

Paperitehtaan paineilmavuotojen havainnointi akustisella kameralla

Tiivistelmä

Tekijä(t) Leino, Santeri	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK Sivumäärä 37	Valmistumisaika 2022
Työn nimi Paperitehtaan paineilmavuotojen havainnointi akustisella kameralla		
Tutkinto Insinööri (AMK)		
Toimeksiantajan nimi, titteli ja organisaatio Vesa Pesu, Kunnossapitopäällikkö, UPM Communication Papers Oy		
Tiivistelmä <p>Paineilman käyttö teollisuudessa on todella yleistä ja nykyään lähes jokaisessa tehtaassa on oma paineilmajärjestelmä. Paineilmajärjestelmien ilmavuodot ovat väistämättömiä ja ne tuovat ylimääräisiä kustannuksia. Kaukaan paperitehtaalle hankittiin akustinen kamera kunnossapidon työkaluksi paineilmavuotojen havainnointiin. Akustisen kameran toiminta perustuu äänen visualisointiin näkyväksi kuvaksi. Paineilmavuotojen havainnointi akustisella kameralla ei ole vielä yleistynyt teollisuuden kunnonvalvonnassa, eikä sen käytöstä ole kattavasti tietoa saatavilla.</p> <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli todentaa akustisella kameralla saatavat hyödyt paineilmajärjestelmän vuotojen kartoituksessa ja arvioida siitä syntyvät säästöt Kaukaan paperitehtaalle. Työssä tutkittiin kameran ominaisuuksia ja käytettävyyttä tehdasympäristössä. Tehtaan paineilmavuodot etsittiin suurimmaksi osaksi tuotannon prosessin ollessa pois päältä.</p> <p>Työn teoriaosuudessa käytiin läpi paineilmajärjestelmän perusteita ja akustisen kameran toimintaa. Tieteellisiä julkaisuja etsittiin pääasiassa LUT-tiedekirjastosta ja Google Scholar -hakupalvelun kautta. Paineilmajärjestelmän aineisto on kerätty pääasiassa teollisuuden paineilmaa käsittelevistä kirjallisuuksista.</p> <p>Työn lopputuloksena voidaan todeta akustisen kameran hyödyn olevan merkittävä vuotojen havainnoinnissa. Kamera toimi tehdasympäristössä lähes moitteetta, kovasta taustamelusta huolimatta. Paineilmavuotojen löytäminen akustisen kameran avulla on huomattavasti tehokkaampaa verrattuna yleisimpiin vuotojen havainnointimenetelmiin. Tarkempi paineilmavuotojen kustannusten laskeminen vaatisi jatkotutkimusta, jossa kuvattaisiin kaikki paperitehtaan alueiden vuodot tuotannon ollessa käynnissä.</p>		
Asiasanat paineilmavuoto, akustinen kamera, paperitehdas		

Abstract

Author(s) Leino, Santeri	Type of Publication Thesis, UAS	Published 2022
	Number of Pages 37	
Title of Publication Detection of compressed air leaks in a paper mill with an acoustic camera		
Name of Degree Engineer (UAS)		
Name, title and organization of the client Vesa Pesu, Maintenance Manager, UPM Communication Papers Ltd.		
Abstract <p>The use of compressed air in industry is very common and nowadays almost every factory has its own compressed air system. Air leaks in compressed air systems are unavoidable and bring additional costs. An acoustic camera was purchased for the Kaukas paper mill as a maintenance tool to detect compressed air leaks. The acoustic camera works by visualising sound as a visible image. The use of an acoustic camera for the detection of air leaks is not yet widespread in industrial maintenance monitoring and there is no comprehensive information available on its use.</p> <p>The aim of the thesis was to verify the benefits of the acoustic camera in the detection of leaks in the compressed air system and to estimate the savings for the Kaukas paper mill. The thesis investigated the features and usability of the camera in a factory environment. Most of the compressed air leaks in the mill were detected while the production machines were shut down.</p> <p>The theoretical part of the thesis covered the basics of the compressed air system and the operation of the acoustic camera. Scientific publications were mainly located in the LUT research library and Google Scholar. The material on compressed air systems was mainly collected from the literature on industrial compressed air.</p> <p>As a result of this work, I show significant benefits associated with using an acoustic camera to observe leaks. The camera worked almost flawlessly in the factory environment, despite the high amount of background noise. The detection of compressed air leaks using the acoustic camera is significantly more efficient than the most common leak detection methods. A more accurate calculation of the cost of compressed air leaks would require a further study to photograph all leaks in all areas of the paper mill while production is running.</p>		
Keywords compressed air leak, acoustic camera, paper mill		

Sisällys

1	Johdanto.....	1
2	UPM-Kymmene Oyj.....	2
3	Paineilmajärjestelmä.....	3
3.1	Paineilma.....	3
3.2	Paineilman tuottaminen	3
3.2.1	Kompressori	4
3.2.2	Säiliöt ja paineilmaverkko	5
3.2.3	Ilman kuivaus ja puhdistus.....	6
3.2.4	Toimilaitteet ja venttiilit.....	6
4	Kaukaan paineilmajärjestelmä	10
4.1	Kompressorit ja kuivaimet.....	10
4.2	Paineilmaverkko ja säiliöt.....	11
4.3	Ohjaus	13
5	Paineilman käyttökohteet paperitehtaalla.....	14
5.1	Hiomo	14
5.2	Paperikone	15
5.3	Päällystyskoneet.....	15
5.4	Jälkikäsittely	16
5.5	Muut paineilman käyttökohteet	19
6	Akustinen kamera	20
6.1	Yleistä.....	20
6.2	Noiseless Acoustics NL Camera.....	21
7	Kustannukset ja säästökohteet	27
7.1	Energiakustannukset	27
7.1.1	Kompressoreiden ja kuivainten energiankulutus	27
7.1.2	Jäähdytysvesikustannukset	27
7.1.3	Huoltokustannukset	28
7.2	Paineilmavuodot ja kustannukset.....	28
7.3	Paineilman muut säästökohteet.....	33
8	Yhteenveto ja pohdinta	34
	Lähteet	36

Liitteet

Liite 1. Paineilman energiakustannukset

Liite 2. Kompressoreiden jäähdytysveden kustannukset

Liite 3. Paperitehtaan kompressoreiden energian kustannukset tammi-huhtikuu 2022

Liite 4. Arvio paperitehtaan paineilmavuodoista ja niiden kustannuksista

1 Johdanto

Tämä opinnäytetyö tehdään UPM Communication Papers Kaukaan paperitehtaalle. Paineilmaa käytetään paperitehtaalla prosessin toimilaitteissa ja kunnossapidon työkalujen yhtenä voimanlähteenä. Paineilman käyttökohteita on paljon, joten paineilmaverkon on oltava myös laaja. Tehtaan laajan paineilmaverkon vuoksi paineilmalinjoihin ja toimilaitteisiin voi tulla toisinaan vuotoja. Tuotannon koneiden kovan melun vuoksi paineilmavuotoja ei välttämättä havaita, ennen kuin jokin toimilaitte lakkaa kokonaan toimimasta. Paineilmavuodot ja niiden löytäminen muodostuu tässä tapauksessa ongelmaksi.

Työn tarkoituksena on todentaa akustisen kameran hyöty paineilmajärjestelmän vuotojen havainnoinnissa ja tehtaan kunnossapidon yhtenä työkaluna. Tarkoituksena on myös saada tehtaan paineilmavuodoista aiheutuva arvio kustannuksista.

Opinnäytetyössä käsitellään paineilmaa ja sen käyttökohteita, sekä akustisen kameran ominaisuuksia ja toimintaa tehdasympäristössä. Paperitehtaan laajojen alueiden vuoksi työ on rajattu jälkikäsitteilyn, päällystyskoneiden, paperikoneen ja hiomon alueille. Tutkimuslaitos, laboratorio, pastakeittiö ja katolla sijaitsevat tuloilmakojeet ovat jätetty käsittelemättä opinnäytetyössä.

2 UPM-Kymmene Oyj

UPM-Kymmene on yksi maailman johtavia metsätalousyhtiöitä, jonka liiketoiminta keskittyy erilaisiin papereihin, tarramateriaaleihin sekä puutuotteisiin. Tuotantolaitoksia 12 maassa ja työntekijöitä yhteensä noin 17000. Yhtiön liikevaihto on noin 9,8 miljardia euroa. (UPM 2022a.)

UPM Communication Papers on UPM-Kymmene Oyj:n toiseksi suurin liiketoiminta-alue ja maailman johtava graafisten papereiden valmistaja. Tuotevalikoima sisältää papereita, jotka soveltuvat mainontaan ja julkaisuun sekä koti- ja toimistokäyttöön. Yhtiön pääkonttori on Saksassa, ja paperitehtaat sijaitsevat Suomessa, Saksassa, Isossa-Britanniassa, Itävallassa ja Yhdysvalloissa. Tehtaita on yhteensä 13 ja työntekijöitä on noin 6400 henkilöä. Liiketoiminta-alueen liikevaihto on 3577 milj.€ ja tuotantokapasiteetti on 6,1 miljoonaa tonnia. (UPM 2022b.)

UPM Kaukasin paperitehdas on perustettu vuonna 1975 ja se sijaitsee Lappeenrannassa, Kaukaan tehdasintegraatissa (kuva 1). Tehdasalueella tuotetaan sellua, aikakauslehtipapereita, sahatavaraa, kehittyneitä biopolttoaineita ja energiaa uusiutuvista raaka-aineista.



Kuva 1. UPM Kaukaan tehdasintegraatti (UPM 2017.)

Kaukaan tehdasintegraatissa työskentelee yhteensä noin 1000 työntekijää, joista 230 paperitehtaalla. Kaukaan paperitehtaan tyypillisiä asiakkaita ovat painotalot ja kustantajat.

3 Paineilmajärjestelmä

3.1 Paineilma

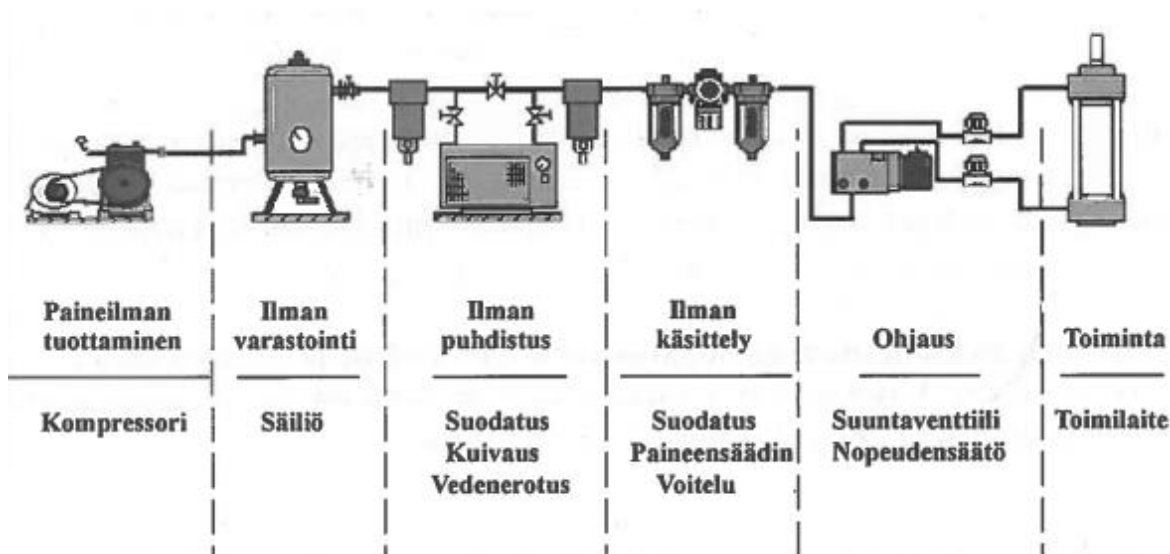
Paineilma on ihmiselle vaarattomin energiamuoto. Se on ylipaineistettua ilmaa, joka on kiineettisesti tai staattisesti kokoon puristettu haluttuun paineeseen. Ylipaineistetun ilman painetta verrataan normaaliin ilmakehän aiheuttamaan paineeseen. Paineilman käyttö on yleistä ja sitä on alettu käyttää teollisuudessa jo 1800-luvun loppupuolella. Yleisimmin sitä käytetään erilaisten toimilaitteiden kuten sylintereiden, palkeiden ja muiden toimilaitteiden liikkeiden luomiseen. Paineilmalla voidaan myös siirtää hienojakoisia aineita paikasta toiseen, kuten hiekkapuhalluksessa ja maalauksessa. Monet teollisuuden kunnossapidon työkaluista ovat paineilmakäyttöisiä. (Keinänen & Kärkkäinen 2005, 21, 35–36.)

Paineilmalla on kyky tehdä työtä, joka mahdollistaa toimilaitteiden liikkeet tai työkalujen käytön. Työkykyä nimitetään exergiaksi. Exergialla tarkoitetaan sitä mekaanisen energian määrää, joka paineilmalla enintään voidaan tuottaa ilman paisuessa takaisin alkutilaansa eli imuilman paineeseen ja lämpötilaan. Paineilman exergia riippuu paineesta ja lämpötilasta, jotka lisäävät exergiaa. Paineilmalaitteissa on erilaisia laitehäviöitä, jotka pahimmillaan voivat vähentää koko exergian määrän. Paineilman ja ympäristön sisäinen energia vähenee aina tuotetun mekaanisen energian määrällä. (Airila ym. 1983, 15.)

Paineilman etuina ovat nopeiden liikkeiden mahdollisuus, puhtaus, komponenttien edullisuus ja järjestelmän helppo muunneltavuus, verrattuna vastaaviin energialähteisiin, kuten sähköön ja hydraulikkaan. Paineilman rajoituksina voidaan pitää turvallisuussyistä alhaisena pidettävää käyttöpainetta, yleensä 4–10 baaria, kokoonpuristumisesta johtuvaa epätarkkuutta ja kokonaisjärjestelmän alhaista hyötysuhdetta. (Keinänen & Kärkkäinen 2005, 36.)

3.2 Paineilman tuottaminen

Paineilmajärjestelmä on aina kokonaisuus, joka muodostuu yhteensopivista osista, kuten paineilmakompressoreista, kuivaimista, suodattimista, säiliöistä, toimilaitteista ja aikaisemmat osat yhdistävästä paineilmaverkosta (kuva 2). Jokaisella paineilmajärjestelmän osalla on oma tehtävänsä, ja ne ovat riippuvaisia toistensa toiminnasta. (Ellman ym. 2002, 41.)



Kuva 2. Paineilmajärjestelmä (Ellman ym. 2002, 10.)

Järjestelmän osien valinnassa lähtökohtana ovat kulutuskohteiden asettamat vaatimukset, joita ovat paineilman tuotto, kulutus ja laatu, sekä käytettävä työpaine. Laajennettavuus ja käyttövarmuus ovat myös tärkeitä vaatimuksia paineilmajärjestelmää suunniteltaessa. Paineilmajärjestelmiä käytetään yleensä tehtaissa ja tuotantolaitoksissa, joissa paineilman kulutus on suuri. (Ellman ym. 2002, 41.)

3.2.1 Kompressor

Ilman paineen kohottamaksi tarkoitettua laitetta kutsutaan kompressoriksi silloin, kun saatettava loppupaine on vähintään kaksinkertainen imupaineeseen verrattuna. Pienillä paineilla ilman puristus tapahtuu yksivaiheisena, jolloin kompressorissa puristus tapahtuu kerralla haluttuun paineeseen. Korkeimmilla paineilla puristus tehdään vaiheittain, joka eliminoi lämpörasituksia. Puristusvaiheiden väliin sijoitetaan usein jäähdyttimiä viilentämään puristuksessa lämmennyt ilma. Kompressoreilta vaadittava loppupaine vaihtelee käyttötarkoituksen mukaan. Pienenempiä paineita kehittäviä laitteita kutsutaan puhaltimiksi tai ahtimiksi, joiden käyttökohteet eroavat kompressoreihin verrattuna. Kompressoreiden tuotot määrät vaihtelevat muutamista litroista tuhansiin kuutiometriin minuutissa. Kompressoreiden tuotto ilmoitetaan tilavuusvirtana, jonka yleisimmät yksiköt ovat l/min tai m³/h. (Keinänen & Kärkkäinen 2005, 25–26.)

Kompressorityyppejä on rakenteeltaan monenlaisia. Yleisimpiä ovat mäntä-, lamelli-, ja ruuvikompressorit. Mäntäkompressorissa ilma imetään imuventtiilin kautta kompressorin, josta

se puristetaan paineventtiin kautta painesäiliöön tai monivaiheisissa kompressoreissa seuraavaan puristusvaiheeseen. Yksivaiheisella mäntäkompressorilla päästään 10 baarin paineeseen, mutta monivaiheisella mäntäkompressorilla loppupaine voi olla jopa 1000 baaria. (Keinänen & Kärkkäinen 2005, 26, 28–29.)

Lamelli- eli siipikompressorissa on sylinterimäinen pesä, jossa on epäkeskeisesti laakeroitu ja säteittäisesti uritettu roottori. Siivet liikkuvat roottorin urissa ja niiden väliin jää kammioita, joissa ilma siirtyy imupuolelta painepuolelle. Lamellikompressorissa ei ole samalla tavalla imu- eikä paineventtiileitä, kuten mäntäkompressorissa. Lamellikompressorin etuina ovat alhainen melutaso, pitkäikäisyys ja helppo huollettavuus. (Keinänen & Kärkkäinen 2005, 30.)

Ruuvikompressorit ovat yleisiä isoissa tehtaissa, joissa tarvitaan kompressoreilta suurta tuottoa. Ruuvikompressoreissa ei ole lamellikompressorin tavoin imu- tai paineventtiilejä, vaan ilma kulkee sisään kompressorin imuaukosta ja poistuu paineaukosta ulos. Ilman puristus tapahtuu ruuvi- ja luistiroottorin väliin jäävissä urissa. Roottoreiden ulko- ja päätypintojen tiivistys tapahtuu ympärillä olevalla pesällä. Mäntäkompressoreihin verrattuna ruuvikompressorilla tuotettu ilma on sykkeetöntä ja sen tuottaminen on hiljaisempaa. Ruuvikompressoreiden tuottoa voidaan säädellä käyttömootorin pyörimisnopeudella, rajoittamalla imuvirtausta tai kierrättämällä painevirtausta takaisin imupuolelle. (Keinänen & Kärkkäinen 2005, 27.)

Kompressoreiden laskennallinen hyötysuhde on yleisesti huono. Puristettu ilma kuumenee, jonka jälkeen se jäähdytetään. Puristetussa ilmassa oleva vesi tiivistyy ja se poistetaan jälkijäähdyttimien avulla. Suurin osa energiasta poistuu lämpönä kompressorin ympäristöön ja jäähdytysveden mukana viemäriin. Paineilman puristuksesta saatavaa lämpöä voidaan hyödyntää sijoittamalla paineilma-keskus ympäristöön, jossa ympäristön ilman lämpeneminen on suotavaa. (Ellman ym. 2002, 41.)

3.2.2 Säiliöt ja paineilma-verkko

Jokaiseen paineilmajärjestelmään kuuluu yksi tai useampia paineilmasäiliöitä. Säiliöiden tilavuus määräytyy kompressorikapasiteetin säätöjärjestelmän ja ilmantarpeen vaihtelujen mukaan. Säiliöt voivat sijaita paineilmajärjestelmässä heti kompressoreiden jälkeen ennen ilmankuivainta tai vasta niiden jälkeen, jolloin säiliöön ei kerry niin helposti kosteutta. Paineilmasäiliön yhtenä tehtävänä on tasoittaa mahdolliset kompressorin aikaansaamat ilmasykykset ja toimittaa järjestelmään ilmaa tasaisemmalla paineella. Paineilmasäiliöt jäähdyttävät myös ilmaa, jolloin säiliöiden pohjalle kertyy lauhdevettä. (Keinänen & Kärkkäinen 2005, 31.)

Paineilmaverkon tehtävänä on viedä ilma paineilmasäiliöltä erilaisille toimilaitteille ja paineilmapisteille. Paineilmaputkisto kulkee usein tehtaan seinä- tai kattorakenteissa, riippuen tilan korkeudesta, verkon rakenteesta ja ilmapisteiden sijoittelusta. Monet kunnossapidon työkalut ovat paineilmakäyttöisiä, joten niitä käyttäessä on paineilmaa oltava saatavilla työkohteen lähistöllä. Paineilma johdetaan runkoputkesta jakeluputkien avulla toimilaitteille ja ilmapisteisiin. (Ellman ym. 2002, 59.) Paineilmapisteitä on oltava yleensä useita, jotta paineilmakäyttöisten työkalujen käyttö on mahdollista ympäri tehdasta. Laaja paineilmaverkko toimii säiliön kaltaisena paineilman varastona. Isoissa tehtaissa pelkät paineilmaverkon runkoputkistot voivat lisätä paineilmajärjestelmän tilavuutta kymmenillä kuutiometreillä. Putkiston halkaisijat ovat riippuvaisia ilman määrästä, työpaineesta, putkiston pituudesta sekä mahdollisista painehäviöistä. Paineilmaputkistoa ei saa ikinä alimitoitaa. (Keinänen & Kärkkäinen 2005, 67.)

3.2.3 Ilman kuivaus ja puhdistus

Paineilma sisältää monia epäpuhtauksia, mutta niistä ongelmallisimman on vesi, joka kulkee kompressorin läpi ilmapuhtautuksen mukana. Ilmapuhtaus on käsite, joka kuvaa vesihöyryn määrää ilmapuhtautuksessa. Paineeseen puristetun ilman suhteellinen kosteus lisääntyy, jonka vuoksi ilmapuhtautusta pienennetään siihen tarkoitetuilla kuivaimilla. Kesällä ilmapuhtaus on yleensä huomattavasti suurempi kuin talvella. Paras tapa poistaa vettä paineilmapuhtautuksesta on oikea ennaltaehkäisy ja kuivaimien käyttö. Ellei kuivainta ole, on järjestelmässä oltava vedenerottimia, jotka pienentävät mahdollista jäämisvaaraa ja parantavat voitelua kaikkina vuodenaikoina, koska kondenssi- eli lauhdevesi ei pääse huuhtelemaan öljykalvoa. (Keinänen & Kärkkäinen 2005, 21).

Käyttäessä paineilmaa alhaisemmissa lämpötiloissa on kuivaukseen valittava tehokas menetelmä. Paineilma voi myös jäähtyä liikaa virtausnopeuden kasvaessa. Tehokas ja usein teollisuudessa käytetty kuivausmenetelmä on adsorptiokuivaus. Kuivattava paineilma kulkee vettä sitovan adsorptioaineen läpi, joka poistaa suurimman osan ilman sisältämästä vesihöyrystä. Tyypillisessä adsorptiokuivaimessa on kaksi kuivauskolonna, joiden toimintaa jaksotellaan vuorotellen automatiikan avulla. Adsorptiokuivaimella päästään jopa -80°C kastepisteeseen. Yleisesti paineilman kuivaamisella saadaan lisättyä paineilmakoneiden ja laitteiden kestoikää ja niiden korjausten tarve vähenee. (Keinänen & Kärkkäinen 2005, 33–34.)

3.2.4 Toimilaitteet ja venttiilit

Toimilaitteita on paljon erilaisia ja ne soveltuvat eri käyttökohteisiin. Paineilmajärjestelmän toimilaitteet muuttavat paineilman energian mekaaniseksi liikkeeksi, joka on yleensä

suoraviivaista tai pyörivää. Pneumaattisia toimilaitteita käytetään yleensä nopeutta vaativissa liikkeissä. Yleisimmät toimilaitteet ovat kalvotoimilaite ja sylinteritoiminen toimilaite (kuva 3). (Ellman ym. 2002, 88–89.)



Kuva 3. Paineilmasyylinteri (Kuva: Santeri Leino)

Kaksitoiminen sylinteri on yleisin sylinterityyppi. Nimensä mukaisesti sylinterin työliikkeet toimivat molempiin suuntiin. Erilaisten paineilmasyylinterien yhdistävä tekijä on suoraviivainen edestakainen liike. Paljesylinterit ovat kumista valmistettuja sylinterin kaltaisia toimilaitteita. Paljesylinterin etuna on suuri voima pienellä rakennepituudella. Paljesylinterit mahduttavatkin todella pieneen väliin, kun ne eivät ole paineistettuna (kuva 4). Tavalliset paineilmasyylinterit eivät voi ilman lisälaitteita käsitellä kuormia, kohdistavat sylinteriin vääntävää tai leikkaavaa kuormitusta. Paineilmasyylintereihin kohdistuva vääntävä kuormitus kuluttaa sylinterin laakerointia ja tiivisteitä. Tätä ongelmaa ei ole paljesylinterissä. (Ellman ym. 2002, 96.)



Kuva 4. Paljesylinteri kasaan puristettuna (Kuva: Santeri Leino)

Automaattisten sulkuventtiileiden toimilaitte on usein helposti nähtävillä. Kuvassa 5 toimilaitte on venttiilikokonaisuuden sininen osa. Pneumaattisille toimilaitteille yhteinen tekijä on kuormasta riippuva liikenopeus. Raskaampi kuorma toimilaitteella hidastaa liikenopeutta. Toimilaitteilta saatavan voiman tai vääntömomentin suuruutta voi muuttaa säätämällä toimilaitteelle tulevan ilman painetta. (Ellman ym. 2002, 88.)



Kuva 5. Automaattiventtiili (Kuva: Santeri Leino)

Venttiileiden avulla ohjataan paineilmalla toimivia järjestelmiä. Venttiilit sijaitsevat painelähteen ja toimilaitteen välissä. Suuntaventtiilit, virta- ja vastaventtiilit, sekä paineventtiilit ovat yleisimmät venttiilityypit. Suuntaventtiileillä ohjataan ilmavirta toimilaitteiden eri kammioihin ja toisten venttiileiden sisäänmenoliitäntöihin, joilla saadaan aikaan toimilaitteiden suunnan ohjaus ja paineilmasignaalin hallinta. Toimilaitteiden nopeutta säädetään virtaventtiileillä, rajoittamalla ilmavirran nopeutta. Paineventtiileiden avulla säädetään toimilaitteiden voima ja vääntömomentti, asettamalla järjestelmälle sopiva painetaso. (Ellman ym. 2002, 75.)

4 Kaukaan paineilmajärjestelmä

4.1 Kompessorit ja kuivaimet

Paineilmajärjestelmä on erittäin tärkeä osa paperitehtaan toimintaa. Ilman paineilmaa tehtaan prosessi ei toimi. Kokonaisuuden tarkoitus on tyydyttää tehtaan kulutuskohteiden vaatimukset mahdollisimman pienillä kokonaiskustannuksilla. Järjestelmä on mitoitettu tehtaan käyttöön sopivaksi ja sitä on paranneltu käyttötarpeiden muuttuessa.

Paperitehtaan paineilmaverkkoon tuottaa paineilmaa kolme öljytöntä ZR 5-52 paineilma-kompressoria. Kompessorit sijaitsevat eri puolilla paperitehdasta, alimmassa kerroksessa maan tasolla. 1-kompressori sijaitsee tehtaan tuotantolinjan alkupään puolella massaosastolla 2-linjalla ja 2-kompressori superkalanteri 1 ja 3 välissä käytävällä (kuva 6). 3-kompressori sijaitsee UPM:n tutkimuslaitoksen puolella, joka on myös samassa tehdasrakennuksessa. Kompessoreiden valmistajan antaman nimellistuoton mukaan kompressorien tuotto on täydellä teholla noin 173 m³/min. (Viinikainen 2009, 22.)



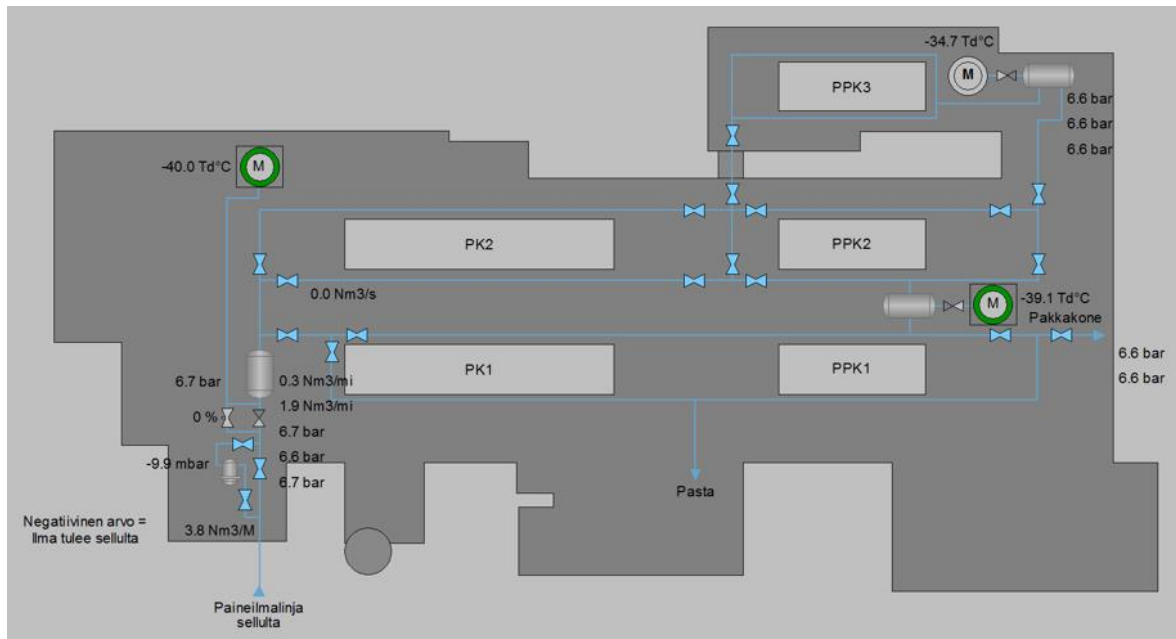
Kuva 6. Paineilmakompressori 2, jäähdytin ja suodatin (Kuva: Santeri Leino)

Paineilman kuivaimina on kolme MD-5 kuivainta, joista jokainen sijaitsee oman kompressorinsa vieressä. MD-5 kuivaimen toiminta periaate on pyörivä roottorikuivain, jossa hyödynnetään ZR kompressorin toisen vaiheen puristuslämpöä. Roottorin pyöriessä hitaasti, tiettyä osaa kuivaimen pinta-alasta elvytetään toisen vaiheen puristuslämmöllä. Loput roottorin pinta-alasta kuivaa toiseen suuntaan läpi kulkevaa ilmaa elvytyssektoriin nähden vastavirtaan. Tällöin kuivain on jatkuva toiminen eikä tuhlaa paineilmaa. (Kervinen 2022.)

4.2 Paineilmaverkko ja säiliöt

Tehtaalla paineilmaverkko jaetaan kahteen osaan, instrumentti-ilmaan ja työilmaan. Molempiin verkostoihin paineilma tuotetaan samoilla kompressoreilla. Verkostot ovat kuitenkin erillään, koska instrumentti-ilman verkoston paine on erittäin tärkeä pitää riittävän korkealla turvallisuussyistä, jos paineilmaverkoston paine laskisi hetkellisesti. Monet paperitehtaan prosessiputkiston säätöventtiilit ovat automaattisia ja niiden ohjaus tapahtuu instrumentti-ilman avulla. Instrumentti-ilman paineen putoaminen vaikuttaisi prosessissa käytettävien toimilaitteiden ja automaattiventtiileiden toimintaan negatiivisesti, joka johtaisi huonoimmillaan tuotannon menetykseen.

Paineilmaverkon yhteenlaskettu pituus on noin 3000 metriä, sisältäen instrumentti- ja työilmaverkon runko- ja jakeluputkiston. Kuvassa 7 näkyy tehtaan paineilmaverkon runkoputkisto, joka ovat halkaisijaltaan 168,3 mm DN 150 putkea. Runkoputkistosta lähtee useisiin kohteisiin pienempiä jakeluputkia, joita ei ole merkitty edellä mainittuun kuvaan. Tarkemmat kuvat tehtaan paineilmaverkosta ja jakeluputkista ovat arkistoitu sähköisinä CAD-kuvina.



Kuva 7. Paperitehtaan paineilmaverkon runkolinjat (PDM 2022.)

Paperitehtaan paineilmaverkkoon tulee Kaukaan sellutehtaalta DN 200 paineilmaputki, josta tarvittaessa saadaan lisää paineilmaa paperitehtaan kompressoreiden ollessa pois käytöstä. Kompressoreiden toimiessa sellu- ja paperitehtaan välisen paineilmaputken sulkuventtiili pidetään kiinni.

Paineilmasäiliöitä on yhteensä kuusi kappaletta, joiden tilavuudet ovat 15–15,5 m³ väliltä. Säiliöiden yhteistilavuus on 92 m³. Kompressorin 2 ja 3 läheisyydessä on yhteensä 4 kpl paineilmasäiliöitä. Kummankin kompressorin vieressä on kaksi säiliötä päällekkäin kuvan 8 tavalla. 1-kompressorin säiliöt eivät ole kompressorin vieressä, vaan ne sijaitsevat kauempana hiomon alakerrassa.



Kuva 8. Paineilmakompressori 2 paineilmasäiliöt (Kuva: Santeri Leino)

Paperitehtaan runkoputkisto toimii myös paineilman varastona, joka kasvattaa kokonaissäiliökapasiteetin noin 156 m³:n. Säiliökapasiteetti on tehtaan tarpeisiin riittävä. (Viinikainen 2009, 25.)

4.3 Ohjaus

Paperitehtaan paineilmanverkon paine on noin 6,2–6,3 baaria, joka on riittävän korkea kaikille tehtaan toimilaitteille. Kompressorit on ohjattu toimimaan automaattisesti haluttuun paineeseen saakka, jonka jälkeen yksi kompressoreista menee kevennykselle. Jokaiselle kompressorille on erikseen määritelty omat kuormitus- ja kevennyspaineet. Porrastuksella pyritään saavuttamaan mahdollisimman tasainen paine, erilaisiin kulutustilanteisiin nähden. Kevennys matalapaine-elementin päällä oleva imusulkija toimii virtaussäätimenä. Imusulkijalla ei ole portaatonta säätöä, vaan se on kokonaan auki tai kiinni asennossa. (Kervinen 2022.)

5 Paineilman käyttökohteet paperitehtaalla

5.1 Hiomo

Hiomosta alkaa paperin valmistusprosessi Kaukaan paperitehtaalla. Hioketta tehdään hiomossa sijaitsevilla painehiomakoneilla, joiden hiontakammioissa tarvitaan ylipainetta. Vesi-hydrauliikan säiliöt paineistetaan myös paineilman avulla. Valkaisu- ja pesupuristimien viiran ohjaustelojen liikuttaminen tapahtuu paljesylinterien avulla, jotka ovat paineilmatoimitukset (kuva 9). (Melanen 2022.)



Kuva 9. Pesupuristimen ohjaustelan paljesylinterit (Kuva: Santeri Leino)

Valkaisupuristimissa käytetään ilmakaavareita, jotka puhdistavat koneessa pyörivää telaa paineilmalla. Osassa hiomon koneissa käytetään paineilmasyylinteriä erinäisiin toimiin, kuten puristimien kuormittamiseen, viirojen kiristämiseen ja kaavariseulojen huulien liikuttamiseen. Hiomon alueella on paljon prosessiputkistoja, joissa käytetään paineilmatoimisia automaattiventtiileitä. (Melanen 2022.)

5.2 Paperikone

Paperitehtaan oleellisin osa tuotantoa on paperikone. Kaukaan paperitehtaalla on yksi paperikone, joka sijaitsee tuotantolinjassa hiomon jälkeen seuraavana. Paperikoneen suurin paineilman käyttökohde on kuivausosan päävientipuhallus, joka kuluttaa arviolta 50 m³ ilmaa paperin pääviennin aikana. Päävienti tehdään harvoin, joten suuri ilmankulutus ei tuota paineilmajärjestelmälle ongelmia. Paperin valmistuessa saattaa tapahtua katko, joka tarkoittaa koneen sisällä kulkevan paperin katkeamista. Katkot eivät ole toivottuja paperin valmistuksessa. Katkon sattuessa paperikoneelta puhalletaan hajonneesta paperista tullut silppu pois koneen sisältä ja ympäristöstä. Paperikoneen telojen kaavareiden avaus ja kuormitus tapahtuu paineilmasylintereiden avulla. Osa kaavarin pitimistä ovat letkukuormitteisia, jotka vaativat paineilmaa toimiakseen. Paperikoneen viirojen ja huopien ohjaus toimii myös paineilmasylintereiden avulla, kuten osassa hiomon koneista. Perälaatikon huulen toimilaitteiden jäähdyttämiseen kuluu jatkuvasti isoja määriä paineilmaa. Yhden toimilaitteen jäähdyttämiseen kuluu ilmaa yli 20 l/min. Kulu on merkittävä, kun toimilaitteita on yhteensä 81 kpl. Yhteensä perälaatikon jäähdytykseen kuluu paineilmaa 1,6 m³/min. Jäähdytysilman kulutus mitattiin akustisella kameralla. Paperikoneen alueella suurin osa prosessiputkiston venttiileistä ovat automaattisia, joiden toimilaitteet ovat paineilmakäyttöisiä. Paperikoneen prosessia seurataan osittain myös kameroiden avulla, joiden linssit pidetään puhtaana paineilamalla. Kameroiden kuvaamiin kohtiin on asennettu usein kirkkaita valaisimia, joiden jäähdytyksessä käytetään paineilmaa. (Uusitalo 2022.)

5.3 Päällystyskoneet

Kaukaan paperitehtaalla on kaksi päällystyskoneita, joilla päällystetään paperikoneelta tullutta paperia. Päällystyskoneiden alueella paineilmaa käytetään laajasti. Aukirullauksessa monet laitteet ovat paineilmatoimisia, joilla toteutetaan rullanvaihto. Katkaisuterän ja sau-
maustelan liikkeet tapahtuvat paineilamalla. Aukirullauksessa on myös paljon erilaisia puhalluksia, jolla saadaan rullanvaihdosta hallittu. Päällystyskoneiden asemilla paperin päällystemäärän säätö tapahtuu paineilmatoimisesti. Paineilmaa käytetään myös päällystyskoneiden päävientihinnan ja kuivatusviirojen kiristykseen. Kiristys tapahtuu paineilmasylintereillä. Päällystyskoneissa on paljon telojen tapaisia pyöriviä kuivaussylintereitä, joiden kaavareiden aukaisussa käytetään paineilmasylintereitä. Päällystyskoneilla tapahtuu tietyn väliajoin tahattomia paperin katkeamisia. Paineilmaa käytetään tuotannon operaattoreiden toimesta katkojen myötä tulleen paperi silpun puhaltamiseen, sekä viikoittaisiin alueen pudistuksiin ja pölyn poistamiseen. (Parkkonen 2022.)

5.4 Jälkikäsittely

Paperin viimeiset työvaiheet tapahtuvat tehtaan jälkikäsittelyssä (kuva 10). Jälkikäsittelyyn kuuluu paperin kiillotus, oikean kokoisiksi rulliksi leikkaaminen ja leikattujen paperirullien pakkaus. Lopuksi kuljettimet vievät pakatut rullat varastoon, josta ne lähtevät asiakkaille.



Kuva 10. Jälkikäsittelyn alue (Kuva: Santeri Leino)

Superkalanterit kiillottavat paperia, joka on kiiltävien papereiden viimeinen osa valmistusprosessia. Kiillotuksen jälkeen paperit menevät leikkureille. Superkalanteri 1 ja 2 käyttävät paineilmaa kaavainten terien painattamiseen, kuin myös kaavainten liikuttaminen käyttöasentoon tapahtuu paineilmasylintereiden avulla. Prosessista johtuen superkalantereita pestään vedellä, jonka kuivaaminen tapahtuu paineilmalla. Tästä syystä superkalantereiden huoltohisseissä on paineilmapisteet puhallusta varten. Superkalantereiden telojen keventäminen tapahtuu pneumaattisesti tai hydraulisesti. Pneumaattiset keventäjät toimivat omien korkeapainekompressoreiden avulla, eikä ne ole kytköksissä tehtaan paineilmaverkkoon.

Kaukaan paperitehtaalla on kolme käytössä olevaa pituusleikkuria. Kaksi JR-1000-leikkuria ja yksi Winroll-leikkuri. Pituusleikkureilla paperirullat leikataan pienemmiksi asiakkaan

tarpeen mukaan (kuva 11). Leikkureilta lähtevät pienimmät rullat painavat noin 800 kg ja painavimmat noin 7000 kg. Pituusleikkureiden useissa työvaiheissa käytetään pneumaattisia toimilaitteita. (Natri 2022.)



Kuva 11. Pituusleikkurilla pienemmäksi leikatut rullat (Kuva: Santeri Leino)

Pituusleikkureiden aukirullauksessa tampuurihyllyn pysäyttimet toimivat paineilmasyntereiden avulla. Pysäyttimet pitävät tampuurit varastokiskoilla omilla paikoillaan. Aukirullauksessa JR-1000 -leikkureilla osa tampuurihyllyn pysäyttimistä ovat paineilmatoimisia. Pysäyttimet pitävät aukirullatut tampuurit varastokiskoilla omilla paikoillaan. WinRoll -leikkurilla tampuurihyllyn kaikki pysäyttäjät ovat paineilmatoimisia. (Natri 2022.)

JR-1000 leikkureilla osa päävientiä tapahtuu mekaanisilla hihnoilla, joilla leikattava paperi painetaan teloja vasten. Suurin osa päävientiä tapahtuu kuitenkin paineilmalla. Koneen levyistä paperiarkkia kutsutaan rainaksi, jonka pää ohjataan koneen läpi sille tarkoitettuista väleistä. Paineilmaa puhalletaan suoraan rainaan ja päävientiä laatuun muodostamalla sille alipaineen. Paperi kulkee päävientiä aikana aukirullauksesta kiinnirullaukseen. Winroll-leikkurilla päävienti tapahtuu täysin automaattisesti. Paperin päävientiä käytetään paineilmatoimista imutela, sekä paljesylintereitä. Kone hakee uuden rainan tampuurilta imutelan avulla. Telassa olevien imevien reikien avulla paperi pysyy kiinni telassa. Imutela liikkuu pyörien ala-asentoon, jossa tapahtuu paperin saumaus. Raina pidetään kiinni paljesylinterien avulla. Paperin kuljettua päävientiä laatuun avulla koneen läpi, se katkaistaan paineilmatoimilla koneen levyisillä terillä. Leikkausosat ovat hyvin samankaltaiset kaikissa paperitehtaan pituusleikkureissa, mukaan lukien uudelleenrullaimet. Koneessa kulkeva paperi kulkee leikkausosan läpi. Leikkausosalla on kaksi leikkausterää, ylä- ja alaterä. Teränpitimien rungoissa on paineilmalla toimivat jarrut terän siirtoa varten. Terän liike leikkaus-asentoon toteutetaan paineilmasyntereillä. Paperiraina on leikattu sopivan levyisiksi asiakasrulliksi mentyä leikkausosan läpi. (Natri 2022.)

Leikkureilta tulevat paperirullat menevät pakkauskoneelle hihnakuuljettimen avulla. Pakkauskoneella on paineilmalla toimivat työntäjät ja vastaanottimet. Pakattavat rullat työnnetään seuraavaan kohteeseen, tai vaihtoehtoisesti ne voidaan vierittää kaltevaa tasoa pitkin. Vieritetyn paperirullan hallittu pysäytys tapahtuu vastaanottimien avulla. Pakkauskoneella paineilmaa käytetään pakkauksen eri vaiheissa. Ensimmäisenä rullien päätyihin laitetaan niin sanotut välilaput paikalleen. Vaiheen suorittaa robotti, jossa on ejektoreilla toimiva imu. Välilappuja ei kiinnitetä erikseen paperirullaan kiinni, ne pidetään paikallaan paineilmasyntereillä toimivien varsien avulla. Rullan varsinainen paketointi tapahtuu kääreen avulla, joka ohjataan rullan ja paketoinnin kantotelojen väliin paineilmahuuhtelulla. Käärityn paperirullan päätyihin liimataan päätylaput robotin avulla välilappujen tapaisesti. Rullan kääre jää väli- ja päätylappujen väliin kuumaliimalla, jolloin tuotettu paperi ei joudu kosketuksiin liiman kanssa. Kuumaliimauksessa käytetään paineilmatoimisia pumppuja, venttiileitä ja suuttimia. Pakatut paperirullat kuljetetaan varastoon kuljettimien, työntäjien ja vastaanottajien avulla. (Natri 2022.)

5.5 Muut paineilman käyttökohteet

Paperitehtaalla paineilmaa käytetään usein työpisteiden ja koneiden puhdistuksessa, lähes tehtaan jokaisella alueella. Puhdistuksessa kuluvan paineilman määrää on vaikea arvioida, johtuen sen monista eri tekijöistä. Kulutuksen suuruuteen vaikuttavat puhdistettavan työpisteen tai koneen likaisuus, likaantumisen ajanjakson pituus ja puhdistusta tekevän työntekijän paineilmapistoolin käyttötapa.

Paineilmalla pidetään myös prosessien seurannassa käytettävien kameroiden ja valojen linssit puhtaana. Paineilmaa puhalletaan linssiä kohti, joka estää prosessista tulevan lian kiinnittymästä linssin pintaan. Kameroita on lähes jokaisella paperitehtaan koneella ja niiden määrä vaihtelee kone kohtaisesti. Eniten kameroita sijaitsee tehtaan paperi- ja päällystyskoneilla.

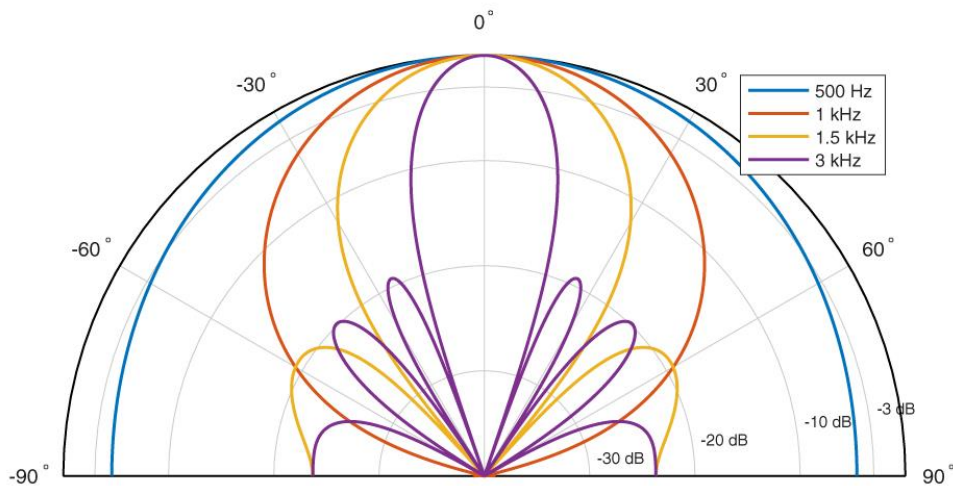
Automaatiojärjestelmän kaappeihin ja koteloihin puhalletaan useissa tapauksissa paineilmaa estämään komponenttien liiallisen kuumentumisen. Paineilmalla syntyvä ylipaine estää myös ylimääräisen pölyn ja muiden epäpuhtauksien pääsyn kaappien sisälle, joka lisää komponenttien toimintavarmuutta. Paineilmalla toteutettuja jäähdytyskohteita on paperitehtaalla kymmeniä.

6 Akustinen kamera

6.1 Yleistä

Akustisilla kameroilla visualisoidaan mikrofoniin havaitsemat ääniaallot, jolloin äänen lähteestä ja sen käyttäytymisestä saadaan helpommin ymmärrettävä kuva. Äänen visualisointi helpottaa monien ongelmakohtien ja vikojen havainnoinnissa. Akustisten kameroiden yleisimpiä käyttökohteita ovat melulähteiden havainnointi laitteiden tuotekehityksessä, äänivuotojen paikannus rakenteissa, paineilmapuotojen paikannus kunnossapidon työkaluna ja sähköverkkojen osittaispurkauksen paikannuksessa. Akustisten kameroiden käyttö on lisääntynyt myös autokorjaamoissa. Ajoneuvojen ylimääräisten äänien paikantaminen on nopeampaa ja vikojen diagnosointi helpottuu, kun äänen lähteen näkee suoraan kameran näytöltä. (MIP Electronics Oy 2022.)

Akustinen säteenmuodostus on signaalinkäsittelytekniikka, joka perustuu kaukokentän mikrofoniinmittauksiin. Äänikentästä saadaan spatiaalinen näytteenotto, josta säteenmuodostusalgoritmi suorittaa spatiaalisen suodatusoperaation, jonka avulla voidaan kartoittaa lähteiden jakautuminen tietyllä etäisyydellä ääniryhmästä ja siten paikantaa voimakkaimmat äänen lähteet. Säteenmuodostusalgoritmit parantavat itse asiassa array-signaalin sieppauskykyä tietyssä suunnassa, jolloin syntyy ohjattu signaali eli säteenmuodostaja. Ohjaussuuntaa kääntämällä lähemmäksi lähteen etenemissuuntaa kohden, ohjattu signaali voimistuu. Useista signaaleista muodostuu keilanmuodostaja, jonka toimintaperiaate näkyy kuvassa 12. Ensimmäinen dokumentoitu säteenmuodostusratkaisu on peräisin 1940-luvulta ja liittyy radioantennin kehittämiseen. (Mechanical Systems and Signal Processing 2019.)



Kuva 12. Keilanmuodostajan toimintaperiaate (Norsonic 2022.)

6.2 Noiseless Acoustics NL Camera

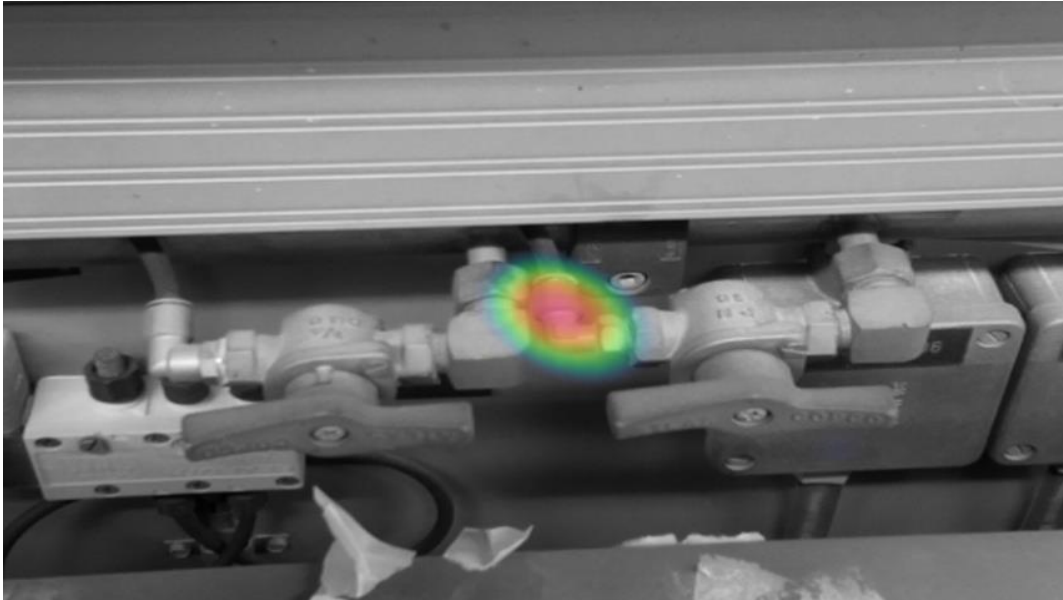
Opinnäytetyössä käytettiin suomalaisen Noiseless Acoustics Oy:n valmistamaa akustista kameraa. Tässä työssä yrityksestä käytetään NL Acoustics nimeä, joka on lyhenne sen oikeasta nimestä. Kyseinen kameran malli on tarkoitettu erityisesti paineilmapuotojen etsintään (kuva 13). Kameran toiminta perustuu yhteen kameraan ja 124:än mikrofoniin.



Kuva 13. Noiseless Acoustics Oy:n NL Camera (Directindustry 2022.)

Mikrofonien avulla äänen lähde visualisoidaan värilliseksi alueeksi kameran tuottamalle mustavalkoiselle kuvalle (kuva 14). Mikrofonien suuri määrä lisää vuodon sijainnin

tarkkuutta kameran kuvassa. Kamera käyttää vuotojen tunnistuksessa keilamuodostumista. Kameran jokainen pikseli on keilamuodostettu monesta suunnasta, joka lisää vuodon sijainnin tarkkuutta kameran näytöllä. (Saksela 2022.)



Kuva 14. Kameran näyttää paineilmauudon värillisenä alueena mustavalkokuvassa (Kuva: Santeri Leino)

NL-kamerassa ei käytetä painetta parametrina vuotojen arvioinnissa, koska paineesta saatava hyöty on minimaalinen normaaleilla painealueilla. Käyttöliittymä on tarkoituksella mahdollisimman yksinkertainen, joka tekee kamerasta helppokäyttöisen. Paineesta muutettavana parametrina saatavan hyödyn ei katsota olevan mahdollisten virheiden ja laitteen helppokäyttöisyyden heikkenemisen arvoinen. Esimerkiksi painekohtaisen estimaattorin käyttäminen vuotokohteessa, jossa on 3 baarin paine, lisää tarkkuutta alle 5 % verrattuna paineesta riippumattomaan estimaattoriin. Kun paine on 4–8 baaria, tarkkuushyöty on vielä pienempi. Taulukosta 1 näkee vuotojen tarkkuuden ja tekniset tiedot NL Acoustics:n akustisesta kamerasta.

Akustiikan mittaus	124 matalan äänen MEMS mikrofonia, reaaliaikainen äänen visualisointi
Taajuusalue	2-35kHz
Mittausetäisyys	0,3 metristä yli 130 metriin
Vuotojen tarkkuus	Tyypillisessä teollisuusympäristössä: >0.032 l/min, 3 bar paineella, 3 metristä >0.05 l/min, 3 bar paineella, 10 metristä Absoluuttinen pienin havainto hiljaisessa ympäristössä: 0,016 l/min, 1.2 bar paineella 0,3 metristä.
Vuodon havainnointi	Automaattinen, reaaliaikainen vuotojen tunnistus
Kameran näyttö	5", 800 x 480 pikselin kosketusnäyttö
Ruudunpäivitysnopeus	25 fps (optinen kuva) / 30 fps (akustinen kuva)
Zoomaus	2 x digitaalinen zoomaus
Videon tallennus	Jopa 5 minuuttia äänien kanssa
Videon resoluutio	1640 x 1232
Sisäinen tallennustila	32 GB / 2000 kuvaa
Kameran mitat ja paino	273 x 170 x 125 mm, 980 g

Taulukko 1. NL Cameran tekniset tiedot

Vaikka kamera ei käytä painetta parametrinä vuotojen suuruuden arvioissa, on vuodon ja ilmakehän paine-eron oltava riittävän suuri, jotta siitä muodostuu tarpeeksi ääntä vuodon akustiseen havaitsemiseen kuvan 15 tavalla. (NL Acoustics 2022.)



Kuva 15. Kameran havaitsema vuotava venttiili (Kuva: Santeri Leino)

Äänen fysiikan ansiosta vuotojen etsinnässä ei tarvitse suoraa näköyhteyttä. Ääni heijastuu kovista pinnoista kaikuna, joka helpottaa vuotojen löytämistä ahtaissa paikoissa tai pitkältä etäisyydeltä. NL-Kameran pieni fyysinen koko ja sen liikuteltavuus helpottaa käyttöä ahtaimmissa paikoissa. Meluisassa ympäristössä kamera saattaa luoda satunnaisesti ylimääräisiä äänten heijastumia kameran näytölle. Ylimääräiset heijastumat näkyvät usein vain hetkellisesti seinissä tai rakenteissa, joissa paineilmavuodot eivät ole mahdollisia. Virheelliset heijastukset ovat täten helppo erottaa oikeista paineilmavuodoista. Kuvassa 16 näkyy esimerkki seinästä kimpoavasta äänestä, joka näkyy kameran näytöllä keltaisena pisteenä.



Kuva 16. Kameran näytöllä näkyy tehtaan seinästä tuleva haamuvuoto (Kuva: Santeri Leino)

Vuotojen etsintä äänikameralla on tehokasta ja sitä voi käyttää jopa tuotannon käydessä. NL-kamerassa on automaattinen vuodon tunnistus ja reaaliaikainen vuodon koon ja kustannusten arviointi. Kameralla on helppo etsiä vuotoja tehtaan tuotannon koneiden äänistä huolimatta. Automaattinen vuotojen tunnistus erottaa vuodosta syntyvän äänen taajuuden muusta ympärillä olevasta melusta.

Vuodosta kuvaa ottaessa on erityisen tärkeää määrittää vuotokohdan oikea etäisyys kamerasta, muuten arvio vuodon suuruudesta ja kustannuksista eivät pidä paikkaansa. Kuvauskulma vaikuttaa myös merkittävästi kameran antamaan vuotoarvioon. Vuodot harvemmin vuotavat suoraan kohti kameraa, vaan ääni kimpoaa viereisten pintojen kautta kameran mikrofoneihin. Äänen kimpoaminen pienentää aina sen voimakkuutta, joka pienentää samassa suhteessa kameran antamaa arviota vuodon suuruudesta. Kameran asetuksissa on valittavina 0,5 m, 1 m, 2 m, 5 m, 10 m, 25 m, 50 m ja 100 m etäisyydet. Vuotojen etsinnässä yleisimmin käytetyt etäisyydet olivat 1 m ja 2 m.

NL-Kameralla on mahdollista etsiä muitakin kuin paineilma- vuotoja. Mahdollisia muita vuotokohteita ovat höyry- ja maakaasuvuodot sekä jäähdytyskoneiden kylmäainevuodot. Vaikka kamera mahdollistaa erilaisten kaasuvuotojen havainnoinnit, on vuotojen arviot

optimoitu ilmapuotoja varten. Kaasujen eri tiheyksien vuoksi kaasupuotoista syntyvä ääni ei vastaa ilmapuotojen ääntä. Kaasuissa äänen nopeus vaihtelee, joten puodosta syntyvän äänen taajuus ei ole sama ilman kanssa. Kamera soveltuu muissa tilanteissa kohtalaisen hyvin puotojen etsintään, muttei niiden suuruuden tai kustannusten määrittämiseen.

7 Kustannukset ja säästökohteet

7.1 Energiakustannukset

Kaukaan paperitehtaalla jäädytysvesi ja sähkönkulutus muodostavat paineilmajärjestelmän energiakustannukset. Sähkö on selkeästi isompi osa energian kokonaiskustannuksista. Sähkön säästäminen on helpoin tapa pienentää paineilman energiakustannuksia.

7.1.1 Kompressoreiden ja kuivainten energiankulutus

Paperitehtaan kompressoreiden ja kuivainten energiankulutuksen kustannukset perustuvat vuoden 2021 kulutukseen. 2022 vuoden paineilmakustannukset tulevat olemaan pienemmät edellisvuoteen verrattuna, johtuen poikkeuksellisesta tehtaan seisomisesta vuoden ensimmäisellä neljällä kuukaudella. Vuonna 2021 kaikkien kompressorien energiankulutus oli yhteensä 7093 MWh, josta muodostuu 319185 € vuosittaiset energiakustannukset.

Kompressorien kuivainten energiakustannukset ovat vain 129 € vuodessa. Kuivainten energiakustannukset eivät ole merkittävät. Liitteestä 1 löytävät kompressorien ja kuivainten energialaskut. Vuosikustannukset on laskettu vuoden 2021 sähkön hinnalla.

7.1.2 Jäähdytysvesikustannukset

Tehtaan paineilmajärjestelmän kaikki kolme kompressoria ovat vesijäähdytteisiä, joiden jäähdyttämiseen käytetään raakavettä. Jäähdytysvesi on mekaanisesti puhdistettua ja sen kuutiohinta vuonna 2021 oli 0,03 €. Jäähdytysvettä kuluu arviolta 12 l/min kompressoria kohden. Kulutuksen määrä on mitattu sulkemalla jäähdytysveden virtaus sammutetusta kompressorista ja vertaamalla tehtaan raakaveden normaaliin kulutukseen. Mittaus on tehty tammikuussa 2022 tehtaan seisoessa, jolloin tehtaan raakaveden kulutus on minimoitu ja tuloksesta on saatu tarkempi. Vuotuiset jäähdytysveden kustannukset ovat arviolta 12 l/s:n kulutuksella on 34060 €. Kompressorien jäähdytysveden kustannuslaskut löytyvät liitteestä 2.

Jäähdytysvesikustannuksia saisi pienennettyä kompressorilta lähtevän lämmenneen jäähdytysveden lämpötilan mittauksella, joka ohjaisi kompressorille tulevan raakaveden määrää automaattisesti. Lämmennyt jäähdytysvesi johdetaan tehtaan kanaaliin nykyisellä avoimella jäähdytysvesikierrolla.

7.1.3 Huoltokustannukset

Paineilmajärjestelmän laitteet vaativat tietyin väliajoin huoltoa ja tarkastuksia. Kaukaan paperitehtaalla kompressoreiden huollosta vastaa Atlas Copco Kompressorit Oy. Kompressoreiden huoltosopimuksen huollot jaetaan A-, B- ja C-huoltoihin. A-huollossa kompressori ja kuivain tarkastetaan ulkoisesti. Kaikki tarvittavat tiedot pystytään tarkastamaan kompressoreiden omista mittareista tai pintalämpötila- ja kastepistemittarilla. A-huollossa tarkastettavia asioita ovat veden ja ilman lämpötila ennen ja jälkeen jäähdyttimen, sekä pyöritysmootorin, lauhteenpoistimen ja uimuriventtiilin toiminnan tarkastaminen. Paineilma ja öljyvuodot tarkastetaan myös silmämääräisesti. B-huoltoon sisältyy A-huollon tarkastuksien lisäksi uimuriventtiilin puhdistus ja lauhteenpoistimen kalvojen vaihto. B-huollossa tarkastetaan myös varolaitteiden toiminta ja tehdään tarvittavat suodattimien ja öljyjen vaihdot. C-huolto on laajempi ja se sisältää A- ja B-huoltojen toimenpiteiden lisäksi tarkastuksia ja erillisten komponenttien sekä tiivisteiden vaihtoja. Kompressorit vaativat myös tietyin väliajoin peruskunnostuksen, jonka kustannukset ovat iso osa huoltokustannuksia. Tässä työssä ei käsitellä mahdollisia laiterikkoja tai muita ennalta arvaamattomia, mutta mahdollisia kulueriä. Paineilmajärjestelmän huoltokustannukset ovat energiakustannuksiin verrattuna pienet. (Kervinen 2022.)

Kompressoreiden huollon lisäksi paineilmasäiliöiden määräaikaistarkastukset lisäävät paineilmajärjestelmän kustannuksia. Säiliöt tarkastetaan vähintään neljän vuoden välein. Paineilmasäiliöille on olemassa lakisääteiset vaatimukset, joiden tulee täytyä tarkastuksissa. Tarkastusten tarkoitus on vähentää riskejä, valvoa laatua, tarkistaa määriä ja täyttää lakisääteiset vaatimukset. (Kiwa Inspecta 2022.)

7.2 Paineilmavuodot ja kustannukset

Paineilmavuodoissa putkistossa kulkevaa paineistettua ilmaa pääsee vuotamaan ilmaan. Vuodot eivät ole tarkoituksellisia, eikä niitä voi välttää. Niitä esiintyy aina, kun järjestelmässä on paine. Laajasta paineilmaverkosta ja monista paineilman käyttökohteista johtuen vuotoja on paljon. Vuotojen etsintä ja paikallistaminen on usein vaikeaa. Suurimmat vuodot voidaan todeta kuulon avulla, mutta pienimmät vuodot etsitään usein ruiskutettavien, vaahtoavien aineiden tai ultraäänivuotomittareiden avulla. (Ellman ym. 2002, 67.)

Aaltomaisen luonteensa vuoksi akustiikka on yksi eniten tutkituista tekniikoista vuotojen havaitsemiseksi ja paikallistamiseksi putkistoissa. Akustiseen vuotojen paikallistamistekniikkaan liittyvät tutkimukset ovat tulleet suosituiksi viime vuosikymmenellä. Vuotojen tehokkaalla ja tarkalla paikallistamisella on merkittävä rooli. Paperitehtaan paineilmaverkossa ei ole vuotojen varoitusjärjestelmää, ja sellaisen toteuttaminen olisi haastavaa. Uusia vuotoja

ei huomaa järjestelmän paineen muutoksessa tai putkiston virtauksessa, joka tekisi vuotojen varoitusjärjestelmästä toimimattoman. (Hu ym. 2021, 161.)

Vuodon paineen ollessa lähellä ilmakehän painetta, ei välttämättä synny riittävästi ääntä sen akustiseen havaitsemiseen. Säästöjen kannalta < 5 l/min kokoiset vuodot ovat käytännössä merkityksettömiä ja niiden korjauskustannukset ovat usein isommat kuin vuodoista muodostuvat kustannukset usean vuoden aikana. Isommilla vuodoilla on piilevä taloudellinen merkitys pitkällä aikavälillä. Niiden aiheuttama turha energiankulutus muodostaa vuotasolla huomattavia kustannuksia. Opinnäytetyön aikana etsityt vuodot ovat kuvattu tehtaan tuotannon ollessa seis. Tästä johtuen monet koneiden toimilaitteet eivät olleet kuvaushetkellä paineistetussa tilassa, joka muuttaa vuotojen määrän huomattavasti pienemmiksi.

Suurin osa vuodoista jää korvakuulolla huomaamatta tehtaan koneiden melun vuoksi, jolloin akustinen kamera on lähes välttämätön apuväline kunnonvalvonnassa. Aiemmin vain huoltoseisokit ovat helpottaneet vuotojen etsintää paperitehtaalla, koska koneiden seisoessa tehtaalla on riittävän hiljaista havainnoida vuotoja korvakuulolla. Kameralla on mahdollista havaita pienimmätkin vuodot, joita ei kuule korvalla pidemmältä etäisyydeltä tai edes tuotannon koneiden ollessa sammutettuina. Ennen akustista kameraa tehtaan vuotojen etsinnässä on voinut käyttää apuvälineenä vuodonilmaisusprayta, jota suihkutetaan epäilyjen vuotojen päälle. Huonona puolena vuodonilmaisusprayn käyttäminen vaatii tarvittaessa laitoshenkilön ahtautumista tuotannon koneiden sisälle pieniin väleihin, jotta suihkuttaminen on mahdollista oletettuihin vuotoihin. Koneiden sisälle tai pieniin väleihin ahtautumisessa on aina riski loukkaantua tai jäädä puristuksiin, koneiden turvallisamisesta huolimatta. Vuotojen havainnointi kameralla pidemmältä etäisyydeltä lisää myös työturvallisuutta, jonka tärkeyttä ei voi korostaa liikaa.

Löydettyjen vuotojen kuvat siirretään tietokoneelle USB-muistitikun avulla. NL Acoustics:n kuvien analysointiin on NL Camera Viewer Basic-sovellus, josta näkee kameran antaman arvion vuodon suuruudesta ja sen vuosikustannuksesta. Sovelluksella saa muutettua tarvittaessa vuodon voimakkuutta kuvasta, joka mahdollistaa tarkemman näkymän vuotavasta kohdasta. Kuvassa 17 on näkymä NL Camera Viewer Basic-sovelluksesta, johon on siirretty kuva vuotavasta sylinterin letkusta.

Tiedot

Nimi:
nro114 ppk2 hp leiju1 sylinterin letku

Sarjanumero:
AC130210

Tunniste:
21

Mitattu dB (Z):
72 dB

Luontipvm:
2022-02-28 13:16:39 GMT+0200

Synkronointipvm:
2022-05-24 21:18:37 GMT+0300

Vuotoanalyysi

Etäisyys
2 m etäisyydellä

Arvioitu vuodon koko: 52 l/min
Arvioitu vuosikustannus: 139 €
Paineilma


Kuva 17. Paineilmavuoto nro. 114 NL Camera Viewer Basic-sovelluksessa.

Paineilmavuotojen kirjaus tehdään alueittain erilliselle Excel-ohjelmiston taulukolle, kameran oman sovelluksen lisäksi. Kuvatun vuodon nimeäminen kamerassa on rajallista merkien määrän suhteen, joten alueiden ja komponenttien lyhennyksiä on käytettävä usein. Taulukko 2 on esimerkki Excel-ohjelmistoon tehdystä kirjanpidosta. Kirjaus Excel-ohjelmistolla helpottaa vuotojen rajausta pienempiin ryhmiin, kuten paperitehtaan alueiden mukaan. Vuodot voidaan myös laittaa helposti suuruus järjestykseen, kriittisimmät ensimmäiseksi. Kriittisyysjärjestys toimii myös alustavana järjestyksenä vuotojen korjauksessa.

Kuvan nro.	Laitepaikka	Selkokielineen	Tarkenne	Vuodon suuruus [l/min]
114	PPK2 hp	Leiju 1	Sylintereille menevä letkuliitos	52,1
115	PPK2 hp	Paineilmapiste	Letkuliitos	66,4

Taulukko 2. Esimerkki vuotojen kirjauksesta

Vuotojen kirjanpitoa helpottaa niiden numerointi. Kuvan ottamisen jälkeen nimeäminen on hyvä aloittaa numeroinnilla. Numerointi mahdollistaa selkeän järjestyksen kuville, kun niitä taulukoidaan. Numeroinnin jälkeen on hyvä kertoa laitepaikka tai alue, josta kuva on otettu. Kamerassa nimeämisen ei tarvitse olla sen tarkempi, kuvan näyttäessä loput tiedot sijainnista ja vuotokohteesta. Taulukkoon voi halutessaan kuitenkin merkata tarkennuksen vuodosta. Vuodon tarkenne ei kuitenkaan kerro vuodon oikeaa syytä, vaan suuntaa antavan tiedon kohteesta. Asentajan on taulukossa olevasta tarkennuksesta huolimatta käytävä tarkastamassa vuoto paikanpäältä, ennen korjaustöiden valmistelua. Kuvan perusteella on vaikea arvioida vuodon korjaamiseen tarvittavat varaosat tai välineet. Kuvassa 18 näkyy paineilmapisteen letkuliitoksen vuoto, jonka tarkennus on jätetty nimeämättä kameran kuvasta.



The screenshot displays a camera view of a leak detection point. A color-coded area (rainbow spectrum) indicates the leak location. Below the image is a volume control slider ranging from -12.4 dB to 82.6 dB, with a current setting of 63.6 dB.

Tiedot

- Nimi:** nro115 ppk2 hp paineilmapiste
- Sarjanumero:** AC130210
- Tunniste:** 19
- Mitattu dB (Z):** 82.6 dB
- Luontipvm:** 2022-02-28 13:18:23 GMT+0200
- Synkronointipvm:** 2022-05-24 21:16:52 GMT+0300

Vuotoanalyysi

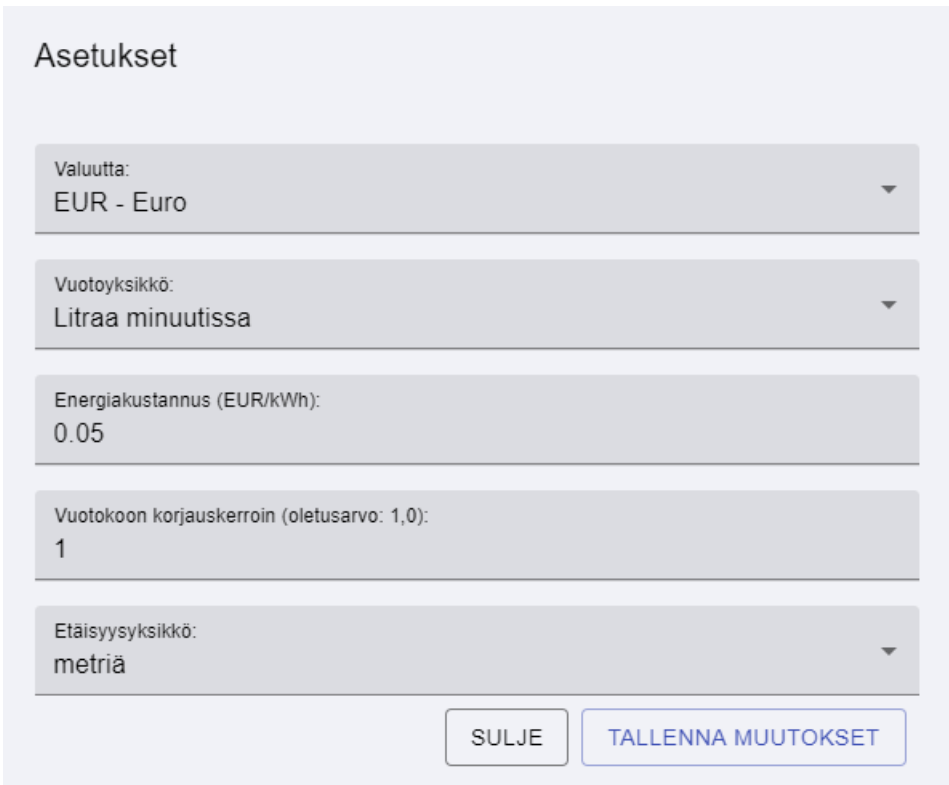
Etäisyys m etäisyydellä

Arvioitu vuodon koko: 66 l/min
Arvioitu vuosikustannus: 178 €
 Paineilma

Kuva 18. Päälylystyskone 2 paineilmapisteen vuoto NL Camera Viewer -sovelluksella.

Tässä työssä ei tutkittu paperitehtaan kaikkia alueita, joten vuotojen kokonaismäärä on arvioitu kuvattujen alueiden ja niissä esiintyvien vuotojen määrän perusteella. Löydettyjä vuotoja kuvatuilla alueilla on yhteensä 318 kpl, joten tehtaan vuotojen kokonaismäärä on

arviolta 400–450 kpl. Vuodot olivat suurimmaksi osaksi pieniä, joiden ilmamäärä on noin 5–20 l/min. Kaikkien löydettyjen vuotojen keskiarvo on noin 26 l/min. Vuotojen keskiarvon kertomalla vuotojen määrällä saadaan suuntaa antava arvio ylimääräisestä paineilman kulutuksesta. Vuotoihin menevä paineilman määrä tehtaan seisoessa on yli 11 m³/min. Kamera laskee vuotojen kustannukset asetuksiin määriteltyjen arvojen mukaan. Vuotoarvion parametrejä pystyy muuttamaan tarvittaessa myös NL Camera Viewer Basic-sovelluksesta (kuva 19).



Asetukset

Valuutta:
EUR - Euro

Vuotoyksikkö:
Litraa minuutissa

Energiakustannus (EUR/kWh):
0.05

Vuotokoon korjauskerroin (oletusarvo: 1,0):
1

Etäisyysyksikkö:
metriä

SULJE TALLENNNA MUUTOKSET

Kuva 19. Akustisen kameran vuotojen kustannusarvion määrittävät tekijät.

Paperitehtaan paineilma vuotojen kustannukset voi prosessihistorian tietokannasta pystyttiin katsomaan kompressoreiden energiakustannukset. Kompressoreiden energiankulutuksen mittausjakso on otettu 2022 vuoden alusta ensimmäiseltä neljältä kuukaudelta, jotta se olisi sama vuotojen kuvaus ajankohdan kanssa. Kyseisellä ajanjaksolla paperitehtaalla ei ollut käynnissä olevaa tuotantoprosessia. Vuotojen havainnoinnin ajankohtana sellutehtaalta tuleva paineilmalinja oli kiinni. Ilman siirtyminen sellutehtaan ja paperitehtaan välillä olisi muuttanut vuotolaskemien tuloksia. Koneiden seisoessa paineilma vuotojen kustannukset korostuvat kompressoreiden energiankulutuksessa, kun paineilmaa ei käytetä

tuotannon prosessissa. Koneiden toimilaitteet eivät ole silloin paineistetussa tilassa, joten vuotoja on oletettua vähemmän.

Kompressorit kuluttivat yhteensä vuoden 2022 alusta huhtikuun loppuun yhteensä 1763 MWh, joka tekee vuoden 2021 sähkön hinnalla kompressoreiden sähkönkustannuksiksi 79335 €. Liitteestä 3 voi vertailla kompressorien alkuvuoden kulutusta. Paperitehtaan kompressoreiden energian kulutuksen ja paineilman tuoton suhteella saadaan laskettua vuodoille kustannusarvio. Vuotojen yhteenlasketun arvion ollessa yli 11 m³/min, kustannuksiin kuluu noin 15200 € vuodessa. Energian hintojen nousu tekee energiakustannuksista kannattavan säästökohteen. Liitteestä 4 voi katsoa vuotokustannusten laskut.

7.3 Paineilman muut säästökohteet

Tehtaalla paineilmanvuotojen korjausten lisäksi säästöä voi saada rajoittamalla paineilman käyttöä. Prosessikameroiden ja -valojen linssit pidetään puhtaana paineilman avulla. Akustisella kameralla katsottuna prosessikameroiden ilmankulutuksissa on huomattavia eroja. Kameroissa ja valoissa käytettävän paineilman määrää pystyisi varmasti pienentämään. Kohteissa on kuitenkin huomioitava kameran sijainti. Osa kameroista likaantuvat sijaintinsa puolesta helpommin kuin toiset, jolloin puhalluksen on oltava suurempi pitääkseen linssit puhtaana. Paineilmaa käytetään paljon puhdistusvälineenä paperikoneella ja päälystyskoneilla. Osan paineilman puhdistuskäytöstä voisi korvata edullisemmalla menetelmällä, kuten harjaamisella.

Monet tehtaan sähkökaapit ovat paineilmajäähdytteisiä. Useimmissa tapauksissa jäähdytykseen riittäisi kevyt ilmavirta estämään komponenttien kuumentumisen. Kaappeihin tulevaa jäähdytysilmaa lasketaan silti kovalla paineella, jonka vuoksi kustannuksetkin ovat moninkertaiset verrattuna ilman määrään, joka jäähdyttäisi komponentteja riittävästi.

8 Yhteenveto ja pohdinta

Työn tarkoitus oli osoittaa akustisen kameran hyöty yhtenä kunnossapidon työkaluna vuotojen havainnoinnissa. Kameraan ja sen toimintaan tehtaalla oli erittäin mielenkiintoista tutustua ja sen käyttö oli todella vaivatonta. Vuotojen havainnollistavuus teki positiivisen vaikutuksen. Akustinen kamera helpottaa ja nopeuttaa huomattavasti vuotojen etsintää.

Akustinen kamera toimi suurimmalta osin todella hyvin, lukuun ottamatta pieniä käyttötekniisiä puutteita. Kameran kosketusnäytöllä olevan näppäimistön vuoksi, vuodoista otettujen kuvien nimeäminen oli hiukan kömpelöä. Nimeäminen on ainut manuaalisesti kirjattava tieto kuvan ottamisen jälkeen. Löydetyn vuodon tarkka ja yksityiskohtainen nimeäminen ei ole kuitenkaan välttämätöntä, mutta se helpottaa laitosmiestä löytämään vuodon luokse. Kunnossapidon laitosmiehet tuntevat omat vastuualueensa ja siellä sijaitsevat koneet yleisesti ottaen todella hyvin, joten pelkkä kuva vuotavasta toimilaitteesta tai letkusta ja suurpiirteinen ohjeistus oikealle sijainnille riittää auttamaan laitosmiehiä löytämään korjattavat vuodot. Muutamat käyttötekniiset epäkohdat eivät estä kameran käyttöä tai vaikeuta vuotojen havainnointia, vaan parannus lisäisi vain käyttömukavuutta. Käyttöliittymän parannusehdotukset informoidaan NL Acoustic:lle opinnäytetyön valmistuessa.

Opinnäytetyö osoittaa paperitehtaalla olevan paineilmavuotoja odotettua enemmän, vaikka kaikkia tehtaan alueita ei ole vielä tarkastettu akustisen kameralla. Kuvatut paineilmavuodot ja niiden sijainnit ovat kirjattu alueittain Excel-taulukoksi, helpottaakseen vuotokohdan löytämistä. Tulevaisuudessa vuototaulukosta on helppo katsoa suurimmat vuodot, jotka ovat myös kustannuksiltaan kalleimpia. Taulukon ja kuvien avulla pystytään myös päättelemään kohteet, joiden korjaus vaatii suurempia toimenpiteitä tai uusia komponentteja. Vuotojen suhteellisuus on myös helpompi hahmottaa taulukon avulla. Automaattisesti ei kannata olettaa kaikkien vuotojen korjauksen olevan kustannustehokasta. Esimerkiksi automaattiventtiilissä olevan vuodon tuomat kustannukset voivat olla vain 5 % uuden venttiilin hinnasta. Venttiilin vaihto ei ole silloin kannattavaa, jos uusi venttiili käy oletettavasti myös vuotamaan samalla tavalla muutaman vuoden päästä. Tästä syystä vuotoja on hyvä seurata tulevaisuudessa kirjanpidon avulla. Oletettavasti osa pienistä vuodoista ei välttämättä kasva ajan myötä ja niitä voi pitää harmittomina. Suuriin vuotoihin pitäisi reagoida nopeasti, jotta vältetään isommilta ylimääräisiltä kustannuksilta, joten niiden kasvun seuraaminen ei ole kannattavaa. Vuodoista muodostettu kustannusarvio ei ole täysin paikkaansa pitävä, johtuen tehtaalla olleista poikkeuksellisista olosuhteista. Tarkempi vuotoarvio vaatisi vuotojen kuvaamisen tuotannon ollessa käynnissä. Paineilman kulutus ei ole kuitenkaan merkittävästi isompi tuotannon käydessä. Tärkeämpi havainto on paperitehtaan paineilman suuri kulutus sinä aikana, kun tehtaassa ei ole käynnissä olevaa prosessia. Vuotojen kustannusten

tarkkuus ei kuitenkaan ole oleellisin asia, vaan tärkeämpänä tietona voidaan pitää löydettyjen vuotojen määrää.

Opinnäytetyöstä oli hyötyä minulle, sekä Kaukaan paperitehtaalle. Opinnäytetyön aikana paperitehtaalla oli meneillään työtaistelu, jonka vuoksi vuotojen kuvaaminen oli yksi ylimääräinen työvaihe tutkimuksessa. Vuotojen etsiminen ja kirjaaminen vei oman aikansa opinnäytetyöstä, johtuen paperitehtaan alueiden laajuudesta. Omakohtainen kokemus kameran käytöstä on kuitenkin hyväksi ohjeistaessa seuraavia vuotokartoituksen tekijöitä. Tulevaisuudessa vuotojen havainnointi tapahtuu paperitehtaalla enimmäkseen laitosmiesten toimesta. Tämän työn yhtenä tuloksena saadaan tehtyä kunnossapidon laitosmiehille ohjeistus kameran käyttöä varten, joka mahdollistaa oikean tavan työskennellä akustisen kameran kanssa omatoimisesti. Tieto paineilmavuotojen määrästä ja niiden tuomista ylimääräisistä kustannuksista auttavat tehtaan kunnossapitoa reagoimaan vuotojen korjaamiseen pienemmällä kynnyksellä.

Lähteet

- Airila, M., Hallikainen, K., Kääpä, J. & Laurila, T. 1983. Kompessorikirja. Helsinki: Korpivaara Oy Hydor Ab.
- Castellini, P., Chiariotti, P. & Martarelli, M. 2019. Acoustic beamforming for noise source localization – Reviews, methodology and applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 423. Viitattu 14.3.2022. Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.09.019>
- Directindustry. 2022. Partial discharge detection camera. Viitattu 25.5.2022. Saatavissa <https://www.directindustry.com/prod/nl-acoustics/product-223353-2286018.html>
- Ellman, A., Hautanen, J., Järvinen, K. & Simpura, A. 2002. Pneumatiikka. Helsinki: Edita Publishing Oy.
- Hu, Z., Tariq, S., & Zayed, T. 2021. A comprehensive review of acoustic based leak localization method in pressurized pipelines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 161. Viitattu 3.5.2022. Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.107994>
- Keinänen, T. & Kärkkäinen, P. 2005. Automaatiojärjestelmien hydraulikka ja pneumatiikka. Porvoo: WSOY.
- Kervinen, M. 2022. Huoltoteknikko. Oy Atlas Copco Kompessorit Ab. Lappeenranta. Haastattelu: 30.5.2022.
- Kiwa Inspecta. 2022. Kiwan tekemillä tarkastuksilla vastaat lain vaatimuksiin ja täytät laatutavoitteesi. Viitattu 29.5.2022. Saatavissa <https://www.kiwa.com/fi/fi/palvelutyypit/tarkastus-ja-varmennus/>
- Melanen, P. 2022. Päivämestari. UPM Communication Papers Oy. Lappeenranta. Haastattelu: 19.4.2022.
- MIP Electronics Oy. 2022. Akustinen kamera - SOUND CAM. Viitattu 24.3.2022. Saatavissa <https://www.mip.fi/fi/tuotteet/melu-ja-aani/tutkimus-ja-simulointi/akustiset-kamerat/acoustic-camera-soundcam-detail>
- Natri, J. 2022. Kunnossapitomestari. UPM Communication Papers Oy. Lappeenranta. Haastattelu: 24.3.2022.
- Noiseless Acoustics Oy. 2022. Knowledge Base. Viitattu 23.4.2022. Saatavissa <https://support.nlacoustics.com/>
- Norsonic As. 2022. Acoustic camera overview. Viitattu 23.5.2022. Saatavissa https://web2.norsonic.com/product_single/acoustic-camera/

Parkkonen. S. 2022. Kunnossapitomestari. UPM Communication Papers Oy. Lappeenranta. Haastattelu: 5.4.2022.

PMD 2022. UPM Communication Papers automaatiojärjestelmä. Honeywell. Tietokoneohjelma. Luettu 30.3.2022.

PHD 2022. UPM Communication Papers prosessihistorian tietokanta. Honeywell. Tietokoneohjelma. Luettu 19.5.2022.

Saksela. K. 2022. Toimitusjohtaja. Noiseless Acoustics Oy. Microsoft Teams videohaastattelu: 23.3.2022.

UPM. 2017. UPM Kaukas näyttää mallia kiertotaloudessa. Viitattu 30.3.2022. Saatavissa <https://www.upm.com/fi/ajankohtaista/artikkelit/2017/05/upm-kaukas-nayttaa-mallia-kiertotaloudessa/>

UPM. 2022a. Tietoa meistä. Viitattu 29.3.2022. Saatavissa <https://www.upm.com/fi/tietoa-meista/>

UPM. 2022b. Liiketoiminnot UPM Communication Papers. Viitattu 29.3.2022. Saatavissa <https://www.upm.com/fi/liiketoiminnot/upm-communication-papers/>

Uusitalo. T. 2022. Kunnossapitomestari. UPM Communication Papers Oy. Lappeenranta. Haastattelu: 15.3.2022.

Viinikainen. V. 2009. Paineilmajärjestelmän nykytilan selvitys. Paperikoneteknologian koulutusohjelma. Jyväskylä: Jyväskylän Ammattikorkeakoulu.

Liite 1. Paineilman energiakustannukset

Kompressorit ZR 5 3 kpl	
Sähkön hinta [€/MWh] (vuosi 2021)	45
Kompressori 1 kulutus 2021 [MWh]	3423
Kompressori 2 kulutus 2021 [MWh]	1601
Kompressori 3 kulutus 2021 [MWh]	2069
Kompressoreiden yhteiskulutus vuosi 2021 [MWh]	7093
Kompressoreiden sähkön kustannukset 2021 [€]	319185
Kuivaimet MD-5 3 kpl	
Sähkötehon tarve 0,12 kW (Atlas Copco)	
Energian kulutus vuodessa $3 \cdot 0,12 \text{ kWh} \cdot 24 \text{ h} \cdot 365 \text{ d}$ [kWh/a]	3153,6
Kustannukset $3153,6 \text{ kWh/a} \cdot 0,0408 \text{ kWh}$ [€/a]	141,91
Energiakustannukset yhteensä (€/a)	319326,91

Liite 2. Kompressoreiden jäähdytysveden kustannukset

KOMPRESSOREIDEN JÄÄHDYTYSVEDEN KUSTANNUKSET	
Mekaanisesti puhdistettu raakavesi [€/m ³] (vuosi 2021)	0,03
Kompressorin (ZR-5) keskimääräinen jäähdytysveden tarve [l/s]	12
Jäähdytysveden kokonaiskulutus vuodessa	
3*(12 l/s/1000 l/m ³) *3600*24 h*365d	1135296
Jäähdytysveden kustannukset 1135296 m³/a * 0,030 €/m³ [€/a]	34059

Liite 3. Paperitehtaan kompressoreiden energian kustannukset tammi-huhtikuu 2022

Kompressoreiden sähkön kulutus tammi-huhtikuu 2022	
Sähkön hinta [€/MWh] (vuosi 2021)	45
Kompressori 1 kulutus tammi-huhtikuu 2022 [MWh]	655
Kompressori 2 kulutus tammi-huhtikuu 2022 [MWh]	631
Kompressori 3 kulutus tammi-huhtikuu 2022 [MWh]	477
Sähkönkulutus yhteensä tammi-huhtikuu 2022 [MWh]	1763
Energian kustannukset tammi-huhtikuu 2022 [€]	79335

Liite 4. Arvio paperitehtaan paineilmavuodoista ja niiden kustannuksista

Arvio vuodoista	
Kompressorien arvioitu tuotto [m ³ /min]	173
Arvioitu vuotojen määrä [kpl]	425
Keskimääräinen vuodon suuruus [l/min]	26
Arvioitu vuotoihin menevä paineilman määrä [m ³ /min]	11,1
Vuotojen arvioitu kustannus tammi-huhtikuu 2022 [€]	5067,351
Arvio vuotojen kustannuksista vuodessa [€]	15202,05