

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Nico Kinnunen

TEOLLISUUDEN JAKOKOTELOIDEN INSTRUMENTTI-
ILMAVUODOT JA INDIKOINTI

Opinnäytetyö
Kesäkuu 2017



OPINNÄYTETYÖ
Kesäkuu 2017
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
013 260 600

Tekijä(t)
Nico Kinnunen

Nimeke
Teollisuuden jakokoteloiden instrumentti-ilman vuodot ja indikointi

Toimeksiantaja
Efora Oy

Tiivistelmä

Opinnäytetyössä selvitetään teollisuuden prosessin ja tuotannon kannalta tärkeimmissä jakokoteloissa esiintyviä instrumentti- ja paineilma vuotoja ja niistä aiheutuvia turhia kuluja. Työssä suunnitellaan lisäksi vuodoista indikoivaa mittausta ja sen toteutustapoja teollisuusprosessijärjestelmään. Tuloksia ja toimintatapoja voidaan käyttää hyväksi laajennettaessa tarkastukset kattamaan myös muita tehtaan tuotannon paineilmajakelun osa-alueita.

Ilmavuodoista laskettuja tuloksia voidaan käyttää suuntaa antavaan arviointiin vuotavista ilmamääristä johtuviin turhiin kustannuksiin paineilmantuotannossa.

Kieli
suomi

Sivuja 30
Liitteet 1

Asiasanat

ilmavuodot, paineen mittaaminen, ilmavuotojen havaitseminen, vuotojen kustannukset



THESIS
June 2017
Degree Programme in
Electrical Engineering
Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
FINLAND
013 260 600

Author (s)
Nico Kinnunen

Title
Industrial compressed air leak detection in distribution manifolds and leak indication

Commissioned by
Efora Oy

Abstract

In this thesis are defined air leakages in the most important parts of industrial process automation and results from those leakages to make unnecessary costs to industry. Thesis also includes a plan for leakage detection and indication to the process automation system. Detection and measurement results can be used to cover whole factory process field in compressed air distribution.

Calculated numbers from results can be used to evaluate unnecessary costs depending the sizes of air leakage in the air distribution system.

Language

Finnish

Pages 30

Appendices 1

Keywords

air leak, pressure measurement, leak measurement, leakage costs

Sisältö

1	Johdanto	5
2	Instrumentti-ilman käyttö teollisuusautomaatiossa	5
2.1	Kompressorityypit	6
2.2	Instrumentti-ilmaa käyttävät prosessiventtiilit	7
3	Paineilman ominaisuudet	9
3.1	Paineen mittaaminen	11
3.2	Vuodot	12
3.2.1	Vuotokohtien etsiminen	12
3.2.2	Vuotojen määrittely	15
3.2.3	Laskentaohjelma	17
3.2.4	Vuotojen ilmamäärän laskeminen	17
3.2.5	Vuodoista aiheutuvat kustannukset	20
4	Mittauksen suunnittelu	22
4.1	Painelähetin	23
4.2	Ultraäänilähetin	25
4.3	Järjestelmään liittäminen	26
5	Pohdinta ja arviointi	27
	Lähteet	30

Liitteet

Liite 1	Ilmamäärät vuotojen pinta-aloja kohden ja niistä aiheutuvat tappiot
---------	---

1 Johdanto

Kunnossapitopalveluja tarjoavalta yritykseltä Efora Oy saatiin toimeksiantona toteuttaa työ teollisuusverkon jakokoteloiden osa-alueelta paineilman jakelusta, järjestelmän vuotokohdista ja niiden indikoinnin suunnitelmasta tulevaisuutta varten. Työn tarkoituksena on saada vähennettyä paineilmapuodoista tehtaalle aiheutuvia turhia kustannuksia. Jakokotelot on otettu käyttöön vuonna 1993 ja niissä olevat jakotukit ovat vaivalloisesti huollettavaa mallia. Työ rajautui Stora Enson Enocell -tehtaalla keittämön alueelle, mutta on helposti laajennettavissa kattamaan koko tehdasalueen jakokotelot ja muutkin alueet, joissa on paineilman jakelu.

2 Instrumentti-ilman käyttö teollisuusautomaatiossa

Nykyaikaisessa teollisuuslaitoksessa käytetään paljon sähköpneumaattisia toimilaitteita prosessiventtiilien säätöön ja ohjaukseen. Laadukkaan paineilman toimitaminen toimilaitteen ohjaimelle on elintärkeää. Jo vanhentuneita paineilmalla ohjattavia venttiileitäkin on laajalti käytössä, mutta ne korvataan uudemmilla sähköpneumaattisilla sitä mukaa, kun niiden käyttöikä kuluu loppuun. Uudempien sähköpneumaattisten venttiilien etuna on parempi säätö- ja tiedonkeruujärjestelmä. Uudemmat toimilaitteet ja ohjaimet myös kuluttavat huomattavasti vähemmän paineilmaa mm. vähäisemmän luistinyksiköiden tuuletuksen takia staattisessa pidossa [1, 3; 2, 3].

Pneumaattisten laitteiden etuina muihin järjestelmiin verrattuna ovat huollon ja ylläpidon yksinkertaisuus sekä siisteys. Järjestelmä sopii hyvin myös räjähdysvaarallisiin tiloihin kipinättömyytensä ansiosta. Toimilaitteen ylikuormitus ei aiheuta yleensä vaurioita [3, 9]. Paineilmasta käytetään nimitystä instrumentti-ilma, kun sitä ohjataan tehdasinstrumenttien kuten prosessiventtiilien toimilaitteiden käytettäväksi.

Paineilman määrä on valtava suurissa teollisuuslaitoksissa ja sen on riitettävä koko ajan kattamaan laitteiden vaatiman volyymin tarpeen. Järjestelmään tulevasta vuodoista voi seurata suuria turhia kulueria tehtaalle jo suhteellisen lyhyessäkin ajassa. Kiinteistöissä, joissa käytetään paljon paineilmatoimisia eli pneumaattisia laitteita paineilma tuotetaan koko kiinteistön käyttöön yhdessä paikassa. Suuremmat kompressorit toimivat paremmalla hyötysuhteella kuin pienet. Ilma paineistetaan käyttövoimansa sähkömoottorilta saavilla kompressoreilla ja käsitellään sopivaksi prosessin käyttöön. Paineilmalle asetetaan tietyt laatuvaatimukset prosessin toiminnan varmistamiseksi. Riittävä vaatimustaso saavutetaan oikeaoppisella pneumatiikkajärjestelmällä [3, 9-10]:

- kompressori paineilman tuottoon
- säiliö ilman varastointiin, joka suuressa kiinteistössä muodostuu pääosin tai kokonaan paineilman jakelun runkolinjoista
- suodatus
- kuivaus
- vedenerotus
- paineensäädin
- runkolinjat
- jakeluputkisto
- venttiilinohjain/-asennoitin
- toimilaite

2.1 Kompressorityypit

Paineilmaa tuotetaan useilla erilaisilla kompressorimalleilla. Yleisimmin käytössä olevia kompressorimalleja ovat mäntä-, ruuvi- ja turbokompressorit. Mäntäkompressorit ovat eniten käytettyjä pienissä kohteissa matalien hankintakustannusten ja pienen ilmamäärän tarpeen takia. Ruuvimallisia kompressoreita käytetään suuremmissa kohteissa suurempien ilmamäärien tuottamiseen, mutta ne ovat myös kalliimpia hankintahinnaltaan. Turbokompressorit ovat suurien kiinteistöjen käyttöön suunniteltuja koneita, jotka tuottavat taloudellisimmin suuria ilmamääriä kohtalaisen matalaan paineeseen, kuten kohteessa n. 6 bar. Kohteessa on käytössä turbotyypiset kompressorit, joiden keskimääräinen imutuotto prosessin

käydessä on n. 100 Nm³. Korkeampia paineita tarvittaessa kaikki mainitut kompressorimallit voidaan rakentaa useampivaiheisiksi korkeampien painevaatimusten niin edellyttäessä [4, 16-29].

2.2 Instrumentti-ilmaa käyttävät prosessiventtiilit

Niin kuin kompressoreissa, myös prosessiventtiileissä eri mallien kirjo on laaja. Työssä keskitytään kohteessa pääasiassa käytössä oleviin Neles-toimilaitteisiin ja venttiiliohjaimiin (kuva 1).



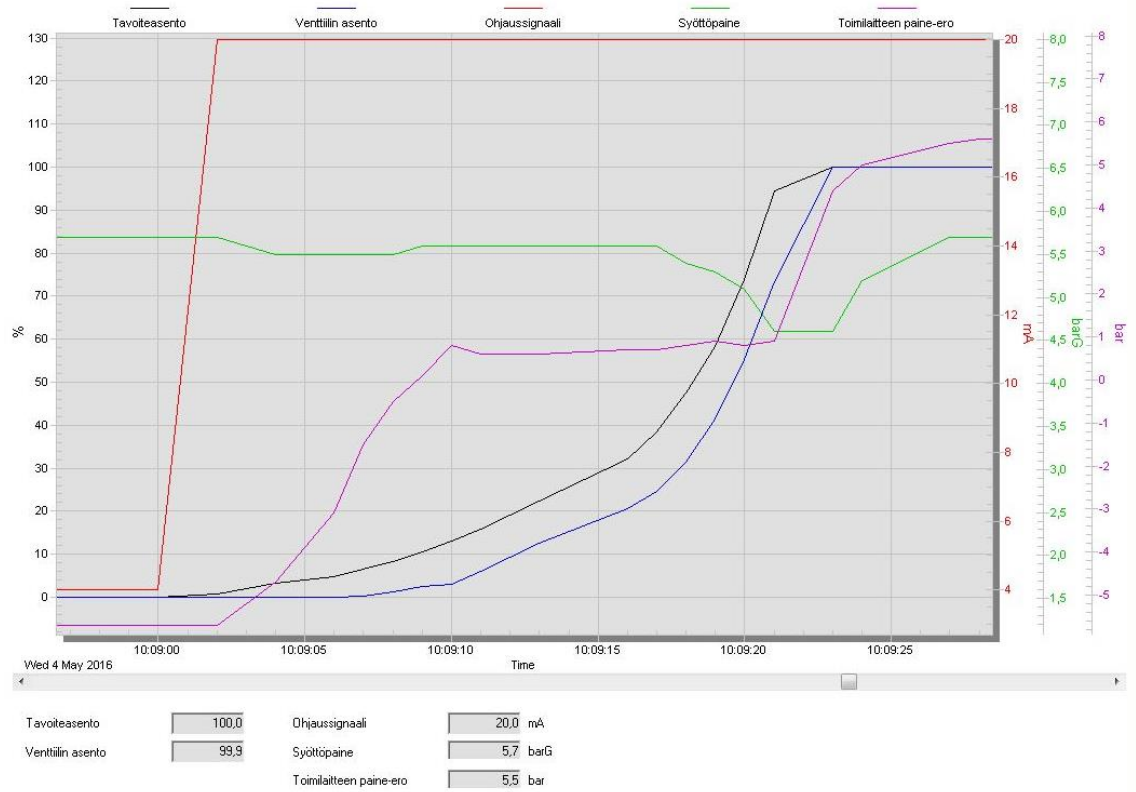
Kuva 1 Metso Neles -venttiili toimilaitteella ja ND9000 -ohjaimella [5]

Venttiilien toimilaitteiden toimintaan ei synny merkittävää haittaa pienistä jakotukien vuodoista. Toimilaitteiden laajan syöttöpaineenalueen vuoksi jakotukeilla esiintyvät vuodot aiheuttavat vain taloudellisia menetyksiä tarpeettomien kulujen muodossa. Suuremmat painehäviöt venttiileitä syöttävissä linjoissa voivat aiheuttaa venttiilien toiminnan hidastumista tai vajaatoimintaa. Toimilaitteen liikkeen

alussa tämä tilanne voi olla mahdollinen matalan syöttöpaineen vuoksi. Mahdollinen paineen romahtaminen liikkeen alussa johtuu yleensä ahtaista paineilman syöttölinjoista venttiilille ja toimilaitteen äkillisestä suuresta ilman tarpeesta nopeilla venttiilin liikkeillä. Toisaalta syöttölinjoja ei ole tarpeellistakaan rakentaa poikkipinta-alaltaan suuremmiksi toimilaitteen ollessa muuten kunnossa, koska suurten venttiilien ei ole tarpeellista liikkua räjähtävästi liikkeiden alussa.

Neles SG9000H -venttiilinohjaimen paineilman toiminta-alueeksi valmistaja ilmoittaa 3-8 bar [1, 3]. Tehtaan jakokotelolta mitattiin 5,8 baaria, mikä riittää hyvin venttiilien ohjaukseen ja venttiilien toimimisen varmistamiseen. Teollisuusprosessin erilaisista ajotilanteista ja putkissa liikkuvista massoista johtuen ilmanjakelunpaine on hyvä pitää hieman korkeampana kuin venttiilien vaatima minimipaine. Kohtuullinen paineen korotus minimivaatimuksista parantaa prosessin toimintavarmuutta, mutta lisää kompressorien tekemää työtä. Hieman korkeammalla paineella varmistetaan riittävä ilmansaanti venttiileille kaikissa prosessin ajovaiheissa [3, 9].

Syöttöpaineen heittely voi johtua myös muista prosessissa toimivista suurista paineilmatoisista venttiileistä tai muusta suuresta hetkellisestä ilman kulutuksesta. Tällöin on syytä kiinnittää huomiota paineilmanverkon suunnitteluun ja mahdollisiin laajennustarpeisiin. Teollisuudessa käytetään tuotannon kannalta kriittisissä kohteissa venttiilien kunnonvalvontaan jo hyvin yleisesti Fieldcare-ohjelmistoa. Ohjelmistoon sisältyy Metso valve manager -venttiilienvälvontatyökalu, jolla voidaan seurata venttiilin toimintaa (kuva 2).



Kuva 2 Metso Valve Manager SG9000H laitetyypin monitoroinnista esimerkki syöttöpaineen heittelystä

3 Paineilman ominaisuudet

Paineilmaa suositaan energiansiirtomateriaalina sen edellä mainittujen ominaisuuksien vuoksi. Paineilman teoreettisessa tarkastelussa otetaan huomioon ilman fysikaaliset ominaisuudet. Kaasut ovat lämpötila- ja kokoonpuristuvuusriippuvaisia, toisin kuin kokoonpuristumattomat nesteet. Näistä syistä teoreettisiin tarkasteluihin käytetään kaasuilla massavirtaa, koska tilavuusvirta vaihtelee paineen ja lämpötilan mukaan [3, 17]. ”Putkessa tapahtuvassa virtauksessa on jokaisessa poikkileikkauksessa läpi menevä massa yhtä suuri eli massavirta on vakio” (Pneumatiikka 2002, s.17).

Normaaleiksi vakiintuneet ilman fysikaaliset ominaisuudet [3, 14]:

paine, $p_0 = 1,013 \text{ bar}$

lämpötila, $T_0 = 293 \text{ K} = 20 \text{ °C}$

tiheys, $\rho_0 = 1,22 \text{ kg/m}^3$

ominaiskaasuvakio, $R = 287 \text{ J / (kg K)}$

Tarkasteluja varten tilavuusvirrat redusoidaan normaaliin ilmanpaineeseen yksikössä NI/s (normaali-ilmanpaineessa litraa/sekunti), jolloin tilavuusvirran arvot ovat vertailukelpoisia keskenään [3, 17; 3, 50].

Huomioitavia tilasuureiden yksiköitä [3, 11-17]:

tiheys, $\rho = \text{kg/m}^3$

paine, $p = \text{N/m}^2$

Lämpötila, $T = \text{K}$

tilavuus, $V = \text{m}^3$

virtauspoikkipinta-ala, $A = \text{mm}^2$

tilavuusvirta, $q = \text{m}^3 / \text{s}$

virtauksen nopeus, $v = \text{m} / \text{s}$

massavirta, $\dot{m} = \text{kg} / \text{s}$

Ilmalle käytetään teoreettiseen tarkasteluun ideaalikaasun tilayhtälöä, koska se soveltuu siihen hyvin kohtalaisen matalilla ilmanpaineilla (alle 30 bar) ja normaaleissa lämpötiloissa [3, 12].

Ideaalikaasun tilayhtälö lasketaan kaavalla 1 [3, 12]:

$$pV = mRT \quad (1)$$

missä, $m =$ kaasun massa

Ilmantiheyden riippuvuus paineesta ja lämpötilasta, kaava 2 [3, 14]:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p}{RT} \quad (2)$$

3.1 Paineen mittaaminen

Edellä mainituista ilman ominaisuuksista huomataan tiettyjen tilasuureiden mittaamisen toteutuksen hankaluus. Esimerkiksi paineilman tilavuus- tai massavirran mittaaminen prosessista on haastavaa. Yleisin ja tarpeellisin on painemittaus. Riittäväällä ilmanpaineella varmistetaan venttiilien toimilaitteiden tarkoituksen mukainen toiminta. Ilmanpaineen mittauksilla varmistetaan tuotannon toimintakyky laadukkaan ja ennakoivan kunnonvalvonnan näkökulmasta. Painemittareita on perinteisiä analogisia viisarinäytöllisiä sekä laajemmilla ominaisuuksilla varustettuja digitaalisia paineantureita.

Paineen mittaamiseen käytetään paineantureita ja -lähettimiä, joita valmistetaan erilaisille painealueille. Oikealla painealueen valinnalla saavutetaan sopiva mittauksen herkkyuden taso. Anturin mitta-alueen valitaan vaikuttaa prosessissa esiintyvät paineenvaihteluiden ääripäät. Oikeaoppisella anturin mitta-alueen valinnalla mahdollistetaan paras mittauksen erottelukyky. Erottelukyvyllä tarkoitetaan lähtöviestin pienintä askelmuutosta mitta-arvon muutoksessa.

Paineenmittaus on paine-eromittaus. Yleensä vertailupaineeksi valitaan vallitseva ilmanpaine sen helppouden ja käytännöllisyyden vuoksi. Kun verrataan mittauspainetta vallitsevaan ilmanpaineeseen, puhutaan suhteellisesta mittauksesta. Muita painemittauksia ovat tyhjiöön eli absoluuttiseen paineeseen verrattava mittaus sekä paine-eromittaukset, joissa vertailupaine ei ole tyhjiö tai vallitseva eli suhteellinen ilmanpaine [6, 38].

Paineen yksikkö Pascal (Pa) saadaan kaavalla 3 [3, 16]:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{N}{m^2} = Pa \quad (3)$$

Normaali-ilmakehä ilmanpaine, atm [3,17]:

$$1 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar} = 101\,325 \text{ Pa}$$

3.2 Vuodot

Koska paineilman tekeminen on kallista, sen jakelujärjestelmän vuotoihin on syytä kiinnittää huomiota ja korjata turhat vuotokohdat mahdollisimman nopeasti. Vuotavan ilman määrää on hankala mitata käytännössä. Vuotokohdat voivat olla erilaisia, hankalissa paikoissa tai niin meluisissa tiloissa, ettei niitä voi normaalisti kuulemalla havaita.

Pahimmassa tapauksessa havaitsemattomista vuodoista aiheutuva haitta vaikuttaa tehtaan lopputuotteen laatuun. Tämän hetkisessä järjestelmässä ilmanpaineen mittauksia ei juuri ole käytössä kohteessa, joten mahdollisista paineenalennuksista ei saada selvää tietoa valvomon käyttöhenkilöille. Turhat ilmavuodot myös kuluttavat tarpeettomasti kompressoreita ja sähköä.

Ilmavuotojen havaitsemiseen ja mittaamiseen on kehitetty muutamia erilaisia mittaustapoja. Ne ovat käyttökelpoisia vuotojen paikallistamiseen, mutta eivät tarkan vuodon määrän mittaamiseen. Siksi onkin käytännössä tehtävä suuntaa antavia havainnoiteja ja mittauksia ilmanmäärästä, kun tiedetään järjestelmän olosuhteista paine ja vuodon pinta-ala. Tämän vuoksi vuodoista johtuvien kustannustappioiden määrittäminen tarkasti on haastavaa [3, 67].

3.2.1 Vuotokohtien etsiminen

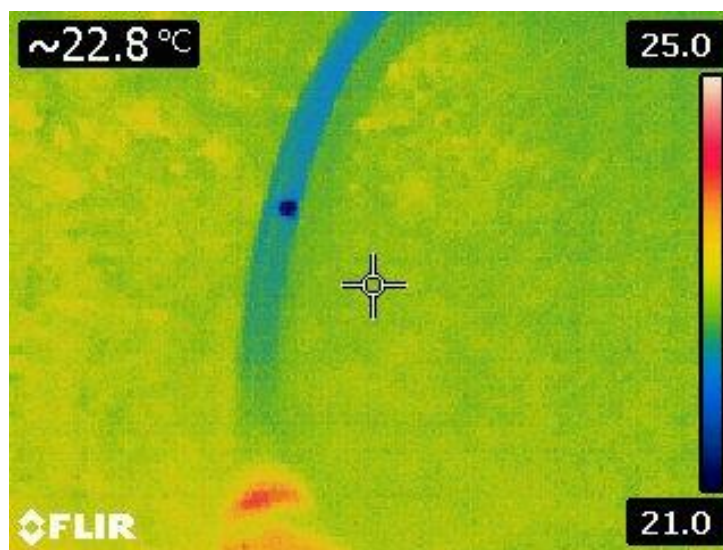
Ilmavuodot on helpoin havaita järjestelmästä kuuluvana suhinana. Mitä korkeampi paine-ero suhteellisen ilmanpaineen ja teollisuusverkon paineen välillä on, sitä selvemmän ääni on kuultavissa [3, 67]. Aina vuotoääniä ei kuitenkaan voi kuulla. Joissain kohteissa laitteiston aiheuttama taustamelu on niin kova, että vuotoääniä ei kuule. Jos ilman seassa on esimerkiksi pölyä tai muita epäpuhtauksia, voidaan vuodot havaita myös näkemällä.

Kohteessa testattiin, kuinka hyvin lämpökamera soveltuu ilmavuotojen havaitsemiseen. Valvotuissa testiolosuhteissa vuotokohta havaittiin lämpökameralla selvästi (kuva 4). Todettiin kuitenkin, että vuotoja ei voida luotettavasti tällä tavalla

havaita. Matalasta ominaislämpökapasiteetista johtuen ilma ehtii lämmentä samaan lämpötilaan ympäristön kanssa paineilmaverkossa. Hävikkikohtia etsiessä ollaan hieman kauempana vuotokohdista, jolloin kameran ominaisuuksilla on lisääntyvä merkitys mittausluotettavuuteen. Lämpökameroiden resoluutio ei ole kauempaa kuvattuna riittävä luotettavaan vuotojen havaitsemiseen. Kohteen lämpösäteilyyn perustuva mittaus ei ole myöskään vuotokohdan koon määrittämiseen mittatarkkuudeltaan riittävä.



Kuva 3 Testiputken 0,3 mm:n vuotoreikä 6 mm:n putkessa



Kuva 4 Testiputken 0,3 mm:n reikä lämpökameralla 6 bar

Paras tapa vuotojen havaitsemiseen on ultraäänimittaus. Ultraääni on taajuudeltaan >20 kHz. Etenkin pienistä vuotokohdista purkautuvat ja turbulentit kaasut tuottavat myös korkeaa ihmisen kuuloalueen yläpuolella olevaa ääntä. Ultraäänimittauksessa nämä taajuudet havaitaan selvästi ja suodatetaan muusta taustakohinasta ihmisaistein havaittaviksi suureiksi [7, 7]. Yleisin meluisissa kohteissa käytettävä vuodonilmaisin on kannettava ultraäänimittari (kuva 5). Mittari ilmoittaa vuodon mittalaitteen omalla mitta-asteikolla näytöllä sekä kuulokkeisiin kuultavaksi muunnetulla äänellä. Mittauksiin valittiin logaritminen ultraäänen intensiteetin ilmaisuasteikko. Logaritmi esitystavan etuna lineaariseen mitta-asteikkoon on selvästi erottuvat ”piikit” vuotokohdissa. Logaritmiasteikko, kuten suoritetuissa mittauksissa on 0-140 [7, 26].



Kuva 5 Kannettava ultraäänimittausvuodonilmaisin mittapäineen

Vuotomittaukset tehtiin tehtaalla olevalla Sonotec Sonaphone M kannettavalla ultraäänimittarilla. Mittaukset rajautuivat jakokoteloihin, joissa käyttö- ja kunnossapitohenkilökunta havaitsee lisääntyvästi vuotoja. Mitta-alueen koosta johtuen mittauksissa käytettiin lähietäisyyksillä toimivaa L50-anturia. Mitattavaksi taajuudeksi valittiin 40kHz [7, 26]. Vuotojen sijainti, koko ja lukumäärä merkittiin tarkastuspöytäkirjaan.



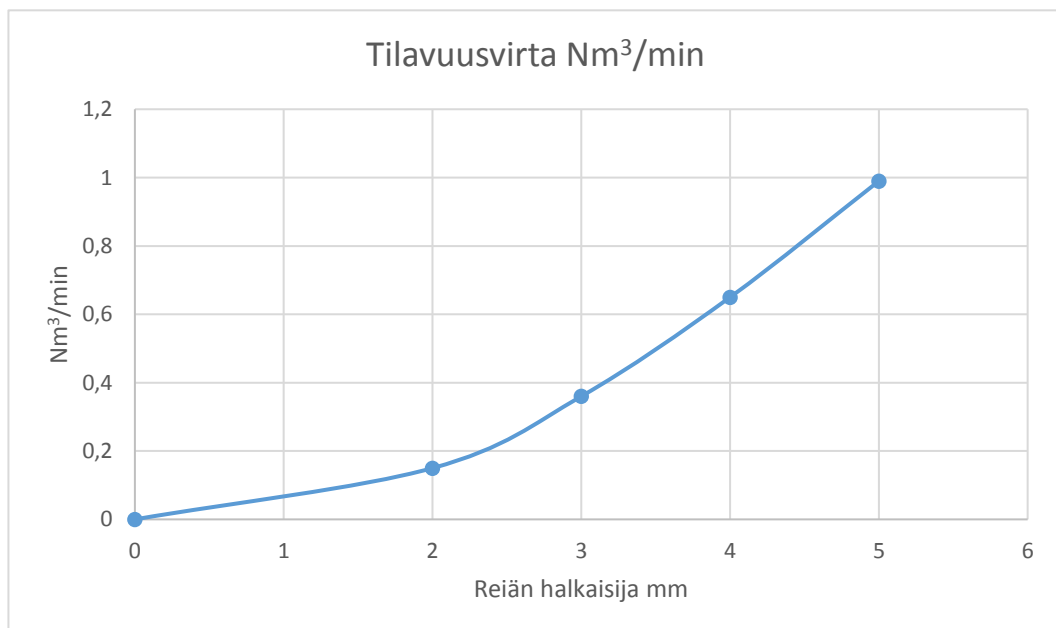
Kuva 6 Vuotojen havaitseminen SONOTEC SONAPHONE M mittarilla

3.2.2 Vuotojen määrittely

Helpoin tapa mitata vuodon määrä on sulkea kaikki paineilmaa käyttävät laitteet, ja tarkastella, kuinka paljon ilmaa virtaa verkostoon ja näin ollen vuotokohdista järjestelmästä ulos [4, 85]. Tällainen koe ei kuitenkaan onnistu kohteissa, joissa prosessia ei pysäytetä ilmavuotojen tarkastelua varten. Tuotantoa pystytään ajamaan tehtaalla pienistä vuodoista huolimatta. Kustannustappiot olisivat kohtuuttoman suuret saatuihin hyötyihin nähden.

Mittari ei varsinaisesti ilmoita vuodon suuruutta vaan valitulle taajuusalueelle aiheutuvan ultraäänen voimakkuuden valitun näyttötavan mukaan. Vuotokustannusten arviointiin tarvitaan reikien pinta-alat. Ilmanvuotokohtien alat määriteltiin työssä vertaamalla vuodon suuruutta tehtaan korjaamalla suoritettuihin vertailuvuotoihin. Koska vuotokohdat eivät ole aina pyöreitä reikiä, tarvittiin pinta-alan määrittämiseen vertailukohtia. Vertailuarvot saatiin poraamalla koepaineilmaputkiiin 0,3 ja 0,5 mm halkaisijaltaan olevat reiät. Tuloksista saatiin arvot kentällä olevien vuotojen pinta-alojen suuruusluokan arviointiin. Testireikiä suuremmat kohdat voitiin havaita tarvittaessa näkemällä, jolloin myös pinta-ala voitiin todeta mittaamalla.

Kaikki työhön kuuluvat 70 jakokoteloä käytiin läpi ja kirjattiin niissä esiintyvät vuodot. Kaikista vuodoista laskettiin keskiarvo vuotoreiän halkaisijasta, jota käytetään kustannustappion laskemiseen. Paineilmalaitteiden valmistajilla on omat esityksensä vuodoista hukkaan menevästä ilmanmäärästä (kuva 7). Taulukoista saadaan hyvä vertailukohta itse laskettuihin tuloksiin ja hukkailman suuruusluokan määrittämiseen.



Kuva 7 Feston vuodon tilavuusvirta Nm³/min [4, 84]

3.2.3 Laskentaohjelma

Koska ilmapuotolaskuihin tarvittava massavirran selvittäminen osoittautui työlääksi tehtäväksi, suoritettiin tarvittavat massa- ja tilavuusvirtojen laskennat tarkoitukseen soveltuvalla laskentaohjelmalla. Sopivaksi ohjelmaksi valittiin saksalaisen Software Factoryn tarjoama Pressure Drop -ohjelma, jonka ladattavalla ilmaisversiolla saatiin työn tarvittavat laskennat suoritettua [8].

Pressure Drop on ohjelma putkissa virtaavien nesteiden ja kaasujen laminaaristen ja turbulenttien virtauksien laskentaan. Ilmaisversio soveltui käyttötarkoitukseen riittävän hyvin sen sisältämien ilmanlaadun määrittämismuunnosominaisuuksien sekä monipuolisten putkien rakennemääritysten ansiosta. Ohjelman käyttöön suhtauduttiin aluksi hieman skeptisesti sen vaatimattomien laatusenssien puutteellisen esittämisen vuoksi, mutta todettiin laskelmien asettuvan järkeviin arvoihin työn edetessä.

3.2.4 Vuotojen ilmamäärän laskeminen

Kun halutaan määrittää järjestelmästä vuotavan ilman määrä, selvitetään tarkasti jokainen yksittäinen vuotokohta. Tämä ei ole työssä kuitenkaan tarpeellista, koska tiedetään pienistäkin vuodoista järjestelmässä aiheutuvan turhaa ilman kulutusta. Mitatut kohteet olivat suuruusluokiltaan melko lähellä toisiaan, koska vuodot esiintyivät pääasiassa jakotukkien tietyissä kohdissa. Tarkastuksessa havaittiin myös magneettiventtiilien vuotoja sekä liitosnippavuotoja. Kaikki vuotokohdat tulisi pyrkiä sulkemaan mahdollisimman pian havaitsemisen jälkeen.

Vuotava ilmamäärä lasketaan tähän tarkoitukseen soveltuvalla Pressure Drop -ohjelmalla. Ohjelma on tarkoitettu paineen alenemisen laskemiseen. Sitä käytetään soveltavasti tässä työssä ilmanmäärän määrittämiseen. Ensin haetaan järjestelmän ilmanpaine paineenalenumana suuttimen läpi, jolloin saadaan ohjelmasta virtaama litraa/sekunnissa. Ilman tiheytenä käytetään kuuden baarin paineista tiheyttä, mikä vastaa seitsemän baarin absoluuttista painetta. Ilman tiheys lasketaan kaavalla 2:

$$\rho = \frac{7,0 \cdot 1,013 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}}{287 \frac{Nm}{kg K} \cdot 293K} = 8,43 kg/m^3$$

Kompressoreilla paineistettu ilma kuivataan ilmankuivaimella. Ohjelmalla laskettiin kuivan ilman ominaisuudet (kuva 8).

Paine, absoluuttinen: 7 bar

Lämpötila: 20°C

Tiheys: 8,337 kg/m³

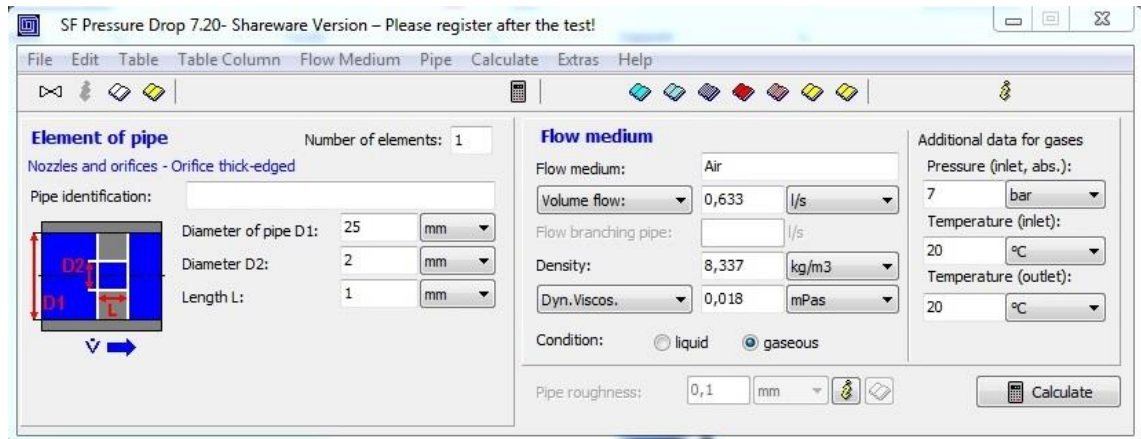
Tilavuus: 0,12 m³/kg

Viskositeetti: 18 · 10⁻⁶ Pas

Kuva 8 Ilman ominaisuuksien määrittäminen

Määritetyt ilman ominaisuudet viedään pääikkunaan laskentaohjelmaan. Vuodon virtauskohdan seinämäpaksuus vaikuttaa hieman paine-eroon, mikä on syytä

muistaa tuloksien arvioinnissa. Saadut arvot ovat vertailukelpoisia eri laitevalmistajien ilmoittamiin virtausmääradiagrammeihin [4, 84]. Asetusten määrittysten jälkeen haetaan virtaamaa muuttamalla paine-eroksi mahdollisimman lähelle tehdasverkon paine (kuva 9). Laskennat suoritettiin kuuden baarin paine-erolle.



Kuva 9 Virtausmäärän hakeminen määritetystä suuttimesta (reiästä)

Saaduista arvoista tehtiin taulukko (liite 1), josta selviää vuotavan ilman määrä erikokoisista pyöreistä vuotorei'istä. Tehtaan kompressoreilta saadaan järjestelmästä mitattu imutuotto eli se ilmamäärä, jonka laite ottaa normaalipaineista ilmaa työhön. Taulukoidut arvot ilmoitetaan redusoituna normaaliin ilmanpaineeseen. Vuoto- ja imuilmamäärät ovat näin vertailukelpoisia keskenään.

Ohjelmasta saadaan ilman massavirta [3, 18]. Massavirta tarvitaan ilmantilavuusvirran redusointiin normaali-ilman paineeseen NI/s. Massavirta lasketaan tarkasteluja varten kaavalla 4:

$$\dot{m} = q \rho \quad (4)$$

missä,

$$\dot{m} = \text{massavirta, kg/s}$$

Normaali-ilmanpaineinen tilavuusvirta lasketaan kaavalla 5 [3, 19]:

$$q_0 = \frac{q_{\dot{m}}}{p_0} \quad (5)$$

3.2.5 Vuodoista aiheutuvat kustannukset

Vuodoista aiheutuvien kustannusten määrittely on tärkeää, että saadaan selvä käsitys hukkaan heitetystä kompressorityöstä. Kustannukset määritetään selvitystä ilman tilavuusvirrasta [3, 18]. Kompressorivalmistajat ilmoittavat tuotteidensa imutuoton m^3/min . Koska imutuotto on normaalipaineisen ilman tilavuus, se on suoraan vertailukelpoinen vuotojen normaalipaineeseen redusoituun arvoon [3, 50-51]. Suurissa teollisuuslaitoksissa kompressorien tuotto mitataan reaaliaikaisena mittauksena. Mittausta käytetään, koska prosessin ilman tarpeen määrä voi vaihdella. Ilmavuotojen takia kompressoreissa on syytä olla hieman ylimääräistä kapasiteettia prosessin toiminnan varmistamiseksi.

Turhat kustannukset selvitetään tarkastelemalla järjestelmään menevän ja sieltä vuotavan ilman tilavuuksia. Tarkastetuista vuotokohtien pinta-aloista saadaan keskimääräinen vuotopinta-ala A_k . Selvitetään kompressorien sähköteho, kWh ja imutuotto Nm^3/h . Lasketaan kompressorien hyötysuhde, μ kaavalla 6:

$$\mu = \frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3/\text{h}} \quad (6)$$

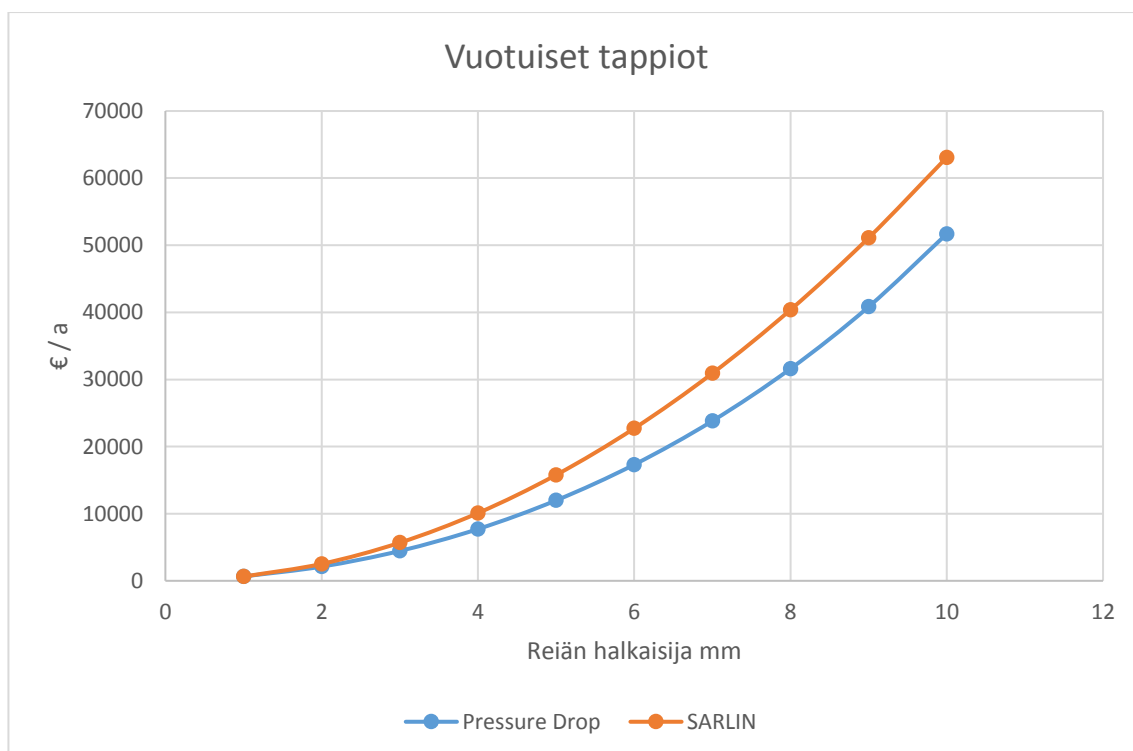
Vuotavan ilman määrä Nm^3/h katsotaan ilmavuototaulukosta (liite 1). Vuodoista aiheutuva turha energiahukka lasketaan kaavalla 7 vuotojen keskiarvo pinta-alan lähimmästä taulukoidusta pinta-alasta ja kompressorin hyötysuhteesta:

$$\text{kWh} = \mu * \text{Nm}^3 \quad (7)$$

Ilmanpaineistamiseen menevästä turhasta työstä ja työhön käytetystä ostoenergian hinnasta lasketaan kustannustappiot:

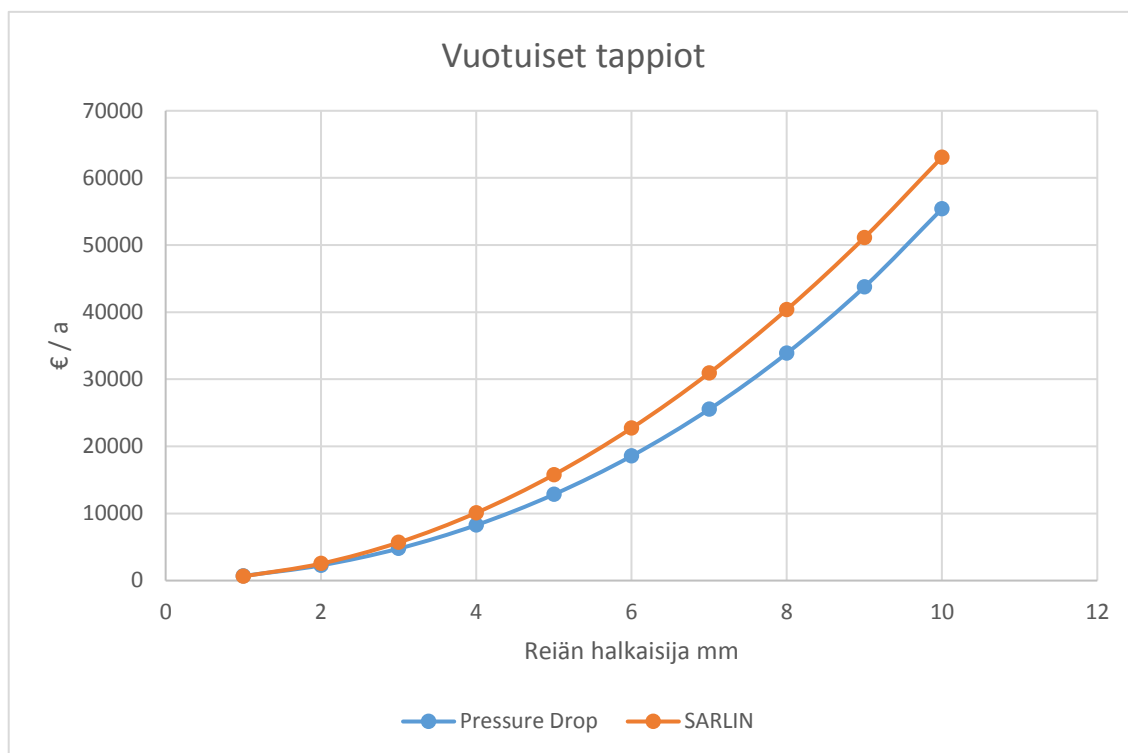
$$Tappiot = \text{Energian hinta} \frac{\text{€}}{\text{kWh}} * \text{kompressorityö kWh} \quad (8)$$

Paineilmapalveluja teollisuuteen tarjoavalla Sarlin-yhtiöllä on internet-sivuillaan vuodon hintalaskuri, jolla kuluttaja voi itse laskea vuotuisen hukan (kuva 10). Laskurin arvot ovat suuruusluokaltaan melko lähellä Pressure Drop -ohjelmalla selvitettyjä arvoja.



Kuva 10 SARLIN-laskurin ja Pressure Drop -ohjelman tuloksilla tappiot 0,14€/kWh sähköhinnalla [9]

Pressure Drop -ohjelmalla selvitetty vuotojen hinnat nousevat Sarlinin laskurin mukaan jyrkemmin. Osasyynä tähän on kaikissa virtausmitoituksissa käytetty sama vuotokohdan seinämävahvuus ja ilmanjakelulinjan halkaisija. Hinnan määritymiseen vaikuttaa vielä enemmän kompressorin tehokkuus sähköenergian muuttamisesta paineilmaksi. Arvot laskettiin turbokompressorin hyötysuhteella, joka on kohteessa n. 6,53 kW/m³/min. Sarlinin tulokset ovat nettilaskurin kompressorin 7 kW/m³/min. Kun kompressorin hyötysuhde muutetaan vastaamaan Sarlinin arvoja, nähdään tulosten ja käyrien jyrkkyyksien olevan lähempänä toisiinsa (kuva 11).



Kuva 11 Vuotuiset tappiot samalla kompressorin hyötysuhteella

4 Mittauksen suunnittelu

Mittauksen suunnittelussa otetaan huomioon mittauksen tarve, mitattava suure, suureen ominaisuudet, ympäristökijät, mittaustapa, tiedonsiirto, asennustapa, kaapeloinnit, liittäminen järjestelmään, käyttöhenkilökunnalle visuaalinen esitys järjestelmään, huollettavuus ja varaosien saannin jatkuvuus.

Prosessin seuraamisen ja laadun kannalta suunniteltiin vuotojen indikoinnin lisäksi painemittaukset asennettaviksi tärkeisiin jakotukkeihin. Tällä tavoin saadaan rakennettua parempi kokonaiskuva prosessin toiminnasta ja siihen mahdollisesti ilmentyneistä vuodoista ja prosessin instrumentti-ilman laadusta. Paikallisnäytöllä varustetusta painelähtetimestä kunnossapitohenkilön on helppo tarkistaa jakotukin painelukema. Järjestelmään indikoitu jakotukin paine voidaan tarkastaa myös lähtetimen paikallisnäytöstä.

Vaativat olosuhteet otettiin huomioon suunniteltaessa järkevintä mittaustapaa vuotojen ilmaisemiseen kohteessa. Mittauksilta viedään tieto käyttäjien ja kunnossapitohenkilökunnan tarkasteltavaksi järjestelmään. Prosessia ohjataan TotalPlant Alcont-järjestelmällä (TPA).

Järjestelmään tehdään indikointi mittauksista ja suunnitellaan rakenteen osalta painelähtimien liittäminen prosessiin. Mietitään mittaustietojen käsittely, positiot, esittäminen, tarvittavat hälytykset ja historiatoiminnot. Huomioidaan järjestelmään jo ennestään prosessin hoitajien näyttökuviin valitut värit ja ulkoasut yhteneväisen esitystavan toteuttamiseksi.

4.1 PAINELÄHETIN

Paineantureiksi valittiin valmiilla varastonimikkeellä olevat sopivat painelähtimet. Anturit asennetaan jakotukkien päihin (kuva 12), jotta kaikki jakotukinlähdet jäävät vapaaksi mahdollisia prosessimuutoksia varten. Jakotukin ja painelähtimen väliin asennetaan käsikäyttöiset sulkuventtiilit anturin vaihtoa varten. Viikaantunut anturi voidaan vaihtaa myös prosessin käydessä.

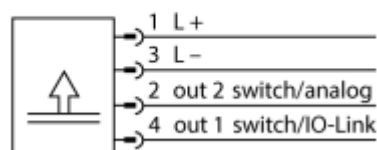
Sähköiseen painelähtimeen vaikuttava paine johdetaan anturin kalvolle. Kalvon toisella puolella on tähän muutokseen reagoiva tuntoelin [6, 39]. Vaativissa painemittausolosuhteissa kalvon ja tuntoelimen välissä käytetään hydraulinestettä, kuten öljyä välittäjäaineena jolloin itse tuntoelin voidaan sijoittaa vähemmän vaativiin olosuhteisiin. Tuntoelimen signaali muutetaan standardivirtaviestiksi 4-20mA [10, 124-125].



Kuva 12 Painelähettimen koeviritys 0-6,5 bar

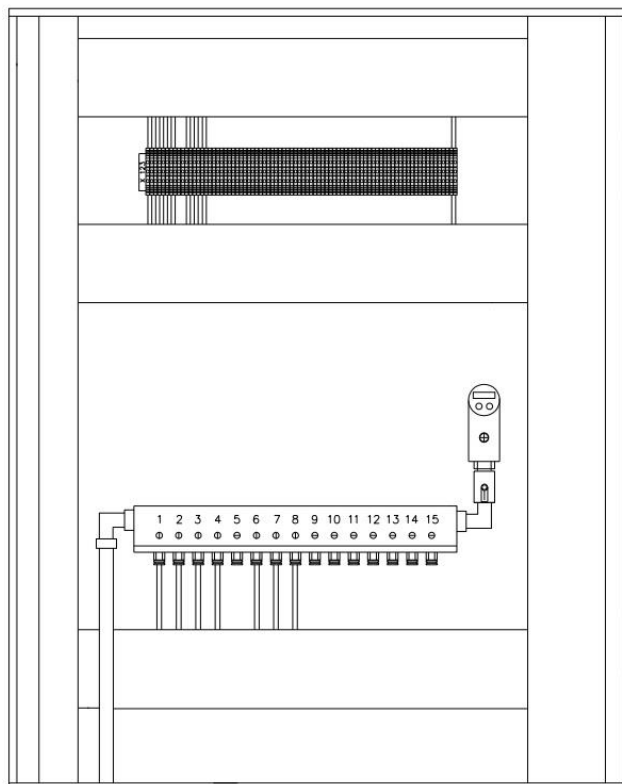
Valittujen anturien painealue on 0-10 bar. Anturit voidaan virittää mittaamaan suurinta aluetta suppeampaa mittausaluetta tarvittaessa [3, 39]. Huollon ja mahdollisen vaihtotyön helpottamiseksi on käytännöllisempää jättää antureihin tehdasviritysarvot. Tehdasviritystä ei ole tarvetta muuttaa, koska järjestelmäpaine on noin 6 baaria. Prosessin seurannan ja mittaustarkkuuden kannalta anturien tehdasviritys ja erottelukyky ovat riittävät prosessin paineenvaihtelun analysoimiseksi. Anturointia suunniteltaessa otetaan huomioon, käytetäänkö passiivisia vai omavoimaisia lähettäjiä. Alcont-järjestelmään tehtaalla on pääasiassa liitetty passiivia kaksijohdinlähettäjiä. Uudet paineanturit kytketään kolmijohdinkytentänä [6, 20].

Wiring Diagram



Kuva 13 Painelähettimen liitäntä [11, 1]

Anturille tuodaan järjestelmästä 24V syöttöjännite nastoihin yksi ja kolme. Lähettimessä on tehdasasetuksena analogia viesti out2 I/O-liitännästä. Prosessiliitäntäkorttina käytetään milliampeeriviestin mittaamiseen analogiatulokorttia. TPA-ohjelmaan suunnitellaan mittauksen indikointi 4-20mA, 0-10bar. Paineenmittauksille määritetään tarvittaessa alarajahälytykset [6, 124]. Hälytyksen suunnittelussa huomioidaan hälytyksen tulostuksen viivästyttämisen tarve mahdollisten paineenheilahteluiden vuoksi. Mietitään myös, tarvitaanko käyttäjille tulostaa ohjeita hälytyksen tultua. Hälytysväreinä käytetään vakioituneita värejä selkeyden vuoksi.



Kuva 14 Esimerkki painelähettimen asennustavasta

4.2 Ultraäänilähetin

Ilmavuodon havaitsemiseen paras mittaustapa on tällä hetkellä ultraäänimittaus. Vuotokohdasta purkautuva kaasu aiheuttaa ääntä myös ihmiskorvan kuuloalueen yläpuolelle. Yleensä tarkastelutaajuus on n. 40 kHz, jolloin ääni on selvimmin havaittavissa eikä ympäristöstä aiheudu häiriöääniä tälle taajuudelle.

Kun kaasun paine-ero on riittävä ympäristön paineeseen verrattuna, se tuottaa vuotokohdasta purkautuessaan kuuloalueella (20-20000 Hz) olevan suhinan lisäksi voimakasta ääntä myös > 20 kHz taajuudelle. Ultraäänilähettimen mittaustaajuusalue on >25 kHz < 75 kHz. Tähän tarkoitukseen suunniteltuja vuodonilmaisinelähttimiä on markkinoilla vielä melko rajoitetusti. Teollisuudessa, jossa käsiteltävät kaasut ovat räjähdysherkkiä ja tulenarkoja ultraäänimittauksia käytetään niiden nopean toimintavasteen vuoksi. Ultraäänimittaus on oikein sijoitettuna kaikkein tarkin havaintomenetelmä vuodonilmaisuuksiin. Nopean reagoinnin vuoksi mittauksissa käytetään muutaman kymmenen sekunnin aikaikkunaa vuodon jatkuvuuden mittaamiseen ja vuodon varmistamiseen [12, 2-5].

Ultraäänilähetintä käytettäessä kiinteänä mittauksena paineilmaavuodon ilmaistamiseen suodatetaan hetkelliset ilma- ja kaasuvuodot pois. Hälytyksiä suunniteltaessa asetetaan vuodon intensiteetti raja ja minimi aika raja-arvon ylittymisestä hälytyksen tulostamiseen. Minimi ajalla poistetaan turhat hälytykset, joita prosessin käydessä on mahdollista esiintyä. Järjestelmään liittäminen toteutetaan analogiatulokorttiin milliampeeriviestiä käyttävän lähettimen liitännätavalla.

4.3 Järjestelmään liittäminen

Teollisuudessa instrumentoinnin liittäminen tehtaahan ohjausjärjestelmään toteutetaan aina samankaltaisen järjestelmän rakenteen kautta. Tehtaalla on käytössä useita eri valmistajien logiikkajärjestelmiä [6, 104-105]. Prosessiohjaukseen käytetään kohteessa Honeywell yhtiön toimittamaa Total Plant Alcont -logiikkaa.

Kaikki samaan automaatiojärjestelmään liitettävät instrumentit kytketään samaa toimintatapaa käyttäen. Kenttälaite liitetään parikaapeloinnilla (NOMAK, JAMAK) lähimpänä olevan jakokotelon riviliittimiin. Jakokotelolta mittasuure viedään ristikytkentäkaappiin. Ristikytkennältä signaali viedään prosessiliitännäkortille. Viestinä käytetään vähiten häiriöherkkää standardoitua 4-20 mA:n milliampeeriviestiä. Logiikalla luetaan viesti ja käsitellään se ohjelmoiduilla loogisilla operaatioilla

ohjaamaan prosessia. Kyseinen painemittaus ilmoitetaan pelkkänä mittaustietona, eikä ohjauksena. Jakotukin painemittauksella ei ole tarvetta vaikuttaa prosessinohjaukseen.



Kuva 15 Automaattiorakenne

5 Pohdinta ja arviointi

Työssä selvitettiin tehtaan eniten tuotantokatoja aiheuttavan keittämön osalta paineilmajakelun vuodot jakokoteloilla. Suoritettiin ja taulukoitiin laskennat paineilmavuotojen suuruusluokista yleisille vuotokohtien pinta-aloille. Työssä havaittujen vuotojen määrät ja koot kirjattiin tarkastuspöytäkirjaan ja määritettiin vuodoista aiheutuvat tappiot. Jakotukkien uudistusta varten suunniteltiin parannus mahdollisuuksia paineilmalaadun tarkkailuun ja vuotojen havaitsemiseen.

Vuotokohtien tiedettiin olevan pääasiassa jakokoteloissa instrumentti-ilman jakotukeissa. Useat magneettiventtiilien vuodot paikannettiin kannettavan ultraäänimittarin avulla. Vuotopinta-alojen määrittämistä hankaloittivat vuotokohtien vaihtelevat muodot. Ultraäänimittauksessa kiinnitettiin huomiota anturipään va-

lintaan, että välttyttiin virheellisiltä mittauksilta kuten heijastuksilta. Ultraäänimittaus on luotettava vuodon paikantamiseen oikein käytettynä. Mittauksella voidaan monipuolistaa myös prosessiventtiilien FieldCare -kunnonvalvontaohjelmiston toimintaa mittaamalla venttiilien ja toimilaitteiden mahdollisia ohivuotoja ultraäänellä [13, 2].

Vuotokohtia esiintyi mittauksissa runsaasti. Vuodoista ei ole pienien kokojensa puolesta vielä haittaa venttiilien toiminnalle, mutta niistä aiheutuu vuositasolla kuitenkin merkittäviä kuluja turhana kompressorityönä. Vuodoista johtuvien tappioiden tarkemmalla määrittelyllä ei saavuteta suuressa tehtaassa merkittävää hyötyä. Tehdas tuottaa itse oman sähköenergiansa, mikä laskee hukkaenergian hintaa. Jakotukkien uusinta on kannattavaa tuotantovarmuuden kannalta ja turhien kulujen leikkaamisena. Tuloksista saadaan määritettyä vaihdon rahallinen suuruusluokka vuotojen osalta.

Koteloihin sijoitettavia kiinteitä vuodonilmaisimia suunniteltaessa otetaan huomioon, kuinka paineilmasyöttö venttiileille on toteutettu. Jakokoteloissa on hengityssihti paineen tasaamiseksi. Kohteessa toimilaitteiden liikesuunnan puolen ilmat lasketaan magneettiventtiileistä jakokotelon sisään. Näistä aiheutuvat suuret hetkelliset painenvaihtelut ja melu vaikeuttavat mittauksen suunnittelua. Mittauksen kannalta helpoin tapa olisi johtaa ylimääräiset ilmat suoraan kotelon ulkopuolelle. Vuodoista johtuvan paine-eron tai ultraäänen tason määrittämiseen tulee kiinnittää huomiota.

Prosessinhoitajat ja kunnossapitohenkilöt käyvät usein jakokoteloilla tekemässä venttiilien lukituksia ja muita käyttö- sekä huoltotoimenpiteitä. On mietittävä tarkkaan, onko järkevää investoida uuteen vuodon indikointiin jakokoteloille melko vähäisen hyödyn vuoksi. Vuotavat kohdat ovat koteloiden osalta jo ennestään huoltohenkilökunnan tiedossa. Työssä päätarkoituksena oli selvittää vuodoista aiheutuvat kulut sekä kirjata ylös tarvittavat vaihto-osat.

Ilman kulutusta voidaan teollisuudessa vähentää uusimalla toimilaitteita uudempiin, kun entisten käyttöikä kuluu loppuun. Metson uudet toimilaitteet kuluttavat

huomattavasti vähemmän ilmaa niin staattisessa pidossa kuin liikkeissäkin. Ilmamäärät ovat suuruusluokiltaan huomattavasti alle millin halkaisijaltaan olevaan reikään verrattavissa, mutta venttiilien suuresta määrästä kertyy vuodessa kuitenkin huomattava ilmamäärä.

Työssä selvitettyjä ilmamääriä pinta-aloihin nähden voidaan käyttää kaikkiin paineilmanverkon vuodoista johtuviin vuotojen kustannusarviointeihin.

Lähteet

1. Neles. 2017a. ND9000 älykäs venttiilinojain. <http://valveproducts.metso.com/documents/neles/TechnicalBulletins/fi/7ND9021FI.pdf>. 20.4.2017.
2. Neles. 2017b. NDX älykäs venttiilinojain. <http://valveproducts.metso.com/documents/neles/TechnicalBulletins/en/7NDX20EN.pdf>. 20.4.2017.
3. Ellman, A. Hautanen, J. Järvinen, K. & Simpura, A. 2002. Pneumatiikka. Helsinki. Edita Prima Oy.
4. Hulkkonen, V. 1978. Pneumatiikka 2. Keuruu. Kustannusosakeyhtiö Otava.
5. Metso Oyj. 2017. Neles toimilaitte kuva. <http://www.metso.com/products/ball-valves1/metsos-neles-series-e-ceramic-ball-valve/>. 19.4.2017.
6. Sivonen, M. 1995. Teollisuuden instrumentointi. Helsinki. Painatuskeskus Oy.
7. Sonotec. 2017. Ultrasonic Leak Detector and Leakage Tester. <http://www.spectrum-instruments.com/products/general/documents/SonaphoneMManual.pdf>. 31.5.2017
8. Pressure Drop. 2017. SF Pressure Drop 7.2. <http://www.pressure-drop.com/>. 19.4.2017.
9. Sarlin. 2017. Yksikön muunnos, painehäviön ja vuodon hinta -laskimet. <http://www.sarlin.com/fi/Paineilma/Paineilma---tyokalupakki/Laskurit>. 19.4.2017.
10. Aumala, O. 1996. Teollisuusprosessien mittaukset. Tampere. Pressus Oy.
11. Turck. 2017. Pressure sensor. http://pdb.turck.de/media/_en/Anlagen/Datei_EDB/edb_6833304_gbr_en.pdf. 19.4.2017.
12. MSA. 2017. Ultrasonic Gas Leak Detection. <http://s7d9.scene7.com/is/content/minesafetyappliances/Ultrasonic%20Gas%20Leak%20Detection%20White%20Paper%20-%20EN>. 18.4.2017.
13. Sonotec. 2017. Application note leak detection. http://www.sonotec.eu/fileadmin/media/DE/Produkte/Vorbeugende_Instandhaltung/sonaphone_e/ansonaphone-e-en-leak-detection-sonotec.pdf. 19.4.2017.

Ilmamäärät vuotojen pinta-aloja kohden ja niistä aiheutuvat tappiot

Reiän halkaisija, mm	Virtaus, l/s 600kPa	Massavirta, m kg/h	Massavirta, m kg/s	Paineenalenema, mbar	Redusoitu Normaali- ilmanpaineeseen, Nl/s	Nm ³ /min	Vuotavan ilman määrä, Nm ³ /h	Vuotavan ilman määrä, Nm ³ /a	Kompressori työ, kW/h	Kompressori työ, kW/h a	Tappiot, € a
0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00
0,1	0,001279	0,038	1,05559E-05	6000	0,01	0,00	0,03	277,40	0,00	30	4,23
0,2	0,006685	0,201	5,58333E-05	5995	0,05	0,00	0,17	1467,30	0,02	160	22,37
0,3	0,01682	0,505	0,000140278	6000	0,12	0,01	0,42	3686,50	0,05	401	56,19
0,4	0,03161	0,949	0,000263611	5994	0,22	0,01	0,79	6927,70	0,09	754	105,60
0,5	0,0508	1,525	0,000423611	5992	0,35	0,02	1,27	11132,50	0,14	1212	169,69
0,6	0,074	2,221	0,000616944	5996	0,51	0,03	1,85	16213,30	0,20	1765	247,14
0,7	0,1006	3,019	0,000838611	5993	0,70	0,04	2,52	22038,70	0,27	2400	335,93
0,8	0,12989	3,898	0,001082778	6000	0,90	0,05	3,25	28455,40	0,35	3098	433,74
0,9	0,16114	4,836	0,001343333	5999	1,12	0,07	4,03	35302,80	0,44	3844	538,11
1	0,19395	5,821	0,001616944	5995	1,35	0,08	4,85	42493,30	0,53	4627	647,71
2	0,633	18,998	0,005277222	5999	4,40	0,26	15,83	138685,40	1,72	15100	2113,95
3	1,331	39,948	0,011096667	5991	9,25	0,55	33,29	291620,40	3,62	31751	4445,10
4	2,31	69,33	0,019258333	5999	16,05	0,96	57,78	506109,00	6,29	55104	7714,49
5	3,587	107,657	0,029904722	5999	24,92	1,50	89,71	785896,10	9,77	85566	11979,22
6	5,184	155,588	0,043218889	5994	36,02	2,16	129,66	1135792,40	14,12	123661	17312,60
7	7,13	213,994	0,059442778	5992	49,54	2,97	178,33	1562156,20	19,42	170083	23811,56
8	9,462	283,985	0,078884722	5995	65,74	3,94	236,65	2073090,50	25,77	225711	31599,61
9	12,225	366,911	0,101919722	5995	84,93	5,10	305,76	2678450,30	33,29	291621	40826,96
10	15,479	464,574	0,129048333	5998	107,54	6,45	387,15	3391390,20	42,15	369244	51694,13