

Aapo Karsikas

**MUURAHAISSHAPPOTEHTAIDEN HÖYRYTASEEN JA ALLO-
KOINNIN MÄÄRITTÄMINEN**

MUURAHAISSHAPPOTEHTAIDEN HÖYRYTASEEN JA ALLO- KOINNIN MÄÄRITTÄMINEN

Aapo Karsikas
Opinnäytetyö
Kevät 2022
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu
Ympäristö- ja energiatekniikka

Tekijä: Aapo Karsikas

Opinnäytetyön nimi: Muurahaishappotehtaiden höyrytaseen ja -allokoinnin määrittäminen

Opinnäytetyön englanninkielinen nimi: Determining Steam Balance and Allocation to Formic Acid Plants

Työn ohjaajat: Jukka Ylikunnari

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2022

Sivumäärä: 57

Toimeksiantajan Eastmanin toimipisteellä Oulussa on viisi muurahaishapon tuotantolinjastoa. Tehtaiden energiankulutus tuotantokustannuksista on yksi merkittävimmistä. Tämän seuranta sekä sen optimointi on tehtaan kustannustehokkuuden kannalta hyvin tärkeää.

Opinnäytetyön tavoitteena on laatia laskentamenetelmä, jolla voidaan toimeksiantajan haluamallaan tavalla määrittää yksittäisen tuotantolinjan energiankulutus. Ennen varsinaisia muurahaishappotehtaita on erinäisiä yhteisiä tuotantosuuksia sekä -tehtaiden välistä tulevien liuosten erottelemiseen käytettäviä kolonneja. Näiden yhteisten osuuksien energiankulutus lasketaan, ja allokoidaan tuotantolinjojen tuotantomäärien suhteen. Tähän lisätään lisäksi kunkin linjaston oma kulutus. Näin saadaan linjakohtainen energiankulutus tuoteyksikköä kohden koko tuotantoprosessista.

Opinnäytetyön pohjalta automaatiojärjestelmiin on tarkoitus syöttää laaditut laskentakaavat jatkuvan linjakohtaisen energiankulutuksen seurannan toteuttamiseksi. Seurantaa tullaan käyttämään mahdollisuuksien mukaan tehtaiden energiankäytön optimointiin. Toteutetun laskennan pohjalta löytyi eroavaisuuksia nykyiseen seurantaan nähden. Tämä todennäköisesti johtuu erinäisistä mitausepäterkkyyteen liittyvistä tekijöistä.

Asiasanat: muurahaishappo, energiankulutus, kustannustehokkuus

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
1 JOHDANTO	6
2 MUURAHAIHAPPO JA SEN TUOTANTO	7
2.1 Muurahaishappo	7
2.2 Valmistaminen	7
3 OULUN TEHTAAT JA ENERGIATASEALUEET	10
4 ENERGIANKULUTUKSEN LASKENTA	13
4.1 Allokoitavat tasealueet	14
4.1.1 Vesilaitos	14
4.1.2 Maakaasun höyrystys	16
4.1.3 Kaasutus	17
4.1.4 Amisolpesu	23
4.1.5 Kaliummetylaatti tehdas	24
4.1.6 Membra	25
4.1.7 MF1-tehdas	26
4.1.8 MF2-tehdas	27
4.1.9 Palautuskolonne 4600	28
4.1.10 Metanolin suolanpoisto - MESU	29
4.1.11 Kaliumformiaatin poisto	32
4.1.12 Metanolinkuivain	33
4.1.13 Verkostojen häviöt	34
4.1.14 Allokoitavien alueiden yhteenveto	34
4.2 Happotehtaiden energiankulutus	35
4.2.1 MH1-tehdas ja formamidi-tehdas	36
4.2.2 MH2-tehdas	38
4.2.3 MHL-tehdas	39
4.2.4 MH4-tehdas	41
4.2.5 MH5-tehdas	44
4.3 Muita energiankulutukseen liittyviä tekijöitä	46
5 ALLOKOINTI JA LINJAKOHTAINEN KULUTUS	53

6 YHTEENVETO	56
LÄHTEET	57
Liite 1: Hydrolyysireaktorin ja etulämmönvaihtimen energian ja höyrynkulutuksen laskenta	
Liite 2: Laskentakaavat automaatiojärjestelmään	

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimiva Eastman on kansainvälinen yhtiö, joka toimii pääsääntöisesti kemianteollisuudessa. Yhtiö valmistaa laajalla skaalalla eri tuotteita, joita löytyy ihmisten päivittäin käyttämistä tarvikkeista. Eastman työllistää kansainvälisesti noin 14 000 työntekijää ja palvelee asiakkaitaan yli sadassa valtiossa. (1.)

Opinnäytetyö kohdistuu Eastmanin tytäryhtiön Taminco Finland Oy:n Oulussa sijaitsevien muurahaishappotehtaiden energiankulutukseen. Muurahaishapon valmistamiseen liittyy olennaisesti sen tislaminen erilleen valmistamiseen käytettävistä komponenteista. Lisäksi erilleen tislataan reaktiossa syntyvä metanoli sekä reagoimaton metyyliformaatti. Tämä tarvitsee lämpöenergiaa, joka tehtaalle toimitetaan höyrynä voimalaitokselta. Energiankulutus muurahaishapon valmistuksessa on hyvin suurta, ja kulutuksen optimointi on yksi tuotantokustannusten merkittävimmistä tekijöistä.

Opinnäytetyön tavoitteena on määrittää energiankulutus muurahaishappolinjastojen yhteisille osuuksille sekä jokaiselle muurahaishappotehtaalle erikseen. Yhteisten osuuksien kulutus allokoidaan yksittäisille tuotantolinjoille, jotta saadaan linjojen yksilöity energiankulutus. Näiden energiataseiden pohjalta tulevaisuudessa pyritään yksittäisten tehtaiden energiankäytön optimointiin. Nykyisin tarkan energiankulutuksen määrittämisen haasteena on se, että osassa tehtaita ei ole riittävästi mittauksia tai ne ovat epätarkkoja. Osaltaan höyrynkulutusta voi laskea myös toisipuolelta erinäisten massataseiden ja lämpötilamuutosten sekä ominaislämpökapasiteettien avulla kohteissa, joissa ei ole höyrynkulutuksesta mitausta tai se on epätarkka.

2 MUURAHAISSHAPPO JA SEN TUOTANTO

Oulussa muurahaishapon tuotanto on alkanut vuonna 1981 yhdellä linjastolla. Vuosien saatossa linjastoja on rakennettu lisää. Niitä kaikkienensa on nykyään viisi kappaletta. Tuotantomäärät ovat tämän myötä kasvaneet merkittävästi. Nykyään Oulussa tuotetaan vuosittain noin 100 000 tonnia muurahaishappoa. Tällä tuotantomäärällä Oulun tehtaat ovat yksi maailman suurimmista muurahaishapon tuottajista. (2.)

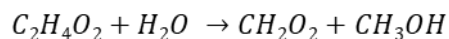
2.1 Muurahaishappo

Muurahaishappo on yksinkertainen karboksyylihappo. Se on löydetty vuonna 1671 tislamalla muurahaista. Muurahaishappoa esiintyy monissa hyönteisissä, kuten mehiläisissä, muurahaissa sekä kasveissa, kuten nokkosessa. Happo on väritön ja syövyttää useita metalleja, kuten alumiinia, lyijyä ja valurautaa. Muurahaishapon kemiallinen kaava on HC_2O_2 . (2.)

Muurahaishappo on hyvin monikäyttöinen tuote. Sitä käytetään paljon muun muassa elintarvike- ja tekstiiliteollisuudessa. Pääasiallinen käyttötarkoitus on kuitenkin säilöntä ja antibakteerisena aineena karjan rehuntuotannossa. Toinen merkittävä käyttökohde on nahan tuotannossa nahan parkitseminen. (2.)

2.2 Valmistaminen

Muurahaishapon tuotantomenetelmiä on olemassa useita. Oulussa muurahaishappoa valmistetaan korotetussa paineessa metyyliformiaatista sekä vedestä. Kemiallinen reaktio tapahtuu siten, että vesi sekä metyyliformiaatti reagoivat muurahaishapoksi ja metanoliksi. (Kaava 1.) (2.)



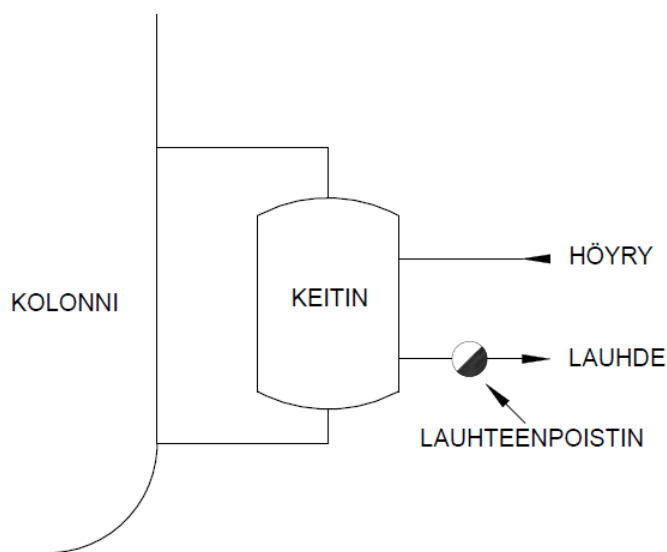
KAAVA 1

missä

- $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$, Metyyliformiaatti
- H_2O , Vesi

- CH_2O_2 , Muurahaishappo
- CH_3OH , Metanoli

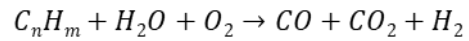
Saatu tuote tislataan muista komponenteista erilleen sekä väkevöidään tislaukskolonneissa. Tislauskolonnin toiminta perustuu eri nesteiden kiehumispisteiden eroon. Tislauskolonnien tarvitsema energia tehtaalla tulee voimalaitoksen tuottamasta höyrystä, joka ohjataan kolonnin keittimelle. Keittimellä kolonnin neste höyrystyy, ja höyry lauhtuu. Lauhteenerottimen tehtävänä on estää höyryn läpimeno kaasumaisena (kuva 1).



KUVA 1. Tislauskolonnin keittimen periaatekuva

Metyyliformiaatin valmistukseen puolestaan tarvitaan hiilimonoksidia sekä metanolia. Tämä tapahtuu korkeassa paineessa syöttämällä hiilimonoksidikaasu metanolin sekaan katalyytin läsnä ollessa. (2.)

Oulun tehtailla häkä valmistetaan nykyisin maakaasun kaasutusreaktiossa, jonka jälkeen erinäisten kaasunpudistusten myötä tuotteeksi saadaan hiilimonoksidia sekä vetyä (kaava 2.)



KAAVA 2

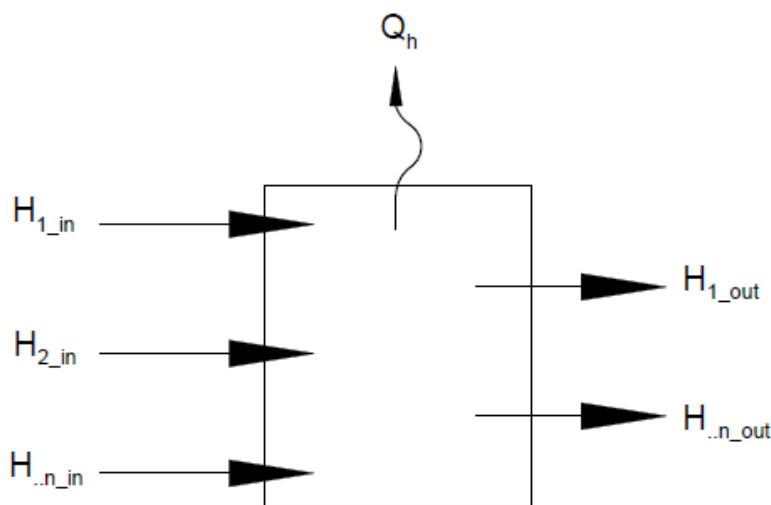
missä

- C_nH_m , Hiilivedyt
- H_2O , Vesi
- O_2 , Happi
- CO , Häkä
- CO_2 , Hiilidioksidi
- H_2 , Vety

Näiden lisäksi riippuen käytettävän raaka-aineen puhtauksista lopputuote voi sisältää esimerkiksi rikkiyhdisteitä. Kaasutusreaktiossa voidaan käyttää myös pitkiä nestemäisiä hiilivetyjä, jotka yleensä sisältävät huomattavasti enemmän epäpuhtauksia kuin maakaasu. Tuotetusta kaasusta hiilimonoksidi toimitetaan muurahaishapon tuotantoon ja vety toimitetaan Oulun tehtailla Kemiralle muun muassa vetyperoksidin tuotantoon.

3 OULUN TEHTAAT JA ENERGIATASEALUEET

Koska opinnäytetyössä keskitytään energiataseiden laskentaan höyrynkulutuksen kannalta, opinnäytetyössä tarkastellaan vain alueita ja laitteita, joissa höyryä joko kulutetaan tai tuotetaan. Muilta osin prosessin tarkastelu pelkistetään yksinkertaiseksi. Tasealue rajataan aina halutunlaiseksi, ja tasealueelle menevien entalpiavirtojen summa on sama kuin tasealueelta poistuvien entalpiavirtojen summa (kuva 2).

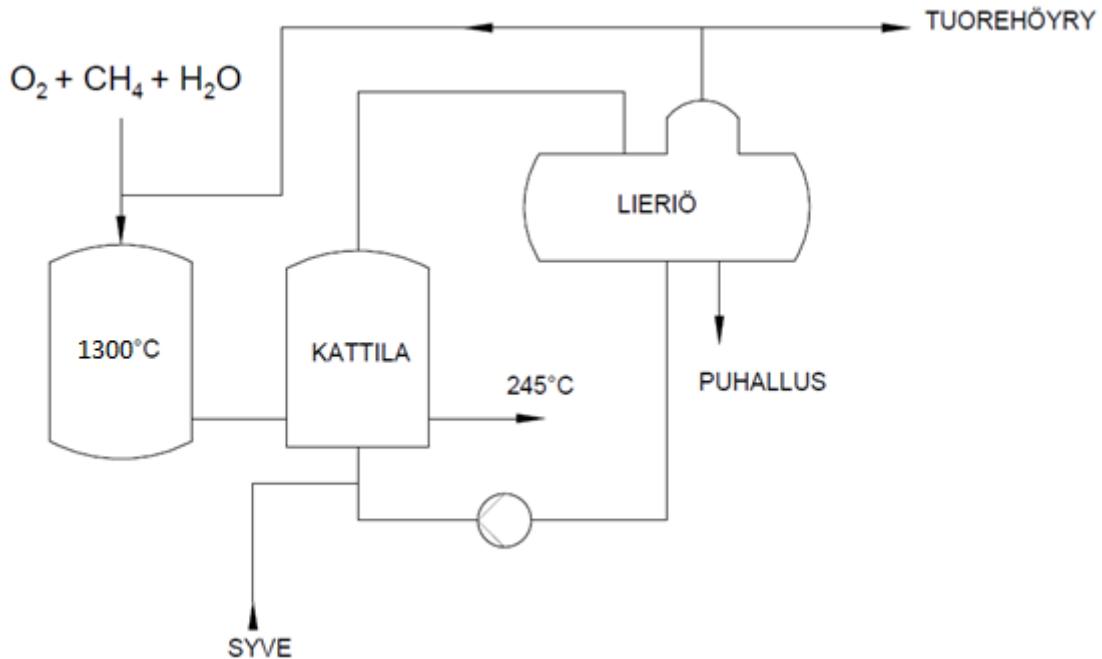


KUVA 2. Rajatun tasealueen entalpiavirtojen periaatekuva

Vesilaitos on tehtaan tuotantoyksiköistä ensimmäinen höyryä kuluttava kohde. Vesilaitokselle tuleva jokivesi lämmitetään haluttuun lämpötilaan ennen varsinaista veden puhdistamisen aloitusta. Vesilaitoksella puhdistettua vettä käytetään niin voimalaitoksen tarpeisiin kuin muurahaishapon tuotantoon.

Oulun tehtailla varsinainen tuotanto alkaa maakaasun kaasuttamisesta. Maakaasun höyrystäminen tarvitsee lämpöenergiaa, ja optimitilanteessa tämä tarvittu energia otetaan täysin tehtaalla käytettävistä kiertovesistä. Toisinaan lisälämmitykseen käytetään lisänä höyryä. Maakaasun kaasuttaminen on hyvin eksoterminen reaktio, ja lämpötila pysyttelee maakaasun, hapen sekä vesihöyryn sopivalla

suhteella noin 1200–1300°C:ssa. Muodostuneesta synteesikaasusta lämpöenergia otetaan jälkilämpökattilalla talteen, jolla tuotetaan 35 bar(g):n höyryä kaasutimen omaan sekä alueella olevien muiden tehtaiden käyttöön. (Kuva 3.)



KUVA 3. Periaatekuva kaasutuksesta ja siinä muodostuvan lämpöenergian talteenotosta

Höyryä tarvitsevat kaasun eri puhdistusvaiheet. Näistä ensimmäinen höyryä käyttävä vaihe on niin kutsuttu amisolpesu. Amisolpesussa kaasusta pestään hiilidioksidi, argon sekä mahdolliset muut epäpuhtaudet pois. Amisolpesun yhteydessä toimii myös kaliummetylaattitehdas, jolla tuotetaan katalyyttiä muurahaishapon tuotantoon. Kaasunpuhdistuksessa membraaniyksikkö käyttää myös hieman lämpöä, jossa syötettävä puhdistettu vedyn ja hiilimonoksidin kaasuseos lämmitetään haluttuun lämpötilaan.

Muurahaishapon tuotannon kannalta seuraava vaihe on metyyliformiaatin valmistus, joka tapahtuu korkeapaineisessa reaktorissa. Reaktorissa metanolin ja hiilimonoksidikaasun reaktiossa muodostuva metyyliformiaatin ja metanolin neste-faasi syötetään tislaukolonniin, jossa metyyliformiaatti tislataan metanolista eril-

leen. Metanolin ja häkäkaasun reaktio metyyliformiaatiksi on itsessään eksoterminen ja tarvitsee jäähdystä, mutta metyyliformiaattitehtaiden tislaukolonnit tarvitsevat lämpöenergiaa.

Itse muurahaishapon valmistuksessa sekoitetaan vesi ja metyyliformiaatti sekä prosessin myöhemmästä vaiheesta tislattu lauha vesi ja muurahaishapon seos. Nämä syötetään esilämmönvaihtimen sekä hydrolyysireaktorin kautta tislaukolonniin. Muodostuneen seoksen tislauksen tapahtuu kolmessa erillisessä kolonnissa, joissa muurahaishappo tislataan muista komponenteista erilleen.

4 ENERGIANKULUTUKSEN LASKENTA

Jotta yksittäisen tuotantolinjaston kokonaisenergiankulutus voidaan määrittää, täytyy jokaiselle yksittäiselle höyryä kuluttavalle tai tuottavalle yksikölle laskea sen energiankulutus tai vastaavasti tuotanto. Laskenta toteutetaan still-kuva-tyyppisenä laskentana eräästä prosessitilanteesta. Julkisen raportin lukemat ovat prosentuaalisia lukemia suhteessa joihinkin kokonaisuuksiin.

Laskennassa on käytetty oletuksia muun muassa höyryjen laatuja suhteen. Tehtaalla käytetään höyrynlaatuja 1,7, 2,5 sekä 8 ja 35 bar(g):n ylipaineessa. Näiden osalta oletetaan, että ennen höyryä käyttökohdetta, höyry olisi 2 °C tulistettua. Tuleva höyry voi olla hieman kuumempaa myös, mutta se jäähdytetään monessa paikassa ruiskutusvedellä lähelle lauhtumislämpötilaa. Lämpöenergia mitä lämpöä käyttävään kohteeseen jää, on kuitenkin peräisin tulevasta höyrystä, joten laskennan kannalta sillä ei suurta vaikutusta ole. Ruiskutusveden vaikutusta höyrystä saatavaan tehoon massayksikköä kohden tarkastellaan myös erikseen luvussa 4.3.1. Tämän tarkastelun perusteella todennäköisesti antureiden mitausvirheet ovat merkittävästi suurempia kuin ruiskutusveden aiheuttama massayksikköä kohden energian hyödyntämiseen tuleva muutos.

Lämmönvaihtimissa on myös toisiopuolilla suuria lämpötilaeroja. Laitteesta lähtevän lauhteen lämpötilana käytetään laskennoissa toisiopuolen lämpötilan ja vallitsevan höyrynpaineen lauhtumislämpötilan keskiarvoa. Todellisuudessa tässä voi olla vaihtelua lämmönvaihtimien teknisten erojen vuoksi.

Lauhteet ohjataan lopulta kuitenkin lauhdesäiliöön, ja lauhdesäiliön paine määrittää käytännössä yksikön käyttämän lämpöenergian, koska valtaosa lauhdeista on yli 100 °C ja lauhdesäiliöt ovat noin 1 bar(g):n paineessa. Täten lauhdeissa lauhteenerottajan jälkeen oleva energia paisuu lauhdesäiliössä ja siirtyy joko kierto- veteen tai vaihtoehtoisesti lauhdeiden paisuntahöyryjen hyödyntämiseen. Lauhteiden paisunnan hyödyntäminen huomioidaan laskennoissa alentavana vaikutuksena yksittäisen tuotantolinjan energiankäytössä niissä kohteissa, joissa paisuntojen hyödyntämistä on.

Kokonaisentalpian muutos massayksikköä kohden on tulevan höyryn entalpiasta lauhdesäiliössä vallitsevan kylmän nesteen entalpiaan. Tällöin lämmönvaihtimelta lähtevällä lauhteen lämpötilalla on merkitystä siihen, paljonko lämmönvaihtimelle energiaa jää. Kokonaisenergian kannalta tällä lämmönvaihtimelta lähtevän lauhteen lämpötilalla ei kuitenkaan ole merkitystä.

Mikäli käytettävät höyryn laadut ovat korkeapaineisia, näistä paisutetaan matalampipaineisiin verkostoihin vapaana oleva energia ennen lauhteiden ohjaamista lauhdesäiliöön. Nämä hyödynnettävissä olevat paisuntahöyryt huomioidaan alentavana vaikutuksena yksittäisen tuotantolinjan energiankäytössä.

Kaikesta laskennasta tehdään myös laskentakaavat, joiden avulla jokaisen linjan energiankulutuksen seuranta tulevaisuudessa on aikomus toteuttaa automaatiojärjestelmään. Laskentakaavat toimitetaan erillisenä liitteenä toimeksiantajalle.

4.1 Allokoitavat tasealueet

Allokoitavat tasealueet ovat sellaisia, jotka koskevat muurahaishapon tuotantoa kokonaisuutena. Näitä ei voida osoittaa suoraan yksittäisen muurahaishappotehtaan kulutukseen. Nämä ovat lähes kaikki tuotannon osakokonaisuuksia, jotka ovat ennen varsinaisia muurahaishappotehtaita. Käytetyt höyryn määrät sekä muut suureet on otettu järjestelmästä tasaisen käynnin aikana tietyn ajanjakson keskiarvoina. Täten ne kuvastavat tasaista käyntiä kyseisen ajanjakson sisällä.

4.1.1 Vesilaitos

Vesilaitos käyttää höyryä tulevan jokiveden lämmittämiseen. Jokiveden tuleva lämpötila prosessitilanteessa on 0 °C ja vesi lämmitetään 21 °C:seen. Keskimääräinen veden tiheys lämpötilavälillä 0–21 °C on 999,6 kg/m³ ja keskimääräinen ominaislämpökapasiteetti 4,195 kJ/kgK. Tilavuusvirta tiedettäessä näiden perusteella voidaan laskea lämpöteho kaavalla 3.

$$\Phi = \rho * q_v * c_p * \Delta t$$

KAAVA 3

missä,

- Φ , Lämpöteho [W]
- ρ , Tiheys [kg/m^3]
- q_v , Tilavuusvirta [m^3/s]
- c_p , Ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]
- Δt , Lämpötilamuutos [$^{\circ}\text{C}$]

Lämmönvaihtimen kulutus on 9,4 % kaikesta allokoitavasta kulutuksesta.

Tämän perusteella voidaan laskea myös höyrynkulutus. Kun tiedetään käytettävän höyryn paine 2,5 bar(g) sekä lämpötila 141 $^{\circ}\text{C}$, on käytettävän höyryn entalpia 2736 kJ/kg. Lauhdelinjan lämpötila puolestaan on mitatusti noin 40 $^{\circ}\text{C}$. Täten lauhteen entalpia on 167,82 kJ/kg. Jakamalla saatu lämmönvaihtimen teho höyryn ja lauhteen entalpiamuutoksella saadaan laskettua höyryn massavirta kaavalla 4 (taulukko 1).

$$q_{m_h} = \frac{Q}{\Delta h}$$

KAAVA 4

missä

- q_{m_h} , höyryn massavirta [kg/s]
- Q , lämmönvaihtimen teho [kW]
- Δh , entalpiamuutos lämmönvaihtimessa [kJ/kg]

TAULUKKO 1. Vesilaitoksen höyryn sekä energiankulutus

Vesilaitos			
Tulevan veden lämpötila	$t_{1_jokivesi}$	0,5 °C	
Lähtevä lämpötila	$t_{2_jokivesi}$	21 °C	
Kokonais energiankulutus allokoitavista	$Q_{veden_lämmitys}$	9,8 %	%-osuus allokoitavista
Tulevan höyryn paine	p_h	3,5 Bar (a)	
Tulevan höyryn lämpötila	t_h	140,9 °C	
Lauhteen lämpötila	t_l	40 °C	
Höyryn entalpia	h_h	2737 kJ/kg	
Lauhteen entalpia	l_h	168 kJ/kg	
Kokonais energiankulutus	$Q_{kok.}$	10,4 %	%-osuus allokoitavista

Vesilaitoksella lauhteet menevät vesilaitoksen saostusaltaisiin, ja tällä tavoin lauhteen vähäinen energiasisältö menee veden lämmittämiseen. Koska energiankulutuksessa referenssi vertailuentalpiana on 1 bar(g) ja 0 °C, laskennassa täytyy huomioida vielä tämä lauhteen sisältämä energia tähän referenssi entalpiaan nähden. Tällöin vesilaitoksen energiankulutus nousee kokonaisuudessaan 10,4 %:iin kaikesta allokoitavasta kulutuksesta

4.1.2 Maakaasun höyrystys

Maakaasun höyrystämiseen energia pyritään ottamaan tehtaan kiertovesistä säätämällä kiertovesien lämpötila sopivaksi. Mikäli kiertovesien lämpötila ei ole riittävä, lämmittämiseen käytetään lisäksi höyryä. Prosessitilanteessa kiertoveden lämpötila ei ole ollut riittävä, ja lämmitykseen on käytetty lisäksi höyryä. Käytettävän höyryn osuus kaikesta allokoitavasta energiasta on ollut 2,7 %. Lauhteet hieman alijäähtyvät, ja täten entalpiavirta lauhdesäiliöön on negatiivinen (taulukko 2).

TAULUKKO 2. Freeziumin lämmityksen energiankulutus

Freeziumin lämmitys			
Höyryn paine	p_h	3,5	bar(a)
Höyryn lämpötila	p_t	140,86	°C
Lähtevän veden lämpötila	t_{vesi}	27,5	°C
Lauhtumispiste	$t_{sat.}$	138,9	°C
Lauhteen lämpötila (arvio)	t_l	83,2	°C
Höyryn entalpia	h_h	2736,55	kJ/kg
Lauhteen entalpia	h_l	348,54	kJ/kg
Lämmönvaihtimen teho	Q_{8930}	2,7	%-osuus allokoitavista

Energia lauhdesäiliöön			
Lauhesäiliön paine	$p_{lauhes.}$	1,45	bar(a)
1,04bar(a) nesteen entalpia	$h_{lauhes.}$	462,78	kJ/kg
Kokonais energiankulutus allokoitavista	$Q_{lauhteet}$	-0,13	%-osuus allokoitavista
Kokonais energiankulutus	Q_{kok}	2,7	%-osuus allokoitavista

4.1.3 Kaasutus

Kaasutus on käynnistyttyään käytettävän höyryn kannalta omavarainen sekä tuottaa höyryä myös muiden tehtaiden käyttöön. Kaasutuksen energiatasealueen höyrypuolelle tulee syöttövesi sekä siihen siirrettävä energia kaasuttimessa muodostuneesta synteesikaasusta. Tuotteeksi saadaan lieriöstä 35 bar(g):n paineessa tuorehöyryä.

Syöttövesi tulee voimalaitokselta ja sen lämpötila vaihtelee noin 120–140 °C:seen välillä paineessa 50 bar(g). Veden tiheys kyseisissä olosuhteissa on noin 926 kg/m³. Tuorehöyryn massavirta on noin 69 % syöttöveden massavirrasta. Kaasutin itsessään käyttää 5 % tuotetusta höyrystä. Tämän lisäksi hapen sekä maakaasun ja hiilidioksidin tulistimet käyttävät höyryä. Käytettävien kaasujen lämmittimillä ei ole höyryn massavirtausmittareita, joten energiankulutus laskeaan virtaavien kaasujen lämpötilamuutoksen, ominaislämpökapasiteetin sekä tilavuusvirtojen avulla.

Maakaasun- ja hiilidioksidintulistin

Monille kaasuvirtaamille järjestelmistä saa tilavuusvirrat normalisoituna NTP-olosuhteisiin. Maakaasun tuleva lämpötila on 4 °C ja se lämmitetään 225 °C:seen. Maakaasu on metaania lähes 100-prosenttisesti, joten laskenta voidaan toteuttaa täysin maakaasun ominaisuuksilla. Maakaasun, eli metaanin moolimassa on 16,04 g/mol ja yleinen moolitilavuus NTP-olosuhteissa on 22,4 dm³/mol. Ainemäärä saadaan tilavuusvirta jakamalla yleisellä moolitilavuudella. (Kaava 5.) Massavirta ainevirran sekä moolimassan tulosta. (Kaava 6.) (3.)

$$n = \frac{q_v}{V_m}$$

KAAVA 5

missä

- n, ainemäärä [kmol/h]
- q_v, tilavuusvirta [nm³/h]
- V_m, moolitilavuus NTP-olosuhteissa [22,4 dm³/mol]

$$q_m = n * M$$

KAAVA 6

missä

- q_m, massavirta [kg/h]
- n, ainemäärä [mol/h]
- M, moolimassa [kg/mol]

Keskimääräinen ominaislämpökapasiteetti metaanilla on kyseisellä lämpötilavälillä 2,48 kJ/kgK, ja tämän saadun massavirran, lämpötilamuutoksen sekä ominaislämpökapasiteetin avulla saadaan lämmönvaihtimen tehoksi 7,5 % koko kattilan tehosta (taulukko 3). (3.)

Hiilidioksidin tuleva lämpötila on 96,2 °C ja moolimassa 44,01 g/mol. Laskenta voidaan toteuttaa täysin samalla tavalla kuin maakaasulle, ja hiilidioksidin lämmityksen tehoksi saadaan 0,84 % kattilan tehosta. Täten yhteenlaskettu lämmönvaihtimen teho on 8,3 % kattilan tehosta (taulukko 3).

Lämmitykseen käytettävä höyryn paine on kaasutuksen omaa tuotantoa, kylläistä höyryä 35,6 bar(g):n paineessa. Höyryn entalpia on 2802 kJ/kg ja lauhteen entalpia kyseisessä paineessa ja lämpötilassa 242 °C on 1048 kJ/kg. Edellä lasketujen tehojen sekä höyryn ominaisuudet tiedettäessä voidaan laskea myös massavirrat. Tulistimelle menee 9,4 % kattilasta poistuvista massavirroista (taulukko 3).

TAULUKKO 3. LNG:n sekä CO₂:n tulistimen energian ja höyryn käyttö

LNG:n sekä CO₂:n tulistin		
Tuleva lämpötila	t_{in}	4 °C
Poistuva lämpötila	t_{out}	225 °C
Metaanin moolimassa	M	16 g/mol
Lämpökapasiteetti keskilämpötilassa	$cp_{t_kesk.}$	2,48 kJ/kgK
Lämmitysteho	Q_{LNG}	7,5 % %-osuus jlkat. Tehosta
Tuleva lämpötila	t_{in}	96 °C
Poistuva lämpötila	t_{out}	225 °C
Hiilidioksidin moolimassa	M	44 g/mol
Lämpökapasiteetti keskilämpötilassa	$cp_{t_kesk.}$	1 kJ/kgK
Lämmitysteho	Q_{LNG}	0,84 % %-osuus jlkat. Tehosta
Tulistimen kokonaisteho	$Q_{tulistin_104L}$	8,3 % %-osuus jlkat. Tehosta
Lämmitys höyrynpaine	p_h	37 bar (a)
Lauhteen lämpötila	p_l	242 °C
Höyryn entalpia	h_h	2802 kJ/kg
Lauhteen entalpia	h_l	1047 kJ/kg
Höyryn massavirta	qm_h	9,4 % %-osuus massavirroista

Korkeapaineiset lauhteet tulistimen jälkeen paisutetaan 2,5 bar(g):n verkostoon. Kyseisissä lauhteissa energiasisältö on vielä jokseenkin suuri ja paisuvan lauhteiden massavirtaosuus saadaan kaavalla 7.

$$y = \frac{h_{kp_lauhde} - h_{mp_lauhde}}{h_{paisunta} - h_{mp_lauhde}}$$

KAAVA 7

missä

- y , paisuvan massavirran osuus
- h_{kp_lauhde} , korkeapaineisen lauhteen entalpia [kJ/kg]
- h_{mp_lauhde} , matalapaineisen lauhteen entalpia [kJ/kg]
- $h_{paisunta}$, paisuvan höyryn entalpia [kJ/kg]

Kyseisen tulistimen lauhteista paisuu 22 %. Paisuvan höyryn tehon laskentaan voidaan soveltaa kaavaa 3, jonka avulla saadaan paisuvan höyryn massavirrasta sekä entalpiamuutoksesta korkeapaineisen lauhteen ja paisuvan höyryn väliltä paisunnan tehoksi 1,7 % kattilan tehosta. Lauhdesäiliössä paisuntaa tapahtuu vielä 0,6 %:n teholla kattilan tehoon nähden (taulukko 4).

TAULUKKO 4. LNG- ja CO₂-tulistimen lauhteiden paisunnat ja energia lauhdesäiliöön

Lauhteiden paisunta			
Paisunnan paine	$p_{paisunta}$	4 bar(a)	
Paisunnan höyryn entalpia	$h_{h_paisunta}$	2732 kJ/kg	
Paisunnan lauhteen entalpia	$h_{l_paisunta}$	584 kJ/kg	
Lauhteista paisunnan osuus	%-osuus	21,5 %	
Paisunnan teho	$Q_{paisunta}$	1,7 %	%-osuus jlkat. Tehosta

Energia lauhdesäiliöön			
Lauhdesäiliön paine	$p_{lauhdes.}$	1 bar (a)	
Lauhteen entalpia	h_l	417 kJ/kg	
Energia lauhdesäiliöön	$Q_{lauhdes.}$	0,6 %	%-osuus jlkat. Tehosta

Hapentulistin

Hapentulistimen laskenta toteutetaan samalla tapaa kuin LNG- ja CO₂-tulistimen laskenta. Hapen tuleva lämpötila on 133 °C. Happi lämmitetään 200 °C:n lämpötilaan, ja kyseisen lämpötilavälin keskimääräinen ominaislämpökapasiteetti on

0,953 kJ/kgK. Happiatomin moolimassa on 16 g/mol, mutta puhdas happi ilmenee kahden atomin molekyylinä. Tällöin käytettävä moolimassa on 32 g/mol. Kun tiedetään tilavuusvirta, sekä edellä olevia tietoja hyödyntäen, lämmönvaihtimen teho on 1,3 % kattilan tehosta (taulukko 5). (3.)

Käytettävän höyrynlaatu on myös samaa kuin LNG- ja CO₂-tulistimen höyry ja kyseisen höyryn ominaisuuksilla massavirta on 1,5 % kattilasta poistuvista massavirroista (taulukko 5).

Hapentulistimen lauhteet ohjataan myös paisutettavaksi 2,5 bar(g):n verkostoon. Lauhteen paine on hieman alhaisempi, 25,4 bar(a) ja lauhteen entalpia 966 kJ/kg. Lauhteista paisuu 17,8 % massavirrasta ja paisunnan teho on 0,23 % kattilan tehosta. Lauhdesäiliössä paisuntaa tapahtuu vielä 0,1 %:n teholla kattilan tehoon nähden (taulukko 5).

TAULUKKO 5. Hapentulistimen energiankäyttö sekä höyryjen paisunta ja energia lauhdesäiliöön

Hapen tulistin			
Tuleva lämpötila	t_{in}	133 °C	
Poistuva lämpötila	t_{out}	200 °C	
Hapen moolimassa	M	32 g/mol	
Lämpökapasiteetti keskilämpötilassa	$cp_{t_kesk.}$	0,95 kJ/kgK	
Lämmitysteho	$Q_{O2_tulistin}$	1,3 %	%-osuus jlkat. Tehosta
Lämmitys höyrynpaine	p_h	37 bar (a)	
Lauhtumispaine (tulistimella)	p_l	25 bar (a)	
Höyryn entalpia	h_h	2802 kJ/kg	
Lauhteen entalpia	h_l	966 kJ/kg	
Höyryn massavirta	qm_h	1,5 %	%-osuus massavirroista
Lauhteiden paisunta			
Paisunnan paine	$p_{paisunta}$	3,50 bar(a)	
Paisunnan höyryn entalpia	$h_{h_paisunta}$	2732 kJ/kg	
Paisunnan lauhteen entalpia	$h_{l_paisunta}$	584 kJ/kg	
Lauhteista paisunnan osuus	%-osuus	18 %	
Paisunnan teho	$Q_{paisunta}$	0,23 %	%-osuus jlkat. Tehosta
Energia lauhdesäiliöön			
Lauhdesäiliön paine	$p_{lauhdes.}$	1,04 bar (a)	
Lauhteen entalpia	h_l	422 kJ/kg	
Energia lauhdesäiliöön	$Q_{lauhdes.}$	0,10 %	%-osuus jlkat. Tehosta

Kun tiedetään lieriöön tuleva massavirta sekä sieltä poistuvat kaikki muut massavirrat paitsi puhalluksesta poistuva, voidaan puhalluksen kautta poistuva massavirta laskea vähentämällä tulevasta massavirrasta kaikki tiedetyt massavirrat. Syöttöveden massavirrasta vähennetään tuorehöyryn massavirta, kaasuttimen omakäyttö sekä tulistimien massavirrat. Näin ollen puhalluksen massavirraksi saadaan 15,4 % kattilasta poistuvista massavirroista. Puhalluksen kautta menevä lämpöteho on tulevan syöttöveden ja lieriössä vallitsevan kylläisen nesteen entalpioiden erotuksen ja massavirran tulo. Puhalluksesta menee noin 4 % kattilan lämpötehosta. Tästä arvioidusti noin puolet menee paisuntaan ja sieltä saadaan talteen 1,4 % kattilan tehoon nähden. Verkostoon omaa höyryntuotantoa

on tuorehöyryn tuotanto sekä paisuntojen summa, joka kaikkinsa on 81 % kattilan kokonaistehosta (taulukko 6).

TAULUKKO 6. Kaasutuksen tuotannon yhteenveto

KAASUTUS			
Syöttöveden massavirta	$q_{m_{syve}}$	100 %	%-osuus massavirroista
Tuorehöyryn massavirta	$q_{m_{th}}$	69 %	%-osuus massavirroista
Tulistimille menevä höyrynmäärä	$q_{m_{O_2+LNGtul.}}$	10,9 %	%-osuus massavirroista
Kaasuttimeen syötetty höyrynmäärä	$q_{m_{kaasutin}}$	5,2 %	%-osuus massavirroista
Puhalluksen massavirta	$q_{m_{puhallus}}$	15,4 %	%-osuus massavirroista
Kattilan energiantuotto höyryverkostoon	$Q_{th_tuotanto}$	78 %	%-osuus jlkat. Tehosta
Matalapaineverkostoon paisunnat	$Q_{paisunnat}$	3,4 %	%-osuus jlkat. Tehosta
Tuotanto verkostoon	$Q_{verkostoon}$	81 %	%-osuus jlkat. Tehosta
Tulistimien höyryjen höyrystys teho	$Q_{O_2+LNGtul.}$	12,3 %	%-osuus jlkat. Tehosta
Puhalluksen kautta menevä lämpöteho	$Q_{puhallus}$	4,0 %	%-osuus jlkat. Tehosta
Kaasuttimen höyryjen höyrystysteho	$Q_{kaasutin}$	5,9 %	%-osuus jlkat. Tehosta
Jälkilämpökattilan kokonaisteho	$Q_{jlkat.}$	100 %	%-osuus jlkat. Tehosta
Puhalluksen paisunnan teho	$Q_{paisunta}$	1,4 %	%-osuus jlkat. Tehosta
Puhallusten häviöt	Q_{hukka}	1,0 %	%-osuus jlkat. Tehosta
Omakäytön %-osuus kattilan tehosta	%-osuus	18 %	
Paisuvan osuus puhalluksesta	%-osuus	22 %	

4.1.4 Amisolpesu

Amisolpesussa on kaksi höyryä kuluttavaa kohdetta. Molempiin kohteisiin on massavirtausmittaukset, joten energiankulutus voidaan laskea massavirran sekä keittimen ylitse tapahtuvan entalpiamuutoksen tulolla. Näihin lisätään myös lauhdesäiliössä tapahtuva lauhteiden paisunta. Arvioitujen lauhteiden lämpötilojen perusteella keittimien tehot ovat 6 % ja 13,6 % allokoitavien energiankulutuksen kokonaistehosta. Lauhdesäiliössä energiaa paisuu vielä 0,6 %:n teholla allokoitamaan kulutukseen nähden, ja täten amisolin kokonaisenergiankulutus on 20,2 % allokoitavasta energiankulutuksesta (taulukko 7).

TAULUKKO 7. Amisolpesun energiantarve sekä höyrynkäyttö

Amisol			
Höyryn paine	p_h	3,5 bar (a)	
Höyryn lämpötila	p_t	140,9 °C	
Höyryn entalpia	h_h	2737 kJ/kg	
Lauhtumislämpötila	$t_{sat.}$	138,9 °C	
Tislauskolonni 206A			
206A:n pohjan lämpötila	$206A_t$	119 °C	
Lauhteen arvioitu lämpötila	l_t	128,9 °C	
Lauhteen entalpia	l_h	542 kJ/kg	
Keittimien teho	Q_{206A}	6,0 %	%-osuus allokoitavista
Regeneraattori 209A			
209A:n pohjan lämpötila	$209A_t$	83 °C	
Lauhteen arvioitu lämpötila	l_t	110,9 °C	
Lauhteen entalpia	l_h	465 kJ/kg	
Keittimien teho	Q_{209A}	13,6 %	%-osuus allokoitavista

Energia lauhdesäiliöön			
Lauhdesäiliön paine	$p_{laudes.}$	1 bar(a)	
1,04bar(a) nesteen entalpia	$h_{lauhes.}$	417 kJ/kg	
Lauhteiden energiahukka	$Q_{lauhteet}$	0,6 %	%-osuus allokoitavista
Amisolin energian kulutus	Q_{Amisol}	20,2 %	%-osuus allokoitavista

4.1.5 Kaliummetylaattitehdas

Kaliummetylaattitehtaassa höyrynkulutus tapahtuu kahdessa eri tislauskolonnissa. Kyseiset tislauskolonnit käyttävät 2,5 bar(g):n höyryä. Tiedettäessä höyryn massavirrat kolonnin 1000 energiankulutus on 2,4 % allokoitavasta energiasta ja kolonnin 1010 3,6 % allokoitavasta energiasta. Lauhdesäiliössä paisuntaa tapahtuu 0,3 %:n teholla. Täten kaliummetylaattitehtaassa kokonaisenergiankäyttö on 6,3 % allokoitavasta energiasta (taulukko 8).

TAULUKKO 8. Kaliummetylaattitehtaan energiantarve sekä höyrynkulutus

Kaliummetylaatti-tehdas			
Höyryn paine	p_h	3,5 bar (a)	
Höyryn lämpötila	t_h	140,9 °C	
Höyryn entalpia	h_h	2737 kJ/kg	
Lauhtumislämpötila	$t_{sat.}$	138,9 °C	
Kolonne 1000			
Kolonnin 1000 pohjan lämpötila	$Kol.1000_t$	106 °C	
Lauhteen arvioitu lämpötila	l_t	122,4 °C	
Lauhteen entalpia	l_h	514 kJ/kg	
Keittimien teho	$Q_{Kol.1000}$	2,4 %	%-osuus allokoitavista
Kolonne 1010			
Kolonnin 1010 pohjan lämpötila	$Kol.1010_t$	112 °C	
Lauhteen arvioitu lämpötila	l_t	125,4 °C	
Lauhteen entalpia	l_h	527 kJ/kg	
Keittimien teho	$Q_{Kol.1000}$	3,6 %	%-osuus allokoitavista

Energia lauhdesäiliöön			
Lauhdesäiliön paine	$p_{lauhes.}$	1 bar(a)	
1,04bar(a) nesteen entalpia	$h_{lauhes.}$	417 kJ/kg	
Lauhteiden energiahukka	$Q_{lauhteet}$	0,3 %	%-osuus allokoitavista
KAME-tehtaan energiankulutus	Q_{KAME}	6,3 %	%-osuus allokoitavista

4.1.6 Membra

Membraanille menevän kaasun lämpötilaa nostetaan prosessiteknisistä syistä. Membraanille syötettävä kaasu on suurelta osin vetyä ja hiilimonoksidia sisältäen pieniä pitoisuuksia metaania, typpeä sekä argonia.

Kyseisellä lämmönvaihtimella ei ole mittauksia höyrypuolella. Syötettävästä kaasusta kuitenkin tiedetään menevä sekä poistuva lämpötila. Lisäksi tiedetään kaasun normaalitilavuusvirta. Kaasusta tiedetään myös tarkasti eri kaasukomponenttien pitoisuudet.

Tilavuusprosenttiosuuksien perusteella voidaan laskea jokaisen komponentin tilavuusvirta ja yleisen moolitilavuuden perusteella ainevirta. Kaasukomponenttien

moolimassojen sekä ainevirtojen avulla saadaan massavirrat. Hiilimonoksidille, vedylle ja typelle on interpoloitu vaihtimessa vallitsevan keskilämpötilan perusteella ominaislämpökapasiteetit, kun taas argonille ja metaanille on käytetty NTP-olosuhteissa löytyvää ominaislämpökapasiteettia. Tämä ei ole siten niin tarkka, mutta argonin ja metaanin massaosuudet ovat hyvin pienet suhteessa kokonaismassavirtaan. Tästä syystä se ei aiheuta suurta virhettä. Näiden perusteella voidaan laskea tarvittava lämmitysteho lämmönsiirtimelle. Membraanin energiankulutus on 1,4 % kaikesta allokoitavasta energiasta. (3; 4; 5.)

4.1.7 MF1-tehdas

Metyyliformiaattitehtaiden höyrynkulutus tapahtuu metyyliformiaatin tislaamisessa metanolista erilleen. Kyseinen tehdas käyttää 2,5 bar(g):n höyryä. Pohjan lämpötila on normaaliolosuhteissa noin 90 °C. Aiemmin esitettyjen oletusten perusteella, entalpiamuutoksella keittimen ylitse ja kertomalla se massavirralla keittimen tehoksi saadaan 18,3 % allokoitavasta energiankulutuksesta. Lauhdesäiliössä energiaa paisuu vielä 0,5 % allokoitavasta energiankulutuksesta. Täten tehdään energiankulutus kaikkienensa on 18,8 % kaikesta allokoitavasta energiasta (taulukko 9).

TAULUKKO 9. MF1-tehtaan höyryn ja energiankulutus

MF1-tehdas			
Höyryn paine	p_h	3,5 bar (a)	
Höyryn lämpötila	t_h	140,9 °C	
Kolonnin pohjan lämpötila	t_{1800}	91 °C	
Höyryn entalpia	h_h	2737 kJ/kg	
Lauhtumislämpötila	$t_{sat.}$	138,9 °C	
Lauhteen lämpötila (Arvio)	t_l	114,9 °C	
Lauhteen entalpia	h_l	482 kJ/kg	
Keittimen teho	Q_{1810}	18,3 %	%-osuus allokoitavista

Energia lauhdesäiliöön			
Lauhesäiliön paine	$p_{lauhes.}$	1,04 bar(a)	
1,04bar(a) nesteen entalpia	$h_{lauhes.}$	422 kJ/kg	
Lauhteiden energiahukka	$Q_{lauhteet}$	0,5 %	%-osuus allokoitavista
MF1-tehtaan energian kulutus	$Q_{MF1-tehdas}$	18,8 %	%-osuus allokoitavista

4.1.8 MF2-tehdas

MF2-tehdas on toimintaperiaatteeltaan samanlainen tehdas kuin MF1-tehdas. Käytettävä höyry tosin on 1,7 bar(g):a, ja se tuotetaan osittain MH5-tehtaalla. Mikäli MH5-tehtaan tuottama höyry ei riitä, 2,5 bar(g):n verkosta paine pidetään 1,7 bar(g):ssa reductioventtiilin kautta. Höyryn lähtölämpötila MH5-tehtaalla on 132 °C ja täten höyryn entalpia 2724 kJ/kg. Höyrynkulutus tiedettäessä energiankulutus on 13,3 % allokoitavasta energiasta. Lauhesäiliön paisunnat huomioiden kokonaiskulutus on 13,6 % allokoitavasta energiasta (taulukko 10).

TAULUKKO 10. MF2-tehtaan höyryn ja energiankulutus

MF2-tehdas			
Höyryn paine	p_h	2,7	bar (a)
Höyryn lämpötila	t_h	132,0	°C
Kolonnin pohjan lämpötila	t_{2500}	91	°C
Höyryn entalpia	h_h	2724	kJ/kg
Lauhtumislämpötila	$t_{sat.}$	130,0	°C
Lauhteen lämpötila (Arvio)	t_l	110,5	°C
Lauhteen entalpia	h_l	464	kJ/kg
Keittimen teho	Q_{2510}	13,3 %	%-osuus allokoitavista

Energia lauhdesäiliöön			
Lauhdesäiliön paine	$p_{lauhes.}$	1,04	bar(a)
1,04bar(a) nesteen entalpia	$h_{lauhes.}$	422	kJ/kg
Lauhteiden energiahukka	$Q_{lauhteet}$	0,2 %	%-osuus allokoitavista
MF2-tehtaan energian kulutus	$Q_{MF2-tehdas}$	13,6 %	%-osuus allokoitavista

4.1.9 Palautuskolonne 4600

Palautuskolonne 4600 käyttää myös matalapaineista 1,7 bar(g):n höyryä. Höyrynkulutuksen ja ominaisuuksien avulla keittimen tehoksi saadaan 16,1 % allokoitavasta energiankulutuksesta. Paisunnat huomioiden kokonaiskulutus on 16,4 % allokoitavasta energiasta (taulukko 11).

TAULUKKO 11. Palautuskolonnin 4600 höyryn ja energiankulutus

Palautuskolonne 4600			
Höyryn paine	p_h	2,7 bar (a)	
Höyryn lämpötila	t_h	132,0 °C	
Kolonnin pohjan lämpötila	t_{4600}	88 °C	
Höyryn entalpia	h_h	2724 kJ/kg	
Lauhtumislämpötila	$t_{sat.}$	130,0 °C	
Lauhteen lämpötila (Arvio)	t_l	109,0 °C	
Lauhteen entalpia	h_l	457 kJ/kg	
Keittimen teho	Q_{4610}	16,1 %	%-osuus allokoitavista

Energia lauhdesäiliöön			
Lauhesäiliön paine	$p_{lauhes.}$	1,04 bar(a)	
1,04bar(a) nesteen entalpia	$h_{lauhes.}$	422 kJ/kg	
Lauhteiden energiahukka	$Q_{lauhteet}$	0,2 %	%-osuus allokoitavista
Palautuskolonnin energian kulutus	$Q_{pal.kol.}$	16,4 %	%-osuus allokoitavista

4.1.10 Metanolin suolanpoisto - MESU

MESUn kolonne on hieman poikkeuksellinen. Tässä on kolme erillistä lämmönvaihtinta: yksi toimii lauhteista paisuvan höyryn avulla, ja toinen keitin MH2-tehtaan 2-kolonnin tislehöyryn avulla ja kolmas 2,5 bar(g)-höyryllä. Pohjimmaisena on keitin, joka käyttää 2,5 bar(g):n höyryä. MESUn pohjimmaisina lämmönvaihtimia käyttää keskimäärin 4,6 % allokoitavasta energiankulutuksesta (taulukko 12).

TAULUKKO 12. MESU:n 2,5 bar(g)-höyryn ja energiankulutus

Metanolin suolanpoisto			
Höyryn paine	p_h	3,5 bar (a)	
Höyryn lämpötila	t_h	140,9 °C	
Kolonnin pohjan lämpötila	t_{2800}	71 °C	
Höyryn entalpia	h_h	2737 kJ/kg	
Lauhtumislämpötila	$t_{sat.}$	138,9 °C	
Lauhteen lämpötila (Arvio)	t_l	104,9 °C	
Lauhteen entalpia	h_l	440 kJ/kg	
Keittimen teho	Q_{2801}	4,6 %	%-osuus allokoitavista

Energia lauhdesäiliöön			
Lauhesäiliön paine	$p_{lauhes.}$	1,04 bar(a)	
1,04bar(a) nesteen entalpia	$h_{lauhes.}$	422 kJ/kg	
Lauhteiden energiahukka	$Q_{lauhteet}$	0,04 %	%-osuus allokoitavista
Keittimen kokonaiskulutus		4,6 %	%-osuus allokoitavista

Happohöyrykeittimen tehon laskennassa täytyy huomioida muurahaishappohöyryn vesi- ja happopitoisuudet. Muurahaishappoa höyryssä on noin 12 % ja höyryn paine 2 bar(g). Lämpötila on 134 °C normaali tilanteessa. Vesihöyryn teho-osuus saadaan entalpiamuutoksen sekä vesihöyryn massaosuuden tulosta. Happohöyryosuuden laskennassa käytetään happohöyryn ominaislämpökapasiteetteja kaasumaisena sekä nestemäisenä ja lauhtumisenergiaa. Vesihöyryn osuus on 2,8 % allokoitavasta energiankulutuksesta ja hapon mukana siirtyvä lämpötehon osuus on noin 0,2 % allokoitavasta energiasta. Keittimen kokonaiskulutus 3 % allokoitavasta energiankulutuksesta (taulukko 13). (6.)

TAULUKKO 13. MESU:n happohöyrykeittimen teho

Happohöyry keitin			
Hapon pitoisuus	X_{MH}	12 %	
Veden osuuden teho			
Höyryn paine	p_h	3 bar (a)	
Höyryn lämpötila	t_{4700_huippu}	134 °C	
Lauhteen lämpötila	t_{2800}	85 °C	
Höyryn entalpia	h_h	2726 kJ/kg	
Lauhteen entalpia	h_l	356 kJ/kg	
Teho	$Q_{v\,esi}$	2,8 %	%-osuus allokoitavista
Hapon moolimassa			
Hapon moolimassa	M_{MH}	46,03 g/mol	
Lauhtumis energia	$\Delta_{vap}h$	47,7 kJ/mol	
Lauhtumis/Höyrytymis energia	$\Delta_{vap}h$	1036 kJ/kg	
Höyryn ominaislämpökapasiteetti	$C_{p,gas}$	50,9 J/molK	
	$C_{p,gas}$	1,11 kJ/kgK	
Nesteen ominaislämpökapasiteetti	$C_{p,liquid}$	95,0 J/molK	
	$C_{p,liquid}$	2,06 kJ/kgK	
Hapon lauhtumislämpötila	$t_{lauhtuminen}$	120 °C	
4700-kolonnin yläpään lämpö		134 °C	
Arvioitu lauhteen lämpötila		85 °C	
Happohöyryn teho	Q_{MH}	0,18 %	%-osuus allokoitavista
Keittimen teho	Q_{2802}	3,0 %	%-osuus allokoitavista

MESU-kolonnissa on myös metanolisyötteen lämmitys, joka toteutetaan MH2- ja MHL-tehtaiden lauhdesäiliön paisuntahöyryillä. Keittimelle on metanolin tilavuusvirtaus ja keittimeltä on arvioitu sinne menevä ja poistuva lämpötila. Tilavuusvirrasta on mittaustietoa ja metanolin tiheys vallitsevissa olosuhteissa noin 792 kg/m³. Lämpötilan muutos keittimellä on noin 33 °C ja metanolin ominaislämpökapasiteetti 2,65 kJ/kgK. Näiden tietojen avulla kaavalla 3 saadaan lämmönvaihtimen tehoksi 0,56 % allokoitavista kulutuksesta (taulukko 14). (3.)

TAULUKKO 14. MH2- ja MHL-tehtaiden lauhneiden paisuntahöyryjen käyttö

Lauhdesäiliön 4920 paisuntahöyryjen käyttö			
Paine	p_{4920}	1,04	bar (a)
Höyryn entalpia	h_h	2677	kJ/kg
Lauhteen entalpia	h_l	422	kJ/kg
Tiheys	ρ_{metanoli}	792	kg/m ³
Menevä lt.	$t_{\text{menevä}}$	22	°C
Poistuva lt.	t_{poistuva}	55	°C
Metanolin cp	cp	2,65	kJ/kgK
Teho	Q_{2803}	0,56 %	%-osuus allokoitavista

Kyseisen lämmönvaihtimen lämpöenergia on peräisin MH2- ja MHL-tehtaiden otamasta lämpöenergiasta. Tästä syystä lämmönvaihtimen käyttämä energia suhteutetaan kummankin tehtaan 2-kolonnien energiankulutukseen, jaetaan kolonnien energiankulutuksen summalla ja kerrotaan lämmönvaihtimen teholla (kaavat 8 ja 9).

$$Q_{4920_{MH2}} = \frac{Q_{MH2}}{Q_{MH2} + Q_{MHL}} * Q_{4920}$$

KAAVA 8

$$Q_{4920_{MHL}} = \frac{Q_{MHL}}{Q_{MH2} + Q_{MHL}} * Q_{4920}$$

KAAVA 9

Kyseiset tehot siirretään allokoitaviksi kaikkien tehtaiden kesken ja ne myös vähennetään tehtaiden omasta kulutuksesta. 2-kolonnien käyttämä energia antaa riittävän tarkkuuden lauhneiden paisuntahöyryjen käytöstä, sillä niiden kautta tulee yli 80 % kyseisten tehtaiden lauhteista lauhdesäiliöön. Kyseiseen lauhdesäiliöön tulee myös allokoitavia lauhteita, mutta laskennan kannalta niiden vaikutus ei ole kovin suurta.

4.1.11 Kaliumformiaatin poisto

Katalyytin muodostamien suolojen poistamiseen käytettävä kolonni käyttää 2,5 bar(g)-verkoston höyryä. Höyrynkulutuksen keskiarvolla keittimen teho on 1,12

% allokoitusta energiasta ja lauhteiden paisunnassa vapautuu 0,03 % allokoitavasta energiasta. Täten tehtaan energiankulutus kokonaisuudessaan on 1,15 % allokoitavasta energiankulutuksesta (taulukko 15).

TAULUKKO 15. Kaliumformiaatin poiston höyryn- ja energiankulutus

FOKURA			
Höyryn paine	p_h	3,5 bar (a)	
Höyryn lämpötila	t_h	140,9 °C	
Kolonnin pohjan lämpötila	t_{2600}	89 °C	
Höyryn entalpia	h_h	2737 kJ/kg	
Lauhtumislämpötila	$t_{sat.}$	138,9 °C	
Lauhteen lämpötila (Arvio)	t_l	113,9 °C	
Lauhteen entalpia	h_l	478 kJ/kg	
Keittimen teho	Q_{2610}	1,12 %	%-osuus allokoitavista

Energia lauhdesäiliöön			
Lauhdesäiliön paine	$p_{lauhes.}$	1,04 bar(a)	
1,04bar(a) nesteen entalpia	$h_{lauhes.}$	422 kJ/kg	
Lauhteiden energiahukka	$Q_{lauhteet}$	0,028 %	%-osuus allokoitavista
Fokuran kokonais kulutus	Q_{foukra}	1,15 %	%-osuus allokoitavista

4.1.12 Metanolinkuivain

Metanolinkuivain käyttää sekä 2,5 bar(g):n että 35 bar(g):n höyryä. Höyryn käyttö tapahtuu sykleissä, ja energiankulutukselle lasketaan painotettu keskiarvo vuorokauden ajanjaksolle. Regenerointi tapahtuu kuumentamalla typpikaasua ja kierrättämällä tätä regeneroitavassa adsorberissa. Typpikaasun tilavuusvirta saadaan järjestelmästä ja vallitseva paine on 2,54 bar(g). Typpikaasun keskilämpötila on 190 °C, ja näiden perusteella voidaan laskea typpikaasun keskimääräinen massavirta kaavalla 10.

$$m = \frac{pV}{RT} = \frac{pV}{\frac{R}{M}T}$$

KAAVA 10

missä

- m , kaasun massavirta [kg/s]
- p , kaasun absoluuttinen paine [Pa]
- V , kaasun tilavuusvirta [m^3/s]
- R , kaasuvakio [8,314 J/molK]
- T , kaasun lämpötila [K]
- M , kaasun moolimassa [kg/mol]

Typpikaasu lämmitetään kahdessa vaiheessa, ensin 2,5 bar(g):n höyryllä ja regeneroinnin myöhemmässä vaiheessa tulistetaan vielä 35 bar(g):n höyryllä. 2,5 bar(g):n höyryä käytetään ajasta 60 % ja 35 bar(g):n höyryä 41 %. Typpikaasu lämmitetään 2,5 bar(g):n höyryllä 20 °C:n lämpötilasta 130 °C:seen ja tästä 35 bar(g):n höyryllä tulistetaan 217 °C:seen. Typen keskimääräinen ominaislämpökapasiteetti 2,5 bar(g):n lämmönvaihtimessa on 1,041 kJ/kgK ja 35 bar(g):n lämmönvaihtimessa 1,049 kJ/kgK. Typpikaasun massavirran, lämpötilamuutosten sekä ominaislämpökapasiteettien avulla saadaan lämmönvaihtimien tehoiksi 0,55 % ja 0,44 % allokoitavasta energiasta. Tästä ajallisesti painotettuna keskimäärin lämmönvaihtimien tehot ovat keskimäärin 0,33 % ja 0,18 % allokoitavasta energiankulutuksesta. Täten yhteensä lämmönvaihtimen keskimääräinen höyryenergiankulutus on 0,51 % allokoitavasta energiankulutuksesta

4.1.13 Verkostojen häviöt

Verkostojen häviöt tehtaan kokonaiskulutuksesta oletettavasti ovat jokseenkin pienet vaikkakin silti merkittävät suurista energiankulutuksista johtuen. Näitä ei kuitenkaan lasketa erityisen tarkasti, vaan ne arvioidaan. Eristepaksuuden, keskimääräisen lämpötilaeron ulkoilman sekä putkistojen sisälämpötilan välillä ja putkiston pituuden avulla putkistojen lämpöhäviöt ovat noin 0,9 % allokoitavasta kulutuksesta.

4.1.14 Allokoitavien alueiden yhteenveto

Allokoitavien tehtaiden höyryn sekä energiankulutukset voidaan laskea yhteen ja täten saadaan muurahaishappotehtaiden käynnin kannalta ulkoisten osakoko-

naisuuksien höyrynkulutuksista arvio. Yhteiset tehtaiden osuudet käyttävät kaikesta kulutuksesta 36,8 %. Painekaasutus tuottaa kaikesta allokoitavien kohteiden käyttämästä energiasta 29,3 %, eli 10,8 % kaikesta käytetystä höyryenergiasta (taulukko 16).

TAULUKKO. 16 Allokoitavien höyryenergioiden yhteenveto

Allokoitavien höyryjen yhteenveto (%-osuudet allokoitavien kulutuksesta)		
Vesilaitos	$Q_{\text{vesilaitos}}$	10,4 %
Freeziumin lämmitys	Q_{8930}	2,7 %
Amisol	Q_{amisol}	20,2 %
Kaliummetylaatti-tehdas	Q_{KAME}	6,3 %
Mebraani	Q_{membra}	1,4 %
MF1-tehdas	Q_{MF1}	18,8 %
MF2-tehdas	Q_{MF2}	13,6 %
Palautuskolonne 4600	Q_{4600}	16,4 %
Kuivaaja	Q_{kuivaaja}	0,5 %
Metanolin suolanpoisto	Q_{MESU}	7,6 %
Fokura	Q_{fokura}	1,1 %
Verkostojen häviöt	$Q_{\text{verkostot}}$	0,9 %
Kaasutuksen tuotanto (%-osuus allokoitavien kulutuksesta)	Q_{kaasutus}	29,3 %
Kaasutuksen tuotanto (%-osuus kaikesta kulutuksesta)	Q_{kaasutus}	10,8 %
Allokoitujen %-osuus kaikesta kulutuksesta	$Q_{\text{\%-osuus}}$	36,8 %

4.2 Happotehtaiden energiankulutus

Noin puolet tehtaiden kaikesta höyrynkulutuksesta tapahtuu muurahaishappotehtailla hapon väkevöinnissä. Kolonneja on yhdellä tehtaalla kaksi kappaletta ja lopuissa kolme kappaletta. Tehtaat ovat osaltaan hyvin samanlaisia, mutta jokaisessa on myös yksilöllisiä ominaisuuksia. Höyryä jokaisella tehtaalla käytetään myös hydrolyysireaktorien syötteen esilämmityksessä sekä itse hydrolyysireaktoreissa nostamalla sekä pitämällä lämpötila halutussa.

Kaikilla tehtailla 2-kolonnei tarvitsee höyryä, jolla on korkeampi paine sekä lämpötila. Myös kolonnista lähtevät höyryt ovat selkeästi kuumempia ja hyödynnettävissä muiden kolonnien keittämiseen. Täten näitä kolonneja, joita keitetään omalla tuotehöyryllä, ei tarvitse laskea ulkoisen höyryn käyttöön. Näitä ovat muun muassa MH2- ja MHL-tehtaiden 1- sekä 3-kolonnit. Poikkeuksia tosin on, kuten MH5-tehtaan 1- sekä 3-kolonnien kulutus, koska 1-kolonneiin höyry tulee MH4-tehtaalta ja 3-kolonneiin käytetään lauhteiden paisuntahöyryä sekä 1,7 bar(g):n höyryä (taulukko 17).

TAULUKKO 17. Höyrylaadun käyttö eri MH-tehtaiden höyryä käyttävissä yksiköissä

Yksikkö	Käytettävän höyryn laatu					
	FAM	MH1	MH2	MHL	MH4	MH5
Höyrystin	8bar(g)	-	-	-	-	-
Etulämmönvaihdin	-	2,5bar(g)	1,7bar(g)	2,5bar(g)	2,5bar(g)	2,5bar(g)
Hydrolyysireaktori	-	2,5bar(g)	5,5bar(g)	5,5bar(g)	8bar(g)	8bar(g)
1-kolonnei	2,5bar(g)	2,5bar(g)	Happoh.	Happoh.	Happoh.	Happoh.
2-kolonnei	8bar(g)	8bar(g)	5,5bar(g)	5,5bar(g)	8bar(g)	8bar(g)
3-kolonnei/haihdutin	8bar(g)	-	Happoh.	Happoh.	Happoh.	1,7bar(g)

4.2.1 MH1-tehdas ja formamidi-tehdas

MH1-tehdas on poikkeuksellinen muihin nähden siinä mielessä, että se soveltuu myös formamidin tuotantoon. Kyseinen tehdas on prosessitilanteessa ollut formamidiajolla, ja laskenta toteutetaan sen mukaan.

Formamidin tuotanto tarvitsee huomattavasti vähemmän energiaa kuin muura-haishapon tuotanto. Ensimmäinen höyryä kuluttava kohde on ammoniakkin höyrystin (positio 7500). Kyseiselle höyrystimelle ei ole höyrynmäärämittareita, joten laskenta toteutetaan ammoniakkin virtauksista. Sen voidaan olettaa olevan kutaquinkin ulkoilman lämpötilassa. Tällöin ammoniakkin höyryntämiseen tarvitaan valitsevassa ajankohdassa energiaa 1188 kJ/kg. Ammoniakkin virtauksen perusteella laitteen energiankulutus on 8,8 % FAM-tehtaan energiankulutuksesta (taulukko 18). (3.)

1-kolonne (positio 3400) käyttää 2,5 bar(g):n höyryä. Kolonnin höyrymittausten perusteella keittimen teho on 71,1 % tehtaan energiankulutuksesta ja lauhteiden paisunnan teho lauhdesäiliössä 1,6 % tehtaan energiankulutuksesta. Täten 1-kolonnin energiankulutus on 72,7 % tehtaan energiankulutuksesta (taulukko 18).

2-kolonne (positio 3700) FAM-tehtaalla käyttää 8bar(g):n höyryä. Höyryyn paine alennetaan ennen käyttöä 4 bar(g):n paineeseen ja jäähdytetään ruiskutusvedellä lämpötilaan 152 °C:seen. Höyryyn massavirran perusteella laitteen energiankulutus on 10,4 % tehtaan energiankulutuksesta ja paisunnat sekä lauhdesäiliöön menevä energia huomioiden 11,2 % tehtaan kulutuksesta (taulukko 18).

Haihdutin (positio 7200) käyttää myös 5 bar(g):n höyryä. Höyrynkulutuksen perusteella laitteen energiankulutus on 6,6 % ja lauhdesäiliöön menevä energia huomioiden 7,2 % tehtaan kulutuksesta (taulukko 18).

TAULUKKO 18. MH1-tehtaan energian- ja höyrynkulutus formamidiajolla

MH1/FAM-Tehtas - Formamidi ajolla						
Laitteen positio		7500	3400	3700	7200	
Ammoniakin massavirta	$q_{m_{NH_3}}$	770	-	-	-	kg/h
Höyrystysenergia	$\Delta_{vap}h$	1188	-	-	-	kJ/kg
Höyrystimen teho	$Q_{höyrystin}$	8,8 %	-	-	-	%-tehtaan kulutuksesta
Laitteen energian käyttö						
Höyryyn paine	p_h	9	3,5	5	5	bar(a)
Höyryyn lämpötila	t_h	177,4	140,9	152	152	°C
Toisiopuolen lt.	t_{toisio_p}	23,5	87	128	133,3	°C
Lauhtumis lämpötila	$t_{sat.}$	175,4	138,9	151,8	151,8	°C
Lauhteen arvioitu lt	t_{lauhde}	99,4	112,9	139,9	142,6	°C
Höyryyn entalpia	h_h	2778	2737	2749	2749	kJ/kg
Lauhteen entalpia	h_l	417	474	589	600	kJ/kg
Laitteen teho	Q	8,8 %	71,1 %	10,4 %	6,6 %	%-tehtaan kulutuksesta
Paisunta lauhteista						
Paisunnan paine	$p_{paisunta}$	-	-	3,5	-	bar(a)
2,5bar nesteen entalpia	$h_{sat_2,5bar}$	-	-	584	-	kJ/kg
2,5bar höyryyn entalpia	$h_{höyr_2,5bar}$	-	-	2732	-	kJ/kg
Paisunnan suhde	y	-	-	0,22 %	-	
Paisunnan teho	$Q_{paisunta}$	-	-	0,02 %	-	%-tehtaan kulutuksesta
Energia lauhdesäiliöön						
Lauhdesäiliön paine	$p_{lauhes.}$	1,04	1,04	1,04	1,04	bar(a)
1,04bar(a) nesteen entalpia	$h_{lauhdes.}$	422	422	422	422	kJ/kg
Lauhteiden energiahukka	$Q_{lauhteet}$	-0,02 %	1,63 %	0,78 %	0,55 %	%-tehtaan kulutuksesta
Laitteen kulutus	Q	8,8 %	72,8 %	11,2 %	7,2 %	%-tehtaan kulutuksesta

Yhteenvetona FAM-ajolla tehdas kuluttaa kaikkinsa 6,4 % kaikesta tehtaiden energiankulutuksesta.

4.2.2 MH2-tehdas

MH2-tehtaalla tuorehöyryä käytetään kolmessa eri kohteessa: etulämmönvaihtimessa (positio 4180), hydrolyysireaktorissa (positio 4200) sekä 2-kolonnissa (positio 4700). Etulämmönvaihtimessa höyryä käytetään syötteen lämpötilan nostamiseen ja hydrolyysireaktorissa edelleen nestefaasin lämpötilan nostamiseen sekä ylläpitoon. Lämpötila pidetään halutussa riittäen kattamaan myös reaktion tarvitsema energia. Hydrolyysinsyötteen energiankulutuksen laskenta avataan prosessiteknisistä syistä erillisessä liitteessä, joka on toimitettu toimeksiantajalle (liite 1). Etulämmönvaihtimen tarvitsema lämpöteho on 7,8 % ja hydrolyysireaktorin 7,2 % MH2-tehtaan kulutuksesta. Lauhteissa menee näistä laitteista yhteensä 0,7 % MH2-tehtaan kokonaisenergiankulutuksesta (taulukko 19).

Suurin yksittäinen höyrynkuluttaja MH2-tehtaalla on 2-kolonne. 2-kolonnin tislehöyryillä keitetään tehtaan 1- sekä 3-kolonneja sekä osittain myös MESU-kolonnia. Kyseisissä olosuhteissa kolonnin keittimen teho on 80 % MH2-tehtaan energiankulutuksesta ja lauhteiden paisunnat matalapaineverkostoon sekä lauhdesäiliössä tapahtuva paisunta huomioiden energiankulutus on 84 % MH2-tehtaan energiankulutuksesta (taulukko 19).

TAULUKKO 19. MH2-tehtaan energian- ja höyrynkulutus

		MH2-Tehdas			
Laitteen positio		4180	4200	4700	
Laitteen energian käyttö					
Höyryn paine	p_h	2,7	6,5	6,5	bar(a)
Höyryn lämpötila	t_h	132,0	175,0	175,0	°C
Toisiopuolen lt.	$t_{\text{toisio_p}}$	93,5	120,0	144,5	°C
Lauhtumis lämpötila	$t_{\text{sat.}}$	130,0	162,0	162,0	°C
Lauhteen lämpötila (Arvioitu)	t_{lauhde}	111,7	141,0	153,2	°C
Höyryn entalpia	h_h	2724	2791	2791	kJ/kg
Lauhteen entalpia	h_l	469	594	646	kJ/kg
Laitteen teho	Q_{laite}	7,8 %	7,2 %	81 %	%-tehtaan kulutuksesta
Paisunta lauhteista					
Paisunnan paine	p_{paisunta}	-	3,5	3,5	bar(a)
2,5bar nesteen entalpia	$h_{\text{sat_2,5bar}}$	-	584	584	kJ/kg
2,5bar höyryn entalpia	$h_{\text{höyr_2,5bar}}$	-	2732	2732	kJ/kg
Paisunnan suhde	y	-	0,4 %	2,9 %	
Paisunnan teho	Q_{paisunta}	-	0,03 %	2,3 %	%-tehtaan kulutuksesta
Energia lauhdesäiliöön					
Lauhesäiliön paine	$p_{\text{laudes.}}$	1,04	1,04	1,04	bar(a)
1,04bar(a) nesteen entalpia	$h_{\text{lauhdes.}}$	422	422	422	kJ/kg
Lauhteiden energiahukka	Q_{lauhteet}	0,2 %	0,5 %	5,9 %	%-tehtaan kulutuksesta
Laitteen kulutus	$Q_{\text{kok.}}$	8,0 %	7,7 %	84 %	%-tehtaan kulutuksesta

Tuotantolinjan kokonaiskulutus on näin ollen 17,9 % koko tehtaan kulutuksesta, mutta koska 2-kolonnin höyryä hyödynnetään MESU-kolonnin käyttöön, tämä siirretään 2-tehtaan kulutuksesta allokoitavaiin ja vähennetään MH2-tehtaan kulutuksesta. Samoin MESU-kolonnin metanolin syötettä lämmitetään MH2- sekä MHL-tehtaiden lauhteiden paisunnoilla. Kun nämä vähennetään MH2-tehtaan kulutuksesta, lopullinen energiankulutus on 16,4 % koko tehtaan energiankulutuksesta.

4.2.3 MHL-tehdas

MHL-tehdas on lähes identtinen MH2-tehtaan kanssa. Energiankäytön osalta eroavaisuutena on 2-kolonnin tislehöyryjen käyttö. Tislehöyryjen käyttökohteita on vain kaksi: tehtaan 1- sekä 3-kolonnit. Näin ollen tislehöyryjä ei saada kaikissa prosessiolosuhteissa niin hyvin hyödynnettyä.

Etulämmönvaihtimen (positio 5180) energiankulutus vallitsevissa prosessiolosuhteissa on ollut laskennallisesti 6,7 % ja hydrolyysireaktorin (positio 5200) energiankulutus 6,1 % MHL-tehtaan kulutuksesta. Lauhdesäiliössä paisuntaa tapahtuu yhteensä 0,7 % MHL-tehtaan energiankulutukseen nähden (taulukko 20).

Kuten MH2-tehtaalla, suurin yksittäinen höyrynkuluttaja on 2-kolonne, joka ottaa kaikkinsa 83 % MHL-tehtaan energiankulutuksesta. Paisuntaa matalapaineverkostoon tapahtuu 2,3 %:n teholla ja lauhdesäiliössä paisuntaa tapahtuu 6,1 %:n teholla MHL-tehtaan energiankulutukseen nähden. Kolonnin kokonaisenergiankulutus on 87 % tehtaan energiankulutuksesta (taulukko 20).

TAULUKKO 20. MHL-tehtaan energian- ja höyrynkulutus

MHL-Tehtas					
Laitteen positio		5180	5200	5700	
Laitteen energian käyttö					
Höyryn paine	p_h	3,5	6,5	6,5	bar(a)
Höyryn lämpötila	t_h	140,9	166,0	166,0	°C
Toisipuolen lt.	$t_{\text{toisio_p}}$	96,5	122,5	144,5	°C
Lauhtumis lämpötila	$t_{\text{sat.}}$	138,9	162,0	162,0	°C
Lauhteen lämpötila (Arvioitu)	t_{lauhde}	117,7	142,2	153,2	°C
Höyryn entalpia	h_h	2737	2770	2770	kJ/kg
Lauhteen entalpia	h_l	494	599	646	kJ/kg
Laitteen teho	Q_{laitte}	6,7 %	6,1 %	83 %	%-tehtaan kulutuksesta
Paisunta lauhteista					
Paisunnan paine	p_{paisunta}	-	3,5	3,5	bar(a)
2,5bar nesteent entalpia	$h_{\text{sat_2,5bar}}$	-	584	584	kJ/kg
2,5bar höyrynt entalpia	$h_{\text{höyr_2,5bar}}$	-	2732	2732	kJ/kg
Paisunnan suhde	y	-	0,68 %	2,9 %	
Paisunnan teho	Q_{paisunta}	-	0,04 %	2,3 %	%-tehtaan kulutuksesta
Energia lauhdesäiliöön					
Lauhdesäiliön paine	$p_{\text{laudes.}}$	1,04	1,04	1,04	bar(a)
1,04bar(a) nesteent entalpia	$h_{\text{lauhdes.}}$	422	422	422	kJ/kg
Lauhteiden energiahukka	Q_{lauhteet}	0,2 %	0,5 %	6,1 %	%-tehtaan kulutuksesta
Laitteen kulutus	$Q_{\text{kok.}}$	6,9 %	6,5 %	87 %	%-tehtaan kulutuksesta

MHL-Tehtaan energiankulutus paisunnat huomioiden on 17,3 % koko tehtaiden höyrynkulutuksesta. Lauhteista tapahtuvaa paisuntaa hyödynnetään samassa kohteessa kuin MH2-tehtaan paisuntoja. Kaavalla 6 saadaan MHL-tehtaan osuus

lauhteiden hyödyntämisestä. Lopullinen kulutus lauhteiden paisunta huomioiden on 17,1 % tehtaiden kaikesta höyryenergiankulutuksesta.

4.2.4 MH4-tehdas

MH4-tehdas poikkeaa aiemmista siten, että 2-kolonnin höyryjä hyödynnetään MH5-tehtaan 1-kolonnin keittämiseen. Laskennassa tämä huomioidaan siten, että MH5-tehtaan 1-kolonnin ottama energia vähennetään MH4-tehtaan energiankulutuksesta ja siirretään MH5-tehtaan energiankulutukseksi.

Tuotanto alkaa samoin kuin muillakin tehtailla, eli ensimmäisenä on etulämmönvaihdin (positio 8180) ja hydrolyysireaktori (positio 8200). Näiden energiankäyttö on 13,3 % ja 4,8 % MH4-tehtaan höyryenergiankulutuksesta. Paisuntaa tapahtuu hydrolyysireaktorin höyryistä 0,1 %:n teholla- ja yhteensä lauhdesäiliössä paisuntaa 0,8 %:n teholla MH4-tehtaan höyrynkulutukseen nähden (taulukko 21).

Kuten muillakin tehtailla, 2-kolonne on suurin energiankäyttäjä. Kolonne kyseisessä prosessitilanteessa kuluttaa 80 % MH4-tehtaan höyryenergiankulutuksesta. 2-kolonnin kokonaiskulutus paisunnat sekä lauhdesäiliöön menevä energia huomioiden 81 % tehtaan kokonaiskulutuksesta (taulukko 21).

TAULUKKO 21. MH4-tehtaan energian- ja höyrynkulutus

		MH4-Tehtas			
Laitteen positio		8180	8200	8700	
Laitteen energian käyttö					
Höyryn paine	p_h	3,5	9	9	bar(a)
Höyryn lämpötila	t_h	140,9	176,0	176,0	°C
Toisiopuolen lt.	$t_{\text{toisio_p}}$	117,0	129,0	144,0	°C
Lauhtumis lämpötila	$t_{\text{sat.}}$	138,9	175,4	175,4	°C
Lauhteen lämpötila (Arvioitu)	t_{lauhde}	127,9	152,2	160,0	°C
Höyryn entalpia	h_h	2737	2775	2775	kJ/kg
Lauhteen entalpia	h_l	538	642	676	kJ/kg
Laitteen teho	Q_{laite}	13,3 %	4,8 %	80 %	%-tehtaan kulutuksesta
Paisunta lauhteista					
Paisunnan paine	p_{paisunta}	-	3,5	3,5	bar(a)
2,5bar nesteen entalpia	$h_{\text{sat_2,5bar}}$	-	584	584	kJ/kg
2,5bar höyryn entalpia	$h_{\text{höyr_2,5bar}}$	-	2732	2732	kJ/kg
Paisunnan suhde	y	-	2,7 %	4,3 %	
Paisunnan teho	Q_{paisunta}	-	0,1 %	3,3 %	%-tehtaan kulutuksesta
Energia lauhdesäiliöön					
Lauhdesäiliön paine	$p_{\text{laudes.}}$	1,45	1,45	1,45	bar(a)
1,45bar(a) nesteen entalpia	$h_{\text{lauhdes.}}$	463	463	463	kJ/kg
Lauhteiden energiahukka	Q_{lauhteet}	0,5 %	0,3 %	4,4 %	%-tehtaan kulutuksesta
Laitteen kulutus	$Q_{\text{kok.}}$	13,7 %	4,9 %	81 %	%-tehtaan kulutuksesta

Tehtaan energiankäyttö paisunnat huomioiden on 19,4 % tehtaiden kaikesta höyryenergiankulutuksesta. Höyryenergian käytöstä täytyy kuitenkin vähentää lauhteiden paisuntojen hyödyntäminen MH5-tehtaiden 3-kolonnille sekä MH5-tehtaan 1-kolonnin höyryn käyttö.

Lauhteiden hyödyntäminen MH4-tehtaalta saadaan jakamalla MH4-tehtaan otama 2-kolonnin energia molempien MH4- sekä MH5-tehtaiden 2-kolonnien käytämällä energioiden summalla (kaava 11). Tämä on riittävä tarkkuus, kun 2-kolonnit käyttävät tehtaiden energiasta yli 80 %.

$$Q_{8920_{MH4}} = \frac{Q_{8700}}{Q_{8700} + Q_{8500}} * Q_{8920}.$$

KAAVA 11

Kyseisillä tehtailla on yhteinen lauhdesäiliö, ja näin ollen voidaan olettaa, että lauhteiden paisuntaa tapahtuu likipitään tehtaiden ottamien energioiden suhteen. Paisuntoja käytetään puolestaan MH5-tehtaalla. Täten tämä paisuntojen hyödyntäminen vähennetään MH4-tehtaan kulutuksesta ja lisätään MH5-tehtaan käyttöön. Paisuntahöyryjen käyttö tapahtuu lauhdesäiliöstä, jonka paine on 1,45 bar(a). Kylläisen höyryn entalpia on 2692 kJ/kg ja lauhteen entalpia 463 kJ/kg. Paisuntojen hyödyntämisen teho on 4,9 % MH5-tehtaan kulutuksesta. Tästä MH4-tehtaan osuus on 51 %, joka puolestaan on 2,6 % koko MH4-tehtaan kulutuksesta (taulukko 22).

TAULUKKO 22. MH4- ja MH5-tehtaiden lauhdesäiliöiden paisuntahöyryjen hyödyntäminen

Lauhdesäiliön 8920 paisuntahöyryjen käyttö		
Paine	p_{8920}	1,45 bar (a)
Höyryn entalpia	h	2692 kJ/kg
Lauhteen entalpia	l	463 kJ/kg
Teho	Q_{9910}	4,9 % %-osuus MH5-tehtaan kulutuksesta
MH4-tehtaan osuus		
8700 höyryenergian käyttö	Q_{8700}	15,5 % %-osuus kaikesta kulutuksesta
8500 höyryenergian käyttö	Q_{8500}	14,9 % %-osuus kaikesta kulutuksesta
MH4-osuus		50,9 %
MH4-osuus	Q_{8920_MH4}	2,61 % %-osuus MH4-tehtaan kulutuksesta

Jotta saadaan MH4-tehtaan lopullinen energiankäyttö, täytyy laskea vielä MH5-tehtaan 1-kolonnin (positio 9400) energiankäyttö. Kyseisen kolonnin keitin sisältää suurelta osin vettä, mutta myös hieman happoa. Tislehöyryjen massavirrasta on muurahaishapon sekä veden massaosuuksien avulla laskettu kummankin virtauksen teho. Happohöyryn lauhtumispiste on noin 120 °C vallitsevassa paineessa³ ja kyseisen keittimen toisiopuolen lämpötila on noin 115 °C. Veden lauhtumislämpötila on 133,5 °C. Täten voidaan olettaa, että lauhteen lämpötila on hyvin lähellä 120 °C. Vesihöyryn sekä happohöyryn tehojen summasta saadaan keittimen kokonaisteho, joka on 43 % MH4-tehtaan höyryenergiankulutuksesta (taulukko 23).

TAULUKKO 23. MH5-tehtaan 1-kolonnin energiankäyttö

Kolonne 9400		
Höyryn paine (8700-kolonnin paine)	p_h	3 bar(a)
Höyryn lämpötila (8700-huippu)	t_{8700_huippu}	135 °C
Kolonnin lämpötila	t_{9400}	115,0 °C
Lauhtumis lämpötila	$t_{sat.}$	133,5 °C
Lauhteen lämpötila (Arvioitu)	t_{lauhd_vesi}	118,0 °C
Happohöyryn lauhtumis lt.	t_{lauhd_happo}	120,0 °C
Happopitoisuus	X_{mh}	10 %
Veden pitoisuus	X_{vesi}	90 %
Vesihöyryn entalpia	h_{h_vesi}	2728 kJ/kg
Vesilauhteen entalpia	h_{l_vesi}	495 kJ/kg
Happohöyryn cp	cp_{hh}	1,106 kJ/kgK
Hapon lauhtumisenergia	$\Delta h_{g \rightarrow l}$	1036 kJ/kg
Happolauhteen cp	cp_{hl}	2,064 kJ/kgK
Vesihöyryn teho	Q_{vesi}	41,0 % %:a MH4-tehtaan kulutuksesta
Happohöyryn teho	Q_{hh}	2,2 % %:a MH4-tehtaan kulutuksesta
Keittimen teho	Q	43,1 % %:a MH4-tehtaan kulutuksesta

Kun saatu energiankäytön osuus vähennetään, saadaan MH4-tehtaan lopullinen energian käyttö. Lopulta MH4-tehdas käyttää energiaa 10,7 % tehtaiden kaikesta höyryenergiasta.

4.2.5 MH5-tehdas

MH5-tehdas eroaa taas muihin nähden siten, että siellä tuotetaan 1,7 bar(g):n höyryä 2-kolonnin tislehöyryjen avulla siten, että lauhduttimen yhteyteen on toteutettu luonnonkiertokattila. Tehdas on muutoin hyvin samanlainen.

Tehtaan etulämmönvaihdin (positio 9280) käyttää lämpöenergiaa 12 % MH5-tehtaan höyryenergiankulutuksesta ja hydrolyysireaktori (positio 9300) 3,8 % MH5-tehtaan höyryenergiankulutuksesta. Hydrolyysireaktorin lauhteista paisuntaa matalapaineverkoston tapahtuu 0,1 %:n teholla MH5-tehtaan energiankulutukseen nähden ja yhteensä lauhdesäiliöissä paisuntaa 0,6 %:n teholla (taulukko 24).

Suurin energiankäyttäjä on 2-kolonne (positio 8500), joka käyttää höyryä prosessitilanteessa 76 % kyseisen tehtaan höyryenergiankulutuksesta. Paisunnat huomioiden 2-kolonnin kulutus on 77 % MH5-tehtaan kaikesta kulutuksesta (taulukko 24).

MH5-tehtaan 3-kolonne ottaa myös 1,7bar(g):n verkostosta höyryä tarvittaessa, mikäli paisuntahöyryt MH4- ja MH5-tehtaiden lauhdesäiliöstä eivät riitä. Prosessitilanteessa keitin ottaa 7,6 % tehtaan kulutuksesta. Keitin on myös hieman vaakuamalla, ja tällöin lauhtumispiste menee alle lauhdesäiliössä vallitsevan lämpötilan. Teho menee negatiiviseksi eli käytännössä jäähdyttää lauhdesäiliöön tulevia muita lauhteita vähentäen siellä tapahtuvaa paisuntaa (taulukko 24).

TAULUKKO 24. MH5-tehtaan energian ja höyryjen kulutus

MH5-Tehdas						
Laitteen positio		9280	9300	8500	9900	
Laitteen energian käyttö						
Höyryn paine	p_h	3,5	9	9	2,7	bar(a)
Höyryn lämpötila	t_h	140,9	177,4	177,4	132,0	°C
Toisiopuolen lt.	$t_{\text{toisio_p}}$	119,0	128,0	157,5	52,0	°C
Keittimen paine	p_{keitin}	-	-	-	0,86	bar(a)
Lauhtumis lämpötila	$t_{\text{sat.}}$	138,9	175,4	175,4	95,4	°C
Lauhteen lämpötila (Arvioitu)	t_{lauhde}	128,9	151,7	166,4	73,7	°C
Höyryn entalpia	h_h	2737	2778	2778	2724	kJ/kg
Lauhteen entalpia	h_l	542	640	704	309	kJ/kg
Laitteen teho	Q_{laite}	12,0 %	3,8 %	76,5 %	7,6 %	%-tehtaan kulutuksesta
Paisunta lauhteista						
Paisunnan paine	p_{paisunta}	-	3,5	3,5	-	bar(a)
2,5bar nesteen entalpia	$h_{\text{sat_2,5bar}}$	-	584	584	-	kJ/kg
2,5bar höyryn entalpia	$h_{\text{höyr_2,5bar}}$	-	2732	2732	-	kJ/kg
Paisunnan suhde	y	-	2,6 %	5,6 %	-	
Paisunnan teho	Q_{paisunta}	-	0,1 %	4,2 %	-	%-tehtaan kulutuksesta
Energia lauhdesäiliöön						
Lauhdesäiliön paine	$p_{\text{laudes.}}$	1,45	1,45	1,45	1,45	bar(a)
1,45bar(a) nesteen entalpia	$h_{\text{lauhdes.}}$	463	463	463	463	kJ/kg
Lauhteiden energiahukka	Q_{lauhteet}	0,4 %	0,2 %	4,2 %	-0,5 %	%-tehtaan kulutuksesta
Laitteen kulutus	$Q_{\text{kok.}}$	12,4 %	4,0 %	76,5 %	7,1 %	%-tehtaan kulutuksesta

Tehtaan energiankulutus paisunnat huomioiden on 19,6 % tehtaiden kaikesta kulutuksesta. Tähän kuitenkin lisätään taulukossa 26 laskettu MH5-tehtaan 1-ko-

lonnin energiankäyttö sekä MH4-tehtaan lauhteista MH5-tehtaan 3-kolonnille paiseva höyryenergia. Täten lukemaan on ilman tehtaan tuottamaa höyryn vähennystä 28,2 % kaikesta höyryenergiankulutuksesta.

MH5-tehtaalla kuitenkin tuotetaan 1,7 bar(g):n höyryä. 1,7 bar(g):n höyrynkulutuksesta MH5-tehdas tuottaa 60 %. Tämä on liki 44 % edellä esitetystä 28,2 %:sta, joten lopullinen kulutus MH5-tehtaalla on 15,7 % kaikesta tehtaiden höyryenergiankulutuksesta.

4.3 Muita energiankulutukseen liittyviä tekijöitä

Opinnäytetyössä esille nousi myös höyrynpaineenalennuksen ja ruiskutusveden käyttö. Osassa on käytössä pelkästään ruiskutusvettä, osassa molemmat. Näiden vaikutus energiankäytön kannalta nousi esille, paljonko nämä alentavat tulevasta höyrystä saatavaa energiaa massayksikköä kohden.

MH2- ja MHL-tehtailla käytetään 8 bar(g):n höyryä 2-kolonnien keittämiseen. Kyseisillä tehtailla höyryn paine lasketaan paineensäätäjällä 5,5 bar(g):n käyttöpaineseen, minkä jälkeen ruiskutetaan vettä höyryn sekaan laskien höyryn lämpötila halutuksi. Tulevan 8 bar(g):n höyryn lämpötila on noin 200 °C ja täten entalpia 2834 kJ/kg. Kun tämä lasketaan 5,5 bar(g):n verkostoon, oletetaan, että reduktiossa ei tapahdu häviötä. Tällöin lämpötila laskee 193 °C:seen entalpian pysyessä vakiona. Tähän ruiskutetaan vettä siten, että MH2-tehtaalla lämpötila lasketaan 178 °C:seen ja MHL-tehtaalla 166 °C:seen. Tarkasteltavaksi otetaan MHL-tehdas, koska lämpötilanmuutos on suurempi ja saadaan konkreettisemmin enemmän esille se, mikä on ruiskutusveden vaikutus tuorehöyryn massavirrasta saatavaan energiaan massayksikköä kohden.

Ruiskutusvetenä käytetään lauhdesäiliön vettä, joka on ruiskutusvesipumpulta lähtiessä noin 11 bar(g):n paineessa ja lämpötila pumpun jälkeen 104 °C. Ruiskutusveden entalpia on tällöin 436,7 kJ/kg. MHL-tehtaalla käytettävän höyryn paine on 5,5 bar(g) ja lämpötila edellä mainittu 166 °C. Höyryn entalpia on tällöin

2769,5 kJ/kg. Näiden tuorehöyryn, käytettävän höyryn sekä ruiskutusveden entalpioiden avulla voidaan laskea ruiskutettavan höyryn osuus käytettävän tuorehöyryn määrään nähden seuraavalla kaavalla 12

$$y = \frac{h_{th} - h_{rv}}{h_{käyttö} - h_{rv}} \cdot 1$$

KAAVA 12

missä

- y , ruiskutusveden osuus tuorehöyryn massavirrasta
- h_{th} , tuorehöyryn entalpia
- h_{rv} , ruiskutusveden entalpia
- $h_{käyttö}$, ruiskutuksen jälkeisen höyryn entalpia

Täten kaavaan sijoittamalla ruiskutusveden massaosuus on MHL-tehtaalla 2,77 % käytettävään tuorehöyryyn nähden.

Tämän perustella verrataan, paljonko tuorehöyryn (tuleva höyry ennen ruiskutusta) massayksikköä kohden saadaan keittimessä irti ilman ruiskutusvettä sekä ruiskutusvedellä. Tähän otetaan huomioon myös se, paljonko paisunnassa saadaan energiaa talteen, ja tämän myötä saadaan kokonaisenergia selville, paljonko tuorehöyryn massayksikköä kohden energiaa tehtaalle jää.

Koska käytettävä höyrynpaine on 5,5 bar(g), lauhtumislämpötila on 162 °C ja lauhteen entalpia 684,2 kJ/kg. Koska MHL-tehtaalla ei ole keittimen jälkeistä lauhteen lämpötilamittausta, hyödynnetään MH5-tehtaan mittaustietoa. MH5-tehtaalla käytettävä höyry on 177 °C ja paine 8 bar(g). Lauhtumislämpötila kyseisessä paineessa on 175,4 °C. Lauhteen lämpötila on kuitenkin 169 °C ja pohjan lämpötila 157 °C. Täten lauhde alijäähtyy lauhtumisen jälkeen vielä noin 35 % siitä lämpötilaerosta, joka on lauhtumisen ja kolonnin pohjan välillä. Mikäli tehdään oletus ja samaa alijäähtymisastetta käytetään, MH2-tehtaalla 2-kolonnin pohjan lämpötila on 145 °C ja pohjan sekä lauhtumislämpötilan ero 17 °C. Jos lauhde alijäähtyy tästä samat 35 %, lauhteen lämpötila olisi tällöin 156 °C. Tällöin lauhteen entalpia olisi lauhtumispaineessa 5,5 bar(g) 658,6 kJ/kg.

Keittimelle jäävä energia massayksikköä kohden on keittimellä tapahtuvan entalpiamuutoksen suuruus. Tällöin ilman ruiskutusta keittimelle jää 2175,5 kJ/kg.

Keittimen jälkeen on vielä lauhteiden paisutus 2,5 bar(g):n verkostoon, jossa kylmäisen höyryn entalpia on 2732 kJ/kg ja kylmäisen nesteen 584,3 kJ/kg. Lauhteesta paisuvan massavirran osuus saadaan kaavalla 7. Täten paisunnan osuudeksi saadaan 3,5 %. Tällöin massayksikköä kohden paisuntaan saadaan 71,7 kJ/kg. Täten keittimelle jäävä energia sekä paisunnan yhteenlaskettu energia on 2247,2 kJ/kg.

Lauhdesäiliössä paine on 0,04 bar(g) ja siellä kylmäisen nesteen entalpia on 422,1 kJ/kg. Täten lauhdesäiliössä tapahtuu paisuntaa vielä 2,5 bar(g):n verkostoon tapahtuvan paisunnan jälkeisen lauhteen massavirran sekä matalapainelauhteen ja lauhdesäiliössä olevan nesteen entalpioiden erotuksen tuloon verran 156,6 kJ/kg. Kaikkinensa tehtaalle jää 2403,8 kJ/kg.

Ruiskutusvettä käytettäessä massavirta nousee tuorehöyryn massavirtaan nähden 2,77 %. Entalpia tipahtaa 2769,5 kJ:een/kg mutta entalpia keittimen jälkeen oletetaan pysyvän vakiona. Täten keittimelle jäävä energia on 2169,4 kJ/kg. Ero tilanteeseen ilman ruiskutusvettä on 6,1 kJ/kg. Täten keittimen osalta olisi kannattavampaa toimia ilman ruiskutusvettä. Tämä ero on 0,28 %.

Paisunnan osalta energian määrä hieman nousee, koska massavirta on suurempi, mutta keittimen jälkeisen sekä paisuvan höyryn ja paisunnasta jäävän lauhteen entalpiat pysyvät vakiona. Paisuvan %-massaosuus pysyy samana, mutta kun absoluuttinen massavirta on hieman noussut, tämän johdosta paisuva massavirta hieman nousee tulevaan tuorehöyryn massavirtaan nähden. Paisunnasta saadaan energiaa 73,7 kJ/kg. Täten keittimen ja paisuvan höyryn energioiden summa on 2243,1 kJ/kg. Ero tilanteeseen ilman ruiskutusvettä on 4,2 kJ/kg, joka on enää 0,19 %.

Lauhdesäiliössä tapahtuvan paisunnan osuus myös hieman nousee ruiskutusveden käytön myötä. Paisuva energia nousee 156,6 kJ:sta/kg ruiskutusveden käytön myötä 161,0 kJ:een/kg.

Täten voidaan ajatella, että ruiskutusveden käyttö tehtaalla ei olennaisesti vaikuta tehtaiden energiatehokkuuteen, koska paisuvalle höyrylle on myös käyttöä. Ruiskutusveden merkitys kasvaa, jos tulevan höyryn lämpötila nousee merkittävästi. Kuitenkin prosentuaalisesti massayksikköä kohden keittimeltä saatavan tehon sekä paisunnan tehojen summien muutos pysyy alle 0,5 %:ssa, vaikka tulevan höyryn lämpötila nousisi 240 °C:seen (taulukko 25). Laskennassa on ajateltu tulevan höyryn olevan 8 bar(g) ja sen lämpötilaväli 180–240°C, josta se ensin paineenalentimen kautta lasketaan 5,5 bar(g):n paineeseen ja ruiskutusvedellä jäähdytetään 166 °C:seen.

TAULUKKO 25. Ruiskutusveden aiheuttamat kokonaishäviöt keittimen- sekä paisunnan tehojen summaan nähden

Tulevan höyryn lt. ennen °C	Ruiskutuksen kokonaishäviöt %-ero
180	-0,046 %
190	-0,118 %
200	-0,185 %
210	-0,250 %
220	-0,312 %
230	-0,372 %
240	-0,430 %

Laskennoissa ei ole otettu huomioon reduktion mahdollisia häviöitä, vaan paineenalennuksen oletetaan tapahtuvan häviöttömänä. Samoin lauhteenerottimien on oletettu toimivan täydellisesti. Tehtailla on myös lauhdesäiliössä tapahtuvien paisuntojen hyödyntämistä, joten jos siellä tapahtuva paisunnan kautta vapautuva energia saadaan talteen, tilanne kääntyy näitä tarkastellessa jopa ruiskutusveden käytön eduksi 0,18 kJ/kg. Tämä sillä oletuksella, että energiaa ei siirry kiertoveiteen lauhdesäiliön lauhduttimella. Tämä tarkastelu on teoreettinen ja absoluuttisen häviötön ja tämä edellä esitetty 0,18 kJ/kg nousu johtuu ruiskutusvesipumpun aiheuttamasta lauhdeveden entalpian noususta.

Yksistään paineenalennusta voidaan vielä tarkastella taulukossa (taulukko 26), jossa vasemmalla juoksee paine, mihin paine alennetaan 8 bar(g):sta. Tämän myötä lauhteen lämpötila on arvioitu samalla tapaa, että se alijäähtyy samaisen

35 % lauhtumispisteen sekä kolonnin pohjan lämpötilaerosta. Tästä on laskettu paisuvan höyryn osuus, keittimelle jäävä energia sekä paisunnassa vapautuva energia. Taulukosta nähdään, että keittimelle jäävä sekä paisunnassa vapautuvan energian summa yksistään paineenalennuksen myötä ei juuri muutu. Keittimelle jäävä energia sekä paisunta tosin muuttuvat huomattavasti.

TAULUKKO 26. Paineenalennuksen vaikutus keittimelle jäävään sekä paisunnassa vapautuvaan energiaan

Paine bar (g)	Lauhtumispiste °C	Lauhteen lt. °C	Lauhteen entalpia kJ/kg	Paisunnan osuus %-osuus	Keittimen teho kW/kg _{höyryä}	Paisunnan teho kW/kg _{höyryä}	Summa kW/kg
8	175,4	155,6	656,79	3,4 %	2177,3	70,0	2247,3
7,8	174,4	155,3	655,34	3,3 %	2178,8	68,7	2247,4
7,6	173,4	155,0	653,86	3,2 %	2180,2	67,3	2247,5
7,4	172,4	154,6	652,35	3,2 %	2181,7	65,9	2247,6
7,2	171,4	154,3	650,82	3,1 %	2183,3	64,4	2247,7
7	170,4	153,9	649,25	3,0 %	2184,8	63,0	2247,8
6,8	169,4	153,5	647,66	2,9 %	2186,4	61,5	2247,9
6,6	168,3	153,2	646,03	2,9 %	2188,1	59,9	2248,0
6,4	167,2	152,8	644,37	2,8 %	2189,7	58,4	2248,1
6,2	166,1	152,4	642,68	2,7 %	2191,4	56,8	2248,2
6	165,0	152,0	640,94	2,6 %	2193,2	55,1	2248,3
5,8	163,8	151,6	639,17	2,6 %	2194,9	53,5	2248,4
5,6	162,6	151,2	637,36	2,5 %	2196,7	51,7	2248,5
5,4	161,4	150,7	635,50	2,4 %	2198,6	50,0	2248,6
5,2	160,1	150,3	633,60	2,3 %	2200,5	48,2	2248,7
5	158,8	149,8	631,64	2,2 %	2202,5	46,3	2248,7
4,8	157,5	149,4	629,64	2,1 %	2204,5	44,4	2248,8
4,6	156,2	148,9	627,58	2,0 %	2206,5	42,4	2248,9
4,4	154,8	148,4	625,46	1,9 %	2208,6	40,4	2249,0
4,2	153,3	147,9	623,28	1,8 %	2210,8	38,3	2249,1
4	151,8	147,4	621,04	1,7 %	2213,1	36,1	2249,2
3,8	150,3	146,9	618,72	1,6 %	2215,4	33,9	2249,2
3,6	148,7	146,3	616,32	1,5 %	2217,8	31,5	2249,3
3,4	147,1	145,7	613,84	1,4 %	2220,3	29,1	2249,4

Kun painetta lasketaan, kokonaismuutos on vain 0,1 %, ja mikäli reduktiossa vähänkään tapahtuu häviötä, tämä ei ole teoriassa kannattavaa. Paineen alennuksella ei ole juuri merkitystä, koska paisutettavalle 2,5 bar(g):n höyrylle tehtaalla on käyttöä. Täten nämä ovat lähes merkityksettömiä tekijöitä.

Paisunta

Paisutettaessa suoraan höyryverkkoon paisuvasta energiasta saadaan enemmän energiaa talteen kuin jos se paisutetaan lauhdesäiliössä, vaikka lauhdesäiliöstä paisuntahöyryjä ohjattaisi jonnekin keittimelle. Lauhdesäiliössä on aina lauhdutin, jonne osa energiasta karkaa, ja MH2-tehtaalla lauhdesäiliössä ei ole

esimerkiksi paineensäätäjää lauhdesäiliön ja lauhduttimen välillä, vaan säätäminen tapahtuu täysin kiertoveden säätämällä sekä ulospuhalluksella. Tästä syystä tarkastellaan myös korkeapainelauhteiden paisuttamista matalapaineisempaan verkostoon.

Tehtaalla on käytössä 1,7 bar(g):n höyryverkosto, mutta tämän käyttö tehtaalla on jossain määrin rajallista, ja toisinaan MH5-tehtaan tuottama 1,7 bar(g) höyryn määrä riittää omiin tarpeisiin. Paisunnan paineen merkitys on huomattavasti suurempi kuin ruiskutusveden käyttö, kun tarkastellaan tehtaille jäävää energian määrää tuorehöyrystä paisunnan jälkeiseen lauhteeseen. Jos paisuntoja ohjattaisi 1,7 bar(g):n verkostoon sen sijaan, että ne menisivät 2,5 bar(g):n verkostoon, saataisiin paisutettua edellä esitetystä tapauksesta 35 kJ/kg enemmän energiaa (taulukko 27). Tämä olisi 1,5 % enemmän energiaa suoraan höyryverkostoon. Taulukossa on värjätty keltaisella 2,5 bar(g):n sekä 1,7 bar(g):n verkostojen sarakkeet.

TAULUKKO 27. Paineen vaikutus paisunnan energiaan

Paisunnan paine	Lauhtumis lämpötila	Kylläisen höyryn entalpia	Kylläisen lauhteen entalpia	Paisunnan %-massaosuus	Paisunnan energia
bar(g)	°C	kJ/kg	kJ/kg	%-osuus	kJ/kg _{höyryä}
4,1	152,6	2749,0	643,4	0,7 %	15,1
3,9	151,1	2747,2	636,9	1,0 %	21,5
3,7	149,5	2745,3	630,2	1,3 %	28,0
3,5	147,9	2743,4	623,2	1,7 %	34,8
3,3	146,2	2741,3	616,0	2,0 %	41,7
3,1	144,5	2739,2	608,6	2,3 %	48,9
2,9	142,7	2736,9	600,8	2,7 %	56,2
2,7	140,8	2734,5	592,7	3,1 %	63,8
2,5	138,9	2732,0	584,3	3,5 %	71,7
2,3	136,8	2729,3	575,5	3,9 %	79,9
2,1	134,6	2726,4	566,3	4,3 %	88,4
1,9	132,4	2723,3	556,5	4,7 %	97,3
1,7	130,0	2720,0	546,3	5,2 %	106,5
1,5	127,4	2716,5	535,4	5,7 %	116,3
1,3	124,7	2712,7	523,7	6,2 %	126,6

Tämänkin merkitys tosin kumoutuu silloin, jos lauhdesäiliöstä saadaan paisutettua käytettävissä oleva energia hyötykäyttöön mahdollisimman matalassa paineessa. Tämä toteutuu hyvin MH4- sekä MH5-tehtaalla. Lauhdesäiliöön menevistä lauhteista saadaan talteen hieman yli 70 %.

5 ALLOKOINTI JA LINJAKOHTAINEN KULUTUS

Lopullisen linjakohtaisen kulutuksen saamiseksi täytyy huomioida yksittäisten tuotantolinjojen tuotanto sekä energiankulutus. Tähän jaetaan allokoitava energiankulutus tuotetun tuotemäärän suhteen. Linjakohtaista tuotantoa verrataan vuorokauden kokonaistuotantoon, ja tämän perusteella allokoitava energiankulutus jaetaan yksittäisille linjastoille (taulukko 28).

TAULUKKO 28. Linjakohtainen energiankulutus allokointi huomioiden

Tehdas	FAM	MH1	MH2	MHL	MH4	MH5
Laite	%-yksikköä tehtaan höyryenergiankulutuksesta					
Höyrystin	9,1 %	-	-	-	-	-
Etulämmönvaihdin	-	0,0 %	8,2 %	7,0 %	13,5 %	12,0 %
Hydrolyysireaktori	-	0,0 %	7,6 %	6,4 %	4,9 %	3,9 %
1-kolonne	73,3 %	0,0 %	Happoh.	Happoh.	Happoh.	Happoh.
2-kolonne	10,8 %	0,0 %	84,2 %	86,6 %	81,6 %	76,6 %
3-kolonne/haihdutin	6,8 %	-	Happoh.	Happoh.	Happoh.	7,6 %
	%-yksikköä kaikesta höyryenergiankulutuksesta					
Laitteiden yhteis teho	6,2 %	0,0 %	17,1 %	16,5 %	19,0 %	19,5 %
Poistot/Lisäykset	%-yksikköä tehtaan höyryenergiankulutuksesta					
Paisunnat (Tehtaan tehosta)	0,0 %	0,0 %	2,4 %	2,5 %	3,5 %	4,3 %
Energia lauhdes. [Tehtaan tehosta]	3,1 %	7,5 %	6,9 %	7,1 %	5,3 %	4,4 %
Lauhdes. Hukka [Tehtaan tehosta]	3,1 %	7,5 %	6,2 %	6,3 %	2,7 %	2,0 %
Lauhteiden hyöd. [Tehtaan tehosta]	0,0 %	0,0 %	0,8 %	0,8 %	2,6 %	-
Poistuva/lähtävä energia	%-yksikköä tehtaan höyryenergiankulutuksesta					
Lisäykset	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	44 %
Vähennykset	0 %	0 %	8,1 %	0 %	43 %	64 %
	%-yksikköä kaikesta höyryenergiankulutuksesta					
Nettokäyttö	6,4 %	0,0 %	16,4 %	17,1 %	10,7 %	15,7 %
Tuotanto (%:a vrk tuotannosta)	19,6 %	0,0 %	21,7 %	18,4 %	21,4 %	18,9 %
Allokoitavat (%:a allokoitavista)	19,6 %	0,0 %	21,7 %	18,4 %	21,4 %	18,9 %
Vrk kulutus [%:a kaikesta kulutuksesta]	12,8 %	0,0 %	23,5 %	23,1 %	17,7 %	22,0 %
Energiatohokkuuden suhdeluku	0,66	-	1,08	1,26	0,83	1,16

Höyrylaadut			
Happoh.	1,7bar(g)	2,5bar(g)	8bar(g)

Taulukosta nähdään, että MH4-tehdas olisi muurahaishappotehtaista selkeästi tehokkain pienimmällä energiankäytön suhdeluvulla, kun verrataan vuorokautista

kulutusta vuorokauden tuotantoon. Kyseisessä ajotilanteessa MH1-tehtaalla tuotetaan formamidia, mikä tarvitsee vähemmän energiaa. Tällöin se ei ole vertailukelpoinen muurahaishapon tuotantoon nähden.

MH4-tehtaan energiantehokkuuden kannalta edellytys on, että MH5-tehdas on päällä. Mikäli MH5-tehdas ei ole päällä, tilanne muuttuu merkittävästi. Tämä on seurausta siitä, että MH4-tehdas tarvitsee kuitenkin tarvittavan energian toimiakseen, mutta 2-kolonnin tislehöyryjä ei saada hyötykäyttöön MH5-tehtaalle. Todellisuudessa, jos yksi linjasto olisi seis, muiden linjastojen tuotannot kiilattaisi mahdollisimman ylös, joka taas muuttaisi energiatehokkuuksia (taulukko 29).

TAULUKKO 29. Linjakohtainen energiankulutus, MH5-tehdas seis

Tehdas	FAM	MH1	MH2	MHL	MH4	MH5
Laite	%-yksikköä tehtaan höryenergiankulutuksesta					
Höyrystin	9,1 %	-	-	-	-	-
Etulämmönvaihdin	-	0,0 %	8,2 %	7,0 %	13,5 %	0,0 %
Hydrolyysireaktori	-	0,0 %	7,6 %	6,4 %	4,9 %	100,0 %
1-kolonne	73,3 %	0,0 %	Happoh.	Happoh.	Happoh.	Happoh.
2-kolonne	10,8 %	0,0 %	84,2 %	86,6 %	81,6 %	0,0 %
3-kolonne/haihdutin	6,8 %	-	Happoh.	Happoh.	Happoh.	0,0 %
	%-yksikköä kaikesta höryenergiankulutuksesta					
Laitteiden yhteis teho	8,0 %	0,0 %	21,9 %	21,1 %	24,3 %	0,0 %
Poistot/Lisäykset	%-yksikköä tehtaan höryenergiankulutuksesta					
Paisunnat (Tehtaan tehosta)	0,0 %	0,0 %	2,4 %	2,5 %	3,5 %	2,5 %
Energia lauhdes. [Tehtaan tehosta]	3,1 %	7,5 %	6,9 %	7,1 %	5,3 %	5,5 %
Lauhdes. Hukka [Tehtaan tehosta]	3,1 %	7,5 %	6,2 %	6,3 %	5,3 %	5,5 %
Lauhteiden hyöd. [Tehtaan tehosta]	0,0 %	0,0 %	0,8 %	0,8 %	0,0 %	-
Poistuva/lähtävä energia	%-yksikköä tehtaan höryenergiankulutuksesta					
Lisäykset	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Vähennykset	0 %	0 %	8,1 %	0 %	0 %	0 %
	%-yksikköä kaikesta höryenergiankulutuksesta					
Nettokäyttö	8,2 %	0,0 %	20,9 %	21,9 %	24,7 %	0,0 %
Tuotanto (%:a vrk tuotannosta)	24,2 %	0,0 %	26,7 %	22,7 %	26,4 %	0,0 %
Allokoitavat (%:a allokoitavista)	24,2 %	0,0 %	26,7 %	22,7 %	26,4 %	0,0 %
Vrk kulutus [%:a kaikesta kulutuksesta]	18,3 %	0,0 %	32,1 %	31,4 %	35,8 %	0,0 %
%:a kaikesta kulutuksesta / tuoteyksikkö	0,76	-	1,20	1,38	1,36	-

Taulukosta nähdään, että tällaisessa tapauksessa MH2-tehdas olisi muurahaishappotuotannossa olevista tehtaista energiatehokkain.

Samoin allokoitavien jakaminen puhtaasti tuotettujen tonnien mukaan ei välttämättä ole täysin aukoton. Tehtaat ovat tavallaan volyymitehtaita: mitä suuremmalla teholla tuotetaan, sitä energiatehokkaampia ne ovat. Energiankulutus ei kasva suoraan verrannollisesti tuotantotehoja nostettaessa. Koska metyyliformiaattia ei ole rajattomasti käytettävissä, osa tehtaista käy yleensä aina vajaalla teholla. Tällöin ne tehtaat, jotka saavat käydä täydellä teholla, ovat jo luonnostaan paremmassa lähtötilanteessa. Toisaalta taas, jos linjakohtainen tuotanto on suurempi, allokoitavien osuudesta kyseiselle tehtaalle jaettavaksi jää enemmän. Tällöin menetelty tapa on mahdollisesti allokoitavien osuuksien osalta järkevin.

Opinnäytetyössä tehdyllä laskennalla saadaan linjakohtainen kulutus huomioiden tehtaalle menevä höyryenergia, lauhteissa tapahtuvat paisunnat sekä tuotantolinjojen tislehöyryjen hyödyntämiset tuotantolinjojen ulkopuolisissa kohteissa ja/tai toisella tuotantolinjalla. Opinnäytetyön pohjalta energiankulutuksen seuranta koko tehtaiden tasolla voitaisi myös kehittää ja tehdä tarkemmaksi. Tällöin otettaisi huomioon kaikki tulevat energiavirrat ja vähentämällä tästä voimalaitokselle palautettavat lauhteet koko tehtaan tasolla.

6 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä määritettiin Oulussa toimivien yksittäisten muurahaishappotekaiden energiankulutusta. Aiemmin laskentaa ja sen pohjalta seurantaa ei ole toteutettu linjakohtaisella tasolla, vaikkakin yksittäisten tuotantolinjojen energiatehokkuuksien hyvät ja huonot puolet ovat olleet tiedossa. Koko tehtaiden tasolla energiankulutuksen tämän suhteen seurantaa on ollut myös aiemmin.

Opinnäytetyössä tehdyn laskennan pohjalta toimeksiantajalle toimitetaan laskentakaavat, jotka voidaan syöttää automaatiojärjestelmään. Tämän pohjalta energiankulutuksesta saadaan jatkuva seuranta ja yksittäisten tuotantolinjojen energiantehokkuutta voidaan tämän myös optimoida (liite 2).

Mittausdatan perusteella toteutettu laskenta sisältää varmasti virheitä, sillä yksittäiset mittaukset eivät ole absoluuttisen tarkkoja. Lähtökohtaisesti höyryn massavirtausten mittaaminen tarkasti on teknisesti haastavaa. Tiedettävästi epätarkat mittauspisteet on pyritty laskennassa ohittamaan toteuttamalla laskenta esimerkiksi lämmönvaihtimen toisiopuolelta löytyvillä mittauksilla.

Opinnäytetyössä saatu lopullinen laskennan tulos on tasaisen käynnin hetkellinen kulutus. Siirrettäessä laskenta automaatiojärjestelmään tehtaista tullaan saamaan linjakohtainen jatkuva energiankulutuksen seuranta. Laskennoissa pohjana on käytetty järjestelmästä löytyvää mittausdataa. Energianseurannan kannalta jokaisen laskentaan liitettävän mittauksen on toimittava, jotta seurantaa voidaan pitää mittausten virhemarginaalit huomioiden luotettavana.

LÄHTEET

1. Eastman. About Eastman. Hakupäivä 25.1.2022. https://www.eastman.com/Company/About_Eastman/Pages/Introduction.aspx.
2. Britannica. Formic Acid. Hakupäivä 26.1.2022. <https://www.britannica.com/science/formic-acid>.
3. Moran, Michael J. Shapiro, Howard N. Fundamentals of Engineering Thermodynamics 5th edition. John Wiley & sons, Inc. 2006
4. National Institute of Standards and Technology. Methane. Hakupäivä 6.4.2022. <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C74828&Mask=1>.
5. Air Products and Chemicals, Inc. Expris ultra-high purity gases. Technical specification. Argon.
6. Chemeo. Chemical Properties of Formic Acid. Hakupäivä 4.2.2022. <https://www.chemeo.com/cid/39-377-1/Formic%20acid#ref-joback>.