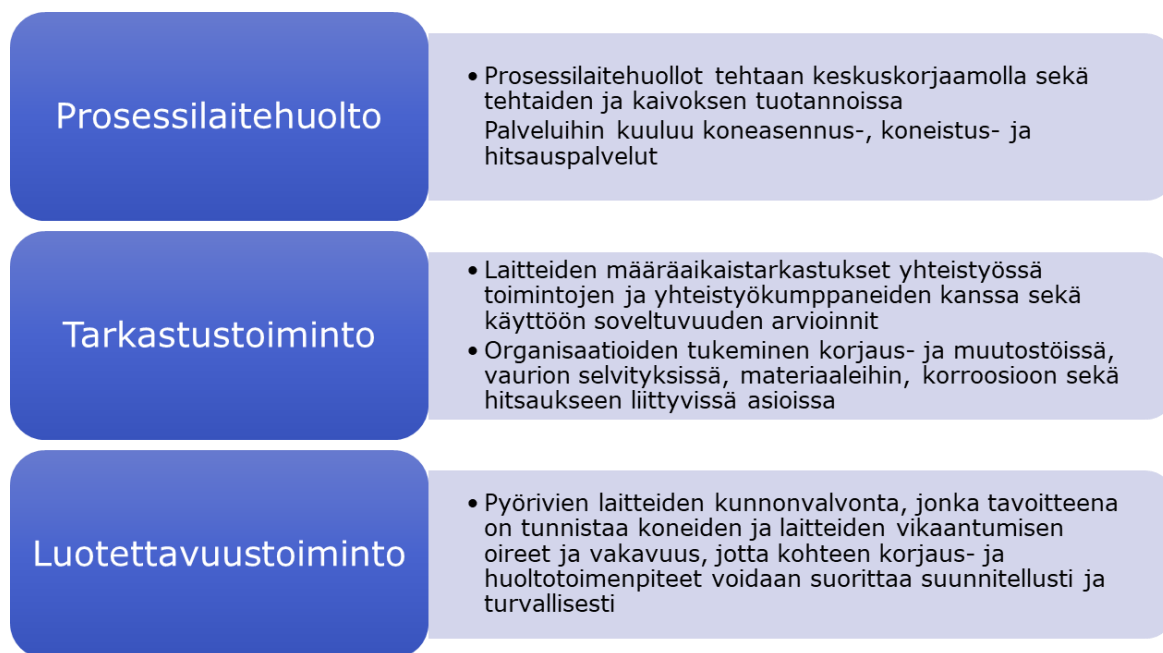
2.2 Siilinjärven toimipaikka

Siilinjärven toimipaikka on yksi Yara-konsernin monipuolisimmista toimipaikoista, jonka historia ulottuu vuoteen 1950, jolloin Siilinjärven malmiesiintymä löydettiin. Tehtaiden perustamispäätös tehtiin vuonna 1967 ja tehtaiden toiminta alkoi vuonna 1969. Kaivoksen toiminta alkoi kymmenen vuotta tehtaiden perustamisen jälkeen. (Yara 2022c.)

Siilinjärven toimipaikalla on kaivoksen lisäksi neljä tuotantolaitosta, joita ovat rikkihappotehdas, fosforihappotehdas, typpihappotehdas sekä lannoitetehdas. Omaa henkilökuntaa Siilinjärven toimipaikalla on noin 400, ja kun otetaan huomioon urakoitsijat, niin toimipaikalla työskentelee päivittäin yli 700 henkilöä. Yaran Siilinjärven toimipaikka onkin merkittävä työllistäjä Kuopion seudun alueella. (Yara 2022d.)

2.3 Luotettavuustoiminto

Opinnäytetyö toteutetaan Yara Suomi Oy:n Siilinjärven toimipaikan luotettavuustoimintoon. Luotettavuustoiminto kuuluu Siilinjärven tarkastus- ja luotettavuustoimintoon, joka on osa Yara Siilinjärven teknisiä palveluja. Tarkastus- ja luotettavuustoiminto koostuu kolmesta osa-alueesta, joilla jokaisella on oma pääasiallinen toimenkuvansa ja tehtävänsä (kuva 1).



KUVA 1. Tarkastus- ja luotettavuustoiminto sekä toimintojen pääasiallinen toimenkuva ja tehtävä.

Luotettavuustoiminto tarjoaa pääasiallisen tehtävänsä lisäksi monenlaisia asiantuntijapalveluita, joiden tarkoituksena on kehittää ja parantaa tehtaiden luotettavuutta. Luotettavuuden jatkuva parantaminen on edellytys, että tehtaiden korkea käyntiaste ja häiriötön käynti voidaan saavuttaa nyt ja tulevaisuudessa. Tehtaiden häiriötön käynti on myös merkittävä turvallisuustekijä, jolla voidaan varmistaa turvallinen työympäristö.

Luotettavuustoiminnon asiantuntijapalveluihin pyörivien laitteiden kunnonvalvonnan lisäksi kuuluu muun muassa materiaalitunnistukset, paksuusmittaukset, lämpökuvaukset, tasapainotukset, voiteluaineasiat, juurisyyanalyytit, kriittisyysmääritykset, värähtelymallinnukset sekä ennakkohuollon kehittäminen.

3 IRIS M LIIKKEENVAHVISTUSKAMERA

Liikkeenvahvistus on RDI Technologiesin kehittämä patentoitu teknologia, joka mittaa taipumaa, siirtymää, liikettä ja värähtelyä, joita ihmissilmä ei pysty havaitsemaan. Mittauksessa hyödynnetään videokameratekniikkaa yhdessä ohjelmistojen ja prosessointialgoritmien kanssa merkityksellisten tietojen poimimiseksi. Tekniikka muuttaa videokuvan jokaisen pikselin sensoriksi, jotka pystyvät mitaamaan liikettä tai värähtelyä erittäin tarkasti. Liikkeenvahvistus havaitsee hienovaraisenkin liikkeen ja vahvistaa sitten liikkeen paljaalla silmällä näkyvälle tasolle, mikä parantaa liikkeen luovien komponenttien ja keskinäisten suhteiden ymmärtämistä. (RMS Ltd 2021.)

IRIS M on tehokas suoratoistovideokamera, joka pystyy tallentamaan korkealaatuista videokuvaa (kuva 2). Kamerassa käytetään 12 bittistä CMOS-kuvakennoa, jonka pikseliryhmä on 1920 x 1200, mikä johtaa 2,3 megapikselin resoluutioon. Kamera kykenee tallentamaan jopa 1300 kuvaa sekunnissa, mutta tämä vaatii todella merkittävästi alennettua resoluutiota. (RDI Technologies 2019, 16.)



KUVA 2. IRIS M liikkeenvahvistuskamera (Noria Corporation 2022)

RDI Technologiesin kehittämä kamera- ja ohjelmistojärjestelmä ratkaisee värähtelyn ja liikkeen nopean paikallistamisen ongelmat. Kameran avulla voidaan tehdä täysimittainen värähtelyanalyysi, jossa mitataan kaikki kohteen värähtely ja liike nopeasti verrattuna perinteiseen kiihtyvyyssantureilla tehtävään analyysiin. Lisäksi liikkeenvahvistuskamera kykenee mittaamaan matalataajuisista värähtelyä, jossa on paljon mekaanista liikettä toisin kuin kiihtyvyyssanturit. (Noria Corporation 2022.)

3.1 Liikkeenvahvistuksen käytön hyödyt

Liikkeenvahvistuksen käytön hyödyt verrattuna perinteiseen kiihtyvyyssanturilla tehtyyn värähtelyanalyysiin ovat selkeät. Siinä missä perinteisessä värähtelymittauksessa kiihtyvyyssanturit tulee kiinnittää mekaanisesti mitattavaan kohteeseen, on liikkeenvahvistus täysin laitetta koskematon menetelmä. (Hi-Speed Industrial Service 2022.)

Kiihtyvyyssantureiden kiinnitys pyöriviin laitteisiin sisältää aina jonkin asteisen riskin, koska mittaja joutuu operoimaan liikkuvien osien läheisyydessä. Mitattavan laitteen korkea lämpötila voi myös osoittautua riskitekijäksi perinteisellä värähtelymittauksella. Kosketuksettomana menetelmänä liikkeen vahvistukseen liittyy kuitenkin vain vähän tai ei ollenkaan suoraa vuorovaikutusta laitteiden kanssa, mikä tarkoittaa turvallisuusongelmien merkittävää vähenemistä. (Hi-Speed Industrial Service 2022.)

Haasteena kiihtyvyyssantureita käyttävässä värähtelyanalyysissä on, että yleensä tarvitaan useita kiihtyvyyssantureita ja kiihtyvyyssanturin sijoituksella on suuri vaikutus kerättyyn dataan. Liikkeen vahvistuksen kanssa tämä ei ole ongelma, koska pikselit toimivat siirtymäantureina. Siinä missä kiihtyvyyssantureilla tehdyssä analyysissä värähtelytieto kerätään niistä pisteistä, joihin anturit on kiinnitetty, on liikkeen vahvistuksessa jopa yli kaksi miljoonaa mittauspistettä. Koska mittauspisteitä on niin suuri määrä, videodatasta voidaan analysoida värähtelyä vapaavalintaisesti monesta eri laitteen kohdasta. (Hi-Speed Industrial Service 2022.)

Useinkaan värähtelyanalyysin tilaaja ei ole asiantuntija värähtelyn analysoinnista. Perinteisessä kiihtyvyyssanturilla suoritettussa analyysissä tuotetaan värähtelyspektrejä ja -aikatasoja, joiden tulkitseminen asiaan perehtymättömälle voi olla hankalaa. Liikkeen vahvistuksessa tuotetaan video, jonka avulla kuvattavan kohteen todellinen värähtely voidaan esittää visuaalisesti analyysin tilaajalle. (Hi-Speed Industrial Service 2022.)

3.2 Värähtelydata

Värähtelydatan ominaisuudet ja laatu riippuvat suuresti videodatan tallennusasetuksista, joista tärkeimmät asetukset ovat videon kuvataajuus ja tallenteen kesto (RDI Technologies 2019, 45).

Videon kuvataajuus määrittää värähtelyspektrin ylärajataajuuden, jolla tarkoitetaan sitä, kuinka korkealle taajuudelle mittaus ulottuu (kaava 1). Värähtelyspektrin ylärajataajuus lasketaan kaavalla

$$F_{max} = \frac{fps}{2} \quad (1)$$

missä *fps* on videodatan kuvataajuus. (RDI Technologies 2019, 47.)

TAULUKKO 1. Esiasetetut resoluutiot ja niiden vaikutus maksimikuvataajuuteen ja värähtelyspektrin ylärajataajuuteen (Mukaillen RDI Technologies 2019, 42).

Videokuvan resoluutio	max. fps	F _{max} (Hz)
1920 x 1200	109	54,5
1920 x 1080	121	60,5
1600 x 900	168	84
1280 x 720	208	104
1024 x 576	255	127,5
800 x 448	320	160
640 x 360	388	194
448 x 252	525	262,5
320 x 180	686	343
128 x 72	1276	638

Acquisition ohjelmassa on esiasetettuja 16:9 kuvasuhteen resoluutioita, joita muuttamalla kuvataajuus ja värähtelyspektrin ylärajataajuus muuttuu (taulukko 1). Näiden resoluutioiden muutoksella voidaan kuvataajuutta muuttaa helposti ja nopeasti kohteeseen sopivaksi. (RDI Technologies 2019, 47.)

Käyttämällä Acquisition Assistant toimintoa, voidaan haluttu värähtelyspektrin ylärajataajuus syöttää myös manuaalisesti, jolloin ohjelma asettaa kuvataajuuden vastaamaan haluttua ylärajataajuutta. Kuvataajuuden lisääminen johtaa pieneen resoluutioon ja sitä kautta pienempään näkymäkenttään. Halutun ylärajataajuuden vaatima näkymäkentän pienentyminen ilmaistaan esikatselukuvassa, jolloin kamera on mahdollista sijoittaa etäisyydelle, josta saadaan kuvattua koko tutkimuksen kohteena oleva kohde. (RDI Technologies 2021, 27.)

Tallenteen kokonaiskesto määrittää värähtelyspektrin resoluution (kaava 2). Resoluutiolla tarkoitetaan värähtelyspektrin alarajataajuutta ja erottelukykä. Värähtelyspektrin resoluutio hertseinä lasketaan kaavalla

$$R = \frac{1}{T} \quad (2)$$

missä T on videotallenteen kokonaiskesto sekunteina. (RDI Technologies 2019, 45.)

Spektrin alarajataajuudella tarkoitetaan alinta taajuutta mikä sisältyy mitattavaan taajuuskaistaan. Erottelukyvyllä tarkoitetaan pienintä mittauslaitteella havaittavaa mittaussuureen muutosta, joka on kahden vierekkäisen spektriviivan taajuuksien erotus (PSK 5701, 2022, 8).

Tätä työtä varten laskettiin kaavalla 2 värähtelyspektrin resoluutiot 1–6 sekunnin tallenteen kestoille havainnollistamaan tallenteen keston vaikutusta värähtelyspektrin resoluutioon (taulukko 2).

TAULUKKO 2. Värähtelyspektrin resoluutiot laskettuna 1–6 sekunnin tallenteen kestoilla.

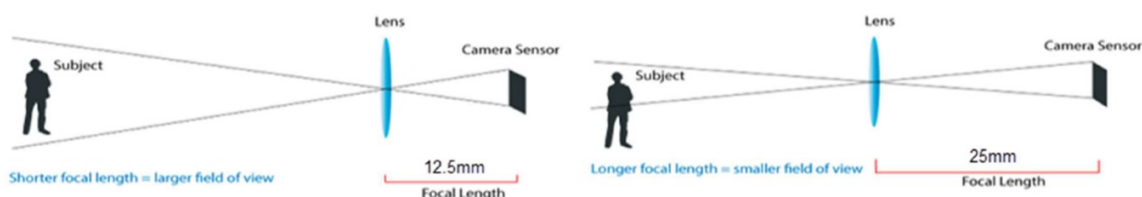
Tallenteen kesto (s)	Resoluutio (Hz)
1	1,00
2	0,50
3	0,33
4	0,25
5	0,20
6	0,17

Esimerkiksi, mikäli videotallenteen kokonaiskestoksi valitaan 3 sekuntia ja kuvataajuudeksi 120 fps, niin värähtelyspektrin ylärajataajuus on kaavalla 1 laskettuna 60 Hz ja resoluutio on kaavalla 2 laskettuna 0,33 Hz. Näin ollen värähtelyspektrin alarajataajuus ja erottelukyky on 0,33 Hz, joten värähtelyspektrin taajuuskaista on 0,33–60 Hz ja erottelukyky 0,33 Hz.

3.3 Kuvan laatu

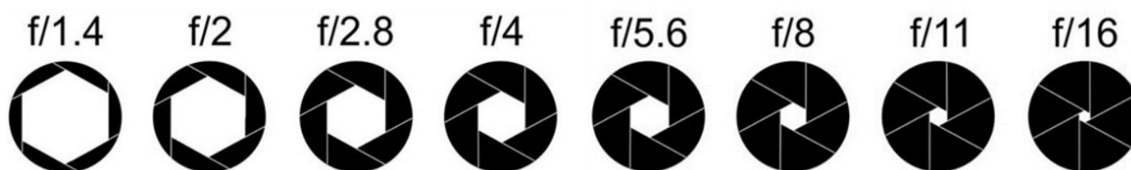
Hyvälaatuisen tallenteen edellytyksenä on kohteeseen sopivan objektiivin valinta, valotus ja kuvan syväterävyys.

IRIS M liikkeenvahvistuskamerassa on viisi eri polttovälillä olevaa objektiivia, joiden polttovälit ovat 6, 12,5, 25, 50 ja 100 millimetriä. Objektiivien polttoväli ei ole säädettävissä, joten ainoa keino muuttaa polttoväliä on vaihtaa objektiivi. IRIS M kameran mukana toimitetut objektiivit on valittu siten, että ne edustavat näkymäkentän tuplaantumista tai puolittumista. Vaihtamalla objektiivi, jossa polttoväli on kaksinkertainen, niin suurennos kaksinkertaistuu, kun taas näkymäkenttä pienenee puoleen (kuva 3). Mikäli vaihtaa objektiivin, jossa on puolet lyhyempi polttoväli, niin suurennos puolittuu ja näkymäkenttä kaksinkertaistuu. (RDI Technologies 2019, 18–19.)



KUVA 3. Objektiivin polttovälin vaikutus näkymäkenttään (Mukaillen RDI Technologies 2019, 19).

IRIS M kameran mukana tulevissa objektiiveissa ei ole lukittuvaa himmenninaukon säätöä, vaan säätö tapahtuu portaattomasti ja aukkosuhteet on merkitty objektiiveihin viivoilla (kuva 4). Asetukset on valittu siten, että ne edustavat joko valotuksen tuplaantumista tai puolittumista. Mitä pienempi aukkosuhde on, sitä enemmän valoa pääsee kameran kennoon. (RDI Technologies 2019, 20–21.)



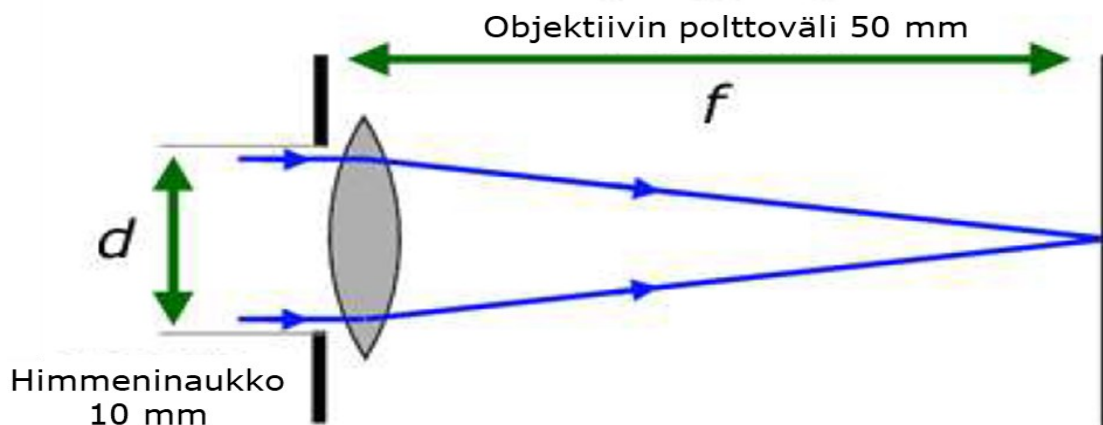
KUVA 4. Himmenninaukon aukkosuhteet IRIS M kameran objektiiveissa (Mukaillen RDI Technologies 2019, 20).

Kuten kuvasta 4 huomataan, aukkosuhteen numeroarvo suurenee, kun himmenninaukko pienenee. Tämä johtuu siitä, että aukkosuhteella tarkoitetaan objektin polttovälin ja himmenninaukon halkaisijan välistä suhdetta (kaava 3). Aukkosuhde lasketaan kaavalla

$$F_{ratio} = \frac{f}{d} \quad (3)$$

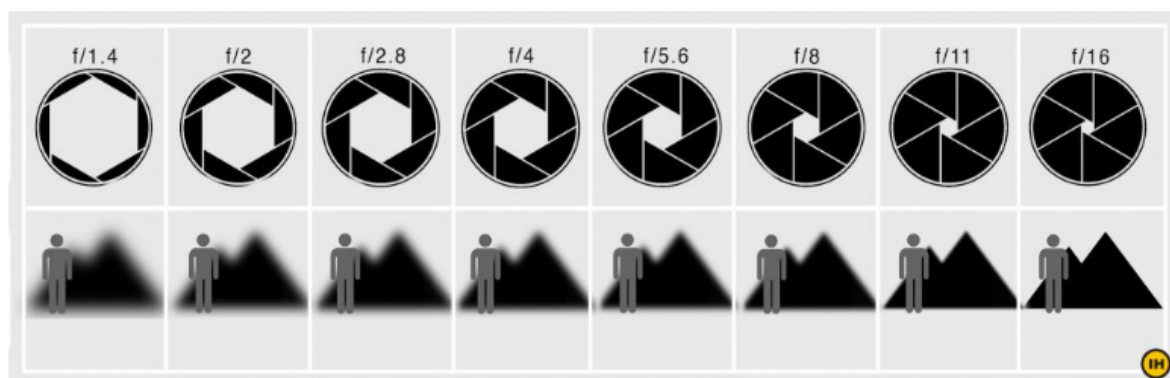
missä f on objektiivin polttoväli millimetreinä ja d himmenninaukon halkaisija millimetreinä. (RDI Technologies 2019, 21.)

Teoriassa, jos aukon halkaisija olisi 50 millimetriä ja objektiivin polttoväli 50 millimetriä, niin aukkosuhde olisi $f/1$. Mikäli himmenninaukon halkaisijaa suljettaisiin 10 millimetriin ja objektiivin polttoväli olisi edelleen 50 millimetriä, niin aukkosuhde olisi $f/5$ (kuva 5).



KUVA 5. Objektiivin polttoväli ja himmenninaukko (Mukaiillen RDI Technologies 2019, 21).

Objektiivin himmenninaukon säätö vaikuttaa myös syväterävyyteen, millä tarkoitetaan lähimpien ja kaukaisimpien kohteiden välistä etäisyyttä syvyyssuunnassa, joka näyttää videolla terävältä (kuva 6). Mikäli suurta syväterävyyttä ei kohteen kuvaamiseen tarvita, niin silloin voidaan aukkosuhteeksi valita pieni arvo, ja kun taas tarvitaan enemmän syväterävyyttä, asetetaan aukkosuhteeksi suuri arvo. (Hue & Hatchet 2022.)



KUVA 6. Objektiivin aukkosuhteen vaikutus syväterävyyteen (Hue & Hatchet 2022).

Aukkosuhdetta säädettäessä on otettava huomioon niin valotus kuin syväterävyys, jotta videosta saadaan riittävän tarkka ja hyvin valotettu, mutta ei ylivalotettu, koska ylivalottuneiden kohtien liikettä ei voi vahvistaa. Joissain tilanteissa kuvattavan kohteen ympäröivä valaistus voi olla niin kohdistettua, että himmenninaukkoa ei voida asettaa kovin suureksi ylivalottumisen takia. Videokuvan kirkkautta voidaan parantaa monilla tavoin Acquisition ohjelmassa, mutta joissain tilanteissa tämäkään ei riitä ja tarvitaan lisävalaistusta, jotta analysoitavaa kohdetta voitaisiin tarkastella riittävästi.

Tällaisia tilanteita varten IRIS M kamerajärjestelmän lisävarusteina on saatavilla tehokkaita tasavirta LED-valonheittämiä, joilla kohde voidaan valaista. Tasavirta LED-valonheittimen hyvänä puolena on myös se, että sen aikaansaama valaistus ei välky vahvistetussa videossa. Valonheittimien valotehoa voidaan myös säätää tarpeen mukaan kohteeseen sopivaksi ylivalottumisen ehkäisemiseksi.

Yara Siilinjärven tehdastilat ovat rakennettu suhteellisen pieneen tilaan, jolloin kaikkiin kuvattaviin kohteisiin ei pääse riittävästi valaistusta. Näin ollen lisävalaistus on monessa kohteessa välttämätön lisävaruste kuvauksen suorittamiseen. Yara Siilinjärvellä on käytössä kaksi tehokasta tasavirta LED-valonheitintä mahdollistamaan parhaan mahdollisen lopputuloksen.

3.4 Liikkeenvahvistus

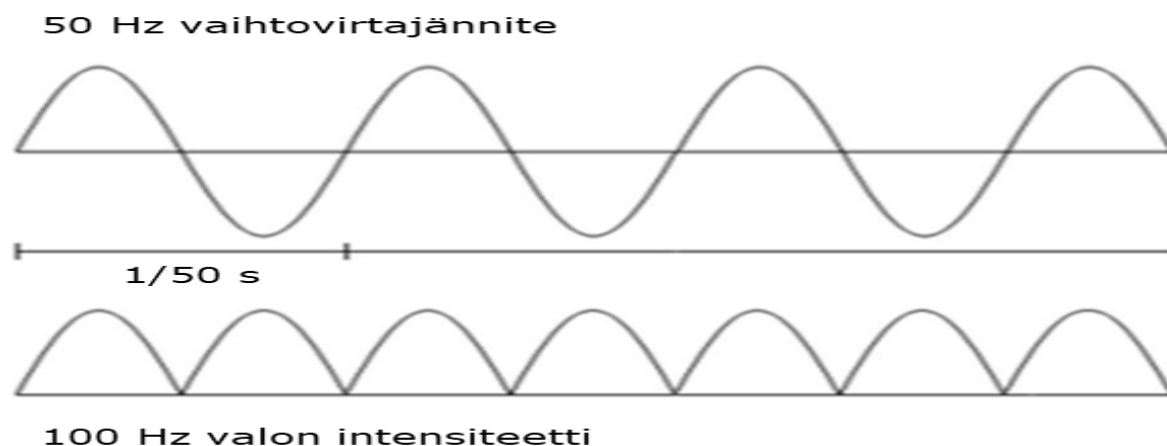
Liikkeenvahvistuksessa objektiivin polttoväli ja kohteen kuvausetäisyys määrittävät siirtymän resoluution (kaava 4). Siirtymän resoluutio on värähtelyn siirtymän minimi mikroneissa, jonka liikkeenvahvistusalgorithmi pystyy vahvistamaan näkyväksi liikkeeksi. Mitä alhaisempi siirtymän resoluutio on, sitä pienempää liikettä kuvattavasta kohteesta voidaan saada vahvistettua lopullisessa vahvistetussa videossa. Siirtymän minimiresoluutio mikroneissa lasketaan kaavalla

$$R_{\mu} = \frac{D}{F} 125 \quad (4)$$

missä D on etäisyys objektiivista kuvattavaan kohteeseen metreinä ja F objektiivin polttoväli millimetreinä. (RDI Technologies 2019, 44.)

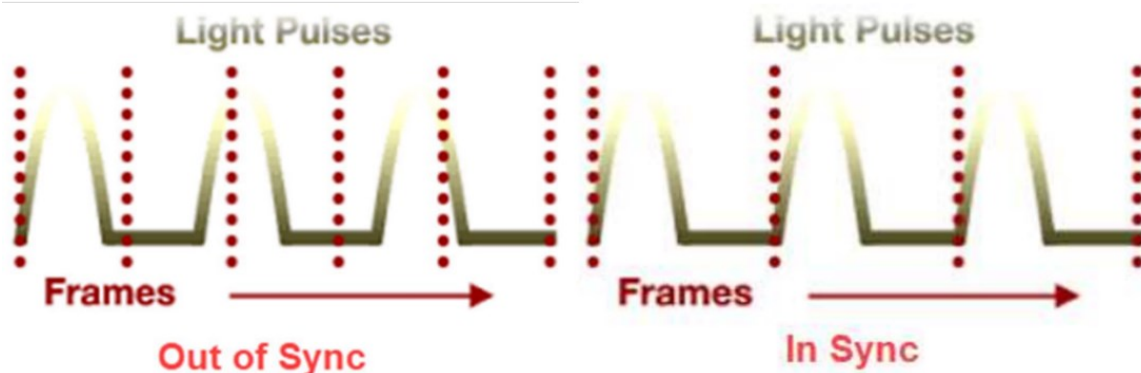
Liitteessä 1 on esitetty kaavalla 4 lasketut siirtymän minimiresoluutiot mikroneissa kaikille objektiiveille 1–20 metrin kuvausetäisyyksille.

Kuvataajuuden määrittämisessä on otettava huomioon sisätilojen vaihtovirtavalaistus. Suomessa vaihtovirran taajuus on 50 hertsiä, mikä tarkoittaa, että jännite muuttuu positiivisesta negatiiviseen 50 kertaa sekunnissa. Matkalla positiivisesta jännitehuipusta negatiiviseen jännitehuippuun jännitteen määrä pienenee, jonka aikana valon intensiteetti on pienempi kuin silloin, kun jännite on lähellä joko positiivista tai negatiivista jännitehuippua (kuva 7). Tämä johtaa jatkuvasti muuttuvaan valon voimakkuuteen tai välkkymiseen sadan hertsin taajuudella. (RDI Technologies 2019, 48.)



KUVA 7. 50 Hz vaihtovirtajännitteen siniaalto ja 100 Hz valon intensiteetti (Mukaiillen RDI Technologies 2019, 48).

Välkkyminen ei ole tyypillisesti ihmissilmällä havaittavissa, koska se tapahtuu niin nopeasti ja todellinen intensiteetin muutos ei ole kovin suuri. Liikkeenvahvistus kuitenkin vahvistaa myös tätä välkkymistä, joten on yleistä, että välkkymistä näkyy vahvistetussa videossa, vaikka raakavideossa ei sitä näkyisikään. Tämä ilmiö tapahtuu aina, kun kuvataajuus ei ole samassa tahdissa sisävalaistuksen pulssinopeuden kanssa. (RDI Technologies 2019, 48.)



KUVA 8. Kuvataajuus ja vaihtovirtavalaistuksen pulssinopeus epätahdissa ja samassa tahdissa (RDI Technologies 2019, 48).

Kuvattaessa sisätiloissa, joissa on vaihtovirtavalaistus, on suositeltavaa kuvataajuudeksi asettaa joko 100 fps tai 50 fps, jolloin kuvataajuus on samassa tahdissa valaistuksen pulssinopeuden kanssa (kuva 8). Tämä johtaa huomattavasti pienempään mahdollisuuteen, että valojen välkkymistä esiintyy vahvistetussa videossa. (RDI Technologies 2019, 48.)

Mikäli korkeampaa kuvataajuutta kuin 100 fps halutaan käyttää, niin sisävalaistus joudutaan sammuttamaan kuvauksen ajaksi ja korvaamaan valaistus LED-valonheittimillä. Tällä tavoin sisävalaistuksen todennäköinen välkyntä saadaan poistettua lopullisesta vahvistetusta videosta.

3.5 Videon analysointi

Videon analysointi ja liikkeenvahvistus suoritetaan Motion Amplification ohjelmalla. Ohjelmassa voidaan suorittaa videolle erilaisia analysointitoimintoja, kuten esimerkiksi erilaisia suodatuksia, vaihekulma- spektri-, aikataso- ja ratakäyräanalyyssejä. Videokuvaa voidaan myös stabiloida, mikäli kamera on värähdellyt kuvaamisen aikana.

Siirtymämittaukset suoritetaan suoraan videotallenteeseen piirtämällä ROI-alue haluttuun paikkaan, mistä mittaukset halutaan tehdä. Kun ROI-alue on piirretty haluttuun kohtaan, siitä saadaan esiin aikataso, spektri ja ratakäyräikkunat. ROI-alueita on valittavana kolme erilaista: standardi XY, vaaka-akseli ja pystyakseli. Standardi XY ROI-alue on tarkoitettu X- ja Y-suuntaisen siirtymän laskeamiseen, mutta se ei sovellu pyöriville akseleille. Vaaka-akseli ROI-alue on tarkoitettu vaakasuuntaisille pyöriville akseleille, ja se laskee pystysuuntaisen siirtymän. Pystyakseli ROI-alue on tarkoitettu pystysuorille pyöriville akseleille, ja se laskee vaakasuuntaisen siirtymän. Spektri- ja aikatasoikkunoi-

den siirtymämittaukset voidaan muuttaa laskennallisesti värähtelyn nopeusmittaukseksi, jolloin yksikkönä käytetään mm/s. Ratakäyräikkunassa mittausta on aina siirtymämittaus, jonka yksikkönä käytetään mikrometriä. (RDI Technologies 2021, 69, 81, 94.)

ROI-aluetta piirrettäessä on tärkeää, että alue piirretään vain alueelle, josta halutaan suorittaa mitaukset. Mikäli ROI-alue piirretään kohtaan, jossa on kaksi eri tavalla liikkuvaa kohdetta, ei voida olla varmoja kummanko kohteen liikettä aikataso edustaa. Toinen tärkeä asia, joka täytyy ottaa huomioon ROI-aluetta piirrettäessä on, että pinnassa täytyy olla jonkin verran kontrastia, jotta ohjelma kykenee suorittamaan siirtymämittaukset. Vaihtoehtoisesti ROI-alue voidaan piirtää kohteen reunan yli mittauksen suorittamiseksi, mikäli takana on tasainen tausta. (RDI Technologies 2021, 73.)

ROI-aluetta voidaan käyttää myös visuaalisena liikevektorina. Vektori osoittaa visuaalisesti liikkeen voimakkuuden ja suunnan kohdasta, johon ROI-alue on piirretty. Liikevektoreilla voidaan analysoida visuaalisesti kahden eri mittauskohdan vaihe-eroa. (RDI Technologies 2021, 48.)

Motion Amplification ohjelman suodatustoimintojen avulla analysoija voi vahvistaa tiettyjä taajuuksia, jotka ovat läsnä tallenteesta poimitussa värähtelytiedossa. Mikäli suodatusta ei käytetä tallenteeseen vahvistusprosessin aikana, vahvistetaan kaikki läsnä oleva liike. Olettaen, että läsnä on useita taajuuskomponentteja, analysoija voi päättää vahvistettavaksi minkä tahansa tietyn läsnä olevan taajuuden liikkeen tai useisiin taajuuksiin liittyvää liikettä. Kun suodatusta käytetään, siitä tehdään aina uusi oma tallenteensa ja alkuperäinen säilyy ennallaan. (RDI Technologies 2021, 101.)

Motion Amplification ohjelmassa on viisi erilaista suodatustilaa, jotka ovat

- manuaalinen suodattimen määrittäminen (Manual Filter Definition)
- amplitudin kynnyksiarvo (Amplitude Threshold)
- huipputaajuuksien (Top Frequencies)
- HDR (High Density Recording)
- aikaperusteinen tasoitus (Time Based Smoothing). (RDI Technologies 2021, 103.)

Manuaalisessa suodattimen määrittämisessä on neljä erilaista suodatintyyppiä, jotka ovat

- kaistapäästö (Bandpass), jossa valitaan suodatuksen ala- ja ylärajataajuus, jonka välinen taajuusalue sisällytetään suodatettuun videoon
- alipäästö (Lowpass), jossa valitaan suodatuksen ylärajataajuus, jonka alapuolinen taajuusalue sisällytetään suodatettuun videoon
- ylipäästö (Highpass) jossa valitaan suodatuksen alarajataajuus, jonka yläpuolinen taajuusalue sisällytetään suodatettuun videoon
- kaistaesto (Bandstop), jossa valitaan suodatuksen ala- ja ylärajataajuus, jonka välinen taajuusalue poistetaan suodatetusta videosta. (RDI Technologies 2021, 103–106.)

Amplitudin kynnyksiarvosuodattimen käyttö ei edellytä analysoijaa määrittämään yksittäisiä suodatintyyppiä. Sen sijaan se antaa analysoijan määrittää amplitudikynnyksen, jota käytetään määrittämään, mitkä amplitudihuiput sisällytetään suodatettuun videoon. Suodatusprosessi pyrkii sisällyttämään suodatettuun videoon valitun huipun tai valittujen huippujen koko taajuusalueet. (RDI Technologies 2021, 106.)

Huipputaajuuksien suodatus etsii tallenteesta korkea-amplitudisia taajuuksia, jotka voivat kiinnostaa analysoijaa. Nämä taajuudet näytetään luettelossa, jossa on valintaruutu jokaisen taajuuden vieressä. Suodatuksessa jokaisella valitulla taajuudella tehdään erillinen suodatettu tallenne, joka luodaan käyttämällä kaistanpäästösuodatinta kyseiselle taajuudelle. Kaistanpäästösuodattimien ala- ja yläraja-arvoja voidaan muokata graafisesti tai syöttämällä manuaalisesti halutut arvot. (RDI Technologies 2021, 106.)

HDR-suodatusta käytetään parantamaan alkuperäisen videon visuaalista resoluutiota sekä suodattamaan erityisesti yhdelle tai useammalle taajuudelle (RDI Technologies 2021, 107).

Aikaperusteista tasoitusvaihtoehtoa käytetään ensisijaisesti pitkäaikaistallennuksella kerättyjen tallenteiden tasoittamiseen. Pitkäaikaisissa tallennuksissa voi olla lyhytkestoisia liikkeitä, jotka voivat vahvistettuna häiritä kohteen pidemmän aikavälin liikettä. (RDI Technologies 2021, 108.)

Hyvän vahvistetun videon aikaansaamiseksi on otettava huomioon tallennetta tehdessä, että kamera itse ei värähtele. Kameran itsensä värähtely tulee näin ollen mukaan vahvistettuun videoon, joten on ensiarvoisen tärkeää saada kameran värähtely estettyä. Passiiviset stabilointimenetelmät, kuten värähtelyn vaimennustyynyjen käyttäminen kameran kolmijalan alla ovat ensisijaisesti suositeltavampia. Passiiviset menetelmät eivät kuitenkaan ole aina mahdollisia, ja tällaisia tilanteita varten Motion Amplification ohjelmassa on digitaalinen stabilointitoiminto. Digitaalinen stabilointi voidaan suorittaa kahdella tavalla, joko käyttämällä stabiloinnissa koko näkymäkenttää tai osaa taikka osia siitä. Koko näkymäkentän stabilointi, jossa koko näkymäkenttää käytetään määrittämään kameran värähtely, toimii hyvin useimmissa tapauksissa, varsinkin kun kohde ei liiku paljon verrattuna kameran ilmeiseen värähtelyyn. Joissakin tapauksissa kiinnostuksen kohteena olevan kohteen liike voi hallita näkymäkenttää ja vaikeuttaa päättämistä: mikä on kiinnostavaa, minkä pitäisi liikkua, mikä on tausta ja mikä ei saisi liikkua. Näissä tapauksissa voi olla hyödyllistä määrittää manuaalisesti yksi tai useampi alue näkymäkentästä, jonka ei pitäisi liikkua. Näin ohjelma kykenee paremmin määrittämään, kuinka kameran värähtely stabiloidaan. (RDI Technologies 2021, 110–112.)

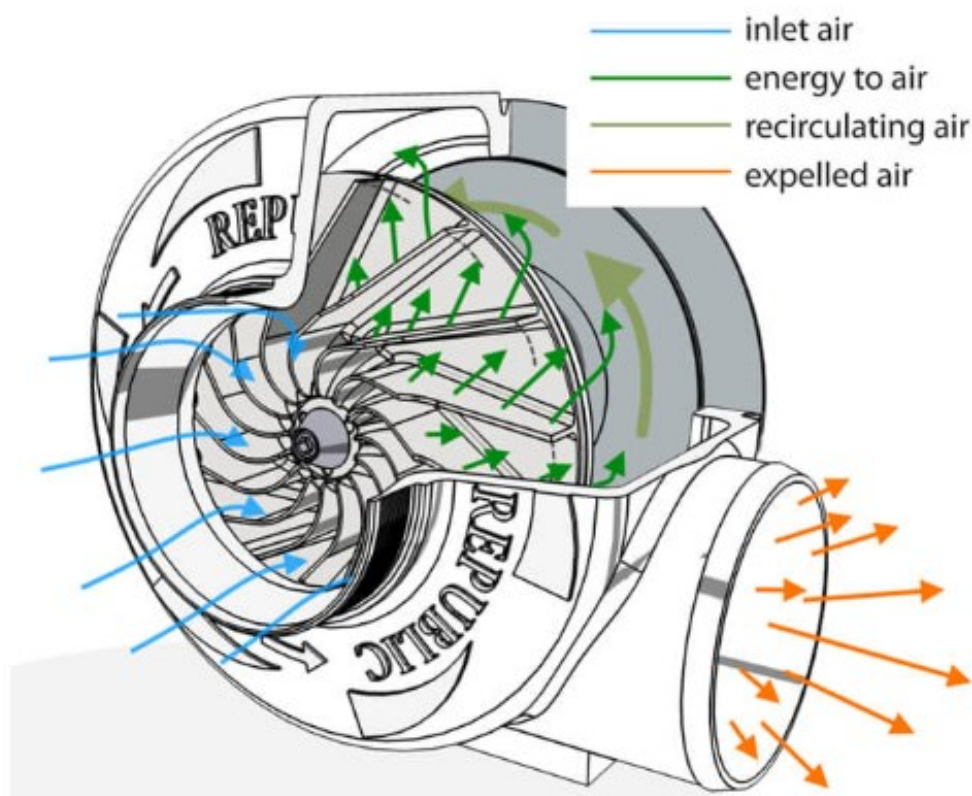
4 TEOLLISUUSPUHALTIMET

Teollisuuspuhaltimia on saatavilla todella suuri määrä erilaisia monelta eri valmistajalta ja niitä valmistetaan useista eri materiaaleista. Teollisuuspuhaltimet ovat toimintaperiaatteeltaan pääsääntöisesti keskipakoispuhaltimia, koska ne ovat hiljaisia, kestäviä ja ne pystyvät suoriutumaan hyvin teollisuuden haastavissa olosuhteissa (Aditya Drier Tech Private Limited 2022).

4.1 Keskipakoispuhaltimet

Keskipakoispuhallin on mekaaninen laite ilman tai kaasujen siirtämiseen, joka lisää ilmavirran nopeutta pyörivällä siipipyörällä. Puhaltimet hyödyntävät siipipyörän kineettistä energiaa lisäämään ilma- tai kaasuvirran painetta, mikä puolestaan liikuttaa niitä vastusta vastaan, joka johtuu kanavista ja muista komponenteista. Keskipakoispuhaltimet kiihdyttävät ilmaa tai kaasua radiaalisesti muuttamalla ilma- tai kaasuvirran suuntaa. (Our Education 2022.)

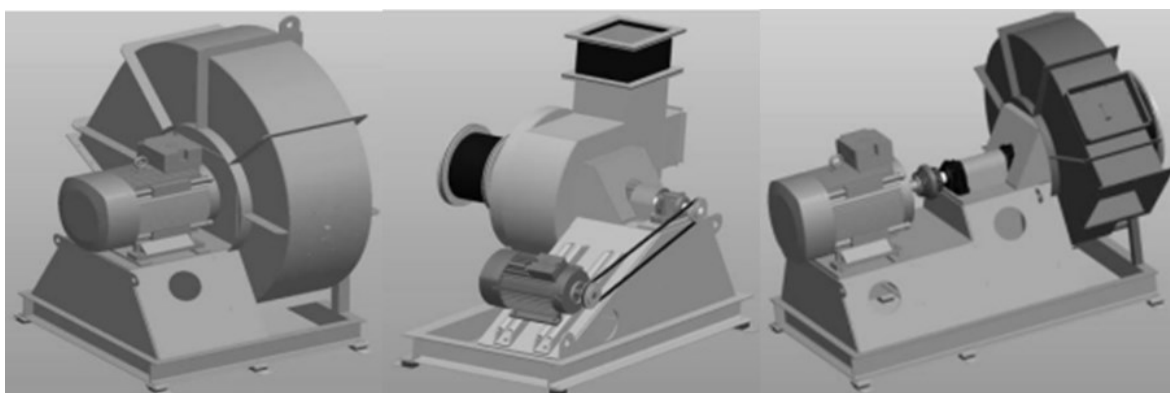
Kun ilma tulee puhaltimen siipipyörän keskeltä sisään, se jakautuu siipipyörän lapojen kesken. Siipipyörän pyöriessä se kiihdyttää ilmaa ulospäin keskipakoisvoimalla puhaltimen kaapuun. Tämän seurauksena nopea ilma leviää ja hidastuu ympäröivässä puhaltimen kaavussa, jonka seurauksena paine kaavun sisällä kasvaa. Tämän jälkeen ilma ohjataan ulos poistokanavan kautta. (Kuva 9.) (Republic Manufacturing 2022.) Ilman siirtyessä siipipyörästä puhaltimen kaapuun, paine siipipyörän keskellä laskee, jonka aiheuttaman paine-eron puhaltimeen virtaava ilma pyrkii normalisoimaan. Kierto toistuu jatkuvasti ja siksi ilmaa voidaan siirtää jatkuvasti tasaisella paineella. (Our Education 2022.)



KUVA 9. Keskipakoispuhaltimen toimintaperiaate (Republic Manufacturing 2022)

Keskipakoispuhaltimia on kahta eri tyyppiä; painepuhallin ja tilavuuspuhallin. Painepuhaltimet on nimensä mukaisesti suunniteltu siirtämään ilmaa tai kaasua korkealla paineella. Tilavuuspuhaltimet ovat sen sijaan suunniteltu siirtämään suuria määriä ilmaa tai kaasua alhaisemmalla paineella kuin painepuhaltimet. (Aditya Drier Tech Private Limited 2022.)

Keskipakoispuhaltimien käyttötyyppejä ovat suora-, hihna- ja kytkinkäyttöinen (kuva 10). Suorakäyttöisessä puhaltimessa siipipyörä on asennettu suoraan moottorin akselille. Hihnakäyttöisessä puhaltimessa käyttövoima siirretään siipipyörän akselille kiilahihnaa tai -hahnoja käyttäen, jolloin sähkömoottori sijoitetaan säätökiskojen avulla jalustaan. Kytinkäyttöisessä puhaltimessa voimansiirto toteutetaan siipipyörän akselin ja moottorin akselin yhdistävän kytkimen avulla. (Dust Control Systems Oy julkaisuaika tuntematon, 6.)



KUVA 10. Suora- hihna- ja kytkinkäyttöinen keskipakoispuhallin (Mukaihen Dust Control Systems Oy julkaisuaika tuntematon, 6).

4.2 Yara Siilinjärven teollisuuspuhaltimet

Yara Siilinjärven teollisuuspuhaltimet ovat pääasiallisesti teräslevyrunkoisia keskipakoispuhaltimia. Puhaltimien rakenne ja materiaalit on suunniteltu kulloiseenkin kohteeseen sopiviksi. Siilinjärvellä on monen eri kokoisia puhaltimia, koska käyttötarkoituksia on monia, kuten prosessikaasujen siirto, pölynpoisto, vaahdotusilman tuotto, jäähdytysilman tuotto, palamisilman tuotto ja savukaasujen poisto. Puhaltimien ikähaitari on erittäin laaja, koska tuotantolaitos on ollut toiminnassa jo yli viisikymmentä vuotta, joka lisää haasteiden määrää varsinkin vanhempien puhaltimien kohdalla. Vanhempien puhaltimien runkorakenteita on jouduttu vuosien saatossa muokkaamaan esimerkiksi sähkömoottorin vaihdon takia, koska uuden tyyppiset moottorit ovat erikokoisia kuin vanhat moottorit. Puhaltimien tuottoa säädetään joko säätämällä pyörimisnopeutta taajuusmuuttajalla tai imuilman määrää säädettävällä imusäleiköllä.

5 TEOLLISUUSPUHALTIMIEN VÄRÄHTELY JA SEN AIHEUTTAJAT

Teollisuuspuhaltimissa voi esiintyä lukuisia erilaisia värähtelyn aiheuttajia, joista toiset esiintyvät korkeilla taajuuksilla, kuten esimerkiksi laakerivauriot sekä siipipyörän ongelmat. Tässä työssä keskitytään värähtelyongelmiin, jotka esiintyvät matalammilla taajuuksilla ja siten ovat mahdollista havaita liikkeen vahvistuskameralla. Värähtelyongelmien selvittämiseksi on erittäin tärkeää tietää pyörivän laitteen pyörintätaajuus (kaava 5). Pyörintätaajuus lasketaan kaavalla

$$n = \frac{rpm}{60} \quad (5)$$

missä rpm on pyörimisnopeus.

5.1 Värähtelyrasitusrajat

Teollisuuspuhaltimien värähtelyn voimakkuutta analysoidessa on otettava huomioon miten voimakas värähtely on sallittua kyseiselle laitteelle. Värähtelyn voimakkuus vaikuttaa suoraan laitteen odotettavissa olevaan käyttöikänsä, vaikkei sitä pystytäkään täsmällisesti ennustamaan. Värähtelyn voimakkuus vaikuttaa korjaavien toimenpiteiden ajoittamiseen, jotta suuremmilta vaurioitumisilta vältyttäisiin. Värähtelyn voimakkuuden ja aiheuttajan havaitseminen aikaisessa vaiheessa antaa kunnossapidolle elintärkeää aikaa toteuttaa korjaavat toimenpiteet suunnitellusti ja turvallisesti. PSK standardi 5704 (2013, 43–44) esittää koneryhmien ja alustojen mukaan luokiteltuja värähtelyrasitusalueita kokonaisvärähtelyn nopeuden tehollisarvoina (taulukko 3). Näitä arvoja voidaan pitää suuntaa antavina raja-arvoina.

TAULUKKO 3. Värähtelyrasitusrajat koneryhmittäin ja alustan jäykkyyden mukaan (mukaihen PSK 5704, 2013, 44).

Värähtelyrasitus V_{rms} (mm/s)	Koneryhmät 2 ja 4		Koneryhmät 1 ja 3				
	Jäykkä	Joustava	Jäykkä	Joustava			
11	D	D	D	11 D			
10				C			
9				C			
8				C			
7				7,1	7,1	7,1	
6				C	C	B	
5				4,5	4,5	4,5	B
4				C	B	B	3,5
3				2,8	B	B	B
2				B	2,3	2,3	A
1				1,4	A	A	A

Koneet ryhmitellään akselikorkeuden ja -liitoksen sekä käyttötehon mukaan (taulukko 4) sekä lisäksi alustan jäykkyyden mukaan. Alustan katsotaan olevan jäykkä, mikäli sen alin ominaistuuus on 25 prosenttia suurempi kuin pääasiallinen herätetaajuus, joka monessa tapauksessa on laitteen oma pyörintätaajuus. Kaikki muut alustat katsotaan olevan joustavia. (PSK 5704, 2013, 43.)

TAULUKKO 4. Koneiden ryhmittely akselikorkeuden ja -liitoksen sekä käyttötehon mukaan (Mukaillen PSK 5704, 2013, 43).

Koneiden ryhmittely	
Ryhmä 1	Suuret koneet, joiden nimellisteho on yli 300 kW ja sähkökoneet, joiden akselikorkeus on 315 mm tai yli
Ryhmä 2	Keskikokoiset koneet, joiden nimellisteho on korkeintaan 300 kW ja sähkökoneet, joiden akselikorkeus on 160–315 mm
Ryhmä 3	Puhaltimet, kompressorit ja pumput, joilla erillinen akseli moottorin kanssa ja nimellisteho yli 15 k
Ryhmä 4	Puhaltimet, kompressorit ja pumput, joilla yhteinen akseli moottorin kanssa ja nimellisteho yli 15 kW

Värähtelyrasitusalueet on jaettu neljään eri alueeseen (taulukko 5), joista selviää mihin käyttötarkoitukseen kutakin aluetta voidaan hyödyntää (PSK 5704, 2013, 44).

TAULUKKO 5. Värähtelyrasitusalueet (Mukaillen PSK 5704, 2013, 44)

Värähtelyrasitusalueet	
A	Koneen vastaanotossa sallittu värähtelyrasitusalue
B	Sallittu värähtelyrasitusalue takuuajan umpeuduttua ja jonka ylärajaa voidaan käyttää alustavana hälytysrajana
C	Hälytysalue, jonka ylärajaa voidaan käyttää alustavana vaurioitumisrajana
D	Koneen vaurioitumisalue

Yara Siilinjärven teollisuuspuhaltimet luokittevat pääasiallisesti ryhmään 3, koska suurin osa puhaltimista on varustettu erillisellä moottorilla. Useimmat puhaltimet on myös varustettu värähtelyn vaimennustyynyillä, joilla pyritään vähentämään ympäristöstä tulevan värähtelyn vaikutusta puhaltimien sekä vaimentamaan mahdollisia pieniä värähtelyjä.

5.2 Epätasapaino

Epätasapaino on pyörivien koneiden ei-toivotun värähtelyn kaikkein yleisin syy, jonka aiheuttaa se, että pyörivän kappaleen painopiste ei ole yhtenevä kappaleen pyörimiskeskilinjän kanssa (Mikkonen ym. 2009, 297).

Epätasapainon yleisimmät aiheuttajat ovat epätasainen likaantuminen, kiinnittyneen massan irtoaminen, epätasainen kuluminen, irronneet tasapainotusmassat ja riittämätön tasapainotus. Epätasapainon kehittyminen voi vaihdella. Esimerkiksi likaantuminen voi joissain tapauksissa jopa parantaa tilapäisesti tasapainotilaa. Epätasapainosta johtuva voima kasvaa pyörimisnopeuden neliön funktiona ja on suoraan verrannollinen epätasapainossa olevan massan määrään ja sen etäisyyteen pyörimiskeskilinjasta (kaava 6). Epätasapainon aiheuttama voima lasketaan kaavalla

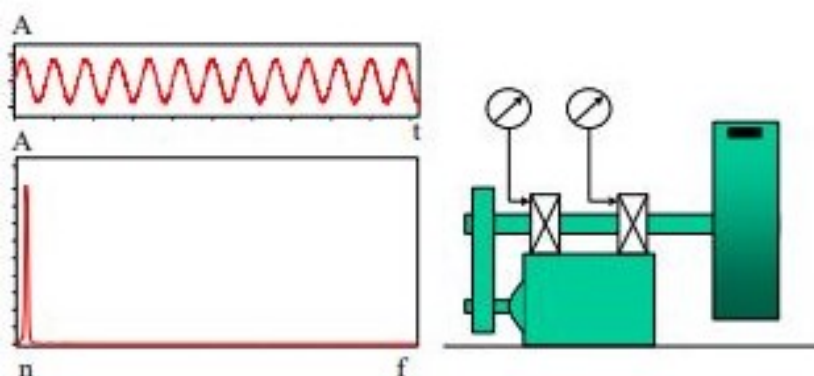
$$F = mr\omega^2 \quad (6)$$

missä m on epätasapainossa oleva massa, r massan etäisyys pyörimiskeskilinjasta ja ω kulmanopeus. (PSK 5707, 2019, 85.)

Värähtelyn voimakkuuteen lineaarisesti käyttäytyvillä laitteilla vaikuttavat epätasapainon aiheuttama voima ja rakenteelliset ominaisuudet, jotka joko lisäävät tai vähentävät värähtelyn voimakkuutta (PSK 5707, 2019, 85).

Epätasapainotyyppisiä ovat staattinen epätasapaino, pariepätasapaino, dynaaminen epätasapaino ja yhdeltä puolelta tuetun roottorin epätasapaino (PSK 5707, 2019, 85–86). Tässä työssä keskitytään yhdeltä puolen tuetun roottorin epätasapainoon, koska Yara Siilinjärven teollisuuspuhaltimista valtaosa on tämän tyyppisiä laitteita.

Epätasapaino yhdeltä puolelta tuetussa roottorissa aiheuttaa värähtelyä säteen ja askelin suunnassa pyörintäaajuudella n . Värähtely akselin suunnassa eri laakereista mitattuna on samassa vaiheessa. (Kuva 11.) Säteen suuntaisen värähtelyn vaihekulma on usein epävakaa. (PSK 5707, 2019, 87.)

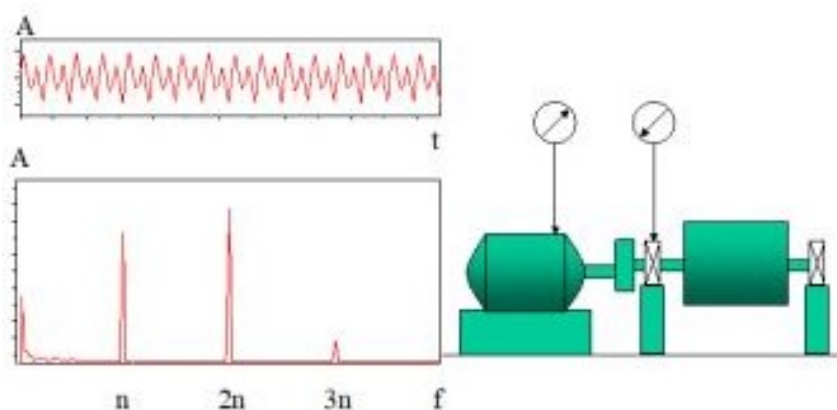


KUVA 11. Yhdeltä puolelta tuetun roottorin epätasapaino (PSK 5707, 2019, 87)

5.3 Linjausvirhe

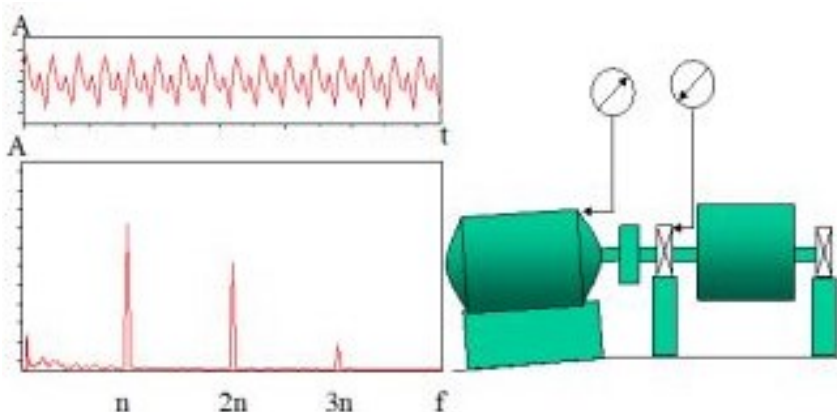
Linjausvirhe on toiseksi yleisin pyörivien koneiden värähtelyn aiheuttaja, jonka yleisimmin aiheuttaa asennusvirhe tai lämpöliikkeet. Pyörivissä koneissa linjausvirhettä voi esiintyä useissa kohdissa, mutta yleisimmin linjausvirhettä esiintyy silloin, kun pyörittävä kone liitetään kytkimen avulla pyörítettävään koneeseen. Linjausvirhe voi olla säteislinjausvirhe, kulmalinjausvirhe tai näiden yhdistelmä. (Mikkonen ym. 2009, 303–304.)

Säteislinjausvirheellä tarkoitetaan tilannetta, jossa akselit ovat samansuuntaiset, mutta akseleiden keskilinjat eivät ole samassa linjassa toisiinsa nähden. Tilanne aiheuttaa säteen suuntaista värähtelyä, jossa vaihe-ero kytkimen eri puolilta olevista laakereista mitattuna pyörintätaajuudella n on 180 astetta (kuva 12). Yleensä värähtelyn voimakkuus on korkeampi pyörintätaajuuden toisella harmonisella taajuudella $2n$, kuin pyörintätaajuudella n . (PSK 5707, 2019, 90.)



KUVA 12. Säteislinjausvirhe (PSK 5707, 2019, 90)

Kulmalinjausvirheellä tarkoitetaan tilannetta, jossa akselin keskilinjat ovat erisuuntaisia toisiinsa nähden. Tilanne aiheuttaa akselin suuntaista värähtelyä, jossa kytkimen eri puolilta mitattuna vaihe-ero pyörintätaajuudella n on 180 astetta (kuva 13). Värähtely on voimakkainta pyörintätaajuudella n ja sitä esiintyy myös pyörintätaajuuden harmonisilla taajuuksilla $2n$ ja $3n$. (PSK 5707, 2019, 89.)

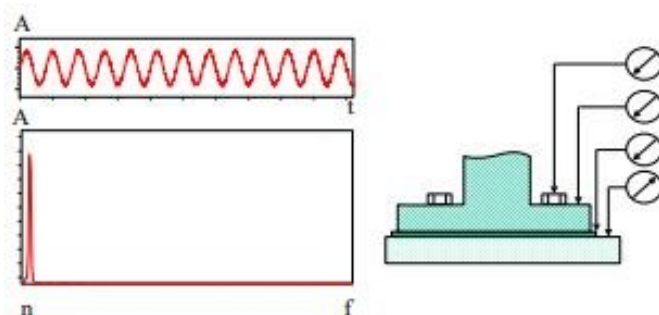


KUVA 13. Kulmalinjausvirhe (PSK 5707, 2019, 89)

5.4 Mekaaninen väljyys

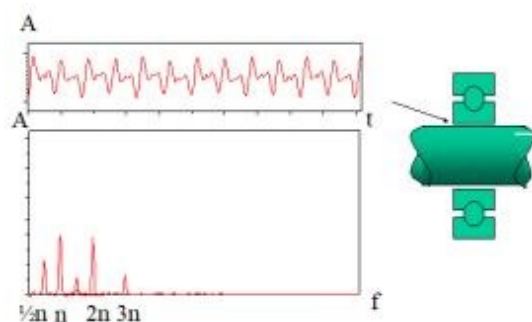
Mekaanisia väljyyksiä on hyvin erityyppisiä, joita ovat muun muassa riittämätön kiinnitys, kuten esimerkiksi kiinnitysruuvien löystyminen ja kiinnikkeiden tai rakenteiden halkeamat sekä kulumisen aiheuttamat toleranssin kasvut, kuten liiallinen välys vierintä- tai liukulaakereissa sekä juoksupyörän ja akselin välyksen löystyminen. Mekaanisen väljyyden ilmeneminen värähtelymittauksessa edellyttää, että heräte värähtelylle johtuu jostain muusta ongelmasta kuin mekaanisesta väljyydestä, kuten epätasapainosta, linjausvirheestä tai jostain muusta. Jo hyvinkin pieni heräte voi aiheuttaa suurta amplitudin kasvua mekaanisen väljyyden ollessa kyseessä. Mekaanisille väljyyksille voidaan tehdä luokittelu, jossa erotellaan rakenteellinen väljyys ja pyörinnällinen väljyys. (Fernandez 2022b.)

Rakenteellisella väljyydellä tarkoitetaan koneen mekaanisiin pyörimättömiin elementteihin liittyvää väljyyttä. Rakenteellinen väljyys voidaan paikallistaa vertaamalla värähtelyn vaihe-eroa eri rajapintojen välillä (kuva 14). Värähtely esiintyy pääasiassa säteen suunnassa ja koneen pyörintätaajuudella n . Väljyyden lisääntyessä värähtelyä voi esiintyä pyörintätaajuuden harmonisilla taajuuksilla $2n$, $3n$ ja niin edelleen. (Fernandez 2022b.)



KUVA 14. Rakenteellinen väljyys (PSK 5707, 2019, 90)

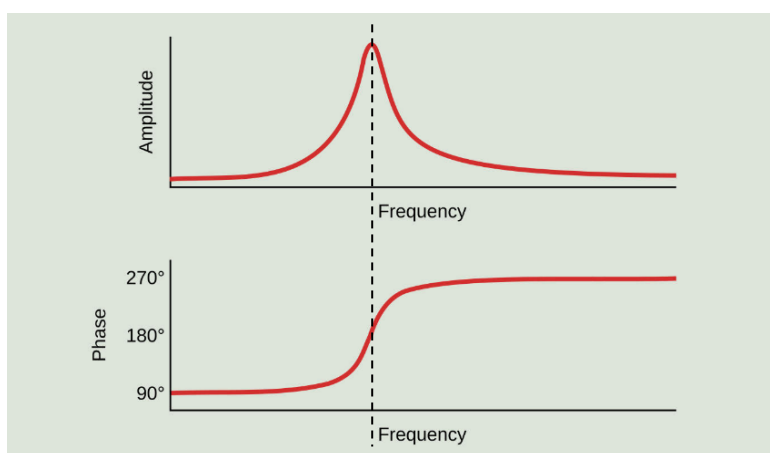
Pyörinnällisellä väljyydellä tarkoitetaan koneen pyörivien elementtien välistä väljyyttä, jossa värähtely esiintyy pääasiassa säteen suunnassa. Pyörinnälliselle väljyydelle on ominaista, että spektrissä esiintyy pyörintätaajuus n ja sen harmoniset taajuudet $2n$, $3n$ ja niin edelleen sekä vakavissa tapauksissa aliharmoninen taajuus $0,5n$ ja puoliharmoniset taajuudet $1,5n$, $2,5n$ ja niin edelleen (kuva 15). (Fernandez 2022b.)



KUVA 15. Pyörinnällinen väljyys (PSK 5707, 2019, 91)

5.5 Resonanssi

Resonanssi esiintyy silloin, kun koneeseen tai laitteeseen vaikuttaa jokin herätevoima, jonka taajuus on lähellä rakenteen ominaistaajuutta. Resonanssissa koneen värähtelytaso on tyypillisesti korkea, koska ainoa rajoittava tekijä amplitudin kasvulle on vaimennus. Resonanssitaajuuden kohdalla värähtelyn voimakkuus saavuttaa huippunsa ja vaihekulma on muuttunut 90 astetta, ja kun resonanssitaajuus ylitetään, niin vaihekulma on muuttunut 180 astetta (kuva 16). Tavanomaisissa pyörivissä laitteissa, kuten teollisuuspuhaltimissa esiintyvät ominaistaajuudet, joilla ongelmia ilmenee, liittyvät koneiden vaak-, pysty- ja aksiaalisuuntaisiin värähtelyihin. Vääntövärähtelyä ei yleisesti esiinny teollisuuspuhaltimissa, vaan enemmänkin nopeasti pyörivissä koneissa, kuten turbiineissa. (Mikkonen ym. 2009, 302.)



KUVA 16. Resonanssi (Fernandez 2022a)

PSK standardin 5708 (2018, 117) mukaan mikään resonanssitaajuus ei saa sijaita pyörivien laitteiden pyörimisnopeuksien alueella tai sen läheisyydessä. Resonanssitaajuuden ja pyörimistaajuuden ero tulisi olla yleensä vähintään 20 prosenttia. Pyörimistaajuuden toisen harmonisen taajuuden läheisyydessäkään ei ole suotavaa sijaita resonansseja sekä puhaltimien tapauksessa on myös otettava huomioon siipipyörän lapataajuus, joka on pyörimistaajuus kertaa lapojen lukumäärä. (PSK 5708, 2018, 117.)

Teollisuuspuhaltimissa yleisin resonanssin heräte on puhaltimen oma pyörintätaajuus, mutta heräte voi johtua myös muista tekijöistä, kuten esimerkiksi viereisestä pyörivästä koneesta.

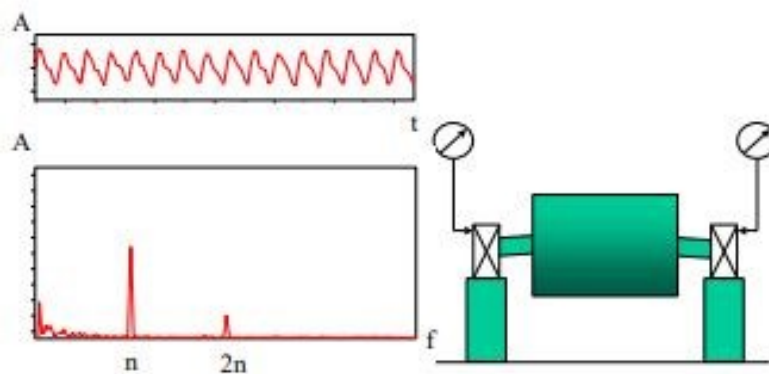
Suorakäyttöisillä sähkömoottoreilla varustetuilla puhaltimilla resonanssin esiintyminen on harvinaisempaa ja liittyy usein rakenteellisten ominaisuuksien muuttumiseen ajan kuluessa. Tämä johtuu useasti rakenteen jäykkyyden muutoksesta, jolloin rakenteen ominaistaajuus voi tulla lähelle resonanssin aiheuttavaa herätettä.

Taajuusmuuttajakäyttöisillä sähkömoottoreilla varustetuissa puhaltimissa resonanssin esiintyminen on yleisempää, koska vaihtuva pyörintätaajuus voi joissain prosessin tilanteissa osua lähelle rakenteen ominaistaajuutta.

5.6 Taipunut akseli

Akselin taipumisen voi aiheuttaa esimerkiksi lämpölaajeneminen tai aksiaalinen ja radiaalinen ylikuormitus. Taipunut akseli ilmenee spektrissä pyörintätaajuudella n . Toisin kuin epätasapainotilassa, mitataan merkittävä akselin suuntainen värähtely pyörintätaajuudella n ja sen harmonisella taajuudella $2n$. Akselin suuntainen värähtely ei liity yksinomaan taipuneen akselin oireisiin, vaan sitä esiintyy myös toiselta puolen tuettujen roottoreiden epätasapainotilanteissa sekä kytkimen tai laakereiden linjausvirhetilanteissa. Vaihekulmamittauksella voidaan varmistaa, onko kyseessä taipunut akseli. Kun vaihekulmamittaus tehdään molemmista laakereista akselin suuntaan, taipuneen akselin tapauksessa vaihe-ero on 180 astetta. (Fernandez 2022c.)

Vaihekulmamittauksessa on huomioitava anturin suunta, joka vaikuttaa vaiheen mittaustulokseen (kuva 17). Mikäli anturit ovat vastakkain toisiinsa nähden, värähtelyt näyttävät olevan samassa vaiheessa, vaikka todellisuudessa vaihe-eroa on 180 astetta. (PSK 5707, 2019, 88.)



KUVA 17. Taipunut akseli (PSK 5707, 2019, 88)

6 PUHALLIN CASE 1: RIKINPOLTTOlaitoksen PALAMISILMAPUHALIN

Tutkimuksen kohteena oli rikinpolttolaitoksen palamisilmapuhallin (kuva 18). Puhaltimen tehtävänä on puhaltaa ilmankuivaustornissa kuivattu palamisilma rikinpolttuuniin, jossa poltetaan puhdasta rikkiä rikkihappotehtaan raaka-aineeksi. Puhallin on teräslevyrunkoinen keskipakoispuhallin, joka on kiinnitetty jäykästi alustaan.



KUVA 18. Rikinpolttolaitoksen palamisilmapuhallin (Heikkinen 2022a)

Palamisilmapuhaltimesta selvitettiin tutkimusta varten oleelliset tiedot, joita hyödynnettiin värähtelyanalysoinnissa. Siipipyörän tiedot selvitettiin etukäteen, koska niitä tarvitaan, mikäli puhaltimessa ilmenisi tasapainotustarvetta (taulukko 6). Tärkein tieto värähtelyanalyysiin pyörivillä laitteilla on pyörimisnopeus, josta saadaan laskettua pyörintätaajuus. Palamisilmapuhaltimen pyörintätaajuus n kaavalla 5 laskettuna oli 49,8 hertsiä.

TAULUKKO 6. Palamisilmapuhaltimen tiedot.

Palamisilmapuhaltimen tiedot	
Puhaltimen tyyppi	Yhdeltä puolelta tuettu roottori
Puhaltimen laakerointi	Öljyvoideltu vierintälaakerointi
Käyttävä laite	1300 kW liukulaakeroitu sähkömoottori
Käyttötyyppi	Kytinkäyttöinen
Kierrosnopeus	2987 RPM vakiokierroksinen
Siipipyörä	16-siipinen suljettu
Siipipyörän halkaisija	1541 mm
Siipipyörän massa	550 kg

6.1 Tutkimus

Tutkimuksessa selvitettiin liikkeenvahvistuskameran toimivuutta palamisilmapuhaltimen värähtelyongelmaan. Värähtelyongelma oli aikaisemmin paikallistettu siipipyörän puoleisen laakerin pyörinnälliseksi väljyydeksi. Tutkimuksella haluttiin selvittää liikkeenvahvistuskameran toimivuus nopeasti pyörivän puhaltimen värähtelyongelmaan, joka esiintyy suhteellisen korkeilla taajuuksilla.

Pyörinnällisen väljyyden toteamiseksi on spektrissä nähtävä pyörintätaajuus n ja vähintään harmoniset taajuudet $2n$ ja $3n$. Puhaltimen pyörintätaajuuden ollessa 49,8 hertsiä oli ylärajataajuuden yllettävä yli 150 hertsiin. Tämän takia tallenteen kuvataajuudeksi asetettiin 320 fps, joten kaavalla 1 laskettuna värähtelyspektrin ylärajataajuus oli 160 hertsiä. Tallenteen kestoksi valittiin 3 sekuntia, jolloin värähtelyspektrin resoluutioksi tuli kaavalla 2 laskettuna 0,33 hertsiä. Näin ollen värähtelyspektrin taajuuskaistaksi tuli 0,33–160 hertsiä ja erottelukyvyyksi 0,33 hertsiä. Kuvataajuuden ollessa 320 fps videokuvan resoluutioksi määräytyi 800×448 , joka pienensi merkittävästi kuvan näkymäkenttää. Tästä syystä ei ollut mahdollista saada videokuva, jossa koko puhallin olisi näkynyt. Kuvaamisessa päätettiin keskittyä laakerointiyksikköön ja osaan puhaltimen kaavusta, jättäen sähkömoottori kokonaan kuvauksen ulkopuolelle.

Käytettäessä näin korkeaa kuvataajuutta sisätiloissa puhallinhuoneen vaihtovirtavalaistus oli sammutettava kuvauksen ajaksi, koska kuvataajuus ei ollut samassa tahdissa valaistuksen pulssinopeuden kanssa. Kohde valaistettiin kuvaukseen LED-valonheittimillä parhaan mahdollisen tuloksen aikaansaamiseksi. Korkea kuvataajuus asetti omat haasteensa kuvan valotukselle, koska kuvan valotusaika on lyhyempi, kuin alhaisemmillä kuvataajuuksilla. Kaikissa kuvauksissa käytettiin $f/2$ aukkosuhdetta, jotta videokuvaan saatiin riittävä kirkkaus analysointia varten, mutta samalla menetettiin syväterävyyttä.

Koska palamisilmapuhallin on kiinnitetty alustaansa jäykästi, puhaltimen värähtely johtuu puhallinhuoneen lattiaan aiheuttaen lattian pystysuuntaista värähtelyä, joka oli otettava huomioon kuvauksen esivalmisteluissa. Kohteen kuvauksessa käytettiin lattian värähtelyn takia passiivisia stabilointityynyjä minimoimaan kameras värähtely kuvauksen aikana.

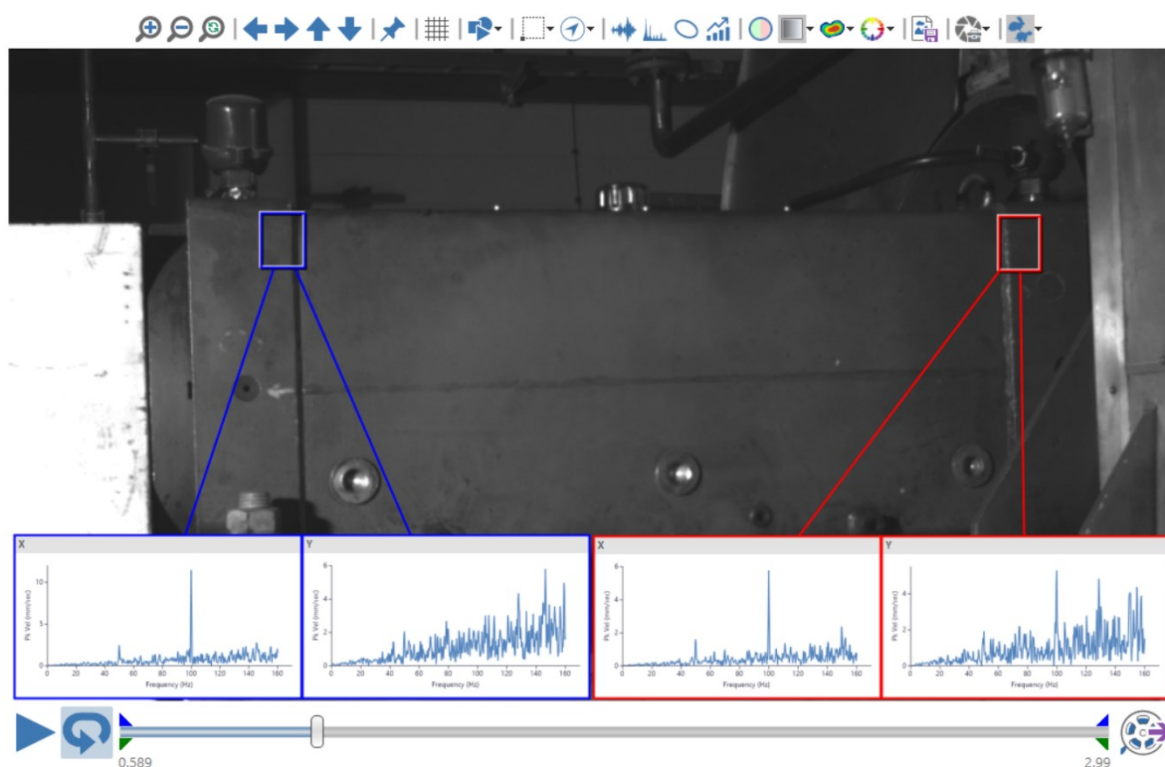
Kohde kuvattiin kahdelta eri etäisyydeltä, kahden ja neljän metrin päästä puhaltimen laakerointiyksikön keskipisteestä mitattuna. Lyhyet kuvausetäisyydet johtuivat puhallinhuoneen pienuudesta, johon puhallin on asennettu. Puhallinhuoneessa puhaltimen vapaalla sivulla oli noin kahden ja puolen metrin verran tilaa, jonne kameras sai aseteltua. Puhaltimen toisella sivulla olisi ollut hieman enemmän tilaa, mutta puhaltimen laakeroinnin voitelukoneikko on sijoitettu sille puolen puhallinta. Voitelukoneikko esti suoran näkymän puhaltimen laakerointiyksikköön. Voitelukoneikossa oli myös runsaasti öljyletkuja, joiden värähtelyn arvioitiin haittaavan videokuvan analysointia ja ROI-alueiden piirtämistä ratkaisevasti. Tästä syystä kuvaus päätettiin suorittaa puhaltimen vapaalta puolen lyhyestä etäisyydestä huolimatta. Kahden metrin etäisyydeltä suoritettu kuvaus oli kohtisuoraan akselilinjaan nähden, käyttäen 6 millimetrin polttovälillä olevaa objektiivia. Neljän metrin kuvaukset suoritettiin takaviistosta noin 60 asteen kulmassa akselilinjaan nähden, käyttäen 6 ja 12,5 millimetrin polttovälillä olevia objektiiveja.

6.2 Analysointi ja tulokset

Analysointi aloitettiin vahvistamalla raakavideota, jotta nähtäisiin, oliko passiivisten stabilointityynyjen käyttäminen poistanut lattian värähtelyn johtumisen kameraan. Raakavideon vahvistuksesta huomattiin, että stabilointityynyjen käyttäminen ei ollut poistanut kaikkea kameran värähtelyä. Näin ollen kuvamateriaalia ryhdyttiin stabiloimaan digitaalisesti. Koko näkymäkentän digitaalinen stabilointi ei tuottanut toivottua tulosta, joten raakavideot stabiloitiin käyttämällä näkymäkentän osittaista stabilointia. Stabiloinnissa näkymäkentästä määritettiin puhaltimen kaikki muut kohdat paitsi laakerointiyksikkö, joiden mukaan stabilointi suoritettiin. Näin saatiin riittävän hyvä lopputulos, vaikkakin kaikkea kameran värähtelyä ei saatukaan poistettua.

Videokuvien kirkkautta säädettiin vielä digitaalisesti analysointivaiheessa, jotta kohteesta saataisiin mahdollisimman kirkas ja selkeä video kuva. Korkean kuvataajuuden takia videokuvat jäivät hieman tummiksi, vaikka kirkkautta voitiinkin lisätä vielä tässä vaiheessa. Kirkkautta ei voinut lisätä digitaalisesti kuitenkaan kovin paljoa, jotta kuvasta ei häviä liikaa kontrastia, joka on siirtymämittausten suorittamisen edellytys. Kuvista saatiin kuitenkin muokattua riittävän hyvät, jotta analysointi voitiin tehdä luotettavasti.

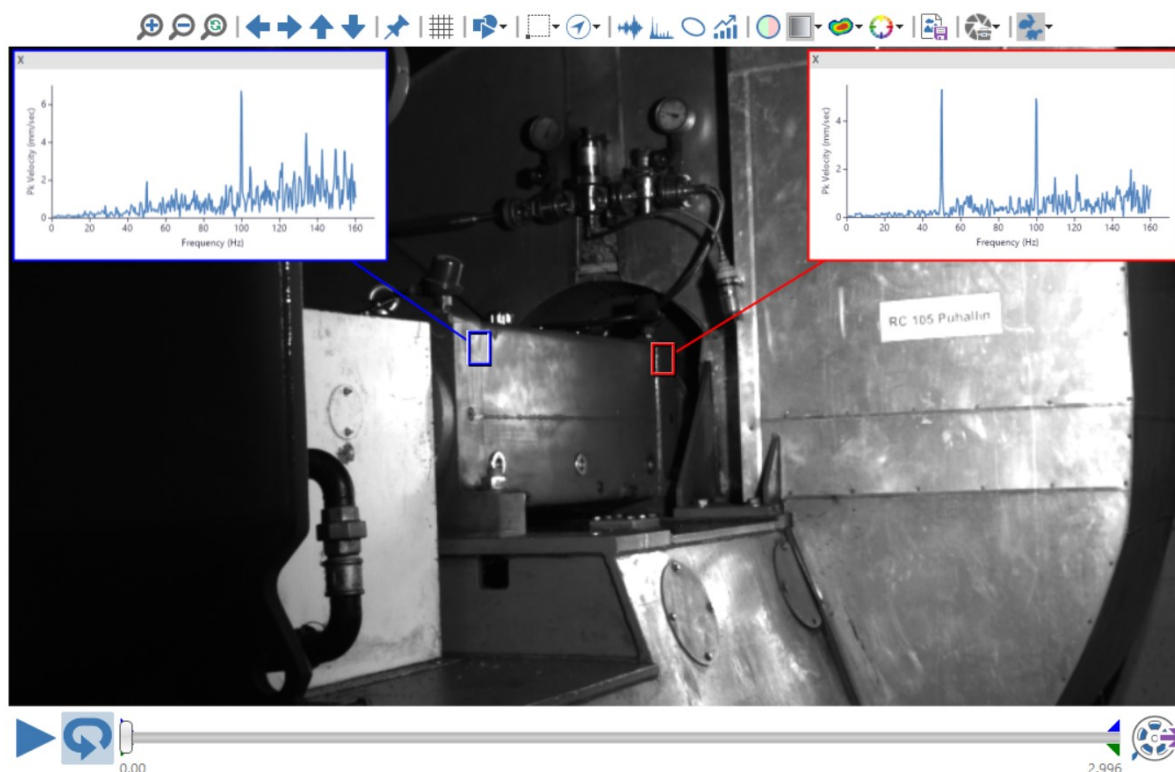
Analysointia jatkettiin piirtämällä ROI-alueet molempien laakereiden kohdalle kohtisuorasti kuvatuun videon näkymäkenttään, joista saatiin X- ja Y-suuntainen värähtelyspektri. Värähtelyspektreistä havaittiin, että X- ja Y-suuntaista värähtelyä ei merkittävästi esiinny puhaltimen pyörintätaajuudella. Tämän avulla voitiin tehdä päätelmä, että puhaltimessa ei esiinny merkittävästi epätasapainoa, kulmalinjausvirhettä, rakenteellista väljyyttä eikä akseli ole taipunut. (Kuva 19.)



KUVA 19. Palamisilmapuhaltimen laakerointiyksikön kohtisuora liikkeenvahvistuskuvaus 6 millimetrin polttovälillä olevalla objektiivilla kahden metrin etäisyydeltä ja X- ja Y-suuntaisen värähtelyn spektrit.

Seuraavaksi analysoitiin takaviistosta kuvattuja videoita, jotta värähtelyspektriin saatiin mukaan puhaltimen laakerointiyksikön vaakasuuntaista värähtelyä. Pystysuuntaista värähtelyä ei tässä vaiheessa enää otettu mukaan analysointiin, koska edellisessä analyysissä todettiin, että pystysuuntaista värähtelyä ei esiinny pyörintätaajuudella.

6 millimetrin polttovälillä olevalla objektiivilla kuvatun videon näkymäkenttään piirrettiin ROI-alueet molempien laakereiden kohdalle, joista havaittiin selkeästi X-suunnassa puhaltimen pyörintätaajuus siipipyörän puoleisen laakerin kohdalta sekä pyörintätaajuuden ensimmäinen harmoninen taajuus $2n$ molempien laakereiden kohdalta. Kytkimen puoleisen laakerin kohdan värähtelyspektristä voitiin todeta, että puhaltimessa ei esiinny säiteislinjausvirhettä. Siipipyörän puoleisen laakerin kohdalta tehtiin vaihe-eroanalyysi laakerointiyksikön ja puhaltimen rungon välillä rakenteellisen väljyyden lopulliseksi poissulkemiseksi. Vaihe-eroanalyysissä piirrettiin uusi ROI-alue puhaltimen runkoon ja verrattiin laakerointiyksikön ja puhaltimen rungon värähtelyn vaihe-eroa. Laakerointiyksikkö ja puhaltimen runko värähtelivät lähes samassa vaiheessa, joten rakenteellinen väljyys voitiin lopullisesti poissulkea. Siipipyörän puoleisen laakerin kohdan värähtelyspektri antoi jo viitteitä siipipyörän puoleisen laakerin pyörinnällisestä väljyydestä. (Kuva 20.)

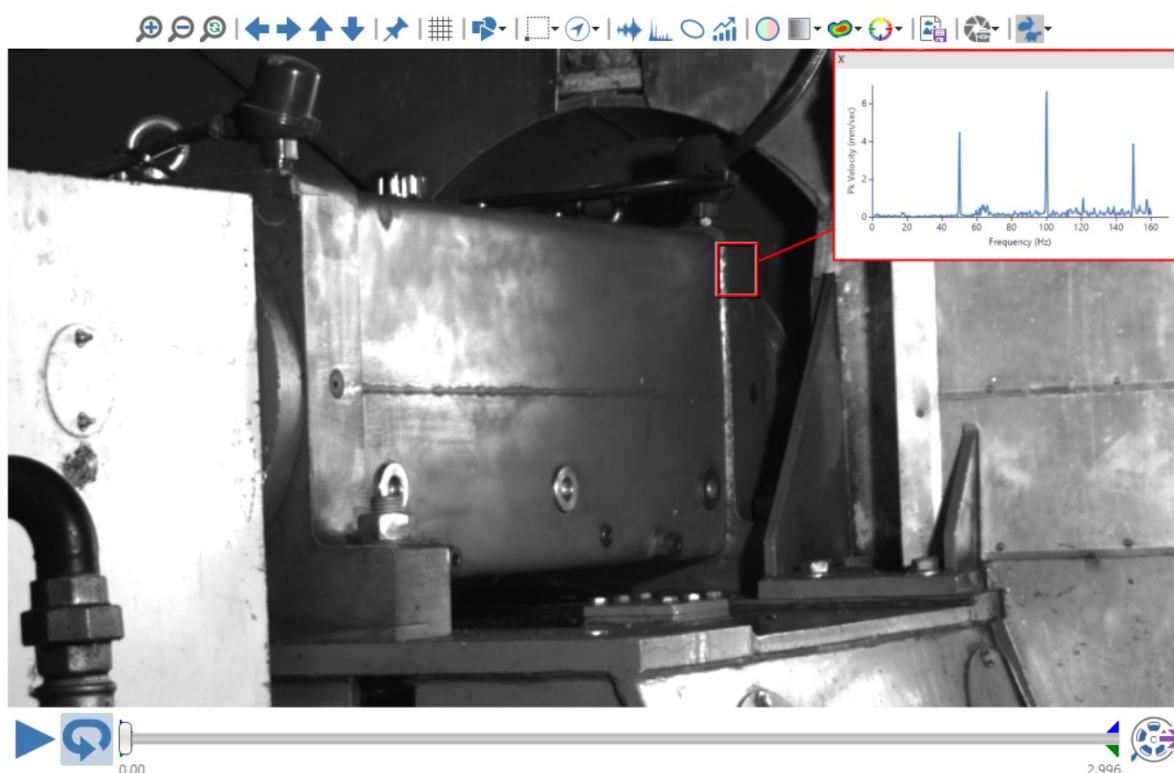


KUVA 20. Palamisilmapuhaltimen takaviisto liikkeen vahvistuskuvauksella 6 millimetrin polttovälillä olevalla objektiivilla neljän metrin etäisyydeltä ja X-suuntaisen värähtelyn spektrit.

Pyörinnällistä väljyyttä alettiin tutkimaan tarkemmin 12,5 millimetrin polttovälillä olevalla objektiivilla takaviistosta kuvatusta videosta. Siipipyörän puoleisen laakerin kohdalla otetusta ROI-alueen X-suuntaisesta värähtelyspektristä havaittiin selkeästi pyörintätaajuus ja harmoniset taajuudet $2n$ sekä

3n. Spektrianalyysin perusteella voitiin todeta, että puhaltimen värähtely johtuu laakerin pyörintäliikkeestä väljyydestä. Aliharmonista taajutta $0,5n$, eikä puoliharmonisia taajuuksia $1,5n$ ja $2,5n$ värähtelyspektristä ei havaittu, joten väljyys ei ole vielä vakavalla tasolla. (Kuva 21.)

Värähtelyn aiheuttajan varmistamiseksi seuraavaksi analysoinnissa käytettiin suodatustoimintoa 12,5 millimetrin polttovälillä kuvattuun videoon, jolla saataisiin tuotua videosta visuaalisesti esille pyörintätaajuuden ja sen harmonisten taajuuksien värähtely. Analysoinnissa käytettiin kaistapäästösuodatinta taajuusalueella 48,5–51,5 hertsiä, jolla saatiin pyörintätaajuudella tapahtuva värähtely vahvistettua. Harmonisten taajuuksien suodatuksessa käytettiin myös kaistapäästösuodatinta alueilla 98,5–101,5 hertsiä ja 148,2–151,2 hertsiä. Suodatuksissa käytettiin kolmen hertsin levyistä kaistasuodatusta, koska värähtelyspektrin taajuuspiikki oli tyvestä hieman leventynyt, jolloin koko taajuusalueen värähtely saataisiin mukaan vahvistettuun videoon. Pyörintätaajuudelle suodatetusta videosta voitiin visuaalisesti havaita värähtely, joka tapahtui X-suunnassa. Harmonisten taajuuksien värähtelyn liikettä ei voitu vahvistaa, koska värähtelyn siirtymät niillä taajuuksilla olivat todella alhaisia. Käytetyistä objektiiveista ja kuvausasetuksista johtuen liikkeen vahvistuksen siirtymän minimiresoluutiot olivat näitä arvoja suurempia.



KUVA 21. Palamisilmapuhaltimen takaviisto liikkeen vahvistuskuvaus 12,5 millimetrin polttovälillä olevalla objektiivilla neljän metrin etäisyydeltä ja X-suuntaisen värähtelyn spektri.

Viitteitä resonanssista ei löydetty yhdestäkään värähtelyspektristä, joten tutkimuksen päätteeksi voitiin todeta, että palamisilmapuhaltimen värähtely johtuu siipipyörän puoleisen laakerin pyörintäliikkeestä väljyydestä.

Pyörinnällinen väljyys esiintyi tässä tapauksessa laakerointiyksikön vaakasuuntaisena värähtelynä, joten värähtelyspektrin, aikataason ja ratakäyrän amplitudit olivat suuntaa antavia, koska niissä oli mukana myös akselin suuntaista värähtelyä. Tästä huolimatta pyörinnällinen väljyys voitiin värähtelyspektrin perusteella varmentaa ja todeta, että väljyys on puhaltimelle haitallisella tasolla, mutta ei vielä vakavalla tasolla. Värähtelyn esiintyminen vaakasuunnassa johtui puhaltimen jäykästä kiinnityksestä alustaansa. Koska puhallin on kiinnitetty jäykästi alustaansa, säteen suuntainen värähtely pääsee tapahtumaan helpoimmin vaakasuunnassa.

6.3 Yhteenveto

Liikkeenvahvistuskameran käyttäminen palamisilmapuhaltimen pyörinnällisen väljyyden selvityksessä osoittautui hyödylliseksi menetelmäksi haasteista huolimatta. Pyörinnällinen väljyys voitiin todeta videokuvasta otetuista värähtelyspektreistä luotettavasti ja poissulkea muut mahdolliset ongelmat. Vahvistetuista videoista selvisi kuinka puhaltimen laakerointi värähtelee. Laakerointiyksikön vaakasuuntaisen värähtelyn amplitudit olivat kuvaussuunnasta johtuen suuntaa antavia, koska siinä oli mukana akselinsuuntaista värähtelyä, mutta tätä ei koettu analyysin lopputuloksen kannalta ratkaisevaksi.

Kameran käyttämisen ensimmäisenä haasteena oli tässä tapauksessa korkea pyörintätaajuus. Korkean pyörintätaajuuden takia kuvataajuudeksi täytyi valita 320 fps, jotta värähtelyspektriin saataisiin pyörintätaajuuden lisäksi harmoniset taajuudet $2n$ ja $3n$, jolloin pyörinnällinen väljyys voitaisiin värähtelyspektristä todeta. Korkea kuvataajuus aiheutti myös haasteita kohteen valotuksessa lyhyen valotusajan sekä syväterävyydessä $f/2$ aukkosuhteen takia. Videokuvasta saatiin kuitenkin digitaalisten kirkkaudensäätötoimintojen avulla riittävän hyvä lopputulos, vaikkakin kuva jäi hieman tummaksi.

Toisena haasteena oli lattian pystysuuntainen värähtely, joka aiheutti kameran värähtelyä kuvauksen aikana. Lattian värähtelyn aiheuttamaa kameran värähtelyä ei saatu poistettua passiivisilla stabilointityynyillä, joten videot oli stabiloitava digitaalisesti. Digitaalinen stabilointikaan ei poistanut kameran värähtelyä kokonaan, mutta kuitenkin riittävästi, että videokuvaan voitiin suorittaa analyysit. Värähtelyspektreissä havaittu pystysuuntainen värähtely ei ollut puhaltimen pyörintätaajuudella, joten voitiin päätellä, että se ei johtunut puhaltimesta, vaan kameran värähtelystä.

7 PUHALLIN CASE 2: FOSFORIHAPPOTEHTAAN JÄTEKAASUPUHALLIN

Tutkimuksen kohteena oli fosforihappotehtaan jätekaasupuhallin (kuva 22). Puhaltimen tehtävänä on poistaa fosforihappotehtaan prosessissa käytetty vesihöyry puhdistuksen jälkeen piippuun. Puhallin on teräslevyrunkoinen keskipakoispuhallin, joka on kiinnitetty värähtelyn vaimennustyynyjen avulla alustaan. Kuvassa 22 näkyvä ritilätaso jätekaasupuhaltimen vieressä on kuitenkin kiinnitetty kiinteästi lattiaan ja puhaltimen runkoon, joka vaikuttaa värähtelyvaimennustyynyjen toimintaan.



KUVA 22. Fosforihappotehtaan jätekaasupuhallin (Heikkinen 2022b)

Jätekaasupuhaltimesta selvitettiin tutkimusta varten oleelliset tiedot, joita hyödynnettiin värähtelyanalysoinnissa. Siipipyörän tiedot selvitettiin etukäteen, koska niitä tarvitaan, mikäli puhaltimessa ilmeni tasapainotustarvetta (taulukko 7). Tärkein tieto värähtelyanalyysiin pyörivillä laitteilla on pyörimisnopeus, josta saadaan laskettua pyörintätaajuus. Jätekaasupuhaltimen pyörintätaajuus n kaavalla 5 laskettuna oli 24,8 hertsiä.

TAULUKKO 7. Jätekaasupuhaltimen tiedot.

Jätekaasupuhaltimen tiedot	
Puhaltimen tyyppi	Yhdeltä puolelta tuettu roottori
Puhaltimen laakerointi	Öljyvoideltu vierintälaakerointi
Käyttävä laite	500 kW vierintälaakeroitu sähkömoottori
Käyttötyyppi	Kytinkäyttöinen
Kierrosnopeus	1490 RPM vakiokierroksinen
Siipipyörä	12-siipinen suljettu
Siipipyörän halkaisija	1722 mm
Siipipyörän massa	411 kg

7.1 Tutkimus

Fosforihappotehtaan jätekaasupuhaltimessa oli ilmennyt värähtelyongelma, joka viittasi siipipyörän epätasapainoon. Epätasapaino aiheuttaa värähtelyä pyörintätaajuudella n niin säteen suunnassa kuin akselin suunnassa. Tutkimuksessa selvitettiin voidaanko liikkeenvahvistuskameralla todentaa siipipyörän epätasapaino ja onko puhaltimessa mahdollisesti jotain muuta ongelmaa, joka voisi aiheuttaa värähtelyn nousua puhaltimessa.

Tässäkin tutkimuksessa värähtelyspektrin ylärajataajuus haluttiin asettaa yli kolme kertaa pyörintätaajuuden, jotta nähtäisiin mahdolliset korkeampien taajuuksien ongelmat ja pyörintätaajuuden harmoniset taajuudet $2n$ ja $3n$. Kohteena olevan puhaltimen pyörintätaajuus tutkimuksen aikana oli 24,8 hertsiä, joten ylärajataajuuden oli yllettävä yli 75 hertsiin. Kuvataajuudeksi valittiin 168 fps, josta saadaan värähtelyspektrin ylärajataajuudeksi kaavalla 1 laskettuna 84 hertsiä. Tallenteen kestoksi valittiin 3 sekuntia, jolloin värähtelyspektrin resoluutioksi tuli kaavalla 2 laskettuna 0,33 hertsiä. Näin ollen värähtelyspektrin taajuuskaistaksi tuli 0,33–84 hertsiä ja erottelukyvyksi 0,33 hertsiä. Kuvataajuuden ollessa 168 fps, videokuvan resoluutioksi määräytyi 1600 x 900, jolloin näkymäkenttä ei pienentynyt merkittävästi. Tämä mahdollisti lähes koko puhaltimen mahdollistamisen videokuvaan. Puhaltimesta otettiin lähes koko puhaltimen kattava yleiskuva, josta voitaisiin päätellä puhaltimen värähtelykäyttäytyminen sekä lähikuvia tarkempia analyysjä varten.

Tässä tutkimuksessa kuvataajuus oli noin puolet pienempi kuin ensimmäisessä tutkimuksessa, mutta kuvataajuus oli kuitenkin eri tahdissa vaihtovirtavalaistuksen pulssitaajuuden kanssa. Tästä syystä puhallinta lähimpänä olevat valaisimet sammutettiin ja kohde valaistiin LED-valonheittimellä kuvauksen ajaksi. Ensimmäistä tutkimusta matalampi kuvataajuus mahdollisti saamaan paremmin valotetun videokuvan, koska valotusaika oli merkittävästi pidempi. Pidemmän valotusajan ansiosta voitiin käyttää aukkosuhdetta $f/4$, joka paransi syväterävyyttä videokuvassa ja videokuvaan saatiin riittävä kirkkaus analysointia varten.

Kohteena oleva puhallin on kiinnitetty alustaansa värähtelyn vaimennustyynyjen avulla, joten puhaltimen värähtely ei johdu tilan lattiaan, johon puhallin on asennettu. Lattian värähtelyä arvioitiin ennen kuvauksen aloittamista ja todettiin lattian olevan erittäin stabiili, joten passiivisten stabilointityynyjen käytölle ei ollut tarvetta.

Kohde kuvattiin kolmelta eri etäisyydeltä, kolmen, neljän ja viiden metrin etäisyydeltä puhaltimen laakerointiyksikön keskipisteestä mitattuna. Kolmen metrin etäisyydeltä kuvattiin kohtisuora kuvaus laakerointiyksikköön nähden 12,5 ja 25 millimetrin polttovälillä olevilla objektiiveilla ja takaviistosta noin 45 asteen kulmassa laakerointiyksikköön nähden 12,5 millimetrin polttovälillä olevalla objektiivilla. Neljän metrin etäisyydeltä tehty kuvaus suoritettiin takaviistosta 12,5 ja 25 millimetrin polttovälillä olevilla objektiiveilla noin 45 asteen kulmassa laakerointiyksikköön nähden. Viiden metrin etäisyydeltä tehty kuvaus suoritettiin takaviistosta noin 30 asteen kulmassa laakerointiyksikköön käyttäen 12,5 millimetrin polttovälillä olevaa objektiivia. Kohteesta olisi haluttu suorittaa kuvaus takaviistosta noin 60 asteen kulmassa laakerointiyksikköön nähden, jotta värähtelyspektriin olisi saatu sisällytettyä enemmän laakerointiyksikön vaakasuuntaista värähtelyä. Tilassa, johon puhallin on asennettu, on betonipilari, joka oli näkymän esteenä 60 asteen kulmassa suoritettavalle kuvaukselle.

7.2 Analysointi ja tulokset

Analysointi aloitettiin vahvistamalla raakavideoita, jotta nähtäisiin, onko kamera värähdellyt kuvauksen aikana, vaikka lattia todettiin stabiiliksi. Raakavideoiden vahvistuksesta todettiin, että kamera ei ollut värähdellyt kuvauksen aikana, joten digitaalista stabilointia ei ollut tarpeen tehdä. Videonkuvan kirkkautta lisättiin hieman, jolloin kohteesta saatiin erittäin hyvälaatuinen kuvamateriaali analysointia varten.

Kohteesta kuvattiin useita videoita erikulmista ja eri objektiiveilla. Nämä esianalysoitiin ja päätettiin käyttää kahta videota värähtelyanalyysissä. Värähtelyanalyysissä käytettiin kolmen metrin etäisyydeltä kohtisuorasti ja takaviistosta 45 asteen kulmassa laakerointiyksikköön nähden 12,5 millimetrin polttovälillä olevalla objektiivilla kuvattuja videoita.

Kohteen värähtelyn analysointi aloitettiin kohtisuorasti kuvatusta videosta, josta saatiin hyvä käsitys puhaltimen akselinsuuntaisesta ja pystysuuntaisesta värähtelystä. Puhaltimen molempien laakereiden kohdalle piirrettiin ROI-alueet, josta saatiin X- ja Y-suuntaiset värähtelyspektrit. Siipipyörän puoleisen laakerin kohdalta saaduista värähtelyspektreistä havaittiin Y-suunnassa korkeaa värähtelyä pyörintätaajuudella ja X-suunnassa taajuudella 68,5 hertsiä. Kytkimen puoleisen laakerin kohdalta erottui korkeimmat värähtelyt pyörintätaajuudella ja värähtelyä 68,5 hertsin taajuudella Y-suunnassa ja X-suunnassa 18,7 ja 68,5 hertsin taajuudella. Tässä vaiheessa voitiin poissulkea linjausvirheet ja pyörinnällinen väljyys, koska pyörintätaajuuden harmonisia taajuuksia ei merkittävästi spektreissä esiintynyt. (Kuva 23.)



KUVA 23. Jätekaasupuhaltimen kohtisuora liikkeenvahvistuskuvaus 12,5 millimetrin polttovälillä olevalla objektiivilla kolmen metrin etäisyydeltä ja X- ja Y-suuntaisen värähtelyn spektrit.

18,7 ja 68,5 hertsin taajuudella tapahtuvat värähtelyt eivät ole puhaltimen pyörintätaajuuden harmonisia taajuuksia, joten seuraavaksi alettiin selvittämään minkälaista liikettä näillä taajuuksilla tapahtuu. Videosta tehtiin kaksi suodatettua videota, joihin käytettiin kaistapäästösuodatusta kaistoilla 17,2–20,2 ja 67–70 hertsiä ja liike vahvistettiin.

Liikkeenvahvistuksesta ei havaittu puhaltimessa juurikaan liikettä taajuudella 68,5 vaan kuva välkkyi, joten voitiin tehdä päätelmä, että spektrissä näkyvä värähtelypiikki ei ole peräisin puhaltimesta, vaan jostakin ulkoisesta lähteestä. Tämä johtui hyvin todennäköisesti siitä, että puhallin on asennettu melko avaraan tilaan ja kohteeseen pääse tehtaan valaistusta ja niiden heijastuksia. Koska 68,5 hertsin värähtelypiikki spektrissä ei ollut peräisin puhaltimesta, sitä ei tämän enempää analysoitu. Liikkeenvahvistuksessa taajuudella 18,7 hertsiä havaittiin X-suuntaista jaksottaista värähtelyä. Värähtelyn suunta ja käyttäytyminen viittaasi vahvasti prosessista tulevaksi värähtelyksi, joka on hyvin todennäköisesti vesihöyryn turbulenttista virtausta. Turbulenttinen virtaus aiheutuu siitä, että puhallin imee vesihöyryn pesurista, joka on voinut olla kuvaushetkellä hieman likaantunut. Värähtelyn amplitudi taajuudella 18,7 hertsiä oli kuitenkin niin pieni, että tämä voitiin hyväksyä ja keskittyä pyörintätaajuudella tapahtuvaan värähtelyyn.

Pyörintätaajuudella tapahtuvan värähtelyn analysointia varten kohtisuoraan kuvattuun videoon käytettiin kaistapäästösuodatinta kaistalla 23,5–26,5 hertsiä, jolla saatiin esiin pyörintätaajuudella tapahtuva värähtely. Suodatetusta videosta ja värähtelyspektristä alettiin selvittämään mistä värähtely johtuu. Värähtelyspektreistä havaittiin korkeaa Y-suuntaista värähtelyä pyörintätaajuudella ja vai-
meaa X-suuntaista värähtelyä pyörintätaajuudella. (Kuva 24.)



KUVA 24. Jätekaasupuhaltimen kohtisuora pyörintätaajuudelle suodatettu liikkeenvahvistuskuvaus 12,5 millimetrin polttovälillä olevalla objektiivilla kolmen metrin etäisyydeltä ja X- ja Y-suuntaisen värähtelyn spektrit.

Akselin suuntainen värähtely pyörintätaajuudella viittaa epätasapainoon tai taipuneeseen akseliin. Tämän takia akselin suuntaisiin värähtelyihin suoritettiin vaihe-eroanalyysi, josta havaittiin molempien ROI-alueiden kohdalla olevan värähtelyn olevan samassa vaiheessa. Tämän ansiosta voitiin päätellä, että puhaltimen akseli ei ole taipunut ja värähtely johtuu epätasapainosta.

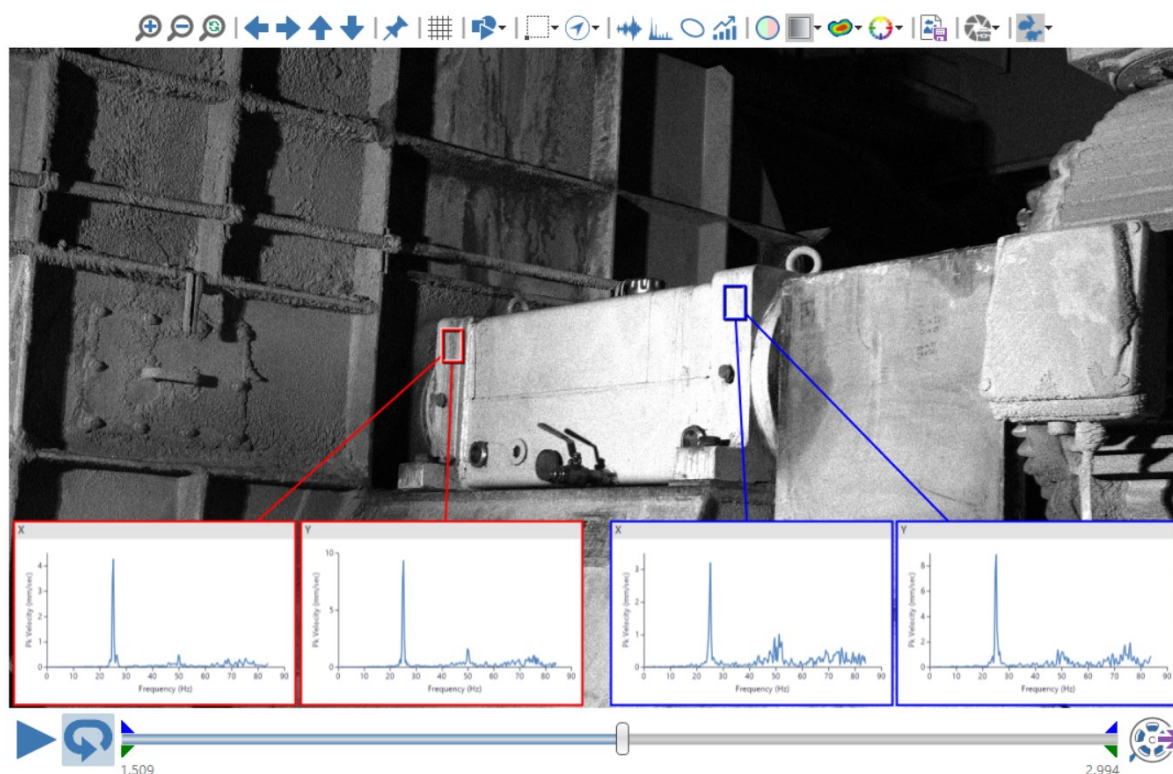
Pystysuuntainen värähtely pyörintätaajuudella viittaa epätasapainoon, mutta voi olla myös rakenteellisesta väljyydestä johtuvaa. Värähtelyn aiheuttajan vahvistamiseksi suoritettiin vaihe-eroanalyysi laakerointiyksikön ja puhaltimen rungon välillä. Vaihe-eroanalyysissä piirrettiin uudet ROI-alueet puhaltimen runkoon ja verrattiin laakerointiyksikön ja puhaltimen rungon värähtelyn vaihe-eroa. Tällä tavalla voitiin erottaa, onko värähtely peräisin epätasapainosta vai rakenteellisesta väljyydestä. Vaihe-eroanalyysin perusteella voitiin varmuudella poissulkea rakenteellinen väljyys, koska laakerointiyksikön ja puhaltimen rungon pystysuuntaiset värähtelyt olivat samassa vaiheessa.

Tässä vaiheessa analyysiä kaikki viittasi siipipyörän epätasapainoon, joten tutkimuksessa tehtiin lisäanalysointi takaviistosta kuvatusta videosta, jotta mukaan saataisiin puhaltimen laakerointiyksikön vaakasuuntaista värähtelyä. ROI-alueet piirrettiin molempien laakereiden kohdalle, josta saatiin X- ja Y-suuntaiset värähtelyspektrit. Värähtelyspektreistä havaittiin, että puhaltimen pyörintätaajuus oli läsnä kaikissa värähtelyspektreissä. Pyörintätaajuus erottui selvästi X- ja Y-suunnan värähtelyspektreissä siipipyörän puoleisen laakerin kohdalla ja Y-suunnan värähtelyspektrissä kytkimen puoleisen laakerin kohdalla. Tämä viittasi entistä enemmän epätasapainoon. Siipipyörän puoleisissa värähtelyspektreissä oli läsnä myös 68,5 hertsin taajuuspiikit, jotka oli jo aiemmin todettu tulevan jostain ulkoisesta lähteestä. (Kuva 25.)



KUVA 25. Jätekaasupuhaltimen takaviisto liikkeen vahvistuskuvaus 12,5 millimetrin polttovälillä olevalla objektiivilla kolmen metrin etäisyydeltä ja X- ja Y-suuntaisen värähtelyn spektrit.

Siipipyörän epätasapainon lopulliseksi varmistamiseksi suoritettiin suodatus takaviistosta kuvattuun videoon käyttäen kaistapäästösuodatusta kaistalla 23,5–26,5 hertsiä. Suodatetusta videosta otetuista värähtelyspektreistä havaittiin, että puhaltimen pyörintätaajuudella tapahtuva värähtely on voimakkaampaa Y-suunnassa kuin X-suunnassa. Värähtelyn suuntautuminen enemmän Y-suuntaan varmistettiin visuaalisesti käyttämällä liikkeenvahvistusta, jolla asiaan saatiin varmistus. (Kuva 26.)



KUVA 26. Jätekaasupuhaltimen takaviisto pyörintätaajuudelle suodatettu liikkeenvahvistuskuvaus 12,5 millimetrin polttovälillä olevalla objektiivilla kolmen metrin etäisyydeltä ja X- ja Y-suuntaisen värähtelyn spektrit.

Viitteitä resonanssista ei löydetty tässäkin tutkimuksessa yhdestäkään värähtelyspektristä, joten resonanssi voitiin lopuksi myös poissulkea värähtelyn aiheuttajista. Epätasapaino ilmenee pyörintätaajuudella säteen ja akselin suuntaisesti, joten voitiin varmuudella todeta, että jätekaasupuhaltimen värähtely johtuu siipipyörän epätasapainosta

Siipipyörän epätasapainon esiintyminen enemmän pystysuuntaisesti johtui jätekaasupuhaltimen kiinnityksestä alustaan. Jätekaasupuhallin on kiinnitetty alustaan värähtelyn vaimennustyynyjen avulla, jolloin epätasapainosta johtuva värähtely pääsee tapahtumaan sekä vaakasuunnassa, että pystysuunnassa. Tässä kyseisessä tapauksessa värähtely oli selkeästi voimakkaampaa pystysuunnassa, joka selittyy sillä, että puhaltimen vieressä oleva ritilätaso on kiinnitetty kiinteästi puhaltimen runkoon ja lattiaan. Kiinteästi asennettu ritilätaso vaimentaa vaakasuuntaista värähtelyä ja sallii enemmän pystysuuntaista värähtelyä, aiheuttaen puhaltimen keinumista epätasapainon voiman takia.

7.3 Yhteenveto

Liikkeenvahvistuskamera osoittautui tässä tapauksessa erittäin toimivaksi työkaluksi matalamman pyörintätaajuuden takia. Kohteen valaistuksen kanssa ei ollut ongelmia pidemmän valotusajan ansiosta ja kohteesta saatiin todella hyvälaatuiset videomateriaalit, joista voitiin suorittaa värähtelyanalyysi luotettavasti.

Värähtelyongelman selvityksessä voitiin luotettavasti tunnistaa värähtelyjen suunnat ja käyttäytymisen ja paikallistaa paikat, joissa värähtelyä esiintyy eniten. Siipipyörän epätasapaino saatiin selvitettyä poissulkemalla muut mahdolliset värähtelyn aiheuttajat ja lopuksi voitiin varmuudella todeta, että värähtely johtuu siipipyörän epätasapainosta. Laakerointiyksikön pystysuuntaisen pyörintätaajuudella tapahtuvan värähtelyn spektrin, aikataason ja ratakäyrän amplitudeja voitiin pitää lähellä todellisia, koska kuvaus oli suoritettu kohtisuorasti laakerointiyksikköön nähden. Laakerointiyksikön vaakasuuntaisen värähtelyn amplitudit olivat suuntaa antavia, koska siinä oli mukana myös akselin suuntaista värähtelyä. Pystysuuntaisen värähtelyn spektrin ja amplitudien perusteella voitiin todeta, että siipipyörän epätasapaino on puhaltimelle haitallisella tasolla.

Värähtelyspektrin ylärajataajuus nostettiin tässäkin tutkimuksessa yli kolme kertaa pyörintätaajuuden, jotta voitiin nähdä pyörintätaajuuden harmonisia taajuuksia, sekä muita korkeampia taajuuksia. Matalamman pyörintätaajuuden takia värähtelyspektrin ylärajataajuutta ei tarvinnut nostaa kovin korkealle, joka nostaisi myös videon kuvataajuutta korkeaksi, joten se ei luonut haasteita kuvaamisen suhteen. Kuvauksissa voitiin käyttää $f/4$ aukkosuhdetta ja valotusaikakin oli paljon pidempi alemman kuvataajuuden ansiosta. Nämä mahdollistivat tarkan ja hyvälaatuisen kuvamateriaalin hankkimisen, josta pystyttiin tekemään luotettava värähtelyanalyysi ja osoittamaan värähtelyn aiheuttaja.

8 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää teorian ja käytännön avulla liikkeenvahvistuskameran hyödyntämistä värähtelyanalysoinnissa. Teoriassa käsiteltiin tärkeimmät liikkeenvahvistuskameran ominaisuudet, jotka edesauttavat hyvän lopputuloksen saavuttamista. Käytännön esimerkeissä kuvattiin kaksi eri nopeudella pyörivää ja eri tavalla alustaansa kiinnitettyä teollisuuspuhallinta. Näistä puhaltimista kuvatuista kuvamateriaaleista saatiin vertailukohtia liikkeenvahvistuskameran käyttämisestä ja soveltuvuudesta Yara Siilinjärven teollisuuspuhalltimien värähtelyongelmien selvityksessä.

8.1 Tulosten vertailu ja yhteenveto

Molemmista case-tutkimuksesta saatiin luotettavat värähtelyanalyysit suoritettua, vaikkakin palamisilmapuhaltimen tutkimuksessa oli enemmän haasteita, kuin jätekaasupuhaltimen tutkimuksessa. Palamisilmapuhaltimen tutkimuksesta teki haasteellisen korkea pyörintätaajuus, kun muistetaan, että värähtelymittaukset suoritetaan liikkeenvahvistuskameralla siirtymämittauksena, joka soveltuu parhaiten matalataajuisien värähtelyjen mittaukseen. Lattian värähtely palamisilmapuhaltimen tapauksessa oli myös haasteena hyvän lopputuloksen aikaansaamiseksi, mutta stabilointityökalun käytön ansiosta kuvamateriaalista saatiin riittävän hyvä, jotta analysointi voitiin suorittaa. Jätekaasupuhaltimen tapauksessa ei ilmennyt mitään kuvauksellisia haasteita, joten tästä voitiin vetää johtopäätös, että kuvattavan kohteen ympäristön stabiilisuuden tarkastaminen on tärkeää tehdä ennen videomateriaalin keräyksen aloittamista. Palamisilmapuhaltimen korkeampi pyörintätaajuus vaikeutti myös riittävän valotuksen saamista, jotta kuvattavasta kohteesta saataisiin riittävän kirkas kuva analysointia varten. Motion Amplification-ohjelmassa on kuitenkin hyvät kuvan kirkkauden säätömahdollisuudet, jolla kuvan kirkkautta voitiin lisätä jälkikäteen, jolloin saatiin riittävän hyvä lopputulos.

Palamisilmapuhaltimen värähtelyanalyysistä löydettiin värähtelyongelma, joka oli aiheuttanut puhaltimen kokonaisvärähtelyn nousua. Ongelma voitiin luotettavasti osoittaa siipipyörän puoleisen laakerin pyörinnälliseksi väljyydeksi. Pyörinnällinen väljyys ei vielä ollut vielä vakavalla tasolla, koska aliharmonista taajuutta eikä puoliharmonisia taajuuksia värähtelyspektreissä havaittu. Liikkeenvahvistuksella voitiin hyvin havaita laakerointiyksikön vaakasuuntainen värähtely pyörintätaajuudella, jolla värähtelyn siirtymä oli suurinta. Harmonisten taajuuksien värähtelyä ei voitu vahvistaa, koska ne olivat siirtymänä mitattuna todella alhaisia. Harmonisten taajuuksien siirtymäarvot olivat liikkeenvahvistuksen siirtymän minimiresoluution alapuolella, joten siitä syystä niiden liikettä ei voitu vahvistaa.

Jätekaasupuhaltimen värähtelyanalyysissä erottui todella selvästi siipipyörän epätasapaino, joka oli aiheuttanut puhaltimen kokonaisvärähtelyjen nousua. Matalamman pyörintätaajuuden ansiosta kohteen valotus ei osoittautunut haasteeksi, vaan kohteesta saatiin todella hyvälaatuinen kuvamateriaali, jota ei tarvinnut juurikaan jälkikäteen käsitellä analysointia varten. Värähtelyn siirtymätkin olivat suuremmat johtuen joustavasta kiinnityksestä alustaan, joten liikkeenvahvistuksen kanssa ei ollut mitään haasteita ja kaikki liike saatiin vahvistettua visuaalisesti näkyville.

Kun verrattiin näitä kahta tutkimusta, voitiin todeta, että liikkeenvahvistuskamera soveltui paremmin jätekaasupuhaltimen analyysin suorittamiseen kameran ominaisuuksista ja alemmasta pyörintätaajuudesta johtuen.

8.2 Loppupäätelmät

Liikkeenvahvistuskamera osoittautui näissä tutkimuksissa hyväksi työkaluksi värähtelyanalysoinnissa ja värähtelyn visualisoinnissa. Samasta kuvamateriaalista voitiin tehdä useita värähtelymittauksia sekä vaihekulma-analyysyjä piirtämällä ROI-alueet haluttuihin paikkoihin. Kuvamateriaalista värähtelykäyttäytyminen voitiin visuaalisesti todentaa ja tarkastella värähtelyn liikettä niiltä osin mikä pystyttiin vahvistamaan.

Tutkimuksessa selvisi myös, että liikkeenvahvistuskameran käytölle on tiettyjä rajoitteita, joita havaittiin palamisilmapuhaltimen tutkimuksen yhteydessä. Nämä rajoitteet olivat korkea pyörintätaajuus, lattian värähtely sekä ahdas kuvauspaikka. Kuvauspaikkojen ahtauden ja puhaltimen suuren koon takia objektiivien käyttömahdollisuudet olivat rajalliset, joten liikkeenvahvistuksen siirtymän minimiresoluutiot olivat mittauksissa liian korkeat, jotta pienimmät liikkeet olisi saatu vahvistettua. Tästä syystä pyörintätaajuuden harmonisia taajuuksia ei voitu vahvistaa. Tämä ei osoittautunut lopputuloksen kannalta merkittäväksi, koska vaihekulma-analyysillä voitiin todentaa, että värähtely tapahtuu vaakasuunnassa, kuten pyörintätaajuuden värähtely. Lattian värähtely aiheutti sen, että kuvamateriaaliin jouduttiin käyttämään digitaalista stabilointia, joita tehtiin useampi kappale ennen kuin saatiin riittävä lopputulos. Korkean pyörintätaajuuden takia jouduttiin käyttämään korkeaa kuvataajuutta, joka loi haasteita kuvan valotukselle ja tästä syystä videomateriaalin näkymäkenttä jäi hieman tummaksi ja syväterävyyttä menetettiin. Jätekaasupuhaltimen tutkimuksessa ei havaittu mitään rajoitteita värähtelyanalyysin suorittamiseksi alhaisemman pyörintätaajuuden, lattian stabiilisuuden ja avaramman tilan ansiosta.

Molemmissa tapauksissa jouduttiin sammuttamaan tehdastilojen vaihtovirtavalaistus, koska kuvataajuus ei ollut kummassakaan tutkimuksessa samassa tahdissa valaistuksen pulssinopeuden kanssa. Tämä sinällään ei ollut rajoite hyvän kuvamateriaalin hankkimiseksi, mutta se lisäsi hieman datan keräykseen käytettävää aikaa, koska lisävalaistuksia jouduttiin asettelemaan riittävän valaistuksen aikaansaamiseksi.

Jotta puhaltimien laakerointiyksiköiden vaakasuuntaisen värähtelyn saisi tarkasti mitattua, puhallin täytyisi kuvata puhaltimen yläpuolelta, joka ei ole työturvallisuusnäkökulmasta katsottuna kovinkaan suositeltavaa, saatikka edes mahdollista. Tästä syystä kohteen vaakasuuntaisen värähtelyn analysoinnissa analysoijan täytyy osata soveltaa mittaustuloksia ja ymmärtää puhaltimien värähtelykäyttäytyminen, koska kuvaus on suoritettava takaviistosta ja värähtelyyn tulee mukaan myös akselin suuntaista värähtelyä. Näissä tutkimuksissa jäykästi alustaan kiinnitetyn palamisilmapuhaltimen värähtely oli suurinta vaakasuunnassa, kun taas joustavasti kiinnitetyn jätekaasupuhaltimen värähtely oli suurinta pystysuunnassa, mutta siinä esiintyi värähtelyä myös vaakasuunnassa.

Liikkeenvahvistuskameran käyttö ei korvaa perinteistä kiihtyvyyssanturilla tehtävää värähtelyanalyysiä, vaan nämä kaksi erilaista mittaus- ja analysointitapaa tukevat toisiaan. Kohteen värähtelyongelman selvityksen aluksi onkin tarpeen pohtia, kuinka ongelmaa lähdetään selvittämään ja käytetäänkö selvityksessä liikkeenvahvistuskameraa vai kiihtyvyyssanturilla suoritettavaa mittausta. Varsinkin kohteissa, joissa värähtelyn siirtymä on alhaista, on syytä mitata värähtelyn siirtymä kiihtyvyyssanturilla etukäteen, jotta voidaan päättää onko liikkeenvahvistuksen käytölle edellytyksiä ja oli-

siko se ylipäättään järkevin tapa tehdä värähtelyanalyysi. Objektivi ja kuvausetaisyys asettavat rajoitteen siirtymän minimiresoluution muodossa liikkeenvahvistuskameran käytölle kohteissa, joissa kuvausmahdollisuudet ovat rajalliset kohteen koon ja tilan takia. Mikäli värähtelyn siirtymät ovat alhaisella tasolla ja kohde on kovin suuri, voi liikkeenvahvistuksen siirtymän minimiresoluutio nousta niin suureksi, että kohteen värähtelyä ei saada vahvistettua ihmissilmällä havaittavalle tasolle. Tämä ei kuitenkaan poissulje värähtelyanalyysin toteuttamista, koska kohteesta saadaan tehtyä värähtelyanalyysi, vaikkakin värähtelyliikettä ei voida vahvistaa. Tästä syystä tällaisissa tapauksissa onkin pohdittava etukäteen tarvitaanko liikkeenvahvistusta vai riittääkö värähtelyanalyysi, josta voidaan vaihekulma-analyysillä todentaa liikkeen suunta.

Tutkimusten loppupäätelmänä voitiin todeta, että liikkeenvahvistuskamera on hyödyllinen työkalu värähtelyanalysoinnin ja havainnollistamisen toteuttamiseksi, kunhan ymmärtää sen mahdollisuudet ja rajoitukset. Liikkeenvahvistuskamera on parhaimmillaan kohteissa, joissa värähtely tapahtuu matalilla taajuuksilla ja värähtelyn siirtymä on kohtuullisen suurta. Liikkeenvahvistuskameran käyttämisen mahdollisuus kiihtyvyyssanturilla tehtävän värähtelyanalyysin kanssa antaa analysoijalle parhaan mahdollisen lähtökohdan tutkimuksen kohteena olevan laitteen tai rakenteen värähtelyongelman selvittämiseksi riippumatta värähtelytaajuudesta. Mikäli värähtely tapahtuu korkeilla taajuuksilla, joissa siirtymä on pientä, kiihtyvyyssantureilla tehtävä analyysi on parempi tapa tehdä analyysi ja mikäli värähtely tapahtuu matalilla taajuuksilla, joissa siirtymä on suurempaa, on parempi tapa analyysin suorittamiseksi liikkeenvahvistuskamera.

Lisäksi tutkimuksissa selvisi liikkeenvahvistuskameran vahvuus vaihekulma-analyysin suorittamiseen. Puhaltimista voitiin tehdä useita eri värähtelysuuntiin olevia vaihekulma-analyysejä samasta videomateriaalista, joilla voitiin poissulkea eri värähtelyn aiheuttajia ja selvittää onko rakenteissa esimerkiksi väljyyttä tai vääntyilyä. Tämä on erinomainen ominaisuus erilaisten runkorakenteiden värähtelyongelmien selvityksessä ja etenkin sellaisten, joissa on paljon rajapintoja. Tällaisista rakenteista voidaan hyvin havaita eri vaiheessa värähtelevät komponentit.

Liikkeenvahvistuskameran ehdoton vahvuus, joka tuli case-tutkimusten analysoinnissa ilmi, oli visuaalisuus. Liikkeenvahvistuksen avulla voitiin helposti päätellä värähtelykäyttäytymistä ja analysoida värähtelyn suuntia. Visuaalisesti esitettävä värähtely on myös erinomainen tapa esittää laitteen värähtely analyysin tilaajalle, joka saa varmasti paremman käsityksen laitteen värähtelystä kuin pelkäänsä värähtelyn aikatasoja, spektrejä tai ratakäyriä katsomalla. Tämä antaa analysoijalle paremman mahdollisuuden tuoda esille laitteen tai rakenteen värähtely henkilölle, joka ei välttämättä niin hyvin ymmärrä värähtelyanalysointia.

Pohdittaessa kumpaa menetelmää käytetään kohteen värähtelyongelman selvityksessä on otettava huomioon molempien menetelmien hyvät ja huonot puolet, turvallisuusnäkökulmia unohtamatta. Laitteen tai rakenteen sijainti voi esimerkiksi tulla kysymykseen menetelmää valittaessa, koska luokse päästävyys on olennaista kiihtyvyyssanturilla tehtävässä analyysissä. Tämä siitä syystä, että kiihtyvyyssanturi tulee kiinnittää mitattavaan kohteeseen. Liikkeenvahvistuskameralla tehtävässä analyysissä esteeksi voi muodostua laitteen tai rakenteen sijainti sellaisessa paikassa, jonne ei ole esteetöntä näkymää. Tämä estää kohteen videokuvaamisen. On siis erityisen tärkeää pohtia etukäteen kumpaa menetelmää käyttää parhaan mahdollisen lopputuloksen saavuttamiseksi.

8.3 Jatkokehitysmahdollisuudet

Liikkeenvahvistuskameran käytölle on tulevaisuudessa monia potentiaalisia kohteita ympäri Yara Siilinjärven toimipaikan tehtaita ja kaivosta. Kameraa voidaan hyödyntää niin pyörivien laitteiden kuin staattisten rakenteiden värähtelyongelmien selvityksessä, joita puhaltimien lisäksi ovat esimerkiksi

- putkistot
- pumput
- sekoittimet
- pyörivien laitteiden tukirakenteet.

Putkistovärähtelyjen selvitys on perinteisellä kiihtyvyyssanturilla suoritettuna todella aikaa vievä prosessi, koska putkistot sijaitsevat yleensä korkealla, joten mittauksiin tarvitaan joko telineitä tai henkilönostinta. Liikkeenvahvistuskameralla putkistot tai niiden osia voidaan kuvata kauempaa, joka on merkittävästi nopeampi ja kustannustehokkaampi tapa suorittaa värähtelyanalyysi. Toinen haaste kiihtyvyyssanturilla tehtävässä analyysissä on putkistojen materiaali ja lämpöeristyksen, koska kiihtyvyyssanturi kiinnitetään kohteeseen magneetin avulla. Iso osa Yara Siilinjärven putkistoista on ei-magneettista materiaalia, joten kiihtyvyyssanturin kiinnitys magneetilla ei ole mahdollista. Lämpöeristysten päällä käytetään alumiinilevyä, johon myöskään magneetti ei tartu. Liikkeenvahvistuskameraa käytettäessä tätä ongelmaa ei ole, koska menetelmä on täysin kosketukseton.

Pumppujen värähtelykäyttämisen selvityksessä liikkeenvahvistuskamera on hyvä työkalu, koska verrattuna puhaltimiin, pumppujen pyörintäaajuudet ovat alhaisempia kuin puhaltimien, joten kohteista saadaan hyvälaatuiset videomateriaalit. Pumpuissa esiintyy hieman erilaisia värähtelyongelmia kuin puhaltimissa ja värähtelyn aiheuttaja on hyvin usein rakenteellinen. Liikkeenvahvistuskameralla voidaan helposti ja nopeasti havaita sekä paikallistaa pumppujen rakenteelliset ongelmakohdat, joita voivat olla halkeamat pumppujen betoniperustuksissa, ratkeamat pumppujen teräsrakenteissa tai löystyneet ruuviliitokset.

Yara Siilinjärvellä on lukuisia nesteiden sekoittimia, jotka on asennettu joko säiliön tai reaktorin päälle teräsrakenteisiin. Sekoittimet pyörivät todella alhaisilla pyörintäaajuuksilla, joten kiihtyvyyssanturilla tehtävä värähtelyanalyysi on erittäin haasteellinen. Joidenkin reaktoreiden päälle asennettujen sekoittimien värähtelyanalyysi on myös lähes mahdoton suorittaa kiihtyvyyssantureilla, koska reaktoreiden päällä oleminen tuotannon käynnissä ollessa on turvallisuussyistä kielletty. Liikkeenvahvistuskameralla värähtelyanalyysin tiedonkeruu voidaan suorittaa turvallisen välimatkan päästä kohteesta. Sekoittimien värähtelyt liittyvät usein sekoittimen lapojen likaantumiseen, jolloin lapoihin tarttuu sekoitettavan nesteen mukana olevaa kiintoainetta, tai teräsrakenteiden ratkeamiin sekä vääntäilyyn. Liikkeenvahvistuskameralla suoritettua värähtelyanalyysistä voidaan havaita mil-laisesta ongelmasta on kyse ja paikallistaa esimerkiksi teräsrakenteen ratkeamat.

Pyörivillä laitteilla on hyvin usein jonkinlaisia tukirakenteita. Esimerkiksi vaihdelaatikoissa, jotka asennetaan suoraan käytettävän laitteen akselille on momenttituki, joka on kiinnitetty kiinteästi joko laitteen omaan runkoon tai erilliseen tukipisteeseen. Momenttituet ovat niveltankoja, joten näiden nivelten kuluminen voi aiheuttaa ylimääräistä värähtelyä ja liikettä. Liikkeenvahvistuksen avulla pystytään havaitsemaan ja kohdentamaan värähtelyn aiheuttaja.

8.4 Lopuksi

Opinnäytetyön tekeminen tuki ammatillista kehittymistäni liikkeenvahvistuskameran käyttämisessä värähtelyanalysoinnissa. Teoriatiedon opiskelu antoi suuren määrän tietoja, jota voin hyödyntää tulevaisuudessa värähtelyongelmien ratkaisemissa, koska opin ottamaan huomioon oikeita asioita liikkeenvahvistuskameran käyttämisestä. Työn edetessä aloin ymmärtämään paremmin, että värähtelyanalysointia voidaan suorittaa myös toisenlaisella menetelmällä kuin perinteisellä kiihtyvyyssanturilla suoritettulla mittauksella ja päästä yhtä hyvään lopputulokseen.

Käytännön tutkimusten suorittaminen ja teorian yhdistäminen onnistui case-tutkimuksissa hyvin ja teollisuuspuhaltimista saatiin selvitettyä värähtelyn aiheuttajat. Case-tutkimuksista opittiin ottamaan huomioon liikkeenvahvistuskameran mahdollisuudet ja rajoitukset värähtelyn analysoinnissa. Tämä auttaa tulevaisuudessa valitsemaan tutkimuksen kohteena olevan laitteen tai rakenteen värähtelyongelman selvitykseen oikean menetelmän, joka on paras vaihtoehto kulloiseenkin tilanteeseen, jotta kohteen värähtelyongelma voidaan selvittää ja ratkaista kustannustehokkaasti.

LÄHTEET

- Aditya Drier Tech Private Limited 2022. What is a Centrifugal Blower and How It Works?. Verkkojulkaisu. <https://www.adityadrier.com/what-is-a-centrifugal-blower-and-how-it-works/>. Viitattu 9.8.2022.
- Dust Control Systems Oy julkaisuaika tuntematon. Keskipakoispuhaltimen huolto- ja käyttöohje. Versio 3.6. Verkkojulkaisu. https://www.dcs.fi/uploads/D0kYo2jn/Keskipakoispuhallin_huolto_ja_kytt_ohje_3.7.pdf. Viitattu 28.7.2022.
- Fernandez, Alfonso 2022a. Detection and elimination of resonance. Power-MI. Verkkojulkaisu. <https://power-mi.com/content/detection-and-elimination-resonance>. Viitattu 6.6.2022.
- Fernandez, Alfonso 2022b. Looseness. Power-MI. Verkkojulkaisu. <https://power-mi.com/content/looseness>. Viitattu 19.7.2022.
- Fernandez, Alfonso 2022c. Bent shaft. Power-MI. Verkkojulkaisu. <https://power-mi.com/content/bent-shaft>. Viitattu 20.7.2022.
- Heikkinen, Henry 2022a. Rikinpolttolaitoksen palamisilmapuhallin. Valokuva 19.8.2022. Siilinjärvi: Yara Suomi Oy, Siilinjärven toimipaikka.
- Heikkinen, Henry 2022b. Fosforihappotehtaan jätekaasupuhallin. Valokuva 25.8.2022. Siilinjärvi: Yara Suomi Oy, Siilinjärven toimipaikka.
- Hi-Speed Industrial Service 2022. The benefits of motion amplification vs standard vibration. Verkkojulkaisu. <https://www.gohispeed.com/the-benefits-of-motion-amplification-vs-standard-vibration/>. Viitattu 17.7.2022.
- Hue & Hatchet 2022. What is the Focal Plane?. Verkkojulkaisu. <https://hueandhatchet.com/what-is-the-focal-plane/>. Viitattu 18.7.2022.
- Mikkonen, Henry, Jantunen, Erkki, Miettinen, Juha, Leinonen, Pertti, Kautto, Juha & Lumme, Veli Erkki 2009. 13. Diagnostiikka. Teoksessa Mikkonen Henry (toim.) Kuntoon perustuva kunnossapito. Käsikirja. Kunnossapidon julkaisusarja 13. Kerava: Savion kirjapaino, 281–368.
- Noria Corporation 2022. Motion Amplification Technology: A New Perspective on Vibration. Verkkojulkaisu. <https://www.reliableplant.com/Read/32033/motion-amplification-technology-a-new-perspective-on-vibration>. Viitattu 18.7.2022.
- Our Education 2022. Centrifugal Blowers & Fans. Verkkojulkaisu. <https://blog.oureducation.in/centrifugal-blowers-fans/>. Viitattu 10.8.2022.
- PSK 5701, 2022. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Käsitteet ja määritelmä. Käytettävät suureet ja mittayksiköt. PSK-käsikirja 3. Helsinki: PSK Standardointiyhdistys ry.
- PSK 5704. 2013. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Vastaanottotarkastus ja tärinärasitusrajat. PSK-käsikirja 3. Helsinki: PSK Standardointiyhdistys ry.
- PSK 5707. 2019. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Vianmääritys. PSK-käsikirja 3. Helsinki: PSK Standardointiyhdistys ry.
- PSK 5708. 2018. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Rakenteelliset värähtelyominaisuudet. PSK-käsikirja 3. Helsinki: PSK Standardointiyhdistys ry.
- RDI Technologies 2019. IRIS M Training Manual version 2.4. Verkkojulkaisu. <https://rditechnologies.com/wp-content/uploads/2019/01/Basic-Iris-M-V2.4.pdf>. Viitattu 15.6.2022.
- RDI Technologies 2021. Motion Amplification User's Manual version 3.3.1. Päivitetty 28.9.2021.

Republic Manufacturing 2022. Centrifugal blowers. Verkkojulkaisu. <https://www.republic-mfg.com/blowers/centrifugal-blowers.asp>. Viitattu 10.8.2022.

RMS Ltd 2021. Motion Amplification Technology. Verkkojulkaisu. <https://rms-reliability.com/motion-amplification/#tab-id-4>. Viitattu 5.6.2022.

Yara 2021. Yara Integrated Report 2021. Verkkojulkaisu. <https://www.yara.com/siteassets/investors/057-reports-and-presentations/annual-reports/2021/yara-integrated-report-2021.pdf/>. Viitattu 28.5.2022.

Yara 2022a. Suomen ensimmäinen lannoitetuottaja. Verkkojulkaisu. <https://www.yara.fi/tietoa-yarasta/yara-suomi/historia/>. Viitattu 28.5.2022

Yara 2022b. Yaran toimipaikat Suomessa. Verkkojulkaisu. <https://www.yara.fi/tietoa-yarasta/yara-suomi/toimipaikat/>. Viitattu 28.5.2022.

Yara 2022c. Yara Siilinjärvi. Verkkojulkaisu. <https://www.yara.fi/tietoa-yarasta/yara-suomi/toimipaikat/siilinjarvi/>. Viitattu 29.5.2022.

Yara 2022d. Yara Siilinjärvi. Tehtaat ja kaivos. Verkkojulkaisu. <https://www.yara.fi/tietoa-yarasta/yara-suomi/toimipaikat/siilinjarvi/tuotantolaitos/>. Viitattu 29.5.2022.

Yara International ASA 2022. Yara's Legacy. Verkkojulkaisu. <https://www.yara.com/this-is-yara/our-history/>. Viitattu 28.5.2022.

LIITE 1. LASKENNALLISET SIIRTYMÄN MINIMIRESOLUUTIOT MIKRONEISSA

Siirtymän minimiresoluutiot laskettuna kaavalla 4 kaikille käytössä oleville objektiiveille kuvausetäisyydellä 1–20 metriä.

Kuvausetäisyys (m)	Polttoväli (6 mm)	Polttoväli (12,5 mm)	Polttoväli (25 mm)	Polttoväli (50 mm)	Polttoväli (100 mm)
1	20,83 µm	10,00 µm	5,00 µm	2,50 µm	1,25 µm
2	41,67 µm	20,00 µm	10,00 µm	5,00 µm	2,50 µm
3	62,50 µm	30,00 µm	15,00 µm	7,50 µm	3,75 µm
4	83,33 µm	40,00 µm	20,00 µm	10,00 µm	5,00 µm
5	104,17 µm	50,00 µm	25,00 µm	12,50 µm	6,25 µm
6	125,00 µm	60,00 µm	30,00 µm	15,00 µm	7,50 µm
7	145,83 µm	70,00 µm	35,00 µm	17,50 µm	8,75 µm
8	166,67 µm	80,00 µm	40,00 µm	20,00 µm	10,00 µm
9	187,50 µm	90,00 µm	45,00 µm	22,50 µm	11,25 µm
10	208,33 µm	100,00 µm	50,00 µm	25,00 µm	12,50 µm
11	229,17 µm	110,00 µm	55,00 µm	27,50 µm	13,75 µm
12	250,00 µm	120,00 µm	60,00 µm	30,00 µm	15,00 µm
13	270,83 µm	130,00 µm	65,00 µm	32,50 µm	16,25 µm
14	291,67 µm	140,00 µm	70,00 µm	35,00 µm	17,50 µm
15	312,50 µm	150,00 µm	75,00 µm	37,50 µm	18,75 µm
16	333,33 µm	160,00 µm	80,00 µm	40,00 µm	20,00 µm
17	354,17 µm	170,00 µm	85,00 µm	42,50 µm	21,25 µm
18	375,00 µm	180,00 µm	90,00 µm	45,00 µm	22,50 µm
19	395,83 µm	190,00 µm	95,00 µm	47,50 µm	23,75 µm
20	416,67 µm	200,00 µm	100,00 µm	50,00 µm	25,00 µm