



Satakunnan ammattikorkeakoulu  
Satakunta University of Applied Sciences

TERO PEURANIEMI

# **Natriumbisulfiitin hukkalämmön tehokkaampi käyttö**

ENERGIA- JA YMPÄRISTÖTEKNIikka  
2023

## TIIVISTELMÄ

Peuraniemi, Tero: Natriumbisulfiitin hukkalämmön tehokkaampi käyttö  
Opinnäytetyö, AMK  
Tutkinto-ohjelma: Energia- ja ympäristötekniikka  
Huhtikuu 2023  
Sivumäärä: 70

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia natriumbisulfiitin, toiselta nimeltään natriumvetysulfiitin, valmistuksessa syntyvän hukkalämmön tehokkaampaa käyttöä. Työn tilaajana toimii kyseisen aineen valmistaja Kemiran Harjavallan tehdas. Tällä hetkellä syntynyttä hukkalämpöä jo käytetään oman tehdasrakennuksen ja vesisäiliön lämmittämiseen. Kaikkea lämpöä ei kuitenkaan saada talteen, jolloin tehdasta joudutaan lämmittämään sähköllä toimivilla höyrykehittimillä.

Työssä kerrotaan natriumbisulfiitin koostumuksesta ja käyttökohteista ja määritetään sen tuottama lämpö standardimuodostumisentalpian avulla. Opinnäytetyössä analysoidaan tehtaan nykyistä lämmitystä ja sen lämmönsiirtimiä. Niitä havainnollistetaan useilla kuvilla ja taulukoilla. Työssä myös kerrotaan lämmön siirtämisestä ilmaan kiertoilmakojeiden eli ilmapuhaltajien avulla ja määritellään putkistojen jäähtymistä. Lopussa tutkitaan, riittääkö lämpö myös toiselle rakennukselle ja miten lämpö siirrettäisiin sinne. Lisäksi vertaillaan näiden kahden rakennuksen lämmitystapojen eroja ja lasketaan veden jäähtymisen matkalla sinne.

Lopputuloksena suositellaan, että tuotetta valmistetaan hitaasti. Raakaveden viemäriin asennetaan kaksi tai kolme ilmapuhaltajaa. Lämmitysveden pisimpään putkilinjaan suositellaan eristämistä. Ilmapuhaltajien lämmönsiirtimessä kannattaa vaihtaa virtaussuunta myötävirrasta vastavirtaan ja puhdistaa se samalla. Lämmön viemistä erikoishappotehtaalle ei suositella, johtuen liian matalasta lämpötilasta jo alkupisteessä tehtaalla.

Asiasanat: Natriumbisulfiitti, Natriumvetysulfiitti, Standardimuodostumisentalpia, Lämmönsiirrin, Höyrykehitin, Putken eristäminen, Kaukolämpöputki

## Abstract

Peuraniemi Tero: More efficient waste heat utilization of sodium bisulfite

Bachelor's thesis

Degree programme: Energy and Environmental Engineering

April 2023

Number of pages: 70

The objective of this thesis was to investigate the more efficient use of the waste heat generated in the production of sodium bisulfite, otherwise known as sodium bisulfite. Kemira's Harjavalta plant, the manufacturer of the substance in question, is the client of the study. Currently, the waste heat is already used to heat the own plant and water tank. However, not all the heat is recovered, so the plant has to be heated with steam generators that operate on electricity.

The thesis describes the composition and uses of sodium bisulfite and determines the heat generation using the standard enthalpy of formation. The thesis analyzes the factory's current heating system and its heat exchangers. They are illustrated with several pictures and tables. The thesis also studies about transferring heat to the air with the air heaters and defines the cooling of pipelines. At the end, study investigate whether the heat is also sufficient for another building and how the heat would be transferred there. In addition, study compare the differences in the heating methods of these two buildings and calculate the cooling of the water on the way there.

As a result, it is recommended that the product be manufactured slowly. Two or three air heaters are installed in the raw water drain. Insulation is recommended for the longest heating water pipeline. In the heat exchanger of the air heater, it is recommended to change the direction of flow from parallel flow to counter flow and clean it at the same time. Transferring the heat to the special acid mill is not recommended, due to the too low temperature already at the starting point in the plant.

Keyword: Sodium bisulfite, Sodium hydrogen sulfite, Standard enthalpy of formation, Heat exchanger, Steam generator, Pipe insulation, District heating pipe

# SISÄLLYS

1 JOHDANTO .....	6
2 NATRIUMBISULFIITIN VALMISTUS .....	7
2.1 Käyttötarkoitus ja raaka-aineet .....	7
2.2 Valmistusprosessi tehtaalla .....	8
2.3 Reaktioyhtälö.....	10
2.4 Reaktion ominaisentalpia .....	10
2.5 Hyödyksi saatu lämpö .....	15
2.6 Tuotantovauhti.....	15
3 LÄMMÖNSIIRTIMIEN TOIMINTAPERIAATE .....	16
3.1 Lämmönsiirtimien jaottelu .....	16
3.2 Levylämmönsiirtimet.....	17
3.3 Levylämmönsiirtimen mitoitus .....	21
3.4 Edut ja haitat .....	22
4 TUTKIMUSMETODIT .....	23
5 LÄMMÖNSIIRRON NYKYTILANNE .....	24
5.1 Tehtaan lämmitys .....	24
5.2 Tehtaan lämpötilat.....	26
5.3 Lämmitys ulkoisella energialla .....	27
5.4 Lämmönsiirtimet ja putkistot .....	28
5.5 Lämmönsiirto tilaan .....	29
5.6 Ilmapuhaltajat .....	30
5.7 Jäähdytysvesi eli raakavesi .....	31
6 LÄMMITYKSEN ANALYSOINTI.....	33
6.1 Natriumbisulfiitin ja veden lämpötilat .....	33
6.2 Lämmönsiirron rajoitukset .....	35
6.3 Raakaveden ja jäähdytyksen säätö.....	37
6.4 Kehitysehdotukset .....	39
7 JÄRJESTELMÄN LÄMMÖNSIIRTIMET .....	44
7.1 Luupin lämmönsiirrin .....	44
7.2 Natriumbisulfiitin lämmönsiirrin .....	47
7.3 Lämmitysveden lämmönsiirrin .....	49
7.4 Muut lämmönsiirtimet .....	52
7.5 Ilmapuhaltajien lämmönsiirrin .....	54
7.6 Putkiston lämpöhäviöt .....	58
8 LÄMMÖNSIIRTO ERIKOISHAPPOTEHTAALLE .....	60

8.1 Erikoishappotehdas .....	60
8.2 Ilma-vesilämpöpumppu .....	62
8.3 Kaukolämpöputket tehtaalle .....	64
8.4 Veden jäähtyminen putkistossa .....	67
8.5 Investoinnin kannattavuus .....	68
9 YHTEENVETO.....	69
LÄHTEET .....	71

## 1 JOHDANTO

Johtuen kalliista energian hinnoista ja ilmastonmuutoksen hillinnästä, kiinnitetään entistä enemmän huomiota energiatehokkuuteen. Parantaakseen energiatehokkuutta erilaiset kemian- ja prosessinteollisuuden tehtaot yrittävät käyttää valmistuksessa syntynyttä hukkalämpöä mahdollisimman tehokkaasti. Sama pyrkimys on myös tämän työn toimeksiantajan eli Kemira Harjavallan tehtaalla. Heidän tarkoituksenaan on hyödyntää natriumbisulfiitin valmistuksesta syntynyttä lämpöenergiaa entistä paremmin.

Selvityksen tekohetkellä kemiallisesta reaktiosta syntyneestä lämmöstä jo otetaan energiaa talteen. Sitä hyödynnetään tehdasrakennuksen lämmityksessä ja toisessa prosessissa tarvittavassa kuuman veden lämmityksessä. Tehtaalla on kuitenkin havaittu, että lämpöä voisi saada vielä enemmän hyödynnettyä, jopa niin paljon että sitä voisi siirtää noin 50 metrin päässä olevalle toiselle tehdasrakennukselle.

Tutkimuksen tavoitteena on parantaa lämmön siirtoa kemiallisesta reaktiosta lämmitykseen ja tutkia, riittääkö yli jäänyt lämpö toisen rakennuksen lämmittämiseen. Tutkimus aloitetaan kertomalla natriumbisulfiitista ja määrittämällä reaktion tuottama lämpö laskemalla se standardimuodostumisentalpioista. Työssä myös analysoidaan tehtaan lämmityksen nykytilaa ja miten lämpöä siirretään ympäri rakennusta. Tutkimuksessa määritetään keskeisten lämmönsiirtimien toimintaa ja tehokkuusasteita. Huomiota kiinnitetään myös tehtaan sisäisten putkistojen lämpöhukkaan ja lämpötilan vaihteluihin tehtaan sisällä. Viimeisenä lasketaan lämpöhukka putkistossa, jos lämpöä päätetään siirtää toiseen rakennukseen.

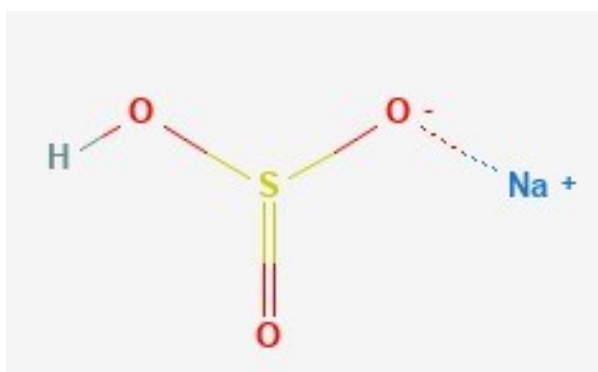
Tutkimus on laaja, joten työssä on rajattu ilmanvaihdon rooli kokonaan pois. Lisäksi tehtaan toisen tuotteen, alumiinisulfaatin roolia lämmityksessä ei

analysoida. Työssä myös otetaan lämmityksen säätöön ja automaatioon vain vähän kantaa. Putkiston jatkamisessa toiseen rakennukseen lasketaan vain sen järkevyys lämmön riittävyden kannalta. Siinä siis analysoidaan tarvittavia putkiliitännöitä ja tarvikkeita vain pintapuolisesti.

## 2 NATRIUMBISULFIITIN VALMISTUS

### 2.1 Käyttötarkoitus ja raaka-aineet

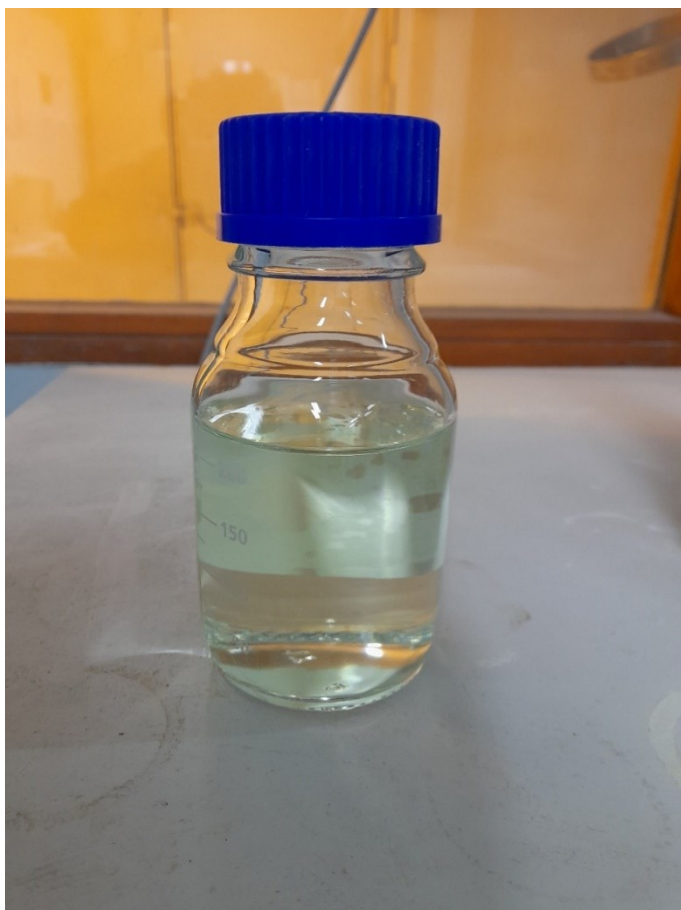
Natriumbisulfiitti tai toiselta nimeltään natriumvetysulfiitti on valkoisen väristä kiteistä tai jauhemaista ainetta. Se on epävakaata ilmassa ja on voimakas pelkistin (Hawley, 1977, s. 786.) Yleensä sitä myydään 38 p-% vesiliuoksena, kuten Kemirakin tekee. Natriumbisulfiitti koostuu natriumista, vedystä ja sulfiitista eli rikistä ja hapestä. Sen kemiallinen kaava on  $\text{NaHSO}_3$ . Aine on ioniyhdiste, jossa natrium on kationina ja vetysulfiitti on ionina. Aine on lievästi myrkyllinen ja ärsyttää ihoa sekä muita elimiä. Se on lievästi hapan ja sen pH on noin 5,0. Alla on kaavio 1 yhdisteen kemiallisesta rakenteesta.



Kaavio 1. Natriumbisulfiitin kemiallinen rakenne (National Library of Medicine, 2023.)

Natriumbisulfiittia käytetään sellunkeitossa. Sinne Kemira myös myy valtaosan tuotteestaan. Pääasiassa myydään kotimaahan mutta myös jonkin verran Ruotsiin. Sitä voidaan käyttää myös tekstiili- ja kumiteollisuudessa esimerkiksi parkitsemisissa tai peittauksessa. Elintarviketeollisuudessa natriumbisulfiittia

käytetään fermentaatioon ja glukoosisiirapin valmistukseen (Hawley, 1977, s. 786.) Natriumbisulfiittia käytetään lisäksi säilöntäaineena ja se estää tehokkaasti hapettumista. Sen E-koodi on E-222 ja tuotetta on turvallista käyttää 0,7 mg/kg vuorokaudessa. (Ruokavirasto, 2023.) Alla on kuva 1 näytteestä, jossa on valmista natriumbisulfiittia. Käytännössä kaikki tuote myydään säiliöauto-toimituksina.



Kuva 1. Natriumbisulfiittiliuos

## 2.2 Valmistusprosessi tehtaalla

Valmistumassa oleva liuos kiertää pumpun avustuksella ns. luupissa. Tehtaalla natriumbisulfiitti valmistetaan 50 p-% lipeästä (NaOH), nestemäisestä rikkidioksidista (SO<sub>2</sub>) ja nestemäisestä vedestä (H<sub>2</sub>O). Kemiralla reaktio tapahtuu putkivirtausreaktorissa, eli aineet yhdistetään lähekkäin toisiaan putkessa, jossa reaktio tapahtuu. Luupissa on yhdet haarat kaikille kolmelle aineelle, jotka syötetään hyvin lähellä toisiaan. Yhdestä syötetään 50 p-% lipeää,

toisesta nestemäistä rikkidioksidia ja kolmannesta vettä. Haarojen ja pumpun jälkeen liuos menee levylämmönsiirtimeen. Lämmönsiirtimen jälkeen tulee haara ylöspäin, josta valmis liuos jatkaa matkaansa ylös kohti seuraavaa levylämmönsiirrintä. Erottelu valmiin liuoksen ja valmistumassa olevan välillä perustuu painovoimaan, koska valmis natriumbisulfiitti on kevyempää kuin rikkidioksidi ja lipeä. Valmis natriumbisulfiittiliuos on tiheydeltään 1,28 kg/l. Lukema perustuu Kemiran antaman mittausdataan. Kirjallisuuden mukaan puhtaan lipeän tiheys on 2,10 kg/l (Fabricius ym., 2010, s. 64). Nestemäisen rikkidioksidin tiheys taas on 1,4 kg/l (Fabricius ym., 2010, s. 70). Valmisteilla oleva liuos jatkaa matkaansa ulosmenohaaran jälkeen alaspäin, jossa tulee edellä mainitut lipeän, rikkidioksidin ja veden tulohaarat. Huomioitavaa on, että liuos on vasta valmistumassa luupissa olevassa lämmönsiirtimessä.

Vertaamalla massavirtauksia ulosmenohaarassa ja luupissa voidaan laskea kaavalla 1, kuinka monta kertaa valmistumassa oleva liuos kiertää luupin ennen kuin se on valmis.

$$\frac{m_{luuppi}}{m_{ulos}} = \text{kierrosten lukumäärä} \quad (1)$$

$$\frac{162000 \frac{kg}{h}}{6480 \frac{kg}{h}} = 25 \text{ kertaa}$$

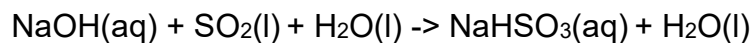
Erään päivän virtausmittauksista saatiin laskettua, että liuos kiertää keskimäärin 25 kertaa ennen kuin reaktio on valmistunut. 8 840 kg/h vauhdilla liuos kiertää 18 kertaa ja 5 830 kg/h vauhdilla se kiertää 28 kertaa luupissa. Se siis vaihtelee tuotantomäärien mukaan, niin että kovemmalla vauhdilla liuos valmistuu nopeammin kuin hitaalla vauhdilla. Useiden kierroksien takia luupin lämmönsiirtimessä ei välttämättä saada kaikkea lämpöä ulos, koska reaktio ei kaikilta osin ole vielä tapahtunut. Sen takia valmiille natriumbisulfiitille on rakennettu toinen levylämmönsiirrin. Siitä lisää myöhemmin.

Luupissa on koko ajan noin 6 baarin paine. Myös valmistusaineet syötetään sinne kohotetussa paineessa. Vesi noin 7 baarin, rikkidioksidineste 7,6 baarin

ja lipeä vähän pienemmässä 4,2 baarin paineessa. Kohotettu paine nostaa prosessin saantoa ja nopeuttaa prosessia, koska korkeassa paineessa molekyylit ovat lähempänä toisiaan ja siten törmäilevät useammin (Kalkku ym., 2005, s. 61).

### 2.3 Reaktioyhtälö

Natriumvetysulfiitin reaktioyhtälö on seuraava:

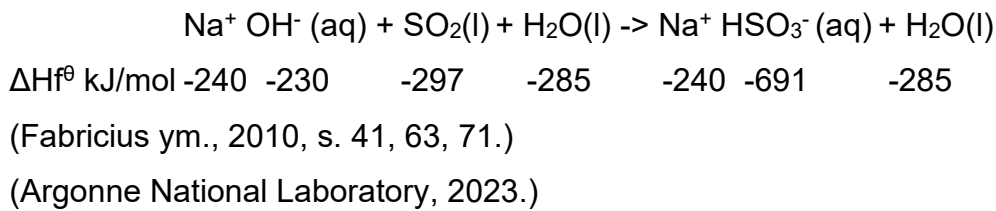


Kuten reaktioyhtälöstä voi huomata, reaktio ei sinänsä tarvitse vettä toimiakseen. Se kuitenkin myydään asiakkaille vesiliuoksena. Tuloksena on 38–41 p-% natriumbisulfiittiliuos. Tarkka konsentraatio vaihtelee mutta asiakkaille on luvattu vähintään 38 p-% liuos. Liuoksen konsentraatio on 38 g/l, joka on lähellä mitä natriumbisulfiitin liukoisuus sallii. Näin siksi, koska sen maksimi-liukoisuus on 42 g/l eli maksimi massaprosentti on 42 p-%. Kemira myy ainoastaan 38 p-% natriumbisulfiittiliuosta. Sen takia lämmöntuotto ei vaihtele erilaisilla prosessin ajotavoilla. Ainoa tapa vaihdella lämmöntuottoa on muuttaa tuotantomääriä ja tuotantovauhtia. Sitä myös tehdään. Asiasta kerrotaan myöhemmin.

### 2.4 Reaktion ominaisentalpia

Reaktion lämmöntuoton voi laskea entalpian avulla. Moolientalpia kuvaa, kuinka paljon lämpöä syntyy yhtä moolia kohti ja ominaisentalpia taas kertoo, että kuinka paljon lämpöä syntyy yhtä kilogrammaa lopputuotetta kohden. (Hänninen ym., 2018, 230.)

Lipeä ja rikkidioksidi tuottavat lämpöä, kun ne reagoivat keskenään ja muodostavat natriumbisulfiittia. Kirjallisuuden mukaan vetysulfiitin  $\text{HSO}_3^-$  syntyy tuottaa -691 kJ/mol (Argonne National Laboratory, 2023). Kokonaisuudessaan reaktiomuodostumisentalpia standarditilassa menee näin:



Tästä voidaan laskea reaktion lämmöntuotto moolimääräisenä kaavalla (Hänninen ym., 2018, s. 234).

$$\Delta H_r = \Delta H_{f\text{tuotteet}} - \Delta H_{f\text{lähtöaineet}} \quad (2)$$

$$-240 + (-691) + (-285) - (-240) - (-230) - (-297) - (-285)$$

$$\Delta H_r(\text{NaHSO}_3) = -164 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

Koska lukema on miinusmerkkinen, on reaktio eksoterminen eli se tuottaa lämpöä (Hänninen ym., 2018, s. 231). Tämän avulla voidaan laskea todellinen lämmöntuotto. Lasken sen tyypillisellä arvolla 7 710 kg/h eli 2,142 kg/s.

Kaikki edellä mainitut luvut ovat standardimuodostumisentalpioita. Niitä voidaan käyttää koska kaikki lähtöaineet syötetään reaktoriin lähes huoneenlämpöisinä eli hyvin lähellä standarditilaa 25 celsiusastetta (Fabricius ym., 2010, s. 20).

Kilogrammoina lämmöntuotto saadaan, kun moolientalpia jaetaan moolimassalla. Natriumbisulfiitin moolimassa on 104,1 g/mol (National Library of Medicine, 2023).

$$\Delta H_r(m) = \frac{\Delta H_f(n)}{M} \quad (3)$$

$$(164 \text{ kJ/mol})/104,1 \text{ g/mol} = 1,58 \text{ kJ/g} = 1,58 \text{ MJ/kg}.$$

Saatua yksikköä voi kutsua myös teholliseksi lämpöarvoksi. Tuloksena oleva lukema ei lämpöarvoltaan ole kovin suuri, kun sitä verrataan esimerkiksi kevyeen polttoöljyyn tai ammoniakkiin. Kevyessä polttoöljyssä tehollinen lämpöarvo on 42,4 MJ/kg. (Motiva, 2023.) Ammoniakin muodostumisentalpia taas

on  $-46,2$  kJ/mol eli kaavalla 3 laskettuna lämpöarvo on  $2,71$  MJ/kg eli jo huomattavasti lähempänä natriumbisulfiittia, mutta silti  $1,2$  MJ korkeampi (Kalkku ym., 2005, s. 48).

Mittausdatan perusteella voi laskea tarkan konsentraation. Lopputuotteen massavirralla  $7\,710$  kg/h lipeän massavirta on  $2\,380$  kg/h. Lipeä syötetään reaktoriin  $50$  p-% liuksena, joten puhdasta lipeää syötetään  $1\,190$  kg/h. Vettä pumpataan  $3\,500$  kg/h, ja lipeän vesi huomioiden yhteensä  $4\,690$  kg/h. Rikki-dioksidia nesteinä syötetään  $1\,830$  kg/h. Näistä laskemalla saadaan tarkaksi konsentraatioksi  $39,2$  p-%. Varsinaisen tuotteen massavirraksi lasketaan kaavalla 4:

$$m(\text{tuote}) = cm(\text{liuos}) \quad (4)$$

$$0,392 * 7\,710 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 3\,020 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Jossa  $c$  on konsentraatio

$m$  = massavirta

Massavirta sekunneissa on  $0,839$  kg/s

Lämmöntuoton voi laskea, kun massavirran kertoo tehollisella lämpöarvolla seuraavasti:

$$Q = m\Delta Hr(m) \quad (5)$$

$$0,839 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 1580 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 1\,325 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 1\,325 \text{ kW} \quad (6)$$

Laskuissa ei tarvitse ottaa mukana olevaa vettä huomioon koska ne ovat nestemäisessä olomuodossa koko reaktion ajan eivätkä osallistu itse reaktioon millään tavalla. Vesi itse asiassa jonkin verran heikentää lämmöntuottoa koska reaktio lämmittää myös vettä noin  $40$  °C. Sen voi laskea kaavalla 7:

$$Q = mc\Delta T \quad (7)$$

Jossa  $Q$  on lämpöteho kilowatteina

$m$  = massavirta kg/s

$c$  = ominaislämpökapasiteetti kJ/kgK,

$\Delta T$  = aineen lämpötilaero  
(Hänninen ym., 2018, s. 227.)

Kun veden ominaislämpökapasiteetti on  $4,1819 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ , prosessiveden massavirta  $0,972 \text{ kg/s}$  ja lämpötila ennen reaktiota on  $15,9 \text{ }^\circ\text{C}$  ja jälkeen reaktion  $55,0 \text{ }^\circ\text{C}$  saadaan tulokseksi (Seppänen, 2005 s. 81).

$$0,972 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}^\circ\text{C} * (55,0 \text{ }^\circ\text{C} - 15,9 \text{ }^\circ\text{C}) = 159,7 \text{ kW} \quad (7)$$

Myös lipeän veteen sitoutuu lämpöä. Lipeän alkulämpötila on  $33,0 \text{ }^\circ\text{C}$  ja massavirta on  $0,661 \text{ kg/s}$ , josta veden osuus on tasan puolet eli  $0,331 \text{ kg/s}$ . Lämmön sitoutumisen voi laskea kaavalla 7 seuraavasti:

$$0,331 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}^\circ\text{C} * (55,0 \text{ }^\circ\text{C} - 33,0 \text{ }^\circ\text{C}) = 30,5 \text{ kW} \quad (7)$$

Tuotantovauhdilla  $7\ 460 \text{ kg/h}$  lämpöä sitoutuu prosessin veteen siis yhteensä:

$$159,7 \text{ kW} + 30,5 \text{ kW} = 190,2 \text{ kW} \quad (8)$$

Kokonaislämmöntuotto on siis:

$$1\ 325 \text{ kW} - 190,2 \text{ kW} = 1\ 135 \text{ kW} \quad (9)$$

Lämpöä sitoutuu prosessin veteen vieläkin enemmän, koska ennen reaktioon syöttämistä sitä pitää esilämmittää. Se tehdään reaktion aikana kierrättämällä omaa reaktiolämpöä puhtaan reaktioveden lämmönsiirtimen kautta. Siitä lämmönsiirtimestä lisää myöhemmin. Lisäksi lipeää esilämmitetään tarpeen mukaan saattolämmityksellä eli sähköllä. Alla olevassa kuvassa 2 ja 3 on kuvattuna osa tuotantotiloista.



Kuva 2. Natriumbisulfiitin tuotantotila



Kuva 3. Toinen kuva natriumbisulfiitin tuotantotiloista

Alla on taulukoitu lämmöntuottoa kilowatteina eri tuotantovauhdeilla. Konsentraationa on aina asiakkaille luvattu 38 p-%. Reaktiomuodostumisentalpia on myös aina vakio 1,58 MJ/kg.

Taulukko 1 Lämmöntuoton teho eri tuotantovauhdeilla

Tuotantovauhti kg/h	Lämmöntuotto kW	Veden Lämmitys kW	Lipeän Veden Lämmitys kW	Kokonaislämmöntuotto kW
7460	1306	159,0	30,4	1116
6480	1134	136,6	31,2	967
5500	963	121,7	27,2	814
4620	809	99,2	18,3	691
7480	1309	173,8	36,9	1099
8840	1547	232,4	48,8	1266
5860	1026	118,1	23,2	884
5500	963	119,0	29,1	815

## 2.5 Hyödyksi saatu lämpö

Edellä laskettu lämmöntuotto on teoreettinen maksimi, mitä valmistusprosessista voi saada. Esimerkiksi jo laskettu kokonaislämmöntuotto 1 135 kW on ehdoton yläraja, jonka yli ei voi mennä sen tuotantovauhdilla 7 710 kg/h, kun luvusta on vähennetty liuoksen veden lämmitys. Kuitenkin prosesseissa tulee aina lämpöhukkaa, ja niin tulee tässäkin. Luvut on laskettu käyttäen standardimuodostumisentalpiaa, joka kertoo muodostumislämmöt 25 °C-asteessa (Fabricius ym., 2010, s. 20). On myös huomattava, että valtaosa reaktion lämmöstä sitoutuu liuokseen itseensä. Tuotteen laadun takia näin myös pitää tehdä koska liuosta ei saa päästä jäähtymään liian kylmäksi. Siitä lisää myöhemmin.

## 2.6 Tuotantovauhti

Maksimituotantovauhti natriumbisulfiitille on 9 500 kg/h. Kuitenkin harvoin tuotetta valmistetaan sillä vauhdilla, koska tilauskirjassa ei ole niin paljon tilauksia, että prosessia tarvitsee ajaa täydellä teholla. Siksi tilauskanta sallii hitaan tuotantovauhdin. Hidas tuotantovauhti on hyvä, koska sillä vältetään pitkät katkot omassa lämmöntuotannossa ja vältetään kaiken lämmityksen tuottaminen

sähköllä. Kuitenkin välillä prosessia tarvitsee ajaa täydellä teholla, jos noutoja tulee paljon yhtä aikaa ja varastosäiliöitä pitää täyttää nopeasti. Toinen tilanne ovat huoltokatkot ja sen jälkeiset tilanteet, jolloin taas säiliöitä pitää täyttää nopeasti. Luonnollisesti tilauksista ei kieltäydytä ja lähtökohtaisesti asiakas määrittelee, milloin he tarvitsevat tuotetta. Natriumbisulfiittia pyritään tuottamaan tasaisella vauhdilla maanantaista perjantaihin vuorokauden ympäri. Tuotanto keskeytetään vain, jos varastosäiliöt ovat täynnä tai jos tulee huoltokatkoja. Ennakoimattomia rikkoutumisia, jotka pakottavat keskeyttämään tuotannon, on kuitenkin hyvin vähän. Asiaa helpottaa liikkuvien osien vähäinen määrä. Viikonloppuisin koko tehdas on kiinni, mutta tehdasta kuitenkin lämmitetään ja pidetään yllä samaa lämpötilaa kuin arkisinkin eli noin 15 °C.

### 3 LÄMMÖNSIIRTIMIEN TOIMINTAPERIAATE

#### 3.1 Lämmönsiirtimien jaottelu

Lämmönsiirtimet tai toiselta nimeltään lämmönvaihtimet ovat laitteita, joissa nimensä mukaisesti siirretään lämpöä aineesta toiseen. Lämpöä voi siirtää kaasusta kaasuun, kaasusta nesteeseen, nesteestä nesteeseen tai nesteestä kiinteään aineeseen. Lämmönsiirtimet siirtävät lämpöä joko suoralla kontaktilla tai useimmissa tapauksissa epäsuorasti ilman aineiden suoraa kontaktia. (Shah & Sekulic, 2003, 1.) Aineet yleensä erotellaan lämmönsiirtopinnoilla eli yleensä levyillä tai putkilla tms. Lämmönsiirtimissä ei useimmiten ole liikkuvia osia eikä voimanlähdettä. Ne vaan siirtävät lämpöä. (Shah & Sekulic, 2003, s. 1.)

Lämmönsiirtimet voidaan jakaa kahteen luokkaan: suoran kontaktin ja epäsuoran kontaktin lämmönsiirtimiin. Suoran kontaktin lämmönsiirtimissä aineiden annetaan sekoittua keskenään, jolloin samalla kuumempi aine luovuttaa lämpönsä kylmemmälle aineelle. Tarvittaessa aineet voidaan erotella toisistaan, jos mahdollista. Näiden tehokkuus on erittäin hyvä ja mahdollistaa lähes

täydellisen lämmönsiirron kylmempään aineeseen. (Shah & Sekulic, 2003, s. 7.) Tosin monesti aineet eivät saa sekoittua keskenään ja siksi ne yleensä pidetään toisistaan erossa. Näin on myös tämän tutkimuksen kohteessa, joissa käytetään vain epäsuoran kontaktin lämmönsiirtimiä.

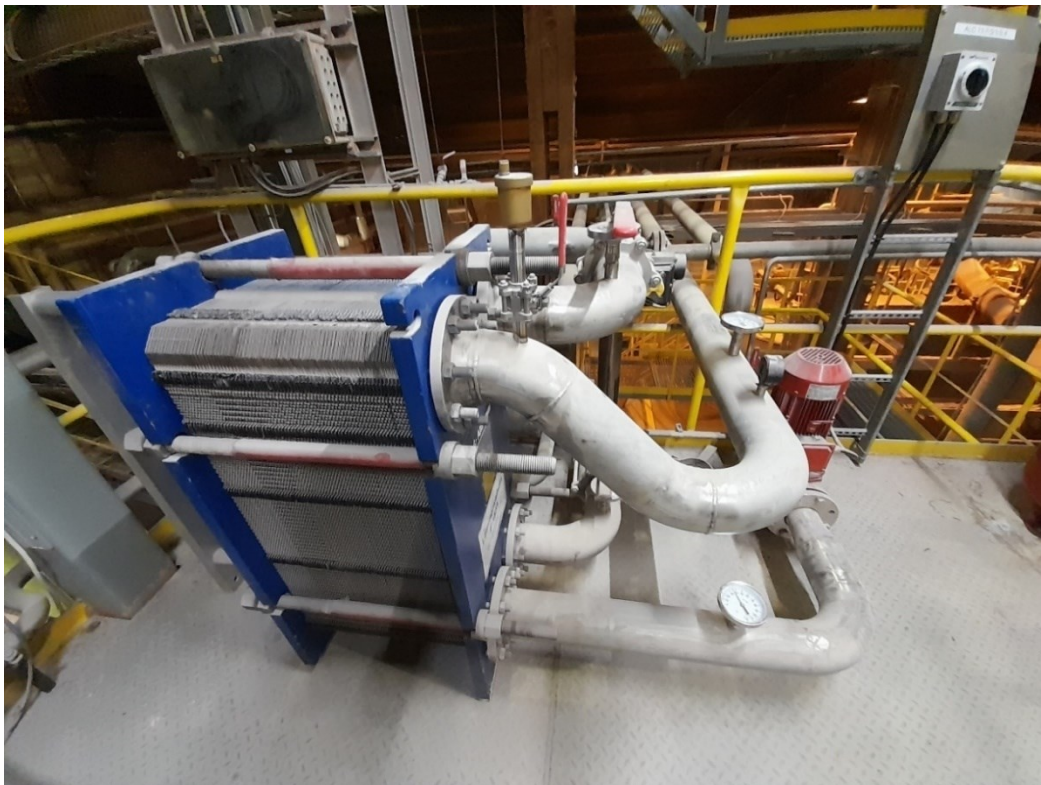
Epäsuoran kontaktin lämmönsiirtimet voidaan jakaa kahteen päätyyppiin: putkilämmönsiirtimiin ja levylämmönsiirtimiin. Putkilämmönsiirtimissä aineet virtaavat niin että toinen aine virtaa hyvin ohuissa putkissa ja toinen aine virtaa putken ulkopuolisessa tilassa täyttäen koko lämmönsiirtimen, joka tietenkin on umpinainen. (Shah & Sekulic, 2003, 13.) Nämä ovat yleisiä lämmönsiirtimiä, kun paineet ja/tai paine-erot ovat isoja tai siellä tapahtuu faasimuutoksia. Tässä työssä niitä ei kuitenkaan käsitellä enempää, koska työn kohteena oleva yritys ei käytä putkilämmönsiirtimiä.

### 3.2 Levylämmönsiirtimet

Sen sijaan tutkimuksen kohteena ovat toinen lämmönsiirrin päätyyppi eli levylämmönsiirtimet. Kuten nimikin jo sanoo niin aineet jaotellaan toisistaan yleensä suorakulmaisten levyjen avulla. Lämpö myös siirretään levyjen läpi, joten levyt rakennetaan mahdollisimman ohuiksi, jotta lämpö siirtyy mahdollisimman tehokkaasti kylmempään aineeseen. Tämän työn lämmönsiirtimissä levyt ovat paksuudeltaan vain yhden millimetrin tai ohuempia. Levyt kuitenkin eivät kestä kovia paineita, joten se soveltuu vain pienille paineille ja paine-eroille. (Shah & Sekulic, 2003, s. 22.) Levyjä voi olla muutamasta kappaleesta satoihin riippuen halutusta lämmönsiirron tehokkuudesta. Levyt liitetään toisiinsa hitsaamalla, juottamalla tai tiivisteiden avulla. (Savree, 2019.) Alla on kaksi kuvaa Kemiralta kuvatusta tyyppillisestä tiivisteellisestä levylämmönsiirtimestä.



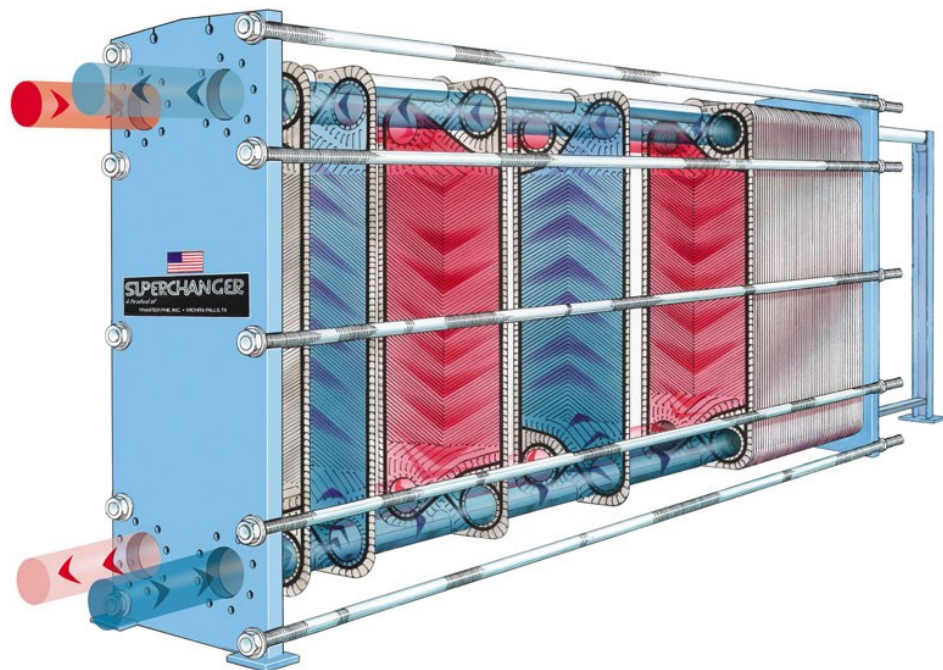
Kuva 4. Levylämmönsiirrin tiivisteillä



Kuva 5. Sama lämmönsiirrin kauempaa

Levylämmönsiirrin koostuu jo aiemmin mainituista lämmönsiirtolevyistä ja kahdesta päätylevystä, jotka ovat lämmönsiirtimen molemmissa päissä.

Päätylevyt ja niiden välissä olevat lämmönsiirtolevyt liitetään tiukasti toisiinsa tankojen, pulttien ja mutterien avulla. Aineet syötetään lämmönsiirtimeen päätylevyjen kautta kulmasta. Yleensä aineita on kaksi, mutta myös useiden aineiden virtaaminen on mahdollista. Kemiran tapauksessa aineet syötetään yhtä lukuun ottamatta toisen päätylevyn kautta, eli putkisto tekee U-mutkan. Kuitenkin myös läpivirtaukset ovat mahdollisia. Aineet virtaavat lämmönsiirtolevyjen läpi kulmissa olevien putkien läpi. Lämmönsiirtolevyt muodostavat pitävät, umpinaiset tilat, jossa aine voi virrata joko ylhäältä alas tai toisin päin. Joka toisessa tilassa virtaa lämmin aine ja joka toisessa taas viileä aine. Alla on 6 havainnekuva lämmönsiirtimestä.



Kuva 6. Havainnekuva levylämmönsiirtimestä (Process Heating, 2023.)

Kuten havainnekuvesta voi nähdä, lämmin ja viileä tila vuorottelevat keskenään. Silloin muodostuu lämmönsiirtopinta, joka mahdollistaa lämmönsiirron fluidien välille niiden sekoittumatta keskenään. (Savree, 2019.) Yleensä putkistot rakennetaan niin että lämmin aine syötetään ylhäältä ja tulee ulos alhaalta ja viileä fluidi menee alhaalta ylös. (Savree, 2019.) Jäähtyessään aine tulee tiheämmäksi, joten se jo fysiikan perussääntöjen mukaan laskeutuu alaspäin. Lämmitessään taas aine kevenee ja menee ylöspäin. Kun tämä huomioidaan, vähennetään pumppaustarvetta ja siten pienennetään

energiankulutusta. (Savree, 2019.) Tässä tapauksessa kyseessä on vastavirtalämmönsiirrin. Se parantaa lämmönkontaktia ja siten parantaa lämmönsiirtoa fluidista toiseen. Myötävirtalämmönsiirrin taas voi olla hyvä idea, kun halutaan varmistaa, että jäähditys ei ole liiallista, esimerkiksi reaktion saannon ja nopeuden kannalta. (Shah & Sekulic, 2003, s. 59.) Ei olekaan sattumaa, että Kemiralla on vain kaksi myötävirtalämmönsiirrintä. Yksi on luupin lämmönsiirrin, eli juuri se missä kemiallinen reaktio tapahtuu, ja toinen on ilmapuhaltajien lämmönsiirrin. Kaikki muut lämmönsiirtimet ovatkin vastavirtalämmönsiirtimiä.

Levyt yleensä muotoillaan niin että niissä on kohoumia, aaltokuvioita tai muita kuvioiteja. Niiden tarkoituksena on muokata fluidien virtausta mahdollisimman turbulenttiseksi, mikä parantaa lämmönsiirron tehokkuutta. Lähellä levyjen ulkoreunaa olevat tiivisteet, juotokset tai hitsaussaumamat ohjaavat virtausta kohti ulosmenoputkea ja estävät vuodot ulkopuolelle tai toisen aineen tilaan. (Savree, 2019.) Alla on kuva 7 tyypillisestä tiivistellisestä lämmönsiirtolevystä.



Kuva 7. Lämmönsiirtolevy ja sen tiiviste  
(Purkukolmio, 2023.)

Mikäli levyt on liitetty juottamalla tai tiivistämällä, on ne mahdollista avata puhdistuksen ajaksi. Hitsattuja taas ei voi avata. Tyypillisesti lämmönsiirtimet rakennetaan ruostumattomasta tai haponkestävästä teräksestä, mutta myös tiitaania tai muoveja käytetään. Materiaalivalinnassa tärkeää on huomioida, että

ympäristö on hyvin altis korroosiolle, unohtamatta mekaanisia vaatimuksia. (Shah & Sekulic, 2003, s. 25.)

### 3.3 Levylämmönsiirtimen mitoitus

Lämmönsiirron tehon voi laskea lämpöopin kaavalla 7 (Seppänen, 2009, s. 120).

$$Q = mc\Delta T \quad (7)$$

Jossa Q on lämpöteho kilowatteina

m = massavirta kg/s

c = ominaislämpökapasiteetti kJ/kgK,

$\Delta T$  = aineen lämpötilaero

Kaava on jo tuttu edellisestä kappaleesta. Lämmönsiirtimen tapauksessa, kun kyseessä on kaksi ainetta siirtämässä lämpöä. Voidaan se kirjoittaa näin:

$$m_1 c_1 \Delta T_1 = m_2 c_2 \Delta T_2 \quad (7)$$

Toinen tapa laskea lämpöteho on:

$$Q = UA\theta_{ln} \quad (10)$$

Jossa U on lämmönsiirtokerroin W/m<sup>2</sup>K

A = Pinta-ala m<sup>2</sup>

$\theta_{ln}$  = logaritminen lämpötilaero

(Motiva, 2017, s. 4.)

Mikäli lämpötehon on jo saanut laskettua edellisellä kaavalla, voi tällä kaavalla laskea tarvittavan lämmönsiirtopinta-alan. Tosin tässä työssä jo olemassa olevien lämmönsiirrinten pinta-ala on laskettu mittaustulosten perusteella näin:

$$A = korkeus * leveys * levyjen lukumäärä \quad (11)$$

Tulos antaa tarpeeksi tarkan tuloksen, kun vertaillaan niitä toisiinsa.

Kaavassa 10 oleva termi  $\theta_{ln}$  on logaritminen lämpötilaero ja se lasketaan näin:

$$\Delta\theta_{ln} = (\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2) / \ln\left(\frac{\Delta\theta_1}{\Delta\theta_2}\right) \quad (12)$$

Jossa  $\Delta\theta_1$  on suurempi virtojen välinen lämpötilaero jommassa kummassa päässä

$\Delta\theta_2$  = pienempi virtojen välinen lämpötilaero jommassa kummassa päässä  
(Motiva, 2017, s. 4.)

Lämmönsiirtimen tehokkuutta voi analysoida rekuperaatioasteen  $\varepsilon$  avulla. Se kuvaa, kuinka paljon lämpöä voi saada talteen teoreettisesta maksimista. Sen voi laskea kaavalla:

$$\varepsilon = \frac{\Delta T_{max}}{\theta} \quad (13)$$

Jossa  $\Delta T_{max}$  on suurempi kuuman tai kylmän virran lämpötilaeroista.

$\theta$  = Koko lämmönsiirtimen suurimman ja pienimmän lämpötilan erotus.

Mitä korkeampi luku sitä tehokkaampi lämmönsiirrin. Yksi on maksimitulos. (Motiva, 2017, s. 4.) Se ei kuitenkaan ota kantaa lämmönsiirtimen kokoon, vaan olettaa lämmönsiirtopinnan äärettömän suureksi (Shah & Sekulic, 2003, s. 115). Siksi sitä ei voi käyttää lämmönsiirtimien mitoituksessa. Tässä tutkimuksessa se on hyvä apuväline arvioimaan jo toiminnassa olevien lämmönsiirtimien tehokkuutta. Rekuperaatioasteita on taulukoitu lämmönsiirtimet kappaleessa.

### 3.4 Edut ja haitat

Tyypillinen lämmönsiirtopinta tilavuuteen nähden on 12–660 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. Levylämmönsiirtimen etuja onkin se, että ne mahtuvat pieneen tilaan, samalla tarjoten ison lämmönsiirtopinta-alan. Lisäksi niillä saavutetaan suuri lämmönsiirron

tehokkuus eli rekuperaatioaste. Se voi olla jopa 0,93 ja jopa yhden celsiusasteen erot aineiden välillä ovat mahdollisia. (Shah & Sekulic, 2003, s. 26.)

Rakenteen takia levylämmönsiirtimellä on myös huonoja puolia. Se kestää huonosti painetta, noin 3 MPa asti. (Shah & Sekulic, 2003, s. 28.) Lisäksi se ei sovellu erittäin korkeisiin lämpötiloihin, vaan toimii yleensä alle 260 °C lämpötilassa. Lisäksi aineiden tulee olla melko puhtaita, eikä suuria kiintoaine partikkeleja sallita. Paineessa ja lämpötilassa rajoittavana tekijänä on yleensä tiivisteet ja ohuet lämmönsiirtolevyt. Monesti tiivisteitä pitää vaihtaa säännöllisesti, mikäli olosuhteet ovat haastavat. Myös painehäviö on melko iso, mikä taas nostaa pumppauskustannuksia. Monia haittoja voi minimoida liittämällä levyt toisiinsa hitsaamalla. Se taas estää monia huoltotoimenpiteitä. (Shah & Sekulic, 2003, s. 29.) Kemiran tapauksessa levylämmönsiirtimiä käytetään koska ne mahtuvat pieneen tilaan ja paineet ovat matalia. Lisäksi lämpötilaerot ovat jo lähtökohtaisesti pieniä, joten rekuperaatioasteen pitää olla hyvä.

## 4 TUTKIMUSMETODIT

Lämmitystä ja tuotantoa on analysoitu käymällä useita kertoja tehtaalla seuraamassa tuotantoa, katsomassa putkistoa, tekemällä mittauksia ja valokuvaamassa putkia ja lämmönsiirtimiä. Tehdaskierrokset kestivät noin 1,5–3 tuntia kerrallaan. Valtaosa kuvista onkin itse otettuja kuvia tehtaalta.

Työssä esitetyt lämpötilat perustuvat useisiin mittaustapoihin. Moni lämpötila perustuu Kemiran automaatiojärjestelmän tietoihin, eli mittaus on sähköinen. Näin on etenkin tuotannon lämpötilamittauksissa. Vastaavasti lämmityksen liitetyissä lämmönsiirtimissä mittaus on analoginen, eli anturi on asennettu putken sisälle ja mittaustulos katsotaan putken päällä olevasta viisarinäytöstä. Monissa tarkemmissa mittauksissa, kuten ilmapuhaltajien ja natriumbisulfiitin lämmönsiirtimen lämpötiloissa on käytetty omaa Boschin UniversalTemp pintalämpötilamittaria. Sen mittaus perustuu kohteen lähettämään

infrapunasäteilyn analysointiin. Putkistojen tapauksessa sen tulokset eivät aina ole luotettavia. Ennen varsinaisia mittauksia tulokset varmennettiin mittaamalla pintalämpötilan lähellä analogisia lämpömittareita ja asettamalla emissiivisyys sen mukaan. Lähes aina se oli 0,95. Tulokset olivat pääasiassa luotettavia, jos säde on suunnattu oikein kohtisuoraan ja pinta ei kiillä. Ilmapuhaltajissa mittaukset suoritettiin maalatuista ja tummista pinnoista koska ne antavat luotettavamman tuloksen. (Bosch, 2019 s. 129.) Ilman lämpötilat on mitattu langattomalla omalla sisä/ulkolämpömittarilla.

Osa tuloksista perustuu vuonna 2012 tehtyyn sisäiseen energiaselvitykseen ja vuonna 2017 tehtyyn natriumbisulfiitin mitoituslaskelmiin. Hankaluutta aiheutti puutteelliset mittaustulokset veden putkistojen virtausmääristä. Ne perustuvat mitoituslaskelmiin ja pumpun tyyppikilven arvoihin. Työnjohdon arvion mukaan voidaan olettaa, että mitoituslaskelman tiedot pitävät edelleen paikkaansa. Lisäksi pumppujen tyyppikilven virtausmäärän arvot vaikuttavat energiataseen kannalta järkeviltä, eikä niiden pohjalta ole tehty tärkeitä laskelmia.

## 5 LÄMMÖNSIIRRON NYKYTILANNE

### 5.1 Tehtaan lämmitys

Natriumbisulfiitilla siis lämmitetään sen oma tehdasalue. Samassa rakennuksessa on myös alumiinisulfaatin  $AlSO_4$  valmistusta. Alumiinisulfaatin valmistusprosessi on monimutkaisempi ja sisältää enemmän vaiheita. Siksi se vaatii huomattavasti enemmän tilaa kuin natriumbisulfiitin valmistusprosessi. Karkea arvio on, että alumiinisulfaatti vie 75 % koko tehtaan lämmitetystä pinta-alasta. Koko tehtaan pinta-ala on noin 7 000 m<sup>2</sup>. Tästä kuitenkin noin 33 % on kylmävarastoja alumiinisulfaatin tarpeisiin. Niissä pidetään lämpötila vain hieman yllä nollassa celsiusasteessa. Joissakin tiloissa ei pidetä lämmitystä ollenkaan päällä, edes pakkasilla. Paremmin lämmitetyn alan pinta-ala on siis 4 600 m<sup>2</sup>. Siellä pidetään lämpötila noin 15 celsiusasteessa. Kesällä lämpötilan

annetaan nousta vapaasti, eli tiloissa ei ole jäähdytystä. Tehtaan ohjaamo ja muut sosiaalitalat lämmitetään noin 21 °C lämpötilaan. Niissä lämmitys on toteutettu sähköllä toimivilla pattereilla, joko öljykierrolla tai ilman sitä. Joka tapauksessa niiden lämmitys ei ole sidottu millään tavalla natriumbisulfiittiin tai höyrynkehittäjiin. Alla on kuva 8 alumiinisulfaattitehtaasta.



Kuva 8. Alumiinisulfaattitehdas

Käsiteltävä rakennus on rakenteeltaan tyyppillinen tehdasrakennus. Se tarkoittaa, että rakennuksen eristys ei ole erityisen hyvä. Osasyllinen on rakennuksen ikä. Se on rakennettu 1960-luvulla, jolloin eristykset eivät olleet erityisen hyviä nykypäivän standardeilla. Lämmitystä tarvitaan noin puolen vuoden ajan eli 26 viikkoa. Rakennuksen lämmitystarpeen voi arvioida höyrynkehittimien tehon avulla. Viikonloppuisin, kun tehtaalla ei ole tuotantoa, käyttää höyrynkehittimen 150 kW teholla sähköä. Siitä voidaan karkeasti laskea koko vuoden kulutus, kun viikonloppu kestää noin 2,5 päivää. Lämmitystä tarvitaan 26 viikkoa vuodessa.

$$150 \text{ kW} * 24 \text{ h} * 2,5 \text{ d} * 26 \text{ vk} = 234\,000 \text{ kWh} = 234 \text{ MWh} \quad (14)$$

Rakennusta siis lämmitetään ostoenergialla noin 234 MWh. Lukema on myös lähellä todellista lämmityksen tarvitsemää sähkön kulutusta, koska natriumbisulfiitin reaktion tuottama energia riittää lähes aina tehtaan lämmitykseen. Eli arvion mukaan sähköllä tarvitsee lämmittää vain viikonloppuisin ja silloin kun ei ole tuotantoa. Lisäksi energiaselvityksen mukaan alumiinisulfaatin kuuma- vesisäiliö tarvitsee 120 MWh/a. Eli kokonaislämmöntarve on 354 MWh/a.

Kuten keskimääräisestä tehontarpeesta huomataan, teoriassa natriumbisulfiitin lämmöntuoton pitäisi riittää lämmittämään koko tehdasta, koska käytettävissä oleva teho on jopa 7-kertainen tarpeeseen nähden. Täytyy ottaa huomioon, että huipputehonkulutus kylminä pakkaspäivinä on huomattavasti korkeampi. Kuitenkin koska lämmitystä aina voi täydentää sähkökäyttöisillä höyrykehittimillä, niin laskelmissa keskitytään keskimääräiseen energiankulutukseen.

## 5.2 Tehtaan lämpötilat

Alla on taulukoitu tehtaan eri huoneiden ja tuotantotilojen ilman lämpötilat sekä tilojen ilmapuhaltajat eli kiertoilmakojeeet. Mittaukset on suoritettu 2.2.2023 jolloin ulkolämpötila oli -3 °C.

Taulukko 2. Tehtaan huoneiden lämpötilat 2.2.2023

Tila	Lämpötila °C	Ilmapuhaltajat Määrä
Käytävä Höyrykattilat Alakerta	12,2	2
Varasto & Käytävä Alakerta	15,3	4
NaHSO <sub>3</sub> Käytävä Alakerta	14,9	1
NaHSO <sub>3</sub> Tuotanto Alakerta	14,3	2
Viileä Varasto	10,7	3
NaHSO <sub>3</sub> Tuotanto 2 krs	18,4	0
NaHSO <sub>3</sub> Säiliöt Yläkerta	17,9	0
AlSO <sub>4</sub> Keitto Tuotanto 2 krs	16,5	1
AlSO <sub>4</sub> Säilytys Alakerta	18,7	1
AlSO <sub>4</sub> Rakeistus 2 krs	16,2	0
AlSO <sub>4</sub> Rakeistus Yläkerta	17,2	0
Hydraattihalli	Ulkolämpötila	1

Lämpötiloissa on huomattava, että mittaushetkellä ei ollut alumiinisulfaatin tuotantoa. Se osaltaan lämmittää omia tuotantotilojaan. Kuten taulukosta voi huomata on kaikista lämpimimmät tilat natriumbisulfiitin säiliöiden lähetyillä. Näin siitä huolimatta vaikka siellä ei ole ilmapuhaltajia. Korkeammat lämpötilat ovat myös alumiinisulfaatin tuotantotiloissa, vaikka sielläkään ei ole juuri ollenkaan ilmapuhaltajia. Viileässä varastossa pidetään lämpötila tarkoituksella noin 10 celsiusasteessa. Tuotanto siis itsessään lämmittää tiloja merkittävästi. Ongelmana on, että lämpö ei siirry tasaisesti ympäri tehdasta. Esimerkiksi yläkerran tuotantotiloissa oleskellaan varsin vähän verrattuna alakerran tuotantotiloihin ja käytäviin.

### 5.3 Lämmitys ulkoisella energialla

Koska natriumbisulfiitin tuotanto ei käy joka päivä, on oltava varavaihtoehto. Siinä tapauksessa tehdasta lämmitetään höyrykehittimien avulla. Höyrykehittäjiä on kaksi kappaletta 300 kW ja 150 kW tehoisia. Nämä kehittimet toimivat sähköllä ja sähkön hinta on sidottu spot-markkinoihin.

Suurin osa niiden tehoista käytetään erilaisiin tuotantoprosesseihin, mutta etenkin pakkaskaudella niiden rooli lämmityslähteenä on merkittävä. Tarkkaa energian tarvetta ei kuitenkaan voi tietää koska alumiinisulfaatin tarvitsema höyry vääristävät tuloksia liikaa, eikä höyryn käyttökohteita ole eritelty tarvittavin mittauksin. Arvion mukaan lähes kaikissa talven lämpötilassa natriumbisulfiitin lämmöntuotto riittää lämmitykseen. Alla on kuva 9 molemmista höyrykehittimistä.



Kuva 9. Höyrykehittimet

Höyrykehittimien tuottama höyry ajetaan lämmönsiirtimeen, joka lämmittää ilmapuhaltajien vettä. Lämpimän veden tavoitearvo on 80 °C, joten pelkästään natriumbisulfiitin lämpöenergia ei riitä millään lämmittämään vettä. Siksi siihen aina tarvitaan sähkövastuksia lämmittämään vettä, jota natriumbisulfiitin lämpö auttaa. Höyrykehittimien ilmoitettu hyötysuhde on 90 %, jonka lisäksi tulevat linjahäviöt. Arvion mukaan todellinen hyötysuhde linjahäviöiden on noin 80 %. Linjahäviöt lämmitykseen kuitenkin ovat pienet koska molemmat höyrykehittimet sijaitsevat hyvin lähellä ilmapuhaltajien lämmönsiirintä.

#### 5.4 Lämmönsiirtimet ja putkistot

Järjestelmässä on useita lämmönsiirtimiä. Tehtaan lämmitykseen liittyviä lämmönsiirtimiä on yhteensä kahdeksan kappaletta. Kahdessa kiertää natriumbisulfiitti. Neljässä kiertää joesta pumpattu raakavesi, ja ne ottavat lämmön talteen natriumbisulfiitista. Neljässä kiertää lämmitysvesi ja yhdessä kiertää

sähköllä tuotettu höyry, joka linjastossa lauhtuu takaisin vedeksi. Yhdessä lämmönsiirtimessä kiertää paineilmakompressorin öljy. Lämmitysvesi ottaa lämmön talteen useista lähteistä ja vie sen useisiin paikkoihin. Se lämmittää veden ilmapuhaltajille ja siten tehtaan lämmitykseen. Se lämmittää myös alumiinisulfaatin valmistuksessa tarvittavaa kuumavesisäiliötä. Natriumbisulfiitin lisäksi se ottaa lämmön talteen myös eri valmistusprosesseissa tarvittavasta paineilmakompressorista. Vielä yhdessä putkikierrrossa kiertää ilmapuhaltajien vesi. Se ottaa lämmön talteen lämmitysvedestä ja höyryn kehittimien tuottamasta lämmöstä. Kaikki edellä mainitut lämmönsiirtimet ovat levylämmönsiirtimiä ja liitetty tiivisteillä yhtä lukuun ottamatta. Lämmönsiirtimistä on lisää myöhemmin.

Lämmönsiirtoa voi huonontaa myös ilma putkistossa. Etenkin lämmitysveden putkistoon on asennettu ilmanpoistiventtiilit kuten kuuluukin eli korkeimpaan kohtaan. (Talja, 2019, s. 22.) Jos sen oikeaoppisesta toiminnasta huolehditaan, niin ainakaan siinä putkistossa huono lämmönsiirto ei todennäköisesti johdu ilmasta. Myös ilmapuhaltajien verkostossa on ainakin muutama ilmanpoistiventtiili asennettuna korkeimpaan. Verkoston laajuudesta ja siitä että se sijaitsee katonrajassa johtuen, on vaikea sanoa, kuinka paljon niitä on asennettu.

## 5.5 Lämmönsiirto tilaan

Riippumatta siitä, käytetäänkö lämmitykseen höyrynkehittäjiä tai natriumbisulfiitin hukkalämpöä, kaikki lämpö siirretään huoneilmaan ilmapuhaltajilla toiselta nimeltään kiertoilmakojeilla. Ilmapuhaltajia on tehtaalla yhteensä 17 kappaletta tasaisesti ripoteltuna ympäri tehdasta ja niissä kiertää vesi. Ilmapuhaltaja sanan mukaisesti puhaltaa ilmaa vesiputkiston läpi. Ilman virratessa ohuiden ja lämpimien putkien läpi ilma samalla lämpenee. Kaikki ilmapuhaltajat ovat yhtä lukuun ottamatta täsmälleen samanlaisia. Niiden ottama virta tyyppikilven mukaan on 1,3 ampeeria ja käyttävät vaihtovirtaa jännitteellä 230 voltia. Valmistajan antaman tiedon mukaan sähköteho on 250 W. Osa tehosta

häviää EC-moottorin pyörittämiseen ja tasasuuntaajaan. Moottorin kierrosnopeus on 1 430 rpm. (Volcano käyttöohje, 2020, s. 243.)

## 5.6 Ilmapuhaltajat

Ilmapuhaltaja tai toiselta nimeltään kiertoilmakoje on laite, jota yleensä käytetään erilaisten hallien, varastojen ja tehtaiden lämmitykseen. Se sopii myös kosteiden tilojen lämmitykseen, jos vettä ei mene suoraan laitteeseen. Kuuma vesi pumpataan ilmapuhaltajassa olevan lämmönsiirtosäleikön läpi. Säleikön takana oleva aksiaalipuhallin puhaltaa viileää ilmaa kuumaa vettä virtaavan säleikön läpi. Samalla ilma lämpenee ja virtaa huonetilaan ja siten lämmittää tehdasta. Edessä on harva säleikkö, joka ohjaa ilmaa haluttuun suuntaan. Ilmapuhaltajat yleensä asennetaan seinälle tai katonrajaan, riippuen putkiston sijainnista. (Volcano käyttöohje, 2020 s. 239) Kemira käyttää EC-moottorilla toimivaa puhallinta eli se on kytkettynä vaihtovirtaan ja 230 voltin jännitteeseen. EC-moottori tarkoittaa elektronisesti kommutoitua tasavirtamoottoria ilman hiiliharjoja. Siinä verkon vaihtojännite muunnetaan tasasuuntaajilla tasavirraksi. Kun virran määrää säädetään, niin samalla säädetään moottorin kierrosnopeutta, eikä tähän tarvita taajuusmuuttajaa. Järjestelmä on energiatehokas etenkin pienemmillä kierrosnopeuksilla ja on hiljainen. (Airtècnics, 2018.) Myös Kemiralla puhaltimet ovat hyvin hiljaisia.

Harjavallan tehdas käyttää tiloissaan saman valmistajan samaa mallia. Se on Onnline Volcano VR2 EC. Paneeli on neliön mallinen ja sivun pituus on 700 mm. Paksuus on 425 mm. Se on mitoitettu toimimaan niin että kuumavesi on 50–90 °C. ja laite jäädyttää sitä noin 20 °C. Läpimenevä ilmavirta VR2 mallissa on 2 400–4 850 m<sup>3</sup>/h, ja se virtaa kahden säleikön läpi. Puhaltimessa on kolmiportainen asteikko ja Kemira käyttää puhallinta täysillä. Kemiran tapauksessa sisään menevä ilma on 5–10 °C. ja se lämpiää 16,7–19,6 celsiusasteeseen. Lämpöteho on 15,6–19 kW. Veden virtausnopeus taas on maksimissaan 0,68 m<sup>3</sup>/h. Nämä on siis tehty valmistajan antamien parametrien mukaan, kun vesi jäähtyy 50 asteesta 30 asteeseen. (Volcano käyttöohje, 2020, s. 242.)

Kemiran tapauksessa vesi ei milloinkaan ole 50 °C, vaan lähempänä 20 °C. Siksi laskelmat eivät päde suoraan, kun vettä johdetaan säleikön läpi liian viileänä. Tätä tukee myös oma kokemus ja ilman lämpötila, joka on vain 10–15 °C. VR2 malli kestää 1,6 MPa painetta. Alla olevassa kuvassa 10 on yksi tehtaalla olevista ilmapuhaltajista.



Kuva 10. Tehtaan ilmapuhaltaja

### 5.7 Jäähdytysvesi eli raakavesi

Raakavesi pumpataan Kokemäenjoesta ja lämmönsiirtimien jälkeen se ajetaan viemäriin ja siten takaisin jokeen. Järjestelmä on siis avoin eli vesi vaihtuu koko ajan. Sitä hallitaan säätöventtiileillä putkiston alussa, viemärissä ja kolmitieventtiilillä. Juuri ennen viemärin säätöventtiiliä on T-haara, josta vesi jakautuu sen ja veden kierrätyksen välillä. Jos vesi jää sisäiseen kiertoon niin se päätyy T-haaran jälkeen kolmitieventtiilille. Siinä joesta tuleva uusi vesi ja kierätetty vesi yhdistyvät ja jatkavat matkaansa pumpun kautta lämmönsiirtimille. Kaikissa kolmessa venttiileissä on säätömahdollisuus. Venttiilin

avautumisastetta hallitsevat operaattorit automaatiojärjestelmällä. Alla olevassa kuvassa 11 on oikealla raakaveden putkisto ja taustalla vasemmalla on osa luupista.



Kuva 11. Raakaveden putkisto ylhäältä

Jäähdytysvettä kierrätetään noin  $77 \text{ m}^3/\text{h}$  eli  $76\,587 \text{ kg/h}$ . Sille ei kuitenkaan ole reaaliaikaista ja tarkkaa virtausmittausta, vaan lukema perustuu taselaskentaan ja suunnitelma-arvoihin. Kuitenkin vettä kierrätetään aina samalla vauhdilla, joten laskelmissa oletetaan, että jäähdytysveden massavirta on  $76\,587 \text{ kg/h}$ . Raakaveden pumppuun on asennettu taajuusmuuttaja, ja kierrosnopeus on asetettu 95 prosenttiin, eli on lähes täysillä. Kierrosnopeutta ei muuteta juuri ollenkaan.

## 6 LÄMMITYKSEN ANALYSOINTI

### 6.1 Natriumbisulfiitin ja veden lämpötilat

Mittausdatan perusteella tuotantovauhdilla 7 460 kg/h lämpö kohoaa reaktorissa 55,0 °C ja laskee ensimmäisen luopissa olevan lämmönsiirtimen jälkeen 50,6 °C. Eroa on siis vain 4,4 celsiusastetta. Toisen lämmönsiirtimen jälkeen lämpötila laskee 50,6 celsiusasteesta 45,0 asteeseen. Pudotusta on siis 5,6 astetta. Tavoitearvona on kuitenkin vähän yli 40 °C natriumbisulfiitille ja 36 °C lämpötila raakavedelle riippuen ulkolämpötilasta. Alla on taulukko nesteiden lämpötiloille eri päivinä ja tuotantovauhdeilla. Kaikki lukemat perustuvat Kemiran automaatiojärjestelmän antamaan mittausdataan ja ylin rivi, 9 000 kg/h on mitoitusarvo.

Taulukko 3 Nesteiden lämpötilat eri tuotantovauhdeilla

Tuotantovauhti kg/h	NaHSO <sub>3</sub> 3 T(°C) Lämmin	NaHSO <sub>3</sub> T(°C) Vii- leämpi	NaHSO <sub>3</sub> 3 T(°C) Viileä	Raaka- vesi T(°C) Kylmä	Raaka- vesi T(°C) Lämmin	Sähkön- johtavuus µS/cm
9000				25	36	
6480	55,8	52,1	46,1	23,8	34,6	104,5
7460	55	50,6	45	18	31,2	101,5
5550	54,7	51,7	48,1	28,1	35,1	106,5
4630	52,1	49,5	47,4	25,7	32,7	96,6
7480	57,6	53,3	47,7	16,4	30	96,5
8840	60,5	55,7	48,1	13,1	27,8	98,15
5860	52,5	49,5	47,8	32,3	38,4	99,7
5500	52,5	49,4	47,7	31,2	37,6	95,8

Järjestelmä mittaa myös raakaveden sähkönjohtavuutta, joka kertoo välillisesti veden puhtauden. Mitä pienempi sähkönjohtavuus, sitä vähemmän sähköä johtavia ioneja, esimerkiksi suoloja. Se taas yleensä tarkoittaa puhdasta vettä. (Vesi, 2023.) Tyypillisesti järvi- ja jokivesien sähkönjohtavuus on 50–200 µS/cm. Voimakkaasti viljellyillä alueilla, jossa Kokemäenjoki virtaa se on enemmän kuin karuissa maastoissa. (Maa- ja kotitalousnaiset ry, 2023, s. 4.) Arvot ovat siis tyypillisiä, eikä niissä ole paljoa vaihtelua. Alla on taulukoitu erikseen lämpötilaerot.

Taulukko 4 Nesteiden lämpötilaerot eri tuotantovauhdeilla

Tuotanto kg/h	NaHSO <sub>3</sub> LS 1 ΔT °C	NaHSO <sub>3</sub> LS 2 ΔT °C	NaHSO <sub>3</sub> Yhteensä ΔT °C	Raakavesi ΔT °C	Uutta vettä
9000				11	
6480	3,7	6	9,7	10,8	12 %
7460	4,4	5,6	10	13,2	20 %
5550	3	3,6	6,6	7	1 %
4630	2,6	2,1	4,7	7	1 %
7480	4,3	5,6	9,9	13,6	13 %
8840	4,8	7,6	12,4	14,7	18 %
5860	3	1,7	4,7	6,1	2 %
5500	3,1	1,7	4,8	6,4	2 %

Taulukossa kohta uutta vettä kertoo, kuinka monta prosenttia jokivesiventtiili on auki. Jokivesiventtiilin avulla säädetään raakaveden lämpötilaa. Mikäli tarvitaan enemmän jäähdytystä niin sitä avataan enemmän ja jos jäähdytysteho on riittävä niin venttiiliä pidetään käytännössä kiinni, kuten on tehty talvella pienillä tuotantonopeuksilla. Kesällä jokivesi on lämmintä, joten venttiili on huomattavasti enemmän auki kuin talvella, välillä jopa täysin auki. Alla on vertailtu saatua lämmitystehoa teoreettiseen lämmöntuottoon, joka on jo laskettu valmistusprosessin kappaleessa.

Taulukko 5 Lämmön siirtymisen vertailu lämmön tuottoon

Tuotantovauhti kg/h	Lämmöntuotto kW	Lämmön Siirtymisen kW	Ero	Ero %
9000	980	978,6	1,4	0 %
7460	1306	1174,4	131,6	10 %
6480	1134	960,8	173,2	15 %
5500	963	622,8	340,2	35 %
4620	809	622,8	186,2	23 %
7480	1309	1209,9	99,1	8 %
8840	1547	1307,8	239,2	15 %
5860	1026	542,7	483,3	47 %
5500	963	569,4	393,6	41 %

Kuten taulukosta voi huomata, laskee lämmön siirtymisen tehokkuus samalla kun tuotantovauhtia pienennetään. 5 500 kg/h vauhdilla lämpöä häviää jopa 35 % kun 8 840 kg/h vauhdilla erotus on siedettävä 15 %. Ylin arvo 9 000 kg/h on valmistuksessa mitoitettu arvo vertailukohtana. Merkittävä selitys tälle on jokiveden venttiilin avautumisasteesta johtuva raakaveden lämpötila. Pienillä

tuotantovauhdeilla vesi on jo valmiiksi lämmintä, kun taas kovilla vauhdeilla suurempi osa vedestä tulee suoraan joesta. Koska kovemmillä tuotantovauhdeilla lämpötilaero on isompi, johtuen suuremmasta reaktiolämmöstä ja kylmemmästä vedestä, on lämmönsiirto myös tehokkaampaa. Hitailta tuotantovauhdeilla lämpötilaerot sekä vedessä että natriumbisulfiitissa ovat pienempiä, joten lämpötehokin on pienempi. Kuten myöhemmin käy ilmi, huonompi lämmönsiirtoteho ei välttämättä ole huono asia. Raakaveden lämpötiloja on taulukoitu lisää myöhemmin

## 6.2 Lämmönsiirron rajoitukset

Natriumbisulfiitin laatu asettaa omat haasteensa tehtaan lämmitykseen. Sen lämpötila ei milloinkaan saa laskea alle 20 celsiusasteen. Käytännössä se pitää huomioida jo tuotantovaiheessa siten, ettei liuosta päästetä varastosäiliöihin liian kylmänä. Kylminä pakkaspäivinä liuos pumpataan säiliöihin yli 45 celsiusasteen lämpötilassa. Leutoina syyspäivinä tai kesällä taas voi päästää huomattavasti viileämpää liuosta. Näin toimien siis ennakoidaan tulevaa jäähtymistä. Liuoksen lämpötilan asetusarvo perustuu operaattoreiden kokemukseen. Jäähtymisessä pitää huomioida, että valmis natriumbisulfiitti voi olla varastosäiliössä reilusti yli viikon. Varastosäiliöt ovat lähellä tuotantoaluetta samassa rakennuksessa. Ne ovat 112 m<sup>3</sup> kokoisia ja niitä on neljä kappaletta. Säiliöitä ei ole eristetty millään tavalla ja ovat materiaaliltaan terästä ja lasikuitua, eli huonoja lämmöneristeitä. Lisäksi sisällä pidetään yllä pientä alipainetta ehkäisemään haitallisten kaasujen ja hajujen leviämistä ympäristöön. Säiliön koko on 112 m<sup>3</sup> ja natriumbisulfiitin tiheys automaatiojärjestelmänmittausten mukaan on 1,28 kg/l. Massan voi laskea tiheyden kaavan mukaan (Seppänen ym., 2009, s. 119).

$$\rho V = m \quad (15)$$

$$1\,280 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 112 \text{ m}^3 = 143\,360 \text{ kg}$$

Tietenkään säiliöt eivät aina ole täynnä, mutta ne täytetään ja tyhjenetään aina yksi kerrallaan. Operaattoreiden kokemuksen mukaan lähes tyhjänä

natriumbisulfiitin lämpötila voi laskea alle kriittisen lämpötilan 20 °C-asteen. Jäähtyminen on nopeampaa, kun liuoksen massa on pieni. Käytännössä kun säiliössä on vielä paljon tavaraa, on sen lämpötila monesti 30–35 °C, ja kun se on jo seissyt säiliössä. Kokemuksen mukaan täysinäinen säiliö pitää lämpönsä eli on yli 25 °C, noin yhden viikon ja puolikas vieläkin lyhyemmän ajan, riippuen ulkolämpötilasta. Varaston täyttöjä ei voi ennakoida, koska tilaukset tulevat nopealla varoitusaajalla, jopa vuorokauden sisällä. Siksi aina pitää olla säiliöissä tavaraa ja varmistaa että se säilyttää laatunsa viikkokausia. Alla on kuva 12 kahdesta säiliöstä. Kuten 112 kuutiometrin tilavuudesta voi olettaa, ovat ne hyvin isoja, etenkin korkeussuunnassa.



Kuva 12. Natriumbisulfiitin säiliöt

Koska säiliöt ovat sisällä, muodostavat ne merkittävän lämpövaraston. Siksi niiden sisältämä lämpöenergia ei mene hukkaan, vaan osaltaan lämmittävät tehdasta. Asian voi myös todeta siellä, koska säiliöiden ympärillä on tehtaan suurin tila ja eniten kuutioita lämmitettävänä. Siellä ei ole kuitenkaan lähellekään tarpeeksi ilmapuhaltajia, jotta niiden lämmitys pystyisi lämmittämään koko tilan. Siitä huolimatta se tila on jopa lämpimämpi kuin muut tilat. Tosin

vain vähän, eikä liika kuumuus ole sen takia ongelma, kesää lukuun ottamatta. Lämmityksen kannalta on hyvä, jos liuoksen annetaan vapaasti jäähtyä eikä vasta valmistettua liuosta pumpata suoraan säiliöautoon, vaan pumpataan vanhempaa, jo jäähtynyttä liuosta. Näin tosin jo tehdään. Lämpimät säiliöt ovat tosin tasaisen lämmönsiirron kannalta huonot, koska ne vaikuttavat vain samassa tilassa.

### 6.3 Raakaveden ja jäähdytyksen säätö

Valmiin natriumbisulfiitin lämpötilaa säädellään jokivesiventtiilin avulla. Eli kun halutaan jäähdyttää prosessia enemmän, avataan jokivesiventtiiliä. Se tuo raakavesiputkistoon kylmempää suoraan joesta pumpattua vettä. Suurempaa jäähdytystä tarvitaan, kun ajetaan kovemmalla vauhdilla. Suurta jäähdytystä taas ei tarvita, kun ajetaan pienellä tuotantovauhdilla ja halutaan pitää valmiin liuoksen lämpötila tarpeeksi ylhäällä, jotta se ei jäähdy liikaa varastosäiliössä. Kesällä ja alkusyksyllä jokivesiventtiili on lähes kokonaan auki, koska jokivesi on muutenkin lämmintä, jopa 20 °C, ja siten sen jäähdytysteho on huomattavasti heikempi kuin talvella, jolloin vesi on vain 4 °C. Mikäli jäähdytysveden kierto olisi suljettu, niin kesällä se lämpenisi liikaa, eikä siten jäähdyttäisi reaktiota tarpeeksi. Siksi etenkin kesällä, kun lämmitystä ei tarvita, pitää taata, että jäähdytysvesi on riittävän viileää. Joten järjestelmä on avoin, vaikka hitailla tuotantovauhdeilla talvella sitä pidetään käytännössä lähes suljettuna.

Kun jokivesiventtiiliä avataan, eli putkistoon tuodaan lisää vettä, pitää sen luonnollisesti myös poistua jostakin. Siksi samalla aukeaa myös viemäriin venttiili. Raakavesi siis poistuu takaisin jokeen. Viemäriin venttiili on juuri ennen kolmitieventtiiliä, jokivesiventtiili taas on kauempana. Myös viemäriin venttiili on säätöventtiili yhdistettynä automaatiojärjestelmään. Samalla kun raakavettä virtaa jokeen, samalla menee myös lämpöä. Vaikka vesi on jo vienyt lämpönsä lämmitysveden lämmönsiirtimeen, on se silti melko lämmintä, noin 20–30 °C. Erään mittauksen mukaan talvella lämpötila oli 24 °C.

Se tarkoittaa, että etenkin syksyisin, kun venttiiliä pidetään melko auki lämpimän jokiveden takia, menee samalla merkittäviä määriä lämpöä takaisin jokeen. Talvellakin viemäriin menevä vesi on noin 20–25 °C. Lisäksi natriumbisulfiitin lämmönsiirrin johtaa lämpimän veden takaisin putkistoon juuri ennen viemäriin venttiiliä, jolloin lämpöä menee jonkin verran hukkaan. Lämpöhukkaa tosin heikentää natriumbisulfiitin pieni massavirta verrattuna kokonaisvirtaukseen. Olisi parempi, jos kyseinen putkihaara liittyisi putkistoon viemäriin haaran jälkeen, mutta ennen kolmitieventtiiliä. Siihen ei kuitenkaan ole tilaa, eikä pienen virtauksen takia putkistoa kannata muuttaa vain sen takia. Alla olevassa kuvassa 13 on edellä mainitut venttiilit ja suurin osa putkihaaroista.



Kuva 13. Raakaveden putkisto

Valmiin natriumbisulfiitin lämpötilaa säädetään vielä tarkemmin kuristamalla tai avaamalla natriumbisulfiitin lämmönsiirtimen raakavesiventtiiliä. Tästä lisää lämmönsiirtimet kappaleessa.

#### 6.4 Kehitysehdotukset

Viemäriputkiston lämpöhukkaa voi pienentää asentamalla kaksi tai kolme ilmapuhaltajaa viemäriputkistoon ennen kuin se johdetaan jokeen. Se ei ratkaise ongelmaa, mutta ainakin osa lämmöstä saadaan talteen. Vesi virtaa viemäriin noin 20–25 °C lämpötilassa. Siitä voi hyödyntää noin 10 °C, eli vesi olisi hyvä saada 15 °C lämpötilassa ulos. Raakaveden virtaus 77 m<sup>3</sup>/h antaa viitteitä, että viemäriin menevä lämpövirta on merkittävä, vaikka venttiilit olisivat vain vähän auki ja lämpötila vain 20 °C. Asiassa kuitenkin pitää ottaa huomioon, että monesti kun ajetaan hitailla tuotantovauhdeilla viemäriin ei mene juuri ollenkaan vettä. Kovemmalla tuotantovauhdilla valmistetaan melko harvoin, joten etenkin talvella menee aika harvoin paljoa energiaa hukkaan. Silti lämpö olisi edes osittain hyvä ottaa talteen.

Ehdotettu malli on Onnline Volcano VR3, joka on saman valmistajan ja kooltaan samankokoinen mutta lämmitysteholtaan hieman suurempi. Käsiteltävä lämpövirtakin on suuri, kuten edellä kerrottiin, siksi mallin on hyvä olla tehokkaampi. Volcano VR3 lämpöteho on ilman 10 °C lämpötilassa 23,7 kW, joka on suurempi, kun sitä vertaa nykyisiä malleja VR2, joka on teholtaan 15,6 kW. VR3 mallissa veden virtaus on maksimissaan 1,03 m<sup>3</sup>/h, eli vain murto-osa viemäriin veden virtausmääristä, vaikka venttiili olisikin kuristettu. Se on silti enemmän kuin nykyisen VR2 mallin 0,68 m<sup>3</sup>/h. (Volcano käyttöohje, 2020, s. 242.)

Alla olevassa kuvassa 14 vasemmalla olevat putkilinjat ovat jokiveden ja viemäriin putket. Oikealla on meno- ja paluuputki lämmitysveden lämmönsiirtimeltä muille lämmönsiirtimille toisessa huoneessa.



Kuva 14. Raakaveden ja lämmitysveden putkilinjat

Ilmapuhaltajan jälkeen jäähtynyt vesi johdetaan samaan putkeen. Viimeisenä oleva ilmapuhaltaja siis saa viileämpää vettä kuin kantavassa pilarissa oleva. Vesi kuitenkin tuskin jäähtyy kovin merkittävästi yhdessä ilmapuhaltajassa. Mikäli viemäriin venttiili on lähes kiinni ja ei ole virtausta, voidaan ilmapuhaltajat kytkeä pois päältä. Helpointa se on, kun venttiilit ovat magneettiventtiileitä ja liitetään automaatiojärjestelmään. Nykyisissäkin ilmapuhaltajissa on magneettiventtiilit, ja niitä ohjataan manuaalisesti ohjaustaululla, joka sijaitsee natriumbisulfiitin tuotantotilojen läheisyydessä. Niitä ei ole kytketty automaatiojärjestelmään, eikä niitä nykyisin säädetä ollenkaan. Mikäli uudet ilmapuhaltajat kytketään samalla tavalla kuin vanhat, on suuri vaara, että tuotannon loppuessa ilmapuhaltajat jäävät päälle. Siksi ilmapuhaltajat kannattaa kytkeä osaksi valmistuksen automaatiojärjestelmää.

Mikäli halutaan säästää lämpöä vielä enemmän, voidaan niiden lähistöllä olevat ilmapuhaltajat kytkeä pois päältä silloin kun viemäriin ilmapuhaltajat ovat toiminnassa. Siinä on hyvä olla automaatiota, koska ilmapuhaltajien ohjaaminen unohtuu helposti. Siksi myös ne on hyvä kytkeä automaatiojärjestelmään.

Ensimmäinen ilmapuhaltaja sijaitsisi keskellä tilaa kaukana seinistä ja katosta. Kuitenkin se voidaan asentaa kantavalle tukipilarille. Se näkyy alla olevassa kuvassa 15. Viemäriin menevä putki on lähimpänä tukipilaria.



Kuva 15. Ehdotettu paikka uudelle ilmapuhaltajalle alhaalta kuvattuna.

Kuvassa 16 on sama paikka kuvattuna ylempää.



Kuva 16. Ehdotettu paikka uudelle ilmapuhaltajalle ylempää kuvattuna.

Toinen ilmapuhaltaja voidaan asentaa seinälle, koska putkisto menee siellä lähellä seinää ja lattiaa. Kuvassa 17 on ehdotettu asennuspaikka. Poikittain menevä putki on se, josta lämpöä otetaan.



Kuva 17. Ehdotettu paikka toiselle uudelle ilmapuhaltajalle.

Seinän läheisyys taas helpottaa huomattavasti asennusta. Kuvasta 18 voi nähdä, että miten muut ilmapuhaltajat on kiinnitetty seinään. Kuvan ilmapuhaltaja on kauimmaisena, siksi vesiputkisto päättyy siihen. Mikäli halutaan säästää kustannuksissa, voidaan asentaa vain yksi ilmapuhaltaja. Sen asennuspaikka olisi keskellä tilaa asennettuna tukipilariin. Alla olevassa kuvassa 18 on yksi nykyisistä ilmapuhaltajista, josta voi nähdä, että miten ne on asennettu paikalleen.



Kuva 18. Esimerkki ilmapuhaltajan asennustavasta.

Vielä yksi ilmapuhaltaja voidaan asentaa paikkaan, jossa putki menee ulos tehtaalta. Se sijaitisi lähellä seinää ja lähellä lattiaa. Välittömästi sen vieressä olisi kuitenkin kaappeja, joissa käydään usein hakemassa tavaroita. Mikäli koetaan että ilmavirta häiritsee työskentelyä, voidaan tämä ilmapuhaltaja jättää asentamatta. Nykyisellään tilan lämpötila on noin 15 °C-astetta.

## 7 JÄRJESTELMÄN LÄMMÖNSIIRTIMET

### 7.1 Luupin lämmönsiirrin

Ensimmäinen lämmönsiirrin on sama, kuin on jo käsitelty kappaleessa 2. Se on asennettu putkivirtausreaktorin luuppiin, jossa natriumbisulfiitti on valmistusmassa. Luuppi on lämpöeristetty ja se on valmistettu vuonna 2017. Siihen on kuitenkin jälkiasennettu karkeasti arvioiden noin tuplasti lisää lämmönsiirtolevyjä, kun on huomattu, että jäähdysteho ei ole riittävä. Lämmönsiirron pinta-ala suuntaa antavan mittauksen mukaan on 19,8 m<sup>2</sup>.

Natriumbisulfiitti menee lämmönsiirtimeen alhaalta, kuten myös raakavesi. Molemmat tulevat sieltä ulos yläpuolelta. Järjestys on siis väärä, koska yleensä lämmönsiirtimet pyritään rakentamaan niin että kuuma neste menee ylhäältä alas ja kylmä neste alhaalta ylös. Se vähentää painehäviöitä koska jäähtyessään neste tihenee ja siten laskeutuu itsestään, ja toisin päin, kun neste lämpenee. Lisäksi koska molemmat nesteet virtaavat samaan suuntaan se heikentää lämmönsiirtoa. Puhtaasti lämmönsiirron kannalta parempi olisi, että nesteet virtaavat vastakkaisiin suuntiin. (Savree, 2019.) Alla on kuva 19 jossa on kuvattuna luupin lämmönsiirrin.



Kuva 19. Luupin lämmönsiirrin

Luupin lämmönsiirtimen rekuperaatioaste on:

$$\frac{30,5^{\circ}\text{C}-18,6^{\circ}\text{C}}{57,6^{\circ}\text{C}-18,6^{\circ}\text{C}} = 0,31 \quad (13)$$

Alla on taulukoitu muita rekuperaatioasteita.

Taulukko 6. Luupin lämmönsiirtimen rekuperaatioaste

Tuotanto kg/h	Rekuperaatioaste
4620	0,38
7460	0,31
8840	0,25
5860	0,49
5500	0,54

Tulos on melko heikko. Laskennallisesti voidaan arvioida, että prosenteiksi muunnettuna 46 % - 75 % raakaveden lämmityspotentiaalista menee hukkaan. Se selittääkin, mihin suurin osa natriumbisulfiitin jo edellisessä kappaleessa lasketusta muodostumislämmöstä menee. Se sitoutuu lämmenteeseen natriumbisulfiittiin. Siksi yli 1 000 kilowatin muodostumislämmöstä saadaan lämmönsiirtimien kautta hyödynnettyä vain kymmenesosa.

Syynä heikkoon tehoon on osittain edellä mainittu myötävirta, ja se että kaikki liuos ei ole valmista natriumbisulfiittia. Vaikka tulos onkin heikko, niin juuri meillä olevan reaktion takia prosessin olosuhteita ei ole syytä muuttaa. Esimerkiksi vastavirtalämmönsiirtimillä jäähdytysteho voi kasvaa jopa liian isoksi. Liikaa jäähtyneenä reaktio voi hidastua tai sen saanto voi huonontua. Luonnollisesti näistä asioista ei voi tinkiä, vaan tuotteen hyvä laatu ja tehokas tuotanto ovat ensisijaisia tavoitteita ja lämmönsiirto vasta toissijainen asia.

Osasy syy miksi lämmönsiirrintä ei kannata muuttaa on sen sijainti luupissa. Kuten jo kappaleessa laskettiin, on massavirta luupissa ja siten lämmönsiirtimessä jopa 161 000 kg/h, koska liuos kiertää sen ympäri noin 25 kertaa ennen valmistumista. Lämmönsiirron kapasiteetin kasvattaminen lisäämällä levyjä kasvattaa myös painehäviöitä. Tuollaisilla massavirroilla lisääntynyt painehäviö on merkittävä pumpun energiankulutuksen kannalta. Koska pumppu jo käy lähes täysillä, kun tuotantovauhti on 9 500 kg/h, se tarkoittaa, että pumppu pitää uusia tehokkaampaan. Sekin nostaa kustannuksia. Siksi luupin lämmönsiirtimelle ei tehdä mitään.

Luupin lämmönsiirrin avattiin ja puhdistettiin maaliskuussa 2022. Tämä siksi koska operaattorit huomasivat, että lämmönsiirrin ei toimi kunnolla. Koska ehkä tärkeimmän lämmönsiirtimen puhdistamisesta on niin vähän aikaa, on epätodennäköistä, että huono lämmön siirron tehokkuus johtuu pelkästään järjestelmän likaantumisesta.

## 7.2 Natriumbisulfiitin lämmönsiirrin

Natriumbisulfiitin lämmönsiirrin ottaa lämpöä talteen jo valmistuneesta natriumbisulfiitista ennen kuin se pumpataan varastosäiliöihin. Sen kapasiteetti tyyppikilven mukaan on 127 kW. Kuitenkin periaatteessa kapasiteetin pitäisi riittää tehtaan lämmitykseen, koska edellä on jo mainittu, että lämmitystarve on keskimäärin 100–150 kW, eli lämmönsiirtimen pitäisi riittää lähes kaikkiin tilanteisiin. Siirrin on siis huomattavasti pienempi kuin ensimmäinen lämmönsiirrin. Asian voi helposti huomata myös paikan päällä, koska sen koko on reilusti alle puolet ensimmäisen lämmönsiirtimen koosta. Tyyppikilven mukaan lämmönsiirtopinta-ala on 2,85 m<sup>2</sup> ja karkean mittauksen mukaan 2,71 m<sup>2</sup>. Tilavuusvirta on mitoitettu 6 860 l/h. Kun natriumbisulfiitin tiheys mittauksen mukaan on 1,28 kg/l voi sen massavirran laskea tiheyden kaavaa johtamalla (Seppänen ym., 2009, s. 119).

$$m = \rho V \quad (15)$$

$$1,28 \frac{\text{kg}}{\text{l}} * 6\,860 \frac{\text{l}}{\text{h}} = 8\,781 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Kapasiteetti tyyppikilven mukaan siis riittää lähes kaikkiin tuotantovauhteihin. Sekä ensimmäisessä että toisessa lämmönsiirtimessä virtaavat samat nesteet, eli natriumbisulfiitti ja myös lämmitettävä vesi on samaa. Raakavesi eli jokivesi siis jaetaan kummankin lämmönsiirtimen kesken. Niiden jakosuhdetta hallitaan säätöventtiilillä, joka on T-haaran jälkeen, mutta ennen lämmönsiirintä. Toisin kuin luupin lämmönsiirtimessä, tässä nesteet virtaavat oikeaoppisesti, eli natriumbisulfiitti virtaa ylhäältä alas ja kylmä raakavesi alhaalta ylös (Savree, 2019). Alla on kuva 20, jossa on kuvattuna natriumbisulfiitin lämmönsiirrin.



Kuva 20. Natriumbisulfiitin lämmönsiirrin

Alla on laskettu ja taulukoitu rekuperaatioasteita ja venttiilin avautumisasteita.

Lämmönsiirtimen rekuperaatioaste kaavan 13 mukaan on:

$$\frac{49,4^{\circ}\text{C}-18^{\circ}\text{C}}{53,3^{\circ}\text{C}-18^{\circ}\text{C}} = 0,88 \quad (13)$$

Taulukko 7. Natriumbisulfiitin lämmönsiirtimen rekuperaatioaste

Tuotanto kg/h	Rekuperaatioaste	Venttiili auki
4620	0,95	100 %
7460	0,88	90 %
8840	0,77	79 %
5860	0,78	98 %
5500	0,76	98 %

Kuten tuloksesta voi nähdä, on rekuperaatioaste erinomainen. Vesi lämpenee siellä huomattavan paljon, jopa 30 °C. Tosin sitä selittää huomattavasti pienempi massavirta raakavedelle kuin luupin lämmönsiirtimessä. Mikäli lämmönsiirron kokonaistehoa halutaan nostaa, voi harkita tämän lämmönsiirtimen

massavirran kasvattamista. Nykyisellään lämpötila kohoaa kiitettävästi mutta virtauksen pienuus verrattuna luupin lämmönsiirtimeen pitää tämän lämmönsiirtimeen merkitystä liian pienenä. Valitettavasti sen hyödyntämistä haittaa nykyinen säätötapa, jossa säätöventtiiliä kuristamalla tai avaamalla hallitaan natriumbisulfiitin lämpötilaa. Eli kun halutaan pumpata lämpimämpää liuosta säiliöön, kuristetaan raakaveden virtausta. Kun taas liuos saa olla kylmempää, avataan sitä. Tällainen järjestely rajoittaa tehokkaasti lämmityksen hyötykäyttöä, koska mitä kylmempää on ulkona, sitä lämpimämpää liuosta ajetaan säiliöihin. Talvella valmiin liuoksen lämpötila valmistuessa on noin 48 °C. Sillä ennakoitaan säiliöiden jäähtymistä, josta kerrottiin kappaleessa kolme. Yleensä venttiili onkin auki vain 80–90 %. Siten lämmönsiirtimeen lämmityspotentiaali on huomattavan heikko, koska virtaus sen läpi on kokonaisuuteen nähden vähäistä.

Mikäli lämmityspotentiaalia halutaan nostaa, voidaan entistä suurempi osa raakavedestä johtaa tämän lämmönsiirtimeen läpi. Se voidaan tehdä avaamalla venttiili täysin ja kuristaa T-haaran jälkeisen pääputkiston käsiventtiiliä. Sitä valitettavasti ei voi tehdä koska natriumbisulfiitin laatu voi kärsiä, jos se päätetään kylmempänä säiliöön. Näiden rajoitteiden takia ei tähänkään lämmönsiirtimeen kannata tehdä mitään.

### 7.3 Lämmitysveden lämmönsiirrin

Lämmitysveden lämmönsiirrin siirtää lämpöä joesta pumpatun raakaveden ja varsinaisen lämmitysveden välillä. Lämmitysvesi sitten pumpataan ilmapuhaltimille, jotka puhaltavat lämmintä ilmaa tehtaalle. Se sijaitsee natriumbisulfiitin tuotantoalueella toisessa kerroksessa, kun luuppi on ensimmäisessä kerroksessa. Tämä on kooltaan melko iso lämmönsiirrin, huomattavasti isompi kuin natriumbisulfiitin lämmönsiirrin. Karkean mittauksen mukaan lämmönsiirron pinta-ala on 24,5 m<sup>2</sup>. Tosin sen tarvitsee olla isompi koska jo lähtökohtaisesti molempien nesteiden lämpötilaerot ovat pienet, vain muutama celsiusaste. Eräänä päivänä lämpötila raakavedelle ennen lämmönsiirrintä oli 33,5 °C ja jälkeen 30,0 °C. Lämmitysvedelle ennen lämmönsiirrintä 29,0 °C ja jälkeen

31,5 °C. Lämmönsiirrin siis toimii varsin hyvin, eikä vaadi toimenpiteitä. Lämpötilamittaukset perustuvat manuaalisiin mittauksiin eikä lämpötiloja ole yhdistetty automaatiojärjestelmään. Alla olevassa kuvassa 21 on lämmitysveden lämmönsiirrin.



Kuva 21. Lämmitysveden lämmönsiirrin

Asiassa pitää ottaa huomioon, että lämmitysvedellä on myös ainakin välillisesti muita lämmönlähteitä kuin natriumbisulfiitti. Näitä ovat höyrykehittimet ja paineilmakompressori. Siksi lämpötilat eivät aina kerro totuutta lämmönsiirtimen tehokkuudesta. Alla on taulukoitu lämmönsiirtimen lämpötilat eri tuotantovauheilla.

Taulukko 8. Lämmitysveden lämmönsiirtimen lämpötilat

Tuotanto kg/h	Raakavesi T(°C) Lämmin	Raakavesi T(°C) Kylmä	Lämmitysvesi T(°C) Kylmä	Lämmitysvesi T(°C) Lämmin	Raakavesi $\Delta T$ (°C)	Lämmitysvesi $\Delta T$ (°C)
6480	33,5	33	35	35	0,5	0
5550	33,5	30	29	31,5	3,5	2,5
4620	31	30	30	31,7	1	1,7
7460	29,1	28,6	29	29,9	0,5	0,9
8840	26,4	25	24,8	26	1,4	1,2
5860	35	33,9	32,1	35,3	1,1	3,2
5500	35,8	33,1	29,8	33,5	2,7	3,7

Kuten lämpötiloista voi huomata ovat lämpötilaerot nesteiden välillä todella pienet. Lisäksi raakaveden lämpötilan ja tuotantovauhdin välillä ei ole minäkäänlaista korrelaatiota. Itse asiassa kaikista kylmin vesi tulee silloin kun on kaikista kovin tuotantovauhti. Se taas johtuu siitä, että jokivesiventtiiliä pidetään auki, jolloin jäähdytysvesi on ennen lämmönsiirtimiä viileämpää ja jopa kylmää. Lämmityksen kannalta on hyvä, jos lämmityskaudella pystytään ajamaan hiljaisella tuotantovauhdilla. Silloin reaktion ei tarvitse lämmittää liian kylmää vettä suoraan joesta vaan lähes kaikki raakavesi kiertää tehtaan sisällä, eikä lämmennyt vettä johdeta ulos. Näin tosin pyritään tekemään jo nyt. Alla on taulukoitu lämmönsiirtimen teho ja rekuperaatioasteita.

Taulukko 9. Lämmitysveden lämmönsiirtimen teho ja rekuperaatioaste

Tuotanto kg/h	Rekuperaatioaste	Teho kW
6480	0,8	44,5
5550	0,8	311,4
4620	1,0	89,0
7460	0,7	44,5
8840	0,9	124,6
5860	1,0	97,9
5500	0,6	240,2

Kuten taulukosta huomaa on rekuperaatioaste varsin hyvä. Se tarkoittaa, että lämmönsiirto on tehokasta eikä ongelmia ole. (Motiva, 2017, s. 4.)

Lämmönsiirtimen pienet lämpötilaerot voivat hämätä. Lisäksi tuloksia vääristää jo valmiiksi pienet lämpötilaerot. Jo 0,1 celsiusasteen ero vaikuttaa

tulokseen todella paljon. Lämpömittarit ovat perinteisiä mittareita viisarinäytöllä, joten pienet virheet näytössä vääristävät tuloksia paljon. Todellisuudessa myös tässä lämmönsiirtimessä liikkuu suuret lämpövirrat. Se johtuu raakaveden massavirrasta, joka on noin 76 587 kg/h. Se on siis jopa yli kymmenen kertaa enemmän kuin natriumbisulfiitin massavirta. Peruskaavalla  $Q = mc\Delta T$  voi huomata, että lämpövirtaan vaikuttaa lämpötilaeron lisäksi myös massa- virta. Siksi koko raakaveden massavirralla ei voi tulla samaa lämpötilaeroa kuin natriumbisulfiitille, joka on monesti vain kymmenesosa verrattuna raakaveden virtaukseen.

#### 7.4 Muut lämmönsiirtimet

Lämmitysveden lämmönsiirtimen jälkeen on T-haara osalle raakavedestä. Haara vie raakaveden vielä yhdelle ja pienemmälle lämmönsiirtimelle, joka on lämmitysveden lämmönsiirtimen vieressä. Se lämmittää puhdasta vettä, ennen kuin se pumpataan putkivirtausreaktoriin. Tämä lämmönsiirrin on huomattavasti pienempi kuin lämmitysveden lämmönsiirrin. Silti se viilentää raakavettä aika paljon. Tämä lämmönsiirrin on jälkiasennettu, kun on huomattu, että vesi on johdettu liian kylmänä reaktoriin.

Järjestelmän neljä muuta lämmönsiirrintä sijaitsevat eri huoneessa, joten niiden välissä on järjestelmän selkeästi pisin putkistolinja, jos ilmapuhaltajien veden putkistoa ei lasketa. Nämä neljä lämmönsiirrintä ovat hyvin lähellä toisiaan ja myös höyrykehittimet ovat niiden vieressä. Järjestelmä on siis rakennettu fiksusti ja putkistojen lämpöhäviöt on minimoitu. Kuvassa 22 on neljä mainittua lämmönsiirrintä.



Kuva 22. Muut lämmönsiirtimet

Lämmitysveden lämmönsiirtimestä vesi virtaa kuumavesisäiliön lämmönsiirtimeen. Se on kuvassa 21 edessä oikealla. Nimensä mukaisesti se lämmittää alumiinisulfaatin valmistuksessa tarvittavaa vettä. Veden tavoitelämpötila on 85 °C, joten lämmitykseen joudutaan aina käyttämään sähköä.

Sen jälkeen lämmitysvesi virtaa paineilmakompressorin lämmönsiirtimeen. Se taas on kuvassa 21 edessä keskellä. Siellä paineilmakompressoreita jäähdytetään öljyn avulla, ja saatu lämpö otetaan talteen lämmitysvedeen. Itse kompressorit ja paineilmasäiliö sijaitsevat eri tilassa. Öljyputkisto on lämpöeristetty, joten matkalla lämpöhukka on pieniä. Kompressorit eivät useimmiten käy, mutta hetkittäin sieltä saadaan merkittäviä määriä lämpöä hyötykäyttöön. Kokonaisuutena sen rooli lämmityksessä on kuitenkin pieni.

Ilmapuhaltajien lämmönsiirtimen jälkeen on sitten vielä höyryn lämmönsiirrin, jossa lämmittävä aineena on sähköllä tuotettu höyry. Ilmapuhaltajien lämmönsiirtimessä lämmennyt vesi menee höyryn lämmönsiirtimelle, jossa

tarvittaessa sen lämpötilaa nostetaan noin 30 celsiusasteeseen. Jos se on jo valmiiksi niin lämmintä niin höyryä ei tarvita. Tämä lämmönsiirrin on selkeästi muita korkeampi mutta myös kapeampi. Se on alla olevassa kuvassa 23 oikealla. Edessä taas on ilmapuhaltajien lämmönsiirrin, josta lisää seuraavassa kappaleessa.



Kuva 23. Ilmapuhaltajien ja höyryn lämmönsiirrin.

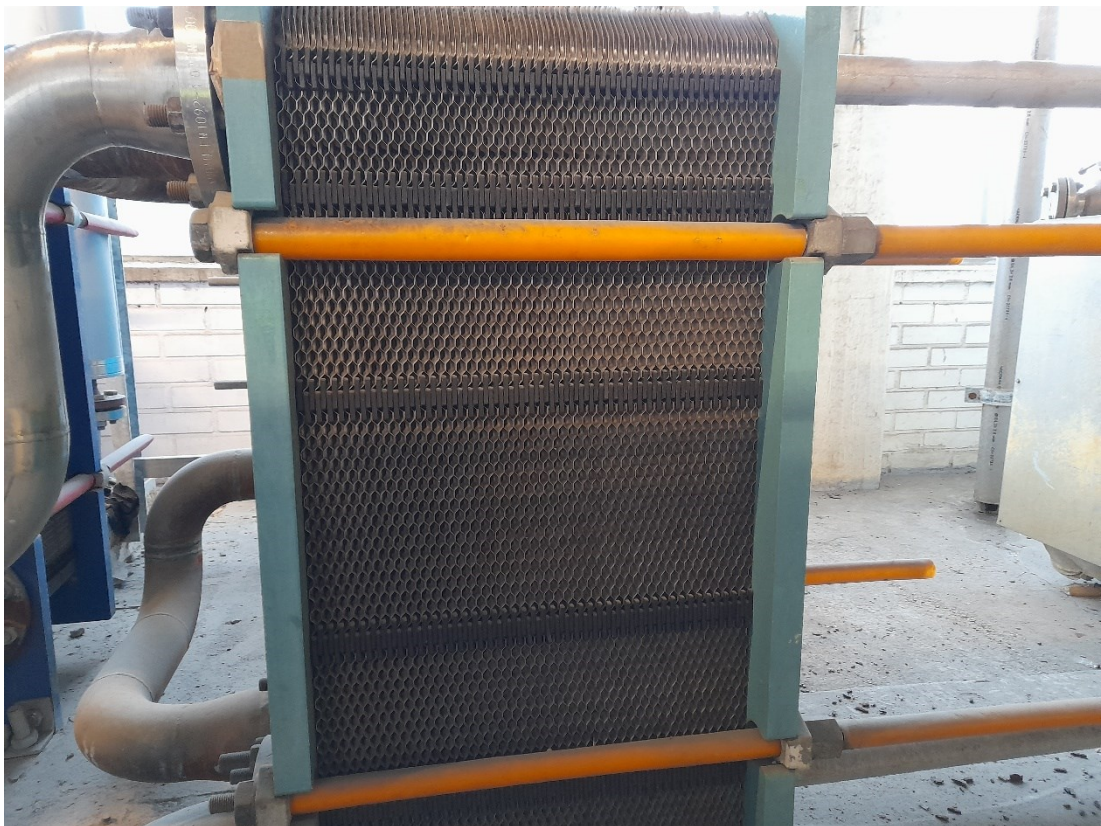
### 7.5 Ilmapuhaltajien lämmönsiirrin

Lämmitysvedelle on vielä yksi lämmönsiirrin. Se siirtää lämmön ilmapuhaltajien vedelle. Lämmitysvesi lämmittää veden ilmapuhaltajille noin 28–30 °C lämpötilaan. Levyt on liitetty toisiinsa tiivisteiden avulla. Alla on taulukoitua lämpötiloja ja laskettu rekuperaatioasteet.

Taulukko 10. Ilmapuhaltajien lämmönsiirtimen lämpötilat ja rekuperaatioaste

Lämmitysvesi Lämmin T °C	Lämmitysvesi Kylmä °C	Ilmapuhaltajat Lämmin °C	Ilmapuhaltajat Kylmä °C	Rekuperatioaste
30,5	29	29,1	27,9	0,58
34	31,3	30,9	29,2	0,56
37,8	35	32,9	30,5	0,38
33,8	31,6	30	28	0,38
34	31,4	29,7	27,9	0,43

Kuten taulukosta voi havaita, on lämmönsiirtimen rekuperaatioaste matalampi kuin lämmitysveden tai natriumbisulfitin lämmönsiirtimelle. Pääosin sitä selittää, että se on myötävirtalämmönsiirrin. Kuten lämmönsiirtimien toimintaperiaate-kappaleessa kerrottiin, ovat ne huonompia kuin vastavirtalämmönsiirtimet. Sen lämmönsiirtopinta-ala karkean mittauksen mukaan on 30 m<sup>2</sup>. Eli se on kaikista suurin. Tulosta selittää kaikista suurin määrä lämmönsiirtolevyjä, 91 kappaletta. Koko ei siis ole ongelma. Lämpötilaerot myös tällä ovat pieniä, noin muutama aste. Alla olevassa kuvassa 24 on lähikuva ilmapuhaltajien lämmönsiirtimestä.



Kuva 24. Ilmapuhaltajien lämmönsiirrin

Lämmönsiirron tehokkuutta voidaan kasvattaa muuttamalla lämmönsiirtimen virtaus myötävirrasta vastavirtaan. Se todennäköisesti kasvattaa rekuperatioastetta ja lämmönsiirtoa ilmapuhaltajien verkostoon. (Shah & Sekulic, 2003, 59.) Nykyisellään myötävirralla ei ole perustetta, koska kyseisen lämmönsiirtimen ainoa tavoite on lämmittää mahdollisimman paljon ilmapuhaltajien verkoston vettä.

Asiaa kuitenkin hankaloittaa sen vaatimat putkistomuutokset. Nykyisin putket mahtuvat hyvin koska lämmönsiirtimen alapuolelta lähtevä putki jatkaa höyryn lämmönsiirtimelle ja menee sisään myös alhaalta. Mikäli lähtevä putki lähtisi yläpuolelta on uudelle putkilinjalle vähän tilaa. Sen takia linja pitää vetää mahdollisimman lähelle höyryn lämmönsiirrintä ja putki joutuisi tekemään U-mutkan juuri ennen sitä. Sama olisi myös tulevassa putkessa, eli U-mutka juuri ennen ilmapuhaltajien lämmönsiirrintä. Todennäköisesti sama asia todettiin myös mitoitus- ja asennusvaiheessa, joten siksi linjaus on vedetty näin. Alla on kuva 25 jossa on vaihdettava putkisto.



Kuva 25. Vaihdeputkisto

Koska tällä on suurin lämmönsiirron pinta-ala, ei lämmönsiirtimen suurentamiselle levyjä lisäämällä ole perusteita. Lisäksi se kasvattaisi paine-eroa, eli pumppu pitäisi uusia isompaan. Siksi parempi olisi, jos virtauksen voisi muuttaa vastavirraksi, koska se ei kasvata paine-eroa.

Samalla kun virtaussuuntaa vaihtaa, voi lämmönsiirintä puhdistaa. Todennäköisesti muita huonompi toiminta ei johdu pelkästään liasta, mutta siellä voi olla likaa lisäämässä painehäviötä ja estämässä lämmönsiirtymistä pinnalta toiselle. Sitä ei myöskään ole tehty tietävästi kertaakaan asennuksen jälkeen eli vuonna 2017. Siksi puhdistaminen on hyvä tehdä. Koska lämmönsiirrin on tiivisteellinen, on sen avaaminen mekaanista puhdistusta varten helppoa, mutta kuitenkin työlästä. (Motiva, 2017 s. 8.)

## 7.6 Putkiston lämpöhäviöt

Lämmönsiirrossa tulee huomioida myös putkiston lämpöhäviöt. Se korostuu etenkin lämmitysveden lämmönsiirtimen ja kuumavesisäiliön lämmönsiirtimen tapauksessa, koska kuten jo edellisessä kappaleessa mainittiin, niiden välillä on ylivoimaisesti pisin putkiosuus. Alla on taulukoitu lämpötiloja ja putkiston jäähtymä.

Taulukko 11. Lämmitysveden putken veden jäähtyminen

Tuotanto kg/h	Lämmitysvesi Meno °C	Lämmitysvesi Tulo °C	ΔT °C Putkisto
5550	31,5	29	2,5
4620	31,7	29	2,7
8840	26	23,5	2,5
5860	35,3	33,3	2
5500	33,5	31,3	2,2

Taulukosta havaitaan että, lämmennyt vesi jäähtyy matkalla 2,0–2,7 °C. Tätä edesauttaa se, että putkissa ei ole minkäänlaista lämpöeristystä. Tosin kuten säiliöissä, myös tässäkin tapauksessa lämpö ei varsinaisesti mene hukkaan koska putkisto kulkee lähes koko matkan ajan tuotantotilojen katonrajassa. Silti on hyvä, jos vesi ei jäähtyisi edes 2,5 astetta matkalla muille lämmönsiirtimille, koska eristämätön putkiosuus lämmittää aluetta, joka on jo riittävän lämmin, noin 14 °C. Putken ulkohalkaisija on 114,3 mm eli sen putkikoko on DN 100. Putki ja sen läpi virtaava lämpövirta on siis suuri. Alla on laskettu kaavan 7 mukaan jäähtymän lämpövirta, kun taulukon jäähtymästä on laskettu keskiarvo.

$$Q = 10 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 4,1819 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{°C} * 2,38 \text{°C} = 99,5 \text{ kW} \quad (7)$$

Lämpövirta on siis suuri. Huomioitavaa on, että massavirta perustuu lämmitysveden pumpun tyypikilven arvoon. Ne eivät välttämättä pidä paikkaansa, mutta antavat suuntaa, kuinka iso virtaus putkistossa menee. Tarkkaa virtausmittausta ei ole saatavilla, joten laskennassa on tyydyttävä tähän. Alla olevassa kuvassa 26 on nuolilla osoitettu eristettävä putki. Se kääntyy keskellä

tilaa ja virta kulkee oikealta ja kääntyy vasemmalle. Rinnakkainen putki on saman virran paluuputki.



Kuva 26. Eristettävä putki

Jäähtymisen takia eristäminen siis kannattaa. Se tehdään lasi- tai mineraalivillalla, jonka päällä on alumiinilaminaattia. Villaeristeen lämmönjohtokyky on noin  $0,037 \text{ W/mK}$  kun käytetään Isoverin Saint Gobainin valmistamaa lasivil-laista suurille putkille tarkoitettua alumiinipäällysteistä eristettä (U Protect Pipe Section Alu 2, 2023). Putken voi eristää myös muulla vastaavalla eristeellä. Sopiva eristepaksuus noin paksulle putkelle on noin 64 mm (Energiateollisuus ry, 2020, s. 6). Jotta asennustyö olisi helpompaa, voidaan mutkat jättää eris-tämättä. Kokonaispituuteen nähden mutkia on vähän, joten niiden merkitys lämpövirran kannalta on vähäinen.

## 8 LÄMMÖNSIIRTO ERIKOISHAPPOTEHTAALLE

### 8.1 Erikoishappotehdas

Tässä työssä tutkitaan myös mahdollisuutta siirtää natriumbisulfiitin lämpöä toiseen rakennukseen. Sitä nimitetään erikoishappotehtaaksi ja siellä laimennetaan väkevää rikkihappoa 37 p-% laimeaksi rikkihapoksi. Lisäksi siellä on varasto ja sosiaalitiloja. Rakennus on huomattavasti pienempi kuin natriumbisulfiitin tehdas, ja siellä on vain yksi kerros. Tehtaan lämmitykseen riittää vain kaksi ilmapuhaltajaa. Tavoitelämpötila on sielläkin 15 °C. Sosiaalilat lämmitetään osittain erikseen suorasähköllä ja ilmalämpöpumpuilla, joten hukkalämpöä ei tulla käyttämään niiden lämmitykseen, aivan kuten ohjaamo isomassa tehtaassa. Nykyisin rakennusta lämmitetään kolmella ilmavesilämpöpumpulla. Se lämmittää vettä, joka johdetaan ilmapuhaltajalle ja märkätilojen lattialämmitykseen. Ilmapuhaltajat ovat samaa sarjaa kuin alumiinisulfaatin tehtaallakin. Alla on kuva 27 kyseisestä tehtaasta ja osa putkisillasta, joka on keltainen tukirakenne.



Kuva 27. Erikoishappotehdas ja osa putkisillasta.

Lisäksi pukuhuoneessa kaksi patteria lämpimää ilma-vesilämpöpumpulla kuten myös suihkujen lattialämmitys. Pukuhuoneessa kaksi muuta patteria toimivat öljykiertoisilla suorasähköpattereilla. Lämpötila siellä on 21,5 °C. Varaajan teho on 2 x 4,5 kW ja veden lämpötila on 58 °C. Sähkövastuksia tarvitaan, kun kulutus on huipussa esimerkiksi kovilla pakkasilla. Suihkun lattialämmityksen ja pattereiden veden lämpötila 47–49 °C. Myös rakennuksen käyttövesi lämmitetään ilma-vesilämpöpumpuilla. Rikkihapon laimennus ei tarvitse lämmintä vettä, eikä muutenkaan lämmitystä. Lämpimän käyttöveden kulutus on siis vähäistä.

Alla on taulukoitu erikoishappotehtaan ilmapuhaltajien meno- ja paluueden lämpötiloja. Lisäksi mukana on kolmen kauimmaisen ilmapuhaltajan lämpötilat alumiinisulfaattitehtaalta, koska siitä voidaan arvioida menoveden lämpötila ennen sen johtamista kaukolämpöputkelle.

Taulukko 12. Ilmapuhaltajien veden lämpötilat kahtena eri päivänä

Tila	Lämmin °C pv 1	Lämmin °C pv 2	Kylmä °C pv 1	Kylmä °C pv 2
NaHSO <sub>3</sub> Tuotanto Alakerta	28	24,3	21,7	20,2
Viileä Varasto	12,1	14,2	10,2	12,5
Tulityöpaikka	16	22,4	14,5	20,8
Erikoishappotehdas	42	39,3	29,1	27,3

Taulukosta voidaan havaita, että erikoishappotehtaalla ilmapuhaltajille johdetaan huomattavasti lämpimämpää vettä. Ero on jopa yli 30 °C. Jopa paluuvesi on lämpimämpää kuin viileän varaston menovesi. Putkisto tulitisiin johtamaan viileästä varastosta erikoishappotehtaalle. Siksi alumiinisulfaatin ilmapuhaltajien vesi on jo valmiiksi liian kylmää erikoishappotehtaalle. Erikoishappotehdas myös vaatii korkeampia lämpötiloja, koska se ei saa hukkalämpöä mistään. Tuotantotilojen lämmitys siis perustuu täysin kahteen ilmapuhaltajaan. Rakennuksen pienempi koko myös lisää lämpöhäviötä. Sen takia kylmemmän veden johtaminen ilmapuhaltajille ei tule kyseeseen.

## 8.2 Ilma-vesilämpöpumppu

Ilma-vesilämpöpumppu on varsin tehokas tapa lämmittää rakennusta, etenkin kun tavoitelämpötila on vain 15 °C. Ilma-vesilämpöpumppu siirtää lämpöä ulkoa ja lämmittää sillä lämmitysjärjestelmän vettä. Niiden lämpökerroin eli COP-arvo on noin 2,5–4,3. COP-arvo (Coefficient of Performance) tarkoittaa lämpökerrointa, kun ulkolämpötilana käytetään 7 °C-astetta ja tavoitelämpötila on joko 35 tai 55 °C-astetta. (Sawo Heat, 2023.) Mikäli COP on 4 niin 1 kWh sähköenergiaa tuottaa 4 kWh lämpöä (Juuti & Kakko, 2023). Lämpökerroin on siis huomattavasti parempi kuin alumiinisulfaattitehtaan höyrykehittimillä, joiden hyötysuhde ei voi edes teoriassa ylittää yhtä vaan on maksimissaan 0,9. Siksi lämpöä ei kannata siirtää, jos siihen tarvitaan höyrykehittämiä. Alla on kuva 28 ilma-vesilämpöpumpun sisäyksiköstä.



Kuva 28. Ilma-vesilämpöpumpun sisäyksikkö

Alla on kuva 29 erikoishappotehtaan kolmesta ilma-vesilämpöpumpun sisäyksiköistä ja niiden putkiliitännöistä.



Kuva 29. Kaikki ilma-vesilämpöpumpujen sisäyksiköt ja putkistot.

Valkoisissa putkissa kulkee kylmäaine ulkoa sisälle ja takaisin. Kuparisissa putkissa taas kulkee vesi kahteen vesivaraajaan. Näiden COP-arvo tyyppikilven mukaan on 2,51, 3,20 ja 3,70 riippuen ulkoilman ja vedelle asetetusta lämpötilasta.

Ilma-vesilämpöpumppu kuluttaa sähköä, kun se pyörittää kompressoria. Kompressori kierrättää kylmäainetta ulko- ja sisäyksikön välillä. Ulkona kylmäaine höyrystyy, kun se lämpiää muutaman asteen. Höyrystyminen takaa sen, että lämpö siirtyy ulkoa kylmäaineeseen. Sen jälkeen kompressori nostaa kylmäaineen painetta ja lämpötilaa. Vastaavasti painetta alennetaan lauhduttamalla, jolloin lämpö siirtyy lämmitysjärjestelmän veteen. (Thermia, 2023.) Ilma-vesilämpöpumppu toimii parhaiten, kun lämpötilaerot ovat pienet, eli ulkona ei ole erityisen kylmä eikä vettä tarvitse lämmittää erityisen lämpimäksi. Siksi ne sopivat hyvin erikoishappotehtaalte, koska mittauksen mukaan menoveden lämpötila oli 39–42 °C, joka on matalampi kuin yleensä vesikiertoisilla patte-reilla. (Sawo Heat, 2023.) Paluulämpötila taas on 27–29,1 °C-astetta. Lisäksi

tavoitelämpötila 15 °C-astetta myös parantaa lämpökerrointa. Suihkutilojen lattialämmityksen vesi taas on 47–49 °C, kun ulkona on pikkupakkasta.

Hukkalämmön hyödyntämistä ajatellen on hyvä, että lämmönsiirtojärjestelmä on sama kuin alumiinisulfaattitehtaallakin. Siksi liittäminen ei vaadi suuria muutostöitä.

### 8.3 Kaukolämpöputket tehtaalle

Hukkalämmön siirtämistä varten tarvitaan kaukolämpöputkia. Putket asennetaan jo olemassa olevalle putkisillalle, jossa on muita prosessiputkia. Jäähdytymisen kannalta paras olisi putkien kaivaminen maan alle, mutta maankaivuun kustannukset ovat niin korkeat, ettei se tule kyseeseen. Näin ajattelee myös toimeksiantaja. Valitettavasti putkisilta tekee melko ison mutkan, joten kaukolämpöputkea tarvitsee ostaa turhan paljon. Alla on kuva 30 osa putkisillasta, joka on keskivaiheilla koko matkaa ulkona. Tähän putkisto tultaisiin asentamaan.



Kuva 30. Putkisillan keskikohta

Kuten kuvasta voi nähdä putkisilta vie mutkan kautta kaukolämpöputket erikoishappotehtaalle. Siellä putki menee seinän viertä ulkopuolella ja menee sisälle lämmönjakohuoneen kohdalla.

Ilmapuhaltajien putkiston halkaisija on 33 mm eli putkikoko DN25. Vastaavasti verkoston putkiston koko on DN80. Ei ole tarkoituksenmukaista, että niin suuri osa vedestä menee erikoishappotehtaalle. Toisaalta DN25-koko on liian pieni kahdelle ilmapuhaltajalle ja lattialämmitykselle. Siksi putkikoko on hyvä olla DN50 tai DN40.

Lämmönjohtavuutena eli konduktanssina voidaan käyttää 0,298 W/mK koossa DN50. Putkikoolla DN40 konduktanssi on 0,268 W/mK. Laskennassa käytetään huonompaa arvoa eli koolla DN50. Tämä arvo on Prugg Peman valmistaman Flexstar Uno -putkistolle ilmoittama konduktanssi. Varsinaisen putken materiaali on PEX-muovia ja eriste polyuretaania. Valmistajan mukaan putki soveltuu matalalämpöisiin sovelluksiin, ilmalämpöpumppuihin ja yksittäisten rakennusten lämmönsiirtoon. Siksi se sopii tähän kohteeseen. Tähän voi sopia myös muiden valmistajien tuotteita. Brugg Peman Flexstar Uno on vain esimerkkinä. Kaksiputkijärjestelmissä maksimikoko on DN32, joka on liian pieni tähän järjestelmään. (Brugg Pema, 2023.) Alla on kuva 31 suunnittelusta putkiston liittämispaiakasta.



Kuva 31. Kaukolämpöputken liittämisaika

Kuvasta voi nähdä todennäköisen liittämisaikan kaukolämpöputkelle. Putkisto on jo valmiiksi ylhäällä ja tukirakenne on kannakkeiden varassa. Siksi putkistoa jatketaan niin että se menee seinällä ja hallin toisella puolella läpiviennin jälkeen menee valmiille putkisillalle. Lämmönsiirtimelle ei ole tilaa koska putkisto jo valmiiksi sijaitsee ylhäällä. Siksi se vaatisi liikaa putkistomuutoksia ja turhan linjan alas ja takaisin ylös, jotka nostavat painehäviötä ja siten energiakustannuksia. Siksi putkilinjaa jatketaan suoraan erikoishappotehtaalle. Koska putkistoa laajennetaan merkittävästi, nostaa se myös painehäviötä. Ilmapuhaltajien pumppu käy jo täysillä, joten pumppu pitää vaihtaa isompaan. Lisäksi erikoishappotehtaalla lämpö todennäköisesti tulee siirtää lämmönsiirtimen avulla. Vettä ei voi johtaa suoraan siihen varaajaan, jossa lämmitetään myös käyttövettä. Siksi veden lämpö on hyvä siirtää epäsuorasti lämmönsiirtimen avulla. Sekin nostaa kustannuksia.

#### 8.4 Veden jäähtyminen putkistossa

Alla on laskettu jäähtymä putkikoolla DN50. Laskussa käytetään sädettä, joten halkaisijat on jaettu kahdella. Sisähalkaisija on DN-standardin mukainen ja ulkohalkaisija on Brugg Peman ilmoittama. Lämpötilaero 32 °C saadaan, kun arvioidusta nesteen sisälämpötilasta 22 celsiusasteesta vähennetään -10 °C. Ulkolämpötila on tyypillinen ja yleinen talven lämpötila, johon lämmönsiirron pitää pystyä vastaamaan. Kaikista kylmimmät lämpötilat on hyvä rajata pois, koska niitä on Harjavallan seudulla melko harvoin. Putkiston pituus on mitattu: 30 + 28 + 1 + 43 + 8 = 110 m yhteensä. 110 metriä kulkee siis ulkona. Lisäksi sisällä se kulkee muutamia metrejä.

Putkessa sisältävän lämpöhäviön voi laskea pelkän konduktanssin avulla, koska matka, 110 metriä on kuitenkin melko lyhyt. Se lasketaan seuraavasti kaavalla 16:

$$Q = \lambda L(T_{\text{sisä}} - T_{\text{ulko}}) \quad (16)$$

Jossa Q on lämpövirta

$\lambda$  = kaukolämpöputken konduktanssi W/mK. Sen on määritellyt kaukolämpöputken toimittaja

L = putken pituus

$T_{\text{sisä}}$  = putken sisäpuolinen lämpötila, eli käytännössä veden lämpötila

$T_{\text{ulko}}$  = putken ulkopuolinen lämpötila eli käytännössä ulkolämpötila

Yksiköksi tulee wattia.

Jäähtymä watteina on siis:

$$Q = 0,298 \frac{W}{mK} * 32 K * 110 m = 1049 W = 1,1 kW \quad (16)$$

Lämpöä siis häviää jonkin verran. Arvo on kuitenkin teoreettinen minimi, koska tuulinen sää lisää lämpöhäviötä, kuten myös korkea ilmankosteus. Ulkoilma ei olekaan optimaalinen sijoituspaikka kaukolämpöputkille, joten siksi ne pyritään

sijoittamaan maan alle, jossa lämpötila pysyy korkeammissa lukemissa talvella. Lämpötilan lasku voidaan laskea tutulla lämpövirran kaavalla 7. Arvio on, että massavirta suurin piirtein on 2 kg/s, kun se kokonaisuudessaan on pumppun tyyppikilven mukaan 10 l/s. Massavirta ei kuitenkaan vaikuta tulokseen, koska kaavan mukaan se supistuu pois.

$$Q = mc(T_{\text{lämmin}} - T_{\text{kylmä}}) \quad (7)$$

$$T_{\text{kylmä}} = Q - \frac{mcT_{\text{lämmin}}}{(mc)}$$

$$T_{\text{kylmä}} = 1049W - 2 \frac{kg}{s} * 4181,9 \frac{J}{kgK} * \frac{295K}{(2 \frac{kg}{s} * 4181,9 \frac{J}{kgK})} = 294,9 K$$

Lämpötila erikoishappotehtaalla on siis 21,9 °C. Kaukolämpöputkistossa vesi siis jäähtyy 0,1 °C, eli hyvin vähän eikä jäähtyminen ole ongelma.

### 8.5 Investoinnin kannattavuus

Laskennasta voidaan havaita, että lämpöhäviö erikoishappotehtaalle on varsin vähäistä, kun kaukolämpöputkilla on hyvät eristeet. Ongelmaksi muodostuu lähtötilanne alumiinisulfaattitehtaalla. Siellä kierrätetään melko viileää vettä, jonka alkulämpötila on maksimissaan vain 30 °C. Verkostossa jo kiertänyt ja ilmapuhaltajien läpi mennyt vesi on positiivissakin arvioissa vähän yli 20 °C. Mittauksista on taas havaittu, että erikoishappotehtaalla jopa lämmityksen paluuvesi on lämpimämpää kuin alumiinisulfaattitehaulta tullut menovesi. Erikoishappotehtaalla menovesi ilmapuhaltajille kauimmaiseen ilmapuhaltajaan on taas jopa 39,3 °C. Lattialämmityksen ja pattereiden vesi taas on vieläkin lämpimämpää, noin 47 °C. Alumiinisulfaatin lämpö siis viilentäisi vettä eikä lämmittäisi sitä. Alumiinisulfaattitehtaalla siis jouduttaisiin nostamaan veden lämpötilaa höyryllä eli käyttämään sähköä. Erikoishappotehtaan ilmavesilämpöpumput taas ovat huomattavasti energiatehokkaampia kuin höyrykehittimet. Siksi huomioiden investointikustannukset lämmön siirtäminen alumiinisulfaattitehaulta erikoishappotehtaalle ei kannata.

## 9 YHTEENVETO

Lämmönsiirto reaktiosta rakennuksen lämmitykseen sujuu varsin hyvin. Se voisi toimia vielä paremmin, jos natriumbisulfiitin laatu, valmistusprosessi ja minimilämpötila ei asettaisi rajoitteita suuremmalle lämmön siirrolle. Positiivista on, että varastosäiliöt sijaitsevat rakennuksen sisällä, joten lämpö ei mene täysin hukkaan eikä valmiin tuotteen lämmittämiseen tarvitse milloinkaan käyttää ulkoista energiaa.

Suurin osa lämmönsiirtimistä toimii niin kuin pitää ja ne on asennettu fiksusti. Ainoa, mitä kannattaa kehittää on ilmapuhaltajien lämmönsiirrin. Siihen suositellaan virtaussuunnan vaihto myötävirrasta vastavirtaan. Lisäksi se kannattaa puhdistaa mekaanisesti avaamalla lämmönsiirrin ja sen levyt.

Lämmitysveden pisimpään putkilinjaan lämmitysveden lämmönsiirtimestä kuumavesisäiliön lämmönsiirtimeen suositellaan putken eristämistä etenkin helposti asennettaville osuuksille. Sopiva eristepaksuus mineraalivillalle on 64 mm.

Raakaveden viemäriin suositellaan kahdesta kolmeen ilmapuhaltajaa otta-  
maan talteen ylimääräinen, noin 20–25 celsiusasteinen lämpö. Ilmapuhaltajien kannattaa olla hiukan tehokkaampia kuin olemassa olevat. Niistä huolimatta prosessia kannattaa ajaa hiljaa, kuten jo tehdäänkin. Hidas tuotantovauhti mahdollistaa raakaveden kierrättämisen ilman että pitää pumpata uutta, kylmää vettä joesta. Se nostaa lämpöhukkaa tarpeettoman korkeaksi ja laskee raakaveden hyödynnettävää lämpötilaa liian matalaksi. Siksi lujaa tuotantovauhtia kannattaa välttää, jos se on mahdollista.

Ilmapuhaltajien putkiston jatkamista erikoishappotehtaalle ei suositella, joutu-  
en hukkalämmön riittämättömyydestä ja sen liian alhaisesta lämpötilasta ver-  
rattuna erikoishappotehtaan vaatimaan lämpötilaan. Kaukolämpöputken jäähtymä sinänsä on vähäinen, mutta lähtötilanne on ongelma. Lisäksi

ilmavesilämpöpumppu täydennettynä sähkövastuksilla on lähes aina tehokkaampi lämmitysmuoto kuin höyrylämmitys.

## LÄHTEET

- Airtècnics. (2018). EC(sähkömuuntaja) ilmaverhot. <https://ilmaverho.com/teknologia/ec-sahkomuuntaja-ilmaverhot>
- Argonne national laboratory. (n.d). Active Thermochemical Tables. Haettu 31.1 osoitteesta [https://atct.anl.gov/Thermochemical%20Data/version%201.122x/species/?species\\_number=1185](https://atct.anl.gov/Thermochemical%20Data/version%201.122x/species/?species_number=1185)
- Bosch. (2019). UniversalTemp käyttöohje. Robert Bosch Power Tools GmbH
- Brugg Pema. (n.d). Flexstar-putkisto – joustava ja luotettava tähti lämmitysalan taivaalla. Haettu 27.2.2023 osoitteesta <https://www.bruggpipes.com/fi/flexstar/>
- Energiateollisuus ry. (2020). Kiinnivaahdotetut kaukolämpöjohdot, suositus L1 2020. [https://energia.fi/files/593/20200831\\_SuositusL1\\_Kiinnivaahdotetut\\_kaukolampojohdot\\_2020.pdf](https://energia.fi/files/593/20200831_SuositusL1_Kiinnivaahdotetut_kaukolampojohdot_2020.pdf)
- Fabricius, Liukkonen & Sundholm. (2010). Fysikaalisen kemian taulukoita. Otatieto
- Hawley Gessner G. (1977). The Condensed Chemical Dictionary Ninth Edition. Van Nostrand Reinhold Company
- Hänninen, H., Karppinen, M., Leskelä, M. & Pohjakallio, M. (2018). Tekniikan kemia. Edita
- Kalkku, I., Kalmi, H. & Korvenranta, J. (2005). Kide 3 Lukion kemia. Otava
- Isover Saint Gobain. (n.d). U Protect Pipe Section Alu 2. Haettu 6.3.2023 osoitteesta <https://tekniset.isover.fi/Tuotteet/u-protect-pipe-section-alu2#descriptions>
- Juuti P. & Kakko T. (6.3.2023). Helsinkiläinen taloyhtiö pumppaa nyt lämpöä ilmasta kun maahan ei saanut porata – tällainen vaihtoehto on ilmavesilämpöpumppu. Yle. <https://yle.fi/a/74-20020100>
- Maa- ja kotitalousnaiset ry. (n.d). Vesistötilan arviointi. Haettu 10.2.2023 osoitteesta [11\\_vesistontilan\\_arviointi.pdf \(maajakotitalousnaiset.fi\)](11_vesistontilan_arviointi.pdf)
- Motiva. (2017). Energiatehokas lämmönsiirto. [https://www.motiva.fi/yriytykset/ohjeita\\_ ja\\_vinkkejä\\_tehokkaaseen\\_energian\\_ ja\\_materiaalien\\_kayttoon/lammonsiirto](https://www.motiva.fi/yriytykset/ohjeita_ja_vinkkejä_tehokkaaseen_energian_ ja_materiaalien_kayttoon/lammonsiirto)
- Motiva. (2021). Biopolttoaineiden lämpöarvoja. [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/bioenergia/tietolahteita/biopolttoaineiden\\_lampoarvoja](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/bioenergia/tietolahteita/biopolttoaineiden_lampoarvoja)

National Library of Medicine. (n.d). PubChem Sodium Bisulfite. Haettu 9.1.2023 osoitteesta <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/23665763#section=DSSTox-Substance-ID>

Purkukolmio. (n.d). Levyvaihtimen levy [valokuva]. Haettu 7.3.2023 osoitteesta <https://www.purkukolmio.fi/tuote/levynvaihtimen-levyja>

Process Heating. (n.d). Maintaining a plate heat exchanger [valokuva]. Haettu 7.3.2023 osoitteesta <https://www.process-heating.com/articles/86243-maintaining-a-plate-heat-exchanger>

Ruokavirasto. (n.d). E222 Natriumvetysulfiitti. Haettu 28.2.2023 osoitteesta <https://www.ruokavirasto.fi/elintarvikkeet/ohjeita-kuluttajille/e-koodit-lisaaineet/e-koodit/e2222/>

Savree. (4.5.2019). How to plate heat exchanger (PHE) works [video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=7TTF4aU3Pcs>

Sawo Heat. (n.d). Mitä COP- ja SCOP-arvot tarkoittavat. Haettu 27.2.2023 osoitteesta <https://sawoheat.fi/cop-ja-scop-arvot/>

Seppänen, R., Kervinen, M., Parkkila, I., Karkela, L. & Meriläinen, P. (2005). Maol Taulukot. Otava

Shah, Ramesh K. & Sekulic, Dusán P. (2003). Fundamentals of heat exchanger design. Wiley

Talja, M. (2019). Ilman käyttäytyminen vesijohtoverkostossa. [Diplomityö, Aalto-yliopisto] <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/37861>

Thermia. (n.d). Ilmavesilämpöpumppu. Haettu 27.2.2023 osoitteesta <https://www.thermia.fi/ilmavesilampopumppu/ilmavesilampopumppu/>

Vesi. (n.d). Sähkönjohtavuus. Haettu 31.1.2023 osoitteesta <https://www.vesi.fi/sanasto/sahkonjohtavuus/>