

Paperitehtaan höyry- ja lauhdeverkon hallinnan parantaminen

Krister Vesterberg

Opinnäytetyö

Marraskuu 2018

Tekniikan ja liikenteen ala

Insinööri (AMK), Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä(t) Vesterberg, Krister	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Marraskuu 2018
	Sivumäärä 96	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Paperitehtaan höyry- ja lauhdeverkon hallinnan parantaminen		
Tutkinto-ohjelma Insinööri (AMK), Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Hytönen, Kari & Henell, Antti		
Toimeksiantaja(t) UPM Communication Papers		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön toimeksiantaja oli paperiteollisuudessa toimiva UPM Communication Papers, jolla oli tarve selvittää paperitehtaan höyry- ja lauhdeverkon tasealueet ja niissä käytettävät mittaukset. Tasealueiden kartoituksen ohessa kehitettiin myös lauhteen palautusta voimalaitokselle. Toimeksiantaja halusi selvittää tasealueissa havaittujen poikkeamien juurisyyn ja mahdollista mittausvirhettä.</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli muodostaa tehtaan höyry- ja lauhdeverkostosta tasealueita havainnollistava kaavio sekä selvittää tasealueiden mittauksissa havaittuja virheitä. Tavoitteena oli myös kehittää lauhteen palautusta paperikonelinoilta ja osoittaa laskelmin kustannusarvio toimimattomasta lauhteenpoistosta.</p> <p>Työ toteutettiin kehittämistutkimuksena. Tiedonkeruumenetelminä käytettiin havainnointia, haastatteluja, mittauksia, prosessikaavioita, laiteoppaita ja toimintakuvauksia. Merkittävien tiedonkeruumenetelmä oli höyry- ja lauhdeverkoston paikallinen kartoitus. Tietoperustaa hankittiin niin kirjallisuudesta, opetusmateriaaleista kuin sähköisistä lähteistä.</p> <p>Konkreettisina tuloksina tehtiin höyry- ja lauhdeverkon tasealueita kuvaava virtauskaavio ja tasealuekartta. Lauhteenpalautuksessa havaituista merkittävimmistä poikkeamista tehtiin kustannuslaskelmat. Tasealueiden mittausvirheiden luotettavuutta arvioitiin ja tuloksina luotiin ehdotukset jatkotoimenpiteille.</p> <p>Työn tuloksista saatiin useita jatkotoimenpide-ehdotuksia, joita voidaan hyödyntää paperitehtaan energiatehokkuutta kehitettäessä.</p>		
Avainsanat (asiasanat) lauhteenpoisto, lauhdeverkko, virtausmittaus, energiatehokkuus, UPM		
Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)		

Author(s) Vesterberg, Krister	Type of publication Bachelor's thesis	Date November 2018 Language of publication: Finnish
	Number of pages 96	Permission for web publication: x
Title of publication Improving the management of the steam and condensate loop at a paper mill		
Degree programme Degree Programme in Energy and Environmental Technology		
Supervisor(s) Hytönen, Kari & Henell, Antti		
Assigned by UPM Communication Papers		
Description <p>The assignor of the bachelor's thesis was UPM Communication Papers which operates in the field of paper industry. The aim of the thesis was to determine consumption areas of the steam and condensate network in the mill by using current measurement points.</p> <p>Improvement of condensate return to power plant has been surveyed. There was needed to understand some flow measurements failures in the balance of the mill site.</p> <p>The purpose of the work was to present estimate calculation of steam traps which was not working. The thesis also aimed to design an illustrative diagram of the steam and condensate network with flow measurement points. The typical failures of the signal handling from the flow measurements has been surveyed.</p> <p>The bachelor's thesis was a development study. Observation, interviews, measuring, studying the operational condition and device manuals were used as data collection methods. Most of the information was gather through local observation at the mill. The theoretical framework was based on literature, educational material and electronic sources. The concrete result of the work was the balance of flow diagram and the map of steam and condensate balance.</p> <p>The thesis included calculating the estimated costs that caused by the most significant the deviations in when the condensate did not return to reuse. The reliability of the flow transmitter data was evaluated and instructions for recommended further actions were made.</p> <p>The outcomes of thesis includes several solutions proposals that can be used in developing the energy efficiency program of UPM Communication Papers.</p>		
Keywords/tags (subjects) steam trap, condensate, flow measuring, energy efficiency, UPM		
Miscellaneous (Confidential information)		

Sisältö

1	Lähtökohdat	7
1.1	Toimeksiantaja	7
1.2	UPM Kaipolan tehdas	8
2	Nykytilan kuvaus	9
2.1	Aiheen valinta ja rajausta	9
2.2	Tutkimuskysymykset	9
2.3	Tutkimusasetelma	9
2.4	Tavoitteet	10
3	Höyryjakelu ja kulutuskohteet	11
3.1	Voimalaitos	11
3.2	Höyryjärjestelmä	12
3.3	Kulutuskohteet	12
4	Taseet	13
4.1	Tasealueen rajojen määrittely.....	13
4.2	Yksinkertaistettu prosessikaavio	14
4.3	Tehdastase.....	14
4.4	Tuotantolinjatase	14
4.5	Säästöpotentiaali.....	15
5	Kattilaveden käsittely	15
5.1	Lauhdevesi.....	16
5.2	Syöttövesi	17
5.3	Lisävesi.....	17
5.3.1	Veden puhdistaminen	18
5.3.2	Mineraalien vaikutus kattilavedessä	19

	2
5.3.3 Veteen liuenneet kaasut.....	19
5.3.4 Hapen kemiallinen poistaminen.....	20
5.3.5 Orgaaniset aineet ja öljy.....	21
6 Höyry- ja lauhdeverkko.....	22
6.1 Lauhteen- ja ilmanpoisto.....	22
6.2 Höyryverkko	23
6.3 Lauhdeverkko	24
6.3.1 Lauhteenerottimet	24
6.3.2 Hönkähöyry.....	25
6.3.3 Ilma	26
6.4 Höyry- ja lauhdeverkon korroosio.....	26
7 Mittaukset höyry- ja lauhdejärjestelmässä.....	27
7.1 Luotettavuus.....	27
7.2 Mittausvirheen aiheuttajat	28
7.2.1 Mittausvirheet höyryverkossa.....	29
7.2.2 Mittausvirheet lauhdeverkossa.....	31
7.2.3 Laadunvarmennus	32
7.3 Mittaustiedon hierarkiatasot	33
7.3.1 Raportointi.....	33
7.3.2 Online-seuranta	34
7.3.3 Energiatohokkuuden seuranta	34
7.3.4 Tunnuslukujen määrittäminen	35
7.4 Virtausmittaukset	36
7.5 Käytetyimmät virtausmittaukset.....	37
7.5.1 Mittalaippa	38
7.5.2 Muuttuva-aukkoinen virtausmittaus.....	40

	3
7.5.3	Vortex -mittaus 41
7.5.4	Pitot-putki 44
7.5.5	Virtausmittauksen sijoittaminen 45
7.6	Paineen mittaus 46
7.7	Johtokyvyn mittaus 47
8	Lauhdejärjestelmä 48
8.1	Lauhteen käsittely Kaipolan voimalaitoksella 48
8.2	Lauhteenpoisto menetelmät ja lauhteenpoistimet 48
8.3	Termiset lauhteenpoistimet 50
8.4	Termodynaamiset lauhteenpoistimet 52
8.5	Mekaaniset lauhteenpoistimet 53
8.6	Lauhteen palautuksen kehittäminen 57
8.7	Esimerkkilaskelma hönkähöyrylle 57
9	Tutkimustyön toteutus 58
10	Tulosten esittäminen ja havainnollistaminen 58
10.1	Tasealueen määrittely 59
10.2	PK6-konelinjan tasemäärittely 60
10.3	PK4:n höyry- ja lauhdetase 62
10.4	Lauhteen palautuksen kehittäminen 63
10.4.1	Hiertämö 64
10.4.2	Vesilaitos 66
10.4.3	Siistaamo 68
10.4.4	PK6:n kaoliinitunnelin lauhteenpoistin 69
10.4.5	PK4:n lauhteenpalautus 70
10.4.6	Lauhteenpoistimien huolto 70
10.4.7	Väliaikaisvarastoitujen lauhteen poistimien tuominen järjestelmään 71

10.4.8	Vesitys pähöryryinjaan	72
11	Tutkimustulosten analysointi ja tulosten luotettavuuden arviointi	74
11.1	Johtopäätökset tutkimuksen tuloksista	74
11.1.1	Tasealueet ja mittausvirheet	74
11.1.2	Lauhteenpalautus	77
11.2	Jatkotoimenpiteet ja kehitysehdotukset.....	78
11.3	Luotettavuuden arviointi.....	79
11.4	Tavoitteiden tarkastelu ja täytyminen.....	80
11.5	Pohdinta	81
	Lähteet	82
	Liitteet.....	84
Liite 1.	Höyryn vaihtoehtoisista virtausmittauksista ehdotettu valinta.....	84
Liite 2.	Tehtaan höyry- ja lauhdeverkon tasealueet.....	85
Liite 3.	Virtauskaavio tehtaan virtausmittausten taseet.....	86
Liite 4.	PK6 tasealueenmittaukset.....	87
Liite 5.	Vesilaitoksen lauhteenmittauspöytäkirja	88
Liite 6.	Siistaamon lauhteenmittauspöytäkirja	89
Liite 7.	TMP-3 lauhteenmittauspöytäkirja	90
Liite 8.	Kaoliinitunnelin lauhteenmittauspöytäkirja.....	91
Liite 9.	Mass ProBar virtausmittarin HART -kommunikointi valikko.....	92
Liite 10.	Vortex -mittarin YF100 ongelman ratkaisu kaavio	93
Liite 11.	Lauhteen ominaisuuksia lämpötilan mukaan	94
Liite 12.	Lauhteen ominaisuuksia paineen mukaan	95
Liite 13.	Tulistetun höyryn ominaisuuksia	96

Kuviot

Kuvio 1. Vesitulpan kehittyminen höyryputkessa.....	22
Kuvio 2. Lauhteenpoistimen sijainti höyrylinjassa	23
Kuvio 3. Hönkähöyry säiliöllä erotetaan kaksifaasivirtauksesta lauhde	25
Kuvio 4. Kompensoinnissa huomioitavat suuret.....	29
Kuvio 5. Höyryn kuivuusasteen vaikutus todelliseen virtausmäärään	30
Kuvio 6. Indmeas Oy 1890 kpl teollisuushöyrykalibroinnin virheiden itseisarvojen mediaaniarvot	31
Kuvio 7. Lauhdesäiliön hönkähöyryn määrittämiseksi tarvittavat mittaukset	35
Kuvio 8. Indmeas Oy:n 2011 tietokannan mukaan suurin osa höyry- ja lauhdevirtausmittauksista on paine-eromittauksia	36
Kuvio 9. Mittalaipan poikkileikkaus ja pysyvän painehäviön kuvaaja.....	39
Kuvio 10. Rengaskammionmittalaipan poikkileikkaus	40
Kuvio 11. Muuttuva-aukkoisen virtausmittauksen poikkileikkaus	41
Kuvio 12. Pyörrevanamittauksen toimintaperiaate.....	42
Kuvio 13. Von Karmanin pyörteet avoimessa tilassa ja putkessa	43
Kuvio 14. Pyörrevana-anturin pyörteiden toteamistapoja	43
Kuvio 15. Interpoloivalla putkella mitataan kokonaispainetta optimoiduista kohdis .	45
Kuvio 16. Vaadittava virtausprofiilin rauhoittumisetäisyys	45
Kuvio 17. Suositeltava paineanturin tai impulssiputken sijoitus prosessiputkeen.....	47
Kuvio 18. Kavitointialue kuvattuna, lauhteen palautus täyteen lauhdelinjaan.....	49
Kuvio 19. Lauhteenpoistinten poisto lämpötilat kylläisenhöyryn käyrään verrattuna paineen funktiona	49
Kuvio 20. Termisen kapselilauhteenpoistimen toimintaperiaate.....	50
Kuvio 21. Säädettävä termostaattinen lauhteenpoistin	51
Kuvio 22. Bi-metallilauhteenpoistimen toiminta periaate.....	51
Kuvio 23. Termodynaamisen lauhteenpoistimen toimintaperiaate.....	52
Kuvio 24. Termodynaamisen lauhteenpoistimen rakenne	53
Kuvio 25. UNA uimurilauhteenpoistimen rakenne	54
Kuvio 26. TLV:n valmistama ilmanpoistimella varustettu vapaasti kelluvan uimurilauhteenpoistimen toimintaperiaate	54

Kuvio 27. Spirax Sarcon FT -mallin ilmanpoistimella varustettu uimurilauhteenpoistimen toimintaperiaate	55
Kuvio 28. Spirax Sarcon-pumppulauhteen poistimen toimintaperiaate	56
Kuvio 29. Konwell FPS 14-lauhteenostimen rakenne ja läpäisymäärätaulukko	56
Kuvio 30. Sankeyn-diagrammi, matalapaine höyryn tuotanto ja suurimmat kulutuskohteet tarkastelujakson aikana.	60
Kuvio 31. PK4:n lauhteenpalautusprosentti PK7:n verrattuna	63
Kuvio 32. Seuraus vesilaitoksen vuotavasta vesitysenttiilistä.....	67
Kuvio 33. Vesilaitoksen nouseva höyrylinja	73
Kuvio 34. Vesilaitoksen höyrylinjan lauhteenerotus.....	73

Taulukot

Taulukko 1. Höyryvuodon aiheuttamat vuotuiset häviöt	23
Taulukko 2. Tulistetun höyryn virtausmittaus virhe (%)	30
Taulukko 3 Lauhteen virtausmittaukset	37
Taulukko 4. Lauhteenpoistimien kunnossapitoraporteista koostettu tilanne 5. marraskuuta 2018.	71

1 Lähtökohdat

Tämä opinnäytetyö käsittelee paperitehtaan höyry- ja lauhdejärjestelmän tasealueita sekä siirtoverkoston virtausmittauksia ja lauhteenpoistimia. Opinnäytetyössä analysoidaan virtausmittauksissa esiintyviä tyypillisiä virheen aiheuttajia ja esitellään yleisimmät prosessiteollisuuden höyryn ja lauhteen virtausmittaukset.

Tasealueiden virtausmittausten mukaan jyvitetään tehtaan lämmönkäytön kustannukset tuotantolinjoittain. Mikäli mittaukset eivät ole luotettavalla tasolla, lämmönkäytön tehostaminen ja tehostamistoimien tulosten seuranta on mahdotonta kohdentaa. Höyryn ja lauhteen virtausmittaukset ovat avainasemassa kehitettäessä energiatehokkaampaa prosessia.

Tässä tutkimustyössä perehdytään tehtaan höyry- ja lauhdeverkon lauhteenpoistimien toimintaan sekä tehdään havaintoihin perustuvia konkreettisia ehdotuksia lauhteen palauttamisen kehittämiseksi.

Lauhde sisältää noin viidesosan prosessiin tuodusta lämmöstä. Lauhde voidaan palauttaa voimalaitokselle käytettäväksi kattilan syöttövetenä, jolloin saadaan tehostetua lämmöntuotannon hyötysuhdetta. Lauhteenpoistimet ja lauhdeverkon toiminta on keskeisessä roolissa tavoiteltaessa energiatehokkaampaa tuotantolaitosta.

Tutkimustyön tuloksina esitetään tasealuemäärittely niillä mittauksilla, joita lämmönkäytön jyvittämissä tulisi käyttää. Lisäksi esitetään parannusehdotuksia niihin lauhteenpalautuskohteisiin, joissa on havaittu merkittäviä puutteita.

Tutkittava aihealue on lämmöntuotantolaitoksilla merkittävässä roolissa. Suomessa toimii useita monikansallisia yhtiöitä, jotka tarjoavat palveluita tutkimuskohteeseen liittyen. Tämä opinnäytetyö raportti sisältää otteita näiden yhtiöiden tuottamasta sisällöstä.

1.1 Toimeksiantaja

Tämä opinnäytetyö pohjautuu todelliselle tarpeelle Jämsässä sijaitsevaan UPM Communication Papers Kaipolan paperitehtaalle, joka on myös tutkimustyön toimeksian-

taja. Energian tuotannosta vastaavat ovat havainneet, että lämmöntuotannon kustannusten jyvittämiseen käytettävien mittausten laatu ja todenmukaisuus on heikentynyt aiheuttaen epävarmuustekijöitä kulujen kohdentamiseen. Lisäksi voimalaitoksen lisäveden osuus on noin 20 – 30 -prosenttia. Lisäveden osuutta halutaan vähentää kattilan vesikierrossa ja lauhteen palautusta kehittää, mikä vaikuttaa tuotantokustannuksiin ja tehtaan kilpailukykyyn. Energiankäytön optimointi ja tehostaminen kuuluvat myös konsernin pitkän aikavälin tavoitteisiin.

1.2 UPM Kaipolan tehdas

UPM Kaipolan tehtaalla toimii kolme paperikonelinjaa, hiertämö, siistaamo, vedenkäsittelylaitos ja voimalaitos. Paperikonelinja kuusi tuottaa päällystettyä aikakauslehtipaperia. Tällä paperikoneella pääraaka-aineet ovat TMP (thermomechanical pulping) ja sellu. Paperikoneet neljä ja seitsemän valmistavat päällystämätöntä luottelo- ja sanomalehtipaperia siistausmassa ja TMP-hierre pääraaka-aineinaan. Siistausmassa valkaistaan peroksidilla ja hierteen valkaisu tehdään ditioniitilla.

TMP-hierre valmistetaan sähkömoottoreiden avulla. Jauhatuksessa vapautuva energia hyödynnetään lämmöntalteenottolaitteistolla eli LTO-höyrystimillä eri kohteiden lämmityksessä. Hiertämö myös syöttää höyryä tehtaan höyryverkkoon, LTO-höyrystimien kautta. Hiertämöllä käytetään omalla kuorimolla tehtyä haketta sekä ostohaketta.

Kuorimolta ja hiertämöltä liukenee paljon COD-kuormaa veteen, eli orgaanisia aineita, jotka kuluttavat happea kemiallisissa reaktioissa. Tehtaan prosessivedet käsitellään biologisella jätevedenpuhdistamolla.

Kaipolan tehtaan voimalaitos varmistaa riittävän höyryn määrän paperikonelinjoille sekä kuorimoon ja vedenkäsittelylaitokselle vaihtelevissa tuotantotilanteissa. Pääosin lauhteet palautuvat voimalaitokselle höyryn kulutuskohteista.

Kaipolan paperikonelinjat, siistaamo, kuorimo ja vesienkäsittelylaitos käyttävät 250 kPa matalapainehöyryä. Lisäksi PK4, PK6 ja hiertämö käyttävät myös 1 MPa:n välipainehöyryä.

2 Nykytilan kuvaus

Toimeksiantajan tämän hetken tiedon mukaan, Kaipolan tehtaalla mittauksiin perustuva lauhdelaskenta antaa ajoittain yli 100 % palautussuhteita. Tehtaan lauhdeverkostossa on osia, joista ei ole toteutettu lauhteen palautusta voimalaitokselle. Lauhteiden palautussuhteet vaihtelevat eikä tarkkaa tietoa häviökohteista ole olemassa. Joissakin kohteissa palautetaan laskennallisesti liikaa lauhdetta.

2.1 Aiheen valinta ja rajaus

Tutkimuskohde valittiin kohteen kriittisyyden perusteella. Havaintojen mukaan tasealaskentoihin käytettävä mittaustieto ei ole luotettavaa. Opinnäytetyön aihe rajautui tehtaan höyry- ja lauhdetaseen mittausten määrittelyyn siltä osin missä tasearajat kulkevat. Saaduista tuloksista tehtiin jatko tutkimuksia tasealueilta missä havaittiin suurinta poikkeamaa. Tästä edettiin lauhteen poistimien ja mittausten kunnon tarkastamiseen. Tässä yhteydessä myös pohdittiin lauhteen poistimien ja mittausten toimintaa.

2.2 Tutkimuskysymykset

Tutkimuskysymykset, joihin tässä tutkimustyössä vastataan

- mitä mittauksia tulisi käyttää tehtaan höyry- ja lauhdeverkon tasealueilla
- miksi PK6:n lauhteenpalautusprosentti on yli 100 %:a
- millä keinoin ja resursseilla voidaan parantaa lauhteen palautusta paperikoneelta.

2.3 Tutkimusasetelma

Tämä opinnäytetyö on toteutettu kehittämistutkimuksena, jonka tarkoituksena on kehittää prosessi tai ilmiö paremmaksi kuin lähtötilanteessa. Kehittämistutkimuksen kohteena on käytännössä ongelma, jota tutkimuksen tuloksilla voidaan parantaa tai poistaa kokonaan. (Tutkimus ja kehittäminen 2017)

Kvalitatiivisella eli laadullisella tutkimusotteella kerätään tutkimusaineistoa havainnoimalla, haastatteluilla ja kirjallisuudesta, jotka voidaan jakaa primääri- ja sekundääriaineistoon. Havainnoinnin tarkoituksena on ymmärtää prosessin toiminta. Havainnointia voidaan toteuttaa osallistuvalla-, suoralla-, tai piilohavainnoinnilla. Haastattelumuotoja ovat yksilö-, ryhmä-, tai fokushaastattelut. (Tutkimus ja kehittäminen 2017)

Opinnäytetyössä on käytetty kvalitatiivista tutkimusmenetelmää, toteuttamalla operaattoreiden haastatteluja sekä analysoimalla mittausdataa ja prosessikaavioita. Lisäksi on pyritty mahdollisimman havainnolliseen tutkimusotteeseen.

Kvalitatiivinen lähestymistapa sopii luonnollisesti tämän tutkimustyön tutkimusmenetelmäksi, missä tavoitteena on esittää käytännön ratkaisuja havaittuihin ongelma-kohtiin. Tutkimustyön aikana tutkittiin ainevirtoja ja mittauksia noin 70:stä virtaus- ja instrumenttikaaviosta.

Haastateltavat henkilöt valittiin heidän työtehtäviensä ja asiantuntijuuden perusteella. Tähän valintaan vaikutti organisaation toimihenkilön suositukset.

Tutkimustyön kirjallista aineistoa on kerätty toimeksiantajan tuotannon ja kunnossapidon toiminnanohjausjärjestelmistä, energiateollisuuden palveluntuottajilta sekä laitevalmistajien koulutusmateriaaleista ja laite manuaaleista.

Tutkimuksen tuloksissa esitetään parannusehdotuksia havaittuihin ongelma-kohtiin ja vastataan tutkimuskysymyksiin. Työn tuloksena esitetään myös kustannus arvio siitä, kuinka paljon toimimattomuus lauhteenpoistimessa maksaa.

Opinnäytetyön ongelmanasettelu on ratkaistu perehtymällä prosessin toimintaan ja tekemällä tasealue määrittely, jolla voidaan todeta ongelma-alueet. Ongelma-alueen prosessiin on perehdytty tarkemmin ja haettu tietoa kirjallisuudesta sekä haastateltu prosessin tuntevia henkilöitä.

2.4 Tavoitteet

Ensimmäisenä tavoitteena oli todeta Kaipolan tehtaan höyry- ja lauhdeverkon nykytila. Tästä ilmenneiden havaintojen perusteella tehtiin määritelmä siitä, mitkä kohteet olivat tarpeellista tarkastella tarkemmin. Osa epäkohdista liittyi höyryverkon

mittauksiin ja lauhteen erottamiseen. Osa taas oli lauhteen palautusjärjestelmässä havaittuja epäkohtia. Tehtaan höyry- ja lauhdeverkon tasealue määrittely voitiin tehdä, kun verkosto oli kartoitettu.

Lopullisina tuotoksina esitetään eriteltynä höyry- ja lauhdejärjestelmän vikaantumiseen vaikuttavia tekijöitä. Energian käytön tehokkuuden nykytilan ja säästöpotentiaalin arviointia sekä esitetään toimenpide ehdotukset epäluotettavien mittausten ja toimimattomien lauhteenpoistimien korjaamiseksi.

3 Höyrynjakelu ja kulutuskohteet

3.1 Voimalaitos

Voimalaitoksen operaattoreita haastateltaessa selviää, että voimalaitoksella tuotetaan osa tehtaan tarvitsemasta lämmöstä ja sähköstä. 1950 -luvulla perustetun Kaipolan paperitehtaan voimalaitos on uudistettu 90 -luvun alussa. Tuolloin käyttöön otettiin nykyinen pääkattila K5 ja noin vuosikymmen myöhemmin varakattila K6. Pääkattilana K5 toimii vuonna 1991 rakennettu ja vuonna 2006 päivitetty Valmetin Hybex-leijupetikattila. Kattilan käyttöaste on noin 98 -prosenttia. Polttoaineena käytetään oman tuotannon kuusi kuorta kuorimolta, johon sekoitetaan lietteenkäsittelylaitoksella kuivattua jätevesilietettä, osto purua, turvetta, metsähaketta sekä murskattuja kantoja. Polttoaineet kerätään kuorivarastoon, mistä kahden ruuvipurkaimen käynti suhteella sekoitetaan sopiva polttoaine seos kattilaan, jolla säädetään myös petilämpötilaa. Kattila on mitoitettu 14 – 40 kg/s höyryn tuotolle. Korkeapaineinen tuorehöyry johdetaan turbiiniin T3, 10,5 MPa paineessa ja 520°C lämpötilassa turbiinin vastapaineen ollessa 0,25 MPa.

Voimalaitoksella on kaksi öljy käyttöistä varakattilaa lämmöntuotantoon. Öljykattila K6 tuottaa 40 kg/s välipainehöyryä 2 MPa paineessa ja korvaa pääkattilan K5 tarvittaessa. Öljykattila K4 on pienempi, sen kapasiteetti on vain noin 18 kg/s välipaine höyryä. Öljykattiloiden tuottamaa höyryä ei voida ajaa turbiinin läpi. Voimalaitoksen generaattori G3 näennäisteho on 31 MVA ja pätöteho 26 MW, millä osallistutaan kanta verkon tuentaan +/- 2 MW. Kattiloita voidaan ajaa seitsemällä eri ajomoodilla Honeywell Alcont -järjestelmästä, mm. turbiinikäyttö, reduktiokäyttö ja saarikäyttö.

3.2 Höyryjärjestelmä

Vakiohöyrynpaine jakeluverkossa vaatii, että kulutus ja jakelu ovat jatkuvassa tasapainossa kaikkialla höyryverkossa. Tämä on käytännössä mahdoton toteuttaa, joten höyrynpaineissa tapahtuu jatkuvaa vaihtelua. Höyrynpaineen vaihtelun tasapainottamiseksi käytetään höyryakkua, syöttövesisäiliötä ja hiertämön lämmöntalteenoton (LTO) ulospuhallusta. Välipainehöyryllä (HVP) ladataan tehtaan höyryakkua. Höyryakun veden pinta pidetään noin 70 %:ssa. Lisäksi järjestelmään pääkomponentteihin kuuluu ulospuhallusventtiili, reduktioventtiili ja höyrynjäähdyttimet.

Tehtaan höyryjakelun pääkaaviosta selviää, että Kaipolan tehtaalla on neljä höyrynpainetasoa. Tuorehöyry eli korkeapainehöyry (HKP) on 10,5 MPa. Välipainehöyryä (HVP) eli nk. omakäyttöhöyryä on kahta painetasoa, 2,3 MPa ja 1 MPa paineessa. HVP-höyryn lämpötila on noin 220 °C. Matalapainehöyry (HMP) paine on 250 kPa ja käyttökohteesta riippuen 140 – 150 °C lämpötilassa lähellä kylläistä pistettä. HMP-jakeluverkko on laajin ja massavirtaukset ovat suurimmat.

Tehtaan voimalaitos sijaitsee alueellisesti keskeisellä paikalla. HMP-tukilta haarautuu kaksi HMP-runkolinjaa, toinen länteen putkitunnelia pitkin siistaamon ja PK7:n suuntaan ja toinen HMP-runkolinja pohjoiseen PK4:n suuntaan.

Lisäksi PK4 ja PK6 käyttävät 1 MPa:n välipainehöyryä tärkkelyksen ja pastan valmistukseen.

3.3 Kulutuskohteet

Hiertämöllä käytetään HVP-höyryä hake- ja hierrelinjojen puhdistamiseen. TMP-2 ja TMP-3 laitokset tuottavat LTO -höyrystimellä kylläistä 250 kPa:n HMP-höyryä tehtaan höyryverkkoon. PK6-konelinjan merkittävimmät HMP-höyryyn kulutuskohteet ovat kuivatusosa, AHR-lämmönvaihtimet (Aqua Heat Recovery) ja höyrylaatikko. Lisäksi jälkikäsitelyssä superkalantereilla käytetään HMP-höyryä. Pastan ja tärkkelyksen valmistuksessa käytetään HVP-höyryä. PK4:n suurimmat HMP-höyryyn käyttökohteet ovat kuivatusosa ja höyrylaatikko. Välipainehöyryä käytetään tärkinvalmistukseen. PK7:n HMP-höyryyn käyttökohteita ovat kuivatusosa, AHR-katkolämmönvaihtimet, höyrylaatikko ja viirakaivo.

Siistaamo käyttää HMP-höyryä saippuan valmistukseen sekä lämmitysruuveihin. Siistaamon höyrymäärämittausten kautta käytetään myös siistaamon konesalin ja keräyspaperivaraston lämmityspattereiden lämmityshöyry.

Vedenkäsittelylaitoksella HMP-höyryllä tilojen lämmityksen lisäksi lämmitetään kemiallisesti puhdistettua vettä ja voidaan tarvittaessa lämmittää lämminvesisäiliötä. Kuorimolla HMP-höyryä käytetään pääasiassa tilojen lämmitykseen ja jäätyneen puun sulatukseen sulatuskuljettimella. Talviaikaan lämmityskaudella kuorimon höyryntarve moninkertaistuu.

4 Taseet

Tässä opinnäytetyössä on pyritty käyttämään yhtenäistä linjaa käsitteiden määrittelyssä ja käyttämisessä energian käyttöä tehostavan Motiva Oy:n oppaiden mukaisesti, jotta tuloksien käsittely ja jatkotoimenpiteet olisivat helposti jalostettavissa. Tätä erillisselvitystä voidaan hyödyntää tulevaisuudessa energia-analyysin teolle. Energia-analyysi jaetaan karkeasti kahdeksi kokonaisuudeksi tehdaskatselmukseen ja täydentävään analyysiin. Energiatehokkuutta ohjaa ja valvoo Suomen työ- ja elinkeinoministeriö.

4.1 Tasealueen rajojen määrittely

Tase voidaan laatia kuvaamaan jonkin prosessin osan, tuotantolinjan tai koko tehtaan energiavirtoja. Yksinkertainen ja visuaalinen tasemuotoinen esitystapa auttaa kokonaisuuden hahmottamisessa. Yhdellä silmäyksellä saa kuvan prosessin tilasta. Taseen eri jakeiden keskinäistä suuruutta voidaan havainnollistaa tarkemmin sankeyn-diagrammilla. (Leskelä & Turunen 2012, 9.)

Laajempien prosessialueiden taseajat ovat mietittävä niin, että niillä on yhteys kustannuslaskentaan. Tällöin taseiden informaatio palvelee kustannusten säästämisen tavoitteissa, mikä myös motivoi tehokkaasti energiansäästötoimenpiteissä. Tehtaan energiavirtojen seuraamisen lisäksi taseiden avulla voidaan seurata kriittisten prosessimittausten kuntoa ja havaita toimimattomia tai virheellisiä mittauksia (Mts. 9.)

4.2 Yksinkertaistettu prosessikaavio

Yksinkertaistetussa prosessikaaviossa esitetään pääprosessilinjat ja laitteet, joiden avulla on mahdollista saada kokonaiskäsitys prosessista ja liitännöistä. Kaaviossa on nimetty ja rajattu tuotanto-osastot. Sekä osastoihin liittyvät energialiitännät, prosessi poistot ja käyttöhyödykkeet. Kaaviossa esitetään tuotteen nimike ja kulkusuunta prosessista toiseen sekä osaprosessien välillä.

Yleisimpiä käyttöhyödykejärjestelmiä ovat höyry- ja lauhdejärjestelmät, jäähdytysvesi sekä paineilmajärjestelmät. Käyttöhyödykejärjestelmiä ovat ne tekniset järjestelmät, joita ei voi yhdistää varsinaiseen tuotantoon mutta, jotka kuitenkin palvelevat prosessia tai sen eri osia (Prosesseiteollisuuden energia-analyysi 2004.)

4.3 Tehdastase

Tehdastaseessa esitetään pääprosessit ja energiankäyttökohteiden vuotuiset primääri- ja sekundäärienergiavirrat numeerisesti ja graafisesti sankeyn-diagrammin muodossa. Sekundäärienergiavirtoja ovat jäähdytysvedet, prosessipoistot sekä konvektio- ja säteilyhäviöt tuotantotiloihin. Energiavirrat esitetään energialajeittain käyttäen samoja yksiköitä kullekin energiamuodolle, esimerkiksi energiamäärä/vuosi tai kuukausi (esim. MWh/a) sekä jatkuvan energiavirran ja hetkellisarvojen esittämisessä teho (kW).

Tehdastaseen tarkoituksena on kuvata havainnollisesti energian käytön painopisteet ja energiankäytön kannalta merkitykselliset prosessit. Tase havainnollistaa myös sekundäärienergiavirtojen mahdollista hukkaamista tai tehokkaampaa hyödyntämistä primäärienergian vähentämiseksi, esimerkiksi lämmöntalteenottolaitteistoa hyödyntämällä. (Prosesseiteollisuuden energia-analyysi 2004, 10.)

4.4 Tuotantolinjatase

Tuotantolinjojen energiataseessa määritellään energiavirrat tarkemmin kuin tehdastaseen yhteydessä. Osaprosessien energiataseet esitetään samoin kuin tehdastaseessa mutta energiamääräyksikkönä käytetään energiamäärä/tuotanto (esim. kWh/t).

Tehdaskatselmuksissa ei tehdä laajamittaisia mittauksia taseiden selvittämiseksi vaan käytetään tuotantoyksiköistä saatua olemassa olevaa dataa. Mikäli mittaustietoa ei ole tai halutaan täsmentää mitattua prosessisuuretta, voidaan tehdä lisämittauksia. (Prosessiteollisuuden energia-analyysi 2004, 10.)

4.5 Säästöpotentiaali

Energian käytön säästöehdotuksissa huomioidaan energiataloudellinen kokonaisvaikutus sekä muut tuotantovaikutukset, kuten huolto- ja käyttökustannukset. Ehdotuksen energiansäästövaikutuksien arvioinnin ohella huomioidaan myös hiilidioksidipäästöjen väheneminen ja muut toimenpidettä edistävät hyödyt. Muita hyötyjä voivat olla kunnossapitokustannusten pienentyminen ja tuotteen laadun paraneminen. Energia-analyysiraportin kustannussäästö ja takaisinmaksuajan yhteenvetotaulukoissa esitetään kuitenkin vain muutos energia- ja vesikustannukset huomioiden.

Kiinteistöjen energiankäyttö huomioidaan energiakustannuksen suuruuden painoarvolla tai mahdollisesti saatavasta kustannussäästöpotentiaalista. Tilojen sähkölämmitykset, sähköputkistosaatot ja lisäsähkölämmitykset tutkitaan kiinteistöselvitysosassa.

Säästöehdotukset esitetään investointien suorana takaisinmaksuajana (TMA) (investointikustannus/säästöpotentiaali vuodessa). Kannattavuus toimenpiteelle voidaan myös laskea sisäisen koron menetelmällä (IRR) tai nykyarvomenetelmällä (NPV). Raportoinnissa noudatetaan työ ja elinkeinoministeriön julkaisema Energiakatselmustoiminnan yleisohjeita. (Prosessiteollisuuden energia-analyysi 2004, 12.)

5 Kattilaveden käsittely

Voimalaitoksen tasapainoisen toiminnan kannalta on erityisen tärkeää kiinnittää huomiota vesikemiaan. Vesi- ja höyrypiirien sisältämät epäpuhtaudet ovat merkittävä tekijä kattilan eliniän ja kunnon ylläpidossa. (Frayne 2002, 158.)

Kattilaveden puhdistamisessa käytetään erillisiä järjestelmiä, kuten suodattimet ja veden pehmentimet. Erillisten ulkoisten järjestelmien laajempi käyttö voi olla turhaa, jos voidaan hyödyntää tehokkaammin sisäisiä järjestelmiä lauhteen puhdistukseen ja vähentää raakaveden puhdistamista ulkoisilla järjestelmillä. Prosessissa käytettävän veden puhtaustasoa on epätaloudellista pitää korkeampana kuin on tarpeen.

Useat teollisuuden keskittyneet kaupalliset yritykset määrittelevät ja suunnittelevat veden korkeampaa laatutasoa kuin on tarpeen. Tämä on valitettavasti laajasti hyväksytty käytäntö. Vähimmäistasolla ja ennakoivalla kunnossapidolla sekä optimoidulla ajotavalla saavutetaan huomattavasti pienemmät ylläpitokustannukset.

Nykyään lähes kaikki kemialliset vedenkäsittelytavat ovat nestemäisiä, mikä mahdollistaa tarkemman, turvallisemman sekä helpomman annostelun ja valvonnan kuin jauhemaisten tuotteiden käytössä (Mts. 165.)

5.1 Lauhdevesi

Lauhdevesi on vesihöyryn lauhtuessa faasimuutoksessa muodostuvaa "tislattua" vettä, joka sisältää vain pieniä määriä epäpuhtauksia tai satunnaisesti öljyä. Epäpuhtauksien määrää kuvataan partikkeleiden määrällä miljoonasta (ppm). Tyypillisesti lauhde sisältää muutamasta miljoonanosasta hieman yli 20 ppm. Lauhdevesi kerätään lauhdeverkossa takaisin voimalaitokselle ja hyödynnetään osittain kattilan syöttövetenä. (Manivasakam 2011, 26.)

Voimalaitoksissa korkea- ja keskipainekattiloiden osalta lauhde on tärkein syöttövesi. Lisävesi on puhtaampaa kuin lauhde ja usein korroosiota aiheuttavat ilmiöt ovatkin lauhdeveden epäpuhtauksista johtuvia. Joten korkealaatuinen lisävesi ei siis yksinomaan riitä riittävän laadukkaan höyryn- ja lauhdeveden ylläpitoon vaan lauhteen puhdistaminen on välttämätöntä. (Mts., 289-293.)

Lauhteenpuhdistuslaitos on teollisuuden voimalaitoksissa tarpeellinen. Lauhteen puhdistuksen tarkoituksena on poistaa lauhdutin- ja lämmönvaihdinvuotojen aiheuttamat korroosiotuotteet ja epäpuhtaudet. Lauhde puhdistetaan mekaanisesti ja ioninvaihtimilla kuten hiekkasuodattimella, magneettisuodattimella, kynttiläsuodattimella ja aktiivihiihluodattimella. (Mts., 289-293.)

Lauhteen suolanpoistoioninvaihtimet ovat samanlaisia kuin lisävettä valmistettaessa. Tavallisesti siihen käytetään kationinvaihto- ja sekavaihdinta sarjassa. Kvartsihiekkasuodattimella poistetaan karkeat yli 10 mikrometrin hiukkaset. Sähkömagneettisuodatin sisältää noin metrin korkuisen kerroksen halkaisijaltaan 6 - 8 millimetrin rautakuulia, jotka varataan magnetointikäymillä. Kun suodatin on ehtynyt, huuhdellaan se vastavirtaan sähkövirta katkaistuna. Kynttiläsuodatin sisältää rakenteeltaan lieriönmuotoisia teräspatruunoita, jotka on päällystetty tekokuitu- tai puuvillalangalla. Lauhdetta, jonka öljypitoisuus on yli 10 mg/kg, voidaan puhdistaa öljynerottimen jälkeen aktiivihiilisuodattimella. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2013, 34.)

On tärkeää huomioida lauhteen puhtaus palautettaessa lauhdetta lauhdeverkkoon. Siksi lauhteesta tyypillisesti mitataan lauhdeveden johtokyky ja tarvittaessa ajetaan lauhdeet prosessiin tai kanaaliin.

5.2 Syöttövesi

Syöttövedellä tarkoitetaan syöttövesisäiliöstä kattilaan pumpattavaa vettä. Syöttövesi valmistetaan pääosin palautettavasta lauhdevedestä ja lisävedestä. Siihen voidaan myös lisätä neutraloivia kemikaaleja kaasun poiston jälkeen. (Manivasakam 2011, 26.)

Prosessiteollisuudessa on huomattavan suuri osa syöttövedestä lisävettä. Tämä johtuu siitä, että höyryä käytetään suoraan prosessiin.

5.3 Lisävesi

Lisävedellä tarkoitetaan voimalaitoksella kattilajärjestelmän kiertoon lisättävää vettä, jota tarvitaan täydentämään höyryn jakelussa ja kattilan ylös- tai alasajossa menetettyä lauhdevettä. Lisävesi on kemiallisesti puhdistettua vettä, joka on vielä lisäksi käsitelty ioninvaihtosarjoissa vaaditulla laatuasteella. (Manivasakam 2011, 26.)

Raakavesi sisältää pääasiassa orgaanisia eloperäisen luonnon hajoamisyhdisteitä, epäorgaanisia suoloja, piidioksidia sekä liuenneita kaasuja. Mineraalit koostuvat nat-

rium-, kalsium- ja magnesiumkarbonaateista, sulfaateista, nitraateista sekä klorideista. Karbonaatit esiintyvät vesissä yleisesti bikarbonaateina. Magnesium- ja kalsiumyhdisteet ovat pahimmat kattilakiven aiheuttajat (Mts. 31.)

5.3.1 Veden puhdistaminen

Kaikki vedet ovat epäpuhtaita, puhtausaste vain vaihtelee. Veden laadulla on merkitystä kattilajärjestelmissä. Höyryn tuottamisessa veden epäpuhtauksilla on haitallisia vaikutuksia. Siksi on tärkeää tietää epäpuhtauksien koostumus ja vaikutus prosessissa. Epäpuhtauksille on määritelty hyväksyttävät tasot ja käsittelymenetelmät, kun pitoisuudet ylittävät säädetyt raja-arvot (Mts. 88.)

Vettä voidaan käsitellä haluttuun puhtaustasoon usealla eri menetelmällä, mutta yleisin, edullisin ja yksinkertaisin vaihtoehto on ioninvaihtomenetelmä, jossa käytetään ioninvaihtohartseja. Tätä käsittelyä kutsutaan pehmennykseksi, dealkaloinniksi tai demineraloisoinniksi riippuen puhtaustasosta.

Pehmennystä käytetään, kun on tarpeen poistaa vain kovuus. Dealkalisaatiolla poistetaan myös liuenneita karbonaatteja. Demineralisoinnissa käytännössä kaikki kiinteät aineet poistetaan (Mts. 130-168.)

Pehmennyssuodattimia on kaksi rinnakkain, jolloin toinen on elvytysvaiheessa, kun toinen on käytössä. Kovuudenpoistoa käytetään teollisuuden matalapaineisista lämmityshöyryä tuottavissa kattiloissa, joissa höyryn paine on noin 100 kPa – 2 MPa. Pehmennyssuodatinta käytettäessä kokonaissuolapitoisuus ei kuitenkaan vähene. Täyysuolanpoistossa on käytettävä useita ioninvaihtimia sarjassa, kuten anioni-, kationi- ja humussuodattimia. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2013, 29.)

Natriumsuolojen liukoisuus kasvaa veden kuumentuessa ja ne neutralisoidaan rikkihapolla natriumhydroksidiksi vapauttamalla hiilidioksidi. Natriumia käytetään pehmennyssuodattimessa vaihtamaan veden kovuutta aiheuttavia kalsium- ja magnesiumioneita haitattomiin natriumioneihin. (Manivasakam 2011, 156.)

5.3.2 Mineraalien vaikutus kattilavedessä

Kalsiumbikarbonaatti hajoaa kuumennettaessa kalsiumkarbonaatiksi, vedeksi ja hiilidioksidiksi. Kalsiumsulfaatin pitoisuus kasvaa vettä kuumennettaessa, jolloin se kiteytyy ja kiinnittyy keraamiseksi eristäväksi pinnaksi, jota on erittäin vaikea poistaa jopa mekaanisin menetelmin.

Kalsium- ja magnesiumkloridi väkevöityy keitetessä ja luovuttaa kloorivetyhappoa joka aiheuttaa kattilavesiputkien pintojen eroosiota. Kalsiumnitraatti hajoaa korkeissa lämpötiloissa typpihapoksi ja syövyttää voimakkaasti tulistimen pintoja. Magnesiumbikarbonaatti hajoaa karbonaatiksi, joka reagoi veden kanssa muodostaen hiilidioksidia ja magnesiumhydroksidia, joka sameutuu aiheuttaen tukoksia. Magnesiumkloridi ja -nitraatti hajoavat korkeissa lämpötiloissa aiheuttaen suola- ja typpihappoa. Se lisää kattilan korroosiota. Alkalit, kuten natrium ja kalium, saostuvat aiheuttaen alkalikorroosiota. (Manivasakam 2011, 31-33.)

Piioksidia eli silikaattia esiintyy tavallisesti luonnon vesissä. Sen pitoisuus vaihtelee 1 – 110 ppm. Piioksidi aiheuttaa yhdessä suolojen kanssa saostumia ja muodostaa silikaatteja alumiinin kanssa. Tästä seuraa lasimainen hankalasti poistettava kattilakivi pinta joka johtaa heikosti lämpöä. (Mts. 33.)

Rauta ja kupari pyritään poistamaan kattilan syöttövedestä. Kiinteä rauta palaa höyrystys pintoihin mustaksi magneettikalvoksi, joka on paras tunnettu korroosiosuoja. Mikäli liiallisen raudan takia magneettikalvo kasvaa liian paksuksi. Alkaa se lohkeilla ja kappaleet aiheuttavat korroosiota turbiinin siivistössä. Kupari taas syövyttää terästä galvaanisen sähköparin muodossa. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2013, 26.)

5.3.3 Veteen liuenneet kaasut

Hiilidioksidin määrä vaihtelee suuresti luonnonvesissä. Pintavedet sitovat noin 2 – 10 ppm, kun taas pohjavesissä määrä saattaa olla jopa 70 ppm. Hiilidioksidi happamoittaa vettä alentaen PH:ta. Hiilidioksidista muodostuu höyryn lauhtuessa hiilihappoa, joka syövyttävää lauhduttimia ja lauhdeverkkoa. Hiilihappo voidaan neutraloida anostelemalla hydratsiinia tai ammoniakkia. (Manivasakam 2011, 57-58.)

Merkittävät ammoniakki pitoisuudet ovat kattilavesissä harvinaisia, mutta se voi aiheuttaa tiettyinä pitoisuuksina messinkiä sisältävien venttiileiden ja tiivisteiden korroosiota. Ammoniakin haittoja ehkäisemään voidaan lisätä orgaanisia amiineja.

Amiineja käytetään hiilidioksidikorroosiosuojana. (Mts. 34.)

Kaasunpoisto onnistuu parhaiten, kun vesi saadaan hajautumaan mahdollisimman nopeasti pieniksi pisaroiksi ja kiehumispisteeseen. Kaasunpoisto on syöttövesisäiliön päälle rakennettu sisältä rei'itetyillä välipohjilla täytetty tornimainen säiliö. Termistä kaasunpoistoa käytetään lähinnä hapenpoistossa mutta siinä myös poistuvat osa hiilidioksidista. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2013, 33.)

Hapen liukoisuus veteen riippuu veden lämpötilasta. Veden lämmitessä hapen määrä vähenee. Noin 30 °C:ssa makeassa vedessä happea on 7,63 ppm. Happi on kattilavedessä erittäin haitallinen reagoiden metallien kanssa kiihdyttäen korroosiota. Liuennut happi korrosoi myös lauhteenkeräimiä. (Manivasakam 2011, 34.)

Jäännöshapella tarkoitetaan kemiallisen- ja termisen kaasunpoiston jälkeen syöttövedeen jäänyttä liuennutta happea. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2013, 34.)

Lauhdeverkon ilmavuodot ovatkin haitallisia tästä syystä, koska seisokeissa tai toimimattomassa järjestelmässä, joissa verkostoon kerääntyy ilmaa. Tällöin korroosionopeus kasvaa ja aiheutuu entisestään toimimattomuutta.

5.3.4 Hapen kemiallinen poistaminen

Tehokkaimmatkaan ilmanpoistimet eivät voi poistaa liuennutta happea täysin. Vaikka veden höyrystyessä hapen määrä on vähäpätöinen, siitä on silti haittaa, koska se aiheuttaa voimakasta korroosiota. Kaksi yleisintä hapenpoistokemikaalia ovat natriumsulfiitti ja hydratsiini. Natriumsulfiittia käytetään enintään 6,2 MPa:n paineissa ja hydratsiinia yli 6,2 MPa:n painekattiloilla. Molemmilla aineilla on etuja sekä haittoja.

Hydratsiini (N_2H_4) lisätään laimeana liuoksena neutraloimaan jäännöshapetta lauhteen korroosiosuojaksi. Hydratsiini on väritön, öljymäinen neste, voimakkaasti emäksinen ja hajultaan ammoniakin kaltainen. Saatavana on myös hydrokinonia tai katalyyttia hydratsiinia reaktion nopeuttamiseksi. Pintakatalyytti, kuten aktiivihiilisuodatin, lisää myös reaktionopeutta. (Manivasakam 2011, 336-338.)

Hydratsiini reagoi hapen kanssa muodostaen typpeä ja vettä kaavan 1 mukaisesti.



missä N_2H_4 = hydratsiini

O_2 = happi

N_2 = typpi

H_2O = vesi

Ylimääräinen annosteltu hydratsiini hajoaa ammoniakiksi veden lämpötilan ylittäessä 200 °C, kaavan 2 mukaisesti.



missä N_2H_4 = hydratsiini

NH_3 = ammoniakki

N_2 = typpi

Tämän vuoksi hydratsiini on syötettävä alle 200 °C:n syöttövedeen kaasunpoiston jälkeen. (Mts. 336-338.)

Hydratsiinin etuina ovat erinomainen hapenpoistokyky pienillä pitoisuuksilla, passiivisuus rauta- ja kuparipinnoilla sekä että se ei sisällä kiinteitä partikkeleita. Se on kuitenkin vahvasti karsinogeeninen sekä erittäin syövyttävää ja tiivistettynä syttyvää. Lisäksi yliannosteltu hydratsiini hajoaa ammoniakiksi. Hapenpoistoaineita ei saa liottaa kylmään veteen, koska ne sitovat enemmän liuennutta happea. Tällöin kemikaalia kuluu enemmän. Karsinogeenisistä syistä on kehitetty ei-karsinogeenisiä hapenpoistajia ja katalyyttejä, kuten metyylietyyliketoksiamiini, isoaskorbiinihappo, dietyylihydroksyyliamiini (DEHA), erytorbiinihappo, hydroksyyliamiini, hydratsiinisulfaatti, hydrokinoni. (Mts. 337-338.)

5.3.5 Orgaaniset aineet ja öljy

Orgaaninen aines aiheuttaa kattilavesien kuohuntaa ja saa aikaan kerrostumia sekä tukkeutumia. Kattilaveteen prosessista vuotanut öljy, muodostaa lämpöä eristävän kalvon lämmönsiirtopinnoille ja heikentävät toimintaa. (Manivasakam 2011, 286.)

6 Höyry- ja lauhdeverkko

Höyryä käytetään sen hyvien ominaisuuksien vuoksi teollisuudessa prosessien lämmittämiseen ja tuotannon eri tarpeisiin. Prosessihöyry kulkee höyryverkostossa lopputkäyttäjille. Höyry- ja lauhdejärjestelmän energiatehokkuutta parantamalla saavutetaan suuria taloudellisia säästöjä. (Federley 2009, 2.)

6.1 Lauhteen- ja ilmanpoisto

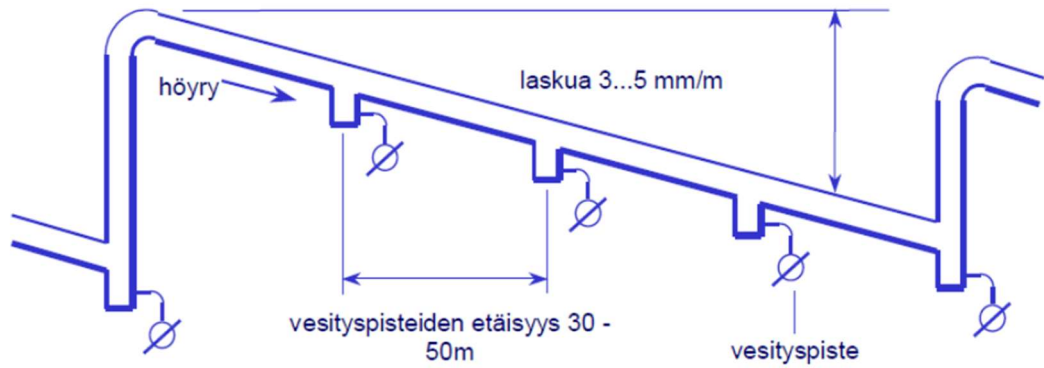
Energiatehokkaan höyry- ja lauhdejärjestelmän kannalta on merkittävää, että seuraavat asiat on huomioitu: suunnitteluvaiheessa siirtoputkiston painetasot ja -häviöt on mitoitettu tarpeen mukaan. Lauhdejärjestelmässä lauhteen-, lian- ja ilmanpoisto on riittävä sekä toteutettu oikein. Mikäli lauhteen poisto on puutteellinen, alkaa virtaava höyry työntämään lauhdetta edellään muodostaen vesitulpan (ks. kuvio 1), joka aiheuttaa vesi-iskuja. Lisäksi hönkähöyryä hyödynnetään ja lauhteenpalautus on tehokasta. Höyry- ja lauhdejärjestelmän putkisto on eristetty ja vuodot minimoitu. Järjestelmän laitteisto sekä instrumentit toimivat oikein ja luotettavasti. (Mts. 3.)

Vesitulpan kehittyminen höyryputkessa



Kuvio 1. Vesitulpan kehittyminen höyryputkessa (Höyry- ja lauhdejärjestelmäkoulutus n.d, 62, muokattu)

Höyry- ja lauhdeverkosto tulisi aina suunnitella laskevaksi, jolloin muodostunut lauhde ei kerääny verkostoon taskuiksi. Vesityspisteiden etäisyys ei saa ylittää yli 50:tä metriä. Jokainen pienikin pystynousu tulee vesittää (ks. kuvio 2). (Höyry- ja lauhdejärjestelmäkoulutus n.d, 64.)



Kuvio 2. Lauhteenpoistimen sijainti höyrylinjassa (Höyry- ja lauhdejärjestelmäkoulutus n.d, 64, muokattu)

6.2 Höyryverkko

Höyryverkonpaine määritellään lopullisen käyttökohteen paine- ja lämpötilatason mukaan. Korkeapaineisen höyryn etuina on, että se voidaan paisuttaa eri painetasoille käyttökohteesta riippuen. Haittapuolena korkeampi paine lisää lämpö- ja vuotohäviöitä verkostossa. Putkiston painehäviöitä lisäävät putkimutkat, virtausvastusta aiheuttavat komponentit ja pitkät putkilinjat. Siksi tarpeettomat mutkat, venttiilit ja mittainstrumentit tulisi poistaa putkistosta. Höyryjärjestelmän vuodot alentavat verkoston painetta ja tehoa, ja aiheuttavat kosteusvaurioita eristeisiin sekä lisäävät lämpöhäviötä ja korroosiota. Taulukossa 1 on esitetty höyryvuodon hinta höyryn kustannuksen ollessa 30 e/MWh (Federley 2009, 10-12.)

Taulukko 1. Höyryvuodon aiheuttamat vuotuiset häviöt (Federley 2009, 12)

Vuotoaukon halkaisija	Höyryvuoto					
	3,5 bar(g)			7,0 bar(g)		
mm	kg/h	tonnia/a	euroa/a	kg/h	tonnia/a	euroa/a
1,5	3	28	630	6	49	1 100
3,0	13	110	2 500	22	194	4 500
4,5	28	248	5 700	50	438	10 000
6,0	50	441	10 000	89	778	18 000

Tyypillisiä vuotokohtia ovat lauhteenerottimet, vaurioituneet putket, laippaliitokset ja venttiilit. Höyryverkosto, jossa lauhteenpoistimia ei ole tarkastettu 3 – 5 -vuoteen, joka kolmas lauteenpoistin vuotaa, kun taas vuotavia on vain noin 5 % säännöllisellä lauhteenpoistimien kunnossapidolla. (Mts. 13.)

6.3 Lauhdeverkko

Höyryjärjestelmän yksi tärkeimmistä energiatehokkuuteen vaikuttavista toimenpiteistä on tehokas lauhteenpoisto. Putkistoon kerääntynyt lauhde vähentää höyryvirtauksen poikkipinta-alaa, aiheuttaa vesi-iskuja sekä heikentää lämmönsiirtoa lämmönvaihtimissa tai jopa estää höyryn virtauksen lämmönsiirtimeen. (Federley 2009, 10.)

Lauhdeverkko tulisi aina suunnitella laskevaksi, jolloin lauhde virtaa painovoimaisesti lauhdesäiliöön. Jos lauhdejärjestelmässä on merkittävästi nousevia putkiosuuksia, saattaa syntyä tilanne, jossa paine ei riitä voittamaan hydrostaattista painetta ja lauhdeverkko kuormittuu. Lauhdelinjat tulisi myös suunnitella siten, että muodostuvalla hönkähöyryllä on tilaa. (Yleiskurssi. n.d.)

6.3.1 Lauhteenerottimet

Lauhteenerottimen tärkeimmät tehtävät on poistaa muodostunut lauhde mahdollisimman nopeasti, ja estää höyryn karkaaminen lauhteenerottimen kautta. Lisäksi se poistaa muodostuneet kaasut ja ilman pois putkistosta. (Federley 2009, 8.)

Lauhteenerottimet voidaan jakaa toimintaperiaatteen mukaan termodynaamisiin, termostaattisiin ja mekaanisiin lauhteenerottimiin. Oikean tyyppinen lauhteenerotin valitaan painealueen ja painevaihteluiden sekä lämpötilan ja lauhteen määrän mukaan. Tyypillisiä lauhteenerottimissa esiintyviä vikoja ovat tukkeutumiset, höyry vuodot, väärä mitoitus tai asennus ja tästä johtuen puutteellinen toiminta. Siksi lauhteenerottimien kunnossapito on merkityksellistä energiatehokkuuden kannalta. Lauhteen erottimien kunto voidaan tarkastaa termisesti, akustisesti, visuaalisesti tai valvontalaitteistolla. (Mts. 8.)

Lauhteen palautuksen etuina on lisäveden kulutuksen pienentyminen, jäteveden puhdistuksen väheneminen, polttoaine säästöt ja prosessin tehostuminen. Lauhteenpalautusputkisto mitoitetaan usein riittämättömäksi, koska palautuvan lauhteen määrä on vaikea arvioida. (Mts. 9.)

Lauhdejärjestelmä jää teollisuudessa huomattavasti pienemmälle huomiolle kuin höyryjärjestelmä. Lauhdejärjestelmän merkityksellisyttä ei usein ymmärretä, tällöin investointeja ei tehdä, jolloin lauhteet johdetaan viemäriin. Säännöllisten tarkastusten puuttuessa lauhteen palautusta vältetään, koska pelkona on vuotojen aiheuttama likaantuminen. (Mts. 10.)

6.3.2 Hönkähöyry

Hönkähöyryä muodostuu, kun kylläisen pisteen lähellä oleva lauhde johdetaan matalampaan paineeseen. Hönkähöyryn määrä riippuu paine-erosta. Tyypillisesti sitä muodostuu noin 10 %:a lauhteen määrästä. Hyödyntämätön hönkähöyry paisuu ja aiheuttaa ongelmia lauhteen siirtoputkistossa, sekä estää lauhteen virtauksen. Hönkähöyryllä voidaan lämmittää tehdassalia, prosessivettä tai -ilmaa vähentäen matalapainehöyryn kulutusta. Hönkähöyry voidaan erottaa lauhteesta erillisellä erotussäiliöllä, jossa virtausnopeutta madaltamalla ja paine-erolla hönkähöyry erottuu (ks. kuvio 3). (Federley 2009, 11.)



Kuvio 3. Hönkähöyry säiliöllä erotetaan kaksifaasivirtauksesta lauhde (Höyry- ja lauhdejärjestelmäkoulutus n.d, 159)

6.3.3 Ilma

Höyryputkistoon päässyt ilma ja kondensoitumattomat kaasut eristävät lämmönsiirtimissä sekä aiheuttaa tukoksia estäen höyryvirtausta. Ilma on myös yksi merkittävä höyry- ja lauhdejärjestelmän korroosion aiheuttaja. Termiset lauhteenerottimet soveltuvat myös ilman- ja lianpoistamiseen järjestelmästä. (Federley 2009, 7.)

Viallisesta ilmanpoistosta voi seurata, että ammoniakki yhdessä hapen kanssa syövyttävät kuparia muodostaen korroosioreaktiosarjan lämmönvaihtimissa tai syöttövedenesilämmittimissä. (Manivasakam 2011, 34.)

6.4 Höyry- ja lauhdeverkon korroosio

Lauhdeverkon korroosio on yksi yleisistä ilmiöistä ja se on vakava ongelma. Jos kattilavesiä ei käsitellä asianmukaisesti lauhde järjestelmä syöpyy voimakkaasti. Korroosio tuotteet, kuten rauta- ja kuparioksidi kerääntyy taskuihin lisäten virtausvastusta. Lisäksi ne muodostavat kerrostumia lämmönvaihtimissa, ja vähentävät lämmönsiirron hyötysuhdetta. Esimerkiksi yhden millimetrin rautaoksidi kerros heikentää hyötysuhdetta noin 6 %:ia. Hiilidioksidi on lauhdeverkkoston yleisin korroosion aiheuttaja. Toiseksi suurin on happi, joka usein vuotaa lauhdeverkkoon toimimattomien ilmastuksien ja venttiilien kautta. (Manivasakam 2011, 69-70.)

Puhtaammat lämmönsiirtopinnat vähentävät polttoainekustannuksia ja kalliita seisokkeja. Sopivalla vedenkäsittelyllä on ratkaiseva rooli tehokkuuden parantamisessa ja kustannusten pienentämisessä. Jos toimimattomassa järjestelmässä annetaan epäpuhtauksien päästä liiallisiin pitoisuuksiin, höyrynlaadun heikkeneminen aiheuttaa vakavia seurauksia ja lyhentää kattilanelinikää. (Mts. 34.)

Kattilavettä puhdistetaan sisäisellä ja ulkoisella kemiallisella käsittelyllä. Ensimmäisessä vaiheessa neutraloidaan tai poistetaan syövyttävät aineet. Toisessa vaiheessa lisätään kemikaaleja kovuudenpoistamiseksi ja neutraloimaan jäljelle jääneitä kaasuja. Yleisesti ottaen mitä korkeampi on kattilaveden paine sitä suuremmat vaatimukset ovat veden puhtaudelle. (Mts. 89.)

7 Mittaukset höyry- ja lauhdejärjestelmässä

Motiva julkaisi vuonna 2012 mittausoppaan jatkona edellisenä vuonna valmistuneelle höyry- ja lauhdejärjestelmien energiakatselmoinnin toteutusohjeelle. Mittausoppaan tavoitteena on kehittää ja parantaa höyry- ja lauhdejärjestelmien energiatehokkuutta sekä lisätä ja tehostaa höyryn ja lauhteen virtaus- ja määrämittauksilla saavutettavaa hyötyä. Opas on tarkoitettu mm. olemassa olevan järjestelmän mittausten kehittämiseen, mittauksen luotettavuuden arviointiin ja energiakatselmusten tai analyysien tukimateriaaliksi. (Leskelä & Turunen 2012, 2-5.)

Höyry- ja lauhdejärjestelmäksi määritellään höyryn käyttökohteiden ja tuottajien välinen prosessialue. Prosessi kokonaisuuksia ja sen toimintoja ovat esimerkiksi höyryputkisto, höngityssäiliöt, lämmönsiirtimet, lauhduttimet, lauhteen poistimet, lauhdeputkisto, lauhdesäiliöt, säätöventtiilit ja mittausinstrumentit. (Mts. 7.)

7.1 Luotettavuus

Teollisuuden prosessien hallinnassa perusmittauksia ovat virtaus, lämpötila ja paine mittaukset. Näiden suureiden tarkka mittaaminen on edellytys toimivalle ja taloudelliselle prosessille. Myös viranomaismääräysten ja turvallisuusvaatimusten toteuttaminen vaatii mittauksilta luotettavuutta.

Mittauksen luotettavuuden arvioinnissa on huomioitava järjestelmään liittyvät fysiikkaaliset ilmiöt kuten lämmön siirtyminen lauhtumisen kautta tai konvektiolla, faasimuutokset, aineensiirto ja putkiston virtausvastus. Käytännössä näiden ilmiöiden seuranta vaatii virtauksen, paineen, lämpötilan ja pinnankorkeuden mittaamista. (Leskelä & Turunen 2012, 8.)

Olennaista on höyry- ja lauhdejärjestelmien energiatehokkuuden kannalta nimetä vastuu henkilö, jonka tehtäviin tulee sisältyä seuraavia osakokonaisuuksia. Höyryn kulutuksen seuranta ja analysointi sekä muutoksesta tiedottaminen ja raportointi. Mittauksien määräaikaistarkistukset ja kalibrointi. (Mts. 6.)

7.2 Mittausvirheen aiheuttajat

Mittauspisteiden perustamisvaiheessa luodaan perusta mittauksen luotettavuudelle. Soveltuvan mittarin valinta ja mitoitus, sijoittelu prosessisuunnittelussa ja viimekädessä asennus sekä käytönaikainen valvonta, huolto ja kalibrointi vaikuttavat mittauksen luotettavuuteen. (Leskelä & Turunen 2012, 19.)

Höyry- ja lauhdevirtojen energiamäärät lasketaan massavirtojen ja entalpian avulla. Tyypillisesti automaatiojärjestelmään tuodut erilliset virtaus-, paine- ja lämpötilamittaukset aiheuttavat kaksi erityyppistä virhelähdettä energiamäärän laskentaan. Virhelähteitä ovat itse mittaukseen liittyvät virheet sekä signaalin käsittelyyn ja energiamäärän laskentaan liittyvät virheet. (Mts. 32.)

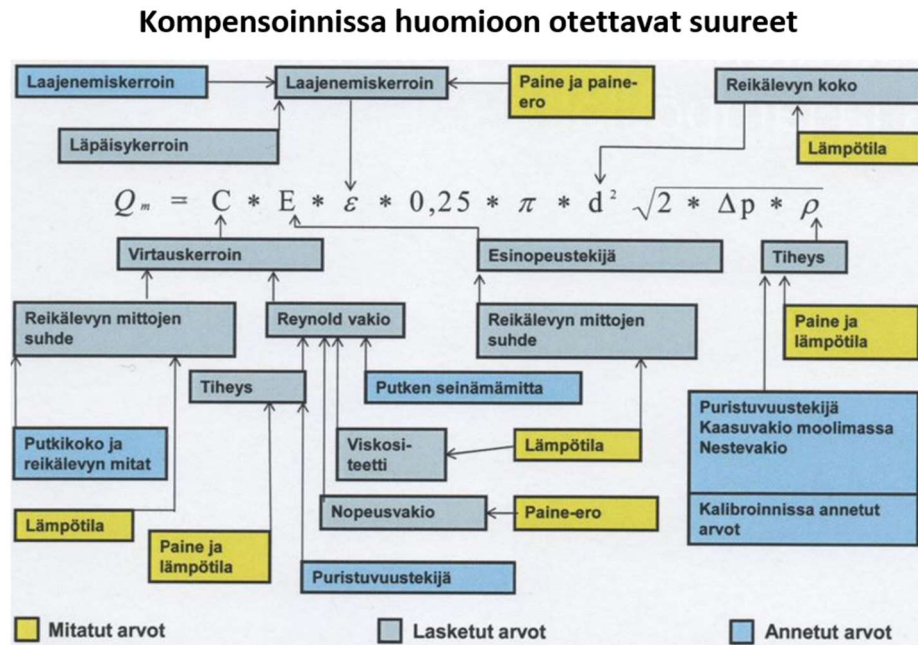
”Energiamittausten kenttäkalibroinneissa kerätty aineisto osoittaa, että teollisuudessa keskimäärin joka viidennessä energiamittauksessa on yli 2 % suuruinen virhe nimenomaan mittausketjussa itse mittauksen jälkeen. Eli vaikka mittarit mittaisivat oikein, lopputulos on laskennasta ja signaalinkäsittelystä johtuen virheellinen.” (Mts. 31.)

Erään voimalaitoksen vesitaseen mittauksia tarkasteltaessa havaittiin että 50 mittauksesta kuusi aiheutti yli 90-prosenttia kaikista tase-eroista. Näistä vain kahdessa oli mittarin itsessään aiheuttamaa mittavirhettä ja neljässä muussa systemaattista laskenta tai tiheydenkompensointi virhettä. (Mts. 31.)

Esimerkki tapauksen havainnot kuvaavat yleistä höyry- ja lauhdejärjestelmän tilannetta jossa virtausmittaukset ovat selvästi heikommassa kunnossa kuin lämpötila- ja painemittaukset. Höyryn määrämittausten signaalinkäsittelyssä ja kompensoinnista löytyy systemaattista virhettä. Lauhdeverkoston mittauksissa ongelmia aiheuttaa höyrystyminen, lämpötilaprofiili ja entalpian oletaminen vakioksi. (Mts. 32.)

Teollisuuden virtausmittauksista usein puuttuu tiheydenkompensointi tai se on puutteellisesti tehty (ks. kuvio 4). Niin kauan kuin virtaavaan aineen tiheys on lähellä mitoituspistettä, näyttää mittaus lähes oikein. Prosessimuutokset ja luonnostaan sykkivä höyryn virtaus ilman tiheydenkompensointia aiheuttaa merkittävää mittavir-

hettä. Toinen yleinen virhelähde on automaatiojärjestelmässä tapahtuva signaalinkäsittely. Esimerkiksi virtausmittauksen vaihdon yhteydessä aikaisemman lähettimen vaatima korjauskerroin on jäänyt muuttamatta.



Kuvio 4. Kompensoinnissa huomioitavat suuret (Yleiskurssi. n.d, 136. muokattu)

Mittasignaaliille tehdään laskennallisia muutoksia laitekohtaisesti, siirrettäessä tietoa järjestelmätasolta toiselle. Mittaviestin korjaus- ja muuntokertoimet voivat aiheuttaa vakavaa mittavirhettä. Esimerkiksi paine-eroon perustuvan virtausmittauksen virtausnopeus on verrannollinen paine-eron neliöjuureen. Vaadittava neliöinti on tehtävä, mutta pitää varmistua, ettei sitä tehdä kahteen kertaan paine-erolähettimellä sekä automaatiojärjestelmässä. (Leskelä & Turunen 2012, 33.)

7.2.1 Mittausvirheet höyryverkossa

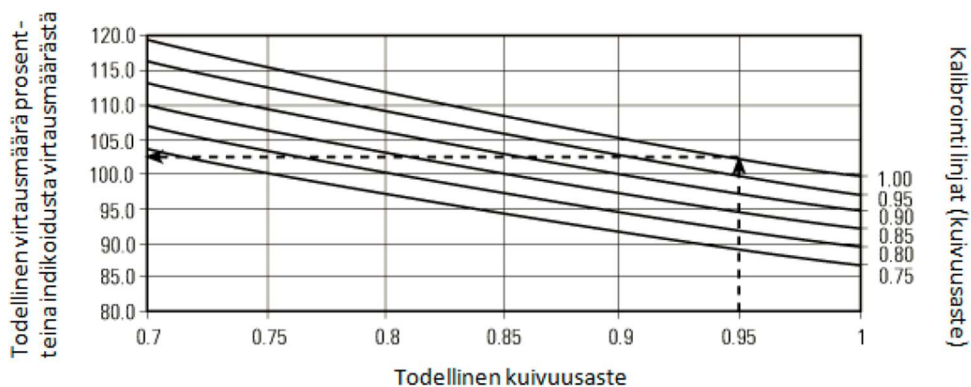
Käytännössä höyryn virtausmäärää mitattaessa, luotettavuuteen vaikuttaa höyryn ominaisuudet mittauspisteessä, kuten höyryn kosteus, tulistusmäärä, lämpötila, paine ja virtausvaihtelut. Tiheyskompensoinnissa otetaan huomioon höyryn lämpötila-

lan ja paineen vaikutus. Seuraavassa taulukossa (ks. taulukko 2) on esitetty virtausmittausvirhe prosentteina, jos tulistetun höyryn tiheyskompensoinnissa ei ole huomioitu lämpötilakompensointia. (Leskelä & Turunen 2012, 23.)

Taulukko 2. Tulistetun höyryn virtausmittaus virhe (%) (Leskelä & Turunen 2012, 25. muokattu)

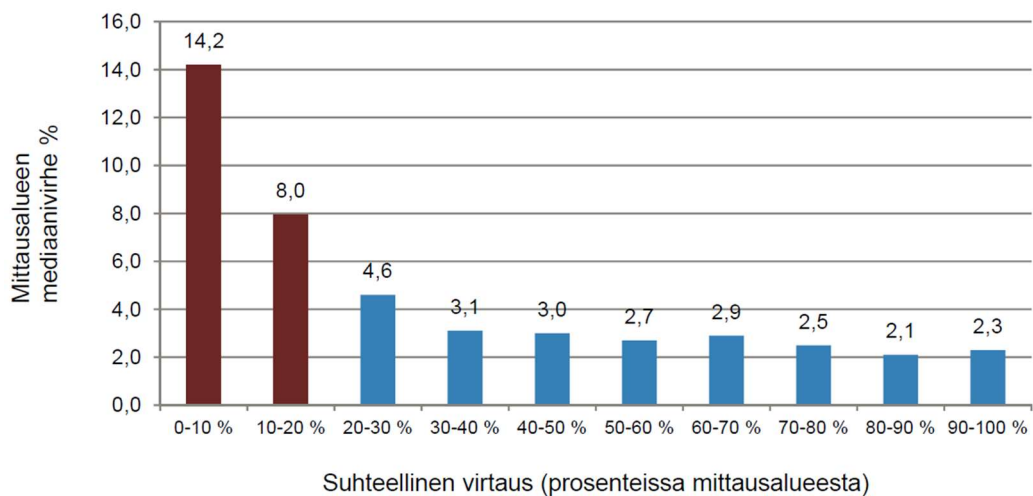
Paine bar_e	Tulistusaste			
	1 °C	5 °C	10 °C	50 °C
1	1,5	8,3	17,0	105
2	1,4	7,6	16,1	95,9
3	1,4	7,5	15,0	90,5
4	1,3	7,0	14,5	86,5
5	1,3	6,8	14,1	83,5
6	1,3	6,8	13,8	81,4
7	1,3	6,5	13,7	79,0
8	1,3	6,5	13,3	77,8
9	1,3	6,4	12,9	76,5
10	1,3	6,3	12,8	75,0

Höyryn kosteudella on vaikutusta höyrymäärän mittaustulokseen, joka on käytännössä hyvin vaikea todentaa (ks. kuvio 5). Siksi kosteuden vaikutus on minimoitava ennen virtausmittausta asentamalla pisaranerotin ja lauhteenpoistin. Tällöin voidaan olettaa, että höyryssä ei ole vesipisaroita. Tilavuusvirtausta mittaavassa Vortex -mittauksessa vesipisarot eivät vaikuta merkittävästi mittaustulokseen, mutta laippamittauksessa pisaranerotus tai laskennallinen kompensatio on välttämättömyys luotettavuuden suhteen. (Leskelä & Turunen 2012, 23.)



Kuvio 5. Höyryn kuivuusasteen vaikutus todelliseen virtausmäärään (Leskelä & Turunen 2012, 24.)

Seisakkien jälkeen käynnistysvaiheessa saattaa höyryverkossa syntyä paineiskuja, jolloin virtausmittareiden nollapiste voi siirtyä (ks. kuvio 6). Paine-erolähtetimiin on saatavissa ”nollapisteen” kalibrointimoduuleja, joiden avulla mittarin nollapiste pidetään luottavalla alueella. Nollapisteen kalibrointi tiedon voi myös toteuttaa hälytyksenä, tuomalla automaatiojärjestelmään signaalin paine-erolähtetimen mitattua alle alarajan. Tästä tiedetään, että nollapiste on siirtynyt ja mittari on kalibroitava. (Mts. 29.)



Kuvio 6. Indmeas Oy 1890 kpl teollisuushöyrykalibroinnin virheiden itseisarvojen mediaaniarvot (Leskelä & Turunen 2012, 34.)

7.2.2 Mittausvirheet lauhdeverkossa

Lauhteenmäärämittauksissa on huomioitava, ettei vedelle sopivat mittausmenetelmät välttämättä sovellu sellaisenaan, koska usein lauhteesta syntyy hönkähöyryä. Siksi lauhteen mittaus on asennettava lauhtesäiliön jälkeen, jolloin hönkimisen vaikutukset pitäisi olla minimoitu. (Leskelä & Turunen 2012, 34.)

”Lauhde-energian mittaamisen perustavampaa laatua oleva virhe tulee kin siitä, että palaavan lauhteen tiheys oletetaan ykköseksi ja/tai entalpia vakioksi. Tämä aiheuttaa suuren vääristymän esimerkiksi energialaskutukseen. Käytäntö on havaittu mm. usealla paperitehtaalla.” (Mts. 36.)

Online-seurannan lisäksi energiatehokkuuden kehittämisen kannalta on tehtävä määräjain kertamittauksia lauhteen poistimien toiminnan ja putkiston lämpöhäviöiden tarkastamiseksi. Lauhteen poistimen toimintakunnon voi toteuttaa esimerkiksi ultraääni- tai lämpökameramittauksella. (Mts. 36.)

7.2.3 Laadunvarmennus

Mittauksen käytönaikainen laadunvarmennustyö voidaan jakaa valvonta-, huolto- ja kalibrointityöhön.

Mittauslaadun valvontaan liittyen operaattoreiden perinteisesti luotetaan reagoivan ja raportoivan kunnossapidolle epäilyttävistä mittauksista. Tosielämässä aina näin ei kuitenkaan tapahdu vaan valvomohenkilöstö tunnistaa epäluotettavan mittauksen ja sivuuttaa asian, jos se ei vaikeuta prosessin säätöä. On olemassa valvontatyökaluja, jotka parantavat huollon ja kalibroinnin toimivuutta, kun valvontamekanismilla voidaan osoittaa signaalin merkittävä hajonta ja reagoida siihen toimenpitein. Tasevertailu on höyryverkkoihin soveltuva valvontatyökalu, missä mittavirhe näkyy tasepoikkeamana trendeissä. Isoissa järjestelmissä on suositeltavaa käyttää vikadiagnostiikkaohjelmaa, joka arvioi mittauskohtaista virhettä. Jolloin vikaantuneet mittaukset havaitaan nopeasti. (Leskelä & Turunen 2012, 35.)

Käytännössä mittausten kunnossapito on korjaavaa, eli reagoidaan hälytysten perusteella. Määrävälein tehdyt paine- ja lämpötilalähetimien kalibroinnit eivät käsitä koko mittausketjua, jolloin toiminta ei ole metrologisesti jäljitettyä. Kuten esimerkiksi impulssiputken likaantuminen tai tukkeutuminen jää tällöin havaitsematta.

Jäljitettävät kalibrointiraportit toimivat laadussa pidon metrologisena lukkona mitausjärjestelmässä. Paine- ja lämpötilamittarit voidaan kalibroida laboratoriossa rakenteellisen irrotettavuuden vuoksi, mutta virtausmittauksissa on syytä käyttää merkkiainemenetelmää, jolla paras saavutettavissa oleva kalibrointiepävarmuus on 0,5-prosenttia. (Mts. 36.)

7.3 Mittaustiedon hierarkiatasot

Mittaustiedon hierarkiatasoa on karkeasti jaoteltuna kolme, paikalliset mittaukset, mittausten online-seuranta, mittaustiedon raportointi. Paikallisen mittauksen tiedolla voidaan ohjata osaprosessia paikallisesti. Online-seurannalla kyetään kokonaisvaltaiseen prosessinohjaamiseen. Laitoksen kustannusten johtaminen ja energiatehokkuuden kehittäminen edellyttävät mittaustiedon raportointia. (Leskelä & Turunen 2012, 10.)

7.3.1 Raportointi

Raportointi on johdon työkalu, jolla tarkastellaan energiatehokkuuden kehittymistä. Tyypillisimmin raportointia käytetään päätösten pohjana sekä muutosten ja toimenpiteiden seurannassa. Jos kunnollista raportointityökalua ei ole käytettävissä on vaikutuksia kokonaistaloudessa vaikeaa tai jopa mahdoton todentaa. Tämä realisoituu lopulta höyryntuotannon tarpeessa.

Raportoinnissa on suositeltavaa käyttää suodattimia, joiden avulla tuotantokatkot voidaan suodattaa pois raportoitavalta ajanjaksolta. Esimerkiksi katkotietoa kannattaa hyödyntää suodattavana signaalina. Myös lajikohtaiset seurannat ja raja-arvot on huomioitava lajikoodin signaalia käyttämällä.

Vuodenajan vaihtelua voidaan normeerata lämpötilakorjauskertoimilla, mutta luotettavan normeerauksen toteuttaminen on haastavaa. Siksi on suositeltavaa verrata raportointia vastaaviin olosuhteisiin aiemmin, kuten tuoreveden lämpötilan mukaan.

Raportointia tarvitaan säädösten ja lupa vaatimusten todentamisessa. Tyypillisesti energiatehokkuussopimuksen vuosiraportointi, ympäristölupa ja päästökauppa vaativat täsmälliset raportit. Raportoinnin pohjalta laskutetaan myös energiankuluttajia. Tällöin on varmistuttava, että taustalla olevat mittaukset ovat kunnossa. (Leskelä & Turunen 2012, 10-12.)

”Tunnetaan tapauksia, joissa höyryn määrämittauksessa ja sen myötä laskutuksessa on ollut yli 10 % virhe.” (Mts. 11.)

Käytännössä ominaiskulutusluvuista sekä muista keskeistä määrää kuvaavista trendikuvaajista, taulukoista ja jakaumapiiraista muodostuu raporttien ydin. Sillä ne kuvaavat tarkasteltavan ilmiön muutoksen suuntaa, vaihtelua, suuruutta ja jakaumaa.

(Mts. 11.)

7.3.2 Online-seuranta

Vaikka monitorointia on jo pitkään käytetty prosessien ohjaamisessa, silti edelleen energiatehokkuuden online-seuranta on varsin vähäistä. Monitorointia työssään pääsääntöisesti käyttää tuotannon ja kunnossapidon henkilöstö joiden toimenkuvaan kuuluu hallita suuria määriä prosessimuuttujia.

Online-seuranta on erinomainen tapa etsiä energiatehokasta ajotapaa, jolloin on heti nähtävissä prosessimuutoksen vaikutus energiatehokkuuteen. On myös mahdollista hyödyntää monitorointityökaluja taseiden ja trendien havainnollistamiseen.

Hyvänä periaatteena on koota energiatehokkuutta kuvaavat tunnusluvut omalle automaatiojärjestelmä sivulle, josta yhdellä silmäyksellä on mahdollista nähdä prosessin energiatehokkuuden tila. Näytöllä voidaan esittää trendien lisäksi liikennevalot, joilla kuvataan, kuinka lähellä prosessi on energiatehokasta tavoitetilaa.

Havainnollistavat raportit ja online-seuranta ovat tehokkaita apuvälineitä tehostamaan henkilöstön ymmärrystä niistä tekijöistä, jotka vaikuttavat höyry- ja lauhdejärjestelmän energiatehokkuuteen sekä sitä kautta voimalaitoksen toimintaan ja taloudellisuuteen. (Leskelä & Turunen 2012, 13-14.)

7.3.3 Energiatehokkuuden seuranta

Prosessin mittausten suurin hyöty saavutetaan, jos mittausdata jalostetaan operaatoreille ja käyttäjille käyttökelpoiseen muotoon. Jolloin kokonaisuus hahmottuu taseiden kautta mahdollistaen ominaiskulutusten ja historiatrendien vertailun. Näin tunnistetaan höyry- ja lauhdejärjestelmien kehittämiskohteita, kuten rakenteellisia kapasiteetti ongelmia tai yksittäisen laitteen tehoton toiminta.

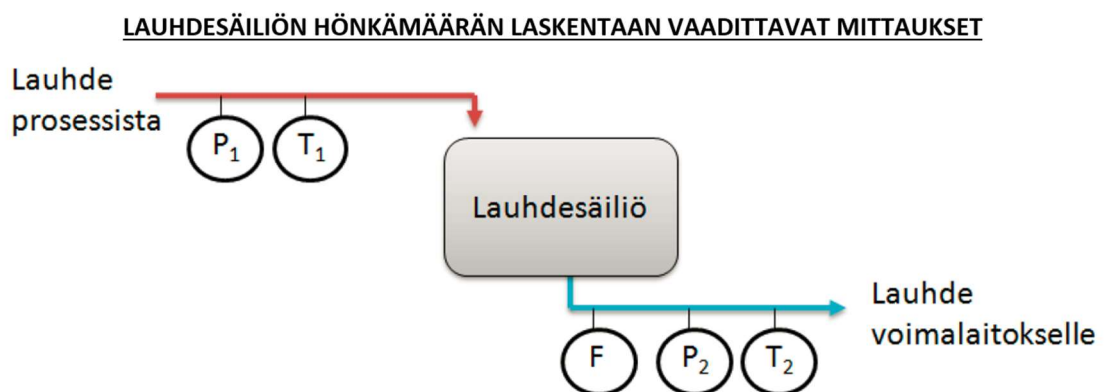
Mittausten online-seurannan ja raportoinnin raja on häilyvä, mutta pääasiassa käyttäjäryhminä online-seurannassa ovat tuotantolinjan operaattorit, johto ja kunnossa-

pito. Raportoinnin määrämuotoisia ja käyttäjäkohtaisia yhteenvetoja puolestaan seuraavat tuotannon ja yrityksen johto. Joskin raportoinnin tunnuslukuja on hyvä tuoda myös lähelle prosessin ohjaustasoa. (Leskelä & Turunen 2012, 17.)

7.3.4 Tunnuslukujen määrittäminen

Höyry- ja lauhdejärjestelmän merkittäviä tunnuslukuja ovat höyryn ominais- ja kokonaiskulutus sekä määrämittaukset käyttökohteittain, palautuvan lauhteen virtaus, johtokyky ja palautusprosentti, lisäveden määrä, lauhduttimen teho, höyryn sekä lauhteen lämpötila ja paine.

Tunnusluvut voidaan jakaa kolmeen ryhmään. Suoraan mittaukseen perustuvat tunnusluvut saadaan järjestelmään tuotavasta mittauksesta. Epäsuoraan mittaukseen perustuvat tunnusluvut antavat indikaation mihin suuntaan prosessia on kokonaisuuden kannalta järkevää ajaa. Esimerkiksi paperikoneen korvausilman lämpötila, jolle on olemassa suositusarvo, jonka yli lämpötilan korottaminen on höyryn hukkaa. Laskekaa hyödyntävät tunnusluvut jalostetaan tyypillisesti useista prosessia mittaavista signaaleista. Esimerkiksi lauhduttimen teho voidaan laskea vesipiirin virtauksen sekä meno- ja paluueden lämpötilan mittauksista (ks. kuvio 7). (Leskelä & Turunen 2012, 18.)



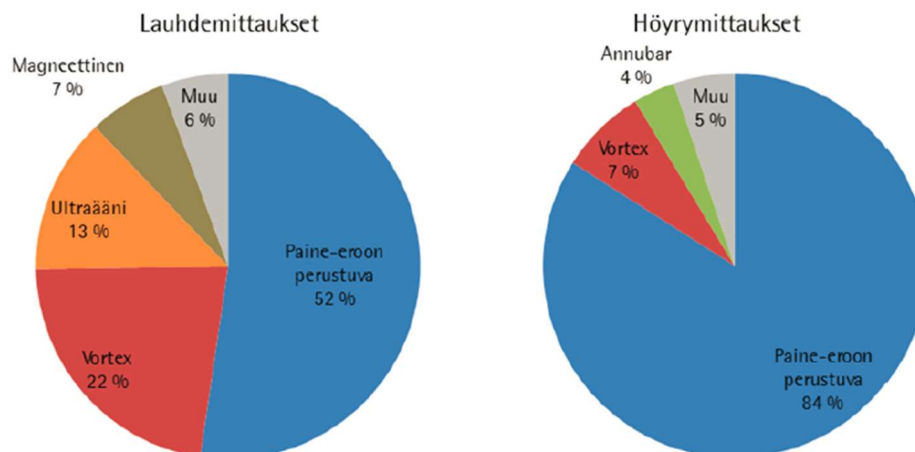
Kuvio 7. Lauhesäiliön hönkähöyryn määrittämiseksi tarvittavat mittaukset (Leskelä & Turunen 2012, 18.)

7.4 Virtausmittaukset

Mittareiden ja mittausten vertailussa tarvitaan seuraavaa kolmea käsitettä. Mittauksen toistettavuus, joka kuvaa mittarin kykyä osoittaa samaa arvoa identtisissä olosuhteissa. Mittauksen tarkkuus, joka kuvaa mittarin mittavirhettä suhteessa mitattuun arvoon tai maksimiarvoon. Mittausalue ilmoittaa mittarin toiminnan tarkkuuden ja toistettavuuden rajoissa. Tyypillisesti määritellään mittausalueeksi mitattu maksimiarvo jaettuna minimiarvolla. Esimerkiksi valmistajan mittarille ilmoittamalla maksimiarvolla ja mittausalueella saadaan selvitettyä pienin mitattava arvo, jonka jälkeen mittauksen luotettavuus heikkenee nopeasti. (Leskelä & Turunen 2012, 22.)

Mittausalue tai mittaussuhde termit kuvaavat virtausmäärä aluetta, jolla mittari toimii annettujen tarkkuus- ja toistettavuustoleranssien sisällä. (Höyry- ja lauhdejärjestelmäkoulutus n.d.)

Virtausmittausta valittaessa on huomioitava riittävän suuri mittausalue ja mittauksen aiheuttama painehäviö. Kuristukseen perustuvat mittaukset ovat luotettavin ja käytetyin toteutustapa mutta ne aiheuttavat paineen alenemaa ja energiatehokkuuden heikkenemistä (ks. kuvio 8). (Leskelä & Turunen 2012, 20.)



Kuvio 8. Indmeas Oy:n 2011 tietokannan mukaan suurin osa höyry- ja lauhdevirtausmittauksista on paine-eromittauksia (Leskelä & Turunen 2012, 32.)

Tyypillisimmät höyryn määrämittausten menetelmät ovat mittalaippa ja Vortex-mittaus. Lauhteen määrää mitattaessa käytetään edellä mainittujen lisäksi ultraäänimittausta

sekä magneettista virtausmittausta, kun lauhde on johtavaa (ks. taulukko 3). Virtausmien määrittelyssä on huomioitava anturin aiheuttama virtaus- ja laajenemiskerroin. Mikäli näitä ei ole määritetty huolellisesti voi lopulliseen mittaustulokseen aiheutua useiden prosenttien virhe. (Leskelä & Turunen 2012, 34.)

Taulukko 3 Lauhteen virtausmittaukset (Leskelä & Turunen 2012, 22.)

Mittaustapa	Ultraääni	Magneettinen	Paine-ero; virtauskorjattu kuristuslaippa	Vortex
Painehäviö	Pieni	Pieni	Kohtalainen	Kohtalainen
T_{max}	200 °C	120 °C	550 °C	300 °C
Mittausalue	120:1	50:1	20:1	40:1
Tarkkuus	<+/- 0,5 %	<+/- 0,5 %	<+/- 3 – 4 %	<+/- 1 %
Virtaussuunta	Kaksisuuntainen	Kaksisuuntainen	Yksisuuntainen	Yksisuuntainen

Kuristuslaippamittauksen mittausalue on pienempi kuin 5:2, mutta jos sen yhteyteen on tehty virtauskertoimen reaaliaikainen laskenta, mittaus aluetta voidaan laajentaa jopa 40:1. Muuttuva aukkoisella kuristuslaipalla mittausalue laajenee 70:1 ja joissakin sovellutuksissa jopa 100:1. Tavallisesti Vortex-mittarin mittausalue on 20:1, mutta kylläisen höyryn massavirtausta mitattaessa ei virtausnopeus saa ylittää 40 m/s. (Leskelä & Turunen 2012, 21.)

7.5 Käytetyimmät virtausmittaukset

Massavirtaukseen ei ole kehitetty anturia vaan massavirtauksen selvittämiseen käytetään tilavuusvirran mittareita. Lisäksi väliaineen tiheys on tiedettävä. Tiheys voidaan mitata epäsuorasti lämpötilan ja paineen avulla tai mitata suoraan tiheytenä. (Halttunen 2007, 84.)

Paine-eroa mittaava virtausanturi perustuu Bernoullin yhtälöön, jossa kineettinen ja potentiaalienergian summa säilyy vakiona. Tämän tyyppisiä virtausmittareita ovat mittalaippa, suutin, venturiputki, segmenttilaippa, pitot-putki, v-cone ja Wedge. (Mts. 88.)

Paine-eroon perustuvat massavirtausmittarit mitoitetaan prosessiaineen arvioidun tiheyden mukaan. Mikäli paine tai lämpötila muuttuu, täytyy suorittaa kompensointi kaavan 3 mukaisesti. (Leskelä & Turunen 2012, 33.)

$$Q_m(\rho) = \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} * Q_m(\rho_0) \quad (3)$$

missä $Q_m(\rho)$ = todellinen massavirtaus

$Q_m(\rho_0)$ = massavirtaus ilman tiheyskompensointia

ρ = todellinen tiheys

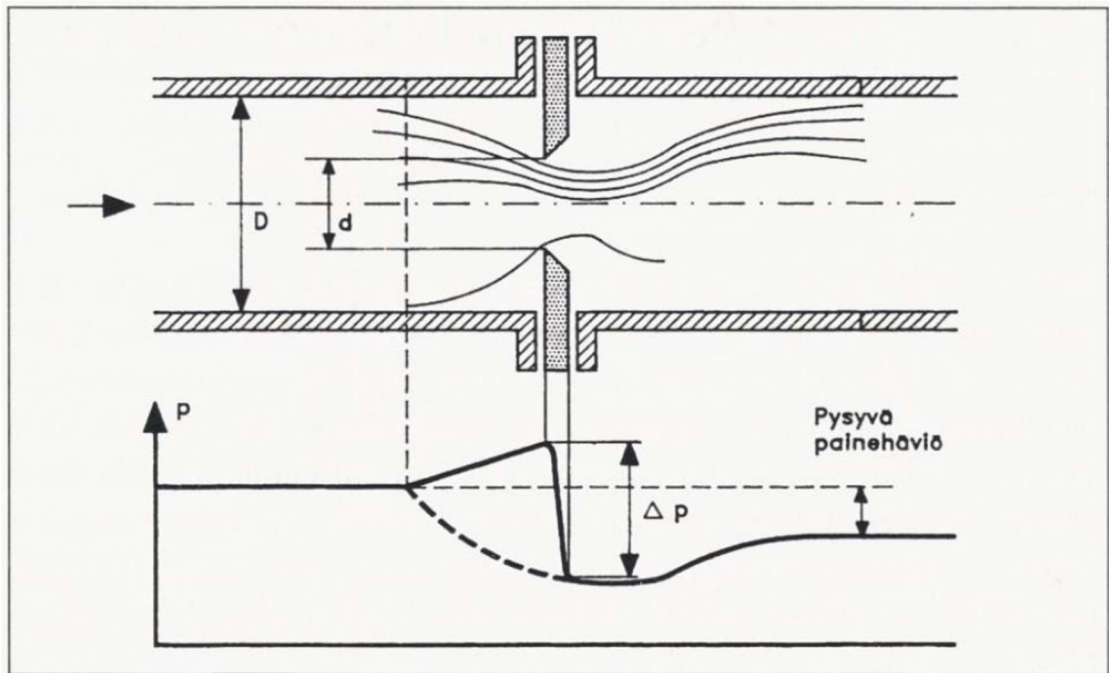
ρ_0 = tiheys mitoituspisteessä

Seuraavaksi käsitellään muutamia Kaipolan tehtaan höyry- ja laudeverkkoon sijoitettuja virtausmittaustapoja.

7.5.1 Mittalaippa

Mittalaippa on yksinkertaisen rakenteensa vuoksi eniten käytetty kuristuselinsovellys. Se sopii kaikkien väliaineiden mittaukseen pienillä virtausnopeuksilla. Kuristuselin on luotettava ja kestävä, missä ei itsessään ole mitään liikkuvaa osaa tai elektroniikkaa (ks. kuvio 9). Standardit määrittelevät tavallisimpien kuristuselinten rakenteen ja mitoituksen. (Halttunen 2007, 89.)

Haittapuolina mittalaipassa on sen suhteellisen pieni mitta-alue, suurehko painehäviöt, asennus vaatimuksen ovat toiminnan kannalta kriittiset. Lisäksi laipan etureunan pyöristyminen likaantumisen ja kiintoainehiukkasista johtuen, aiheuttaa paine-eron huomattavaa pienenemistä. Mikä lisää mittavirhettä ja vaikuttaa merkittävästi massamäärämittauksen tulokseen. (Pihkala 2004, 67-70.)



Kuvio 9. Mittalaipan poikkileikkaus ja pysyvän painehäviön kuvaaja (Pihkala 2004, 68.)

Mittalaippa on levy, jossa on putken halkaisijaa pienempi aukko. Virtausta estävä kuristuselin kasvattaa virtausnopeutta aukon kohdalla jolloin paine laskee. Syntyvä paine-ero riippuu aineen ominaisuuksista, kuristuselimen muotoilusta ja paineen mittauskohdasta. Kuristuselin jättää kuitenkin aina pysyvän painehäviön virtaavaan aineeseen. Paine-ero on verrannollinen virtauksen neliöön. Kaasuja mitattaessa on huomioitava myös lämpötila ja absoluuttinen paine, jotta mittaustulos voidaan korjata olosuhteiden muuttuessa. (Pihkala 2004, 69.)

Tällöin tilavuusvirtauksen yhtälö kirjoitetaan kaavan 4 muotoon.

$$\dot{V} = k \sqrt{\frac{\Delta p * p_{abs}}{T}} \quad (4)$$

missä \dot{V} = Tilavuusvirtaus

k = kuroutumiskerroin

Δp = kuristuselintä ennen ja jälkeen olevan paineen erotus

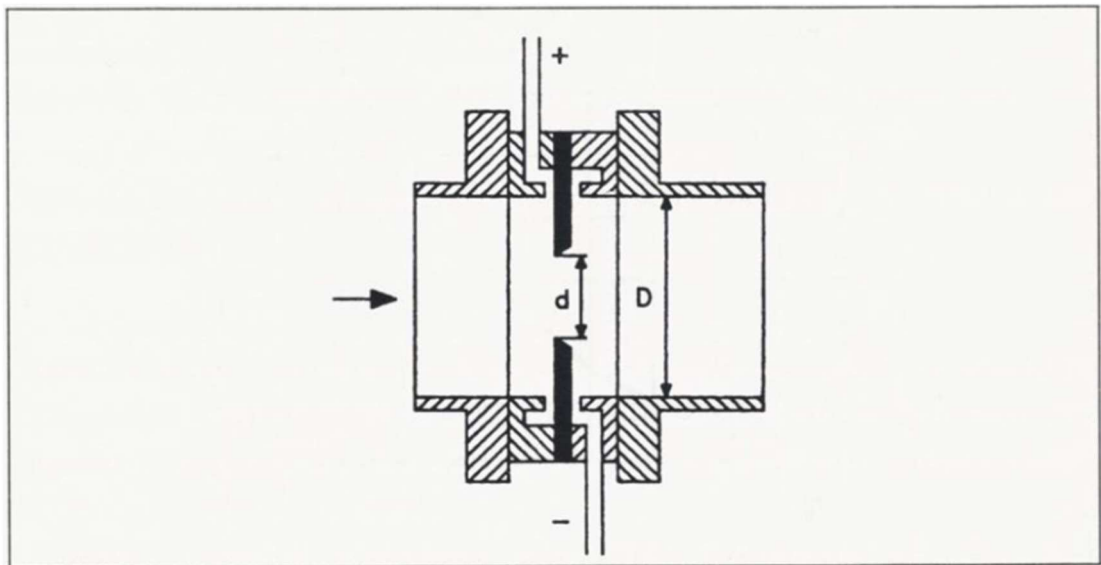
p_{abs} = aineen absoluuttinen paine

T = aineen lämpötila

Kuroutumiskerroin kuvaa suihkun pinta-alan suhdetta purkausaukon pinta-alaan. Terävä reunaisella laipalla se on tyypillisesti noin 0,63 ja vähän pyöristyneellä reunalla noin 0,9. (Valtanen 2013, 187.)

Kuristusmittausta käytettäessä esimerkiksi tulistetulle höyrylle on huomioitava tiheys ja viskositeetti, mitkä vaikuttavat syntyvään paine-eroon. Höyryn sykkivä virtaus aiheuttaa mittausvirhettä, mitä voidaan kompensoida paine-erolla mikä tiedetään jollakin toisella virtauksella. Koska paine-erosta saatava mittaussignaali on epälineaarinen, täytyy lineaarisointi tehdä paine-erolähtetimestä tai erillisellä muuntimella esimerkiksi DCS järjestelmässä. (Halttunen 2007, 87.)

Kun mittalaippa asennetaan putkilaippojen väliin, suositellaan käytettäväksi rengaskammiota mittalaipan yhteydessä. Sen rakenteensa ansiosta tulo- ja jättöpuolen paine-eroa mitataan keskiarvona (ks. kuvio 10), mikä lisää mittaustuloksen luotettavuutta. (Pihkala 2004, 70.)



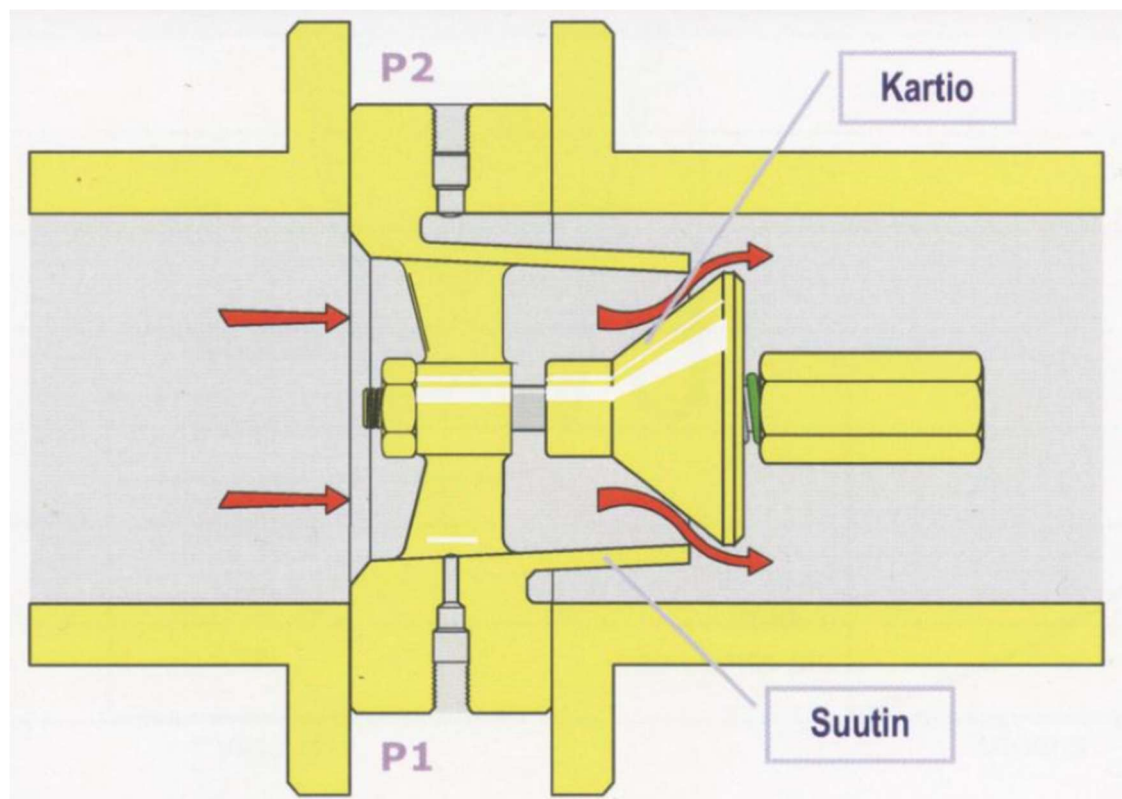
Kuvio 10. Rengaskammionmittalaipan poikkileikkaus (Pihkala 2004, 70.)

7.5.2 Muuttuva-aukkoinen virtausmittaus

Muuttuva-aukkoisella mittalaipalla saavutetaan laaja mittausalue ja tarkkuus säilyy hyvänä pitkään, mutta hankintakustannus kasvaa jyrkästi prosessiputken halkaisijan kasvaessa. Kartiomuodon ansiosta se oikaisee epäsymmetristä virtausprofiilia, eikä siihen synny likaa tai lauhdetta keräävää taskua (ks. kuvio 11). Virtausmuutosta havaitaan paine-eroa mittaamalla tai voima-anturilla. Paine-ero pysyy hyvin stabiilina

jolloin putken rauhoittumisetaisyydet voivat olla lyhyemmät. Joissakin sovelluksissa käytetään venymäliuska anturia ja PRT -anturia (Platinum Resistance Thermometer) virtausnopeuden muutoksen havainnointiin. (The Steam and Condensate Loop 2007, 4.3.11-13.)

Rotametri on yksinkertainen muuttuva-aukkoinen virtausmittari, missä pystysuuntaisessa kartioputkessa virtaava neste tai kaasu nostaa virtausta vastustavaa kapselia. Virtausnopeus voidaan lukea mitta-asteikolta kapselin pinnan korkeudelta rotametrin kyljestä. Vastaavasti voidaan käyttää magneettiin perustuvaa luentatapaa. (Mts. 4.3.8.)



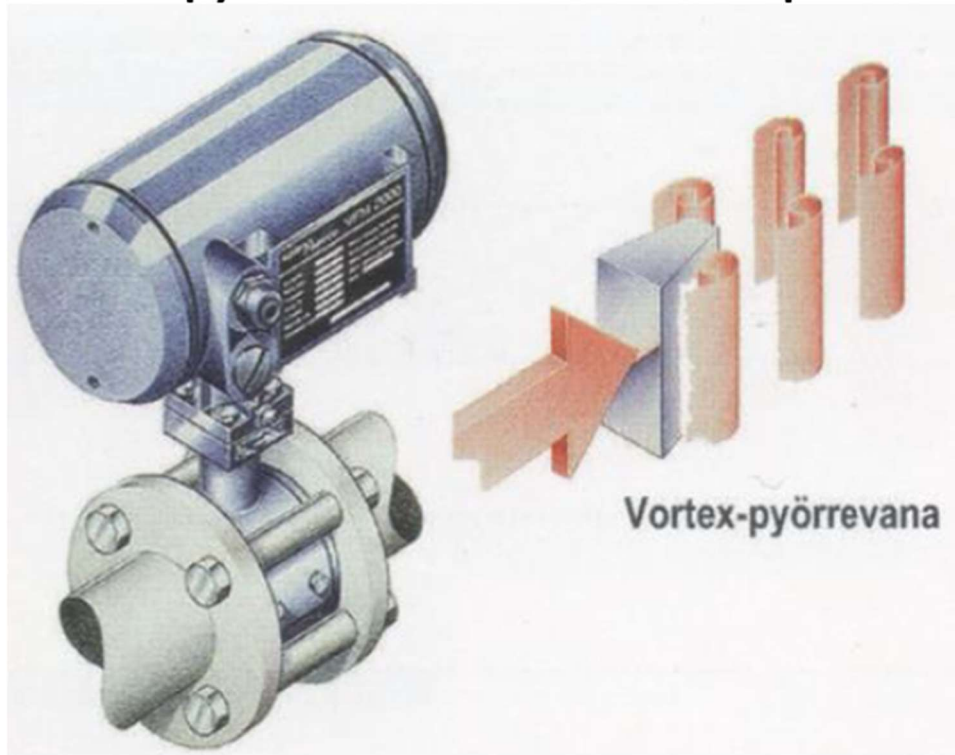
Kuvio 11. Muuttuva-aukkoinen virtausmittauksen poikkileikkaus (Höyry- ja lauhdejärjestelmäkoulutus n.d, 79.)

7.5.3 Vortex -mittaus

Pyörrevanamittarissa eli Vortex-mittauksessa luodaan virtaukseen este, joka synnyttää vuoron perään esteen molemmille puolille nk. Karmanin pyörteet, joiden esiintymistäajuus on verrannollinen virtausnopeuteen (ks. kuvio 12). Tämä on havaittavissa esimerkiksi lipputangossa liehuvassa lipussa. Virtausnopeudesta lasketaan putken

poikkipinnan mukaan tilavuusvirta, kun tiheys tiedetään lämpötilan ja paineen mittauksilla saadaan määritettyä massavirtaus. (Leskelä & Turunen 2012, 21.)

Vortex -pyörrevanamittarin toimintaperiaate



Kuvio 12. Pyörrevanamittauksen toimintaperiaate (Höyry- ja lauhdejärjestelmäkoulutus n.d, 82.)

Pyörrevanamittauksella saavutetaan parempi tarkkuus ja laajempi mittausalue kuin kuristuselin mittauksissa. Sopivasti muotoiltu virtauseste saa pyörteet irtoamaan vuorotellen esteen molemmin puolin (ks. kuvio 13). Pyörteitä ei synny pienillä virtausnopeuksilla. (Pihkala 2004, 78-79.)

Pyörteiden syntymistaajuus voidaan selvittää kaavalla 5.

$$f = \frac{Sr \cdot u}{d} \quad (5)$$

missä f = pyörteiden syntymistaajuus

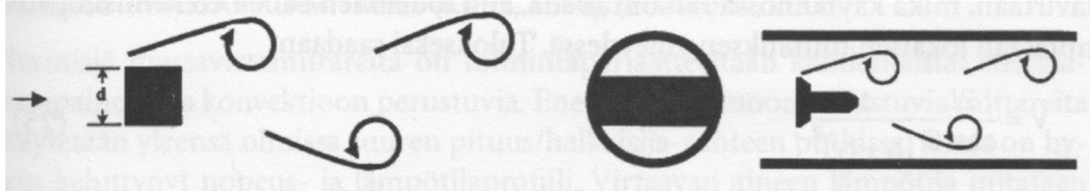
Sr = Strouhalin luku

u = virtausnopeus estekappaleen ohi

d = estekappaleen leveys

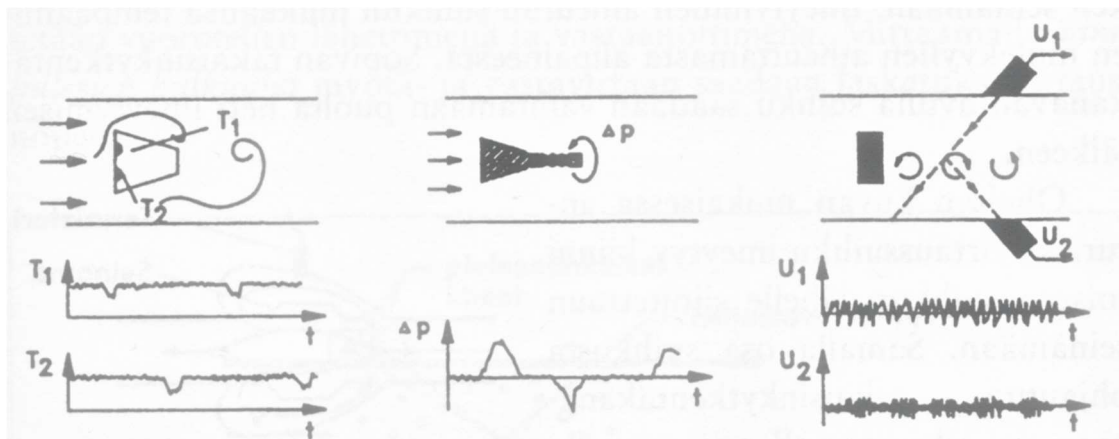
Strouhalin luku on riippuvainen Reynoldsin luvusta. Mikä puolestaan aiheuttaa turbulentsilla virtauksella mittausvirhettä. Siksi usein käytetään virtauksen oikaisijaa ennen mittausta. (The Steam and Condensate Loop 2007, 4.3.18.)

Von Karmanin pyörteet



Kuvio 13. Von Karmanin pyörteet avoimessa tilassa ja putkessa (Halttunen 2007, 93.)

Pyörretajuuden havainnointiin on kehitetty useita erityyppisiä antureita. Kuviossa 14 on esitetty termistoreilla havaittava lämpötilan muutos sekä pietsosähköinen virtausesteen paine-eroon perustuva menetelmä. Pyörretajuutta voidaan havainnoida myös virtausesteen jälkeen ultraäänimenetelmällä, mikä sopii tarkkuutensa ansiosta hyvinkin heikkojen pyörteiden havainnointiin pienillä virtausnopeuksilla. (Pihkala 2004, 79.)



Kuvio 14. Pyörrevana-anturin pyörteiden toteamistapoja (Pihkala 2004, 79.)

7.5.4 Pitot-putki

Pitot-putki mittaa tietyn pisteen virtausnopeutta. Sen toiminta perustuu staattisen- ja patopaineen välisen eron mittaamiseen. Pitot-putkea käytetään pääsääntöisesti virtaavien kaasujen mittaamiseen.

Virtausnopeus voidaan laskea yhtälöllä 6.

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (6)$$

missä v = virtausnopeus

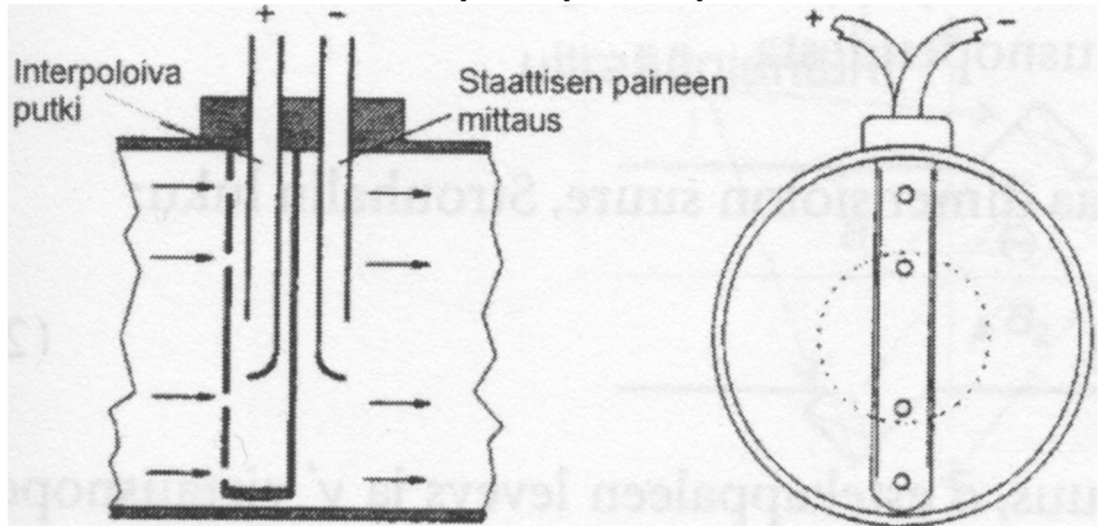
Δp = patopaineen ja staattisen paineen ero

ρ = virtaavan aineen tiheys

Virtaavan aineen keskimääräinen virtausnopeus saadaan usean mittapisteen keskiarvosta. Kuviossa 15 on esitetty usean mittapisteen interpoloitu pitot-putki. (Halttunen 2007, 91.)

Keskiarvottava pitot-putki mittaa kokonaispainetta optimoiduista kohdista interpoloidulla putkella prosessiaineen virtauksen poikkileikkauksesta ja staattista painetta jättopuolelta mahdollisimman stabiilista virtauksesta. Interpoloitavan putken muodolla ja rakenteella voidaan määrittää ns. anturikerroin. Anturin poikkipinnan ollessa ympyrän muotoinen on anturikerroin noin 0,6- 0,7 kun taas pisaran muotoisella anturilla se on 0,7- 0,8. (Mts. 92.)

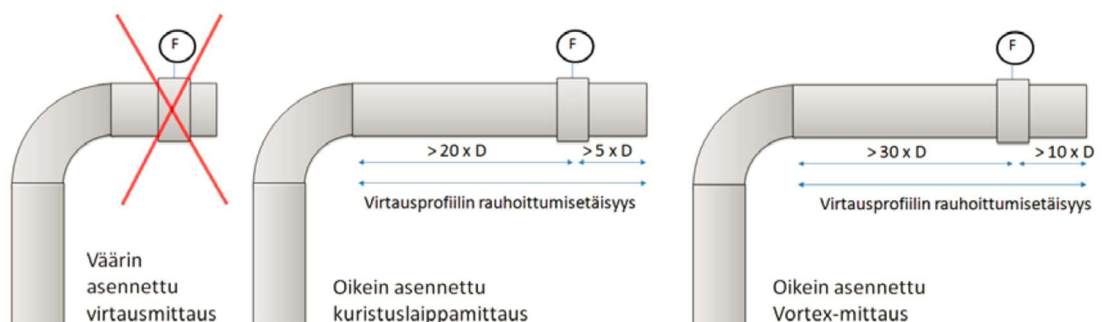
Keskiarvottavan pitot-putket poikkileikkaus



Kuvio 15. Interpoloivalla putkella mitataan kokonaispainetta optimoiduista kohdista (Halttunen 2007, 91, muokattu)

7.5.5 Virtausmittauksen sijoittaminen

Virtausmittauksia suunniteltaessa ja asennettaessa on huomioitava riittävä rauhoittumisetäisyys virtauksessa (ks. kuvio 16). Jos mittauspiste asennetaan liian turbulenteeseen virtaukseen, on todennäköistä, ettei kompensoinnilla voida mittausvirhettä riittävästi korjata. Höyryn virtausta mitattaessa olisi syytä poistaa höyryn kosteus esimerkiksi pisaranerottimella. Virtausmittauksen vaatimat putki supistukset on tehtävä epäkeskeisesti, jotta patoutuva lauhde ei aiheuta häiriötä mittaukseen. (Leskelä & Turunen 2012, 26.)



Kuvio 16. Vaadittava virtausprofiilin rauhoittumisetäisyys (Leskelä & Turunen 2012, 26.)

7.6 Paineen mittaus

Paineen mittaus on toiseksi yleisin teollisuuden mittauksista. Painemittausta käytetään myös esimerkiksi pinnankorkeuden, virtauksen ja tiheyden määrittelyyn. Paineen mittausperiaatteita on kolme, mitattavan paineen suhde tyhjiöön eli absoluuttiseen paineeseen tai ilmanpaineeseen sekä paine-ero valituissa pisteissä.

Paineen mittausmenetelmiä ovat muodonmuutokseen perustuvat palje, kapseli, kalvo ja Bourdon-putki. Lisäksi käytetään nestepaineen muutokseen ja painevaaitukseen perustuvia menetelmiä.

Painemittausta valittaessa on huomioitava mitattavan aineen ominaisuudet ja mahdolliset mittavirheitä aiheuttavat tekijät, kuten likaantuminen ja tukkeutuminen, poikkeama kalibrointilämpötilasta, hydrostaattinen paine, putkiston paineiskut ja mekaaninen värinä, dynaamisen paineen mittaus sekä mittari joka on kalibroitu staattisesti. (Leskelä & Turunen 2012, 29.)

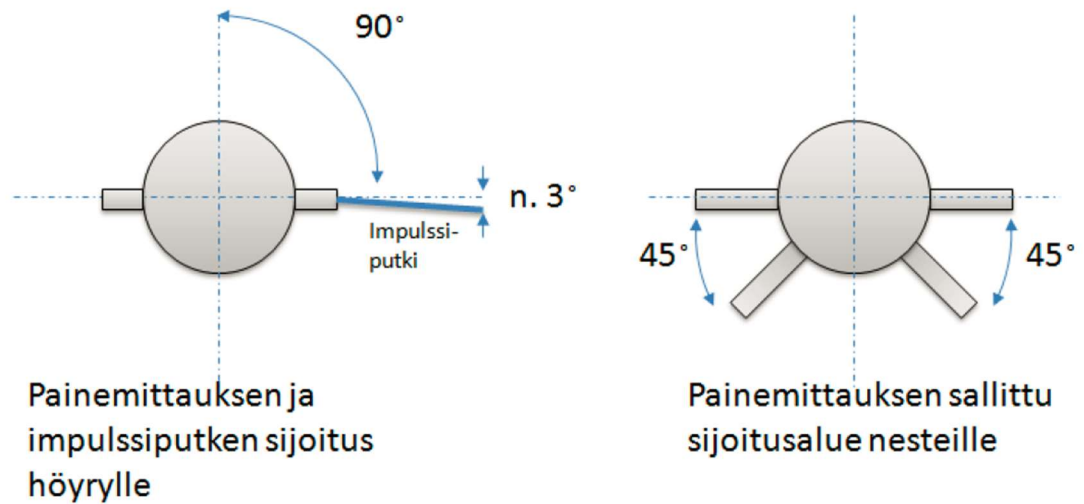
Pienestä paine-eron virheestä aiheutuu suuri mittausvirhe pienillä virtausmäärillä, koska virtaus on verrannollinen paine-eron neliöjuureen kaavan 7 mukaisesti.

$$v = \sqrt{\Delta p} \quad (7)$$

missä v = virtausnopeus

Δp = paine-ero

Mittausanturiin liitetään lähetin, jolla informaatio muunnetaan ja lähetetään järjestelmään sähköisessä muodossa, tyypillisesti milliampeeriviestinä (mA). Kuumaa höyryä mitattaessa painelähettimen anturin ja höyryn välissä käytetään impulssiputkea suojaamaan paineiskuilta ja korkeilta lämpötiloilta. Impulssiputki on suunniteltava niin että se on täynnä lauhdetta eikä siihen jää ilmataskuja (ks. kuvio 17). (Mts. 29.)



Kuvio 17. Suositeltava paineanturin tai impulssi-putken sijoitus tapa prosessiputkeen (Leskelä & Turunen 2012, 30.)

7.7 Johtokyvyn mittaaminen

Sähkönjohtavuus eli konduktiivisuus väliaineessa on verrannollinen elektrolyyttien määrään ja sen mineraalisisältöön. Johtokyky kuvaa väliaineen puhtautta. Johtokyvyn yksikkönä käytetään yleisesti $\mu\text{S}/\text{cm}$. Näytteen lämpötila vaikuttaa mittaus tulokseen. Siksi johtokyky ilmoitetaan yleensä 25°C :ssa ja jos mitataan muissa lämpötiloissa on huomioitava summatekijöiden korjauskerroin. Johtokyvyn mittaamiseen on useita erilaisia mittainstrumentteja tarjolla eri valmistajilla. Pääsääntöisesti kaikki on kuitenkin kalibroitava säännöllisesti kaliumkloridiliuoksella.

Johtokyky mittauksilla valvotaan kattilaveden laatua ja mineraalien sekä liuenneiden kaasujen määrää väliaineessa. Liuenneet kaasut lisäävät johtokykyä, mutta silikaatit ja orgaaninen aine ei näy johtokyvyssä. Höyry- ja lauhdejärjestelmien väliaineen laatua seurataan johtokykymittauksilla. Hydroksidin johtavuus on merkittävän korkea verrattuna muihin. Siksi hydroksidi-ionit neutraloidaan orgaanisilla hapoilla kuten gallushapolla, mikä toteutetaan annosnäytteenottona. (Manivasakam 2011, 508.)

8 Lauhdejärjestelmä

8.1 Lauhteen käsittely Kaipolan voimalaitoksella

Lauhdeverkkoon höyryn käyttökohteilta kerättävän lauhteen johtokyky on tyypillisesti 3 – 5 $\mu\text{S}/\text{cm}^3$. Lauhdeverkosta voimalaitokselle lauhdeveesisäiliöön 1 kerätty lauhde sekä omakäyttölauhde pumpataan Precoat-suodattimen tai patruunasuodattimen läpi syöttöveesisäiliöön. Patruunasuodatinta käytetään vain silloin kun Precoat-suodatinta elvytetään tai huolletaan. Precoat-suodatin on lankapatruunasuodatin, jossa on 134 kappaletta Solkafloc BW40 sellukuidulla päällystettyä polypropyleeni patruunaa. Näin päästään 0,5 mikrometrin suodatusasteeseen, 56 kg/s virtauksella, 130 °C käyttö lämpötilassa. Precoat-suodatin on elvytettävä 150 000 m³ välein.

Tavallisesti tehtaassa lauhtehäviön osuus on alle 30 %:a mutta paperikonelinjojen seisokkien aikana tyypillisesti lisäveden osuus kasvaa 2/3 syöttöveden määrästä. Tehtaassa lauhtehäviö on esitetty voimalaitoksen operointi kuvassa ja sen ylähälytysrajaksi on määritetty 30 %.

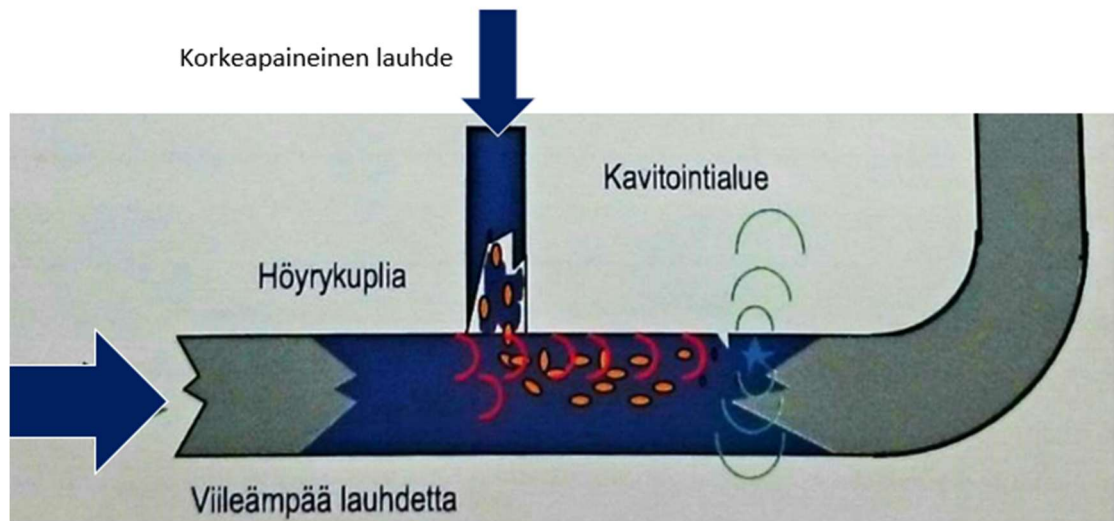
8.2 Lauhteenpoisto menetelmät ja lauhteenpoistimet

Lauhteenpoistimen tehtävä on poistaa kondensoitunut lauhde höyryverkossa samalla estäen höyryvuotoa. Poistaa ilmaa höyryjärjestelmästä pitäen lämmönsiirtimen lämpötilan sopivana, jolloin tehokas ja taloudellinen käyttö mahdollistuu. (The Steam and Condensate Loop 2007, 11.1.2-4.)

Lauhteenpoistimia voidaan valvoa antureiden ja erillisten analysointilaitteiden avulla jotka perustuvat lämpötila- ja ultraäänimittauksiin sekä konduktiivisuuteen. (Yleiskurssi. n.d, 79.)

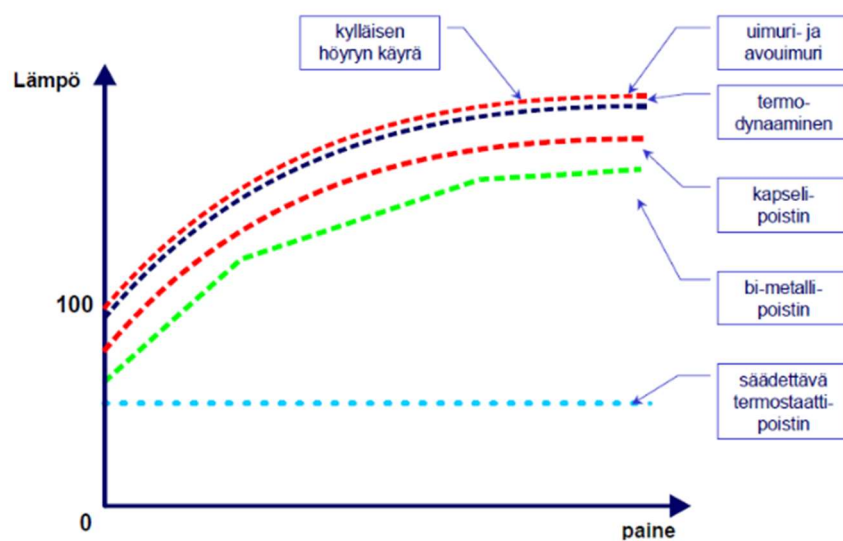
Lauhteenpalautusta ei suositella suoraan täyteen lauhtelinjaan, kavitointi-ilmiön välttämiseksi (ks. kuvio 18). Lauhdeputkea ei voida mitoittaa kuten vesiputkia. Lauhteenpalautuslinjan tulisi olla riittävän suureksi mitoitettu, jotta syntyvällä höyryllä on tilaa virrata. (The Steam and Condensate Loop 2007, 11.1.3.)

Kavitointi täydessä lauhdeputkessa



Kuvio 18. Kavitointialue kuvattuna, lauhteen palautus täyteen lauhdelinjaan (Höyry- ja lauhdejärjestelmäkoulutus n.d, 153)

Yleisimmät lauhteenpoistin tyypit ovat termodynaamiset, termiset ja mekaaniset lauhteenpoistimet (ks. kuvio 19). On olemassa myös suutin, istukkaventtiili, kuristuslevy -tyyppisiä lauhteenpoistimia mutta nämä eivät ole automaattisesti toimivia. (Yleiskurssi. n.d, 38.)

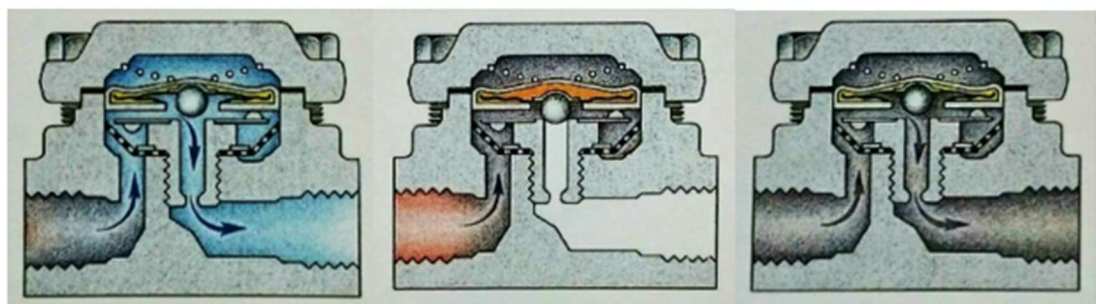


Kuvio 19. Lauhteenpoistinten poisto lämpötilat kylläisenhöyryn käyrään verrattuna paineen funktiona (Höyry- ja lauhdejärjestelmäkoulutus n.d, 121)

8.3 Termiset lauhteenpoistimet

Termiset lauhteenpoistimet avautuvat lauhteen jäähtyttyä 10 – 20 °C, siksi niitä ei saa eristää. Tämän tyyppisiä lauhteenpoistimia ovat kapseli- ja bi-metallilauhteenpoistimet (ks. kuvio 20). Termiset lauhteenpoistimet poistavat myös hyvin ilmaa ja toimivat takaiskuventtiileinä. Niillä on pieni ja kompakti rakenne, mutta suuri kapasiteetti. Ne kestävät hyvin vesi-iskuja sekä tulistusta. Yleisiä käyttökohteita ovat saatto-vesitykset ja autoklaavit. Niitä ei suositella käytettäväksi höyrypuolella säädettävien lämmönvaihtimien yhteydessä. (The Steam and Condensate Loop 2007, 11.2.4-6.)

Kapselin ollessa kylmä lauhde ja ilma pääset poistumaan. Kun kuumaa lauhdetta ja höyryä virtaa kapselilauhteenpoistimeen, kapselin terminen neste höyrystyy työntäen istukkaa ja venttiili sulkeutuu (ks. kuvio 20).



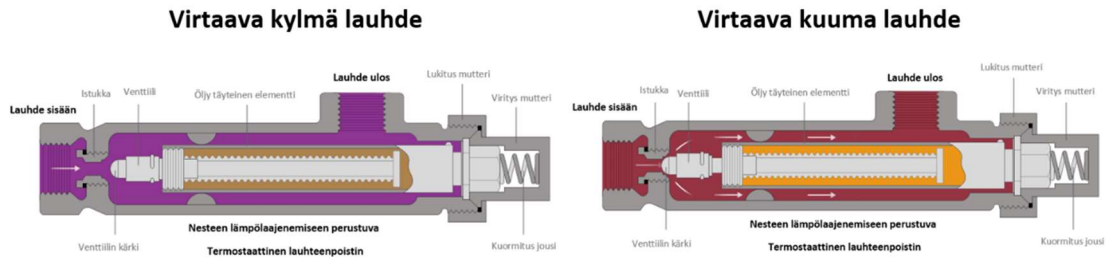
Käynnistys vaihe

Kapseli sulkeutuu

Lauhtuminen

Kuvio 20. Termisen kapselilauhteenpoistimen toimintaperiaate (Höyry- ja lauhdejärjestelmäkoulutus n.d, 133. muokattu)

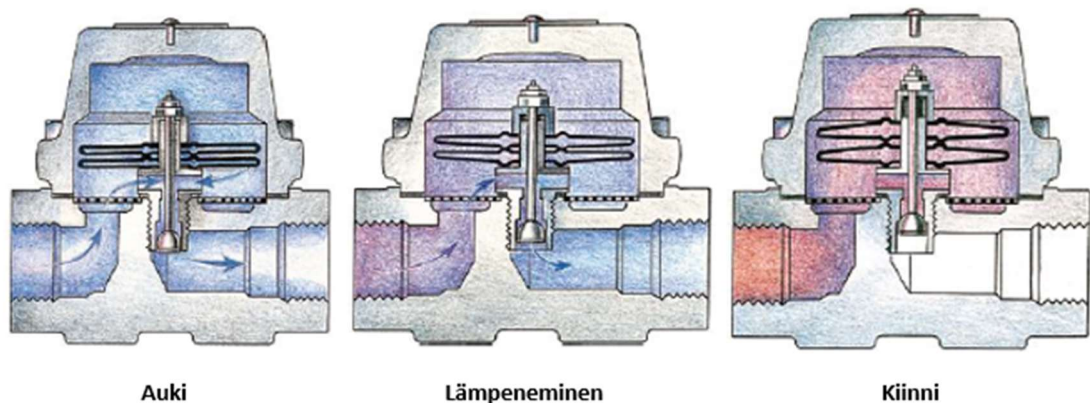
Säädettävä termostaattinen lauhteenpoistin sopii saattovesityksiin sekä suurteen lauhde ja ilma määrien poistoon pähöyrylinjasta käynnistys vaiheessa. Sen toimintalämpötila on 60 ja 100 °C välillä (ks. kuvio 21). (Thermostatic Steam Traps 2018.)



Kuvio 21. Säädetty termostaattinen lauhteenpoistin (Thermostatic Steam Traps 2018, muokattu)

Bi-metallilauhteenpoistin on vankka ja vesi-iskuja kestävä. Se poistaa myös ilmaa ja toimii takaiskuventtiilinä. Rajoittavana ominaisuutena se toimii erittäin hitaasti ja jäädyttää usein lauhdetta likaa. Ei sovellu höyrylinjan vesityksiin, lämmönsiirtimille, radiattoreille tai vastapaineiseen lauhdeputkeen, koska tämä lisää jäähdystystä. Sitä käytetään tyypillisesti saattovesityksissä. (The Steam and Condensate Loop 2007, 11.2.6-8.)

Kylmänä bi-metallipoistimen metallielementti on kasaan painuneena ja lauhde sekä ilma pääsee virtaamaan vapaasti. Kun kuumalauhde virtaa poistimen läpi bi-metallielementtipakka laajenee vetäen istukkaa kiinni. Kun lauhde on kylläisen höyryn rajalla, elementti sulkeutuu, kunnes lauhde jäähtyy ja höyryn paine avaa istukan, jolloin jakso toistuu uudelleen (ks. kuvio 22). (Mts. 11.2.6-8.)



Kuvio 22. Bi-metallilauhteenpoistimen toiminta periaate (Höyry- ja lauhdejärjestelmäkoulutus n.d, 136, muokattu)

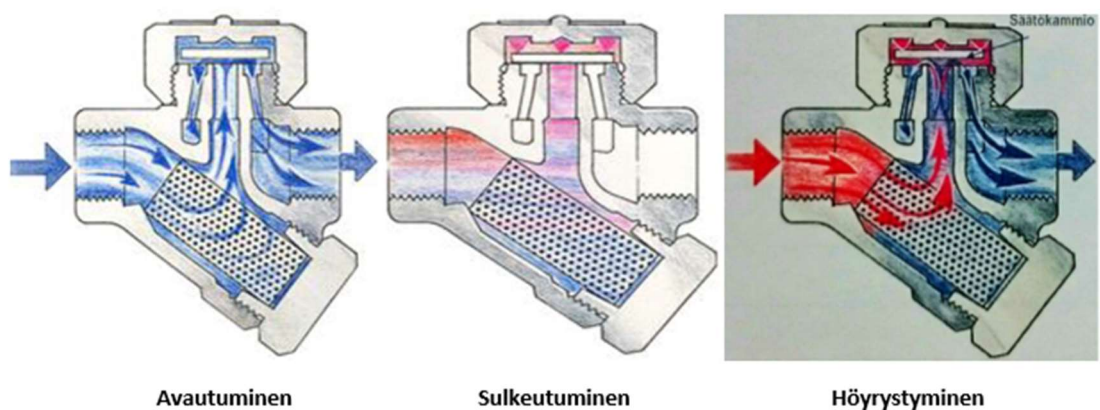
Termostaattiset suurteholauhteenpoistimet ovat kapselityyppisiä apuohjattuja lauhteenpoistimia, jotka ovat kehitetty suurien lauhdemäärien nopeaan poistoon. Poistimen pääventtiilin virtauksen ja höyryn läpipuhalluksen määrää voidaan säätää lauhteenpoistimen säätöruuveista.

Termiset lauhteenpoistimet eivät sovi lämmönsiirtimien lauhteenpoistoon pulssimaisen toiminnan vuoksi. Vaikka paine-eroa olisikin täytyy lauhteen alijäähtyä, kun poistin avautuu se poistaa suuren määrän lauhdetta aiheuttaen lämmönsiirtimeen termisiä rasituksia jaksottaista toimintaa sekä kavitointia. (The Steam and Condensate Loop 2007, 11.2.7.)

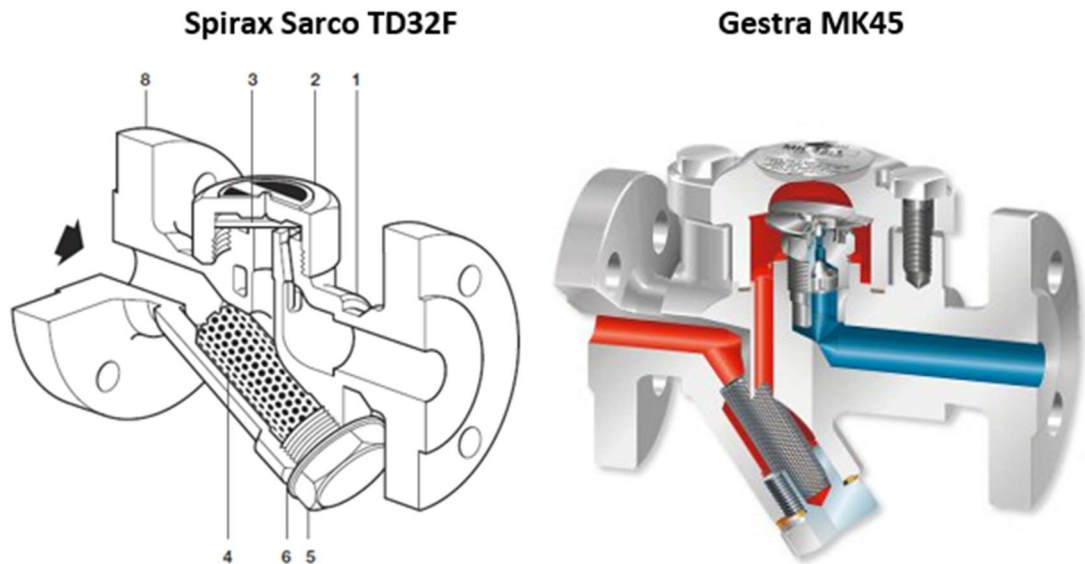
8.4 Termodynaamiset lauhteenpoistimet

Termodynaamisen lauhteenpoistimen toiminta perustuu lämpötilaan ja paine-eroon. Tyypillisesti toimivat nestefaasin ollessa alle 2 – 3 °C kylmän lauhteen. Niitä ei saa eristää. Käytetään linjavesitysten lauhteenpoistimena. Se kestää hyvin vesi-iskuja, tulitusta, korroosiota sekä se on rakenteeltaan yksinkertainen ja luja (ks. kuvio 24). Toimii myös ulkoasennuksissa eikä aiheuta höyryvuotoa. Ei sovellu alle 50 kPa:n höyrynpaineille, ja poistimen ylirajoitus aiheuttaa tiheän toiminnan sekä kulumista. (The Steam and Condensate Loop 2007, 11.4.2-3.)

Termodynaaminen poistin avautuu ja levy nousee, kun hönkähöyry lauhtuu ja paine laskee. Höyryn virratessa poistimeen virtausnopeus kasvaa, samanaikaisesti hönkähöyryn paine nousee kammiossa ja levy sulkeutuu (ks. kuvio 23). (Höyry- ja lauhdejärjestelmäkoulutus n.d, 130.)



Kuvio 23. Termodynaamisen lauhteenpoistimen toimintaperiaate (Höyry- ja lauhdejärjestelmäkoulutus n.d, 130. muokattu)



1. Runko 2. Kansi 3. Sulkulevy 4. Roskasihti 5. Korkki 6. Tiiviste 8. Kiinnitys laippa

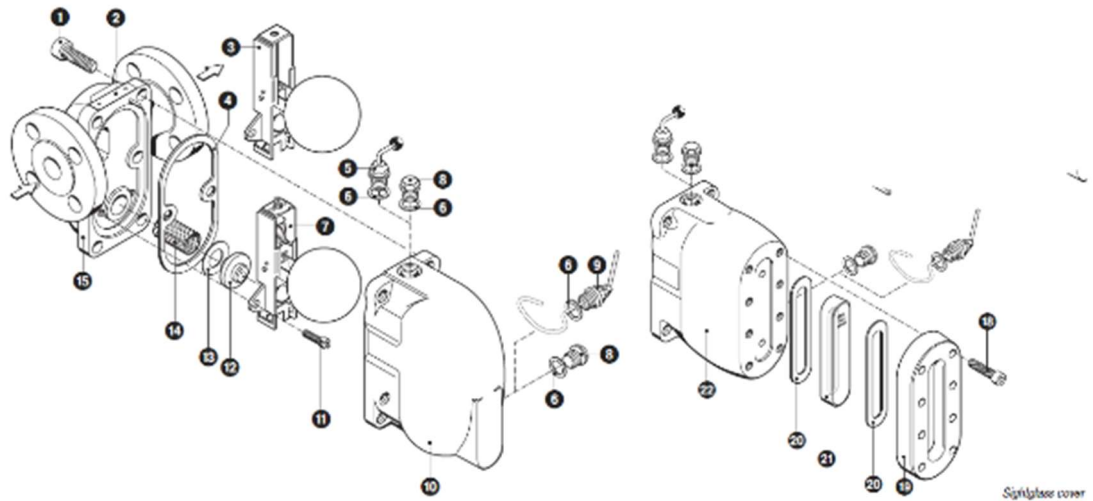
Kuvio 24. Termodynaamisen lauhteenpoistimen rakenne (TD32F Flanged Thermodynamic Steam Trap 2011; Thermostatic steam traps MK 45/45A)

8.5 Mekaaniset lauhteenpoistimet

Mekaaniset lauhteenpoistimet voidaan eristää, ja ne toimivat kylmän lauhteen lämpötilassa. Uimurilauhteenpoistin voi sisältää myös termostaattisen ilmanpoistimen. Uimurilauhteenpoistin toimii uimurin ja lauhteen tiheuserosta johtuvan nosteen vaikutuksesta. Se sopii suurille ja vaihteleville lauhdekuormille pienillä paine-eroilla, kuten lämmönsiirtimiin, höyrypattereihin ja höyryputken vesityksiin. Höyryn paine, lämpötila ja virtaus eivät vaikuta uimurilauhteenpoistimen toimintaan. Sen etuna on, ettei se jäähtyä lauhdetta ja sen elinikä on 2 – 5 kertaa pidempi kuin termostaattisen poistimen. Mutta vesi-iskut vaurioittavat poistimen mekanismia. (The Steam and Condensate Loop 2007, 11.3.2; Höyry- ja lauhdejärjestelmäkoulutus n.d, 120.)

Kaipolan tehtaalla kaikista lauhteenpoistimista noin 30 % on Gestran UNA-uimurilauhteenpoistimia (ks. kuvio 25). Voimalaitoksen alue käsittää noin kolmasosan UNA-mallin poistimista sekä PK6:n ja PK7:n alue valtaosan loppuista.

Gestra UNA 23h rakenne / näkölasi



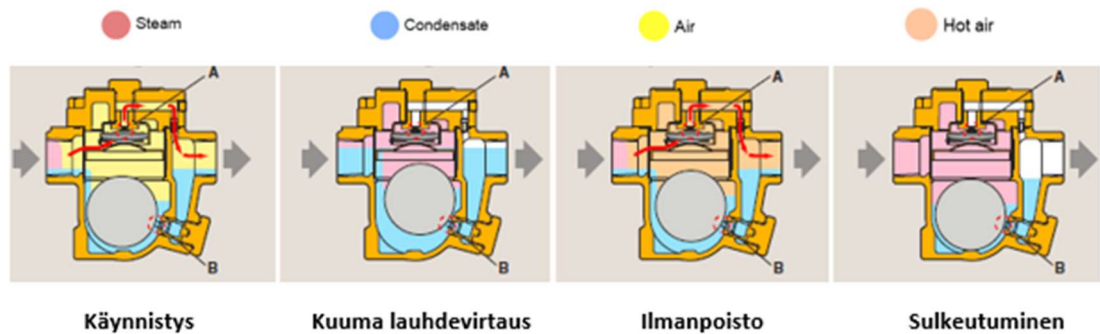
1. Pultti 2. Tyypikilpi 3. Toimielin (SIMPLEX) 4. Kansitiiviste 5. Ilmaventtiili 6. Tiiviste 7. Toimielin (DUPLEX) 8. Korkki 9. Manuaalinen avausvipu 10. Kansi 11. Kiinnityspultti 12. Sulkuaukko 13. Istukkativiste 14. Holkkisuodatin 15. Runko 19. Näkölasilaippa 20. Grafiittitiiviste 21. Näkölasi 22. Näkölasin kansi

Kuvio 25. UNA uimurilauhteenpoistimen rakenne (Gestra Steam Systems 2007, muokattu)

Lauhteenpoistimia valmistava TLV on suunnittelussaan minimoinut liikkuvien mekaniismien määrän, jolloin uimurilauhteenpoistimesta on saatu toimintavarmempi ja pitkäikäisempi. Se ei myöskään päästä höyryä lävitseen. JX -sarjassa on lauhteenpoistimeen lisätty automaattinen ilmanpoistin (ks. kuvio 26). (Free Float Steam Trap Series 2014, 3.)

TLV JX -series

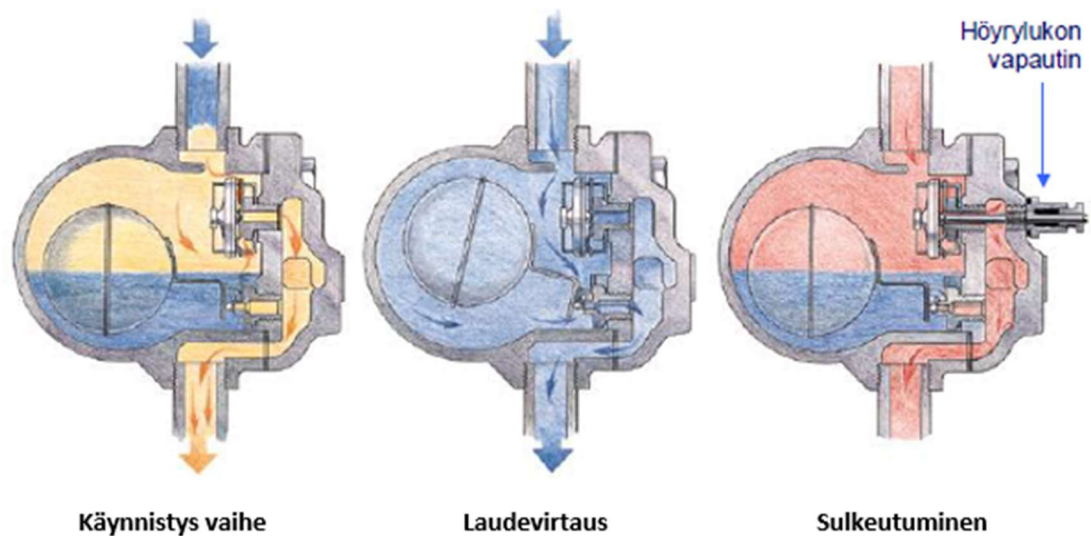
A = ilman virtausaukko (x-element / termostaattinen kapseli) B = lauhteen virtausaukko



Kuvio 26. TLV:n valmistama ilmanpoistimella varustettu vapaasti kelluvan uimurilauhteenpoistimen toimintaperiaate (Free Float Steam Trap Series 2014)

Käynnistysvaiheessa lauhteenpoistimen ollessa kylmä ilma ohittaa pääventtiilin. Kun lauhde virtaa poistimeen, uimuri avaa pääventtiilin. Kapseli-ilmanpoistin sulkeutuu lauhteen kuumentuessa. Lauhteenpoistimen pääventtiili sulkeutuu, kun uimuri laskeutuu pinnan korkeuden mukaan (ks. kuvio 27). (Höyry- ja lauhdejärjestelmäkoulutus n.d, 123.)

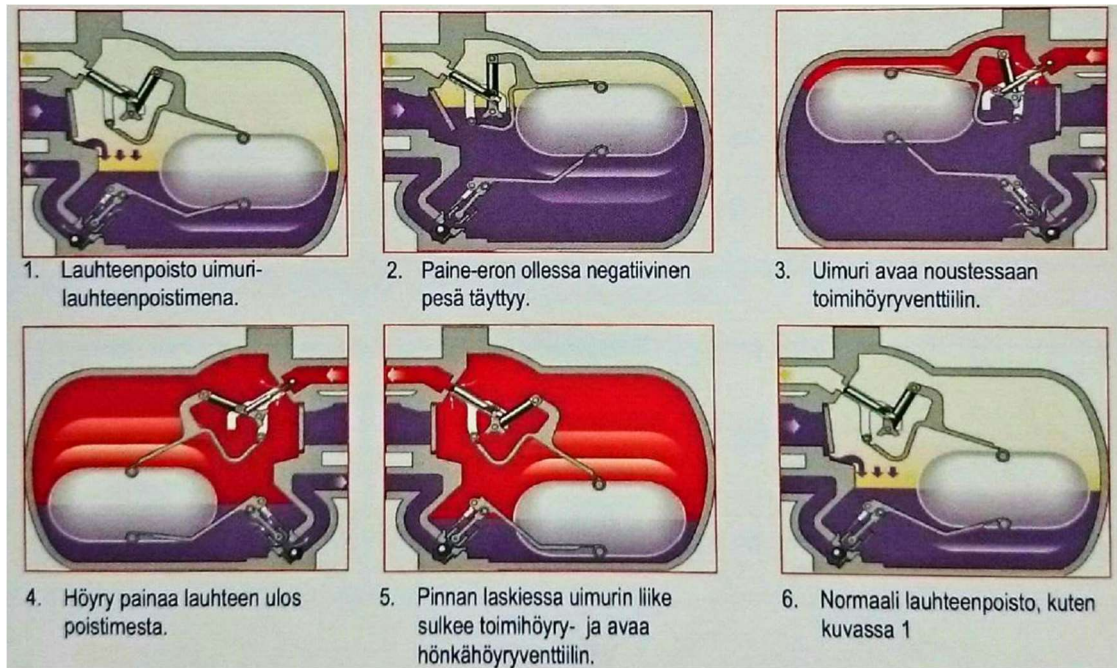
Spirax FT uimurilauhteenpoistimen toimintaperiaate



Kuvio 27. Spirax Sarcon FT -mallin ilmanpoistimella varustettu uimurilauhteenpoistimen toimintaperiaate (Höyry- ja lauhdejärjestelmäkoulutus n.d, 123)

Pumppulauhteenpoistinta käytetään, jos paine-ero on ajoittain nolla tai negatiivinen. Se on lauhteenpoistimen ja lauhdepumpun variaatio (ks. kuvio 28). Se on suunniteltu lämpötilasäätöisiin höyrysovelluksiin, esimerkiksi höyrylämmönsiirtimeen, joka toimii laajalla kuormitusalueella. Tällöin ehkäistään lämmönsiirtimen sakkaaminen. (Höyry- ja lauhdejärjestelmäkoulutus n.d, 142-144.)

Pumppavaa lauhteenpoistoa voidaan käyttää myös, kun lauhdetta joudutaan nostamaan. Tällöin on huomioitava riittävä eropaine lauhteen nostossa. Lauhteen nostossa ei synny vesi-iskuja. Lauhteen nostimissa on olemassa erityyppisiä ratkaisuja, kohteen mukaan. Lauhteen nostimissa käytetään tyypillisesti puskuhöyryä, jolla tehdään potentiaalienergian voittamiseksi tarvittava työ (ks. kuvio 29). (Yleiskurssi n.d, 67.)



Kuvio 28. Spirax Sarcon-pumppulauhteenpoistimen toimintaperiaate (Höyry- ja lauhdejärjestelmäkoulutus n.d, 143.)



Kuvio 29. Konwell FPS 14-lauhteennostimen rakenne ja läpäisymäärätaulukko (Yleiskurssi n.d, 71.)

8.6 Lauhteen palautuksen kehittäminen

Lauhteen sisältämä energia on arviolta 25 % höyryn energiasisällöstä. Polttoainekustannussäästö voi olla jopa 20 % kun lauhde palautetaan tehokkaasti. Hönkähöyryä syntyy, kun lauhteen paine laskee. Hönkähöyryn muodostuminen on määriteltävissä entalpian ja paine-eron mukaan. Energia on jakautuneena keskimäärin tasan lauhteen ja hönkähöyryyn. Hyödyntämällä hönkähöyryä voidaan parantaa hyötysuhdetta ja energiakustannuksissa säästää jopa 10 %.

Hönkähöyrysäiliö erottaa lauhteen hönkähöyrystä pienen virtausnopeuden ansiosta. Siksi virtausnopeuden pitäisi olla enintään 3 m/s. Tyypillisiä hönkähöyryn käyttökohteita ovat prosessin vesien ja ilman lämmitykset sekä kostutus. (Yleiskurssi n.d, 74-81.)

8.7 Esimerkkilaskelma hönkähöyrylle

Hönkähöyryn määrä määritellään lauhteen lämpötilan ja paineen entalpiamäärän mukaan. Tällöin syntyvän hönkähöyryn määrä prosentteina lasketaan kaavalla 8.

$$\text{Hönkähöyry \%} = \frac{(\text{Nestelämpö } P1 - \text{Nestelämpö } P2) * 100}{\text{Höyrystymislämpö } P2} \quad (8)$$

missä neste- ja höyrystymislämpö ovat entalpia-arvoja paineen mukaan.

Hönkähöyryn arvo voidaan määritellä seuraavan esimerkin mukaisesti. Jos lauhdemäärä on 500 kg/h ja vuotuinen käyntiaika 2000 h/v, hönkähöyryä muodostuu 14 %, 1 MPa:n höyrylinjan lauhteenpoistimesta kanaaliin. Seuraavan laskelman mukaisesti hönkähöyryn kuluiksi saadaan 4 200 euroa vuodessa, kun höyryn tuotanto arvo on 30 euroa/tonni. (Höyry- ja lauhdejärjestelmäkoulutus n.d, 159.)

$$\text{Hönkähöyryn arvo} = 0,5 \frac{t}{h} * 0,14 * 2000 \frac{h}{v} * 30 \frac{eur}{t} = 4\,200 \text{ e/v}$$

9 Tutkimustyön toteutus

Tutkimustyön selvitys jakaantui kolmeen pääkohtaan; höyry- ja lauhdeverkon kartoitus, lauhteen palautuksen katselmointi sekä PK6-konelinjan höyry- ja lauhdevirtausmittausten analysointi.

Kaipolan tehtaan höyry- ja lauhdeverkon tutkimustyö aloitettiin konelinjakohtaisilla tutustumiskierroksilla. Kierroksia ohjasi jokaisella konelinjalla käyttöpäällikkö. Tällä tavoin käyttöhenkilöstä tuli tutuksi ja lisättiin turvallisuutta tiedottamalla tutkimustyöstä käyttöhenkilökunnalle.

Höyry- ja lauhdelinjojen kartoitustyö käynnistyi voimalaitokselta. Aluksi perehdyttiin tehtaan höyrynpainetasoihin ja höyryverkkoon. Kun virtaus- ja PI-kaavioista sekä laitekartoista oli saatu riittävän hyvä käsitys tehtaan höyryjärjestelmästä, voitiin aloittaa höyryverkon kartoitus.

Virtausmittausten analysointiin käytettiin Energy Management System -järjestelmää (EMS), josta tehtiin päätelmiä mittaushistorian mukaan. EMS:n lisäksi käytettiin myös Wedge-järjestelmää ja operaattoreiden havaintoja mittausten luotettavuuden arvioinnissa.

10 Tulosten esittäminen ja havainnollistaminen

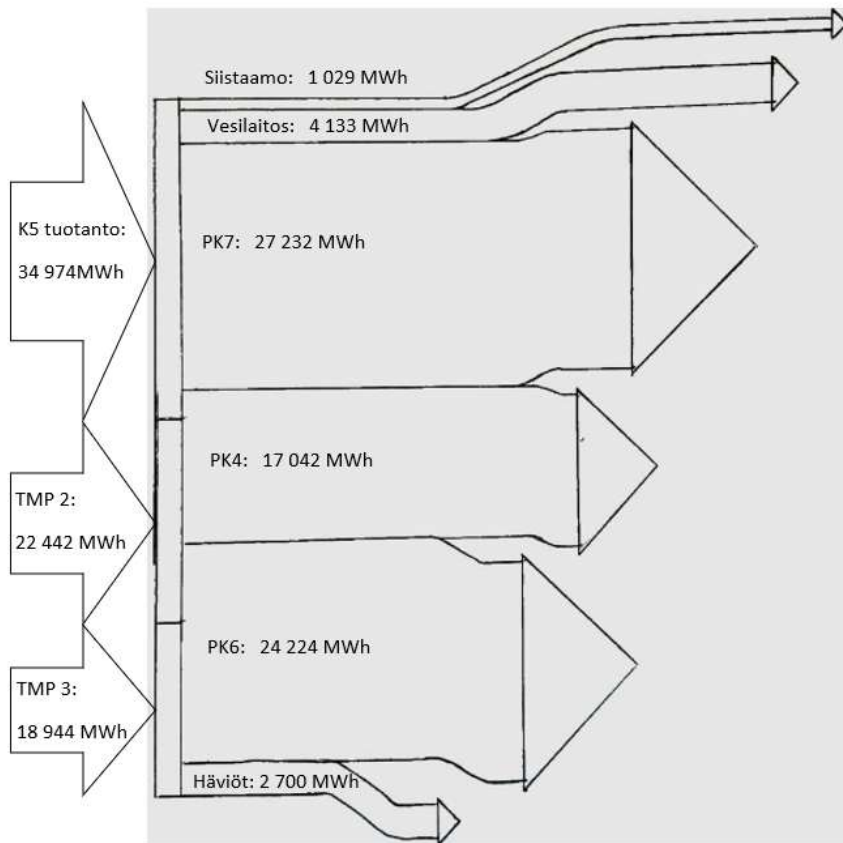
Aluksi tehtiin tehtaan suurimpien höyrynkulutuskohteiden aluekartoitus. Kartoitus eteni höyryverkosta kulutuskohteiden paikantamiseen. Niistä kulutuskohteissa, joissa havaittiin puutteita lauhteenkeräyksessä, tehtiin kartta, johon merkittiin höyry- ja lauhdelinjat sekä virtausmittaukset. Lisäksi paperikonelinjan 4 ja 6 sekä siistaamon ja vesilaitoksen laitekarttaan piirrettiin käsin höyry- ja lauhdelinjat. Osassa lauhteen palautuskohteista tehtiin myös mittauksia jatkotoimenpiteitä varten.

10.1 Tasealueen määrittely

Tutkimustyön yhtenä tavoitteena oli määrittellä käytettävät höyry- ja lauhdevirtausmittaukset kustannusalueittain. Tämän selvittämiseksi käytettiin höyry- ja lauhdeverkon virtauskaavioita. Lisäksi käytiin tarkistamassa paikan päällä mittauksen sijainti ja positio. Virtausmittauksista luotiin AutoCAD-suunnitteluohjelmalla maantieteellinen kartta (ks. liite 2), jossa on kuvattuna mittaukset kustannusalueittain sekä höyry- ja lauhdeverkon runkolinjat. Karttaan on lisätty mittauksia, joita suositellaan asennettavaksi, tasealueen lauhteenpalautuksen kehittämiseksi.

Tasealueista muodostettiin myös yksinkertaistettu virtauskaavio (ks. liite 3). Kaaviossa on havainnollistettu tuotantoalue, siirtoverkosto ja kulutuskohteet. Kaavioon on merkittynä ne mittaukset, jotka toimivat tasealueiden rajoilla. Näitä dokumentteja toimeksiantaja voi hyödyntää, kehitettäessä tehtaan höyry- ja lauhdeverkon tasealueita energiatehokkaampaan suuntaan.

Sankeyn-diagrammi tehtiin tehtaan suurimpien kulutuskohteiden mukaan (ks. kuvio 30). Siitä voidaan nähdä tehtaan suurimmat höyryn kulutuskohteet mutta tuotannon ja häviöiden osalta diagrammissa on merkittävää virhettä johtuen voimalaitokselta lähtevän HMP-höyrylinjan puuttuvasta mittauksesta. Siksi diagrammissa on käytetty K5 höyryntuotantoa mikä on selvästi vähemmän kuin HMP-päähöyrylinjan massavirtaus. Diagrammissa on oletettu mittauspisteiden entalpiat samanarvoisiksi.



Kuvio 30. Sankeyn-diagrammi, matalapaine höyryn tuotanto ja suurimmat kulutuskohteet tarkastelujakson aikana.

10.2 PK6-konelinjan tasemääritys

Tasemäärityä lähdettiin selvittämään, sillä oletuksella, että PK6:n alueelle tulevan päänhöyrylinjan mittauksessa on mittausvirhe. Lähtökohtaisesti oletamus perustui alueella työskentelevän asiantuntijan päätelmiin.

Tarkasteltava ajanjakso määräytyi saatavissa olevan mittaushistorian perusteella. EMS-järjestelmään tuotu data on muotoa kg/s. Mittausdatasta valittiin kuukauden jokaisen tunnin keskiarvo yhteen summattuna kuukauden ajalta. Tätä dataa voidaan käyttää mittausten keskinäiseen vertailuun ja kuukauden kokonaismassavirtausmäärä saadaan kertomalla sekuntien määrällä tunnissa.

PK6:n konelinjalla käytetään HMP- ja HVP-höyryä, jotka luonnollisesti tulevat omaa putkilinjaa käyttökohteeseen asti. HVP-höyryä käytetään pastakeittiössä tärkkelyksen

ja pastan valmistamiseen, joten HVP-höyrystä palautuva lauhde on käytännössä höyryverkossa tapahtuva lauhtuminen. Havaintojen mukaan kuitenkin kaikki HVP-verkon lauhteenpoistot on ohjattu kanaaliin.

HMP-höyryä käytetään pääasiassa paperikoneella mutta myös jälkikäsitelyssä. Jälkikäsitelyyn jakaantuu oma höyrylinja ennen PK6:n päähöyrymittausta. Jälkikäsitelyn höyrylinjassa on mittaus FIQ-6801. Mittauksen jälkeen höyrylinjasta haarautuu putkijoina mm. superkalantereille sekä lateksisäiliöiden 345441 ja 345442 lämmitykseen, CMC-säiliön 345457 lämmitykseen ja kaoliinin purkupaikalle. Nämä kohteet kuluttavat noin 1,5 % PK6:n konelinjan HMP-höyryn kokonaiskulutuksesta.

Päähöyrymittaus FIQ-6757 sijaitsee määränpään nostoluukun kohdalla konetasolla. Noin 9 metriä ennen mittauspistettä päähöyrylinjaan yhtyy TMP-2 LTO-höyrystimeltä tuleva HMP-linja ja tästä vielä noin 10 metrin päästä samaan päähöyrylinjaan yhtyy TMP-3 LTO-höyrystimeltä tuleva höyrylinja. Päähöyrylinja on halkaisijaltaan DN700. Päähöyrymittaus on toteutettu Rosemount Mass ProBar MBR+26S -mallisella, keskiarvottalla pitot-putkivirtausmittarilla. Mittaus sisältää monimuuttujälähettimen, joka on aseteltu 0 – 30 kg/s mittausalueelle.

Päähöyrymittauksen jälkeen höyrylinjasta haarautuu AHR-lämmönvaihtimille (FIQ-6758), viirakaivonlämmitykseen ja lämmönsiirtimiin (FIQ-6266) sekä kuivatusosalle (FIQ-6753). Kuivatusosan höyrymäärä on 80 %:a päähöyrymittauksesta. Massavirtausmittaukset päähöyrymittauksen jälkeen ovat toteutettu mittalaipalla ja Rosemount 1151 DP4 E22 paine-erolähettimellä.

PK6:n päälauhdesäiliöltä 365110 palautettavan lauhdelinjan mittaus sijaitsee päälauhdesäiliön yläpuolella konetasolla. Päälauhdesäiliön keskimääräinen pinnankorkeus on noin 3 metriä lauhdepumppua korkeammalla. Lauhdepumppu pumpkaa suoraan ylänousevaan linjaan, jossa on noin 6 metrin korkeudella kaksi peräkkäistä 45° kulmaa. Tämän ”shikaani mutkan” jälkeen noin 2 metriä korkeammalla on palautuvan lauhteen määrämittaus. Mittauksen jälkeen lauhdelinja nousee vielä noin 3 metriä ja kääntyy sitten vaakalinjaksi. Lauhdelinjan halkaisija on DN100. Lauhteen määrämittaus (FIQ-6791) on toteutettu Yokogawa YF110 Vortex -virtauslähettimellä.

Erityyppisiä höyryvirtausmittareita arvioitiin keskenään ja niistä valittiin liitteessä 1 esitettyjen kriteerien perusteella mittaus joka sopisi parhaiten PK6:n HMP-höyryn mittaamiseen (ks. liite 1).

10.3 PK4:n höyry- ja lauhdetase

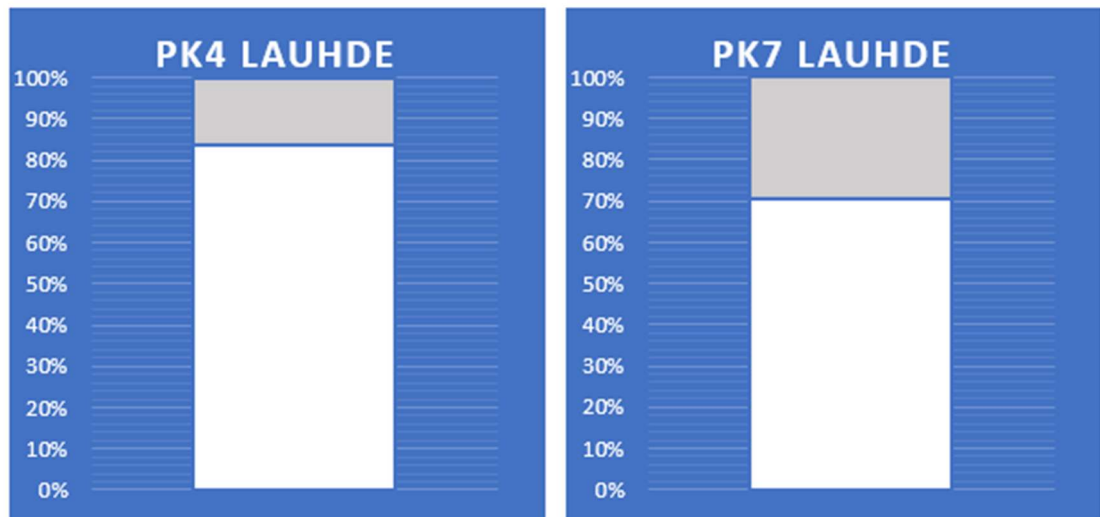
Päähöyrylinjasta pohjoiseen haarautuu kyyppikäytävällä HMP –höyrylinja PK4:n suuntaan. Tämä PK4:n päähöyrylinja jakaantuu vielä ennen PK4:n tulevan höyrymäärämittausta kahdeksi erilliseksi linjaksi. Toinen linja kulkee PK4-konelinjan kellaritasolla, missä sijaitsee myös PK4:n tulevan höyrymäärämittausta (FIQ-5201). Toinen haara kulkee telavaraston kellaritasolla. Tässä höyrylinjassa ei ole mittausta ja se syöttää PK4:n konosalin välikaton paineistuspuhaltimen lämmönvaihdinta 291142 ja salin ilmankostutinta 294615.

Edellä mainituista kohteista lauhde palautetaan kahta erillistä lauhdelinjaa pitkin kyyppi käytävälle, missä linjat yhdistyvät. Tämän jälkeen on PK4:n palautuvan lauhteenmäärämittausta ennen PK4:n päälauhdesäiliötä 295401. Välikaton lämmityksen lauhdesäiliön 295463 lauhdelinjaan on asennettu virtausmittaus (FT-8872) PK5 lauhdevirtaus, mutta tämä positio on otettu uudelleen käyttöön PK4 viirakaivon tuorehöyry virtausmittauksen rinnakkaispositiona.

Tällä hetkellä PK4:n palautuva lauhde on siis höyrymäärä vähennettynä häviöillä ja lisättynä välikaton lämmityksen lauhdesäiliön 295463 lauhteen määrällä. Tämä antaa virheellisen kuvan PK4:n lauhteenpalautus prosentista (ks. kuvio 31).

PK4:n lauhteenpalautusprosenttia verrattiin PK7:n lauhteenpalautukseen. PK7:n tasealuetta ei tämän tutkimustyön ohella käsitelty, koska alkuvaiheessa todettiin PK7:n mittausten olevan riittävän luotettavalla tasolla. Siksi PK7:n ja siistaamon yhteinen tasealue on käytännössä esitetty vain vertailukohtana.

PK7:n alueella on myös tehtaan uusimmat höyry- ja lauhdeverkon mittalaitteistot, joten voidaan sanoa, että päähöyrymittaukset ja lauhteenmäärä mittaus ovat luotettavimmalla tasolla. Siksi myös hyvä referenssikohde.



Valkoinen pilari kuvaa paperikoneelta palautuneen lauhteen määrää suhteessa höyrynmäärään.

Kuvio 31. PK4:n lauhteenpalautusprosentti PK7:n verrattuna.

10.4 Lauhteen palautuksen kehittäminen

Tutkimustyössä havaittiin lauhteen palautuksessa puutteita kaikilla alueilla. Näistä havainnoista kriittisimmiksi arvioitiin vuotava vesitysventtiili, tulviva lauhteen keräyssäiliö sekä toimimattomat lauhteen poistimet, joista aiheutui selkeä lauhdevirtaus kanaaliin. Kohteissa suoritettiin määrämittaukset, joiden tulokset kirjattiin mittauspöytäkirjaan. Mittauspöytäkirjat ovat liitteinä 5 – 8.

Mittaukset ovat suoritettu tilavuusvirtauksena. Laskelmissa on oletettu lauhteen tiheydeksi $1\ 000\ \text{kg} / \text{m}^3$. Todellisuudessa lauhteen tiheys vaihtelee mittausolosuhteissa $930 - 996\ \text{kg} / \text{m}^3$ välillä. Tämä vaihteluväli kuuluu kuitenkin arvioidun mittausvirheen sisään.

Laskelmissa käytetyt entalpia- ja entropia-arvot ovat Property tables and charts kokonaisuudesta. Nämä taulukot löytyvät liitteinä 11 – 13.

Voimalaitoksen lämmöntuotannon kustannus vaihtelee sähköntuotannon ja polttoaineen laadun mukaan. Seuraavissa laskelmissa on käytetty lämpöenergian kustannuksena 25 euroa / MWh, joka on saatu Motiva Oy:n käyttö- ja kunnossapitohenkilökunnan ohjeistuksesta. Voimalaitoksen lisäveden hintana käytettiin 0,3 euroa / m^3 . Prosessin käyttöajaksi on oletettu 365 vuorokautta vuodessa, mikä on todellisuudessa

vähemmän. Mikäli tarkka käyttöaika tiedetään, voidaan lopputulokset kertoa vuosittaisella prosentuaalisella osuudella.

Laskelmissa ei ole suoraan huomioitu tehtaan kemiallisveden lämmityksen kustannusta. Se kuitenkin osittain sisältyy lisäveden hintaan. Kemiallisveden valmistamiseen käytetyn raakaveden keskilämpötila on noin 10 °C:ta. KEMPU-vesi lämmitetään noin 15 °C:n lämpötilaan.

10.4.1 Hiertämö

TMP-3 laitoksen LTO-höyrystimellä tuotetun puhtaan höyryn lauhteenerotussäiliön 445444 lauhteenpoistin vuotaa kanaaliin. Tässä tapauksessa lauhteenerotussäiliötä käytetään LTO:ssa tuotetun kylläisen höyryn pisanerottimena. Lauhteenerotussäiliö sijaitsee konetasolla. Säiliön pohjasta on johdettu putkilinja kellariin, joissa on mekaaninen uimurilauhteenpoistin. Havaintojen perusteella uimurilauhteenpoistin toimii oikein ja poistaa lauhteenerotussäiliössä syntyneen lauhteen. Lauhdetta poistuu kuitenkin hyvin tiuhaan, joten poistoputken suulla virtaus vaikuttaa olevan tasainen.

Lauhteenpoistinta ei ole eristetty. Lauhteenpoistimen tulopuolen putken pintalämpötila oli 132 °C ja päästöpuolen tyhjennysputken lämpötila 115 °C jäähtymän ollessa 17 °C. Tyhjennysputken suuaukolla lauhteen lämpötila oli 99 °C, mikä kehitti hönkähöyryä.

TMP-3 tuotetun HMP-höyryn virtausmäärä lauhteenerotussäiliössä oli mittausajankohtana noin 8,6 kg/s ja höyrynpaine 255 kPa. TMP-laitosten LTO-höyrystimien keskimääräinen höyryntuotanto on noin 10 kg/s. LTO-höyrystimellä tuotetun HMP-höyryn johtokyky on tavallisesti 4,5 μS/cm. Pesusekvenssin aikana johtokyky hetkellisesti nousee muutamia yksiköitä korkeammaksi. Johtokyvyn ylähälytysrajaksi on määritetty 5 μS/cm.

Lauhteenerottimelta kanaaliin johdetusta lauhteesta tehtiin määrämittaus. Mittaus-tulos on arvio lauhteen määrästä. Tästä pitää kuitenkin laskea entalpia erolla syntyneen hönkähöyryn määrä ja lisätä se kokonaisvirtausmäärään.

$$\text{Hönkähöyry \%} = \frac{\Delta h_f}{h_{fg}} * 100 = \frac{(535,4 - 417,5) \frac{kJ}{kg}}{2257,5 \frac{kJ}{kg}} * 100 = 5,2 \%$$

Mittaustulokset on keskiarvotettu ja kerrottu tuotantoajalla, jolloin vuodessa lauhteenpoistimen läpi virranneen lauhteen määrä saadaan selville seuraavan laskelman mukaisesti.

$$\dot{m} = \frac{\left(\frac{3,7 + 4,7}{2}\right) \text{ kg/min} * 60 \text{ min} * 24 \text{ h} * 365 \text{ d}}{1\,000} = 2\,207,52 \text{ t/a}$$

Mitatun lauhteen määrään tulee lisätä vielä hönkähöyryksi muuttuneen lauhteen määrä, jolloin kokonaisvirtausmäärä saadaan seuraavan laskelman mukaisesti.

$$\dot{m}_{sum} = \frac{2\,207,52 \text{ t/a}}{(100 - 5,2)\%} = 2\,328,61 \text{ t/a}$$

Kun kokonaismassavirtaus tiedetään, voidaan hukatun energian määrä laskea massavirtauksen ja entalpian avulla seuraavan laskelman mukaisesti.

$$Q_{sum} = \frac{2\,207,52 \frac{\text{t}}{\text{a}} * 419,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 2\,328,61 \frac{\text{t}}{\text{a}} * 5,2\% * 2675,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{3600} = 347,1 \text{ MWh/a}$$

Hukatun energian kustannus saadaan selville, kun vuotuinen energia hukka kerrotaan energian hinnalla ja siihen lisätään menetetyn lauhteen määrä kerrottuna lisäveden arvolla.

$$\text{Kustannus} = 347,1 \frac{\text{MWh}}{\text{a}} * 25 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} + 2\,328,6 \frac{\text{t}}{\text{a}} * 0,3 \frac{\text{€}}{\text{t}} = 9\,376 \text{ €/a}$$

Eristys ei vaikuta uimurilauhteenpoistimen toimintaan. Eristämätön uimurilauhteenpoistin lämmittää tehdassalia ja on työturvallisuuteen vaikuttava tekijä. Kyseisen lauhteenpoistimen pintalämpötila oli 132 °C. Kun massavirtaus ja lauhteenpoistimen lämpötilaero tiedetään, voidaan laskea eristämättömän lauhteenpoistimen lämpöteho entropian avulla kaavan 9 mukaisesti.

$$\dot{Q} = S_{flin.} * \dot{m} * \Delta T \quad (9)$$

missä \dot{Q} = lämpöteho

\dot{m} = massavirtaus (kg/s)

ΔT = lämpötilaero

Keskiarvottamalla taulukosta saatavia arvoja, voidaan seuraavan laskelman mukaisesti selvittää 132 °C lauhteen entropia.

$$S_{f\text{lin.}} = \frac{1,656 + 1,474}{2} = 1,565 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * ^\circ\text{C}$$

missä $S_{f\text{lin.}}$ = lämpötilapisteistä lineaarisoitu entropia (keskiarvotettu)

Seuraavassa laskelmassa on selvitetty kaavan 9 mukaan lauteenpoistimen konesaliin tuotama lämpöteho.

$$\dot{Q} = 1,565 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * ^\circ\text{C} * \frac{4,2 \text{ kg/min}}{60 \text{ s}} * (132 - 115)^\circ\text{C} = 1,86 \text{ kW}$$

Teho saadaan muutettua vuotuseksi hukatuksi energiamääräksi kertomalla tulos tuotantoajalla, joka tässä tapauksessa on 356 päivää vuodessa.

$$Q = 1,86 \text{ kW} * 24 \text{ h} * 365 \text{ d} = 16,3 \text{ MWh/a}$$

Energiamäärästä voidaan laskea vuotuinen lauhteenpoistimen eristämättömyydestä aiheutuva kustannus.

$$\text{Kustannus} = 16,3 \frac{\text{MWh}}{\text{a}} * 25 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} = 407 \text{ €/a}$$

10.4.2 Vesilaitos

Vesitysventtiilivuoto havaittiin vesilaitoksella lauhdesäiliöön 655408 johdetussa lauhdelinjassa kemiallisen veden lämmönsiirtimeltä 654704. Vesitysventtiili on asennettu niin että putkiston tärinästä johtuen venttiili avautuu täysin auki. Lauhdevirtaus on johdettu kellarin lattialle. Mittausajankohtana vesitysventtiilin läpi virtausta oli lähes 600 l/h. Kellarin lattiaan on muodostunut reikä, johon kaikki lauhdevesi imeytyy (ks. kuvio 32).



Kuvio 32. Seuraus vesilaitoksen vuotavasta vesitysventtiilistä

Voidaan siis päätellä, että vesitysventtiilin on ollut auki jo pidemmän aikaa ja lauhdevirtaus on kaivertanut tunnelin kellarin lattian alle. Määrämittauksen jälkeen vesitysventtiili suljettiin ja lukittiin niin että venttiilin kahva on täysin kiinni. Venttiili jäi kuitenkin vuotamaan vielä 50 l/h. Alueella työskentelevät henkilöt olivat tietoisia lauhdevuodosta ja siitä ettei vesitysventtiili pysy kiinni ilman kahvan lukitusta. Tämä toimintamalli voi olla myös seurausta siitä, että vesilaitoksen lauhdejärjestelmä ei toimi suunnitellusti jostakin muusta syystä.

Lauhdesäiliön pinta alkoi nousemaan, kun vesitysventtiili suljettiin. Pinnan nousun ansiosta myös lauhdepumppu käynnistyi ja järjestelmän todettiin toimivan oikein. Lauhdepumppu pumppaa vesilaitoksen lauhdesäiliöstä lauhteen PK4:n päälauhdesäiliöön 295401. Tälle välille ei ole asennettu mittausta, jolla määriteltäisiin vesilaitokselta palautettavan lauhteen määrää.

Vuotavasta vesitysventtiilistä tehtiin lauhteenmittauspöytäkirja, johon kirjattiin, paljonko lauhdetta vuotaa hukkaan. Seuraavat laskelmat ovat tehty lauhteenmittauspöytäkirjan tulosten mukaan. Seuraavat laskelmat on toteutettu vastaavasti kuin aikaisemmat laskelmat.

$$\dot{m} = \frac{9,75 \text{ kg/min} * 60 \text{ min} * 24 \text{ h} * 365 \text{ d}}{1000} = 5\,124,6 \text{ t/a}$$

$$Q_{sum} = \frac{5\,124,6 \frac{t}{a} * (175,9 - 63) \frac{kJ}{kg}}{3600} = 160,7 \text{ MWh/a}$$

missä Q_{sum} = kokonaisenergia (MWh / vuosi)

kJ/kg = entalpiaero lämpötilan mukaan (42/15 °C)

15 °C vertailukohta tulee kemialliseneden keskimääräisestä lämpötilasta.

Kulutetun lämpöenergian ja hukatun lauhdeveden mukaan voidaan laskea vuosittainen kustannus arvio.

$$Kustannus = 160,7 \frac{\text{MWh}}{a} * 25 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} + 5\,124,6 \frac{t}{a} * 0,3 \text{ €/t} = 5\,555 \text{ €/a}$$

10.4.3 Siistaamo

Siistaamon lauhteen pumppaussäiliön 145466 ylivuoto tulvi kanaaliin mittaushetkellä noin 82 l/h. Pumppaussäiliön lauhdepumppu 145299 on paikallishjattu automaattille pumppaussäiliön viereisestä valintakytkimestä. Omien havaintojeni perusteella lauhdepumppu tai ohjausjärjestelmä ei ole toimintakuntoinen ja tästä johtuen pumppaussäiliöön kerätty lauhde menee ylivuodon vuoksi kanaaliin. Lauhdepumpun on tarkoitus pumpata pumppaussäiliöön kerätty lauhde PK7:n päälauhdesäiliöön 115105. Lauhdepumpun 145299 käytitietoa tai ohjausta ei ole tuotu automaatiojärjestelmään, joten se on itsenäisesti pintakytkimen 145299.81 mukaan toimiva järjestelmä. Siistaamon palautuvan lauhteen määrää ei mitata.

Vuodenaikaan nähden mittausajankohta on sellainen, että tehdastilojen höyrylämmityspatterit ovat olleet käytössä, mutta lämmitystarve on ollut vähäistä. Ulkoilman lämpötila on mittausajankohtana ollut noin 5 – 10 °C. Lämmityskaudella ylivuodon tulviminen on todennäköisesti suurempaa ja kesäaikaan vähäistä. Mittausajankohdasta saatu virtaus kuvastaa hyvin todennäköisesti vuoden keskiarvoista virtausmäärää.

Siistaamon operaattoreilta kysyttäessä he eivät olleet tietoisia lauhteen pumppaussäiliön toiminnasta tai sijainnista. On hyvin mahdollista, että itsenäisesti erillään toimiva järjestelmä, josta ei tule operaattoreille minkäänlaista indikaatiota, saattaa olla

pitkiäkin aikoja vikaantuneena. Pumppaussäiliön ylivuodon tulvimisesta tehtyjen mitausten mukaan on laskettu kustannusarvio.

$$\dot{m} = \frac{1,37 \text{ kg/min} * 60 \text{ min} * 24 \text{ h} * 365 \text{ d}}{1000} = 720 \text{ t/a}$$

$$Q_{sum} = \frac{720 \frac{\text{t}}{\text{a}} * (242,8 - 63) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{3600} = 36 \text{ MWh/a}$$

$$Kustannus = 36 \frac{\text{MWh}}{\text{a}} * 25 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} + 720 \frac{\text{t}}{\text{a}} * 0,3 \frac{\text{€}}{\text{t}} = 1\,116 \text{ €/a}$$

10.4.4 PK6:n kaoliinitunnelin lauhteenpoistin

Kaoliini tuodaan tehtaalle junalla. Talviaikaan kovilla pakkasilla bulkkivaunuun muodostuneita pakkautumia hajotetaan ja sulatetaan höyryllä. Kaoliininpurkauspaikalle on rakennettu HMP-höyrylinja. Linja kulkee kaoliinin siirtotunnelissa, missä on myös lauhtenerotus. Termodynaaminen lauhteenpoistin vuotaa höyryä läpi. PK6:n operaattoreiden mukaan kaoliinitunnelissa käydään muutamia kertoja vuodessa. He olivat tietoisia lauhteenpoistimen vuodosta ja muistelivat sen vuotaneen ainakin viimeiset neljä vuotta. Höyrylinja kaoliinin purkupaikalle haarautuu jälkikäsitteilyn höyrylinjasta.

Lauhteenpoistimen haarassa on sulkuventtiili. Venttiili oli mittausajankohta puoliksi auki. Seuraavissa laskelmissa on esitetty vuotavan lauhteenpoistimen hukattu lauhdemäärä ja siitä muodostuvan hönkähöyryn määrä sekä tästä aiheutuva vuotuinen kustannus.

$$\text{Hönkähöyry \%} = \frac{\Delta h_f}{h_{fg}} * 100 = \frac{(535,4 - 417,5) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{2\,257,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} * 100 = 5,2 \%$$

$$\dot{m} = \frac{0,3 \text{ kg/min} * 60 \text{ min} * 24 \text{ h} * 365 \text{ d}}{1000} = 157,68 \text{ t/a}$$

$$\dot{m}_{sum} = \frac{157,68 \text{ t/a}}{(100 - 5,2) \%} = 166,33 \text{ t/a}$$

$$Q_{sum} = \frac{157,68 \frac{\text{t}}{\text{a}} * 419,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 166,33 \frac{\text{t}}{\text{a}} * 5,2\% * 2\,675,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{3\,600} = 24,8 \text{ MWh/a}$$

$$Kustannus = 24,8 \frac{\text{MWh}}{\text{a}} * 25 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} + 166,33 \frac{\text{t}}{\text{a}} * 0,3 \text{ €/t} = 670 \text{ €/a}$$

10.4.5 PK4:n lauhteenpalautus

Verkostokartoituksen ohessa havaittiin konelinjan käyttöpuolella kellarissa merkittävää hönkähöyrystä syntyvää lämpökuormaa. Useiden höyrylinjan vesitysten havaittiin olevan auki, johtuen todennäköisesti epäkuntoisista lauhteenpoistimista. Hönkähöyryä syntyy, kun kuumaa lauhdetta ajetaan prosessikanaaliin.

Lauhteenpoistimien soveltuvuus käyttökohteessa tulisi tarkastaa ja lauhteenpoistimet pitäisi huoltaa. Lauhde tulisi ohjata lauhdesäiliöihin. Kyseisellä käytävällä sijaitsee myös koneenlauhdesäiliöt, jolloin välttyttäisiin pitkiltä putkilinjoilta.

10.4.6 Lauhteenpoistimien huolto

Lauhteenpoistimien kunnossapidosta vastanneen henkilön haastattelussa selvisi että, vuonna 2015 kesäkuussa Kaipolan tehtaalla on suoritettu laaja, noin 150 lauhteenpoistimen mittaus lauhteenpoistimia valmistavan ja maahantuovan Spirax Oy:n toimesta. Lauhteenpoistinmittaustyö kohdistui höyryn käyttäjiin tehdasalueella. Selvityksessä tarkasteltiin vuotaako lauhteenpoistin, onko se tukkeutunut tai väärin asennettu. Selvityksen yhteydessä on koostettu käyttökohteittain raportti. Siinä määritellään lauhteenpoistimien kunto ja suositellut toimenpiteet.

Selvityksestä jatkotoimenpiteinä on tehty tarjous vikaantuneiden kohteiden kunnostamiseksi. Tuolloin myös tehtaan henkilöstöä oli mukana positioimassa ja valokuvamassa lauhteenpoistimia. Työn tuloksena syntyivät konelinjakohtaiset Excel-raportit, jotka toimivat pohjana lauhteenpoistimien ennakkohuoltokierrokselle.

Raportista selviää lauhteen poistimenpositio, kuvaus poistimen käyttökohteesta ja sijainnista, valmistaja, malli, tyyppi, poistimen kiinnitys ja putkiyhde sekä merkintä poistimen sopivuudesta käyttökohteessa ja tehdyistä toimenpiteistä.

Lauhteenpoistimien kuntoa arvioitaessa tarkastuskierrosraporteista koostettiin taulukko, johon kerättiin tehtaan lauhteenpoistimien tarkastuspäivämäärät alueittain ja epäkuntoisten lauhteenpoistimien osuus (ks. taulukko 4).

Taulukko 4. Lauhteenpoistimien kunnossapitoraporteista koostettu tilanne 5. marraskuuta 2018.

Alue	Viimeksi tarkastettu	yht.	Kunnossa	Epäkunnossa	Epäkuntoisten osuus
Voimalaitos	7. helmikuuta 2018	100	95	5	5 %
PK4	5. huhtikuuta 2017	47	39	8	17 %
PK6	29. kesäkuuta 2018	30	18	12	40 %
PK7	5. huhtikuuta 2017	24	22	2	8 %
Siistaamo	7. huhtikuuta 2017	11	9	2	18 %
Vesilaitos	16. huhtikuuta 2017	11	10	1	9 %
Hiertämö	16. huhtikuuta 2017	10	8	2	20 %
Kuorimo	16. huhtikuuta 2017	17	17	0	0 %
Kaikkien alueiden lauhteenpoistimet yht.		263	231	32	5 %

Lauhteenpoistimien tarkastuskierrosraporttia päivitetään noin kerran vuodessa tarkastuskierroksen yhteydessä. Tarkastuskierrosta konelinjoilla tekee opastettu mekaanisen kunnossapidon asentaja. Mekaaninen kunnossapito vaihtaa tarvittaessa toimimattoman lauhteenpoistimen, edellyttäen, että lauhteen poistimesta on tehty vikailmoitus järjestelmään. Työtä valvoo ja organisoii mekaanisen kunnossapidon toimihenkilöt. Tehtaalla on noin 250 lauhteenpoistinta, joista 100 kuuluu voimalaitoksen kunnossapito-organisaation vuosittaisen tarkastuksen ja huollon piiriin.

Lisäksi konelinjojen operaattoreilla on vastuu raportoida kunnossapitojärjestelmään havaitsemansa toimimaton lauhteenpoistin.

10.4.7 Väliaikaisvarastoitujen lauhteen poistimien tuominen järjestelmään

Jämsänkosken voimalaitoksella on väliaikaisvarastoitu vanhan PK5-paperikonelinjan poistettuja lauhteenpoistimia. Lähes kaikki lauhteenpoistimet ovat UNA-

uimurilauhteenpoistimia, joita Kaipolan tehtaalla suurimmaksi osaksi on asennettuina. Näille komponenteille tulisi tehdä varastopaikka. Kun lauhteenpoistimet ovat kunnossapidonohjausjärjestelmässä, kynnys toimimattoman lauhteenpoistimen vaihtamiseen madaltuu, kun tuote on heti saatavissa varastossa. Tällöin voidaan hyödyntää resurssitehokkaasti toimintakuntoisia ja huollettuja lauhteenpoistimia.

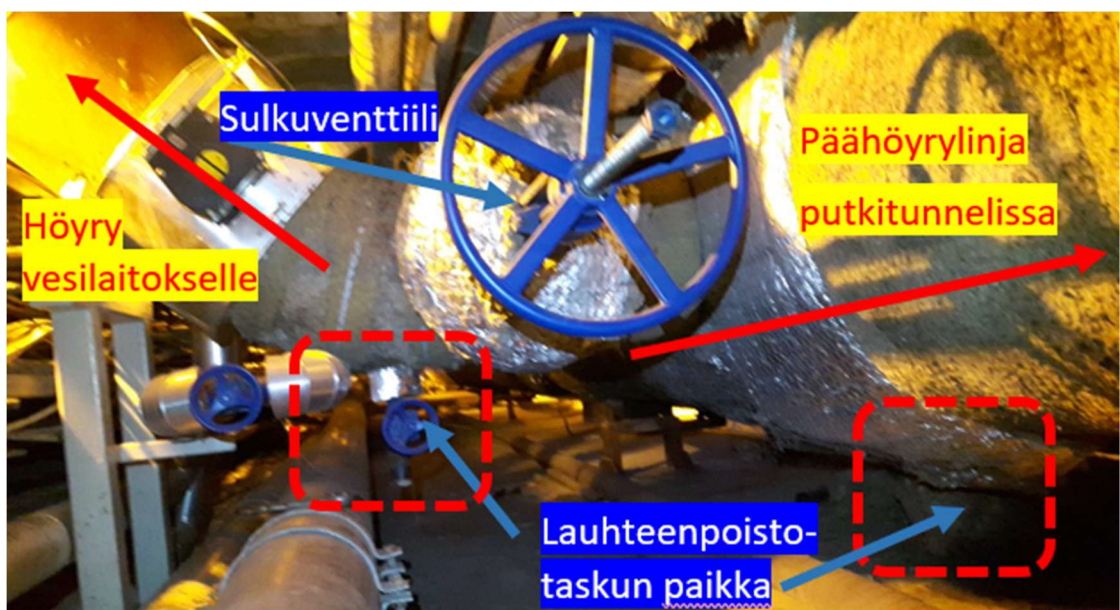
Tuotannon mekaanisen kunnossapidon omaavalla henkilöllä on myös motivaatiota ja halua ylläpitää lauhteenpoistimien huoltotyötä. Tämän resurssi on hyvä ottaa huomioon tehtäessä päätöksiä lauhteenpoistimien kunnossapitosuunnitelmaa luodessa. Lauhteenpoistimien huoltoa voidaan esimerkiksi suorittaa tuotannon työn ohessa. Lauhteenpoistimen tukkeutumisesta tai likaisuudesta johtuva toimimattomuus ei aiheuttaisi isoja investointeja, koska lauhteenpoistimet voitaisiin erillisessä huoltotilassa kunnostaa ultraäänipesurilla ja tämän jälkeen varastoida. Tällöin yhden lauhteen poistimen kunnostustyö ei välttämättä ottaisi työresurssia enempää kuin uuden hankinta.

10.4.8 Vesitys päähöyrylinjaan

Höyryverkon kartoituksen yhteydessä havaittiin, että vesilaitokselle haarautuva höyrylinja nousee päähöyrylinjan kyljestä ulos, noin 10 metrin pystysuoran osuuden (ks. kuvio 33). Tämän haaran yhteyteen ei ole toteutettu lauhteenerotusta (ks. kuvio 34). Mikä aiheuttaa väistämättä sen, että pystysuoralla osuudella muodostuva lauhde valuu päähöyrylinjaan. Haarasta seuraava vesityspiste on noin 30 metrin päässä päähöyrylinjassa. Muodostunut lauhde vähentää virtaavan höyryn tilavuutta, jolloin höyry nopeus kasvaa samalla nostaen lauhteeseen huippuja. Tietyissä olosuhteissa tästä voi seurata vesi-iskuja. Vesilaitoksen höyrynmäärämittaus (FI-58952) on sijoitettu keskelle noin 5 metrin korkeuteen pystysuoralle osuudelle vesilaitoksen nousevaan höyrylinjaan.



Kuvio 33. Vesilaitoksen nouseva höyrylinja



Kuvio 34. Vesilaitoksen höyrylinjan lauhtenerotus

11 Tutkimustulosten analysointi ja tulosten luotettavuuden arviointi

11.1 Johtopäätökset tutkimuksen tuloksista

Tutkimustyön luonteesta ja laajuudesta johtuen, tulokset ovat hyvin erityyppisiä. Tutkimustyön tulokset koostuvat tuotetuista dokumenteista, mittauspöytäkirjoista ja laskelmista. Merkittävimmät tulosten syvyyteen vaikuttavat tekijät ovat tutkijan näkökulma ja käytetty tutkimusote sekä käytettävissä ollut aika.

11.1.1 Tasealueet ja mittausvirheet

Tasealue määrittelyn tuotoksina tehtiin virtauskaavio (ks. liite 3), joka havainnollistaa lämmönkäyttöä ja lauhteen palautumista voimalaitokselle kustannusalueittain. Virtauskaavion tueksi haluttiin tehdä maantieteellinen kartta tehdasalueen kustannusalueista ja niiden rajoilla toimivista mittauksista (ks. liite 2). Karttaan on myös merkitty nk. ylimääräisiä mittauksia, jotka ovat positioitu kysymysmerkein. Nämä merkinnät osoittavat lauhdelinjan sijainnin, johon tulisi toteuttaa virtausmittaus.

Tutkimustyön ohessa kartoitettu ja laitekarttoihin käsin piirretyt höyry- ja lauhdelinjat pitäisi piirtää puhtaaksi ja dokumentoida esimerkiksi piirustusnumeroin. Edellä mainittuja dokumentteja voidaan hyödyntää tehtaan energiatehokkuutta kehitettäessä.

PK6:n tasealueen määrittelyn ongelmakohta oli epäluotettava mittaustieto. Mittaustiedon luotettavuuteen vaikuttavia tekijöitä on käsitelty luvussa kahdeksan. Mittausten luotettavuuteen vaikuttaa myös mitattavan prosessiaineen olomuoto. Tässä tapauksessa veden kaksifaasisuus. Mittauksien luotettavuutta arvioitaessa on huomioitu myös päänhöyrymäärämittauksen jälkeisten mittausten summa. Tästä on koostettu taulukko (ks. liite 4).

Taulukko havainnollistaa, että lauhteen ja päänhöyryn massatase on 12 % -yksikköä positiivinen jälkikäsitellyn höyrynkulutus huomioiden. Jos päänhöyrymittauksen jälkeisiä kulutuskohteiden määrämittauksia vertaa lauhdemittaukseen on massatase 17 %

-yksikköä positiivinen. Tästä voidaan päätellä, että pähöyrymittaus osoittaa enemmän kuin höyrylinjasta haarautuvien mittausten summa. Vertailun referenssiarvona käytetään pähöyryyn ja jälkikäsitteilyn määrämittausten summaa, joka on 100 %. Tällöin lauhdemittaus on yli 100 %.

Alkuperäisen oletuksen mukaan pähöyrymittaus näyttää liian vähän todelliseen virtaukseen nähden. Silloin pähöyryyn jälkeisten määrämittausten tulisi näyttää enemmän. Näin ei kuitenkaan ole, vaan kulutuskohteiden summa on 7 % pienempi kuin pähöyryyn määrämittaus. Eli pähöyrymittauksen jälkeen noin 40 metrin putkijonossa massatase on -7 %. Tämä voi olla todellista, jos ennen kulutuskohteiden mittausta höyryä käytetään mittaamattomassa haarassa tai höyrylinja vuotaa, esimerkiksi varoventtiilistä.

Asetelman voi kääntää myös toisinpäin. Höyrymäärämittaukset näyttävät oikein ja lauhteen määrämittaus näyttää selvästi enemmän kuin todellinen virtaus. Koska paperikonelinjan lauhteenpalautusprosentti häviöt huomioiden on tyypillisesti 60 -70 %. Voidaan siis arvioida, että lauhdevirtausmittauksen virhe on lähes puolet enemmän kuin todellinen virtaus.

Koska höyry- ja lauhdeverkon massatase vaatii luotettavat mittaukset, on huomioitava myös tilanne, missä uskotaan määrämittausten olevan kunnossa ja osoittavan todellista virtausmäärä. Tässä tapauksessa massataseen suuret erot voivat johtua lämmönvaihtimen sisäisestä vuodosta. Eli ei ole pois suljettu, että PK6-konelinjan lämmönvaihtimissa olisi vuoto, joka aiheuttaa lauhdesäiliöön virtausta paine-erojen mukaan.

Mahdollisia vuotoa aiheuttavia lämmönvaihtimia voivat olla lauhdesäiliön 365110 raakavettä lämmittävä kierukka, hönkälauhdutin 365102, lämminvesisäiliön lämmönvaihtimet 365111 ja 365112, AHR -lämmönvaihdin 391101.05 tai lämminvesisäiliön 345482 lämmönvaihdin 346511. Vaihtimen toimintakunto voidaan varmistaa fyysisesti sulkemalla ensiöpuolen venttiilit tai tulppaamalla toinen putkiyhde ja paineistamalla toisiopuoli, jolloin ensiöpuolelle ei tulisi syntyä painetta.

Toinen tapa lämmönvaihtimen sisäisen vuodon havaitsemiseksi on tutkia säätöventtiilien aukeamaa eri ajanjaksoina ja verrata näitä mitattuun massavirtauksen muutokseen. Tämä tapa voi olla kuitenkin työläs ja vaatii säätöventtiilien ohjauksen laajaa mittaustiedon keruuta järjestelmään.

Koska Alcont DCS -järjestelmästä voidaan PK6 paperikoneella seurata viimeisen 8 tunnin trendiä, pitää venttiilien ohjaustieto kerätä PHD Process studiosta. Tämän tutkimustyön aikarajoissa tähän ei syvennytty, vaan pidättäydettiin ainoastaan arvioimaan niitä mittausteknisiä syitä, jotka voivat aiheuttaa virhettä höyry- ja lauhdeverkon massataseessa.

Massamittausten mittausvirhettä kannattaa lähteä purkamaan ketjun loppupäästä. Aluksi on tiedettävä mitkä mittaukset kuuluvat tasealueen sisään. Tässä tapauksessa lauhdemäärä on päähöyryn ja jälkikäsitteilyn summa vähennettynä verkoston häviöillä. Seuraavaksi on todettava oikea mittasuureiden skaalaus valitussa esittämismuodossa. Sitten on varmistettava signaalin käsittely ohjausjärjestelmässä, niin ettei laskennallisissa muutoksissa, kuten mittaviestin korjaus- tai muutokertoimissa ole virhettä.

Tämän jälkeen on syytä perehtyä virtauslähettimen säätö- ja asetusarvoihin, kuten jännitetasoon, virtaviestin skaalaukseen, nolapisteen kalibrointiin, mittausalueeseen sekä väliaineen oletusarvoihin kuten tiheyden määrittämiseen. Tämä voidaan suorittaa HART -parametrointi laitteella mittauksen ollessa asennettuna prosessilinjaan (ks. liite 9). Mittausvirhettä etsittäessä on suositeltavaa käyttää valmistajan ohjekirjojen vianetsintäkaavioita apuna (ks. liite 10).

Mikäli edellä mainittujen tarkastusten jälkeen ei virtausmittaus osoita riittävän todennukaisesti on syytä kyseenalaistaa mittauksen fyysiset ominaisuudet ja väliaineen kaksifaasisuudesta johtuvat mittavirheet. Mittarin mittaelin esimerkiksi pitotputki saattaa olla osittain tukossa tai sen fyysiset muodot ovat muuttuneet. Höyrynmäärämittauksessa muodostunut lauhde ei aiheuta niin suurta mittaepätarkkuutta kuin lauhdemittauksessa puolestaan hönkähöyry aiheuttaa.

Mittausvirheeseen vaikuttaa olennaisesti myös virtauksen rauhoittumisetäisyys. PK6:n päähöyrymittausta ennen alle 20 metrin matkalla yhtyy molempien TMP-

laitosten LTO-höyrystimien höyrylinjat. Kyseisen mittauksen suositeltu rauhoittumisetäisyys ennen mittausta tulisi olla vähintään 20 kertaa putkenhalkaisija. Mikäli tämä ei ole mahdollista on virtausmittausta enne asennettava virtauksenoikaisija. Kyseisellä putkiosuudella tapahtuu myös kaksisuuntaista virtausta, riippuen siitä kuinka paljon TMP-laitoksella HMP-höyryä tuotetaan. Näistä tekijöistä johtuen, olettamuksena voidaan todeta, että virtausprofiili ennen PK6:n päähöyrymittausta on hyvin turbulenttista.

Lauhteen Vortex -mittauksessa voi mittavirhettä lisätä edellä mainittujen lisäksi lauhdelinjassa virtaava kaksifaasinen höyry -lauhde seos. Suositusten mukaan Vortex-mittauksen rauhoittumisetäisyydeksi ilman virtauksenoikaisijaa pitäisi olla 30 kertaa putkenhalkaisija. Eli tässä tapauksessa vähintään 3 metriä. Nykyään virtauksen rauhoittumisetäisyys on vain noin puolet suosituksesta.

PK4:n tasealueen merkittävin poikkeama on konelinjan lauhteenpalautusmittausta ennen kaksi yhdistyvää lauhdelinjaa. PK4:n lauhteenpalautusprosentti on nykyiseltään liian positiivinen, ellei välikaton lämmityksen lauhdesäiliöltä palautuvaa lauhdetta vähennetä PK4:n lauhteenmäärämittauksesta.

Kaikki edellä mainitut asiat ovat mielestäni oltava kunnossa, kun mitataan paperikonelinjan energiatehokkuuden kehittymistä.

11.1.2 Lauhteenpalautus

Kaikkia tutkimustyön aikana havaittuja lauhteenpalautukseen liittyviä poikkeamia ei tähän raporttiin ole tuotu, siitä syystä, että lauhteenpoistimien kunnossapitoon on aikaisemmin luotu käytäntö, jolla vikaantuneet lauhteenpoistimet pyritään tunnistamaan.

Resurssien tehostamiseksi nykyistä käytäntöä kannattaisi kehittää, tuomalla kunnossapitoraportointi ja lauhteenpoistimien väliaikaisvarasto SAP -kunnossapidonohjausjärjestelmään. Tämä auttaisi omalta osaltaan lauhteenpoistimien kunnonvalvontaa ja varastosaldon seuranta sekä helpottaisi vikailmoituksen kohdentamista.

Tuloksissa esitettyjen laskelmien mukaan olisi kannattavaa korjata vesilaitoksen lauhdesäiliön vuotava vesitysventtiili ja siistaamon toimimaton lauhdepumppu. PK6:n

kaoliininpurkupaikalle johtava höyrylinja olisi järkevää sulkea niinä aikoina, kun höyryä ei kohteessa käytetä. Lisäksi vuotavat lauhteenpoistimet tulee aina vaihtaa mahdollisimman nopeasti lämpökuorman vähentämiseksi tehdassaleissa ja kokonaisenergiatehokkuuden parantamiseksi.

TMP-3 LTO-höyrystimen höyrylinjan lauhteenerotussäiliön uimurilauhteenpoistin voitaisiin muuttaa pumppaavaksi lauhteenpoistimeksi ja eristää. Lauhde johdettaisiin lauhdepumpun kautta suoraan TMP-laitoksen päälauhdesäiliöön. Vastaavasti TMP-2 LTO-höyrystimen lauhteenerotussäiliön lauhteenpoistin toteutettaisiin samalla tavalla, mistä saataisiin keskimäärin kaksinkertaiset kustannussäästöt. Tämä korreloi myös voimalaitokselta lauhdesäiliöön pumpattavan lisäveden määrään sekä lauhdesäiliöön ajettavan tuorehöyryn määrään.

Järjestelmään lisättäviä komponentteja olisi esimerkiksi lauhteenpoistin yhdistelmä UNA 25-PK ja FPS14 apuhöyryllä toimiva mekaaninen lauhteennostin (ks. kuvio 29).

Alustava kustannusarvio asennuksineen molempien lauhteenerotussäiliöiden lauhteen palauttamiseksi päälauhdesäiliöön maksaisi noin 10 000 euroa. Tällä hetkellä vastaava summa hukataan vuosittain kuumana lauhtena kanaaliin TMP-3 lauhteenerotussäiliön lauhteenpoistimelta.

Jos energiahäviö TMP-2 lauhteenerotussäiliön lauhteenpoistimelta arvioidaan yhtä suureksi kuin TMP-3 puolella. Lauhteenpalautuksen kehittämisen takaisinmaksu ajaksi muodostuisi noin puolivuotta.

11.2 Jatkotoimenpiteet ja kehitysehdotukset

Virtauskaaviosta voidaan jatkojalostaa voimalaitoksen prosessinäytölle kuva, josta on yhdellä silmäyksellä mahdollista nähdä tehtaan energiavirrat kustannusalueittain. Tasealuekarttaan merkityt ehdotukset uusista virtausmittauksista suositellaan toteuttaa, koska nämä mittaukset täsmentävät höyry- ja lauhdeverkon taseita sekä toisivat lisäarvoa energiatehokkuuden kehittämisprosessiin.

PK6:n höyry- ja lauhdevirtausmittausten luotettavuudesta tulisi teettää kattava selvitys, jonka yhteydessä toteutettaisiin erityyppisten mittausvirheiden tarkastukset.

Tässä yhteydessä myös todennettaisiin ne syyt, joista paperikonelinjan höyry- ja lauhdeverkon tase-erot johtuvat.

PK4:n lauhteenpalautusprosentin laskentaan tulisi lisätä välikaton lämmityksen lauhdesäiliöltä palautuvan lauhteen määrämittaus. Konelinjan lauhteenpoistimien kelpoisuus kohteessa pitäisi tarkastaa ja lauhteenpalautusta kehittää.

Lauhteenpoistimien kunnonvalvontaan pitäisi kehittää menetelmä ja tehtaan sisäinen standardi, jolla taataan riittävä reagointi toimimattoman lauhteenpoistimen kunnostamiseksi. Lauhteenpoistimien väliaikaisvarasto puretaan ja tuodaan SAP:iin. Samalla lauhteenpoistimille tehdään positiot järjestelmään.

Lauhteenpoistimien varastoarvoa mietittäessä on otettava huomioon myös sopimusvarastot maahantuojan kanssa. Tässä yhteydessä tarkasteltaisiin lauhteenpoistimien kunnossapidollisen työn ulkoistamisen kannattavuutta.

Jatkotoimenpiteinä tässä raportissa esitettyjen höyry- ja lauhdeverkon havaittujen puutteiden korjaaminen tulisi toteuttaa ensi tilassa, kuten vuotavien vesitysventtiilien, ylivuotoyhteiden ja lauhteenpoistimien korjaus.

TMP-laitosten lauhteenpalautus järjestelmän kehittäminen vaatii suunnittelutyötä. Mutta näen kannattavaksi toteuttaa lauhteenpalauttamisen päälauhdesäiliöön. Lauhteenpoistimien eristäminen itsessään on työturvallisuuden kannalta huomiotava seikka.

11.3 Luotettavuuden arviointi

Tulosten totuuden mukaisuus ja oikeellisuus on riippuvainen usean tekijän summasta. Merkittävin mittaustulosten luotettavuuteen vaikuttava tekijä on mittausajankohtana saadun tuloksen ja tiheyden vakioiminen. Virhettä aiheuttaa myös huolellisuus mittaustapahtumassa ja laskelmissa. Lopputulokset ovat suuntaa antavia ja niitä jalostettaessa on huomioitava riittävän suuri poikkeama.

Tehtaan höyry- ja lauhdeverkon tasealueen määrittelyssä haasteita ilmeni voimalaitokselta pohjoiseen HMP -höyrylinjan puutteellisesta mittaamisesta, eli höyrylinjaan ei ollut lainkaan toteutettu mittausta. Tasemäärittelyä tehtäessä höyryntuotannon

määrää haluttiin arvioida, että saatiin referenssi kohde kulutuskohteiden mittauksille. Tuotannon määrää voimalaitoksella arvioitiin yhdistelemällä yhteensä 20 eri virtausmittausta HMP-tuotannosta voimalaitoksella. Virtausmäärissä ja entalpia-arvoissa osoittautui niin paljon epäluotettavuutta, ettei taulukosta voitu tehdä suoria johtopäätöksiä.

Sankeyn-diagrammia tehtäessä käytettiin suoraan kattilan K5 tuotantoa. Tämä massavirtaus ei kuitenkaan ole vertailtavissa kulutuskohteiden massavirtaukseen. Sankeyn-diagrammista voidaan ainoastaan nähdä tehtaan kulutuskohteiden suuruusluokka. Sankeyn-diagrammi on piirretty mittakaavaan.

11.4 Tavoitteiden tarkastelu ja täytyminen

Tämän tutkimustyön ongelma kohdat ovat esitelty luvussa 2. Näistä ongelma kohdista muodostettiin tutkimuskysymykset, joihin haluttiin löytää vastaus tämän tutkimustyön puitteissa.

Kaipolan tehtaalla ei ollut tarkkaa tietoa siitä, missä tehtaan kulutuskohteiden taserajat kulkevat ja mitä mittauksia kulutuskohteiden laskutukseen tulisi käyttää. Tähän ratkaisuksi luotiin virtauskaavio ja tasealue kartta. Tasealueiden määrittely ei kuitenkaan ollut täysin yksiselitteinen ja jätti tilaa kehittämislle. Esimerkiksi tiettyjen tasealueiden virtausmittausten lisääminen ja luotettavuuden parantaminen kehittäisi tasemäärittelyn todenmukaisuutta.

Tasealueista haluttiin myös luoda Sankeyn-diagrammi, jolla havainnollistetaan tehtaan kulutuskohteiden höyrynkäyttöä ja lauhteen palautusta. Lähtötiedot osoittautuivat kuitenkin niin epäluotettavaksi ja vaikeasti määriteltäviksi ettei luotettavaa diagrammia kyetty luomaan. Sankeyn-diagrammiin on verkossa saatavissa lukuisia ilmaisohjelmia, millä yritettiin tehdä siistiä ja havainnollistavaa kuvaajaa. Tässä kuitenkin epäonnistuttiin ja päädyttiin tekemään yksinkertainen sankeyn-diagrammi paperille käsin.

Heti alkuvaiheessa yhdeksi tutkimustyön selvityskohteeksi muodostui PK6:n tasealueen höyry- ja lauhdeverkon mittausvirheen selvittäminen. Tämä tutkimuskysymyksikin muodostunut ongelmakohta paisui niin laajaksi ja syvälliseksi selvitykseksi

ettei siitä haluttu selvittää kuin mahdolliset tase- ja virhetekijät sekä esittää jatkotoimenpiteet. Juurisyyanalyysi jäi siis tekemättä ja virheen todellinen aiheuttaja löytämättä.

Lauhteen palautusta halutaan kehittää, joten tehtaan höyry- ja lauhdeverkon parantamisen kolmanneksi aihealueeksi valittiin lauhteen palautuksen kehittäminen. Tämä osio vaati verkoston tarkkaa paikantamista ja lauhdeverkon analysointia. Näen kuitenkin erittäin hyödyllisenä asiana sen että höyry- ja lauhdeverkosto tutkittiin tarkkaan läpi ja putkilinjoista luotiin paperiversio luonnokset, jotka skannataan sähköiseen muotoon.

Verkoston tasealueiden eri osista havaittiinkin jatkotoimenpiteitä vaativia poikkeamia. Näille havainnoille saatiin laskettua vuosittainen kustannusarvio. Vaikka kovin täsmällisiin laskelmiin ei päästy, voidaan kuitenkin sanoa, että tutkimustyön tulokset antavat hyvän pohjan tehtaan höyry- ja lauhdeverkoston hallinnan parantamiseen.

11.5 Pohdinta

Opinnäytetyön aihealuetta ei aluksi rajattu riittävästi, mikä johtui siitä, ettei tiedetty, kuinka laajaa tutkimusta ongelmakohdista voidaan tehdä. Tutkimustyössä esitettyihin kysymyksiin saatiin konkreettisia energiatehokkuutta edistäviä ratkaisuja käytävissä olleiden ajanpuitteissa.

Teoreettisen tietoperustan laajuus johtuu juuri edellä mainituista seikoista. Tutkimustyössä haluttiin löytää tehtaan höyry- ja lauhdeverkosta niitä tekijöitä, joilla voidaan edistää energiatehokkuuden kehittämistyötä ja lauhteenpalautusta. Työluonteesta johtuen esitetyt tulokset ovat havaintoja ja näistä jalostettuja toimenpidesuosituksia. Tuloksien luotettavuutta on kuitenkin perusteltu tutkitulla ja aikaisemmin julkaistulla tieteellisellä materiaalilla.

Tutkimustyön tulokset ovat tietyiltä osin pinnallisia yksittäisen henkilön havaintoja. Kuitenkin validiteettia lisää tietoperustaan nojautuva tapa havainnoida tehtaan verkoston osia.

Lähteet

- Federley, J. 2009. Energiatehokas höyry- ja lauhdejärjestelmä. Koulutusmateriaali. Päivitetty 2015. Motiva Oy. Viitattu 20.10.2018.
https://www.motiva.fi/files/10350/Energiatehokas_hoyry-ja_lauhdejarjestelma_VERKKOKOULUTUSAINEISTO_2015.pdf
- Frayne, C. 2002. Boiler Water Treatment: Principles and Practice. New York: Chemical Publishing Co. Inc. Viitattu 13.10.2018. <https://janet.finna.fi/>, Knovel.
- Free Float Steam Trap Series. 2014. Tuote-esite. TLV. Viitattu 04.11.2018.
https://www.tlv.com/global_pdf/tii/e-pamphlet-0801-hp.pdf
- Gestra Steam Systems. 2007. Tuote-esite. Gestra AG. Viitattu 04.11.2018.
https://www.konwell.fi/images/esitteet/01_lauhteenpoisto/3_uimurlauhteenpoistimet/Gestra_uimuripoistin_UNA23-UNA25-UNA26.pdf
- Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T. & Urpalainen, S. 2013. Voimalaitostekniikka. 3. painos. Helsinki: Opetushallitus.
- Höyry- ja lauhdejärjestelmäkoulutus. n.d. Koulutusmateriaali. Helsinki: Spirax Sarco.
- Halttunen, J. 2007. Virtauksen, lämpötilan ja paineen mittaukset. Julkaisussa Voimalaitosautomaatio. Toim. Joronen, T., Jenó K. & Majanne, Y. 2. painos. Helsinki: Suomen Automaatioseura ry, 84-95.
- Käyttö- ja kunnossapitohenkilökunnan ohjeistus. 2011. Höyry-lauhdesiirtojärjestelmä. Helsinki: Motiva Viitattu 18.11.2018.
https://www.motiva.fi/files/4893/HOLA_kaytto-kunnossapito_ohjeistus_2011.pdf
- Leskelä, M. & Turunen, T. 2012. Höyry- lauhdesiirtojärjestelmän energiatehokkuuden mittaussopas. Helsinki: Motiva. Viitattu 13.10.2018.
https://www.motiva.fi/files/6319/Hoyry-lauhdesiirtojarjestelman_energiatehokkuuden_mittaussopas_verkkoon.pdf
- Manivasakam, N. 2011. Practical Boiler Water Treatment Handbook. Danvers: Chemical Publishing Company Inc. Viitattu 13.10.2018. <https://janet.finna.fi/>, Knovel.
- Mass ProBar® Flowmeter Installation and Operation Manual. 1998. Bognor Regis: Fisher-Rosemount Limited
- Model YF100 Vortex Flowmeter. 1998. Käsikirja. U.S.A. Viitattu 18. 11. 2018.
<http://cdn2.us.yokogawa.com/IM1f2b401yia.pdf>
- Pihkala, J. 2004. Prosessisuureiden mittaustekniikka. 2. uudistettu painos. Helsinki: Opetushallitus.
- Property tables and charts (SI units). N.d. Appendix 1. Taulukkokirja.
- Prosessiteollisuuden energia-analyysi. 2004. Tehdaskatselmuksen toteutusohje. Päivitetty 2015. Helsinki: Motiva Oy. Viitattu 10.10.2018.
https://www.motiva.fi/files/10971/Prosessiteollisuuden_energia-analyysi.pdf
- TD32 Flanged Thermodynamic Steam Trap. 2011. Tuote-esite. Spirax-Sarco. Viitattu 4.11.2018. http://www.spiraxsarco.com/Documents/TI/P068_17.pdf

The Steam and Condensate Loop. 2007. Spirax-Sarco. Second edition. Cheltenham: Spirax-Sarco Limited.

Thermostatic Steam Traps. 2018. Steam Engineering Tutorials. Koulutusmateriaali verkossa. Spirax-Sarco Limited. Viitattu 10.11.2018. <http://www.spiraxsarco.com/Resources/Pages/Steam-Engineering-Tutorials/steam-traps-and-steam-trapping/thermostatic-steam-traps.aspx>

Thermostatic steam traps MK 45/45A. 2018. Gestra AG www-sivut. Viitattu 4.11.2018. <https://www.gestra.com/products/valves/a1-steam-traps/thermostatic-steam-traps-mk/mk-45.html>

Tutkimus ja kehittäminen. 2017. Opetusmateriaali. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Optima-oppimisympäristö. Viitattu 20.11.2018.

Valtanen. E., 2013. Tekniikan taulukkokirja. 20. painos. Mikkeli: Genesis-Kirjat.

Yleiskurssi. N.d. Labra. Konwell-koulutusmateriaali. Helsinki: Oy Konwell Ab.

Liitteet

Liite 1. Höyryn vaihtoehtoisista virtausmittauksista ehdotettu valinta (Käyttö- ja kunnossapitohenkilökunnan ohjeistus 2011, 22. muokattu)

Tyyppi	Turbiini	Pyörivä sivuvirta	Kuristus-laippa	Virt.korj.kur.laippa	Muuttuva kur.laippa	Kartio kur.laippa	Pitotputki	Monikan.pitotputki	Vortex
Ominaisuus									
Mittatarkkuus	hyvä	kohtalainen	kohtalainen	hyvä	hyvä	hyvä	hyvä	hyvä	hyvä
Mittausalue	10:1	<5:1	<5:2	20:1	70:1	30:1	5:1	10:1	20:1
Toistettavuus	heikko	heikko	hyvä	kohtalainen	kohtalainen	hyvä	hyvä	erinomainen	erinomainen
Värinäherkkyys	alhainen	alhainen	alhainen	alhainen	kohtalainen	alhainen	alhainen	alhainen	heikko
As. herkkyys	korkea	korkea	korkea/kohtal.	korkea/kohtal.	alhainen	alhainen	kohtalainen	kohtalainen	korkea/kohtal.
Asennustyö	vaikea	kohtalainen	helppo	helppo	kohtalainen	helppo	eritt. helppo	eritt. helppo	kohtalainen
Painehäviö	kohtalainen	kohtalainen	kohtalainen	kohtalainen	alhainen	alhainen	alhainen	alhainen	alh./kohtal.
Kalibrointitane	usein	usein	usein	harvoin	usein	harvoin	harvoin	harvoin	harvoin
Hankintakulut	kohtalainen	korkea	alhainen	kohtalainen	kohtalainen	kohtalainen	alhainen	alhainen	kohtalainen
Asennuskulut	kohtalainen	kohtalainen	alhainen	kohtalainen	kohtalainen	kohtalainen	alhainen	alhainen	kohtalainen
Huoltokulut	kohtalainen	kohtalainen	korkea	kohtalainen	kohtalainen	alhainen	alhainen	alhainen	alhainen

Liite 4. PK6 tasealueenmittaukset

PK6 HMP -höyryn kulutus suhteessa lauhteen palautukseen

Kohde	Lauhde	Jälkikäsitteily höyry	Päähöyry	AHR -höyry	Viirakaivo höyry	Kuiv.osan höyry	Hukattu päähöyry
Positio	FI-6791	FIQ-6801	FIQ-6757	FIQ-6758	FIQ-6266	FIQ-6753	TASE:
100%	112%	1%	99%	0%	13%	80%	7%
VIRHE %	112% - 112% -	1% - 1% -	99%	0% -	13% -	80% =	<u>17%</u> = <u>12%</u>

Liite 5. Vesilaitoksen lauhteenmittauspöytäkirja

Lauhteenmittauspöytäkirja

Suorittaja: Krister Vesterberg

Päivämäärä: 19.Lokakuuta.2018

Kohde: Vesiaseman lauhdesäiliö, Lauhde VKE lämmönsiirtimeltä 2 (VLA-6501.00-50)

Kuvaus: Vesitysventtiili ei pysy suljettuna ja lauhde virtaa lattialle.

Käytetty mittausmenetelmä: Tilavuusmittaus mittakannuun ajan jakson aikana.

Käytetyt mittalaitteet: SATO SK-1250MC III alfa -lämpötilamittari, ajan laskennassa Samsung SM-G903F älypuhelin, sekuntikello ohjelmaa. Mittakannuina käytettiin 3L ja 5L kannuja sekä 1L mittalasia.

Ympäristön olosuhteet: Ympäristön lämpötila 21-22 °C

Näytteen faasi/lämpötila: Neste/41,1-43,2 °C

Mittaus hetki (klo.)	Näytteenotto aika (sek.)	Mitattu tilavuus (litraa)	Arvioitu mittaus virhe (+/- litraa)
08:10	60	9,7	0,2
08:20	60	9,8	0,2
08:55	60	0,87	0,02

Kommentit: Lauhde mitattu siinä tilasta jossa järjestelmä on ollut. Vesitysputkenpää sijaitsee niin lähellä lattiaa, että pienemmällä 3-litran kannulla piti näytettä ottaa 8-erässä, jolloin kannun reunan yli saattoi hieman loiskua, kun kannusta kaadettiin isompaan 5-litran mittakannuun. Kello pysäytettiin aina mittakannun ollessa pois lauhteenvesitys putken alta. Kellon käynnistäminen ja pysäyttäminen kannun kanssa yhtäaikaisesti aiheuttaa +/- 5sek kokonaisuuskvirhettä.

Kahden ensimmäisen mittauksen jälkeen vesitysventtiili suljettiin.

Kolmas mittaus klo 08:55 on suoritettu vesitysventtiili suljettuna hakasella lukittuna.

Lauhde säiliön pinta oli alhainen vain noin 1/5 -osa ja lauhde pumppu ei pumpannut.

Vesitysventtiilin suljettua lauhdesäiliö täyttyi ja noin 80%:ssa lauhteenpoistopumppu käynnistyi tyhjentäen lauhdesäiliötä. Pumpun painepuolen paine näytti paikallismittarilla 2,6bar ja pumpun käynnissä ollessa 4bar.

Analyysi: Vesitysventtiili on kulunut ja vuotaa suljettuna. Tärinästä ja asennustavasta johtuen vesitysventtiili ei pysy kiinni. Vesiaseman lauhdesäiliö ei täyty tai täyttyy hitaasti, koska vesitysventtiili on auki.

Lauhde on jäähtynyt noin 40 °C:een, vaikka VKE lämmönsiirrin sijaitsee vain noin 12 putkimetrin päässä lauhdesäiliöstä. Tämä saattaa johtua tilanteesta jossa höyry lauhtuu ennen VKE lämmönsiirrintä.

Liite 6. Siistaamon lauhteenmittauspöytäkirja

Lauhteenmittauspöytäkirja

Suorittaja: Krister Vesterberg

Päivämäärä: 19.Lokakuuta.2018

Kohde: Siistaamon lauhteen pumppaussäiliö 145466

Kuvaus: Ylivuotoputki tulvii kanaaliin

Käytetty mittausmenetelmä: Tilavuusmittaus mittakannuun ajan jakson aikana.

Käytetyt mittalaitteet: SATO SK-1250MC III alfa -lämpötilamittari, ajan laskennassa Samsung SM-G903F älypuhelinta, sekuntikello ohjelmaa. Mittakannuina käytettiin 3L ja 5L kannuja sekä 1L mittalasia.

Ympäristön olosuhteet: Ympäristön lämpötila 27,7 °C

Näytteen faasi/lämpötila: Neste/57,8°C

Mittaus hetki (klo.)	Näytteenotto aika (sek.)	Mitattu tilavuus (litraa)	Arvioitu mittaus virhe (+/- litraa)
09:20	60	2,0	0,1
09:25	180	> 8,0	0,4
09:35	480	6,4	0,2

Kommentit: Siistaamon lauhteen pumppaus säiliön 145466 ylivuotoyhde oli paljain käsin kosketettaessa kuuma ja pumpun imuyhde kylmä. Ylivuotoputkesta lorotteli kanaaliin jatkuvasti hyvin erimääriä lauhdetta. Pumppu 145299 ei käynyt tutkimusmittauksen aikana. Pumppu oli paikallisohjattu automaatille lauhdesäiliön vieressä sijaitsevasta kytkimestä.

Kellon käynnistäminen ja pysäyttäminen kannun kanssa yhtäaikaisesti aiheuttaa +/- 1 sek kokonaisaikavirhettä.

Analyysi: Yhteen laskettu lauhdevuoto on $(2L+8L+6,4L) / (1\text{min}+3\text{min}+8\text{min}) = 1,37 \text{ L/min}$.

Pumpun 145299 käyntitietoa ei ole löytynyt järjestelmästä. Käyntitiedosta voitaisiin päätellä kuinka pitkään ylijouksu on tulvinut kanaaliin aiheuttaen lauhdehäviötä.

Liite 7. TMP-3 lauhteenmittauspöytäkirja

Lauhteenmittauspöytäkirja

Suorittaja: Krister Vesterberg

Päivämäärä: 7. Marraskuuta.2018

Kohde: TMP3 lauhteenerotussäiliö 445444

Kuvaus: Lauhteenpoistin vuotaa kanaaliin

Käytetty mittausmenetelmä: Tilavuusmittaus mittakannuun ajan jakson aikana.

Käytetyt mittalaitteet: SATO SK-1250MC III alfa -lämpötilamittari, ajan laskennassa Samsung SM-G903F älypuhelinta, sekuntikello ohjelmaa. Mittakannuina käytetty 2kpl, 5 -litran kannuja.

Ympäristön olosuhteet: Ympäristön lämpötila 31,9 °C / ilmanpaine: hieman alipaineinen

Näytteen faasi/lämpötila: Kaksifaasinen lauhde ja höyry / 99°C

Mittaus hetki (klo.)	Näytteenotto aika (sek.)	Mitattu tilavuus (litraa)	Arvioitu mittaus virhe (+/- litraa)
10:30	60	3,7	0,4
10:45	60	4,7	0,4

Kommentit: TMP3 höyrylinjan lauhteenerotussäiliön lauhteenpoistimen poistoputki on horisontaalisessa asennossa kanaalin pohjalla. Mittakannu mahtui putken suuaukolle noin 30-asteen kulmassa. Tästä syystä kannusta piti tyhjentää noin 10 sekunnin välein lauhdetta toiseen kannuun. Kannun asettelusta johtuen osa kerätystä nesteestä loiskui yli reunan. Tämä aiheuttaa noin +/- 4 dl mittavirheen.

Kellon käynnistäminen ja pysäyttäminen kannun kanssa yhtäaikaisesti aiheuttaa +/- 3 sek kokonaisaikavirhettä.

Mittaushetkellä TMP3 höyryntuotanto oli noin 8,5 kg/s ja höyrynpaine 255 kPa.

Analyysi: Mekaanisen uimurilauhteenpoistimen (UNA23) tulevan putken lämpötila oli 132°C. Lauhteenpoistimen päästöpuolen tyhjennysputken laipan lämpötila oli noin 115°C. Lauhteenpoistin on asennettu kanaalin yläpuolelle noin 1,2 metrin korkeudelle. Kanaali on kansitettu, jotta hönkähöyry lauhtuisi kanaaliin.

Liite 8. Kaoliinitunnelin lauhteenmittauspöytäkirja

Lauhteenmittauspöytäkirja

Suorittaja: Krister Vesterberg

Päivämäärä: 7. Marraskuuta. 2018

Kohde: PK6 kaoliinitunneli HMP höyrylinja

Kuvaus: Lauhteenpoistin vuotaa kanaaliin

Käytetty mittausmenetelmä: Tilavuusmittaus mittakannuun ajan jakson aikana.

Käytetyt mittalaitteet: SATO SK-1250MC III alfa -lämpötilamittari, ajan laskennassa Samsung SM-G903F älypuhelinta, sekuntikello ohjelmaa. Mittakannuina käytetty 2kpl, 5 -litran kannuja.

Ympäristön olosuhteet: Ympäristön lämpötila 14,1 °C / ilmanpaine: normaali

Näytteen faasi/lämpötila: Kaksifaasinen lauhde ja höyry / 99°C

Mittaus hetki (klo.)	Näytteenotto aika (sek.)	Mitattu tilavuus (litraa)	Arvioitu mittaus virhe (+/- litraa)
10:10	60	0,3	0,05
10:20	60	0,3	0,05

Kommentit: Höyrylinjan lauhteenpoistin on asennettu noin 8 metriä laskevan putken mutkan jälkeen. Termisen bi-metallilauhteenpoistimen vesitysventtiili oli kiinni ja poistinta ennen oleva sulkuventtiili noin 30-astetta avattuna. Mittakannu mahtui poistoputken alle sopivasti ja näytteenottovirhettä syntyi vain arvioitaessa nesteen tilavuutta mittakannun asteikolta.

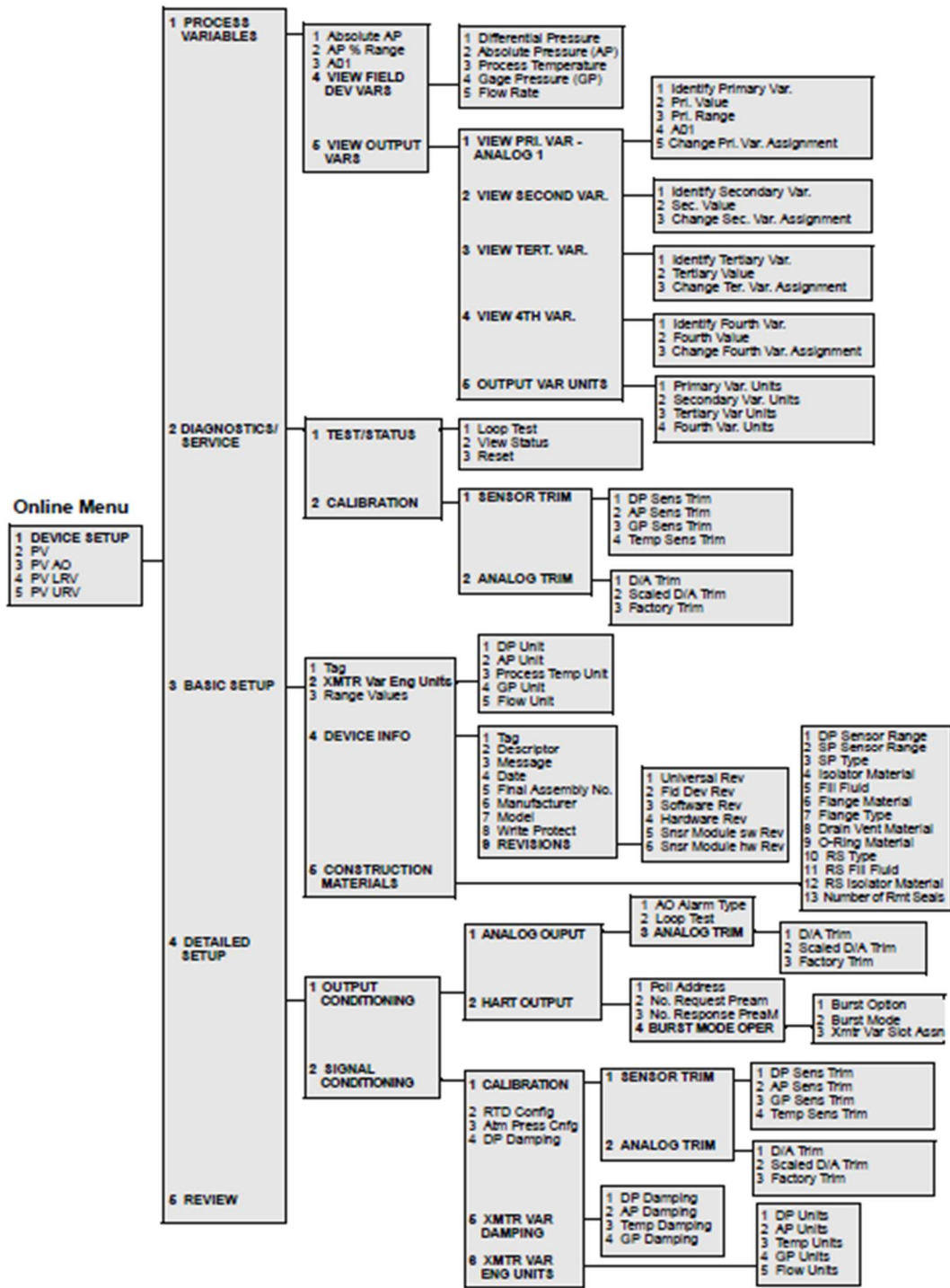
Kellon käynnistäminen ja pysäyttäminen kannun kanssa yhtäaikaaisesti aiheuttaa +/- 1 sek kokonaisaikavirhettä.

Analyysi: PK6 operaattoreiden mukaan kyseinen kohde on vuotanut ainakin 4 -vuotta. Vuoto määrä on vaihdellut sulkuventtiilin asennon mukaan. Kaoliinitunnelissa liikutaan hyvin harvoin. Höyrylinja johtaa kaoliinin purkupaikalle, missä höyryllä (höyrypostista) voidaan kovilla pakkasilla sulattaa jäätä.

Liite 9. Mass ProBar virtausmittarin HART -kommunikointi valikko (Mass ProBar® Flowmeter Installation and Operation Manual 1998, A-2)

Mass ProBar Flowmeter

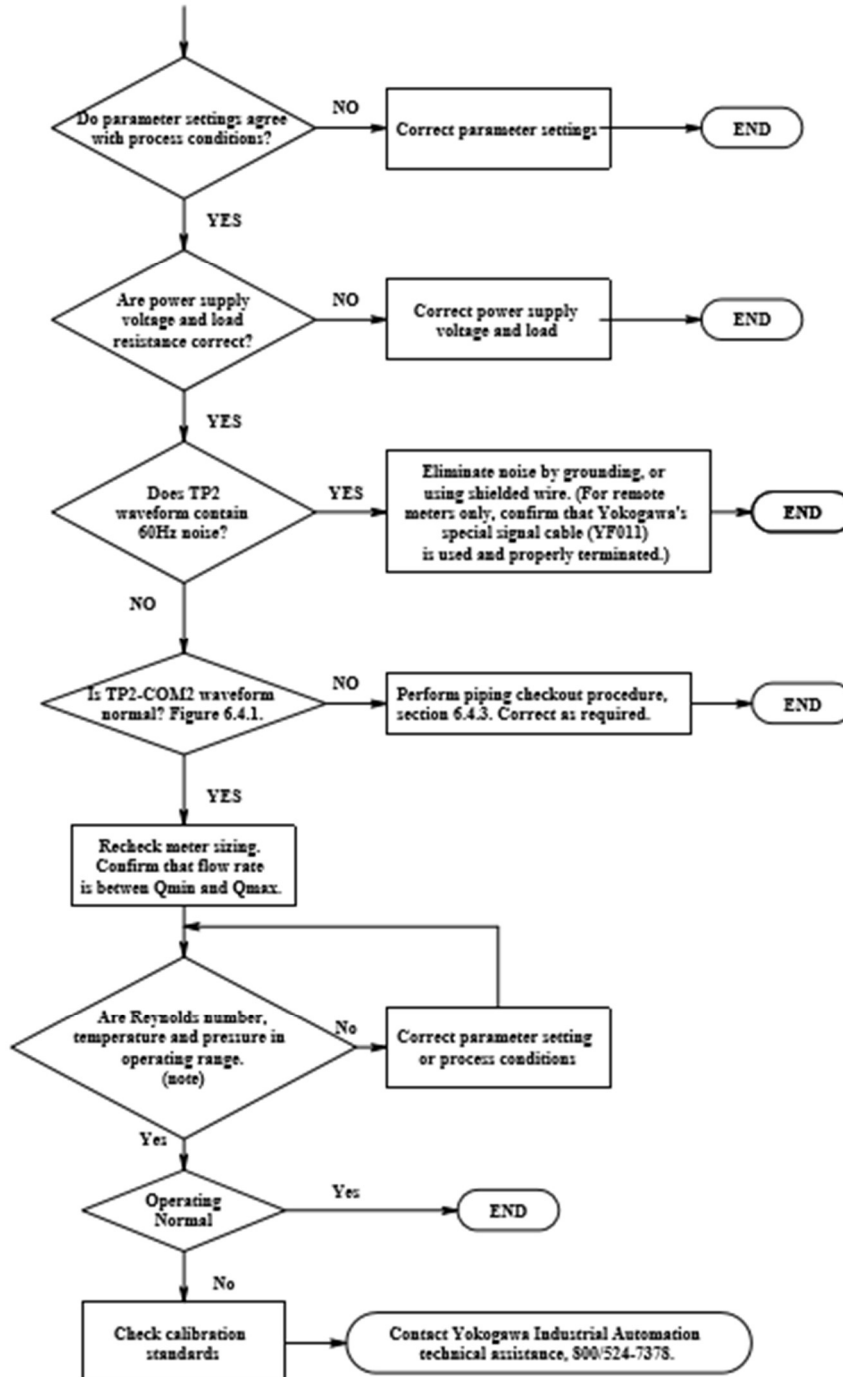
FIGURE A-1. HART Communicator Menu Tree for the Mass ProBar.



Liite 10. Vortex -mittarin YF100 ongelman ratkaisu kaavio (Model YF100 Vortex Flowmeter 1998, 106.)

TROUBLESHOOTING

6.5.3 Large flowmeter errors



Liite 11. Lauhteen ominaisuuksia lämpötilan mukaan (Property tables and charts N.d.)

TABLE A-4

Saturated water—Temperature table

Temp., T °C	Sat. press., P_{sat} kPa	Specific volume, m^3/kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$		
		Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773

Liite 12. Lauhteen ominaisuuksia paineen mukaan (Property tables and charts N.d.)

TABLE A-5

Saturated water—Pressure table

Press., <i>P</i> kPa	Sat. temp., <i>T</i> _{sat} °C	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg·K		
		Sat. liquid, <i>v</i> _f	Sat. vapor, <i>v</i> _g	Sat. liquid, <i>u</i> _f	Evap., <i>u</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>u</i> _g	Sat. liquid, <i>h</i> _f	Evap., <i>h</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>h</i> _g	Sat. liquid, <i>s</i> _f	Evap., <i>s</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>s</i> _g
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2178.5	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	0.001026	3.9933	317.58	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
150	111.35	0.001053	1.1594	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231
175	116.04	0.001057	1.0037	486.82	2037.7	2524.5	487.01	2213.1	2700.2	1.4850	5.6865	7.1716
200	120.21	0.001061	0.88578	504.50	2024.6	2529.1	504.71	2201.6	2706.3	1.5302	5.5968	7.1270
225	123.97	0.001064	0.79329	520.47	2012.7	2533.2	520.71	2191.0	2711.7	1.5706	5.5171	7.0877
250	127.41	0.001067	0.71873	535.08	2001.8	2536.8	535.35	2181.2	2716.5	1.6072	5.4453	7.0525
275	130.58	0.001070	0.65732	548.57	1991.6	2540.1	548.86	2172.0	2720.9	1.6408	5.3800	7.0207
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917

Liite 13. Tulistetun höyryn ominaisuuksia (Property tables and charts N.d.)

TABLE A-6

Superheated water

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg-K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg-K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg-K
$P = 0.01 \text{ MPa (45.81°C)*}$				$P = 0.05 \text{ MPa (81.32°C)}$				$P = 0.10 \text{ MPa (99.61°C)}$				
Sat.†	14.670	2437.2	2583.9	8.1488	3.2403	2483.2	2645.2	7.5931	1.6941	2505.6	2675.0	7.3589
50	14.867	2443.3	2592.0	8.1741								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4489	3.4187	2511.5	2682.4	7.6953	1.6959	2506.2	2675.8	7.3611
150	19.513	2587.9	2783.0	8.6893	3.8897	2585.7	2780.2	7.9413	1.9367	2582.9	2776.6	7.6148
200	21.826	2661.4	2879.6	8.9049	4.3562	2660.0	2877.8	8.1592	2.1724	2658.2	2875.5	7.8356
250	24.136	2736.1	2977.5	9.1015	4.8206	2735.1	2976.2	8.3568	2.4062	2733.9	2974.5	8.0346
300	26.446	2812.3	3076.7	9.2827	5.2841	2811.6	3075.8	8.5387	2.6389	2810.7	3074.5	8.2172
400	31.063	2969.3	3280.0	9.6094	6.2094	2968.9	3279.3	8.8659	3.1027	2968.3	3278.6	8.5452
500	35.680	3132.9	3489.7	9.8998	7.1338	3132.6	3489.3	9.1566	3.5655	3132.2	3488.7	8.8362
600	40.296	3303.3	3706.3	10.1631	8.0577	3303.1	3706.0	9.4201	4.0279	3302.8	3705.6	9.0999
700	44.911	3480.8	3929.9	10.4056	8.9813	3480.6	3929.7	9.6626	4.4900	3480.4	3929.4	9.3424
800	49.527	3665.4	4160.6	10.6312	9.9047	3665.2	4160.4	9.8883	4.9519	3665.0	4160.2	9.5682
900	54.143	3856.9	4398.3	10.8429	10.8280	3856.8	4398.2	10.1000	5.4137	3856.7	4398.0	9.7800
1000	58.758	4055.3	4642.8	11.0429	11.7513	4055.2	4642.7	10.3000	5.8755	4055.0	4642.6	9.9800
1100	63.373	4260.0	4893.8	11.2326	12.6745	4259.9	4893.7	10.4897	6.3372	4259.8	4893.6	10.1698
1200	67.989	4470.9	5150.8	11.4132	13.5977	4470.8	5150.7	10.6704	6.7988	4470.7	5150.6	10.3504
1300	72.604	4687.4	5413.4	11.5857	14.5209	4687.3	5413.3	10.8429	7.2605	4687.2	5413.3	10.5229
$P = 0.20 \text{ MPa (120.21°C)}$				$P = 0.30 \text{ MPa (133.52°C)}$				$P = 0.40 \text{ MPa (143.61°C)}$				
Sat.	0.88578	2529.1	2706.3	7.1270	0.60582	2543.2	2724.9	6.9917	0.46242	2553.1	2738.1	6.8955
150	0.95986	2577.1	2769.1	7.2810	0.63402	2571.0	2761.2	7.0792	0.47088	2564.4	2752.8	6.9306
200	1.08049	2654.6	2870.7	7.5081	0.71643	2651.0	2865.9	7.3132	0.53434	2647.2	2860.9	7.1723
250	1.19890	2731.4	2971.2	7.7100	0.79645	2728.9	2967.9	7.5180	0.59520	2726.4	2964.5	7.3804
300	1.31623	2808.8	3072.1	7.8941	0.87535	2807.0	3069.6	7.7037	0.65489	2805.1	3067.1	7.5677
400	1.54934	2967.2	3277.0	8.2236	1.03155	2966.0	3275.5	8.0347	0.77265	2964.9	3273.9	7.9003
500	1.78142	3131.4	3487.7	8.5153	1.18672	3130.6	3486.6	8.3271	0.88936	3129.8	3485.5	8.1933
600	2.01302	3302.2	3704.8	8.7793	1.34139	3301.6	3704.0	8.5915	1.00558	3301.0	3703.3	8.4580
700	2.24434	3479.9	3928.8	9.0221	1.49580	3479.5	3928.2	8.8345	1.12152	3479.0	3927.6	8.7012
800	2.47550	3664.7	4159.8	9.2479	1.65004	3664.3	4159.3	9.0605	1.23730	3663.9	4158.9	8.9274
900	2.70656	3856.3	4397.7	9.4598	1.80417	3856.0	4397.3	9.2725	1.35298	3855.7	4396.9	9.1394
1000	2.93755	4054.8	4642.3	9.6599	1.95824	4054.5	4642.0	9.4726	1.46859	4054.3	4641.7	9.3396
1100	3.16848	4259.6	4893.3	9.8497	2.11226	4259.4	4893.1	9.6624	1.58414	4259.2	4892.9	9.5295
1200	3.39938	4470.5	5150.4	10.0304	2.26624	4470.3	5150.2	9.8431	1.69966	4470.2	5150.0	9.7102
1300	3.63026	4687.1	5413.1	10.2029	2.42019	4686.9	5413.0	10.0157	1.81516	4686.7	5412.8	9.8828