

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

Höyrytasetarkastelu kemianteollisuuden tehdasalueella

Report of a steam balance in a chemical industry site

Työn tarkastaja: Kari Luostarinen

Työn ohjaajat: Kari Luostarinen

Jukka Ailama

Lappeenranta 11.06.2016

Eetu Rantanen

TIIVISTELMÄ

Tekijän nimi: Eetu Rantanen

Opinnäytteen nimi: Höyrytasetarkastelu kemianteollisuuden tehdasalueella

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2016

34 sivua, 4 kuvaa, 2 taulukkoa ja 3 liitettä

Hakusanat: höyryverkko, höyrytase, höyryn käytön raportointi

Tässä kandidaatintyössä perehdyttiin Kemira Chemicals Oy:n Sastamalan Äetsässä sijaitsevan tehdasalueen höyryverkkoon. Työn tavoitteena oli luoda selkeä kokonaiskuva höyryn tuotannosta ja kulutuksesta tehdasalueella. Työssä tutkittiin höyryverkon nykyisten mittauspisteiden kattavuutta ja suoritettiin höyrytasetarkastelu höyryverkostolle. Höyrytaseen tarkemmalla ymmärtämisellä helpotetaan mahdollisten energiatehokkuushankkeiden kohdentamista järkevästi.

Työssä tarkasteltiin tehdasalueen höyryjärjestelmää siinä tarkkuudessa kuin se nykyisten mittausten dataa hyödyntäen on mahdollista. Laskennassa keskityttiin tarkastelemaan kokonaisuutta, ja erityisesti tuomaan esille merkittävimpiä höyrynkuluttajia. Päähöyrykatilan omakäyttöteho on huomattavan suuri syöttöveden merkittävän lämmitystarpeen johdosta. Tehtaista merkittävimmät höyryn kuluttajat ovat natriumkloraatitehdas (T III) ja hienokemikaalitehdas (T IV). Höyryverkkoa tarkasteltaessa luotiin myös uusi raportointipohja höyryn tuotannon ja kulutuksen tunnuslukujen seurantaan. Luotu raporttipohja hyödyntää saatavissa olevaa mittausdataa aiempaa tarkemmin ja laskenta on toteutettu mahdollisimman läpinäkyvästi.

Mahdolliset höyrynkäytön tarkemmat selvitykset ja investoinnit esimerkiksi höyrymittauksiin kannattaa kohdentaa tehtaisiin T III ja T IV. Mikäli tulevaisuudessa halutaan muodostaa vetytase, helpottaa poltetun vedyn määrän seuranta luodussa raportointipohjassa taseen muodostamista.

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

1 JOHDANTO	4
2 YLEISESITTELY	5
2.1 Kemira Oyj	5
2.2 Äetsän tehdaskokonaisuus	5
3 HÖYRYVERKKO	8
3.1 Höyryn tuotanto	8
3.2 Höyryverkko ja höyryn kulutus	10
4 HÖYRYTASETARKASTELU	12
5 HÖYRYNTUOTANNON JA -KULUTUKSEN RAPORTOINTI	22
5.1 Nykyinen raportti	22
5.2 Vaihtoehtoinen raportointimalli	25
6 JOHTOPÄÄTÖKSET	30
7 YHTEENVETO	32
LÄHDELUETTELO	33

LIITE 1. Mittausaineisto lokakuulta 2015

LIITE 2. Ote höyryn nykyisestä raportointityökalusta

LIITE 3. Mittauspöytäkirja

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

c_p	ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kgK]
E	energia	[MWh]
h	ominaisentalpia	[MWh/t]
H	kemiallinen teho	[MW]
H_2	vetyatomi	
H_2O	vesi(höyry)	
m	massa	[t]
O_2	happiatomi	
q_m	massavirta	[kg/s]
Q	lämpöteho	[MW]
Q_i	lämpöarvo	[MJ/kg]
T	lämpötila	[°C]
V	tilavuus	[m ³]

Kreikkalaiset aakkoset

η	hyötysuhde	
ρ	tiheys	[kg/m ³]

Alaindeksit

0	referenssi	
h	höyry	
H ₂	vety	
HK10	pääkattila	
HK11	varakattilat	

k	kattila
KL	kaukolämpö
l	lauhde
lv	lisävesi
pa	polttoaine
RP	runkoputkisto
RPÖ	raskas polttoöljy
sv	syöttövesi
tot	yhteensä
up	ulospuhallus

Lyhenteet

A	absoluutti
G	mittari (gauge)

1 JOHDANTO

Tässä kandidaatintyössä käsitellään Kemira Chemicals Oy:n Äetsän toimipaikan höyryverkkoa. Höyrynkulutuksen tarkka tehdaskohtainen tuntemus auttaa höyryntuotannon aiheuttamien kustannusten jaossa tuotettaville kemikaaleille ja antaa höyryverkkoon liittyvään päätöksentekoon lisäinformaatiota.

Tämän työn tavoitteena on luoda selkeä kokonaiskuva nykyisestä höyryverkosta. Työn tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

- Mitkä ovat merkittävimmät höyrynkuluttajat tehdasalueella?
- Ovatko nykyiset höyrymittaukset luotettavia ja riittäkö niistä saatava data tarpeeksi yksityiskohtaiseen höyryverkon tarkasteluun?
- Löytyykö nykyisestä höyryntuotannon ja -kulutuksen raportoinnista kehitettävää?

Aluksi esitellään lyhyesti sekä Kemira yrityksenä että Äetsän toimipaikka, minkä jälkeen perehdytään Äetsän tehdasalueen höyryverkkoon kokonaisuutena. Työssä tarkastellaan höyryntuotantoa, höyryntuotantoketua ja höyryntuotuksen kulutuskohteita. Höyryverkko on dokumentoitu yrityksessä melko hyvin, mutta höyryverkkoon liittyviä muutoksia ei ole päivitetty dokumentteihin. Höyryverkon kulutusta seurataan tällä hetkellä tehdaskohtaisesti virtausmittauksilla. Näiden virtausmittausten ja muiden mittauspisteiden perusteella suoritetaan tehdasalueelle höyryntuotantotarkastelu ja selvitetään tehtaan höyryverkon merkittävimmät kuluttajat. Merkittävimpänä lähdeaineistona työssä käytetään automaatiojärjestelmiin tallennettua mittaustietoa. Tarkastelujakson pituudeksi on valittu yksi kuukausi, jolloin ajanjakso sisältää monia erilaisia tehtaiden ajotilanteita.

Työn loppuosassa käsitellään höyryntuotantoa ja kulutukseen liittyvää raportointia. Höyryntuotantoa ja kulutusta raportoidaan kuukausitasolla Microsoft Excel -pohjaisella työkalulla. Kandidaatintyössä luodaan katsaus nykyiseen raportointijärjestelmään. Nykyisen raportoinnin vaihtoehdoksi kehitetään raportointipohja, joka hyödyntää olemassa olevia mittauksia nykyistä laajemmin. Raportointipohjan laskenta hyödyntää höyryntuotantotarkastelun yhteydessä esitettyjä yhtälöitä.

2 YLEISESITTELY

Tässä luvussa esitellään Kemira Oyj yrityksenä ja Kemira Chemicals Oy:n Sastamalan Äetsässä toimiva tehdasalue.

2.1 Kemira Oyj

Kemira Oyj on globaali kemianyhtiö, jonka päätoimialaa on asiantuntemuksen, sovel-lusosaamisen ja räätälöityjen kemikaaliyhdistelmien tarjoaminen runsaasti vettä käyttä-ville teollisuudenaloille. Kemiran keskittymisalaja ovat paperi, öljy & kaasu ja vedenkä-sittely. (Liedes 2015.) Yhtiössä työskenteli vuoden 2014 lopussa 4248 työntekijää ja lii-kevaihto kyseisenä vuonna oli yhteensä 2,14 miljardia euroa (Kemira Tilinpäätös 2014).

Kemiran historia ulottuu vuoteen 1920, jolloin perustettiin Valtion Rikkihappo- ja Super-fosfaattitehtaat. Kemira aloitti siis toimintansa silloisen nimensä mukaisesti valmista-malla rikkihappoa ja superfosfaattia. Tuotanto laajeni vuosikymmenien aikana käsittä-mään useita eri teollisuuskemikaaleja. Myös lannoitetuotanto oli vahvaa. Toimintaport-folion kasvusta johtuen yrityksen nimi muutettiin ensin Rikkihappo Oy:ksi ja tämän jäl-keen vuonna 1972 Kemira Oy:ksi. Useiden yritysostojen ja -myyntien kautta Kemiran painopistealueet ovat hioutuneet käsittämään edellä mainitut kolme segmenttiä. (Kemira historia 2015.)

2.2 Äetsän tehdaskokonaisuus

Kemiran Äetsän toimipaikka koostuu kloraattitehtaasta ja hieno- ja vesikemikaaliteh-taasta. Tehtaiden prosessit, merkittävimpana elektrolyysi natriumkloraatin valmistuk- sessa, kuluttavat huomattavan määrän sähköä. Vuoden 2014 sähkönkulutus oli 658 GWh. Prosessihöyryn kulutus vuonna 2014 oli 145 GWh ja lämpöä kului 6 GWh. (Liedes 2015.) Äetsän tehtaat olivat aiemmin osa Finnish Chemicals Oy:tä. Kemiran yritysoston myötä nimi muuttui Kemira Chemicalsiksi 2000-luvulla. Äetsän tehdasalueen historia kemikaa- lituotannossa ulottuu vuoteen 1939, jolloin Finnish Chemicalsin klooritehdas aloitti toi- mintansa (Michelsen 1989, 53).

Kaikkea tehtaiden toimintaa ohjaa turvallisuusajattelu. Turvallisuusnäkökohtien asetta- minen ajattelu- ja toimintamalleissa etusijalle on luonnollista, sillä tehdasalueella käsitel- lään useita ihmisille ja ympäristölle myrkyllisiä aineita. Tässä työssä käytetään tehtaiden

lyhenteinä niille vakiintuneita lyhenteitä. Vesikemikaalitehdas, jossa tuotetaan PAX-vedenkäsittelykemikaaleja, on T I. T II toimii nykyään pääasiassa varastotilana, mutta siellä sijaitsee myös natriumklooraattitehtaan suolaliuosallas. Molemmat tehdasrakennukset ovat aiemmin toimineet klooritehtaina (Michelsen 1989, 53, 143). T III on natriumklooraattitehtaan lyhenne ja T IV käsittää hienokemikaalien tuotantotilat.

Klooraattitehtaalla tuotetaan elektrolyysillä ruokasuolasta natriumklooraattia. Natriumklooraattia toimitetaan asiakkaalle sekä nestemäisenä liuksena että kiinteänä raemuodossa. Klooraatin valmistuksessa syntyy sivutuotteena vetyä, jota käytetään hienokemian prosesseissa, myydään pulloitetuna asiakkaalle ja hyödynnetään prosessihöyryn tuottamisessa polttoaineena. Vedyn tuotanto on vuositasolla kuitenkin reilusti kulutusta suurempaa, joten vedyn mahdollisten lisähyödyntämiskohteiden selvitys olisi kiinnostavaa. Hieno- ja vesikemikaalitehtaan tuotteita ovat natriumboorihydridi, PAX-vedenkäsittelykemikaalit, trimetyylliboraatti, natriumbisulfiitti, Fennopol ja märkälujahartsit. (Liedes 2015.)

Äetsän tehtaiden tuotteita käytetään esimerkiksi sellu- ja paperiteollisuudessa, lääketieteellisyydessä, kaivosteollisuudessa ja vedenkäsittelyssä. Tuotteita toimitetaan useisiin Euroopan maihin, mutta myös esimerkiksi Brasiliaan, Japaniin ja Yhdysvaltoihin. (Liedes 2015.)



Kuva 1: Ilmakuva Äetsän tehdasalueesta. (Liedes 2015.)

Kuvassa 1 on ilmakehu Äetsän koko tehdasalueesta. Kuvan yläosassa on nähtävissä pääkattilalaitoksen keltainen katto ja savupiippu. Tehdasalueen keskivaiheilla sijaitsee varakattilalaitos, jonka sijainti kuvassa on helpointa paikantaa korkean tiilipiipun avulla. Tehdasalue on laajuudeltaan yhteensä 15 hehtaaria (Liedes 2015), ja tehtaiden sijoittelua on määrittänyt aiempi vilkas junaliikenne tehdasalueella.

3 HÖYRYVERKKO

Höyry on yleinen teollisuudessa käytössä oleva lämmitysjärjestelmien väliaine. Höyry tuotetaan höyrykattilassa, josta se johdetaan höyryputkistoa pitkin kulutuskohteeseen. Kulutuskohteessa höyry lauhtuu vedeksi ja lauhde yleensä palautetaan kattilan syöttövedeksi lauhdeputkistoa pitkin. Näin lisäveden valmistuksen tarvetta saadaan vähennettyä merkittävästi. (Huhtinen et al. 2008, 80–81.)

Höyryn suosioon lämmitysaineena on useita syitä. Näistä merkittävin on se, että höyrystymisessä ja lauhtumisessa tapahtuva faasimuutos sitoo/luovuttaa erittäin suuren määrän energiaa höyrykiloa kohti. Tällöin höyryverkon putkistot voidaan mitoittaa merkittävästi esimerkiksi kaukolämpöputkia pienemmiksi. Muita höyryn etuja lämmönsiirron väliaineena ovat esimerkiksi halpa hinta ja hyvä lämmönsiirtokerroin. Höyryä käytettäessä on kuitenkin huomioitava esimerkiksi korroosio-ongelmat, jäätymisvaara käyttämättömissä putkistoissa ja lauhteenpoisto. (Huhtinen et al. 2008, 80.)

3.1 Höyryn tuotanto

Höyryn tuottaminen tapahtuu höyrykattilassa, jotka ovat nykyään yleisimmin vesiputkikattiloita. Vesiputkikattilaan syötettävä vesi höyrystyy höyrystinputkissa. Kattilan tulipesään syötetään polttoainetta, jonka kemiallinen energia vapautuu poltettaessa sitä palamisilmassa olevan hapen kanssa. Poltosta syntyvät kuumat savukaasut luovuttavat lämpöä kattilan seinillä sijaitseviin höyrystinputkiin. Tulitorvi-tuliputkikattilassa savukaasut luovuttavat lämpöä tulitorvea ja tuliputkia ympäröivään veteen. Tulitorvi-tuliputkikattiloita käytetään pienemmissä teholuokissa, pääasiassa kylläisen höyryn tuotantoon (Vakkilainen 2010). Yleensä höyryn tuottaminen kattilassa sisältää kolme vaihetta: syöttöveden esilämmitys, veden höyrystäminen ja höyryn tulistaminen. (Huhtinen et al. 2000, 7.) Voimalaitoksissa on nämä kaikki vaiheet, mutta tässä työssä tarkasteltavat kattilat ovat suunniteltuja ainoastaan prosessihöyryn tuottamiseen, joten niissä ei ole tulistimia.

Äetsän höyryntuotanto on eriytetty omaksi FC Energia Oy -yhtiöksi. Yrityksen omistajia ovat Leppäkosken Sähkö Oy 66 prosentin osuudella ja Kemira Chemicals Oy 34 prosen-

tin osuudella. FC Energia Oy on perustettu vuonna 2000 vastaamaan tehtaan höyryn, puhtaan prosessiveden ja paineilman tuotannosta (Leppäkoski). Yritys tuottaa myös kaiken kaukolämmön läheiseen Pehulan taajamaan. (Liedes 2015.)

Höyryä tuotetaan Äetsässä pääasiassa HK10-pääkattilalaitoksella, mutta tarpeen mukaan myös HK11-varakattilalaitoksella. Pääkattila on teholtaan 39 MW ja käyttää pääpolttoaineenaan natriumklooraatin valmistuksessa syntyvää vetyä. Pääkattilan polttimet on kuitenkin suunniteltu kattilaa pienemmälle teholle, joten todellinen kattilan maksimiteho on noin 30 MW. Varapolttoaineena toimii raskas polttoöljy. Kattila on tyypiltään kaksoislieriökattila. Varakattilat ovat tulitorvi-tuliputkikattiloita, joita on kaksi kappaletta. Myös varakattiloiden pääpolttoaineena toimii vetykaasu, tarvittaessa kattiloissa on myös mahdollista polttaa kevyttä polttoöljyä. Molempien varakattiloiden teho on noin 10 MW. (Su-honen 2015.)

Puhtaan vedyn käyttäminen polttoaineena on melko harvinaista. Vedyn suurin vahvuus polttokäytössä liittyy sen päästöttömyyteen. Vedyn teoreettinen palaminen tapahtuu seuraavan reaktioyhtälön mukaisesti.



H_2 vetyatomi

O_2 happiatomi

H_2O vesi(höyry)

Ideaalisessa palamisessa vetykattilan savukaasut sisältäisivät ainoastaan vesihöyryä ja palamisilman muita komponentteja, pääasiassa typpeä. Todellisuudessa palamisilmassa oleva typpi reagoi palamisilman hapen kanssa muodostaen NO_x -päästöjä. (Huhtinen et al. 2000, 92–93.)

Vedyn tuotantomäärät pystytään laskemaan natriumklooraatin valmistuksessa pätevien reaktioyhtälöiden avulla, kun tuotetun klooraatin määrä tiedetään. Vedyn kulutusta mitataan sekä pääkattilalaitoksella että varakattilalaitoksella. Lisäksi vetyä poltetaan T IV:n katti-

lassa, jossa lämmitetään lämmönsiirtoöljyä. Polttamisen lisäksi vetyä hyödynnetään pulottamalla paineistettua vetyä asiakkaalle ja hyödyntämällä sitä hienokemian prosessien raaka-aineena. Vetytaseen tarkka selvittäminen antaisi lisäinformaatiota mahdollisten vedyn käyttöön liittyvien investointien päätöksenteon tueksi. Tässä kandidaatintyössä pyritään antamaan lisäinformaatiota myös tarkemman vetytaseen selvityksen mahdollistamiseksi.

3.2 Höyryverkko ja höyrin kulutus

Höyryverkolla tarkoitetaan tässä yhteydessä höyrin siirtoon tarkoitettua putkiston ja siihen olennaisesti liittyvien laitteiden, kuten lauhteenpoistimien ja erityyppisten venttiilien muodostamaa kokonaisuutta. Höyryverkon paineen on säilyttävä kulutusasteessa riittävänä, jotta tehtaiden prosesseja voidaan ajaa. Tästä syystä höyryntuotannon luotettavuus on oleellista. Höyryverkon raportointia käsittelevässä luvussa 5 käsitellään tarkemmin mahdollisia keinoja, joilla voidaan seurata kattiloiden käyttövarmuutta.

Höyrin virtausmittarit ovat tyypiltään vortex-anturillisia, joiden mittaustarkkuus on hyvä. Eräs virtausmittareiden ongelma liittyy hyvin pieniin massavirtoihin. Esimerkiksi vortex-anturin mittaustulos on noin 20:1, joten anturin mittaustulokseen saattaa syntyä virhettä tilanteissa, joissa massavirta putkessa on pieni. (Motiva 2011, 22.) Käytännössä tällainen tilanne on hyvin usein varakattilalla, jota nimensä mukaisesti käytetään ainoastaan tarpeen vaatiessa.

Tehtaiden raportoitu höyrinkulutus on vuoden 2015 aikana vaihdellut välillä 6178–7835 MWh/kk. Höyrin pääasialliset käyttökohteet tehtaissa ovat erilaiset epäsuorat lämmitysmenetelmät. Prosessisäiliöissä tapahtuvat reaktiot tarvitsevat tietyn lämpötilan reaktion mahdollistamiseksi. Tässä kandidaatintyössä keskitytään tarkastelemaan nykyistä kuluusta ottamatta tarkemmin kantaa tehtaiden prosesseihin liittyvään mahdolliseen höyrin säästöpotentiaaliin. Sen sijaan yleisemmin höyryverkkoon liittyviä huomioita tuodaan esille.

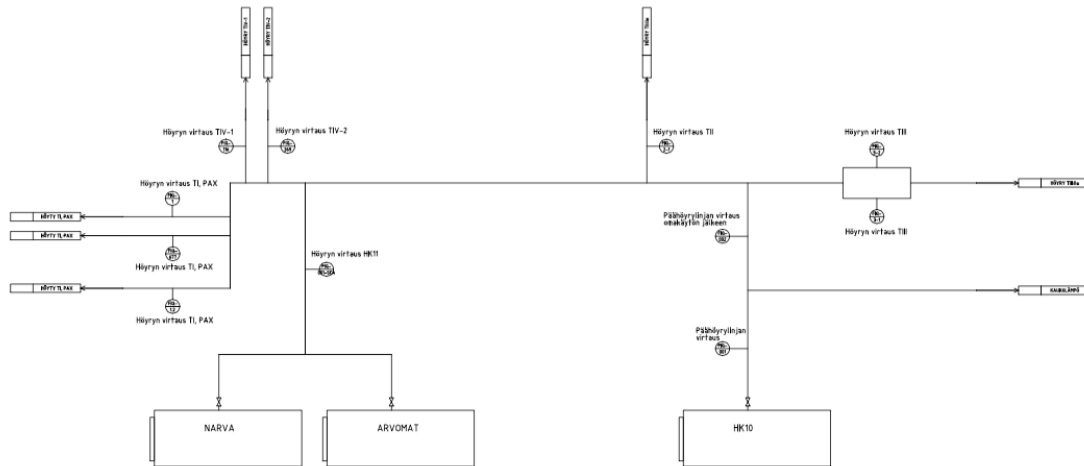
Höyryverkosta on tehty kulutuspieluettelo, joka on kuitenkin jäänyt päivittämättä höyryverkkoon tehtyjen muutosten jälkeen. Kulutuspieluetteloon on koottu kaikki tehtaalla höyrinkulutuskohteet. Suurin yksittäinen höyryverkkoon liittyvä projekti, joka viime

vuosina on tehty, on rakennusten höyrylämmittimien korvaaminen kaukolämmöllä toimivilla lämmittimillä. (Huhtala 2015.) Höyrylämmittimien lauhteita ei ole palautettu, joten kaukolämpölämmittimien käyttöönotolla on aikaansaatu merkittävä säästö lisäveden valmistustarpeessa. Kulutuspisteluetelo päivitettiin tämän työn yhtenä osana. Päivitys suoritettiin tehtaiden laitosmiehiä haastatteleamalla ja luettelon mukaisia kohteita läpikäymällä. Huomioitavaa on, että monen tehdasrakennuksen nykyinen käyttö eroaa alkuperäisestä käyttötarkoituksesta. Tästä syystä osassa rakennuksista on jäänyt jäljelle aikanaan rakennettua höyryverkostoa, jolle ei enää ole käyttöä. Pääasiassa putkilinjat ovat pienehköjä, mutta toisaalta osittain myös tällä hetkellä tarpeettomia. Ylimääräisten linjojen purkaminen selkiyttäisi olemassa olevaa verkostoa, ja samalla mahdollisten vuotojen todennäköisyys vähenisi. Erityisesti T II:n tiloissa sijaitsee tällä hetkellä käyttämättömiä linjoja.

Merkittävämpi huomio on lauhteenpalautuksen puuttuminen täysin. Tehtaissa T III ja T IV sijaitsee lauhdesäiliöt, mutta lauhteita käytetään ainoastaan tehtailla suoritettavissa pesuissa ja muissa vastaavissa toimissa. Lauhteiden palautus mahdollistaisi merkittävän energiansäästön. Sen lisäksi, että lauhteet ovat joesta otettavaa raakavettä lämpimämpää, ovat ne valmiiksi vedenkäsittelyn läpikäyneitä. T III:n lauhteiden palautuksen toteuttaminen olisi edullisempaa, sillä lauhdeputkien pituus olisi murto-osa T IV:n vaatimasta putkimäärästä. T III:n kuluttama höyrymäärä on lisäksi lähes kaksinkertainen, joten lauhteiden palautuksen energiansäästöpotentiaali on suurempi. Lauhteiden energiansäästöpotentiaalia tarkastellaan tarkemmin luvussa 5.

4 HÖYRYTASETARKASTELU

Tässä luvussa tarkastellaan tehdasalueen höyrytasetta lokakuun 2015 ajalta. Tavoitteena on hyödyntää tehtaiden automaatiojärjestelmiin tallentuvaa mittausdataa mahdollisimman tarkasti. Höyryn runkoputkiston yksinkertaistettu kaavio on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2: Höyryverkon runkoputkiston yksinkertaistettu kuva, jossa on esitetty virtausmittareiden sijainnit. (muokattu lähteestä Kemiran PI-kaaviot.)

HK10-kattilalla käytettiin virtausmittausten perusteella vetyä yhteensä 4 839 950 normi- m^3 ja raskasta polttoöljyä 11,842 tonnia. Vedyn tehollinen lämpöarvo on $10,05 \text{ MJ/m}^3$, joka on noin $0,00279 \text{ MWh/m}^3$ (Teräsvirta 2010, 3). Raskaan polttoöljyn lämpöarvo $40,7 \text{ MJ/kg}$, eli noin $11,306 \text{ MWh/kg}$ (Huhtinen et al. 2000, 45). Kattilaan syötettyjen polttoaineiden energiasisältö on

$$E_{\text{pa}} = V_{\text{H}_2} \cdot Q_{i,\text{H}_2} + m_{\text{RPÖ}} \cdot Q_{i,\text{RPÖ}} \quad (2)$$

E_{pa} kattilaan syötettyjen polttoaineiden sisältämä energia [MWh]

V_{H_2} poltetun vetykaasun tilavuus [n-m^3]

Q_{i,H_2} vedyn tehollinen lämpöarvo [MWh/n-m^3]

$m_{\text{RPÖ}}$ poltetun raskaan polttoöljyn massa [t]

$Q_{i,\text{RPÖ}}$ raskaan polttoöljyn lämpöarvo [MWh/kg]

Polttoaineen tuoma energiasisältö kattilaan on siis lokakuun ajalta yhtälön 2 mukaisesti

$$E_{pa} = 4\,839\,950 \text{ n - m}^3 \cdot 0,00279 \frac{\text{MWh}}{\text{m}^3} + 11\,842 \text{ kg} \cdot 11,306 \frac{\text{MWh}}{\text{kg}}$$

$$= 13\,637 \text{ MWh}$$

Kattilan jälkeisen höyryn virtausmittauksen höyrymäärä on 16 346 tonnia. Kattila tuottaa kylläistä höyryä, jonka absoluuttipaine on 11 bar. Kylläisen höyryn entalpia 11 barin paineessa voidaan lukea esimerkiksi kylläisen vesihöyryn ominaisuustaulukosta tai hyödyntää jotakin valmista laskuria. Käytännössä paine luonnollisesti vaihtelee hieman kulutuksen vaihtelusta riippuen asetusarvon molemmiin puolin. Kattilasta poistuvan höyryn energiasisältö on

$$E_h = m_h \cdot h_h = m_h \cdot h''(11 \text{ bar}) \quad (3)$$

E_h höyryn energiasisältö [MWh]

m_h tuotetun höyryn määrä [t]

h_h höyryn ominaisentalpia [MWh/t]

Pääkattilan tuottama höyrymäärä on energiasisällöltään yhtälön 3 mukaisesti

$$E_h = 16\,346 \text{ t} \cdot 0,7725 \frac{\text{MWh}}{\text{t}} = 12\,637 \text{ MWh}$$

Ensimmäisen höyryn virtausmittauksen jälkeen sijaitsee omakäytön höyrylinjat kaukolämpövaihtimelle, syöttövesisäiliön lämmitykselle ja polttimen hajotushöyrylle. Hajotushöyryä käytetään raskasta polttoöljyä poltettaessa, vedyn hajotusaineena toimii ilma. Kaukolämpövaihtimen tehoa mitataan raportointitietokoneelle, lokakuussa mitattu energiamäärä oli 874,4 MWh. Höyrylinjassa on paineenalennusventtiili ennen vaihdinta, paineenalennusventtiilin jälkeen sijaitsevan paikallismittauksen mukaan linjan paine on 9 barG eli absoluuttipaineeksi muutettuna 10 bar. Paineenalentimen toiminta oletetaan isentalpiseksi eli höyryn entalpia ei muutu paineenalennusventtiilissä (SpiraxSarco 2015). Suoritettujen lämpötilamittausten perusteella lauhde poistuu vaihtimesta noin 57-asteisena (Liite 3). Kaukolämmön paluulämpötila oli mittaushetkellä automaatiojärjestelmän mukaan noin 55 °C, joten kylmän pään asteisuus on täten noin 2 °C. Höyryn tuloentalpia

vaihtimeen on siis 2781 kJ/kg (0,7725 MWh/t) ja lauhteen poistumisentalpia 239 kJ/kg (0,0664 MWh/t). Kaukolämmönvaihtimeen kuluva lämmityshöyryn määrä voidaan ratkaista lämmönsiirtimen energiataseen avulla.

$$E_{KL} = m_{KL} \cdot c_{p,KL} \cdot \Delta T_{KL} = m_h \cdot (h_h - h_l) \quad (4)$$

E_{KL} tuotettu energia kaukolämmönvaihtimessa [MWh]

m_{KL} kaukolämpöveden massa [kg]

$c_{p,KL}$ kaukolämpöveden ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]

T_{KL} kaukolämpöveden lämpötila [°C]

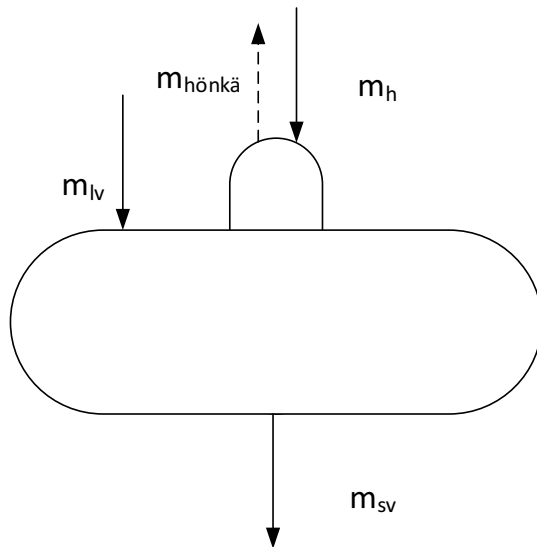
h_l lauhteen entalpia [MWh/t]

Yhtälön 4 mukaisesti kaukolämmityksen vaatima lämmityshöyryn määrä lokakuun ajalta on

$$m_h = \frac{E_{KL}}{(h_h - h_l)} = \frac{874,4 \text{ MWh}}{(0,7725 - 0,0664) \frac{\text{MWh}}{\text{t}}} = 1238 \text{ t}$$

Vaihtimen lauhde ohjataan syöttövesisäiliöön menevään linjaan, joten lauhteen sisältämä energia hyödynnetään normaalissa ajotilanteessa.

Syöttövesisäiliön kuluttaman omakäyttöhöyryn määrä voidaan määrittää syöttövesisäiliön massa- ja energiataseiden perusteella. Syöttövesisäiliön massatase on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3: Kuva syöttövesisäiliön massataseesta. Kuvassa esitetyt merkinnät vastaavat yhtälöissä käytettyjä (sv tarkoittaa syöttövedettä, h höyryä, lv lisävedettä ja hönkä termisen kaasunpoiston mukana poistuvia kaasuja).

Syöttövesisäiliössä on kylläinen tila. HK10-kattilalaitoksen syöttövesisäiliön asetuspainne on 2,1 barA, jolloin syöttövesisäiliön lämpötila on noin 122 °C. Syöttövesisäiliöön tulevan lisäveden määrä voidaan laskea raportointijärjestelmään tallentuvien mittaustietojen perusteella. Kattilalaitoksen vedenkäsittelyssä tuotetaan puhdasta vettä syöttöveden lisäksi tehtaan prosesseihin. Syöttövesisäiliön lisäveden määrä voidaan tällöin ratkaista vähentämällä lisäveden kokonaismäärästä tehtaalle lähtevän veden määrä. Mittaustietojen perusteella syöttövesisäiliön lisävesimäärä on $29\,398,2\text{ m}^3 - 12\,626,2\text{ m}^3 = 16\,772\text{ m}^3$. Lisäveden lämpötilaksi oletetaan 20 °C, jolloin veden tiheys on 997 kg/m^3 . Laskennassa oletetaan hönkähöyryn määrä vähäiseksi.

Syöttövesisäiliön lisäveden massa on

$$m_{lv} = \rho_{lv} \cdot V_{lv} \quad (5)$$

m_{lv} lisäveden massa [kg]

ρ_{lv} lisäveden tiheys [kg/m^3]

V_{lv} lisäveden tilavuus [m^3]

Yhtälön 5 mukaisesti lisäveden massa on

$$m_{lv} = 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 16772 \text{ m}^3 = 16\,721\,684 \text{ kg} \approx 16\,722 \text{ t}$$

Kuten aiemmin mainittiin, ohjataan kaukolämmönvaihtimen lauhde normaalisti syöttövesisäiliön lisävesilinjaan. Tarkastelujakson aikana lauhde on kuitenkin todennäköisesti ohjattu kanaaliin kunnossapitoteknisistä syistä (Olli 2016). Tätä oletusta hyödynnetään laskennassa. Syöttövesisäiliön energiatase on seuraava

$$m_{sv} \cdot h_{sv} = m_{lv} \cdot h_{lv} + m_h \cdot h_h \quad (6)$$

m_{sv} syöttöveden massa [t]

h_{sv} syöttöveden entalpia [MWh/t]

h_{lv} lisäveden entalpia [MWh/t]

Massatase syöttövesisäiliölle on puolestaan kuvan 3 mukaisesti

$$m_{sv} = m_{lv} + m_h \quad (7)$$

Edellä mainittujen yhtälöiden 6 ja 7 perusteella voidaan ratkaista syöttövesisäiliön vaatima omakäyttöhöyryn määrä. Omakäyttöhöyryn entalpia on sama kuin kattilassa tuotetun eli 0,7725 MWh/t.

$$m_h = \frac{m_{lv} \cdot (h_{sv} - h_{lv})}{h_h - h_{sv}} \quad (8)$$

Höyrymäärä on siis yhtälön 8 mukaisesti

$$m_h = \frac{16\,722 \text{ t} \cdot (0,1419 - 0,0233) \frac{\text{MWh}}{\text{t}}}{(0,7725 - 0,1419) \frac{\text{MWh}}{\text{t}}} = 3\,145 \text{ t}$$

Tällöin syöttövesisäiliön omakäyttöhöyryn energiamäärä on $3\,145 \text{ t} \cdot 0,7725 \text{ MWh/t} = 2\,430 \text{ MWh}$. Syöttöveden massa tarkastelujakson aikana on siis $16\,722 \text{ t} + 3\,145 \text{ t} = 19\,867 \text{ t}$. Tuotettu höyrymäärä HK10:llä oli mittauksen perusteella 16 346 tonnia, joten ulospuhalluksesta ja vastaavista poistuu merkittävä määrä höyryä tai vaihtoehtoisesti jokin

mittauksista vaatisi kalibroinnin. Myös syöttöveden massavirtaa mitataan, mutta mitausta ei ole viety raportointikoneen järjestelmään. Suoraan syöttöveden määrää seuraamalla olisi helppo seurata tuotetun höyrymäärän ja syöttövesimäärän erotusta.

Höyryn virtaus omakäytön jälkeen on ollut lokakuussa yhteensä 11 659 tonnia. Täten mittausten perusteella kattilalaitoksen omakäyttöön ja kaukolämpöön on kulunut 4 687 tonnia. Kaukolämpöön ja syöttövesisäiliön lämmittämiseen kulunut höyrymäärä on edellä esitetyn laskennan perusteella 4 385 t, joten muuhun omakäyttöön on kulunut 302 tonnia höyryä. Käytännössä kulutuskohteet ovat lieriön ulospuhallus, öljypolton hajotus-höyry sekä päähöyrylinjasta lähtevä starttiventtiili.

Tehtaiden yhteenlaskettu höyrynkulutus on liitteen 1 tietojen perusteella 11 371 tonnia. Varakattiloissa tuotettu höyrymäärä oli tarkastelujakson aikana 254 t, joten mittaustietojen perusteella runkoputkiston höyrynkulutus on yhteensä

$$m_{\text{RP}} = m_{\text{HK10}} + m_{\text{HK11}} - \sum m_{\text{T}} \quad (9)$$

m_{RP} runkoputkiston höyrynkulutus [t]

m_{HK10} pääkattilan höyryntuotanto omakäytön jälkeen [t]

m_{HK11} varakattiloiden höyryntuotanto [t]

m_{T} tehtaan höyrynkulutus [t]

Yhtälöön 9 arvot sijoittamalla

$$m_{\text{RP}} = 11\,659\text{ t} + 254\text{ t} - 11\,371\text{ t} = 542\text{ t}$$

Varakattiloiden lämmityslinja lähtee sellaisesta kohdasta höyryverkkoa, että se näkyy tuotettuna höyrynä, muttei kulutettuna. Osa lauhtuneesta höyrystä lisäksi poistuu lauhteenpoistimien kautta ennen kulutusmittareita. Mikäli koko höyrymäärä kuluisi varakattiloiden lämmitykseen, olisi lämmitysteho keskimäärin ollut seuraavan yhtälön mukainen.

$$P_{\text{HK11,lämmitys}} = \frac{m_{\text{RP}}}{t_{\text{lokakuu}}} \cdot (h'' - h') \quad (10)$$

$P_{\text{HK11,lämmitys}}$ varakattiloiden lämmityksen keskiteho [MW]

t_{lokakuu} lokakuun tuntimäärä [h]

h'' kylläisen höyryn entalpia [MWh/t]

h' kylläisen veden entalpia [MWh/t]

Höyryverkon lämmitysteho yhtälön 10 perusteella on

$$P_{\text{HK11,lämmitys}} = \frac{542 \text{ t}}{31 \cdot 24 \text{ h}} \cdot (0,7714 - 0,2119) \frac{\text{MWh}}{\text{t}} = 0,41 \text{ MW}$$

Yllä olevassa laskelmassa oletetaan, että ainoastaan höyryn lauhtumisentalpia hyödynnetään kattilan lämpimänä pidossa. Mikäli kattila on verkon paineessa, on tämä todellinen tilanne. On myös muistettava, että osa höyrystä lauhtuu putkistossa ja poistuu lauhteenpoistimien kautta, joten kattiloita lämmittävä höyry määrä on pienempi. Lisäksi on suhtauduttava kriittisesti höyrymittausten todenmukaisuuteen. Mittaukset on kalibroitu vuoden 2015 aikana, mutta tämä ei takaa mittausten näyttävän täysin oikein. Kuitenkin yhtälön 9 mukaan laskettua tuotetun ja kulutetun höyry määrän erotusta voidaan hyödyntää höyrymittausten kunnonvalvonnassa. Suhteuttamalla erotus tuotettuun höyry määrään saadaan eräs mittausten luotettavuuden seurantaparametri.

Runkoputkisto on kokoa DN200 lukuun ottamatta pääkattilalaitoksen haaraa, joka on kooltaan DN250. Tampereen seudun keskilämpötila lokakuussa 2015 on ollut 5,1 °C (Ilmatieteenlaitos 2016). Höyryn siirtoputkiston lämpöhäviöt ovat erittäin karkeilla oletuksilla laskettuna suuruusluokaltaan noin 50 MWh, joten varakattiloiden lämmitys on huomattavassa osassa runkoputkiston höyrynkulutuksessa. Putkisto on pintapuolisen tarkastelun perusteella hyvin eristetty, joten lisäeristyksillä saavutettavat hyödyt jäisivät pieniksi.

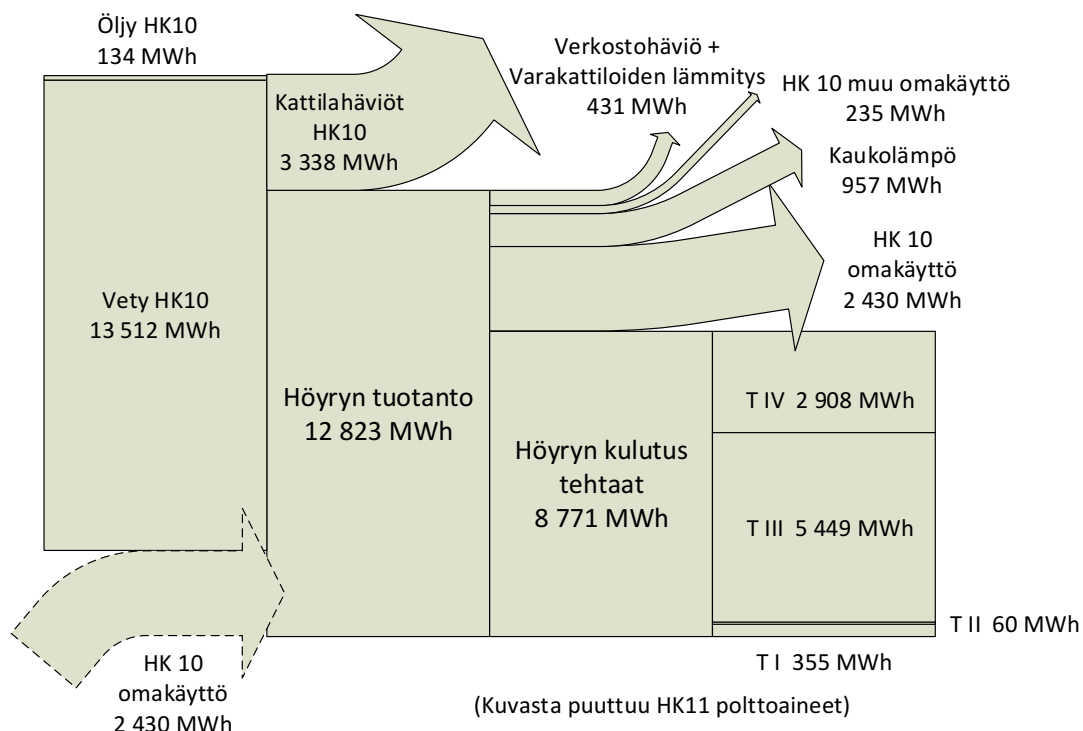
Tehtaiden höyrynkulutukset on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1: Taulukossa on esitetty eri tehtaiden höyrynkulutukset ja höyrylinjojen painetasot.

Tehdas	Höyryn kulutus [t]	Painetaso [barG]	Höyryn kulutus [MWh]
T I	460	9/6/3,5	355
T II	78	9	60
T III	7063	9	5449
T IV	3770	9	2908

Höyryn kulutukset megawattitunteina on laskettu olettaen paineenalennusventtiilien toiminta isentalpiseksi. Tällöin kunkin virtausmittarin kohdalla entalpia vastaa 10 barin absoluuttipaineen kylläisen höyryn arvoa 2777 kJ/kg eli 0,7714 MWh/t. Paineenalennusventtiilit sijaitsevat höyrylinjoissa hieman ennen virtausmittauksia, joten höyry virtaa alempien painetasojen virtausmittausten läpi hieman tulistuneena.

Kulutettujen polttoaineiden energiasisällöt ja niiden jakautuminen eri kulutuskohteisiin on esitetty kuvassa 4.

**Kuva 4:** Kuvassa on esitetty Sankey-diagrammi Äetsän tehtaiden höyrytaseesta lokakuun 2015 ajalta. On huomioitava, että varakattiloiden polttoaineita ei ole esitetty kuvassa.

Tehtaiden sisällä höyryn virtausmittauksia on melko vähän; tämän työn yhteydessä tehdyn selvityksen perusteella yhteensä yhdeksän kappaletta. Näistä yksi sijaitsee T III:n tiloissa ja loput T IV:n alueella. Näiden kahden tehtaan osalta laskettiin mittausten piirissä oleva osuus koko tehtaan höyrynkulutuksesta. Mittausten positiot ja lukemat on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2: Tehtaiden omien höyrymittausten laajuus taulukoituna.

Tehdas ja mittauksen positio	Höyryn kulutus [t]	Osuus tehtaan koko- naiskulutuksesta [%]
T III		
FC-524	1005	18
T IV-1		
FC-1125	1522	48
FC-1045A	768	24
FC-1425	445	14
Yhteensä	2735	86
T IV-2		
FI-131	7	1
FIQ-146	0	0
FIQ-429	42	7
FIQ-246	148	25
FC-160	137	23
Yhteensä	334	56

Taulukkoa tarkastellessa on huomattava, että T IV-2:n jokainen mittaus on näyttänyt vakioarvoa koko lokakuun ajan. Täten näiden mittausten toiminnan tarkastus olisi suotavaa.

Lauhteiden palautuksen energiansäästöpotentialin laskennassa hyödynnetään syöttövesisäiliön energiatasetta. Energiataseessa ei huomioida termisen kaasunpoiston vaatimaa hönkähöyryä. Syöttövesisäiliön stationääritilan energiatase on esitetty kuvassa 3. Energiatase on muotoa

$$q_{m,sv} \cdot h_{sv} = q_{m,lv} \cdot h_{lv} + q_{m,h} \cdot h_h + q_{m,l} \cdot h_l \quad (11)$$

Lisäveden lämpötilaksi oletetaan 20 °C. Nykytilanteessa lauheteita ei palauteta syöttövesisäiliöön, joten energiatase yksinkertaistuu muotoon:

$$q_{m,sv} \cdot h_{sv} = q_{m,lv} \cdot h_{lv} + q_{m,h} \cdot h_h \quad (12)$$

Kun lisävettä korvataan lämpimämmällä lauhteella, vähenee höyryn tarve.

$$E_{\text{säästö}} = m_l \cdot (h_l - h_{lv}) \quad (13)$$

$E_{\text{säästö}}$ syöttöveden lämmityksessä saavutettava hyöty kuukaudessa
[MWh]

Mikäli T III:n höyrynkulutuksesta 20 % pystyttäisiin palauttamaan lauhteina pääkattilan syöttövesisäiliöön, säästäisi se energiaa tarkastelukuukauden aikana yhtälön 13 mukaisesti

$$E_{\text{säästö}} = 0,2 \cdot 7063 \text{ t} \cdot (0,070 - 0,029) \frac{\text{MWh}}{\text{t}} \approx 58 \text{ MWh}$$

Kyseinen melko pieni palautettavan lauhteen osuuden oletus johtuu siitä, että suuri osa T III:n lauhteista on niin sanottuja likaisia lauhteita, joita ei pystyisi palauttamaan suoraan lisäveden sekaan. Laskennassa on oletettu palautettavan lauhteen lämpötilaksi 60 °C ja lisäveden lämpötilaksi 25 °C. Höyrytonneiksi muutettuna energiamäärä on

$$m_h = \frac{E_{\text{säästö}}}{h_h} = \frac{58 \text{ MWh}}{0,7725 \frac{\text{MWh}}{\text{t}}} = 75 \text{ t} \quad (14)$$

Taloudelliset hyödyt ovat Kemiran kannalta nykytilanteessa kyseenalaiset, mikäli palautettaville lauhteille ei sovi rahallista korvausta. Merkittävämmät hyödyt saavutetaan esimerkiksi vedenkäsittelytarpeen vähenemisenä ja siitä, että vedenkäsittelylaitteiston kapasiteetista suurempi osa voidaan kohdistaa prosessiveden valmistukseen.

5 HÖYRYNTUOTANNON JA -KULUTUKSEN RAPORTOINTI

Koska höyryn tuotanto ei tapahdu yrityksen toimesta, on raportoinnilla suuri merkitys laskutuksen kannalta. Tämän lisäksi kustannusten jako tarkemmin yrityksen sisällä eri kustannuspaikoille on yleistynyt. Tästä syystä tuotetun kokonaishöyrymäärän lisäksi on tiedettävä tehdaskohtaiset höyrymäärät. Tämä luku keskittyy höyryverkon raportoinnin tarkasteluun.

5.1 Nykyinen raportti

Höyryn tuotantoa ja kulutusta seurataan Microsoft Excel -pohjaisella raportointityökalulla. Raportointi on säilynyt ennallaan useita vuosia. Raportoinnista vastaava henkilö on kuitenkin vaihtunut kyseisenä aikana eläköitymisestä johtuen, joten raportin tarkempi tarkastelu on ajankohtaista. Tässä työssä on tavoitteena selvittää raportissa selvittämättömien korrelaatiolukujen termodynaamiset tai fysikaaliset perusteet ja pohtia yhtälöiden tarkkuutta. Raportti kootaan kuukausittain. Liitteessä 2 on esitetty ote nykyisestä raportista.

Raporttiin kootaan tehdaskohtaisesti höyryn kulutuslukemat virtausmittausten perusteella. Raportissa eritellään pääkattilalla ja varakattiloilla tuotetut höyrymäärät ja käytetyt polttoaineet. Yrityksen kannalta on edullisinta tuottaa höyryä vedyllä, sillä vetyä syntyy sivutuotteena ja siitä on toistaiseksi ylituotantoa suhteessa kulutukseen.

Raportin tekohetkellä ei todennäköisesti ole ollut käytössä yhtä laajaa mittausdataa kuin tällä hetkellä on saatavissa. Esimerkiksi vedyn kulutus lasketaan tuotetun höyryn ja muiden polttoaineiden kulutuksen kautta. Yhtälössä 15 esitetään laskentakaava vedyn kuukausittaiselle kulutukselle.

Poltetun vedyn määrä =

$$\frac{m_{\text{steam}}(\text{t}) \cdot 0,771 - \frac{m_{\text{RPÖ}}(\text{kg})}{1000} \cdot 11,3 \cdot 0,9 - \frac{V_{\text{KPÖ}}(\text{ltr}) \cdot 0,845}{1000} \cdot 11,83 \cdot 0,9}{0,9} \quad (15)$$

m_{steam} kattiloissa tuotettu höyry määrä

$m_{\text{RPÖ}}$ poltetun raskaan polttoöljyn massa

$V_{\text{KPÖ}}$ poltetun kevyen polttoöljyn tilavuus

Yhtälön 15 mukaisesti poltetun vedyn määrä on laskettu raportissa energiataseen avulla tuotetusta höyry määrästä. Kattiloissa tuotetaan 10 barin (gauge) höyryä, joten 0,771 tarkoittaa höyryn entalpia yksikössä MWh/t. Termin tarkkuus on hyvä, sillä h,s-piirroksista katsoen kylläisen vesihöyryn entalpia on 2781 kJ/kg, joka on haluttuun yksikköön muutettuna noin 0,7725 MWh/t. 1000 on yksinkertaisesti skaalausermi, jolla muutetaan kilogrammat tonneiksi. 11,3 kuvaa raskaan polttoöljyn lämpöarvoa yksikössä MWh/t. Kirjallisuudessa lämpöarvo ilmoitetaan yleisemmin yksikössä MJ/kg. 11,3 MWh/t on edellä mainittuun yksikköön muutettuna 40,68 MJ/kg. Esimerkiksi Huhtisen et al. (2000, 45) mukaan raskaan polttoöljyn kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on 40,7 MJ/kg. Kevyen polttoöljyn lämpöarvo yhtälössä on 11,83 MWh/t eli 42,588 MJ/kg. Huhtinen et al. (2000, 45) on taulukoinut kevyen polttoöljyn teholliseksi lämpöarvoksi 42,7 MJ/kg. Alakangas et al. (2000, 155) on puolestaan taulukoinut raskaan polttoöljyn lämpöarvoksi saapumistilassa 40,9–41,2 MJ/kg ja kevyelle 42,4–42,9 MJ/kg. Lisäksi samasta taulukosta on luettavissa kevyen polttoöljyn tiheyden olevan noin 840–870 kg/m³. Termi 0,845 siis muuntaa kevytöljylitrat tonneiksi. Ainoa tarkkuudeltaan kyseenalainen vakiotermi yhtälössä on höyryntuottohyötysuhde, jonka arvona käytetään laskennassa 0,9:ää. Kattilahyötysuhteen ja höyryntuottohyötysuhteen arvot lasketaan luvussa 5.2.

Nykyisessä raportissa käytetään höyryn laskutuksessa höyrytonneja megawattitunneiksi muutettaessa korrelaatioterminä lukua 0,630 MWh/ton. Käytännössä tämä tarkoittaa, että höyryn sisältämästä energiasta oletetaan saatavan hyötykäyttöön lauhtumislämpö ja pieni alijäähtyminen.

$$h_1 = h''(10 \text{ bar}) - 0,630 \frac{\text{MWh}}{\text{ton}} \quad (16)$$

h_1 lauhteen entalpia [MWh/t]

h'' kylläisen höyryn entalpia [MWh/t]

Lauhteen entalpia määritetään yhtälöön 16 arvot sijoittamalla.

$$h_1 = 0,7714 \frac{\text{MWh}}{\text{ton}} - 0,630 \frac{\text{MWh}}{\text{ton}} = 0,1414 \frac{\text{MWh}}{\text{ton}}$$

Lukema vastaa 121-asteisen kylläisen veden arvoa eli melko tarkkaan syöttöveden entalpiaa.

Nykyisessä käytössä olevassa raportissa ei huomioida verkoston häviöitä mitenkään. Tuotettu höyrymäärä lasketaan kaikkien höyryn kulutuskohteiden summana seuraavasti.

$$m_{h,tot} = m_{TI} + m_{TII} + m_{TIII} + m_{TIV} + m_{OK} \quad (17)$$

$m_{h,tot}$ tuotettu höyrymäärä [t]

m_{TI} tehtaalla I kulutettu höyrymäärä [t]

m_{TII} tehtaalla II kulutettu höyrymäärä [t]

m_{TIII} tehtaalla III kulutettu höyrymäärä [t]

m_{TIV} tehtaalla IV kulutettu höyrymäärä [t]

m_{OK} pääkattilalaitoksen omakäyttöön ja kaukolämmönvaihtimeen
kulutettu höyrymäärä [t]

Höyryn tuotanto HK10:llä perustuu mittaukseen, mutta HK11:n tuotettu höyrymäärä lasketaan erotuksena.

$$m_{HK11} = m_{h,tot} - m_{HK10} \quad (18)$$

Laskentatavan johdosta tuotettu höyrymäärä vastaa aina kulutettua höyrymäärää laskennallisesti. Laskennan ongelmat ilmenevät esimerkiksi tilanteessa, jossa varakattilat eivät ole olleet päällä koko kuukauden aikana. Tällöin höyryverkossa olevien lauhteenpoistinten ja varakattiloiden lämmityslinjan kautta poistuvien massavirtojen johdosta yhtälön 18 perusteella laskien varakattiloiden höyryntuotanto voi olla negatiivinen.

5.2 Vaihtoehtoinen raportointimalli

Vaihtoehtoisen raportointityökalun kehittämiseksi on useita syitä. Kenties merkittävimmät syyt ovat nykyisen raportin lukujen heikko jäljitettävyyden ja se, että nykyinen raportti ei tarjoa tarpeeksi informaatiota aiheeseen liittyvään päätöksentekoon.

Vaihtoehtoisen raportin tekemisen lähtökohdaksi on pitää raportti mahdollisimman yksinkertaisena, mutta kuitenkin tarpeeksi yksityiskohtaisena. Lisäksi tavoitellaan mahdollisimman hyvää läpinäkyvyyttä raportoinnin osalta. Käytännössä siis tavoitteena on hyödyntää olemassa olevia mittauksia mahdollisimman laajasti ja esittää kaikki laskentaparametrit yksikköineen Excelissä. Vaihtoehtoisessa raportissa hyödynnetään esimerkiksi polttoaineiden määrämittauksia nykyistä raportointimallia enemmän.

Raporttipohja hyödyntää suurelta osin höyrytaseen laskennan yhtälöitä. Raporttiin on lisätty tunnuslukuja, joiden perusteella pystytään seuraamaan karkeasti esimerkiksi virtausmittareiden ja kattilan toimintaa.

Höyryverkossa sijaitsee virtausmittaukset molemmilta kattilalaitoksilta lähtevissä ja jorkaiselle tehtaalle menevässä höyryputkessa, eli toisin sanoen jokaisessa merkittävässä tuotanto- ja kulutuspaikassa. Tällöin on erittäin helppoa tarkkailla höyryvirtausmittausten tarkkuutta muodostamalla päähöyrylinjoille massatase. Tulevien ja lähtevien massavirtojen on oltava yhtä suuret. Todellisuudessa varakattiloiden lämmityshöyry otetaan virtausmittareiden välistä ja lauhtunutta höyryä poistetaan lauhteenpoistimien avulla höyryrunkoputkistosta. Näistä syistä johtuen tuotetun höyrymäärän pitäisi olla hieman kulutettua suurempi.

Kattiloihin syötettäviä polttoainevirtoja mitataan sekä vedyn että öljyn osalta. Pääkattilalla mittaukset tallentuvat sekä trendiohjelmaan että raportointitietokoneelle. Myös varakattiloiden kulutuksia seurataan, vedyn virtausmittaus on myös luettavissa automaatiojärjestelmästä. Varakattiloiden vetymittaus on kuitenkin tarkastelujakson aikana ollut epäkuunnossa, joten hyödynnettävän informaation saaminen ei kyseisestä mittauksesta ollut mahdollista. Öljyn kulutusta seurataan paikallismittauksella.

Höyryverkon energiatasetelaskennassa käytetään kattiloissa tuotettavan höyryn entalpiana kylläisen höyryn entalpiaa 11 barin absoluuttipaineessa eli entalpia on 2781 kJ/kg. Tehtaiden kulutusmittareiden kohdalla höyryn absoluuttipaineeksi arvioidaan 10 bar. Lisäksi oletetaan, että virtaava höyry on kylläistä, jolloin entalpia on 2777 kJ/kg. Käytännössä höyryverkon paine vaihtelee, sillä osa tehtaiden kulutuskohteista toimii panosperiaatteella, joten höyrynkulutuksen muutosnopeus on suuri, eikä kattila ehdi reagoida verkon kulustilanteeseen välttämättä tarpeeksi nopeasti. Todellisuudessa paine jokaisen kulutusmittarin kohdalla ei ole sama, sillä höyryputken pituus tehtaiden ja kattilalaitoksen välillä vaihtelee muutamasta kymmenestä metrillä muutamaan sataan metriin. Kyseisellä oletuksella tehtävä virhe on kuitenkin melko pieni, sillä entalpiaero kyseisillä arvoilla on 4 kJ/kg.

Kattilahyötysuhde voidaan määrittää joko suoralla tai epäsuoralla tavalla. Suoralla tavalla kattilahyötysuhteen määritelmä on:

$$\eta_k = \frac{Q_{\text{hyöty}}}{Q_{\text{tuotu}}} \quad (19)$$

η_k kattilahyötysuhde

$Q_{\text{hyöty}}$ hyödyksi saatava lämpöteho [MW]

Q_{tuotu} kattilaan tuodut lämpövirrat [MW]

Hyödyksi saatava lämpöteho lasketaan yhtälöllä 20.

$$Q_{\text{hyöty}} = q_{m,\text{höyry}} \cdot (h_h - h_{sv}) \quad (20)$$

$q_{m,\text{höyry}}$ höyryn massavirta [t/h]

h_h höyryn entalpia kattilan jälkeen [MWh/t]

h_{sv} kattilan syöttöveden entalpia [MWh/t]

Myös ulospuhallus lasketaan standardin SFS-EN 12952-15 mukaan hyötytehoon mukaan. Ulospuhalluksen lämpövirta on määritelty seuraavasti.

$$Q_{up} = q_{m,up} \cdot (h_{up} - h_{sv}) \quad (21)$$

Q_{up} ulospuhalluksen lämpövirta [MW]

$q_{m,up}$ ulospuhalluksen massavirta [t/h]

h_{up} ulospuhallushöyryyn entalpia [MWh/t]

Prosessihöyry otetaan suoraan lieriöstä, jolloin $h_{up}=h_h$ ja lieriön massatase on muotoa

$$q_{m,sv} = q_{m,h} + q_{m,up} \quad (22)$$

Nyt siis hyödyksi saatavan lämpötehon yhtälö yksinkertaistuu muotoon

$$Q_{hyöty} = q_{m,sv} \cdot (h_h - h_{sv}) \quad (23)$$

Syöttöveden massavirrasta kerätään historiatietoa ainoastaan trendiohjelmaan, josta ei ole mahdollista lukea tarkkoja arvoja tarkasteluajaväliltä. Tuotu lämpöteho on polttoaineen lämpöarvon ja kaikkien kattilaan tuotujen lämpövirtojen summa. Polttoaineeseen sitoutunut kemiallinen teho lasketaan seuraavasti.

$$H_{pa} = q_{m,pa} \cdot Q_{i,pa} \quad (24)$$

H_{pa} polttoaineen kemiallinen teho [MW]

$q_{m,pa}$ polttoaineen massavirta [kg/s]

$Q_{i,pa}$ polttoaineen lämpöarvo [MJ/kg]

Polttoaineen mukanaan tuoma lämpövirta määritetään yhtälöllä 25.

$$Q_{pa} = q_{m,pa} \cdot c_{p,pa} \cdot (T - T_0) \quad (25)$$

Q_{pa}	polttoaineen mukanaan tuoma lämpöteho [MW]
$c_{p,pa}$	polttoaineen ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]
T	polttoaineen lämpötila [°C]
T_0	referenssilämpötila [°C]

Palamisilman tuoma entalpiavirta määritetään vastaavasti:

$$Q_i = q_{m,i} \cdot c_{p,i} \cdot (T - T_0) \quad (26)$$

Q_i	palamisilman mukanaan tuoma lämpöteho [MW]
$q_{m,i}$	palamisilman massavirta [kg/s]
$c_{p,i}$	palamisilman ominaislämpökapasiteetti [MJ/kgK]
T	palamisilman lämpötila [°C]

Kattilahyötysuhde on siis yhtälöt 19-26 yhdistämällä

$$\eta_k = \frac{q_{m,sv} \cdot (h_h - h_{sv})}{q_{m,pa} \cdot (Q_{i,pa} + c_{p,pa} \cdot (T - T_0)) + q_{m,i} \cdot c_{p,i} \cdot (T - T_0)} \quad (27)$$

Palamisilma otetaan kattilahuoneen yläosasta, ja sen lämpötila on noin 39 °C liitteen 3 mittausten perusteella. Vedyn lämpötila ennen kattilaa on joitakin kymmeniä asteita. Näiden termien osuus on pieni polttoaineiden lämpöarvoihin verrattuna, joten raportointia varten on hyödyllisempää seurata edellä esitetystä muodosta yksinkertaistettua hyötysuhdetta.

$$\eta_k \approx \frac{q_{m,h} \cdot (h_h - h_{sv})}{q_{m,pa} \cdot Q_{i,pa}} \quad (28)$$

Tarkasteluaikaaväli on kuukausi, joten massavirtojen sijasta tarkastellaan kattilan läpi virranneita massoja. Yksinkertaistettuun hyötysuhteen yhtälöön 28 arvot sijoittamalla saadaan kattilahyötysuhteeksi

$$\eta_k \approx \frac{16346 \text{ t} \cdot (0,7725 - 0,1422) \frac{\text{MWh}}{\text{t}}}{4839950 \text{ n-m}^3 \cdot 0,0028 \frac{\text{MWh}}{\text{n-m}^3} + 11,842 \text{ t} \cdot 11,31 \frac{\text{MWh}}{\text{t}}} = 0,75$$

Kattilahyötysuhde (75 %) on melko matala. Eräänä selittävänä tekijänä saattaa olla, että kattilan teho vaihtelee höyrynkulutuksen mukaan, jolloin kattila toimii pääasiassa osakuormalla ja tehonmuutostilanteissa. Vuosihuollon perusteella kattilan lämpöpinnoilla on myös jonkin verran kerrostumaa. On myös mahdollista, että esimerkiksi vedyn määrämittaukset olisivat kalibroinnin tarpeessa. Kattilahyötysuhteen seuranta ja alhaisen laske-
tun kattilahyötysuhteen tarkempi selvitys saattaisivat olla järkeviä toimenpiteitä.

Nykyisessä raportissa on käytetty höyryntuottohyötysuhteenä 0,9:ää, jonka suuruuden todennäköisyydestä ei ole ollut varmuutta. Tarkastelujakson aikana polttoaineen kemiallisesta energiasta on saatu höyryksi pääkattilalla:

$$\eta_{ht} = \frac{E_h}{E_{pa}} = \frac{12\,627 \text{ MWh}}{13\,645 \text{ MWh}} = 0,925 \quad (29)$$

η_{ht} höyryntuottohyötysuhde

Laskennan perusteella polttoainetehosta saadaan höyryyn sitoutumaan enemmän energiaa, kuin mitä nykyisessä raportissa oletetaan. Käytännössä tämä tarkoittaisi sitä, että vetyä käytetään laskennallista arvoa vähemmän. Toisaalta nykyinen raportti ei huomioi verkostohäviöitä millään tavalla, joka vähentää laskennan virhettä. Sijoittamalla yhtälöön 29 tuotetun höyrymäärän sijaan kulutettu höyrymäärä 12 392 MWh, saadaan arvoksi 0,908, joka on hyvin lähellä nykyisen raportin arvoa. Tässä laskentatavassa puolestaan on otettava huomioon, että polttoaineiden määränä jakajassa on ainoastaan pääkattilan polttoaineet. Käytännössä siis 0,9 on hyvin lähellä todellista arvoa.

Kattilahyötysuhteen lisäksi kuukausiraportissa voisi olla esitettynä kattilan käytettävyyys. Tämä tosin vaatisi muutoksia automaatiojärjestelmään, sillä tällä hetkellä raportointitietokoneella ei ole kattilan käyntituntien mittaustietoa.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Höyryverkon tuotetun ja kulutetun höyrymäärän erotuksesta olisi hyödyllistä tehdä seuranta-parametri kuukausiraporttiin. Mikäli erotus suhteutetaan tuotantomäärään, pitäisi arvon säilyä suuruusluokaltaan samana. Mikäli arvo muuttuu merkittävästi, voivat esimerkiksi höyryn virtausmittaukset olla kalibroinnin tarpeessa. Toki ajotilanteen muutokset esimerkiksi varakattiloiden osalta vaikuttavat tuotetun ja kulutetun höyryn erotukseen. Varakattiloiden ollessa päällä ei luonnollisesti kulu lämmityshöyryä niiden lämmitykseen. Mikäli varakattiloiden lämmityshöyrylinjaan lisättäisiin virtausmittaus, pystyttäisiin runkoputkiston massatasetta seuraamaan erittäin tarkasti.

Tässä kandidaatintyössä ei tarkasteltu laskenta-aineiston mahdollisia mittauserpätkä-kuuksia. Esimerkiksi pääkattilaan syötetyn syöttöveden ja tuotetun höyryn erotus on huomattava laskennan perusteella. Syöttöveden määrää mitataan, joten tämä mittaus olisi tärkeää saada myös raportointitietokoneelle.

Kuukausitason lukujen seuraaminen keskiarvoistaa höyryverkon tilannetta erittäin paljon, joten esimerkiksi paineen vaihtelun aiheuttamia vaikutuksia tehtaiden ajamiseen ei tässä työssä ole pystytty tarkastelemaan. Toisaalta kuukausitason luvut antavat hyvän yleiskuvan höyryn kulutuksesta. Mikäli höyryn tehdaskohtaista höyrynkulutusta halutaan optimoida, olisi tarpeen kerätä höyryn ominaiskulutuksista dataa.

Lauhteiden palautuksella voitaisiin vähentää suurta omakäyttötehon tarvetta kattilalaitoksella. Lisäksi samalla saataisiin vähennettyä vedenkäsittelylaitteiston kuormitusta.

Laskettu kattilahyötysuhde on melko heikko, tarkan syyn tai syiden selvittäminen olisi kiinnostavaa. Osakuorma-ajo ja jatkuvat tehonmuutostilanteet heikentävät omalta osaltaan kattilahyötysuhdetta, mutta syy saattaa liittyä myös esimerkiksi virtausmittausten kalibrointeihin.

Vetyä päästetään nykyisten laskelmien mukaan merkittävä määrä ilmakehään. Tässä työssä on otettu vedyn määrämittaukset kattilalaitoksilla mukaan höyryraporttipohjaan, jolloin poltetun vedyn määrää pystytään seuraamaan hieman luotettavammin. Lisäksi poltetun vetymäärän seuranta helpottaa omalta osaltaan vetytaseen muodostamista. Tämä

olisi eräs mielenkiintoinen jatkotutkimuskohde. Vedyn merkityksen olettaisi muodostuvan entistä merkittävämmäksi tulevaisuudessa, mikäli esimerkiksi biokaasun tuotantoa halutaan lisätä kansallisella tasolla.

7 YHTEENVETO

Työssä tarkasteltiin kuukausitasolla Kemira Chemicalsin Äetsän tehdasalueen höyryverkostoa. Höyryverkon tarkastelu kohdennettiin pääasiassa runkoverkoston ja kattilalaitoksille. Tehdaskohtaisten tarkastelujen tarkka suorittaminen on haasteellista, sillä laitoksilla on melko vähän höyryn virtausmittauksia. Työn tavoitteena oli luoda selkeä kokonaiskuva tämänhetkisestä höyryn tuotannosta ja kulutuksesta.

Höyryverkon merkittävimmät kuluttajat ovat tällä karkealla tehdaskohtaisella tarkastelulla kloraattitehdas ja hienokemian tehdas. Mahdolliset höyrynkäytön tarkemmat selvitykset ja investoinnit esimerkiksi höyrymittauksiin kannattaa siis kohdentaa näihin tehtaisiin.

Höyryn tuotannon ja kulutuksen nykyinen raportointityökalu on Microsoft Excel-pohjainen, mutta se sisältää joitakin oletettavasti kokemuseräisiä termejä. Nykyisillä mittauksilla on mahdollista lisätä mittauksiin perustuvaa tiedonkeruuta, joten vaihtoehtoisen raportointipohjan tekemisessä on ollut juurikin mittausten mahdollisimman laaja hyödyntäminen tavoitteena. Tämän työn osana luotu vaihtoehtoinen raportointipohja jää yritykselle käytettäväksi. Mikäli tulevaisuudessa halutaan muodostaa esimerkiksi vetytase, helpottaa poltetun vedyn määrän seuranta vaihtoehtoisessa raportissa taseen muodostamista.

LÄHDELUETTELO

Alakangas Eija. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo: VTT Tiedotteita 2045. ISBN 951-38-5699-2.

Huhtala Petri. Suullinen tiedonanto. [11.11.2015]

Huhtinen Markku, Kettunen Arto, Nurminen Pasi, Pakkanen Heikki. 2000. Höyrykattilatekniikka. Helsinki: Oy Edita Ab. ISBN 951-37-3360-2.

Huhtinen Markku, Korhonen Risto, Pimiä Tuomo, Urpalainen Samu. 2008. Voimalaitostekniikka. Kotka: Opetushallitus. ISBN 978-952-13-3476-4.

Ilmatieteenlaitos. 2016. Lämpötila- ja sadetilastoja vuodesta 1961. [viitattu 26.2.2016]. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/tilastoja-vuodesta-1961>

Kemira historia. 2015. [viitattu 8.10.2015]. Saatavissa: <http://www.kemira.com/fi/konserni/historia/sivut/default.aspx>

Kemiran PI-kaaviot. Dokumenttiarkisto. Yrityksen sisäisessä käytössä.

Kemira tilinpäätös 2014. 2015. [viitattu 8.10.2015]. Saatavissa: <http://www.kemira.com/fi/SiteCollectionDocuments/uutishuone/vuosikertomukset/2015/kemira-virallinen-tilinpaatos-2014.pdf>

Leppäkoski. [viitattu 3.12.2015]. Saatavissa: <http://www.leppakoski.fi/tietoa-meista/yritystieto/energiantuotanto/vety>

Liedes Mervi. 2015. Äetsän yleisesittely. Kemira.

Michelsen Karl-Erik. 1989. Sähköstä ja suolasta syntynyt. Gummerus kirjapaino Oy. Jyväskylä. ISBN 952-90-1405-8.

Motiva. 2011. Höyry-lauhde-siirtojärjestelmä, Käyttö- ja kunnossapitohenkilökunnan ohjeistus. [viitattu 12.11.2015]. Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/4893/HOLA_kayttokunnossapito_ohjeistus_2011.pdf

Olli Jukka. 2016. Suullinen tiedonanto. [26.2.2016]

SpiraxSarco. 2015. Steam engineering tutorials. [viitattu 29.1.2016]. Saatavissa: <http://www2.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials/steam-engineering-principles-and-heat-transfer/entropy-a-basic-understanding.asp>

Suhonen Pilvi. 2015. Suullinen tiedonanto. [12.11.2015]

Teräsvirta Antti. 2010. Voimalaitosmittakaavan polttokennojärjestelmien teknis-taloudellinen vertailu. Prizztech Oy. [viitattu 26.2.2016]. Saatavissa: <http://www.prizz.fi/sites/default/files/tiedostot/linkki3ID1440.pdf>

Vakkilainen Esa. 2010. Höyryn kehityksen perusteet. Höyrykattilatekniikka-kurssin luentomateriaali. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Yliopiston sisäisessä käytössä.

LIITE 1. MITTAUSAINEISTO LOKAKUULTA 2015

Höyryn virtausmittaukset

Tuotanto

HK10	[t]	16346
HK10 omakäytön jälkeen	[t]	11659
HK11	[t]	254

Kulutus

T I, PAX (FIQ-1)	[t]	310
T I, PAX (FIQ-677)	[t]	122
T I, PAX (FIQ-1.2)	[t]	27
T II (FIQ-2-1)	[t]	78
T III (FIQ-3-1)	[t]	4032
T III (FIQ-3-2)	[t]	3032
T IV-1 + Luja (FIQ-116)	[t]	3177
T IV-2 (FIQ-269)	[t]	593

Polttoaineiden määrät

HK10

Vety, poltin 1	[normi-m ³]	2420213
Vety, poltin 2	[normi-m ³]	2419737
Raskas polttoöljy, poltin 1	[t]	10,184
Raskas polttoöljy, poltin 2	[t]	1,658

HK11

Vety	[normi-m ³]	-
Kevyt polttoöljy	[t]	-

LIITE 2. OTE HÖYRYN NYKYISESTÄ RAPORTOINTITYÖKALUSTA

MITTARILUKEMA KK:N VII-MEISENÄ PÄIVÄNÄ		LOKA
T I		63096
T II		103804
T III		177798
T IV		434769
TI Pax		
KPÖ Witermo		67358
KPÖ Arvomat		253573
KPÖ Narva		6953

HÖYRYN KULUTUS		LOKA
T I tn		165 ton
T I Pax tn		900 ton
T II tn*		78 ton
T III tn*		7 063 ton
T IV tn		3 770 ton
Kaukol.ja FCE omak. tn		4687 ton
HÖYRYÄ YHT. TN**		16662 ton
Höyryn tuotanto HK10:llä ton		16 346 ton
Prosessivettä FCE:ltä m3		12 626 m3
Höyryn tuotanto HK11:llä ton		316
FCE:n hörylaskun tark. (MWh)		7544
Höyryn tuotanto HK10 ja HK11		16 662
POLTTOAINEIDEN KULUTUKSET		LOKA
RPÖ ltr/FCE poltin 1		10720 litraa
RPÖ ltr/FCE poltin 2		1745 litraa
YHT. RPÖ/ltr		12 465 litraa
YHT. RPÖ/kg		11 842 kg
KPÖ ltr/ Witermo		0 litraa
KPÖ ltr/ Arvomat		0 litraa
KPÖ ltr/ Narva		0
YHT. KPÖ/ltr		0 litraa
YHTEENSÄ ÖLJYJÄ /ltr		12 465 litraa
Öljyn euroa/kk		5 200 euroa
Öljyen kulutus MWh/kk		134 MWh
Vedyn kulutus MWh/kk		14 140 MWh
Polttoaineet yhteensä MWh/kk		14 274 MWh

LIITE 3. MITTAUSPÖYTÄKIRJA

Mittauspöytäkirja

28.1.2016

Mittaaja:
Eetu Rantanen

Mittalaite:
Fluke 561 IR Thermometer

Mittauskohteet:

Lämpötila:

T III

Kiteyttimen kuumennin C-5-41	Höyry	179
	Lauhde	42
Puhtaan lauhteen säiliö C-1-2	Lauhde	65

HK10

KL-vaihdin	Lauhde	57
Lisävesi syve-säiliöön	Vesi	40
Palamisilma	Ilma	38/40