

# LÄMMÖNTALTEENOTTO LÄMPÖKÄSITTELYLAITOKSESSA

Stén & Co Oy Ab

Arash Muridiyazd

Opinnäytetyö  
Joulukuu 2014

Paperikoneteknologian koulutusohjelma  
Teknologiayksikkö





Tekijä(t) Muridiyazd, Arash	Julkaisun laji Opinnäytetyö	Päivämäärä 15.12.2014
	Sivumäärä 58	Julkaisun kieli Suomi
	Luottamuksellisuus ( ) saakka	Verkojulkaisulupa myönnetty ( )
Työn nimi Lämmöntalteenotto lämpökäsittelylaitoksessa		
Koulutusohjelma Paperikoneteknologian koulutusohjelma		
Työn ohjaaja(t) Isometsä, Juha		
Toimeksiantaja(t) Stén & Co Oy Ab Piensoho, Antti		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyö tehtiin Stén &amp; Co Oy Ab:lle, jonka päätoimiala on metalli- ja mineraalituotteiden tukkukauppa. Tavoitteena oli saada tietoon aiheen tärkeimmät aspektit, joista hukkalämmön määrän mittaaminen/arvio eri kohteista oli oleellinen tieto. Mittaaminen ei ole aina mahdollista, joten tätä asiaa piti laskennallisesti arvioida. Tällä tiedolla saatiin käsitys, mikä osuus esimerkiksi tuloilman lämmityksestä voidaan hoitaa hukkalämmöllä.</p> <p>Toimeksiantajalle oli tärkeää se, että millä tavalla tai tekniikalla energian kerääminen tapahtuu ja miten varastointi hoidetaan. Varastointi on tarpeellista, koska hukkalämmön syntyminen on epätasaista vuorokausitasolla. Energian talteenotosta tarvittiin suunnittelutyötä ja ratkaisu tilanteelle. Pyrkimyksenä oli konkreettinen lämmöntalteenotto, mikäli koko laitoksessa se ei onnistu, niin ainakin jonkun laitoksen kohteen osalta tämän olisi hyvä onnistua.</p> <p>Opinnäytetyötä lähdettiin toteuttamaan selvittämällä taustoja ja hankkimalla ensin mittausdataa, mikäli tietoa ei ollut saatavilla piti se laskea tai mitata käsin. Laitoksen tuotannon prosessin PI-kaavio oli myös tärkeässä roolissa, jotta sitä voitaisiin hyödyntää opinnäytetyötä tehtäessä, mutta valitettavasti se ei ollut ajan tasalla, joten tämä piti ottaa huomioon opinnäytetyötä tehtäessä.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Lämmöntalteenotto, hukkalämpö, lämmitys, mittaus, energia		
Muut tiedot Liite 1. Entalpialaskut, Liite 2. Yksikkömuunnokset ja ominaislämpökapasiteetilaskut, Liite 3. Vuodot/lämpöhäviöt, Liite 4. Energiatase, Liite 5. Ilmamittaukset, Liite 6. PI-kaavio		



Author(s) Muridiyazd, Arash	Type of publication Bachelor's Thesis	Date 15.12.2014
	Pages 58	Language Finnish
	Confidential ( ) Until	Permission for web publication ( )
Title Heat Recovery in a Heat Treatment Plant		
Degree Programme Degree Programme in Paper Machine Technology		
Tutor(s) Isometsä, Juha		
Assigned by Stén & Co Oy Ab Piensoho, Antti		
Abstract <p>The thesis was assigned by Stén &amp; Co Oy Ab whose main business is wholesale of metal and mineral products. The goal was to gather the most important aspects of the subject of which the measurement and assessment of waste heat in different objects was relevant. Measuring is not always possible so it needed to be computationally assessed. For example, this information gave an understanding of what proportion of the supply air heating can be derived from waste heat.</p> <p>For the client the manner which was used to collect the energy and how storage was managed was important. Storing was necessary since the emergence of waste heat was uneven on a daily basis. Energy recovery needed design work and there was a need for a solution in the situation. The aim was practical heat recovery and if it was not possible in the entire plant then at least in one of the parts of the plant it should be succeeded.</p> <p>The thesis was implemented by finding out the background information and acquiring first measurement data if the data was available and if not it had to be calculated or measured by hand. The plant's pipe and instrumentation diagram also had an important role but unfortunately it was not up-to-date which was taken into account as working with this thesis.</p>		
Keywords Heat recovery, waste heat, heating, measurement, energy		
Miscellaneous Appendix 1. Enthalpy calculations, Appendix 2. Unit conversions and specific heat capacity calculations, Appendix 3. Leakage/heat loss, Appendix 4. Energy balance, Appendix 5. Air measurements, Appendix 6. Pipe and instrumentation diagram		

# SISÄLTÖ

1 JOHDANTO.....	4
2 STÉN & CO OY AB .....	5
2.1 Historia.....	5
2.2 Taloustiedot.....	6
3 YLEISET TERMIT JA KÄSITTEET ENERGIA- JA LÄMPÖTEKNIKASSA.....	7
4 LÄMPÖKÄSITTELY .....	13
4.1 Menetelmät .....	14
4.1.1 Karkaisu.....	15
4.1.2 Hiiletyskarkaisu .....	15
4.1.3 Nitraus.....	16
4.1.4 Vakuumikäsitteilyt .....	17
4.1.5 Suojakaasukarkaisu.....	20
4.1.6 Suolakylpykarkaisu.....	21
4.2 Uunien tekniset tiedot ja käytettävissä olevat menetelmät.....	22
5 Lämmönvaihtimet .....	23
5.1 Lämmönvaihdintyyppit.....	24
5.1.1 Kaksoisputkilämmönvaihdin .....	25
5.1.2 Kompakti lämmönvaihdin.....	26
5.1.3 Putkilämmönvaihdin .....	27
5.1.4 Levylämmönvaihdin .....	28
5.2 Lämmönvaihtimen teoriaa .....	29
6 JÄÄHDYTYSTORNI .....	31
6.1 Kuvaus ja rakenne.....	32
6.2 Pääkomponenttien toiminta .....	34
6.3 Tekninen erittely ja mitoitus tiedot.....	37
7 MITTAUSSUUNITELMA .....	40
7.1 Yleistä.....	41
7.2 Turvallisuus .....	41
7.3 Mittaustyön kuvaus .....	42

7.4 Mittauspisteet ja vaiheet.....	43
7.5 Mittalaite .....	44
6.6 Mittaustulosten raportointi.....	44
9 TULOKSET .....	45
10 POHDINTA .....	46

## KUVIOT

KUVIO 1. Liikevaihto, tilikauden tulos sekä henkilöstön lukumäärä vuosilta 2008–2013 (Taloustiedot) .....	6
KUVIO 2. Liikevaihto pylväsdiagrammina vuosilta 2008–2013 (Taloustiedot) .....	6
KUVIO 3. Tilikauden tulos pylväsdiagrammina vuosilta 2008–2013 (Taloustiedot) .....	7
KUVIO 4. Henkilöstön lukumäärä pylväsdiagrammina vuosilta 2008–2013 (Taloustiedot) .....	7
KUVIO 5. Tuotantotiloissa käytössä olevat pesukoneet .....	14
KUVIO 6. Yksi Ipsenin Nitrausuuneista.....	17
KUVIO 7. Yllä olevan kuvan nitrausuunin kaasupaneeli.....	17
KUVIO 8. Ipsenin vakuumiuni.....	18
KUVIO 9. Toinen vakuumiuni eri kuvakulmasta.....	19
KUVIO 10. Keernoja, joissa on optimoitu jäähdytyskanavisto ja joiden liittäminen voidaan toteuttaa vakuumiliittämisellä (Sten: teräksellä tulokseen. Lämpökäsittelyt. 2006, 10.).....	20
KUVIO 11. Erillisessä huoneessa liittämisessä käytetty 30 kg vakuumiuni (Sten: teräksellä tulokseen. Lämpökäsittelyt. 2006, 10.) .....	20
KUVIO 12. Ipsenin suokajakaasu-uuni.....	21

KUVIO 13. Suolakylpykarkaisua hoidetaan tällä työpisteellä.....	21
KUVIO 14. Vasta- ja myötävirtaussuunnat (Nummila 2010, Monisteita.) .....	25
KUVIO 15. Kaksoisputkilämmönvaihtimen toimintaperiaate (Nummila 2010, Monisteita.) .....	26
KUVIO 16. Kompakti lämmönvaihtimen toimintaperiaate (Nummila 2010, Monisteita.) .....	27
KUVIO 17. Putkilämmönvaihtimen toimintaperiaate (Nummila 2010, Monisteita.) ..	28
KUVIO 18. Levylämmönvaihtimen toimintaperiaate (Nummila 2010, Monisteita.) ...	29
KUVIO 19. Seinän läpi johtuminen (Nummila 2010, Monisteita.) .....	30
KUVIO 20. Jäähdytystorni (Polacel b.v. 2004, 6.) .....	32
KUVIO 21. Karkaisimon jäähdytystorni .....	33
KUVIO 22. Mittalaite TSI Q-TRAK PLUS 8552/8554.....	44

## TAULUKOT

TAULUKKO 1. Muuramen karkaisimon palvelut sekä lämpökäsittelykapasiteetti. (Sten: teräksellä tulokseen. Teräsvarastoluettelo. 2014, 68) .....	22
--	----

# 1 JOHDANTO

Opinnäytetyö on tehty Stén & Co Oy Ab yritykselle, jolla on kaksi erillistä toimipistettä Suomessa, Nurmijärvellä sekä Muuramessa. Toimeksiannossa on keskitytty Muuramen lämpökäsittelylaitokseen. Tässä työssä on nimensä mukaisesti pyritty selvittämään lämpökäsittelylaitoksessa muodostuvan hukkalämmön talteenotto sekä sen hyödyntäminen ja täten syntyvät säästöt. Lähtökohtana oli selvittää syntyvän hukkalämmön määrä laitoksessa, joko mittaamalla se tai laskennallisesti arvioimalla, koska resurssien puitteissa mittaaminen ei ole aina mahdollista. Apuna ja esimerkkinä on käytetty Motivan tarjoamia eri energiakatselmusmalleja niin kiinteistöjen kuin teollisuuden tarpeisiin.

Kokonaisenergian määrän selvittyä saataisiin käsitys siitä, mikä osuus voitaisiin esimerkiksi tuloilman lämmityksessä hoitaa hukkalämmöllä.

Lämpökäsittelylaitoksessa on talvisin liian kylmä ja taas kesäisin liian kuuma, joten lämmöntalteenottoa voitaisiin muun muassa hyödyntää laitoksen konttorin sekä hallitilojen lämmityksessä. Energian kerääminen sekä talteenotto ja varastointi ovat keskeisiä asioita työssä, koska hukkalämmön syntyminen on epätasaista vuorokausitasolla.

Energian talteenotosta tarvittiin suunnittelutyötä ja mahdollisten investointien kustannukset sekä säästöt olisi ollut hyvä laskea, jotta saataisiin tietoon mahdollinen takaisinmaksuaika ja ratkaisu tilanteelle. Työtä lähdettiin tekemään tulkitsemalla lämpökäsittelylaitoksen prosessin PI-kaaviota, joka on keskeisessä osassa työtä tehtäessä. Tosin PI-kaavio ei ollut ajan tasalla ja siihen oli todellisuudessa tullut vuosien kuluessa muutoksia. PI-kaavion avulla lähdettiin tekemään "rautalankamallia" energiataasepiirroksen muodossa. Energiakartoitus sekä -taseen teko ovat työn keskiössä. Työn pyrkimyksenä oli päästä esisuunnitelma-asteelle, jolla voitaisiin antaa karkea ratkaisuehdotus.

## 2 STÉN & CO OY AB

Stén & Co Oy Ab on suomalainen perheyrittäjä, joka kauppa työkalu- ja erikoisteräksiä sekä tarjoaa terästen sahauspalveluja. Terästen lämpökäsittely kuuluu myös yrityksen kokonaisvaltaiseen osaamiseen. Yritys tarjoaa kaiken materiaalinvalinnasta lämpökäsittelyyn, valmiiseen työkaluun sekä komponenttiin saakka. Näiden palvelujen kohteena ovat pienyritykset sekä kansainväliset konsernit. Asiakaskunta koostuu lähinnä kotimaisesta metalli- ja konepajateollisuudesta. Teräspalvelukeskus, myynti ja hallinto sijaitsevat Nurmijärvellä Ilvesvuoren teollisuusalueella ja lämpökäsittelypalvelut Muuramessa. Yrityksen henkilöstöön kuuluu noin 40 teräsalan ammattilaista. (Teräksellä tulokseen jo vuodesta 1932.)

### 2.1 Historia

Yhtiö on ollut historiansa aikana täysin suomalaisessa omistuksessa ja sen taustalta löytyy usean sukupolven ajalta sepäntaitoja sekä miilunpolttoperinteitä. Yhtiön perustajalle diplomi-insinööri Artur Sténille tarjoutui tilaisuus 1930-luvun alussa aikaisempien suhteidensa avulla saada edustus itävaltalaiseen jaloterästehtaaseen Gebr. Böhler & Co AG:n, mikä on tätä nykyä maailman johtavia työkaluterästen valmistajia ja toimii Stén & Co:n tärkeimpänä materiaalitoimittajana. (Vahvat perinteet.)

Aluksi toimintaan kuuluivat erikoisterästen lisäksi työstökoneet, työkalut sekä hitsauslisäaineet, mutta 1980-luvulla toiminnassa alettiin keskittymään yhä enemmän työkaluteräksiin, erikoisteräksiin sekä sahauspalveluihin. Vuonna 1981 Muuramen karkaisimon toiminta aloitettiin, joten toimintaa laajennettiin ja vietiin yhä eteenpäin. Ennen 1980-lukua harvoilla oli Suomessa lämpökäsittelypalveluja käsissään, joten Stén & Co Oy Ab:ta voidaan pitää Suomen mittapuulla alan uranuurtajana ja se toi aikanaan vaihtoehtoja markkinoille. (Vahvat perinteet.)

Nykyisiin Nurmijärven tiloihin yhtiö muutti vuonna 2011. Yhtiön kasvustrategiana ja

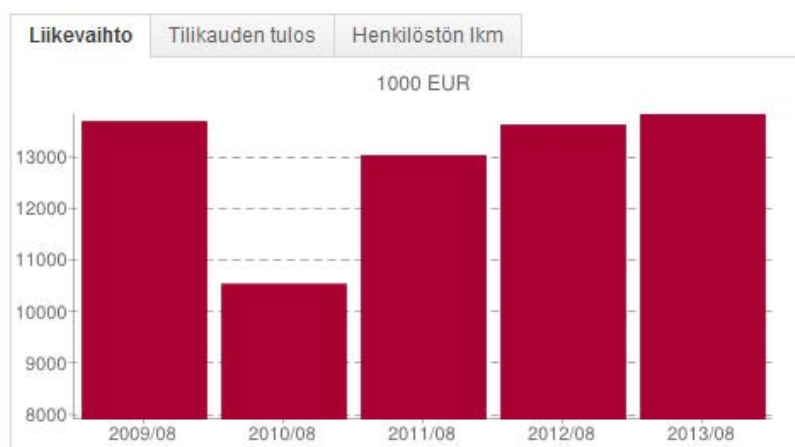


tavoitteena on olla Suomen nopein, kattavin sekä luotettavin teräksen toimittaja. Yhtiöllä on myös tytäryhtiö, Stén & Co OÜ, Virossa, missä se palvelee Baltian maissa sijaitsevia asiakkaitaan. Tytäryhtiö on toiminut 20 vuoden ajan Tallinnassa, mihin se on perustettu tukemaan Stén & Co Oy Ab:n tulevaisuuden visiota, joka on olla johtava työkaluteräksen toimittaja Suomenlahden alueella. Toisena tytäryhtiönä toimintaan kuuluu Kimet Oy, joka toimii ruostumattomien ja haponkestävien terästen maahantuonti- ja tukkuliikkeenä. Sen toimitilat sijaitsevat myöskin Nurmijärvellä Ilvesvuoren teollisuusalueella. (Vahvat perinteet.)

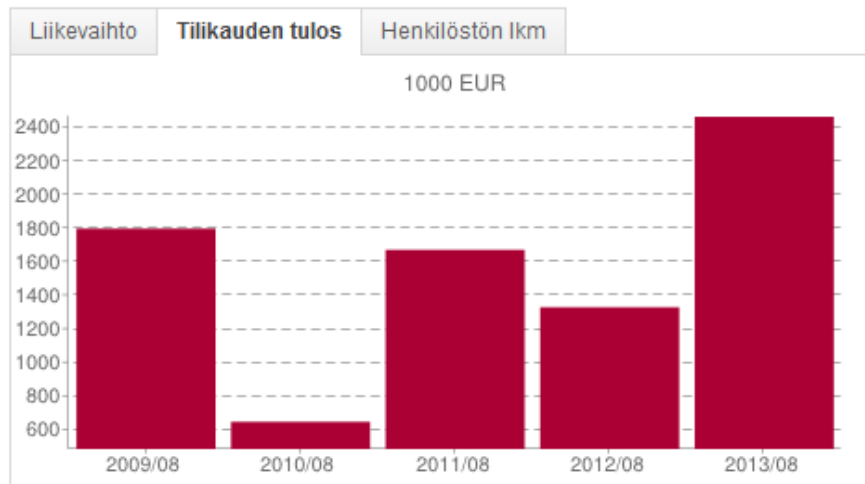
## 2.2 Taloustiedot

	2009/08	2010/08	2011/08	2012/08	2013/08
<b>Liikevaihto 1000 EUR</b>	13 711	10 557	13 049	13 644	13 846
<b>Liikevaihtomuut. %</b>	-25,10	-23,00	23,60	4,60	1,50
<b>Tilikauden tulos 1000 EUR</b>	1 800	650	1 674	1 332	2 466
<b>Liikevoitto %</b>	11,70	10,00	10,10	8,80	16,80
<b>Henkilöstön lukumäärä</b>	38	38	38	35	33

KUVIO 1. Liikevaihto, tilikauden tulos sekä henkilöstön lukumäärä vuosilta 2008–2013 (Taloustiedot)



KUVIO 2. Liikevaihto pylväsdiagrammina vuosilta 2008–2013 (Taloustiedot)



KUVIO 3. Tilikauden tulos pylväsdiagrammina vuosilta 2008–2013 (Taloustiedot)



KUVIO 4. Henkilöstön lukumäärä pylväsdiagrammina vuosilta 2008–2013 (Taloustiedot)

## 3 YLEISET TERMIT JA KÄSITTEET ENERGIA- JA LÄMPÖTEKNIKASSA

### Teollisuuden energiakatselmus

Yleisellä tasolla energiakatselmus on selvitys, missä kartoitetaan, analysoidaan ja raportoidaan kohteen ja sen tuotantoprosessin nykyinen energian ja veden käyttö

sekä niiden tehostamis-/kehityskohteet. Yleensä tavoitteena on vähentää kohteen energian- ja vedenkulutusta ja kustannuksia sekä pienentää energiankäytöstä ja tuotannosta aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä. (Mustasilta, H., Air-ix Talotekniikka, Hietaniemi, J., Husu, T., Koski, P. & Suomi, U., Motiva Oy 2004, 11.)

Teollisuuden energiakatselmuksen tavoitteena on tutkia ja raportoida kaikkien prosesseja palvelevien käyttöhyödykkeiden ja talotekniikan sekä rakenteiden energiansäästömahdollisuudet säästövaikutuksineen sekä takaisinmaksuaikoinen. Keskimääräinen takaisinmaksuaika on kaksi vuotta. (Motiva Oy 2009, 3.)

### **Teollisuuden energia-analyysi**

Teollisuuden energia-analyysissä tutkitaan katselmuksen kaikki primääri- ja sekundäärienergiavirrat sekä energiansäästömahdollisuudet. Kohteen omien tuotanto- ja kunnossapito-organisaatioiden osallistuminen katselmustyöhön on yleensä todella tärkeää, koska energia-analyysissä on tuotantoprosesseilla keskeinen osuus. Teollisuuden energia-analyysissä käsitellään kohteen energian ja veden käytön nykytilanne, kuvataan prosessien ja tehdaspalvelu- sekä taloteknisten järjestelmien energiatehokkuus, toiminta ja käyttö sekä pyritään esittämään säästötoimenpiteet säästövaikutuksineen ja takaisinmaksuaikoinen. Keskimääräinen takaisinmaksuaika on kaksi vuotta. (Motiva Oy 2009, 3.)

### **Prosessiteollisuuden energia-analyysi**

Prosessiteollisuuden energia-analyysi on kaksivaiheinen analyysi, joka on sovellettu teollisuuden energia-analyysistä. Vaihe yksi (tehdaskatselmus), jonka tavoitteena on selvittää energian kokonaiskäyttö ja sen jakauma sekä raportoida säästömahdollisuudet. Työssä raportoidaan todetut mahdolliset tarpeet täydentäville analyyseille. Vaihe kaksi koostuu vaiheessa yksi käynnistyneistä ja muodostuneista täydentävistä analyyseistä. (Motiva Oy 2009, 3-4.)

## **Katselmuksmallit**

Energiakatselmuksmalleja on kehitetty palvelu-, teollisuus- ja energia-alan kohteiden katselmuksintiin. Energiakäytöltään ja elinkaaren vaiheeltaan erilaisille kohteille on kehitetty räätälöityjä energiakatselmuksmalleja tarpeen mukaan. Katselmuksmalleja ovat kiinteistön energiakatselmuks, kiinteistön energiakatsastus, kiinteistön seuranta katselmuks ja kiinteistön käyttöönotto katselmuks. Seuraavassa on esitetty lyhyt kuvaus palvelusektorin katselmuksmalleista. (Mustasilta ym. 2004, 11.)

### **Kiinteistön energiakatselmuks**

Kiinteistön energiakatselmuksmallia voidaan myös soveltaa teollisuudessa ja energia-alalla silloin, kun tarkastellaan ei-tuotannollisia rakennuksia, kuten esimerkiksi toimisto- tai varistorakennuksia. Kartoitetaan LVIS-järjestelmien ja rakenteiden energiansäästömahdollisuudet. Kiinteistön energiakatselmuks on jaettu kahteen luokkaan:

- luokka 1, joissa on tavanomainen LVIS-tekniikka, kuten esimerkiksi toimisto-, virasto-, hallinto-, koulu- tai liikerakennukset
- luokka 2, vaativalla LVIS-tekniikalla varustetut rakennukset, kuten sairaalat, uimahallit, kylpylät ja suuret liikekeskukset.

(Mustasilta ym. 2004, 11.)

### **Kiinteistön energiakatsastus**

Teollisuuskohteissa määräytyy katselmukskohteen arvonlisäverottomien energian ja veden vuosikustannusten sekä tuotannon energiakäytön ominaispiirteiden perusteella. Mallia käytetään pienten palvelurakennusten energiakatselmuksena, jossa keskitytään kohteen säästömahdollisuuksien raportointiin. Mahdollisia katsastuskohteita ovat esimerkiksi huoltoasemat, päiväkodit, kyläkaupat ja varastohallit. (Mustasilta ym. 2004, 11.)

### **Kiinteistön seurantakatselmus**

Kiinteistön seurantakatselmus on päivitetty energiakatselmus aiemmin katselmoidun palvelusektorin kohteen energiakatselmuksesta. Energiatehokkuuden jatkuvaan ylläpitoon, parantamiseen ja kehittämiseen on kehitetty seurantakatselmusmalli, jolloin voidaan tarkistaa aiemmin toteutetussa energiakatselmuksessa ehdotettujen toimenpiteiden toteuttamistilanne, kohteen nykyinen energiatalous ja uudet tehostamismahdollisuudet. (Mustasilta ym. 2004, 12.)

### **Kiinteistön käyttöönottokatselmus**

Soveltuu uusien ja peruskorjattujen palvelukohteiden energiakatselmointiin, jolla varmistetaan rakennuksen energiataloudellinen käyttö käyttöjakson alussa. Mallia voidaan myös soveltaa teollisuuskohteissa. Mallissa analysoidaan energian ja veden käytön jakaumat, esitetään energiätehokkuutta parantavat toimenpiteet, varmistetaan taloteknisten järjestelmien energiataloudellinen käyttö ja oikea toiminta sekä hyvät sisäolosuhteet. Käyttöönottokatselmus tehdään rakennuksen vastaanoton jälkeen, jolloin energian käyttö on vakiintunut ja taloteknisistä järjestelmistä on käyttökokemuksia. Täten mahdolliset viat ja puutteet ovat havaittavissa. Takuuajana tehty katselmus oikeuttaa mahdollisiin takuun piiriin kuuluviin korjaustoimenpiteisiin. (Mustasilta ym. 2004, 12.)

### **Faasi**

Olomuotoaluetta eli eri kidelajeista koostuvaa rakennetta kutsutaan faasiksi. Esimerkiksi jos metalliseen seokseen on lisätty yhtä tai useampaa alkuainetta, jotka muodostavat yhdisteitä perusmateriaalin kanssa tai keskenään voidaan kutsua faaseista koostuvaksi rakenteeksi. Sama aine voi muodostaa myös oman faasinsa, kuten lasissa oleva vesi ja jääpalat. (Kivivuori & Härkönen 2004, 10.)

### **Austeniitti**

Austeniitilla tarkoitetaan teräksen rakenteen muuttumista lämpötilan kohotessa. Kyseessä on metallinen raudan ja seosaineen kiinteä liuos, jonka kiderakenne on

pintakeskinen kuutiollinen. Teräs on tässä vaiheessa melko lujaa ja ei magneettista. (Kivivuori & Härkönen 2004, 25.)

### **Perliitti**

Teräksen jäähtyessä sopivalla nopeudella rakenteeseen muodostuu ohuita vuorottelevia ferriitti- ja sementiittilamelleja (raudan ja hiilen yhdistettä, rautakarbida, kutsutaan sementiitiksi, joka on kova ja hauras faasi). Perliitti muodostuu austeniitin jäähtyessä lämpötila-alueella 500–727 °C ja se on ominaisuuksiltaan sitkeää ja kovaa. (Kivivuori & Härkönen 2004, 26–27.)

### **Martensiitti**

Teräksen lämpökäsittelyn nopeassa jäähtytyksessä muuttunutta kiderakennetta tetragoniseksi kutsutaan martensiitiksi ja tässä olomuodossa se on kovaa ja haurasta. Hiilipitoisuus on sama kuin austeniittisessä muodossa, josta se syntyy. Tähän reaktioon liittyy merkittävä tilavuuden kasvu. (Kivivuori & Härkönen 2004, 28.)

### **Ferriitti**

Ferriitti on hilamuodoltaan tilakeskinen kuutio. Tästä johtuen se pystyy ottamaan hilassaan oleviin koloihin hyvin vähän hiiltä. Ferriitti on mikrorakenteen faasi tai raudan ja rautavaltaisten metalliseosten kiderakenne. Ominaisuuksiltaan se on sitkeää, pehmeää (hyvin muovautuvaa) ja magneettista. (Kivivuori & Härkönen 2004, 14.)

### **Bainiitti**

Bainiitti on eräänlainen perliitti- ja martensiittireaktion välimuoto. Kyseessä on teräksen mikrorakenne, joka muodostuu lämpökäsittelyssä tai teräksen jäähtyessä esimerkiksi hitsaamisen yhteydessä. Bainiittinen rakenne muodostuu osittain diffuusion (molekyylien siirtyminen väkevämmästä laimeampaan) avulla ja osittain linsien leikkautumisella austeniitista. Ominaisuuksiltaan bainiitti on sitkeää ja lujaa.

(Kivivuori & Härkönen 2004, 31.)

### **Hiiletysaktiivisuus**

Kutsutaan myös hiilipotentialiksi, jolla tarkoitetaan sitä hiilipitoisuutta, millä seostamaton teräs on tasapainossa hiiltä luovuttavan väliaineen kanssa. Mitä korkeampi on hiilipotentiali, niin sitä korkeampi on myös pinnan hiilipitoisuus sekä -pitoisuus pintakerroksessa tietyllä etäisyydellä pinnasta. Pinnan hiilipitoisuus ei enää kasva tietyn ajan jälkeen vaikka hiiltä siirtyy edelleen matalahiilisempään sisustaan, joten hiilettyneen kerroksen syvyys kasvaa. (Kivivuori & Härkönen 2004, 141–142.)

### **Homogeeninen**

Yhtenäistä ja tasalaatuista seosta kutsutaan homogeeniseksi eli erotettavissa ei ole selkeää faasirajaa seoksen komponenttien välillä. Esimerkkeinä voidaan pitää puhdasta ilmaa ja lämpökäsittelyssä tasahehkutusta, jolla tasataan rakenteen jähmettyessä syntyneitä jännityksiä. (Kivivuori & Härkönen 2004, 234.)

### **Heterogeeninen**

Sekakoosteista ja epäyhtenäistä seosta kutsutaan heterogeeniseksi eli kyseessä on useamman kuin yhden faasin muodostama rakenne. Rakenteen muodostamat faasit voivat olla puhtaita metalleja, jähmeitä liuoksia tai yhdisteit. Esimerkkeinä voidaan pitää veden ja öljyn tai veden ja hiekan seosta. (Kivivuori & Härkönen 2004, 12.)

### **Kylläinen höyry**

Kaasuuntunutta vettä kiehumispisteen lämpötilassa kutsutaan kylläiseksi höyryksi. Lämpötilan laskiessa höyry alkaa välittömästi kondensoitua vedeksi. (Nummila 2010, Monisteita.)

### **Kosteaa höyryä**

Höyryn seassa kondensoituneita vesipisaroita kutsutaan kosteaksi höyryksi.  
(Nummila 2010, Monisteita.)

### **Tulistettu höyry**

Höyryn lämpötilan ollessa korkeampi kuin tilanteen painetta vastaava kylläisen höyryn lämpötila voidaan höyryä kutsua tulistetuksi. Höyryn täytyy tässä vaiheessa jäähtyä kylläisen höyryn lämpötilaan ennen kuin kondensoitumista alkaa tapahtumaan. (Nummila 2010, Monisteita.)

## **4 LÄMPÖKÄSITTELY**

Muuramen lämpökäsittelylaitos on erikoistunut työkalukarkaisuun, nitraukseen, hiiletyskarkaisuun sekä vakuuillämpökäsittelyihin. Näihin menetelmiin on perehdytty hieman syvemmin. Miksi ja mihin lämpökäsittelyä edes tarvitaan? Alla on listattuna muutamia syitä minkä takia eri metalleille tehdään lämpökäsittelytoimenpiteitä:

- ei-toivottujen mikrorakenteiden poisto
- toivotun rakenteen saavuttaminen
- rakenteen homogenisoituminen
- lämpökäsittelyssä aineen ominaisuudet (yleensä) paranevat
- vaaditut standardin mukaiset materiaalien ominaisuuksien täyttyminen
- asiakkaan vaatimukset.



## 4.1 Menetelmät

Muuramen karkaisimo on erikoistunut työkalukarkaisuun, nitraukseen, hiiletyskarkaisuun sekä vakuuillämpökäsittelyihin. Työstettävien kappaleiden puhtaus on tärkeä lämpökäsittelyssä, jotta saadaan haluttu pinnanlaatu jatkokäsittelyjä varten. Kappaleet pestään ja kuivataan ennen lämpökäsittelyä. Itse pesukone on kaksikammioinen. Ensimmäisessä kammiossa tapahtuu itse pesu alkalisen pesuaineen ja veden seoksella. Puhdistusta tehostetaan korkeapaineruiskulla. Kappaleet huuhdellaan pesun jälkeen, jottei niihin muodostu suolatahroja. Huuhtelun jälkeen kappaleet siirretään toiseen kammioon kuivausta varten, jossa kuivaus tapahtuu kuumalla ilmalla. Kuivauksen jälkeen kappaleet ovat valmiita panostettavaksi lämpökäsittelyä varten. Pesukoneissa on käytössä vesipohjaisia kemikaaleja.



KUVIO 5. Tuotantotiloissa käytössä olevat pesukoneet

### 4.1.1 Karkaisu

Karkaisu on tunnetuin ja tyypillisin lämpökäsittelymenetelmä teräkselle. Työkaluteräksiä käytetään tuotteisiin, joilta vaaditaan korkeaa kulumiskestävyyttä, kovuutta tai kuumalujuutta ja niitä käytetään lastuavaan ja muovaavaan työstöön. Tarkoituksena on muuttaa pehmeänä muokatun kappaleen rakenne kovaksi ja sitkeäksi. Kappale kuumennetaan austeniittialueelle hehkuttamalla aina noin 1000 °C, jonka jälkeen työstettävää kappaletta pidetään hetken aikaa kyseisessä lämpötilassa. Teräs jäähdytetään sammuttamalla teräs nopeasti kastamalla se esimerkiksi veteen, öljyyn, suola- tai polymeeriseokseen. Jäähdytysnopeudesta riippuu, miten suuri osa austeniitista muodostuu martensiitiksi. Jäähdytyksen ollessa riittävän nopea, ferriittiä, perliittiä ja bainiittia ei ehdi muodostua. Martensiittinen teräs on melko haurasta, joten sammutuksen jälkeen tehdään yleensä päästö, joka omalta osaltaan vähentää karkaisujännityksiä ja ehkäisee martensiittisen teräksen haurautta. Terästä siis hehkutetaan matalassa lämpötilassa 150–300 °C tunti tai pitempään, jolloin osa sitkeydestä palautuu, mutta kovuus ei kuitenkaan laske merkittävästi. (Kivivuori & Härkönen 2004, 49–50.)

### 4.1.2 Hiiletyskarkaisu

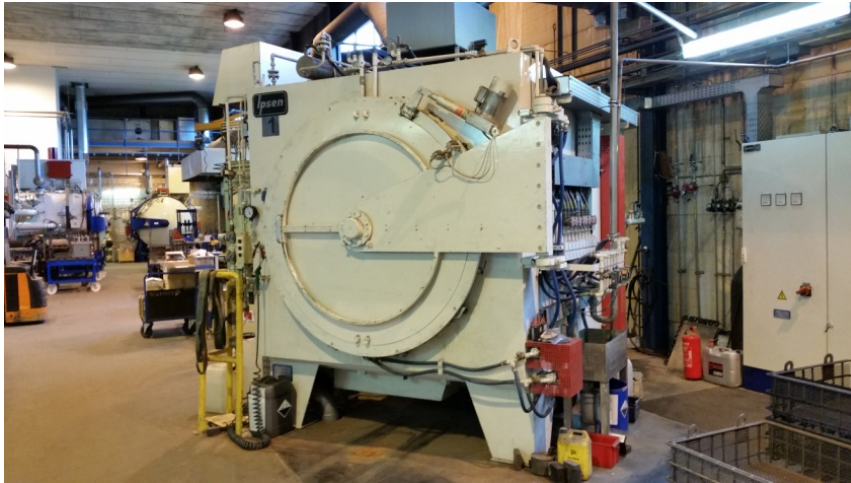
Hiiletyskarkaisun tarkoituksena on saada työstettävään kappaleeseen kova ja kulutusta kestävä pinta, kappaleen sisustan jäädessä lujaksi ja sitkeäksi. Pintaan pyritään saamaan puristusjännitystä, millä saavutetaan hyvä väsymiskestävyys sekä suuri kantokyky. Kappaleen pintakerroksen hiilipitoisuus kohotetaan hehkuttamalla austeniittialueelle hiiltä luovuttavassa väliaineessa, jolloin teräksen pintaan muodostuu 0,3–2,5 mm paksuinen runsashiillinen 0,6–1,0 % hiiltä sisältävä kerros. Siirtyvä hiilimäärä eli pintahiilipitoisuus ja sen jakautuminen aina pinnasta sisustaan riippuu hiiletysajasta, lämpötilasta sekä väliaineen hiiletysaktiivisuudesta. Hiiletysten jälkeisessä sammutuksessa tämä kerros muuttuu pääosin martensiittiseksi ja sisustan kovuus jää pienemmäksi. Pinta saadaan täten karkaisuun päättyvällä

lämpökäsittelyllä kovaksi. (Kivivuori & Härkönen 2004, 141.)

### 4.1.3 Nitraus

Nitraus eli tyypitys (pitkä nitraus) on prosessi, jossa teräs- tai valurautakappale kuumennetaan 480–540 °C (kappaleen seostuksesta riippuen) tyypeä luovuttavassa väliaineessa tarkoituksena lisätä pinnan tyypipitoisuutta. Nykyisin tyypeä luovuttava väliaine on kaasu, kuten esimerkiksi ammoniakkikaasu. Tätä perinteistä menetelmää kutsutaan kaasutypetykseksi. Työstettävä kappale siis kuumennetaan ammoniakkikaasussa ja jäähdytetään hitaasti huoneen lämpötilassa. Ammoniakin hajaantuessa typpi tunkeutuu teräksen pintaan lisäämällä ja parantamalla pinnan kovuutta, kulumiskestävyyttä sekä väsymislujuuutta. Muihin pintakarkaisumenetelmiin etuina voidaan pitää parempaa liukuominaisuutta, pienemmät mittamuutokset käsittelyssä, korroosiokestävyyden lisääntyminen sekä hyvä kuumankestävyys. (Kivivuori & Härkönen 2004, 162.)

Hiilitypetyksessä (lyhyt nitraus) käytettävä lämpötila kappaletta työstettäessä on hiukan korkeampi kuin kaasutypetyksessä, noin 580 °C. Käsittelyaika on täten kaasutypetystä pienempi, mutta samalla saadaan vastaava kerrospaksuus. Kappaleeseen syötetään typen lisäksi hiiltä, joten pintakovuus ei ole yhtä suuri kuin kaasutypetyksessä. Tämä menetelmä soveltuu parhaiten seostamattomien terästen pintakarkaisuun. (Kivivuori & Härkönen 2004, 162.)



KUVIO 6. Yksi Ipsenin Nitrausuuneista



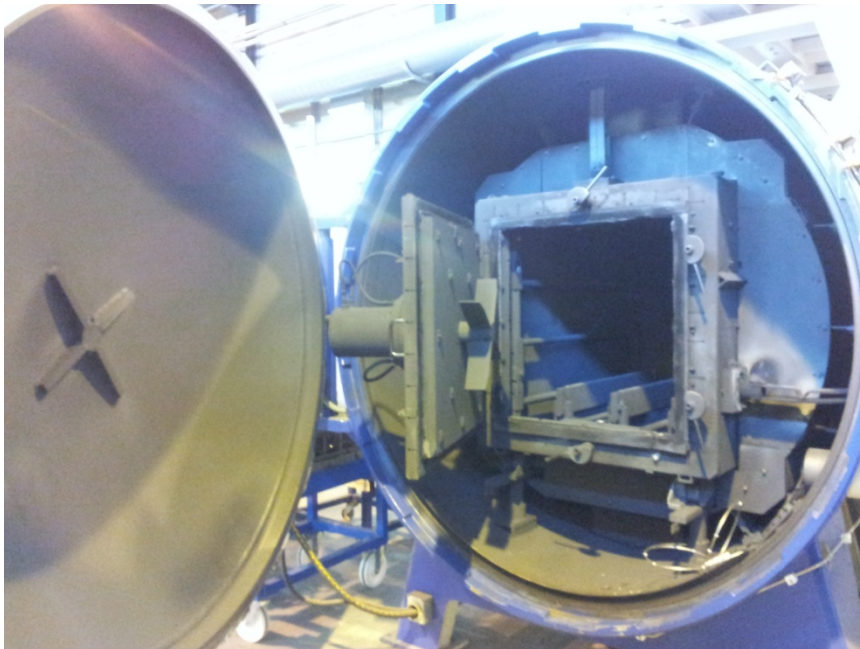
KUVIO 7. Yllä olevan kuvan nitrausuunin kaasupaneeli

#### 4.1.4 Vakuumikäsittelyt

**Vakuumikarkaisu** (alipainekäsittelyssä) työstettävä kappale kuumennetaan alipaineessa ja sammutetaan paineistetussa typpikaasussa. Tätä varten yrityksellä on käytössään vakuumiuuneja (kolme kappaletta), joissa lämpötilassa päästään aina 1300 °C. Typen suurin sammutuspaine on 10 baaria. Tällä menetelmällä kappaleiden pinnalla ei tapahdu hapettumista, hiilettymistä eikä hiilenkatoa. Menetelmää käytetään usein runsaasti seostettujen terästen erilaisiin hehkutuskäsittelyihin. Käsiteltävien kappaleiden pinta voidaan säilyttää todella puhtana alipaineen ja

lämpötilan tasosta riippuen, mikä edesauttaa jälkikäsittelyä kuten hiomista tai kiillotusta. Kappaleet panostetaan arinalle, joka siirretään kylmään uuniin. Uunista pumpataan ilma ulos ja syntynyt alipaine korvataan typpikaasulla. Tämän jälkeen uuni kuumennetaan konvektiokuumennuksella aina 800 °C, jonka jälkeen tehdään loppukuumennus imetyssä alipaineessa. Jäähdytys tapahtuu uunissa hallitulla jäähtymisellä tai typpikaasusammutuksella, joka on käsittelystä riippuen 1–10 baaria. Vakuumikarkaisulla saadaan todella tarkasti halutut kovuus-, lujuus- ja sitkeysarvot hallitun lämpökäsittelyprosessin avulla. (Kivivuori & Härkönen 2004, 178–179.)

Suurimpaan ja kapasiteetiltaan 800 kg:n vakuumiuuniin on integroitu pohjoismaiden ensimmäinen vakuumihiietyslaitteisto. Tämä mahdollistaa vaativien komponenttien laadukkaan hiietyskarkaisun. Merkittävänä etuina voidaan pitää käsiteltävien kohteiden pienet mittamuutokset, syvien reikien hiiettäminen onnistuu vaivattomasti sekä kappaleiden pinnanlaatu säilyy erinomaisena. (Sten: teräksellä tulokseen. Teräsvarastoluettelo. 2014, 68)



KUVIO 8. Ipsenin vakuumiuuni





KUVIO 9. Toinen vakuumiuni eri kuvakulmasta

**Vakuumiliittäminen** (tyhjöliittäminen) on menetelmä, jolla voidaan vapaasti muotoilla jäähdytyskanavisto yhdessä tai useammassa tasossa. Tällä tapaa saadaan muotit ja keernat jäähdytettyä tehokkaasti oikeaan paikkaan ja tätä kautta tuotannon tahtiajat ovat lyhyempiä. Tämä menetelmä soveltuu parhaiten ruisku- ja painevalumuottien sekä näissä käytettävien keernojen valmistukseen. Karkaisu voidaan tehdä samalla kertaa liittämisen kanssa. Menetelmä vaatii kappaleiden ja ympäristön puhtautta, joten sitä varten tuotantoiloissa on käytetty pieniä vakuumiunia, joka on sijoitettu erilliseen huoneeseen, jossa ilmanvaihto on tarkkaan säädettävissä. Nykyään tätä menetelmää ei tehdä enää Muuramen lämpökäsittelylaitoksella, se on ulkoistettu ja tilaukset tehdään Hollannissa. Syynä tähän on laitteiston vaurioituminen uunin palossa. Täten aikanaan on katsottu parhaaksi, ettei uunia korjata. Isompiin uuneihin on katsottu erityyppistä liittämistä, mutta vielä itse muottiliitääntä ei tehdä Muuramen karkaisimossa. (Kivivuori & Härkönen 2004, 179–180.)



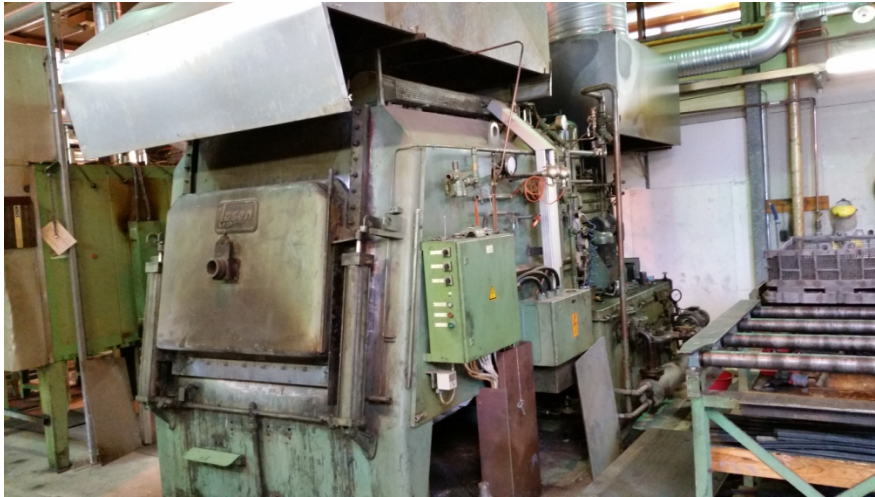
KUVIO 10. Keernoja, joissa on optimoitu jäähdytyskanavisto ja joiden liittäminen voidaan toteuttaa vakuumiliittämällä (Sten: teräksellä tulokseen. Lämpökäsittelyt. 2006, 10.)



KUVIO 11. Erillisessä huoneessa liittämisessä käytetty 30 kg vakuumiuuni (Sten: teräksellä tulokseen. Lämpökäsittelyt. 2006, 10.)

#### 4.1.5 Suojakaasukarkaisu

Suojakaasukarkaisussa työstettävä kappale kuumennetaan suojakaasussa ja sammutetaan öljyyn suojakaasussa. Kappale pestään sammutuksen jälkeen alkalisella pesuliuoksella. (Sten: teräksellä tulokseen. Lämpökäsittelyt. 2006, 11.)



KUVIO 12. Ipsenin suokajakaasu-uuni

#### 4.1.6 Suolakylpykarkaisu

Suolakylpykarkaisussa työstettävä kappale kuumennetaan sulassa suolakylvyssä austeniittilämpötilaan ja sammutetaan sulassa suolakylvyssä noin 200 °C:n lämpötilassa. Erilaisia suolakylpyjä ovat muun muassa alkalinitraatin ja -nitriitin seokset. Lämpötilat kulkevat eri kylvystä riippuen alueella 160–600 °C. Hyötyinä voidaan pitää kulumisenkestävyyttä, jota tarvitaan esimerkiksi hydraulisissa akseleissa, joita käytetään useissa eri käyttökohteissa eri teollisuudenaloilla. (Kivivuori & Härkönen 2004, 55.)



KUVIO 13. Suolakylpykarkaisua hoidetaan tällä työpisteellä



## 4.2 Uunien tekniset tiedot ja käytettävissä olevat menetelmät

TAULUKKO 1. Muuramen karkaisimon palvelut sekä lämpökäsittelykapasiteetti.

(Sten: teräksellä tulokseen. Teräsvarastoluettelo. 2014, 68)

Menetelmä	T, maksimi [°C]	Panos, maksimi [kg]	Maksimimitat, l x k x p [mm]	Laitteisto
<b>Karkaisu ja päästö</b>				
Vakuumikarkaisu	1300	800 600	600 x 600 x 900 600 x 600 x 900	Ipsen
Suojakaasukarkaisu öljyyn	1000 1000	1000 600	680 x 860 x 1200 680 x 460 x 1200	Ipsen
Suolakylpykarkaisu	850	100	∅ 400 x 750	Sarlin
<b>Kaasunitraus/Typetyskäsittelyt</b>				
Kaasutypetys	570	2000	1100 x 1100 x 1500	Ipsen
Hiilitypetys	570	2000	1100 x 1100 x 1500	Ipsen
Mustanitraus	570	2000	1100 x 1100 x 1500	Ipsen
<b>Hiiletyskarkaisu</b>				
Kaasuhiiletys	1000 1000	1000 600	680 x 860 x 1200 680 x 460 x 1200	Ipsen
Vakuumihiiletys	1050	500	600 x 600 x 900	Ipsen

<b>Erikoiskarkaisut</b>				
Etappikarkaisu	850	100	Ø 400 x 750	Sarlin
Bainitointi	850	100	Ø 400 x 750	Sarlin
Erkautuskarkaisu	650	1000	1140 x 650 x 1600	Tempotec
<b>Päästöt ja hehkutukset</b>				
Kiertoilmapäästö	650	1000	1140 x 650 x 1600	Tempotec
Suojakaasupäästö	750	2000	1100 x 1100 x 1500	Ipsen
Jännitystenpoistohehkutus	750	1000	1500 x 800 x 1700	Tempotec
Pehmeäksihehkutus	750	1000	1500 x 800 x 1700	Tempotec
Normalisointi	1300	800	600 x 600 x 900	Ipsen

## 5 Lämmönvaihtimet

Lämmönvaihtimet ovat energiatekniikan komponentteja, joilla siirretään lämpöenergiaa väliaineesta toiseen. Lämpö siirtyy kolmella eri tavalla; säteilyllä kuten esimerkiksi nuotiosta kasvoihin tai auringosta maahan, johtumalla kuten esimerkiksi keittolevystä kattilan pohjalle tai lämpövirran johtuminen seinärakenteiden läpi sekä konvektiolla kuten esimerkiksi tuulesta iholle tai savukaasusta lämmönvaihtimen ripaan. Energia siirtyy lämpimästä kylmempään ja lämpötilaerot pyrkivät tasoittumaan. Itse lämmönvaihtimissa lämmön siirtyminen väliaineesta toiseen tapahtuu säteilyllä sekä johtumalla:

- kaasu → kaasu
- kaasu → neste
- neste → kaasu

- neste → neste
- kiintoaine → neste
- kiintoaine → kaasu
- kaasu/neste → kiintoaine.

Lämmönvaihdintyypeissä on useita eri vaihtoehtoja ja sen oikean valitseminen voi tuntua haastavalta. Lämmönvaihtimen mitoitusprosessin suunnittelussa ja valinnassa tulisi ottaa huomioon useampi asia kuten:

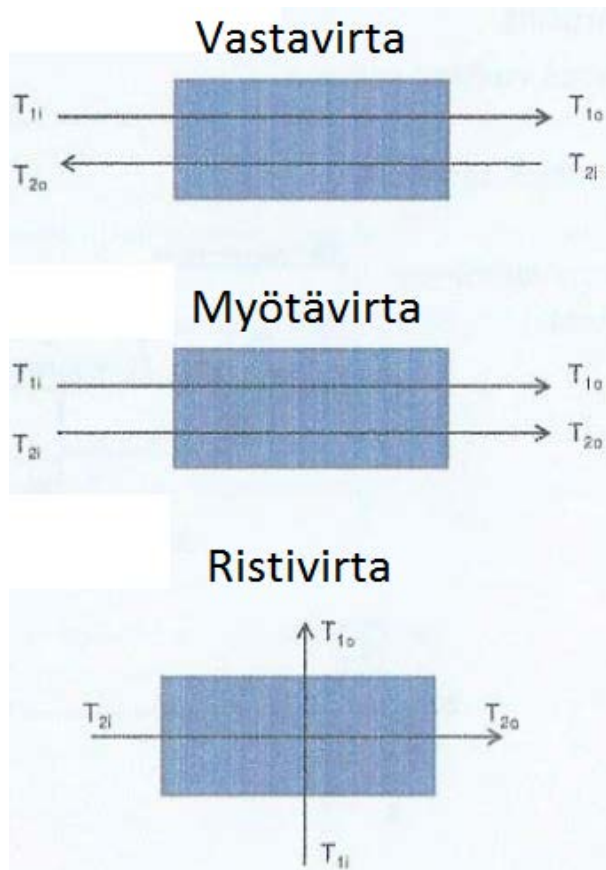
- lämmönsiirto
- pumppausteho
- materiaalit
- tiiveys ja turvallisuus
- likaantuminen ja säätövaran joustavuus
- painon ja koon rajoitukset
- käyttökustannukset ja valmistuskustannukset (kunnossapito ja energia)
- käyttöympäristön vaatimukset kuten mekaaniset ja termiset rasitukset.

(Nummila 2010, Monisteita.)

## 5.1 Lämmönvaihdintyytit

Erinäiset sovellukset asettavat erilaisia vaatimuksia, lämmönvaihtimen valinnassa. Lämmönvaihtimet voidaan jakaa kolmeen eri kytkentäluokkaan virtaussuuntiansa perusteella. Näitä ovat vastavirta-, myötävirta- ja ristivirtakytkentä. Virtaukset ovat saman suuntaisia myötävirtalämmönvaihtimissa ja vastavirtalämmönvaihtimissa luovuttava ja vastaanottava virtaus ovat vastakkaisia. Ristivirtalämmönvaihtimissa virtaukset kulkevat toisiinsa nähden kohtisuorassa. Lämmönvaihtimen käyttöönotossa on hyvä huomioida muun muassa likaantuminen, säätövara, painon

ja koon rajoitukset, käyttökustannukset, valmistuskustannukset sekä ympäristön asettamat vaatimukset (mekaaniset ja termiset rasitukset). (Nummila 2010, Monisteita.)

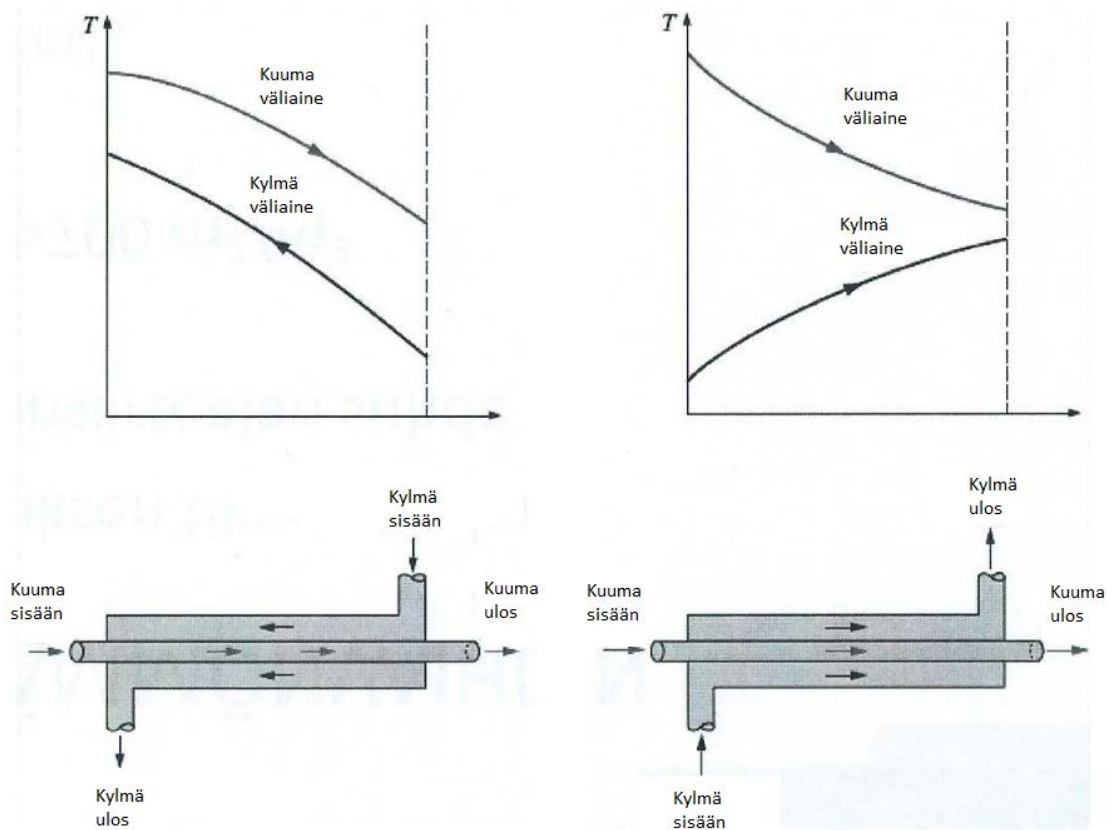


KUVIO 14. Vasta- ja myötävirtaussuunnat (Nummila 2010, Monisteita.)

### 5.1.1 Kaksoisputkilämmönvaihdin

Kaksoisputkilämmönvaihdin on yksinkertainen lämmönvaihdin. Se koostuu kahdesta sisäkkäin olevasta samankeskeisestä putkesta. Toisen väliaineen virtaus virtaa sisemmässä putkessa ja toinen sisä- ja ulkoputken välisessä tilassa.

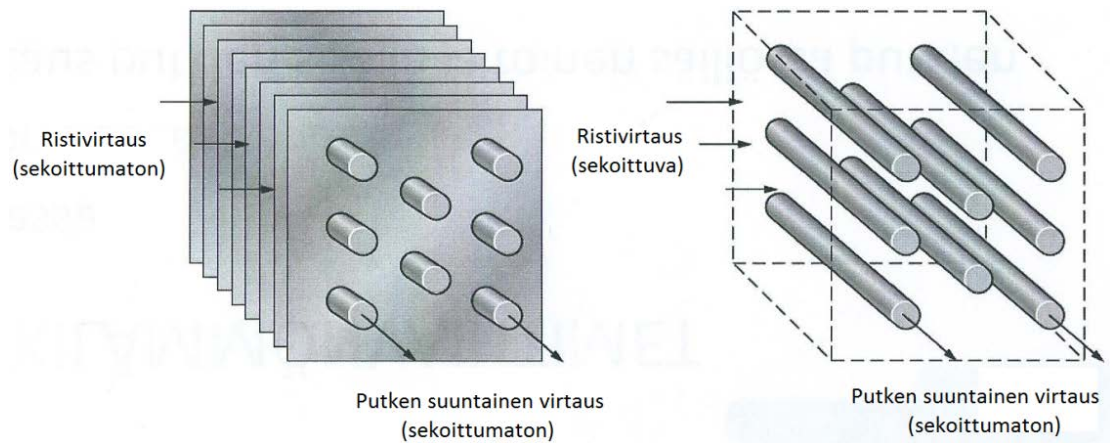
Kytöntaluokkansa ja virtaussuuntansa puolesta tämä tyyppi kuuluu myötä- ja vastavirtakytkentään. Etuna myös voidaan pitää vaivatonta puhdistettavuutta, sen yksinkertaisen rakenteen vuoksi. Tämän tyyppin lämmönvaihtimen pinta-ala asettaa kuitenkin rajoituksia. (Nummila 2010, Monisteita.)



KUVIO 15. Kaksoisputkilämmönvaihtimen toimintaperiaate (Nummila 2010, Monisteita.)

### 5.1.2 Kompakti lämmönvaihdin

Kompaktin lämmönvaihtimen hyviin ominaisuuksiin kuuluu suuri lämmönsiirtoala virtauksen tilavuutta kohti. Tätä lämmönvaihdintyyppiä käytetään yleensä kaasu → kaasu ja kaasu → neste tai neste → kaasu lämmönvaihtimissa. Tyypillisesti virtaussuuntana on ristivirtaus ja itse ristivirtaus voi olla sekoittumaton tai sekoittuva virtaus. (Nummila 2010, Monisteita.)



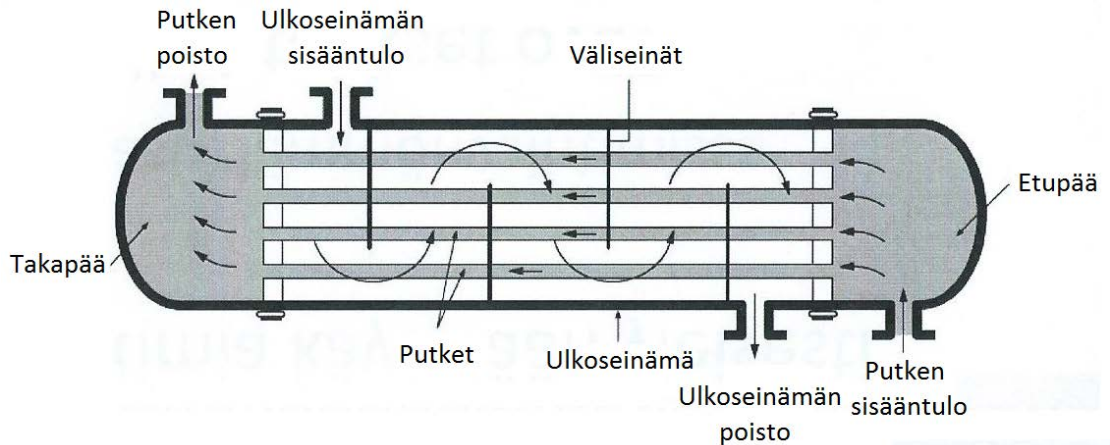
KUVIO 16. Kompakti lämmönvaihtimen toimintaperiaate (Nummila 2010, Monisteita.)

### 5.1.3 Putkilämmönvaihdin

Putkilämmönvaihtimet ovat yleisiä teollisuuden raskaissa prosesseissa kuten muun muassa petrokemiassa ja muussa kemianteollisuudessa sekä voimalaitosten turbiinin lauhduttimissa. Käyttö tapahtuu korkeissa lämpötiloissa ja korkeassa paineessa, kun kyseessä on lämpöenergian siirtyminen väliaineesta neste → neste tai neste → kaasu. Tällä lämmönvaihdintyyppillä on mahdollista myös käyttää likaavia ja kiintoainepitoisia väliaineita. Tehoonsa nähden putkilämmönvaihtimet ovat kalliita ratkaisuja. Niitä mitoitetaan ja valmistetaan tapauskohtaisesti prosessitarpeiden mukaan ja niissä on erikoismateriaalien käyttö mahdollista. (Nummila 2010, Monisteita.)

Tässä lämmönvaihdintyyppissä on putkipatteri säiliön sisällä, jossa ensimmäinen virtaus kulkee putkien sisällä ja toinen säiliössä putkien ulkopuolella. Putkessa on väliseiniä, jotka kääntävät virtausta lämmönsiirron tehostamiseksi. Esimerkiksi nesteen kohdalla energia kulkee suljetussa kierrossa olevan nesteen yhtäjaksoisella haihtumis- ja lauhtumisprosessilla. Putkeen tuleva lämpö haihduttaa nesteen ja siitä syntyvä höyry kulkeutuu putken kylmempään päähän, jossa se taas tiivistyy nesteeksi luovuttaen lämpöä seinämän läpi. Neste palaa näin ollen takaisin haihduttimelle ja

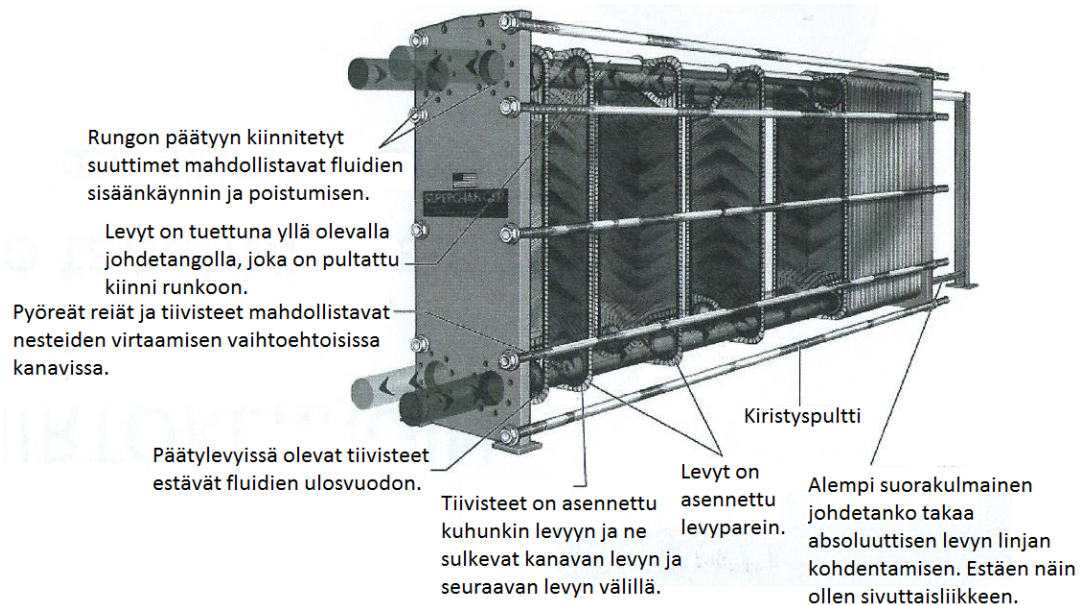
uusi kierto alkaa. Putkilämmönvaihtimia luokitellaan putkimutkien ja väliseinien mukaan. (Nummila 2010, Monisteita.)



KUVIO 17. Putkilämmönvaihtimen toimintaperiaate (Nummila 2010, Monisteita.)

#### 5.1.4 Levylämmönvaihdin

Levylämmönvaihdin koostuu vierekkäin rivissä olevista profiloituista levyistä, jotka on puristettu kehykseen ja ne muodostavat virtausurapaketin. Levyjen poimutus optimoi parhaan mahdollisen lämmönsiirron. Poimutus lisää lämmönvaihtoa varten pinta-alaa yli 10 % vastaavankokoiseen sileään levyyn verrattuna. Joka toisen levyparin välissä virtaa kylmä väliaine ja joka toisen kuuma väliaine. Kuuma väliaine luovuttaa kylmälle väliaineelle lämpöä levyn läpi. Levypareissa tapahtuva lämmönsiirto on kytköksissä levyjen geometriaan ja siihen miten virtaus käyttäytyy levyparien välissä. Lämmönvaihdossa osallisena olevat aineet virtaavat vuorosuuntaisesti virtausurien läpi. Levyn ja levyn reikien reunoja ympäröivät tiivisteet, jotka estävät sisäisen sekoittumisen ja ulosvuodon. Tämä lämmönsiirtotapa on yleinen neste → neste lämmönsiirrossa ja se on käytössä esimerkiksi meijereissä, jossa maito kulkee joka toisessa levyvälissä ja kuuma vesi joka toisessa välissä. Lämpö siirtyy johtumalla levyn läpi kuumasta vedestä kylmempään maitoon ja toisaalta jäähdytettäessä kuumasta maidosta kylmään veteen. (Nummila 2010, Monisteita.)



KUVIO 18. Levylämmönvaihtimen toimintaperiaate (Nummila 2010, Monisteita.)

## 5.2 Lämmönvaihtimen teoriaa

### Tehon mitoitus

$$\varphi_1 = q_{m1} \cdot c_{p1} \cdot (T_{1i} - T_{1o}) \quad \text{Ensiöpuoli}$$

$$\varphi_2 = \varphi_1$$

$$\varphi_2 = q_{m2} \cdot c_{p2} \cdot (T_{2o} - T_{2i}) \quad \text{Toisiopuoli}$$

,missä

$\varphi$  = lämpöteho [kW]

$q_m$  = massavirta [kg/s]

$c_p$  = ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]

$T_i$  = tulolämpötila [°C], [K]

$T_o$  = lähtölämpötila [°C], [K]



### Seinän läpi johtuminen

$$\varphi = \frac{k \cdot A}{s} \cdot (T_{s1} - T_{s2})$$

,missä

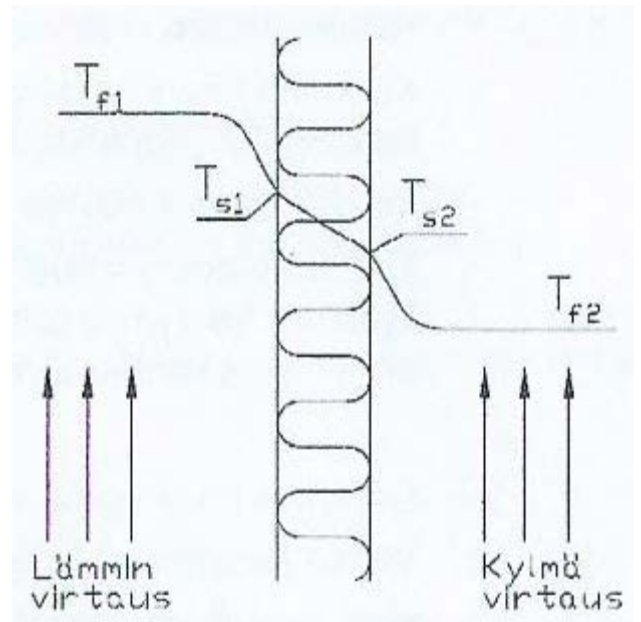
$\varphi$  = lämpöteho [kW]

$k$  = lämmönjohtavuus [W/mK]

$A$  = lämmönsiirtopinta – ala [m<sup>2</sup>]

$T_{s1}$  = pintalämpötila 1 [°C], [K]

$T_{s2}$  = pintalämpötila 2 [°C], [K]



KUVIO 19. Seinän läpi johtuminen (Nummila 2010, Monisteita.)

### Lämmönsiirtoteho

$$\varphi = U \cdot A \cdot \Delta T_{ln}$$

,missä

$\varphi$  = lämpöteho [kW]

$U$  = kokonaislämmönsiirtokerroin [W/m<sup>2</sup>K]

$A$  = lämmönsiirtopinta – ala [m<sup>2</sup>]

$\Delta T_{ln}$  = fluidien lämpötilaero [°C], [K]

Kokonaislämmönsiirtokerroimen,  $U$ , määrittäminen on erittäin työlästä. Se koostuu johtumisen, säteilyn ja konvektion lämmönsiirtokerroimista. Lämmönvaihtimen lämpötekninen mitoitus on toistuva prosessi ja yleensä sen tekee itse laitetoimittaja.

(Nummila 2010, Monisteita.)

## 6 JÄÄHDYTYSTORNI

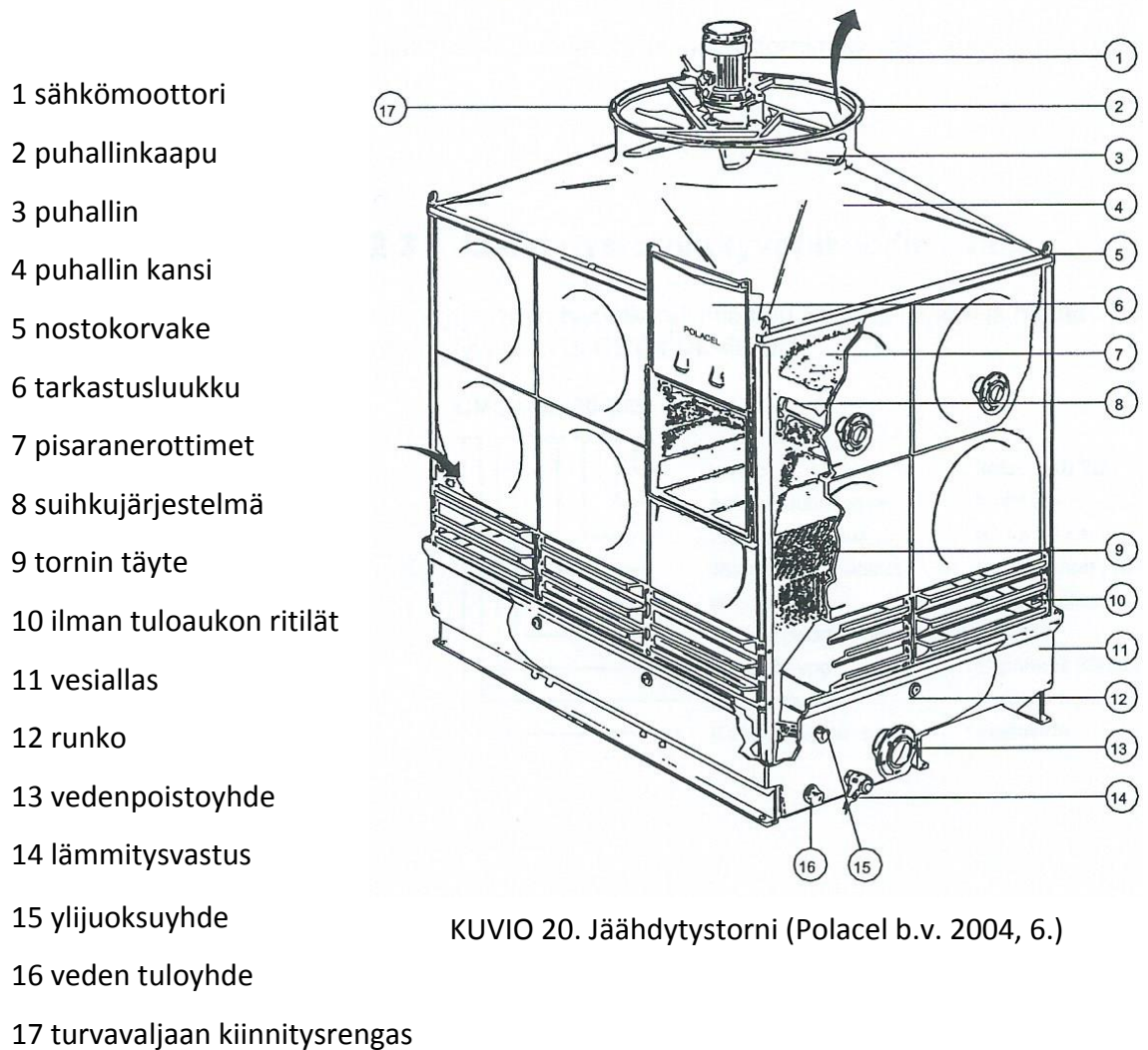
Jäähdytystorneja käytetään yleensäkin eri prosessien jäähdyttiminä ja voimalaitosten lauhduttimina. Toiminta perustuu veden haihtumiseen ja ilman kykyyn sitoa kosteutta, sillä haihtuessaan vesi sitoo runsaasti energiaa. Muuramen karkaisimon jäähdytystorni on suoraikäyttöinen eli aksiaalipuhallin on kiinnitetty suoraan sähkömoottoriin/alennusvaihteeseen. (Polacel b.v. 2004, 6.)

Suora jäähdytys, joka tarkoittaa sitä että jäähdytettävä vesi on suorassa kontaktissa ilman kanssa. Jäähdytystornissa on myös puhallin, joka laitetaan tarvittaessa erikseen päälle. Epäsuorassa jäähdytyksessä jäähdytystornin väliaine kulkee putkissa, joiden ulkopintaa huuhdotaan vedellä, joka haihtuu. Suomessa suurimpina ongelmina ja haittoina voidaan pitää jäätymistä ja suorissa jäähdytyksissä veden likaantumista muun muassa siitepölystä. Etuina taas voidaan pitää sitä, että jäähdytystornit ovat erittäin tehokkaita ja edullisia tehoonsa nähden. (Nummila 2010, Monisteita.)

Mahdollisten vaarojen kannalta on otettava huomioon, että jäähdytystornit on tehty nimensä mukaisesti jäähdyttämään kuumaa vettä, joten koskaan ei saisi koskea putkia varomattomasti ja itse jäähdytystornissa oleva vesi voi olla myös kuumaa. Jäähdytystornissa on sähkökäyttöisiä komponentteja, joten työskennellessä jäähdytystornin päällä tai sisällä on kytkettävä virta pois suojakytkimillä. Joskus veden käsittelyä varten on mahdollisesti lisätty biologisia tai kemiallisia lisäaineita veteen, joten on vältettävä suoraa iho- ja silmäkosketusta. Varsinkin talvisin kosteudesta johtuen jäähdytystornin ympäristö on jäätyneen takia liukas ja jääkappaleita saattaa pudota ilman sisääntulokaihtimista. Tämä on hyvä ottaa huomioon jäähdytystornin sijoituksessa. (Polacel b.v. 2004, 4–5.)

## 6.1 Kuvaus ja rakenne

Tässä kappaleessa on annettu tietoja jäädytystornin sisäpuolisista ja ulkopuolisista osista. Alla olevasta kuviosta voi nähdä jäädytystornin osat ja alla on myös listattuna osien nimet.



KUVIO 20. Jäädytystorni (Polacel b.v. 2004, 6.)

(Polacel b.v. 2004, 6.)

Käyttötavan lisäksi tornit jaetaan kolmeen eri rakenneversioon.

**Versio 1**

Jäähdytystorni ilman ilmansisääntuloa ja vesiallasta. Tässä versiossa oleva jäähdytystorni sijoitetaan olemassa olevan vesialtaan päälle, jonka ympärysmitta on suurempi kuin itse jäähdytystornin. Tällä tavalla ilmaa voidaan imeä jäähdytystorniin vesialtaan kautta.

**Versio 2**

Jäähdytystornissa on kaikki ilmantulot, mutta ei vesiallasta. Tässä versiossa jäähdytystorni sijoitetaan olemassa olevan vesialtaan päälle.

**Versio 3**

Jäähdytystornissa on ilmantulot, vesialtaat ja kuumagalvanoidut teräsrungot.

(Polacel b.v. 2004, 7.)



KUVIO 21. Karkaisimon jäähdytystorni

## 6.2 Pääkomponenttien toiminta

Jäähdytystornin komponentteja suunniteltaessa ja valmistettaessa on erityisesti kiinnitetty huomiota mekaaniseen lujuuteen sekä korroosio- ja kemialliseen kestävyYTEEN. Jäähdytysväliaineen kanssa kosketukseen joutuvien osien materiaalivalikoima on rajoitettu korkealaatuisiin muoveihin, lasikuituvahvisteisiin muoveihin ja ruostumattomaan teräkseen. Näiden takia jäähdytystornin kunnossapito on vähäistä.

### Panelointi

Panelointi koostuu lasikuituvahvistetuista muovipaneeleista ja ne on kiinnitettyinä ruostumattomaan teräsrunkoon ruostumattomilla pulteilla. Itse runko on kiinnitettyinä kuumagalvanoituun teräsrunkoon, joka on sijoitettu lasikuituvahvisteisesta muovista olevan vesialtaan alle tai se on asennettu ankkuripulteilla betonialtaaseen. Jäähdytystornin panelointi on varustettu tarkastusaukolla, jotta täyte ja suihkujärjestelmä voidaan tarvittaessa tarkastaa.

### Suihkujärjestelmä

Suihkujärjestelmän tehtävänä on varmistaa veden tasainen jakautuminen täytekennoston otsapinnalle. Se koostuu polypropeenista täyskartiosuihkuttimista.

### Pisaranerottimet

Pisaranerottimet ovat synteettistä materiaalia ja niillä on erittäin hyvä erotuskyky, joka rajoittaa vesipisarahävikin kahteen promilleen kiertoveden määrästä.

### Ilmantulosäleikkö

Ruostumattomaan teräsrunkoon on asennettu ilmantulosäleikkö, jotta sillä voitaisiin minimoida voimakkaiden tuulenpuuskien aiheuttamat roiskehäviöt. Talvella ilmantulosäleikölle muodostuu usein jäätä, sitä ei saa irrottaa iskemällä, koska se voi vaurioittaa säleikköä. Mikäli puhaltimet kytketään pois päältä, jää sulaa yleensä

melko nopeasti pois.

(Polacel b.v. 2004, 9.)

### **Puhallinyksikkö**

Puhallinyksikkö koostuu useista eri osista, joita ovat aerodynaaminen puhallinpesä, puhallin, lintuverkko ja diffuusori.

1. Aerodynaaminen puhallinpesä on erityisesti suunniteltu aksiaalipuhaltimen optimaalista käyttöä silmällä pitäen. Pesän muoto mahdollistaa ilmavirtauksen, jolla voidaan minimoida tarvittava puhallinteho ja täten myös puhaltimen mekaaniset rasitukset.
2. Aksiaalipuhallin on versiosta riippuen asennettu suoraan alennusvaihteeseen. Valittu yhdistelmä kierrosluvusta, puhallintyypistä ja siipikulmasta varmistaa sen, että ilmamäärä vastaa jäähdytystornin mitoitusta. Näiden asetusten muuttaminen vaikuttaa jäähdytystornin toimintaan ja voi johtaa tasapainohäiriöön ja nopeuttaa osien kulumista.
3. Lintuverkon tarkoituksena on suojata ihmisiä ja eläimiä pyörivältä puhaltimelta. Verkon saa irrottaa ainoastaan siinä tapauksessa, kun puhallin on pysäytetty ja sen suojakytin on lukittu auki. (optio, tätä ei ole karkaisimon jäähdytystornissa)
4. Diffuusori pitää poistoilmavirtauksen vakaana, alentaa tehontarvetta ja alentaa melutasoa. (optio)

(Polacel b.v. 2004, 9–10.)

### **Käyttö**

Puhallin on asennettuna suorakäyttöisissä jäähdytystorneissa suoraan sähkömoottoriin ja alennusvaihteeseen. (Polacel b.v. 2004, 10.)

## Jäähdytystornin täyte

Jäähdytystornin täyte on valmistettu profiloituista nauhoista, jotka auttavat vesikalvon muodostusta. Täytteen pinta on myös uritettu, jotta turbulenttinen ilmavirtaus menee täytteen sisään. Turbulenssi parantaa suoraa lämmönsiirtoa. Täytteen likaantumista pitäisi välttää, koska se vaikuttaa edelle mainittuun ominaisuuteen negatiivisesti, joten likaantuminen olisi hyvä estää ja ennaltaehkäistä. Veden ja jäähdytystornin täytteen kontaminaatioon vaikuttaa useita tekijöitä ja tärkeimpinä seikkoina voidaan pitää:

- veden suolapitoisuuden nousun johdosta muodostuu kalkkia
- mikrobiologinen aktiivisuus eli korkeiden lämpötilojen ja jatkuvan ilman syrjäytymisen/hapen lisäyksen takia jäähdytystorni on ihanteellinen alusta biologiselle toiminnalle ja leväkasvustolle
- prosessista tai ympäristöstä tulleet liukenemattomat ja kelluvat hiukkaset.

Vahvat kemikaalit voivat aiheuttaa tiedettävästi ympäristöhaittoja ja vahingoittaa laitoksen osia, joten tämän takia kemikaaleja on käytettävä suurta varovaisuutta noudattaen. Mahdollisia ja usein käytetyt ratkaisut ovat:

- kalsiumin muodostumisen ehkäiseminen orgaanisia fosforiyhdistelmiä käyttäen
- mikrobiologisen toiminnan estäminen kuten esimerkiksi desinfiointikemikaalien tai kloorin käyttö
- veden ja/tai ilman suodatus kelluvien hiukkasten erottamiseksi
- veden juoksutus eli osa vesikierrosta lasketaan viemäriin, mutta alkujaan on täytynyt huomioida se, että jäähdytystorniin ei ole erikseen vakiona asennettu juoksutusjärjestelmää
- kalsiumin muodostumista vastaan käytetään magneettista reduktiota
- biologista aktiivisuutta vastaan käytetään otsonin annostusta
- kaikkien yllä mainittujen järjestelmien yhdistelmä.

(Polacel b.v. 2004, 10–12.)

### **Vesiallas**

Lasikuituinen vesiallas kerää täytteestä tulevan veden. Vesiallas on varustettu veden poistoyhteellä, mikä on pumpun imupäässä. Se sisältää korisiivilän, jonka tarkoituksena on eristää imulinjan likaantuminen. Tämän lisäksi vesiallas on varustettu ylivuodolla ja uimuriventtiilillä varustetulla korvausvesiliitännällä. (Polacel b.v. 2004, 10.)

### **Tärykytkin**

Tämäkin on optiona jäähdytystorniin ja karkaisimon työntekijöillä itselläänkään ei ollut tarkempaa tietoa tämän toiminnasta ja siitä onko tämä toiminnassa. (Polacel b.v. 2004, 10.)

## **6.3 Tekninen erittely ja mitoitus tiedot**

Tyyppi: CMC4-DH-90-PS5/3

Jäähdytysperiaate: Vastavirta

Kennostomäärä: 1

Väri: Harmaa sinisellä vesikaukalolla

### **Mitoitustiedot**

Jäähdytysteho: 698 kW

Vesimäärä: 50 m<sup>3</sup>/h

Kuuman veden lämpötila: 39,0 °C

Kylmän veden lämpötila: 27,0 °C



Märkälämpötila: 20,0 °C

Maksimi veden lämpötila: 55,0 °C

Korkeammat lämpötilat ovat mahdollisia, mutta niissä tapauksissa pitää ottaa yhteyttä valmistajaan.

### **Tekniset tiedot erittelyineen**

Täytteen korkeus: 900 mm

Vaadittu suutinpaine: 13,6 kPa ja maksimi 49 kPa

Ilmamäärä per puhallin: 10,2 m<sup>3</sup>/s

Ulkoinen staattinen paine: 0,0 Pa

Puhallinmäärä: 1

Moottorien lukumäärä: 1

Asennettu moottoriteho: 4,0 kW ja yksi vaiheinen

Tehonkulutus: 3,4/0,5 kW

Moottorin kierrosluku: 1500/750 r/min

Puhaltimen kierrosluku: 584/288 r/min

Käytön tyyppi: Epäsuora vaihdemoottorilla

Syöttöjännite: 400 V - 3 Ph - 50 Hz

Moottorin suojausluokka: IP 65 F

Lämmitysvastuksen teho: Ei saatavilla

Lämmitysvastuksen syöttöjännite: Ei saatavilla

### **Mitat ja painot**

Pituus: 1760 mm

Leveys: 1760 mm

Korkeus: 3410 mm

Kuljetuspaino: 700 kg

Käyttöpaino: 1410 kg

### **Veden kulutus**

Keskimääräinen haihdutushävikki: 0,8 m<sup>3</sup>/h

Maksimi haihdutus, joka määrää korvausvesimitoituksen ja juoksutusmitoituksen voi olla 25 % suurempi.

Juoksutushävikki: Riippuu veden laadusta

### **Melutaso**

Jäähdytystornin kokonaismelu muodostuu äänilähteiden logaritmisesta summasta, joita ovat puhaltimen ulostulo ja ilman sisääntulo. Vesialtaaseen putoava vesi aiheuttaa ilman sisääntulomelun. Kyseistä melua voidaan vaimentaa käyttämällä Polacelin kehittämiä kelluvia äänenvaimentimia.

PWL – puhaltimen poistoyhde: 89,9 dB

PWL – ilman sisääntulo, ilman vaimentimia: 89,4 dB

PWL – jäähdytystorni yhteensä, ilman vaimentimia: 92,6 dB

PWL – ilman sisääntulo, vaimentimilla: 78,9 dB

PWL – jäähdytystorni yhteensä, vaimentimilla: 90,2 dB

### **Materiaalit**

Puhallinsiipien materiaali ja tyyppi: Alumiini ja 05 KLF 4

Puhaltimen tukirakenne: Kuumagalvanoitu teräs

Täyte ja tyyppi: PVC ja 12 mm

Täytteen tukiraudat: Ruostumaton teräs 304

Pisaranerotin: Vakio PVC

Pisaranerottimen tuet: Ruostumaton teräs 304

Runko: Ruostumaton teräs 304

Torni: Lasikuituvahvistettu polyesteri

Vesiallas: Lasikuituvahvistettu polyesteri

Vesialtaan alusta: Kuumagalvanoitu teräs

Tuloilmasäleikkö: Lasikuituvahvistettu polyesteri

Vedenjako ja suuttimet: PP

Lintuverkko: Ei saatavilla

**Jäähdytystorni täydellisenä, sisältäen:**

- kuumavesiyhteen DN100
- kylmävesiyhteen DN150 pystymallinen pyörteenesto
- viemäri/tyhjennys.

(GEA Process Engineering Oy. 2004, 2–3.)

## **7 MITTAUSSUUNITELMA**

Kyseinen suunnitelma on tehty ennen mittauksia, jotta keksitään keinot mittauksille sekä saadaan kokonaiskuva energiataseeseen siitä mitä mitataan ja minkä takia mitataan.

## 7.1 Yleistä

Energiatasetta varten mittaukset on suoritettava ilman osalta, koska niistä saatu data on ilmamääristä ja painesuhteista sekä virtausnopeuksista. Ilmasta on siis tehty aikanaan mittauksia, mutta niistä ei ole saatavilla lämpötiloja tai kosteuksia, joten mittaukset on tehtävä niiden osalta. Sähköstä on tiedossa se, että sitä kului vuonna 2013 aina 3075399 kWh. Vedestä löytyy ja on saatavilla Muuramen kunnan seurantaraportit vuosilta 2011–2013. Niissä on mainittuna talous-, prosessi- ja jäteveden määrät. Nämä vesimäärät on huomioitu vuodelta 2013 energiataseteseen ja kulutukset olivat talousvesi 468 m<sup>3</sup>, prosessivesi 1480 m<sup>3</sup> ja jätevesi 143 m<sup>3</sup>. Mittaukset suoritetaan siis tässä tapauksessa ainoastaan ilmasta. Ilman energiasisältö (määrä, kosteus ja lämpötila) on asia, joka on saatava tietoon.

Korvausilman ilmanvaihtokone toimii sähkövastuksella eli tuleva ilma lämmitetään sillä. Sain aivan työn viime hetkillä selville, että sen teho on 200 W ja ajatuksena oli myös arvioida kuinka kauan vuodesta se on päällä, jotta voitaisiin saada arvio lämmittimen vuoden sähkönkulutuksesta. Toimeksiantajan arvio oli, että se on vuodessa noin kolme kuukautta toiminnassa. Joten energia = teho x aika = 200 W x 2160 h = 432 kWh. Koska työ piti palauttaa, joten ajan puutteellisuuden takia en pystynyt enempää selvittämään tätä tekijää ja asiaa työssäni.

## 7.2 Turvallisuus

Huolehditaan, että kaikki tarvittavat dokumentit ovat mukana ja paikan päällä noudatetaan lämpökäsittelylaitoksen turvallisuusmääräyksiä. Varmistetaan alkuun ennen mittauksia, mikäli tarvitaan turvavarusteita kuten esimerkiksi turvakenkiä tai kypärää. Paikalla tulee olemaan paikallinen työntekijä, jonka opastuksella ja avustuksella mittaukset suoritetaan. Mittausten asentamisessa ja itse mittauksissa on hyvä kiinnittää huomio siihen onko mittauspaikan lähistöllä prosesseja käynnissä, koska esimerkiksi kuumat kohteet lähistöllä voivat olla riskitekijöitä. Kulkuväylät on

hyvä tarkistaa, jotta niissä voidaan liikkua vapaasti.

### 7.3 Mittaustyön kuvaus

Mittaus tapahtuu lämpökäsittelylaitoksessa paikantamalla tulo- sekä poistoilman putket. Mittaukset suoritetaan päivän ajalta kolmen kertaan, jolloin saadaan tarkempia arvoja ja keskiarvo saaduista mittauksista. Tämä osaltaan myös sen takia, koska itselläni ei ole omaa autoa käytössä, jolla päästä paikan päälle ja mittalaite ei voi olla pitkää aikaa minulla koululta lainassa. Itse mittaus tapahtuu laittamalla mittalaitteen putkimainen mittapää putkeen porattuun reikään. Päätämme toimeksiantajan kanssa yhteisymmärryksessä suotuisan ajankohdan mittauksille, jotta kaikki tarvittavat valmistelut ovat kunnossa.

Yleensä ilmajvirtojen mittausten suunnittelun edellytyksinä pidetään huomioitavana mittauspaikkoja sekä mittausmenetelmiä. Mittauskohteen rakennuksen on oltava valmis ja sen on oltava käyttöä vastaavissa olosuhteissa. Kanaviston tiiviysmittausten tulisi olla suoritettuna, mutta tässä mittauksessa emme tule tarkastelemaan kaikkia mahdollisia muuttujia. Mitattaessa on muistettava kirjata ylös mittaustulokset ja -olosuhteet sekä käytetyt mittausmenetelmät ja -laitteet. Itse mittauksia tehtäessä olisi hyvä, että käytettävissä on hyvät ja kalibroidut mittalaitteet. (Halminen, Kuvaja & Köttö 1994, 106.)

Kun halutaan tarkastella monia mahdollisia muuttujia, niin mittauksissa on hyvä ottaa huomioon ilmajvirtoihin vaikuttavat tekijät. Näitä ovat:

- asetusmenetelmän tarkkuus (laitteiden tarkkuus ja lukematarkkuus)  $\pm 8...15$  %
- asetuspoikkeama  $\pm 5...15$  %

- säättekijät (tuuli, lämpötila ja ilmanpaine sekä kosteus)  $\pm 5...15 \%$
- rakennus ja sen käyttö (ovet, ikkunat ja vuotoilmareitit)  $\pm 5...15 \%$
- laitoksen säätö ja ohjaus (puhaltimet ja säätöpellit)  $\pm 5...15 \%$
- laitoksen likaantuminen (kanavisto, pääte-elimet, patterit ja suodattimet) -  
10...-40 %
- muita huomioon otettavia tekijöitä ovat laitoksen vuodot, jäätyminen, lumi,  
vesi sekä suunnitellut ja hallitsemattomat laitoksen muutostyöt.

(Halminen, Kuvaja & Köttö 1994, 108.)

## 7.4 Mittauspisteet ja vaiheet

Mittauspisteeksi määritetään kelvollinen mittauspaikka tuloilmasta ja poistoilmasta, jossa mittauspaikan edessä ja takana on riittävästi suoraa kanavaa. Mikäli tämä ei ole mahdollista, niin yleensä joudutaan tyytymään menetelmävirheeseen 5-10 %.

Mittalaitteella ei pysty määrittämään virtausnopeuksia, mutta aikaisemmillä kerroilla kun mittauksia on suoritettu, niin kolmeen eri tuloilman putkeen on merkattuna virtausnopeudet jokaisesta kolmesta eri putkesta. Mittari antaa tiedon myös haluamastamme kosteudesta sekä lämpötilasta. Tarvittaessa voidaan laskea tilavuusvirta alla olevalla kaavalla.

$$q_v = k \cdot v_k \cdot A$$

$$q_v = \text{tilavuusvirta [m}^3/\text{s]}, \text{ usein myös [l/s]}$$

$k$  = menetelmäkerroin

$v_k$  = ilmavirran keskinopeus

$A$  = kanavan poikkipinta – ala

Mikäli tilavuusvirta halutaan saada tietoon, niin lopussa otetaan huomioon mahdolliset virhelähteet eli mittauksessa tapahtuva kokonaisvirhe ja ilmoitetaan niiden avulla tilavuusvirta. (Halminen, Kuvaja & Köttö 1994, 115–117.)

## 7.5 Mittalaite

Mittaukset suoritetaan lainaamalla Jyväskylän ammattikorkeakoulun ilmamittauksiin soveltuvaa, TSI Q-TRAK PLUS 8552/8554, mittalaitetta. Mittalaite täyttää vaadittavat standardit ja vaatimukset. Mittalaite mittaa ilmassa olevat arvot lämpötilalle (°C), hiilidioksidille (CO<sub>2</sub> [PPM = parts per million]), hiilimonoksidille (CO [PPM]) sekä suhteelliselle kosteudelle (RH [%]).



KUVIO 22. Mittalaite TSI Q-TRAK PLUS 8552/8554

## 6.6 Mittaustulosten raportointi

Mittaukset onnistuivat ilman suurempia ongelmia ja niistä saadut arvot ovat listattuna liitteessä 5. Tuloilman putki haarautui kolmeen eri putkeen, joista kaikista on mitattu erikseen arvot, mutta laskuissa tämä on huomioitu yhtenä virtauksena. Poistoilman mittauksessa oli sen verran haasteita, että siihen putkeen ei voitu toimeksiantajan puolesta porata reikää, joten sen osalta mittaukset on tehty

poistosäleikön kautta. Mittasin varmuuden vuoksi sisäilman (toimisto- ja tuotantotilat erikseen) sekä ulkoilman arvot, mikäli näistä olisi tarvetta ja apua jatkossa.

Saaduista mittaustuloksista on laskettuna virtauksille kostean ilman entalpia, mikä kertoo omalta osaltaan ilman energiasisällön eli kuinka paljon ilmaan ja vesihöyryyn on sitoutunut energiaa. Kyseiset laskut ovat tarkasteltavissa liitteestä 1. Oleellinen komponentti ilmastoinnin osalta on vesihöyry, jonka määrä vaihtelee ilmassa. Vesi sitoo haihtuessaan lämpöä ja siten vaikuttaa ilman entalpiaan. Laskennassa yleensä käytetään ilman entalpian arvona kostean ilman entalpiaa, joka on kuivan ilman ja vesihöyryn entalpioiden summa. (Isometsä, Liite 1. Kostean ilman entalpia, 10.)

Liitteessä 2 on tarkasteltavissa myös muun muassa ominaislämpökapasiteettien avulla tehdyt yksikkömuunnokset, jotta energiataseen virtauksille saadaan haluttu energian yksikkö MWh. Saadut arvot on laskettu myös entalpian avulla, jotta voidaan hieman verrata saatuja tuloksia toisiinsa ja muutenkin yleensä entalpian avulla saadut arvot ovat tarkempia.

Liitteessä 3 on laskettuna vuodot/lämpöhäviöt ja niistä saatu arvo noin 3 GWh, mikä pistää kyllä heti silmään.

Kaikki laskut on laskettu Mathcad 15 – laskentaohjelmistolla ja opinnäytetyön toimeksiantajalle on annettu näistä tiedostot, jotta tarvittaessa arvoja voidaan tarkastella ja muutella. Toki tämä vaatii sen, että kyseinen ohjelmisto on saatavilla ja käytettävissä.

## 9 TULOKSET

Energiataseesta saatujen tietojen perusteella ja varsinkin vuotojen/lämpöhäviöiden kohdalla saatu arvo on todella suuri (noin 3 GWh), mikä herättää kysymyksen, että



onko tarkastelussa otettu huomioon kaikki mahdolliset tekijät. Joitakin näkökantoja on varmasti jäänyt puuttumaan. Varsinkin jäähdytystornin toiminnan selvittäminen olisi keskeisessä osassa, mutta riittävä osaaminen ja mahdollisuuksieni vähyyksellä olla paikan päällä enemmän ja oppia koko laitoksen toimintaa olivat liian vähäiset. Olen tästä kirjoittanut hieman omia mietteitäni seuraavassa kappaleessa.

Todennäköinen ratkaisu, joka heräsi jo heti alkuvaiheessa, on se että kerätään vesi erilliseen altaaseen sekä mahdollisesti valitaan tarpeisiin nähden toiminnan kannalta paras lämmönvaihdin markkinoilta.

Ajatuksena oli myös taulukoida energian kehitystä laitoksella eli miten esimerkiksi energia on kehittynyt vuosien saatossa sähkön osalta laitekohtaisesti lämpökäsittelyuuneissa. Tässä tapauksessa minulla ei ollut tarkempaa tietoa uunien sähkönkulutuksesta ja jossakin vaiheessa kyselinkin siitä, mutta emme koskaan saaneet ulos tarkempaa tilastointia niistä. Myös yhtenä ajatuksena oli lisätä kulutukset rahan osalta. Valitettavasti tietoja ei ollut tarpeeksi näiden toteuttamiseen ja näin ollen en päässyt myöskään tässä työssä kaikkiin tavoitteisiin.

## **10 POHDINTA**

Opinnäytetyön aihe oli todella haastava, koska se ei käsitellyt niinkään omaa opiskeltua linjaani vaan kyseessä oli enemmän energiatekniikkaan perustuvaa asiaa. Olemme toki käsitelleet jonkin verran näitä asioita kouluvuosien aikana, mutta itselle tämä tuntui todella vaikealta aiheelta. Vaikeammaksi sen teki vielä se, kun olin ollut ennen opinnäytetyön aloittamista poissa koulusta ja kursseista, niin puuttui sellainen rutiini tekemiseen ja siinä ajassa ehtii myös unohtamaan monia asioita, joita ei ole enää käyttänyt. Myöskin tasapainottelu työn ja urheilulajini (futsal) kesken oli vaikeaa ja tuntui, ettei meinaa löytää aikaa työn tekoon, minkä takia työn saattaminen päätökseen venyi. Minulla oli ennestään kaikki kurssit käytynä ajallaan, mutta opinnäytetyön aiheen löytämisessä oli vaikeuksia, koska sitä ei meinannut

irrota oikein mistään. Kiitos kuitenkin Stén & Co Oy Ab:n sain tämän mahdollisuuden.

Työ vaati perehtymistä energiatekniikkaan ja varsinkin prosessitekniikka oli keskeisessä osassa. Onneksi aiheen käsittelyn aikana pystyin käyttämään saamiani tietoja aikaisemmista kursseista ja etenkin käydyistä prosessitekniikkaan liittyvistä kursseista oli apua. Myöskin läpikäytyjen kurssien muistiinpanot olivat tallessa, sillä niistäkin oli apua työtä tehtäessä.

Mielenkiintoisin vaihe oli itse kenttätyö eli mittausten tekeminen paikan päällä. Tästä ei ollut aikaisempaa kokemusta ja itse mittaussuunnitelman tekeminen tuli kokonaan uutena asiana. Mittausten teko saattaa vaikuttaa yksinkertaiselta asialta, mutta siinä täytyy ottaa huomioon monia tekijöitä, jotka voivat muun muassa vaikuttaa itse mittaukseen ja siinä saatuihin tuloksiin. Saatujen mittausten avulla päästiin sitten laskemaan haluttuja tietoja, jotka olivat oleellinen osa tutkimustyötä.

Harmillisesti itselläni ei ole autoa käytössäni ja minulla oli vaikeuksia päästä aina silloin kun halusin paikan päälle Muurameen. Kävin toki useita kertoja siellä lainaamalla autoa, mutta en niin monesti kuin olisi ollut tarve. Mielestäni koko laitoksen toiminnan sisäistäminen olisi ollut tärkeässä osassa tutkimustyötä. Toki paikalla olleet ohjaajat ja työntekijät tiesivät lähes kaiken laitoksen toiminnasta ja selittivät minulle asioita sen toiminnasta, mutta heillä on vuosien kokemus, kun taas itsellä ei ollut aiempaa kokemusta ja nopeasti kerran selitetyt asiat eivät aina jää samalla kertaa mieleen.

Toivon ja uskon todella, että tästä työstä on edes jossakin muodossa hyötyä toimeksiantajalle vaikka kaikkiin tavoitteisiin ei päästykään. Haluan kiittää lopuksi toimeksiantajaa tästä mahdollisuudesta sekä kaikkia lähimpiä Stén & Co Oy Ab:n työntekijöitä, jotka olivat kanssani tekemisissä tämän työn parissa.

## LÄHTEET

GEA Process Engineering Oy. 2004. Jäähdytystornin tekniset tiedot.

Halminen, E., Kuvaja, O. & Köttö, R. 1994. Ilmastointitekniikka. Helsinki: Rakennusalan Kustantajat RAK, Kustantajat Sarmala Oy

[Http://fi.wikipedia.org/wiki/Austeniitti.](http://fi.wikipedia.org/wiki/Austeniitti)

[Http://www.motiva.fi/toimialueet/energiakatselmustoiminta/tem\\_n\\_tukemat\\_energiakatselmukset/energiakatselmusmallit/kiinteiston\\_energiakatselmus.](http://www.motiva.fi/toimialueet/energiakatselmustoiminta/tem_n_tukemat_energiakatselmukset/energiakatselmusmallit/kiinteiston_energiakatselmus)

[Http://www.sten.fi/sten\\_fin/lampokasittely/materiaalipankki/.](http://www.sten.fi/sten_fin/lampokasittely/materiaalipankki/)

Isometsä, J. Liite 1. Kostean ilman entalpia. Opinnäytetyönohjaajan antama moniste kostean ilman entalpiasta.

Kivivuori, S. & Härkönen, S. 2004. Lämpökäsittelyoppi. 2. uud. pain. Helsinki: Teknologiainfo Teknova Oy

Motiva Oy. Teollisuussektorin energiakatselmusten ohjeistus. 2009. Viitattu 2.9.2013. [Http://www.motiva.fi/files/2728/Teollisuus\\_KATohjeet\\_ja\\_mallisisallysluettelot\\_2009.pdf](http://www.motiva.fi/files/2728/Teollisuus_KATohjeet_ja_mallisisallysluettelot_2009.pdf).

Mustasilta, H., Air-ix Talotekniikka, Hietaniemi, J., Husu, T., Koski, P. & Suomi, U., Motiva Oy. Kiinteistön energiakatsastuksen toteutus- ja raportointiohjeet. 2004. Helsinki. Viitattu 2.9.2013. [Http://www.motiva.fi/files/745/kat-kiinteiston-ekatselmus.pdf](http://www.motiva.fi/files/745/kat-kiinteiston-ekatselmus.pdf).

Nummila, M. 2010. Prosessisuunnittelun perusteet luento 3. Monisteita.

Polacel b.v. 2004. Ohjekirja. CMC-Jäähdytystorni. Suorakäyttöinen.

Sten: teräksellä tulokseen. 2006. Lämpökäsittelyt.

Sten: teräksellä tulokseen. 2014. Teräsvarastoluettelo.

Taloustiedot. [Http://yritys.taloussanomat.fi/y/sten-co-oy-ab/nurmijarvi/0114140-3/](http://yritys.taloussanomat.fi/y/sten-co-oy-ab/nurmijarvi/0114140-3/).

Teräksellä tulokseen jo vuodesta 1932. [Http://www.sten.fi/](http://www.sten.fi/), Yritys.

Vahvat perinteet. [Http://www.sten.fi/](http://www.sten.fi/), Yritys, Historiaa.

# LIITTEET

## Liite 1. Entalpialaskut

Entalpia kertoo ilman energiasisällön, eli kuinka paljon ilmaan ja vesihöyryyn on sitoutunut lämpöenergiaa. Tarkastellaan siis virtausten osalta (tulo- ja poistoilma) kostean ilman entalpia eli kuinka paljon yhdessä kilogrammassa on energiaa.

$h$  (kJ/kg) = kostean ilman entalpia eli  $h = 1,006t + x(2501 + 1,85t)$ , missä  $t$  = kostean ilman lämpötila [°C] ja  $x$  = kostean ilman absoluuttinen kosteus [kg/kg].

### Tuloilma

$$t_1 = 12,2 \text{ °C eli } T_1 = 285,35 \text{ K}$$

$$T_1 := 285,35 \quad t_1 := 12,2$$

$p_{hs1}$  = vesihöyryyn kyllästyspaine (Pa)

$$p_{hs1} := \frac{e^{\left(77,345 + 0,0057T_1 - \frac{7235}{T_1}\right)}}{T_1^{8,2}} = 1,417 \times 10^3$$

$$p_{hs1} = 1\,417 \text{ Pa}$$

$\phi$  = ilman suhteellinen kosteus 39,2 %

$$\phi_1 := 0,392$$

$p_{h1}$  = vesihöyryyn osapaine (Pa)

$$p_{h1} := \phi_1 \cdot p_{hs1} = 555,406$$

$$p_{h1} = 555,406 \text{ Pa}$$

$p_1$  = kostean ilman kokonaispaine = 101 360 Pa (Muurame, [www.ilmatieteenlaitos.fi](http://www.ilmatieteenlaitos.fi))

$$p_1 := 101360$$

$x_1$  = kostean ilman absoluuttinen kosteus

$$x_1 := 0,6220 \cdot \frac{p_{h1}}{p_1 - p_{h1}} = 3,427 \times 10^{-3}$$

$$x_1 = 3,427 \times 10^{-3} \text{ kgH}_2\text{O/kgAir}$$

$h_1$  = kostean ilman entalpia (kJ/kg)

$$h_1 := 1,006t_1 + x_1 \cdot (2501 + 1,85t_1) = 20,922$$

$$h_1 = 20,9 \text{ kJ/kg}$$

## Poistoilma

$$t_2 = 35,7 \text{ °C eli } T_2 = 308,85 \text{ K}$$

$$T_2 := 308.85 \quad t_2 := 35.7$$

$p_{hs2}$  = vesihöyryn kylästyspaine (Pa)

$$p_{hs2} := \frac{e^{\left(77.345 + 0.0057 \cdot T_2 - \frac{7235}{T_2}\right)}}{T_2^{8.2}} = 5.828 \times 10^3$$

$$p_{hs2} = 5\,828 \text{ Pa}$$

$\phi$  = ilman suhteellinen kosteus 15,1 %

$$\phi_2 := 0.151$$

$p_{h2}$  = vesihöyryn osapaine (Pa)

$$p_{h2} := \phi_2 \cdot p_{hs2} = 880.017$$

$$p_{h2} = 880,017 \text{ Pa}$$

$p_2$  = kostean ilman kokonaispaine 101 360 Pa (Muurame, [www.ilmatieteenlaitos.fi](http://www.ilmatieteenlaitos.fi))

$$p_2 := 101360$$

$x_2$  = kostean ilman absoluuttinen kosteus

$$x_2 := 0.6220 \cdot \frac{p_{h2}}{p_2 - p_{h2}} = 5.448 \times 10^{-3}$$

$$x_2 = 5,448 \times 10^{-3} \text{ kgH}_2\text{O/kgAir}$$

$h_2$  = kostean ilman entalpia (kJ/kg)

$$h_2 := 1.006 \cdot t_2 + x_2 \cdot (2501 + 1.85 \cdot t_2) = 49.898$$

$$h_2 = 49,9 \text{ kJ/kg}$$

## Liite 2. Yksikkömuunnokset ja ominaislämpökapasiteetilaskut

$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$ , missä massa on vuoden aikana siirtynyt massa. Lämpötilaero lasketaan suhteessa  $0\text{ °C} = 273,15\text{ K}$  (referenssitaso).

Veden ominaislämpökapasiteetti:  $c_v = 4,18\text{ kJ/kgK}$

Ilman ominaislämpökapasiteetti:  $c_i = 1,01\text{ kJ/kgK}$

$c_v := 4.18$

$c_i := 1.01$

$T_{\text{referenssi}} := 273.15$

### Jätevesi

Oletuksena on että ulosmenevä vesi on lämpötilaltaan sama kuin hallin lämpötila eli  $21,7\text{ °C} = 294,85\text{ K}$ .

Vuonna 2013 jäteveden määrä oli yhteensä  $143\text{ m}^3 = 143\,000\text{ l} = 143\,000\text{ kg}$

$T_{\text{jätevesi}} := 294.85$

$m_{\text{jätevesi}} := 143000$

$Q_{\text{jätevesi}} := m_{\text{jätevesi}} \cdot c_v \cdot (T_{\text{jätevesi}} - T_{\text{referenssi}}) = 1.297 \times 10^7$

$Q_{\text{jätevesi}} = 12\,970\,000\text{ kJ} = 3,60\text{ MWh}$

### Talousvesi

Sisääntuleva vesi (hanavesi), mikä tulee vesijohtoverkosta on  $8\text{ °C} = 281,15\text{ K}$ .

Vuonna 2013 talousveden määrä oli yhteensä  $468\text{ m}^3 = 468\,000\text{ l} = 468\,000\text{ kg}$

$T_{\text{talousvesi}} := 281.15$

$m_{\text{talousvesi}} := 468000$

$Q_{\text{talousvesi}} := m_{\text{talousvesi}} \cdot c_v \cdot (T_{\text{talousvesi}} - T_{\text{referenssi}}) = 1.565 \times 10^7$

$Q_{\text{talousvesi}} = 15\,650\,000\text{ kJ} = 4,35\text{ MWh}$

## Prosessivesi

Prosessivesi liikkuu lämpötilaltaan  $25\text{ °C} = 298,15\text{ K}$  ja maksimissaan  $35\text{ °C} = 308,15\text{ K}$ . Joten laskussa on otettu huomioon keskiarvo prosessiveden lämpötiloista eli  $30\text{ °C} = 303,15\text{ K}$ .

Vuonna 2013 prosessiveden määrä oli yhteensä  $1\,480\text{ m}^3 = 1\,480\,000\text{ l}$   
 $= 1\,480\,000\text{ kg}$

$$T_{\text{prosessivesi}} := 303.15$$

$$m_{\text{prosessivesi}} := 1480000$$

$$Q_{\text{prosessivesi}} := m_{\text{prosessivesi}} \cdot c_v \cdot (T_{\text{prosessivesi}} - T_{\text{referenssi}}) = 1.856 \times 10^8$$

$$Q_{\text{prosessivesi}} = 185\,600\,000\text{ kJ} = 51,56\text{ MWh}$$

## Tuloilma

Mitattu ilmamäärä tuloilman osalta on  $q_{\text{tuloilma}} = 5\,623\text{ l/s} = 5,623\text{ m}^3/\text{s}$ , ilman

tiheys on  $\rho_{\text{ilma}} = 1,225\text{ kg/m}^3$  ja mittaamani tuloilman lämpötila on

$T_{\text{tuloilma1}} = 12,2\text{ °C} = 285,35\text{ K}$  ja vuoden 2014 keskilämpötila tammi-syyskuussa Jyväskylän alueella on

$T_{\text{tuloilma2}} = 6,6\text{ °C} = 279,75\text{ K}$  ([www.ilmatieteenlaitos.fi](http://www.ilmatieteenlaitos.fi)).

$$q_{\text{tuloilma}} := 5.623$$

$$T_{\text{tuloilma1}} := 285.35 \quad T_{\text{tuloilma2}} := 279.75$$

$$\rho_{\text{ilma}} := 1.225$$

$$m_{\text{tuloilma}} := q_{\text{tuloilma}} \cdot \rho_{\text{ilma}} = 6.888$$

$$m_{\text{tuloilma}} = 6,9\text{ kg/s}$$

$$h_1 := 20.9$$

$h_1 = 20,9\text{ kJ/kg}$  on kostean ilman entalpia

$$Q_{\text{tuloilma}} := m_{\text{tuloilma}} \cdot c_i \cdot (T_{\text{tuloilma2}} - T_{\text{referenssi}}) = 45.917$$

$$Q_{\text{tuloilma}} = 45,917\text{ kJ/s}$$

$$1\text{ h} = 3600\text{ s} \quad t := 3600$$

$$Q_{\text{tuloilma}} \cdot t = 1.653 \times 10^5$$

$$Q_{\text{tuloilma}} = 165\,300\text{ kJ} = 45,92\text{ kWh} = 0,05\text{ MWh}$$



Voidaan laskea myös entalpian avulla, jolloin voidaan hieman verrata saatuja tuloksia.

$$Q_{\text{tuloilma2}} := m_{\text{tuloilma}} \cdot h_1 \cdot t = 5.183 \times 10^5$$

$$Q_{\text{tuloilma2}} = 518\,300 \text{ kJ} = 143,97 \text{ kWh} = 0,14 \text{ MWh}$$

Kuten voi huomata entalpian avulla saatu arvo heittää hieman, mutta yleisestikin sen avulla lasketut arvot ovat tarkempia. Joka tapauksessa molemmat laskutavat ovat tarkasteltavissa ja verrattavissa keskenään. Itse energiataseeseen on huomioitu entalpian avulla saadut arvot.

## Poistoilma

Mitattu ilmamäärä poistoilman osalta on  $q_{\text{poistoilma}} = 6\,690 \text{ l/s} = 6,690 \text{ m}^3/\text{s}$  ja mitaamani poistoilman lämpötila on  $T_{\text{poistoilma}} = 35,7 \text{ }^\circ\text{C} = 308,85 \text{ K}$ .

$$q_{\text{poistoilma}} := 6.690$$

$$T_{\text{poistoilma}} := 308.85$$

$$m_{\text{poistoilma}} := q_{\text{poistoilma}} \cdot \rho_{\text{ilma}} = 8.195$$

$$m_{\text{poistoilma}} = 8,2 \text{ kg/s}$$

$$h_2 := 49.9$$

$h_2 = 49.9 \text{ kJ/kg}$  on kostean ilman entalpia

$$Q_{\text{poistoilma}} := m_{\text{poistoilma}} \cdot c_i \cdot (T_{\text{poistoilma}} - T_{\text{referenssi}}) = 295.496$$

$$Q_{\text{poistoilma}} = 295,496 \text{ kJ/s}$$

$$Q_{\text{poistoilma}} \cdot t = 1.064 \times 10^6$$

$$Q_{\text{poistoilma}} = 1\,064\,000 \text{ kJ} = 295,50 \text{ kWh} = 0,30 \text{ MWh}$$

Voidaan laskea myös entalpian avulla, jolloin voidaan hieman verrata saatuja tuloksia.

$$Q_{\text{poistoilma2}} := m_{\text{poistoilma}} \cdot h_2 \cdot t = 1.472 \times 10^6$$

$$Q_{\text{poistoilma2}} = 1\,472\,000 \text{ kJ} = 408,89 \text{ kWh} = 0,41 \text{ MWh}$$

Tässäkin tapauksessa voi huomata, että entalpian avulla saatu arvo heittää hieman, mutta yleisestikin sen avulla lasketut arvot ovat tarkempia. Joka tapauksessa molemmat laskutavat ovat tarkasteltavissa ja verrattavissa keskenään. Itse energiataseeseen on huomioitu entalpian avulla saadut arvot.

### Liite 3. Vuodot/lämpöhäviöt

Vuodot/lämpöhäviöt saadaan, kun vähennetään sisääntulevista virroista ulostulevat. Tiedossa oli vuoden 2013 sähkönkulutuksen osalta, se että sitä kului  $Q_{\text{sahko}} = 3\,075\,399 \text{ kWh} = 3\,075,40 \text{ MWh}$ . Täten voidaan laskea  $Q_{\text{vuodot}} = (Q_{\text{sahko}} + Q_{\text{tuloilma2}} + Q_{\text{talousvesi}} + Q_{\text{prosessivesi}}) - (Q_{\text{poistoilma2}} + Q_{\text{jatevesi}})$

$$Q_{\text{sahko}} := 3075.40$$

$$Q_{\text{tuloilma2}} := 0.14$$

$$Q_{\text{poistoilma2}} := 0.41$$

$$Q_{\text{talousvesi}} := 4.35$$

$$Q_{\text{prosessivesi}} := 51.56$$

$$Q_{\text{jatevesi}} := 3.60$$

$$Q_{\text{vuodot}} := (Q_{\text{sahko}} + Q_{\text{tuloilma2}} + Q_{\text{talousvesi}} + Q_{\text{prosessivesi}}) - (Q_{\text{poistoilma2}} + Q_{\text{jatevesi}})$$

$$Q_{\text{vuodot}} = 3.127 \times 10^3$$

$$Q_{\text{vuodot}} = 3\,127 \text{ MWh}$$

## Liite 4. Ilmamittaukset

### Stén & Co Oy Ab ilmamittaukset 17.4.2104

#### Mittalaite TSI Q-TRAK PLUS 8552/8554

Arash Muridiyazd, TPA7S, Jyväskylän ammattikorkeakoulu

°C = lämpötila Celsiusasteina

CO<sub>2</sub> = hiilidioksidi

CO = hiilimonoksidi

RH = suhteellinen kosteus

PPM = parts per million

10000 PPM = 1 %

1000 PPM = 1 ‰

Ulkoilma	°C	PPM CO <sub>2</sub>	RH %	PPM CO
Mittaus 1	12,6	498	29,6	2,6
Mittaus 2	12,5	483	31,4	1,1
Mittaus 3	12,4	486	32,8	0,4
<b>Ulkoilman keskiarvo</b>	<b>12,5</b>	<b>489</b>	<b>31,3</b>	<b>1,4</b>

Sisäilma (tuotantotilat)	°C	PPM CO <sub>2</sub>	RH %	PPM CO
Mittaus 1	21,8	521	21,8	2,9
Mittaus 2	21,8	520	21,5	2,8
Mittaus 3	21,4	527	21,4	3,0
<b>Sisäilman (tuotantotilojen) keskiarvo</b>	<b>21,7</b>	<b>523</b>	<b>21,6</b>	<b>2,9</b>

Sisäilma (toimistotilat)	°C	PPM CO <sub>2</sub>	RH %	PPM CO
Mittaus 1	21,5	880	27,7	0,4
Mittaus 2	21,8	875	27,6	0,1
Mittaus 3	21,8	929	28,1	0,1
<b>Sisäilman (toimistotilojen) keskiarvo</b>	<b>21,7</b>	<b>895</b>	<b>27,8</b>	<b>0,2</b>

Tuloilma	°C	PPM CO <sub>2</sub>	RH %	PPM CO
Mittaus 1, Putki 1 (MP1)	12,0	510	39,3	1,0
Mittaus 1, Putki 2 (MP2)	11,9	500	41,3	1,0
Mittaus 1, Putki 3 (MP3)	12,4	510	39,5	1,0
Mittaus 2, Putki 1 (MP1)	12,2	510	39,5	1,5
Mittaus 2, Putki 2 (MP2)	11,9	515	40,7	1,0
Mittaus 2, Putki 3 (MP3)	12,3	517	40,2	0,8
Mittaus 3, Putki 1 (MP1)	12,6	496	34,5	3,1
Mittaus 3, Putki 2 (MP2)	11,7	501	39,4	1,6
Mittaus 3, Putki 3 (MP3)	12,6	507	38,4	0,3
<b>Tuloilman mittausten keskiarvo</b>	<b>12,2</b>	<b>507</b>	<b>39,2</b>	<b>1,3</b>

Poistoilma (mitattu poistosäleiköstä, koska ei muuta mahdollisuutta)	°C	PPM CO <sub>2</sub>	RH %	PPM CO
Mittaus 1	35,3	820	18,9	136,7
Mittaus 2	35,5	849	13,9	144,5
Mittaus 3	36,4	853	12,5	157,3
<b>Poistoilman mittausten keskiarvo</b>	<b>35,7</b>	<b>841</b>	<b>15,1</b>	<b>146,2</b>

## Liite 5. Energiatase

