

Opinnäytetyö AMK

Konetekniikan koulutus

2024

Eetu Huhtala

Lääketehtaan lauhdejärjestelmän parannuskeinojen tutkiminen ja kehittäminen



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Konetekniikankoulutus

Huhtikuu 2024 | 40 sivua + 1 liite

Eetu Huhtala

Lääketehtaan lauhdejärjestelmän parannuskeinojen tutkiminen ja kehittäminen

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutustua lauhteen käsittelyyn ja löytää lääketehaalle parempi tapa käsitellä lauhdetta. Lauhteenkäsittelyn toteutustapa oli toimiva, mutta se ei ollut energiatehokas.

Työssä tutustuttiin tehtaan höyry- ja lauhdejärjestelmän toimintaan sekä lauhdejärjestelmän toimintaan yleisesti. Työssä tutkittiin yleisimpiä tapoja käsitellä lauhdetta ja niiden joukosta valittiin toimivin ratkaisuvaihtoehto.

Opinnäytetyön lopputuloksena saatiin esitettyä vaihtoehtoinen tapa toteuttaa lauhteenkäsittely, joka säästää vesi- ja energiakustannuksia.

Lopuksi työssä selvitettiin lauhteesta saatavat energiasäästöt sekä vedenkulutuksen säästöt. Työssä hyödynnettiin Spirax Oy:n laskentatyökalua sekä asiantuntemusta.

Asiasanat:

Lauhde, lauhdejärjestelmä, lauhteenkäsittely, lauhteenpoisto

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Mechanical Engineering

April 2024 | 40 + 1 appendix

Eetu Huhtala

Researching and developing the improvement methods for the pharmaceutical factory's condensate system

The aim of this thesis was to research about condensate handling and to find a better way for a pharmaceutical factory to handle condensate. The current implementation method was functional, but it was not energy efficient.

In this thesis the operation of the steam and condensate system of the factory were studied, as well as the operation of the condensate systems in general. The most common ways of handling condensate were investigated, and the most effective solution option was chosen from among them.

As a result of this thesis, an alternative way to implement condensate handling was presented, which saves water and energy costs.

Finally, the possible energy and water savings were determined. The work utilized Spirax Oy's calculation tool and expertise.

Keywords:

Condensate, condensate system, condensate handling, condensate removal

Sisältö

1 Johdanto	7
2 Höyry- ja lauhdejärjestelmä	8
2.1 Höyryn käyttö	8
2.2 Höyryn tuotanto	9
2.3 Höyryn jakelu	9
2.4 Lauhteen käsittely	10
3 Lauhteenpoiston toiminta ja tarkoitus	12
3.1 Lauhteen synty	12
3.2 Lauhteen aiheuttamat ongelmat höyryjärjestelmissä	13
3.2.1 Vesi-iskut	13
3.2.2 Vesilasti	14
4 Lauhteen uudelleenkäyttö	15
4.1 Lauhteen uudelleen käyttö	15
4.2 Laskuesimerkki lauhteen palauttamisesta	17
5 Paisuntahöyry	19
5.1 Paisuntahöyry	19
5.2 Paisuntahöyryn määrä	20
5.3 Paisuntahöyryn hyödyntäminen	22
6 Lauhteen jäähdytys lämmönvaihtimella	24
6.1 Lämmön talteenotto	24
6.2 Vapaajäähdytys	25
7 Lauhdejärjestelmän ongelmat ja suunnittelu lähtökohdat	26
7.1 Lauhdejärjestelmän ongelmat	26
7.2 Suunnittelun Lähtökohdat	27
8 Lauhteen käsittelyn parannus	28
8.1 Lauhteen lämmön johtamien kaukolämpöverkkoon	28

8.2 Paisuntahöyryn käsittely	29
8.3 Ratkaisun haasteet	29
9 Lauhteen määrä	30
9.1 Lauhteen määrän arviointi	30
9.2 Spirax Sarco laskentatyökalu	31
9.3 Laskennan ja arvioinnin yhteneväisyys	33
10 Lauhteesta saatava energia	34
10.1 Paisuntahöyry	34
10.2 Lauhteen energia	35
10.3 Lauhteen jäähdytykseen kuluva vesi	35
10.4 Veden kulutus	37
11 Loppuluku	38
Lähteet	39

Liitteet

Liite 1. Höyrytaulukko

Kuvat

Kuva 1. Lauhteen jäähdytysjärjestelmän rakenne (Toimeksiantajan dokumentti TUK-01-ZZ-PID-ME-1200)	10
Kuva 2. Virtausperiaate kaksoisputkilämmönvaihtimessa (Debasree Ghosh, Lecture notes on Heat Transfer).	11
Kuva 3. Vesipatsaan syntyminen höyryputkistossa (Spirax Sarco Ltd. 2024, Steam mains and drainage.)	13
Kuva 4. Suljetun järjestelmän höyryn ja lauhteen kierto. (Spirax Sarco Ltd. 2024, Condensate recovery)	15

Kuva 5. Runkolinjan lauhteenmäärä (Spirax Sarco, Start Up and Running Losses).	33
--	----

Kuviot

Kuvio 1. Lauhteen ja höyryn lämpöenergia paineen suhteen. (Spirax Sarco Ltd. 2024, Condensate recovery)	18
Kuvio 2. Paisuntahöyryn määrä. (Spirax Sarco Ltd. 2024, Flash Steam.)	21

Taulukot

Taulukko 1. Lauhteen määrä.	31
Taulukko 2. Lauhteesta saatava energia	34
Taulukko 3. Veden kulutus.	37

1 Johdanto

Höyryjärjestelmissä syntyy aina lauhdetta ja toimiva höyryjärjestelmä vaatii toimivan lauhdejärjestelmän. Lauhde eli tiivistynyt höyry täytyy poistaa höyryjärjestelmästä, jotta järjestelmä toimisi suunnitellusti. Tämän opinnäytetyön kohteena olevassa lääketehtaassa lauhdetta syntyy kostutushöyryjärjestelmässä. Lauhde nähdään lääke- ja elintarviketeollisuudessa usein jätteenä, josta täytyy päästä eroon. Vaikka lauhteen uusiokäyttö ei ole aina mahdollista ei sen potentiaalia kannata ylenkatsoa.

Lauhteella on lämpöenergiaa sekä lauhteesta syntyy aina olosuhteista riippuva määrä paisuntahöyryä eli kansan kielellä hönkähöyryä. Näistä saatavilla olevaa lämpöä heitetään hukkaan monessa teollisuuslaitoksessa ja tämän opinnäytetyön kohde on yksi niistä.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on löytää lääketehtaalle parempi tapa hyödyntää ja käsitellä lauhdetta. Työn kohteena olevassa lääketehtaassa lauhdejärjestelmä on tämän opinnäytetyön tekohetkellä alle vuoden vanha, mutta sen suunnittelussa ei ole huomioitu energiatehokkuutta riittävässä määrin. Lauhteen käsittely kuluttaa paljon vettä ja hukkaa lämpöä, joka on energiataloudellisesta näkökulmasta ristiriidassa yrityksen ympäristötavoitteiden kanssa.

2 Höyry- ja lauhdejärjestelmä

2.1 Höyryn käyttö

Lääketeollisuudessa tuotantotiloilla on tarkat vaatimuksen tuotantotilojen ilmanlaadun suhteen. Ilmanlaatua mitataan sen puhtauden sekä lämpötilan ja suhteellisen kosteuden perusteella. Suhteellinen ilmankosteus [% RH] kuvaa kuinka paljon vesihöyryä on ilmassa siihen nähden, miten paljon siinä lämpötilassa on mahdollista olla ilman, että vesi tiivistyy. Lämpötila vaikuttaa suhteelliseen kosteuteen, sillä lämpötila vaikuttaa ilman ominaisuuteen sitoa kosteutta. Lämpimässä ilmassa voi esiintyä enemmän kosteutta, eli lämpötilan noustessa suhteellinen kosteus laskee. (Sandberg 2014, 81.).

Työn kohteena olevassa tuotantolaitoksessa kemikaalivapaata kostutushöyryä käytetään kostuttamaan tuotantotilojen tuloilmaa. Kostutuksella tarkoitetaan ilmassa olevan vesihöyryn määrän lisäystä eli höyryllä kontrolloidaan suhteellista ilmankosteutta tuotantotiloissa. Tilojen ilmankosteusvaatimus on määritetty tilojen käyttötarkoituksen ja puhtausluokan mukaan.

Kostutus tapahtuu sumuttamalla kemikaalivapaata kostutushöyryä ilmastointikanavaan, jossa se sekoittuu tuloilman kanssa. Höyryä sumutetaan höyrykammoilla. Järjestelmästä ja osastosta riippuen, voi järjestelmässä olla useita höyrykamvoja eri kanavan haaroissa, jolloin saavutetaan tuotantotilojen ilmankosteuden parempi kontrolli. Höyrykamat ovat usein viimeisenä ilmastointikoneessa ilman kulkusuuntaan nähden, jotta kostutushöyry sekoittuu hyvin eikä kondensoidu kanavan sisäpinnoille. Poikkeuksia on kuitenkin paljon sillä, osa järjestelmistä on todella vanhoja ja eri vuosikymmenillä rakennetut järjestelmät eroavat toisistaan.

Kostutusprosessi on automatisoitu ja toimii asetusarvon sekä ilmastointikanavasta ja tuotantotiloista saadun mittausdatan perusteella. Automaatio säättää kostutushöyryn virtausta höyrykamalle säätöventtiilin avulla.

2.2 Höyryn tuotanto

Korkeiden puhtausvaatimusten takia tuotantolaitos tuottaa itse omaan käyttöönsä kemikaalivapaata kostutushöyryä. Kostutushöyryä tuotetaan kolmessa höyrynkehittimessä, jotka käyttävät energianlähteenään paikalliselta energiayhtiöltä ostettua teollisuushöyryä. Höyrynkehittimet käyttävät kemikaalivapaan kostutushöyryn valmistukseen käänteisosmoosilla esikäsiteltyä vettä. Höyrynkehittimet toimivat lämmönvaihtimina, jossa teollisuushöyryllä lämmitetään esikäsiteltyä vettä. Teollisuushöyry lauhtuu höyrynkehittimessä täysin lauhteeksi, joka palautetaan toimittajalle lauhdeputkistoa pitkin. Höyrynkehittimet valvovat tuotetun höyryn laatua ja hälyttävät, jos höyryn laadussa on poikkeamia.

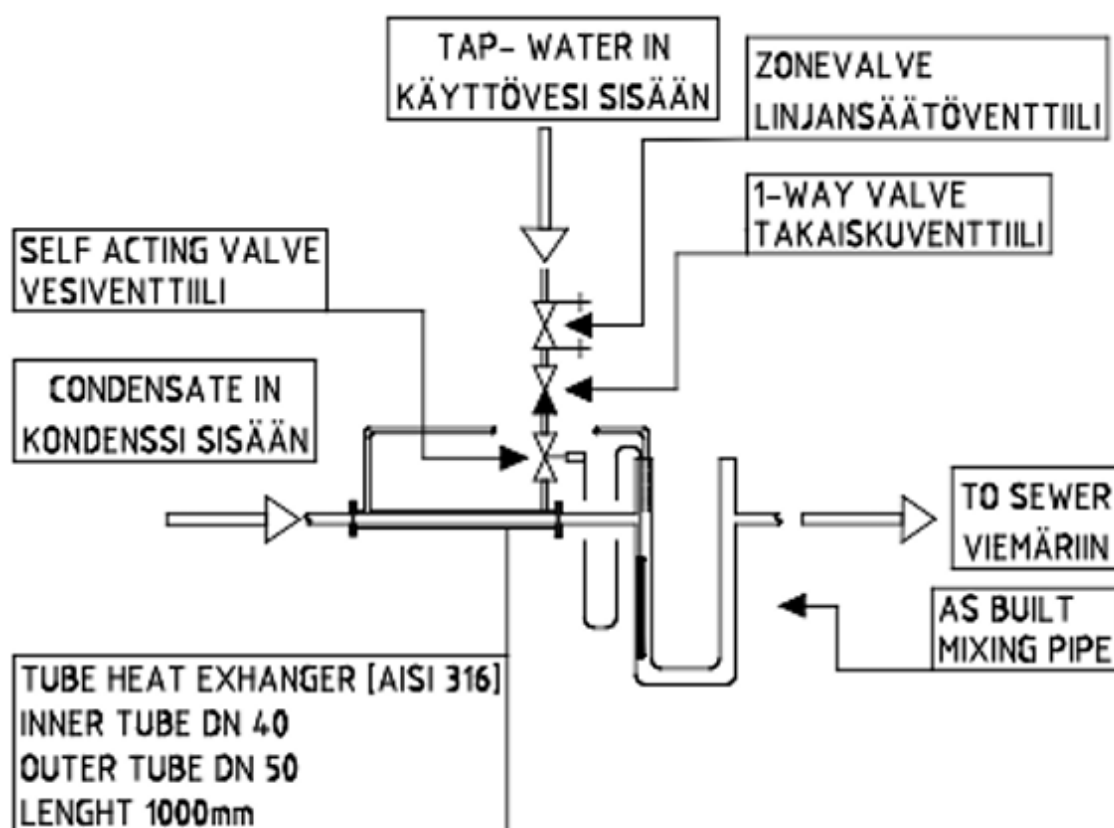
Höyrynkehittimien tuottama höyry on kylläistä höyryä. Kylläisellä höyryllä tarkoitetaan höyryä, joka on kehitetty kosketuksessa veteen eli höyrykattilassa ja sillä on sama paine ja lämpötila kuin höyrykattilan vedellä. Kylläisellä höyryllä on aina määrätty lämpötila–paine suhde. Jos höyryä lämmitetään edelleen, syntyy tulistettua höyryä, joka on kuivaa eikä seuraa lämpötila–paine suhdetta. (Teollisuuden höyry- ja lauhdejärjestelmät 1978, Osa 1, 10–11.)

2.3 Höyryn jakelu

Kemikaalivapaata kostutushöyryä jaetaan sen käyttöpisteille haponkestävästä teräksestä valmistetun putkiston avulla. Koska kostutushöyryllä on korkeat puhtausvaatimukset, ei sen sekaan saa päästä likaa tai muita epäpuhtauksia. Yleisesti höyryputket valmistetaan kuumalujaseostumattomasta teräksestä, mutta tässä kohteessa puhtausvaatimukset vaativat AISI 316L luokan haponkestävän teräksen käytön. Kostutushöyryn jakeluverkosto koostuu tuotantolaitoksen pituussuunnassa kulkevasta runkolinjasta ja siitä haarautuvista sivulinjoista.

2.4 Lauhteen käsittely

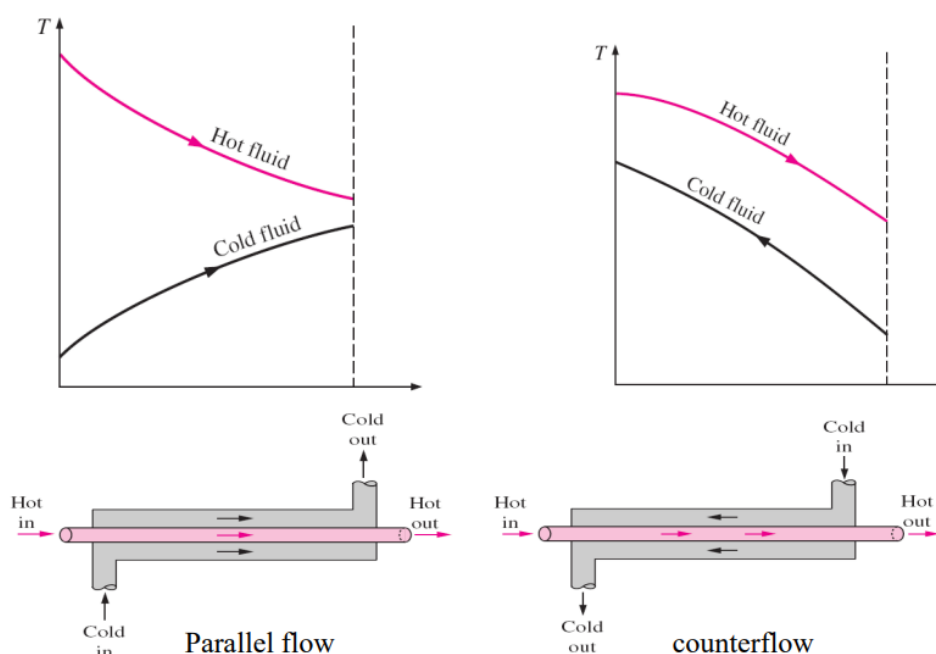
Höyryputkistossa sekä toimilaitteilla syntynyt lauhde erotetaan höyrystä lauhteenpoistimilla. Syntynyt lauhde johdetaan viemäriin. Ennen kuin lauhdetta voidaan päästää viemäriin, sitä on jäähdytettävä, sillä muoviset ja osittain huonossa kunnossa olevat vanhat valurautaviemärit eivät kestä kuumaa vettä yhtäjaksoisesti pitkiä aikoja.



Kuva 1. Lauhteen jäähdytysjärjestelmän rakenne (Toimeksiantajan dokumentti TUK-01-ZZ-PID-ME-1200)

Lauhdetta jäähdytetään kaksoisputkilämmönvaihtimilla, jossa jäähdyttävänä aineena käytetään kylmää vesijohtovettä. Kaksoisputkilämmönvaihtimessa on kaksi putkea sisäkkäin. Sisemmässä putkessa kulkee kuuma lauhde ja sitä ympäröi kylmä vesivaippa, joka jäähdyttää lauhdetta.

Jäähdytykseen käytetyn veden virtausta säädetään lämmönvaihtimen jälkeisen lauhteen lämpötilan mukaan. Säädön hoitaa itsesäätyväventtiili, jossa on lämpötila-anturi. Lauhteen jäähdyttyä ja jäähdytysveden lämmettyä lauhde sekä jäähdytysvesi johdetaan lähimpään viemäriin tai lattiakaivoon. Kohteen mukaan yhdellä lämmönvaihtimella voidaan jäähdyttää yhden tai useamman lauhteenpoistimen lauhteet. Lauhteen jäähdyttämiseen käytettyjä lämmönvaihtimia on 19 kappaletta ja ne sijaitsevat ilmastointikonehuoneissa lähellä höyrynkäyttöpisteitä ympäri tehdasta.



Kuva 2. Virtausperiaate kaksoisputkilämmönvaihtimessa (Debasree Ghosh, Lecture notes on Heat Transfer).

Tässä kohteessa lämmönvaihtimet käyttävät vastavirtaperiaatetta, eli jäähdyttävä neste kulkee lämmönvaihtimessa vastakkaiseen suuntaan kuin jäähdytettävä neste. Vastavirtaperiaate nostaa lämmönvaihtimen hyötysuhdetta ja parantaa jäähdytystehoa. Kaksoisputkilämmönvaihtimen toiminta eri virtausperiaatteissa on esitetty kuvassa 2. (Debasree Ghosh, Lecture notes on Heat Transfer.)

3 Lauhteenpoiston toiminta ja tarkoitus

3.1 Lauhteen synty

Kylläisen höyryn kohdatessa kylmemmän pinnan, siirtyy höyrystä lämpöenergiaa. Lämpöenergian siirtyessä höyry luovuttaa höyrystymisenergiansa ja tiivistyy eli muuttuu vedeksi. Lauhteen lämpötila ja paine pysyvät samoina kuin höyryn, josta lauhde muodostui. (Teollisuuden höyry- ja lauhdejärjestelmät 1978, Osa 2, 1.)

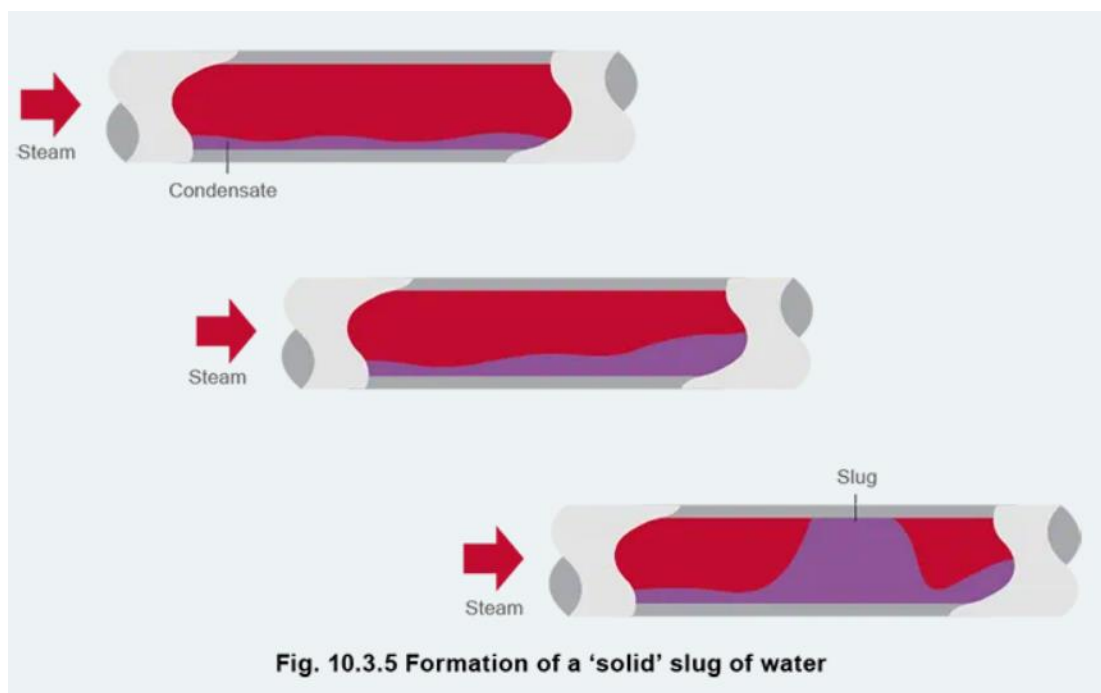
Lauhteella on edelleen suuri lämpösisältö, vaikka se on luovuttanut höyrystymislämpönsä (Energiatehokas höyry- ja lauhdejärjestelmä 2015). Jäljellejäänyttä lämpöä kutsutaan nestelämmöksi. Höyryn kokonaislämpösisältö voidaan siis jakaa kahteen eri osaan, nestelämpöön ja höyrystymislämpöön. Höyrystymislämpö on moninkertainen nestelämpöön verrattuna. Havainnollistavana esimerkkinä vesi höyrystyy 100°C atmosfääripaineessa ja sen nestelämpö on tällöin 419 kJ/kg. Vastaavasti 1 kg 100°C höyryä atmosfääripaineessa sisältää 2676 kJ/kg lämpöenergiaa. (Teollisuuden höyry- ja lauhdejärjestelmät 1978, Osa 1, 7.)

Lauhdetta syntyy höyryjärjestelmissä aina kun kyseessä on kylläinen höyry. Vaikka putket, jossa höyry kulkee ovat eristettyjä ei mikään eristys ole täydellinen, jolloin syntyy lämpöhäviöitä. Niinpä putkistosta vuotaa lämpöä ulospäin ja osa höyrystä lauhtuu putkistossa. Höyryputkiston tehokkaan toiminnan kannalta on tärkeää, että lauhde poistetaan putkistosta oikein ja tehokkaasti. Jos lauhdetta ei poisteta putkistosta, täyttyy höyryputki vedellä pienentäen höyryn tilavuutta, jolloin höyryn nopeus voi nousta suunniteltua korkeammaksi. Putkistoon jäänyt lauhde aiheuttaa putkiston tehokkuuden laskua, korroosiota, eroosiota ja toiminnallisia ongelmia kuten vesi-iskuja. (Spirax Sarco Ltd. 2024, Steam mains and drainage.)

3.2 Lauhteen aiheuttamat ongelmat höyryjärjestelmissä

3.2.1 Vesi-iskut

Vesi-iskulla tarkoitetaan tilannetta, jossa höyryputkessa oleva lauhde muodostaa nopeasti etenevän vesipatsaan, joka osuessaan putkiston osiin, liittimin tai toimilaitteisiin aiheuttaa melua ja mekaanista rasitusta. Vesi-isku voi syntyä, jos höyryputkeen kertyy liikaa lauhdetta, joka lähtee liikkumaan höyryn liikkeen vaikutuksesta. Vesipatsaan syntyminen höyryputkistossa on esitetty kuvassa 2.



Kuva 3. Vesipatsaan syntyminen höyryputkistossa (Spirax Sarco Ltd. 2024, Steam mains and drainage.)

Merkkejä vesi-iskuista ovat putkistosta kuuluvat pamahdukset ja mahdollinen putkiston värähtely. Vesi-iskut rikkovat venttiileitä, tiivisteitä ja pahimmassa tapauksessa putkisto voi revetä. Putkiston repeäminen voi aiheuttaa vakavan vaaratilanteen. Tyypillisempiä syitä vesi-iskujen syntyyn on roikkuva putkisto, jolloin lauhde kerääntyy putkiston alimpaan kohtaan, sihtien väärä asennus, keskeisten supistusten käyttö epäkeskisen sijaan sekä riittämätön lauhteen poisto. (Spirax Sarco Ltd. 2024, Steam mains and drainage.)

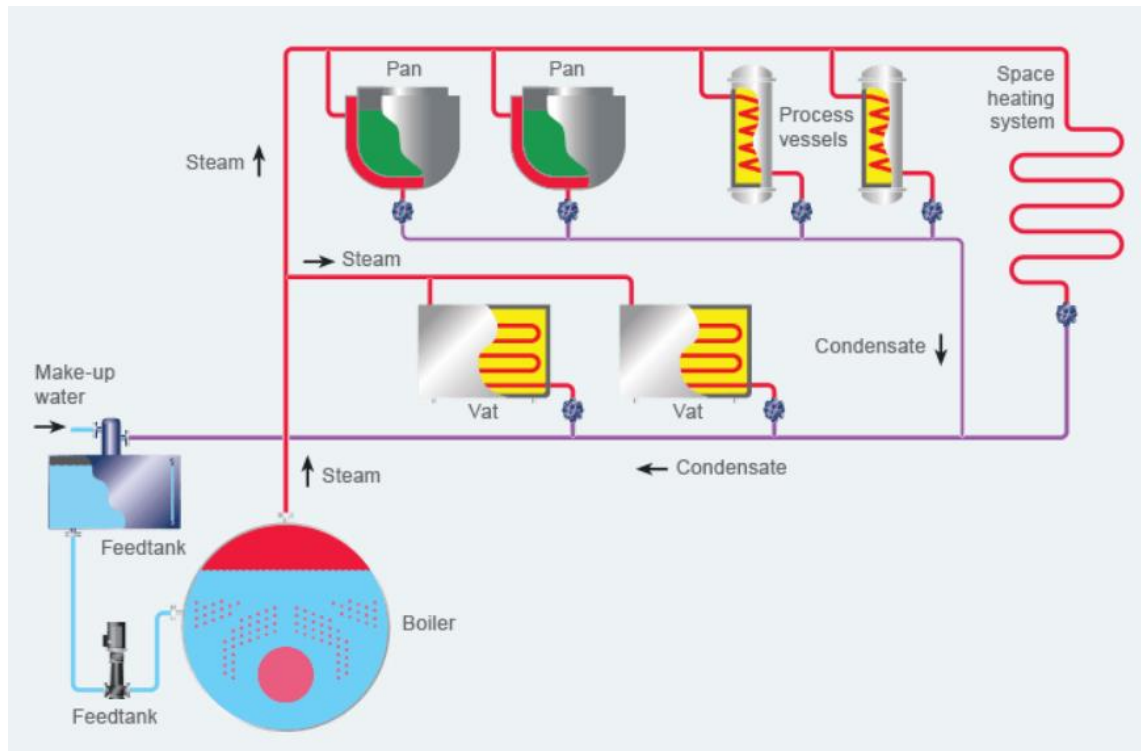
3.2.2 Vesilasti

Höyryn yleinen käyttökohde on erinäiset lämmitykseen käytetyt lämmönvaihtimet. Näissä lämmönvaihtimissa höyry luovuttaa höyrystymislämpönsä lämmittäen ensin lämmönvaihdinta ja sitten lämmitettävää toisiopiiriä. Höyrystymislämpönsä luovuttanut höyry tiivistyy ja jäljelle jää lauhdetta. Jotta lämmönvaihdin toimisi sille suunnitellulla teholla on lauhde poistettava lämmönvaihtimesta. Jos lauhdetta ei poisteta lämmönvaihdin jää "vesilastiin". Lämmönvaihtimeen kertynyt lauhde pienentää höyryn lämmityspinta-alaa, jolloin lämmitettävän toisiopiirin lämpötila laskee. Vaikka lauhteen lämpötila ja paine on sama kuin höyryllä, ei se sovellu lämmitykseen kuten höyry. Veden luovuttaessa nestelämpöään, sen lämpötila laskee välittömästi. Höyry ei jäähdy luovuttaessaan höyrystymislämpönsä. Höyryn höyrystymislämpö on monin kertainen saman lämpöisen lauhteen nestelämpöön verrattuna. (Teollisuuden höyry- ja lauhdejärjestelmät 1978, Osa 2, 1.)

4 Lauhteen uudelleenkäyttö

4.1 Lauhteen uudelleenkäyttö

Kilogramma höyryä tuottaa kilogramman lauhdetta luovuttaessaan höyrystymislämpönsä. Energiatehokas järjestelmä käyttää lauhteen uudelleen. Lauhteen hylkääminen prosessista on sekä energian että rahan tuhlausta ja ympäristöä kuormittavaa. Tehokas lauhdejärjestelmä kerää lauhteen talteen lauhdesäiliöön, syöttövesisäiliöön, veden käsittelyyn tai käyttää sen uudelleen toisessa prosessissa. Koska lauhde on jo kertaalleen höyrynkehittimeen sopivaksi käsiteltyä ja periaatteessa tislattua vettä, se on ideaalista syöttövedettä höyrynkehittimelle. Ainoastaan silloin, kun todellinen kontaminaatoriski on olemassa, ei ole suositeltavaa palauttaa kondenssivettä takaisin höyrynkehittimelle. (Spirax Sarco Ltd. 2024, Condensate recovery.)



Kuva 4. Suljetun järjestelmän höyryn ja lauhteen kierto. (Spirax Sarco Ltd. 2024, Condensate recovery)

Lauhteella on nestelämpö, joka on käyttökelpoista lämpöenergiaa. Energiatohokkuuden kannalta lauhteen kuljettaminen takaisin höyrykehittimelle on paras nestelämmön käyttötapa. (Teollisuuden höyry- ja lauhdejärjestelmät 1978, Osa 2, 3.) Jopa pienellä määrällä lauhteen kierrätystä voidaan saada rahallista säästöä. Suljetussa järjestelmässä hukkaan heitetty lauhde täytyy korvata uudella kylmällä syöttövedellä. Uuden syöttöveden lisäys järjestelmään tuo kustannuksia veden hinnan, veden käsittelyn ja lämmittämisen muodossa. Kylmän veden lämmittämiseen kuluu energiaa, joka on pois höyryn tuotosta, jolloin höyrykehittimen höyryn tuotto laskee. (Spirax Sarco Ltd. 2024, Condensate recovery.)

Lauhteessa olevan nestelämmön lämpöenergian määrä voidaan laskea lämpöenergiankaavalla (Mäkelä 2021, 107, kaava 5)

$$Q_{lauhde} = mc\Delta T$$

jossa

Q_{lauhde} = lauhteessa oleva lämpöenergia

m = lauhteen massa

c = lauhteen ominaislämpökapasiteetti

ΔT = lämpötilan muutos

Höyryn höyrystymislämpö voidaan laskea lämpöenergiankaavalla (Mäkelä 2021, 107, kaava 8)

$$Q_{höyry} = mr$$

jossa

$Q_{höyry}$ = höyrystymislämpöenergia

m = höyryn massa

r = höyrystymislämpö

4.2 Laskuesimerkki lauhteen palauttamisesta

Suljetussa järjestelmässä siinä kulkeva aine ei vaihdu eikä poistu, mutta sen energia voi muuttua. Suljetussa höyryjärjestelmässä vesi ei poistu, vaan se muuttaa olomuotoaan ja energiamääräänsä eri järjestelmän osissa. Suljetussa höyryjärjestelmässä höyrykehittimelle tai syöttövesisäiliölle palaava lauhde sisältää lämpöenergiaa. Jos lauhdetta ei käytetä uudelleen, se täytyy korvata uudella kylmällä syöttövedellä. Olettaen, että syöttöveden lämpötila on 10°C ja palautuvan lauhteen lämpötila on 90°C voidaan laskea säästetty energia. Säästetty energia on sama kuin kylmän syöttöveden lämmittämiseen lauhteen lämpötilaan kulunut energia. Lasketaan 1 kg lämmittämiseen kulunut energia.

$$Q_{lauhde} = mc\Delta T = 1 \text{ kg} * 4.19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * (90^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) = 335 \text{ kJ}$$

Suljetusta järjestelmästä poistettu lauhde luo 335 kJ energiatarpeen jokaista poistettua kilogrammaa kohden. Lauhteen energian suhteuttamista varten lasketaan höyryn tuotantoon kulunut energia. Laskuissa ei oteta huomioon höyrykehittimen hyötysuhdetta. Yhdestä kilogrammasta 10°C syöttövedettä tuotetaan yksi kilogramma kylläistä höyryä, jonka suhteellinen paine on 2 bar ja lämpötila 133°C. Veden kiehumispisteeseen lämmittämiseen kuluva energia on

$$Q_{vesi} = mc\Delta T = 1 \text{ kg} * 4.19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * (133^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) = 515 \text{ kJ}$$

Kiehumispisteessä olevan veden höyrystymiseen kulunut energia on

$$Q_{höyry} = 1 \text{ kg} * 2163 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2163 \text{ kJ}$$

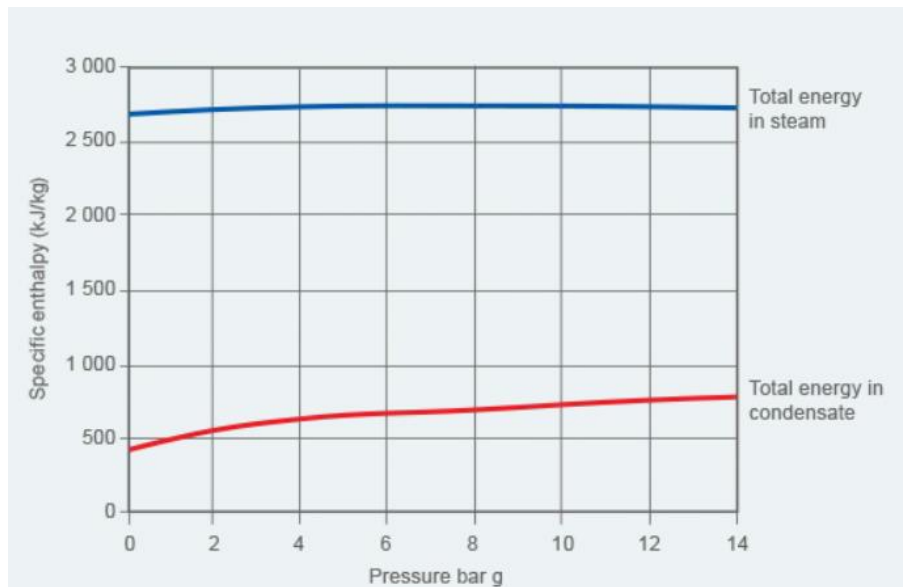
Höyryn kokonaislämpösisältö on

$$Q = Q_{vesi} + Q_{höyry} = 515 \text{ kJ} + 2163 \text{ kJ} = 2678 \text{ kJ}$$

Lauhteen palauttamisella säästettyä energiaa voidaan verrata höyryn kokonaislämpöenergiaan, jolloin saadaan suhteellinen säästö höyryn tuotannon energiankulutuksesta.

$$\frac{Q_{\text{lauhde}}}{Q} = \frac{335 \text{ kJ}}{2678 \text{ kJ}} = 12,5 \%$$

Laskuesimerkissä saatu 12.5 % on merkittävä osuus höyryn tuotantoon kuluvasta energiasta. Lauhteen lämpöenergia ja höyryn kokonaisenergia paineen suhteen on esitetty kuviossa 1.



Kuvio 1. Lauhteen ja höyryn lämpöenergia paineen suhteen. (Spirax Sarco Ltd. 2024, Condensate recovery)

Lauhteen lämpöenergian määrä höyryn kokonaisenergiasta on riippuvainen höyryn paineesta. 1 bar paineessa lauhteen lämpöenergia höyryn kokonaisenergiasta on 18 %, kun taas 14 bar paineessa se on jopa 30 % (Spirax Sarco Ltd. 2024, Condensate recovery). Paineen noustessa höyryn höyrystymislämpö laskee ja lauhteen nestelämpö nousee, jolloin lauhteen uudelleenkäytön hyöty kasvaa. Jotta lauhde voidaan palauttaa kuumempaan, täytyy sen painetta nostaa uudelleen höyrystymisen estämiseksi. Paineellinen lauhdeputkisto ei kuitenkaan ole aina mahdollista toteuttaa, koska sillä voi olla suuri vaikutus prosessin toimintaan.

5 Paisuntahöyry

5.1 Paisuntahöyry

Paisuntahöyryllä tarkoitetaan höyryä, joka syntyy, kun kuumen lauhteen paine laskee ja lauhde alkaa uudelleen höyrystyä. Veden höyrystymisen vaikuttavat lämpötila ja vallitseva paine. Vesi höyrystyy jopa huonelämpötilassa, jos paine on tarpeeksi matala. Lauhdeputkistot ovat usein normaalissa ilmanpaineessa tai selvästi matalammassa paineessa kuin höyryputket. Lauhteen siirtyessä matalapaineiseen lauhdeputkistoon osa lauhdesta höyrystyy uudelleen. (Spirax Sarco Ltd. 2024, Flash Steam.)

Normaalissa ilmanpaineessa ei voi olla vettä, jonka lämpötila on yli 100°C. Paineistettunakin vesi höyrystyy, esimerkiksi 150°C lauhde höyrystyy, kun putkiston paine on alle 3.7 bar. Lauhteesta syntynyt paisuntahöyry on yhtä käyttökelpoista kuin höyrykehittimellä tuotettu höyry. (Teollisuuden höyry- ja lauhdejärjestelmät 1978, Osa 2 73.) Paisuntahöyryä syntyy myös höyryputkistossa ja höyrykehittimessä, jos niiden paine laskee, eikä tällöin voi erottaa, mikä on paisuntahöyryä ja mikä ei. Paisuntahöyry nimitystä kuitenkin käytetään usein vain höyrystä, joka syntyy lauhteenpoistimen jälkeen. (Spirax Sarco Ltd. 2024, Flash Steam.)

Paisuntahöyryllä on hieman huono maine eikä sen potentiaalia ole monesti otettu huomioon. Paisuntahöyryssä on merkittävän paljon käyttökelpoista energiaa, joka liian usein poistetaan järjestelmästä ”puhaltamalla katolle” hukkaan. Kuitenkin nykyään melkein kaikki nykyaikaiset lauhdejärjestelmät hyödyntävät paisuntahöyryä. (Spirax Sarco Ltd. 2024, Lauhteenpoistimet.) Koska paisuntahöyry syntyy matalapaineisessa lauhdejärjestelmässä, on sen paine sama kuin lauhteella. Siksi paisuntahöyryä käytetään matalapaineisissa höyrysovelluksissa kuten lämmityksessä. Jokainen kilogramma paisuntahöyryä, joka käytetään hyödyksi vähentää höyrykehittimen tuottaman höyryn tarvetta saman verran. Paisuntahöyryn hyötykäyttöön pätevät samat taloudelliset- sekä ympäristösyöt kuin lauhteelle. (Spirax Sarco Ltd. 2024, Flash Steam.)

5.2 Paisuntahöyryn määrä

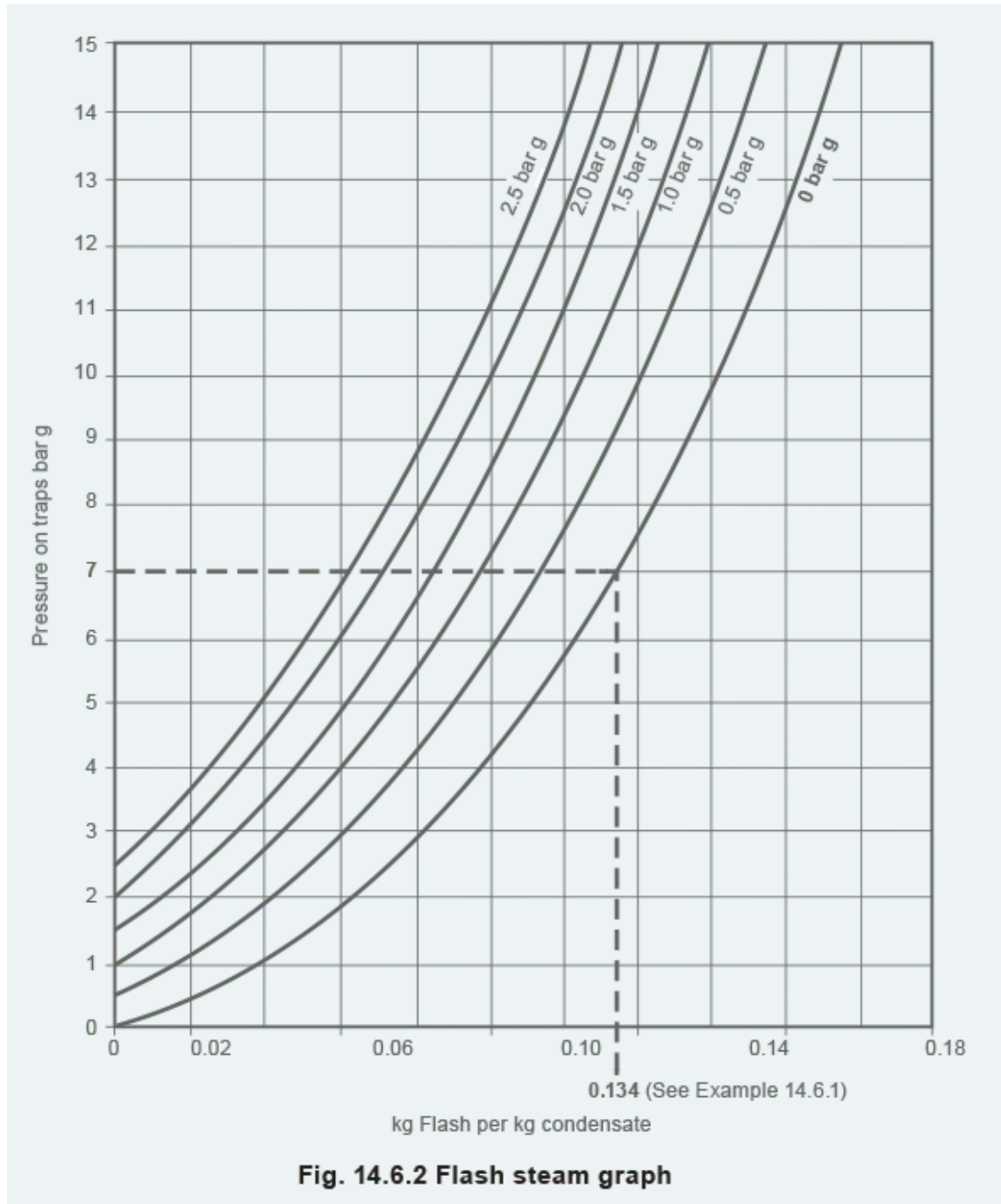
Syntyvän paisuntahöyryn määrä riippuu paineen muutoksesta sekä lauhteen lämpötilasta. Lauhde on samassa lämpötilassa ja paineessa kuin höyry, kun lauhde menee lauhteenpoistimeen. Lauhteenpoistimen tyypistä riippuen lauhteen lämpötila joko laskee tai pysyy samana lauhteen siirtyessä lauhdeputkistoon. (Spirax Sarco Ltd. 2024, Flash Steam.)

Kylläisenhöyryn taulukoista liite 1. voidaan lukea, että lauhteen suhteellisen paineen ollessa 2 bar, on lauhteen lämpöenergia 561 kJ/kg. Lauhteen, joka on normaalissa ilmanpaineessa eli 0 bar suhteellisessa paineessa sisältää 419 kJ/kg lämpöenergiaa. Paineen laskiessa lauhteessa on 142 kJ/kg ylimääräistä lämpöenergiaa, joka höyrystää lauhdetta.

Normaalissa ilmanpaineessa veden höyrystymislämpö on 2256 kJ/kg, jolloin ylimääräisen lämmön höyrystämä höyryn määrä on

$$\frac{142 \text{ kJ/kg}}{2256 \text{ kJ/kg}} = 0,063$$

Lauhteesta muodostuvan höyryn osuus on noin 6 % lauhteen massasta, kun suhteellinen paine laskee 2 baarista 0 baariin. Muodostuvan höyryn osuuteen vaikuttaa paineen muutos. Muodostuvan paisuntahöyryn määrä voidaan lukea kuvaajasta 2. kun lauhteen lämpötila pysyy vakiona lauhteen poistimessa.



Kuvio 2. Paisuntahöyryn määrä. (Spirax Sarco Ltd. 2024, Flash Steam.)

Lauhde voi olla myös alijäähtynyttä. Alijäähtymisellä tarkoitetaan tässä sitä, että lauhteen lämpötila on alle paineen mukaisen höyrystymislämpötilan. Termostaattinen lauhteenpoistin kuten bimetalliset lauhteenpoistimet tai kiinteän avautumislämpötilan lauhteenpoistimet voidaan asettaa poistamaan lauhdetta, joka on jäähtynyt kyllästymislämpötilasta halutun verran. Kiinteän

avautumislämpötilan lauhteenpoistimella voidaan asettaa poistettavan lauhteen lämpötilaksi jopa vain 60°C. (Spirax Sarco Ltd. 2024, Lauhteenpoistimet.) Alijäähtynyt lauhde muodostaa vähemmän paisuntahöyryä kuin kyllästymispisteessä oleva lauhde. Lauhde voidaan myös jäähdyttää alle kyllästymislämpötilan, jolloin paisuntahöyryä ei synny lainkaan. (Spirax Sarco Ltd. 2024, Flash Steam.)

Nostamalla lauhdeputken painetta voidaan estää paisuntahöyryn syntymistä. Se ei kuitenkaan usein ole mahdollista sillä useimmat lauhteenpoistimet ja höyryprosessit vaativat toimiakseen paine-eron höyryputken ja lauhdeputken välillä. Jos lauhdeputken paine on korkeampi kuin höyryputken, voidaan lauhteenpoistimeksi valita pumppu-lauhteenpoistin (Spirax Sarco Ltd. 2024, Condensate removal).

5.3 Paisuntahöyryn hyödyntäminen

Paisuntahöyryä voidaan hyödyntää joko samassa prosessissa tai erillisessä prosessissa höyryn kanssa. Kun paisuntahöyryä käytetään samassa prosessissa, se on usein samassa vaiheessa saatavuuden ja kulutuksen suhteen. Tällainen prosessi on esimerkiksi ilmanlämmittimen tuloilman esilämmitys. Kun lämmitintä käytetään, syntyy lauhdetta, josta saadaan paisuntahöyryä. Tällöin paisuntahöyry voidaan hyödyntää esilämmittämään prosessin tuloilmaa. Paisuntahöyryn kulutus on tällöin samassa vaiheessa lauhteen synnyn kanssa. Mitä suuremmalla teholla lämmitintä käytetään, sitä enemmän syntyy paisuntahöyryä, joka hyödynnetään samaan aikaan samassa prosessissa.

Aina paisuntahöyryn hyödyntäminen prosessissa ei ole mahdollista, jolloin sitä voidaan hyödyntää toisessa prosessissa. Paisuntahöyry voidaan hyödyntää, vaikka tilojen lämmitykseen. Tämä on hyvä keino, kunnes paisuntahöyryn tuotto lakkaa lauhtetta tuottavan prosessin takia tai kun tilojen lämmitystarve pienenee kesällä. Talviaikaan ylimääräisen paisuntahöyryn hyödyntäminen tilojen lämmittämiseen on järkevää, mutta kesällä lämmitystarve voi olla pienempi kuin

paisuntahöyryn sisältämä lämpöenergia. Tällöin paisuntahöyry täytyy käyttää johonkin muuhun prosessiin tai puhaltaa ulos järjestelmästä.

6 Lauhteen jäähdytys lämmönvaihtimella

6.1 Lämmön talteenotto

Lauhteella on lämpöenergiaa, joka kannattaa käyttää hyödyksi, jos lauhdetta ei käytetä uudelleen ja se johdetaan prosessista viemäriin. Lauhteen lämmöntalteenotto on energiatehokkuuden kannalta järkevää, mutta myös monesti vaadittava toimenpide, sillä lauhdetta ei voi monesti päästää viemäriin ilman jäähdyttämistä.

Lauhde on kuumaa vettä, joka on käsitelty höyrykattialle sopivaksi. Lauhdeputkiston materiaalista ja kunnosta riippuen lauhteen laatu voi olla erittäin korkea ja vastata tislattua vettä.

Lauhteen lämmöntalteenotto voidaan toteuttaa samalla tavalla kuin minkä tahansa kuuman nesteen. Lämmöntalteenotossa käytetään yleisimmin jonkinlaista lämmönvaihdinta. Lämmönvaihdin on laite, joka mahdollistaa lämmön siirtämisen kahden eri lämpötilassa olevan fluidin välillä, usein ilman aineiden sekoittumista, jolloin lämmönsiirtyminen perustuu johtumiseen tai lämpösäteilyyn (Thulukkanam 2013, 1).

Lauhteen lämpö voidaan siirtää kiinteistön sisäiseen lämpöverkkoon, jota käytetään joko toisessa prosessissa tai kiinteistön lämmitykseen. Joissain tapauksissa yritys voi myydä hukkalämpöä viereisille yrityksille tai kaukolämpöverkkoon. Lämmön talteenottoa suunniteltaessa on huomioitava, kuinka paljon hukkalämpöä syntyy ja mikä on yrityksen kapasiteetti hyödyntää sitä. Tilojen lämmityksen lämmöntarve laskee kesällä huomattavasti, jolloin prosessista saatavaa hukkalämpöä saattaa olla enemmän kuin järjestelmä pystyy kuluttamaan. Ei kannata myöskään aliarvioida lämmön käyttömahdollisuutta, jos hukkalämmön määrä onkin vähäinen. Esimerkiksi lämpöpumppua avuksi käyttäen, jopa haaleasta vedestä voidaan ottaa lämpöä talteen.

Lauhteen jäähdyttäminen lämpöverkon avulla on energiatehokkuuden kannalta erittäin hyvä vaihtoehto. On kuitenkin olemassa riski, että yrityksen lämpöverkko ei pysty vastaanottamaan tarpeeksi lämpöenergiaa, jolloin täytyy olla varajärjestelmä, jolla jäähdytys toteutetaan.

6.2 Vapaa jäähdytys

Vapaa jäähdytyksessä jäähdyttävän aineena on joko ilma tai vesistöjen rannalla voidaan hyödyntää kylmää vettä. Vapaa jäähdytyksessä ei käytetä kylmäaineita tai kompressoreja, vaan jäähdytys tapahtuu luonnollisesti hyödyntäen ympäristön alhaisempaa lämpötilaa. Tällöin jäähdytyksestä ei tarvitse maksaa mitään. Jäähdytykseen voidaan käyttää neste-ilma-lämmönvaihtimia tai jäähdytystorneja. Vapaa jäähdytys on yksinkertaisimmillaan ulos sijoitettu neste-ilma-lämmönvaihdin, jossa voi olla puhaltimet parantamassa ilman virtausta lämmönvaihtimen läpi.

Vapaa jäähdytystä ei voi käyttää suoraan lauhteeseen, sillä talvella on riski, että lauhde jäähtyy liikaa ja jäätyy. Lauhteen jäähdyttämiseen täytyy käyttää lämmönvaihdinta ja vesi-glykoliliuosta, joka jäähtyy ulkoilmassa vapaa jäähdytyksellä. Vapaa jäähdytystä ei voi suositella lauhteen jäähdyttämiseen, sillä hukkalämmölle on usein paljon parempaa käyttöä.

7 Lauhdejärjestelmän ongelmat ja suunnittelu

lähtökohdat

7.1 Lauhdejärjestelmän ongelmat

Tämänhetkisessä toteutuksessa höyryjärjestelmässä syntyvä lauhde johdetaan viemäriin. Lauhdevesiä ei kerätä kootusti erilliseen lauhdesäiliöön vaan ne on johdettu lauhteenpoistinta lähimpänä olevaan lattiakaivoon. Ennen viemäröintiä lauhdevesi täytyy jäähdyttää, sillä viemärit eivät kestä jatkuvaa kuumaa veden virtausta.

Lauhteen jäähdytys tapahtuu putkilämmönvaihtimella, jossa jäähdyttävänä aineena toimii kylmä vesijohtovesi. Lämmönvaihtimessa lämmennyt vesijohtovesi sekä jäähtynyt lauhde johdetaan viemäriin.

Tuotantolaitoksen lauhdejärjestelmä on alle vuoden vanha, mutta sen suunnittelussa on käynyt virhearvio syntyvän lauhteen ja sen jäähdyttämiseen kuluvan jäähdytysveden. Tuotantolaitoksen vedenkulutus on noussut merkittävästi uusien lauhdejärjestelmien käyttöönoton jälkeen. Toteutustapa tuhlaa käyttökelpoista vesijohtovettä sekä huomattavia määriä lämpöenergiaa, joka voitaisiin hyötykäyttää.

Koska höyryä tarvitaan laajasti ympäri tuotantolaitosta ja höyryn käyttöpisteitä on useita kymmeniä, on myös lauhteen poistimia lukuisia. Uutta lauhteenkäsittelyä suunniteltaessa ei ole huomioitu riittävässä määrin viemäreiden kuntoa. Lauhteet on johdettu ilmastointikonehuoneissa sijaitseviin lattiakaivoihin. Osa viemäreistä on ollut käyttämättömänä vuosikymmeniä ja kun niihin on alettu johtamaan lämmintä vettä, on havaittu pieniä vuotoja sekä riski suurempiin vuotoihin on noussut.

7.2 Suunnittelun lähtökohdat

Opinnäytetyön tarkoituksena on esittää lauhteen käsittelyyn ratkaisu, joka säästäisi vettä ja energiaa.

Opinnäytetyön kohteessa lauhteen uudelleenkäyttö ei ole mahdollista siihen vaadittavan lauhdeverkoston laajuuden takia. Siksi lähtökohtana on, että lauhde tavalla tai toisella johdetaan viemäriin. Lauhde täytyy jäähdyttää ennen viemäriä sekä lauhteen lämpö pitäisi saada hyödynnettyä mahdollisuuksien mukaan. Lauhde jäähdytetään tällä hetkellä putkilämmönvaihtimella, mutta kerätty lämpö johdetaan viemäriin talteenoton sijaan.

Uuden lauhdejärjestelmän suunnittelua hankaloittaa se, että höyryjärjestelmä on avoin ja sen toiminta on riippuvainen vuodenajasta ja säästä. Kostutushöyryä kulutetaan kostutustarpeisiin huomattavasti enemmän talvella kuin kesällä. Kesällä on pitkiäkin jaksoja, kun kostutushöyryn säätöventtiilit pysyvät kiinni eikä kostutushöyryä kuluteta. Höyrylinjassa on kuitenkin vakiopaine ja höyryä tuotetaan linjaston paineen mukaan. Kesällä, kun höyryn säätöventtiilit ovat kiinni, eikä ole virtausta, höyry lauhtuu putkistossa. Kesällä on siis suurin suhteellinen lauhteen tuotto.

Lauhteen tuotto ei ole säännöllistä, joten mikään prosessi ei voi olla riippuvainen lauhteesta. Lauhteen jäähdytyksen täytyy mukautua lauhteen määrän mukaan.

8 Lauhteen käsittelyn parannus

8.1 Lauhteen lämmön johtamien kaukolämpöverkkoon

Tehdas käyttää lämmityksessään kaukolämpöä. Kaukolämmön kulutusta mitataan virtauksesta sekä meno- ja paluulämpötilan erotuksesta. Pienentämällä lämpötilojen erotusta saadaan taloudellista säästöä lämmityskustannuksista.

Mielestäni paras tapa jäähdyttää lauhdetta hyödyntämällä kaukolämpöä on kerätä lauhde lauhdesäiliöön, josta lauhde johdettaisiin lämmönvaihtimeen, jonka toisiopuolelle on kytketty kaukolämmön paluulinja.

Jotta lauhteen jäähdytys olisi tehokasta ja kontrolloitua on lauhdesäiliö hyödyllinen lisä järjestelmään. Lauhdesäiliöön kerätään lauhdetta laajemmalta alueelta monesta eri järjestelmästä. Yksittäisestä lauhteenpoistimesta tulee lauhdetta usein purkauksina. Säiliö tasaa lauhteen virtausta ja parantaa lauhteen virtauksen hallintaa. Automaatiolla kontrolloidaan lauhteen virtausta lämmönvaihtimeen niin, että lauhde luovuttaa lämpöä mahdollisimman paljon.

Toimeksiantajan automaatiojärjestelmästä voidaan tarkastella kaukolämpöverkon lämpötiloja. Kaukolämmön paluulämpötila on tasaisesti noin 30°C. Vaikka virtausta säädellään, on kaukolämpöverkossa virtaavan veden määrä erittäin suuri lauhteen määrään verrattuna, joten sillä on hyvä jäähdytysteho. Lauhteen lämpötilaksi voidaan olettaa noin 90°C, jolloin lämpötilaero lauhteella ja jäähdyttävällä nesteellä eli kaukolämmöllä on 60°C. Kun lauhde on luovuttanut lämpönsä lämmönvaihtimessa, se johdetaan viemäriin mahdollisimman viileänä.

Kaukolämmön putkistoa muutettaessa on huomioitava toimittajan omistama putkiston osuus. Kaukolämmön toimittajan putkistoon tai laitteisiin ei saa tehdä muutoksia, mutta yrityksen puoleiseen osaan voidaan lisätä lämmönvaihdin lauhteen jäähdytystä varten.

8.2 Paisuntahöyryn käsittely

Säiliön toinen tarkoitus on paisuntahöyryn erottelu. Lauhteen siirtyessä paineettomaan järjestelmään osa siitä höyrystyy uudelleen. Paisuntahöyryn erotus onnistuu kätevästi säiliössä. Paisuntahöyrystä otetaan energiaa talteen lämmönvaihtimella joko kaukolämpöverkon paluuseen tai lämpimään käyttöveteen. Järjestelmän energiatehokkuuden kannalta on erittäin tärkeää, että paisuntahöyryn energia otetaan talteen.

8.3 Ratkaisun haasteet

Tämän ratkaisun haasteena on tehtaan koko ja höyryverkon laajuus. Tehtaassa on 3 lämmönjakokeskusta, jossa kaukolämpö luovuttaa lämpöä kiinteistön käyttöön. Tämä tarkoittaa sitä, että jos kaikki lauhteet jäähdytetään kaukolämmöllä, on lauhdeverkoston katettava koko tehdas. Tällaisen lauhdeverkoston rakentaminen on kallista sekä haastavaa ja siksi sellaista ei ole aiemmin rakennettu. On kuitenkin syytä harkita osittaisen lauhdeverkoston rakentamista, joka kattaisi eniten lauhdetta tuottavat järjestelmänosat. Lisä haastetta tuo myös se, että lauhdejärjestelmät ovat paineettomia eli lauhteiden täytyy virrata painovoimaisesti tai järjestelmään täytyy lisätä pumppuja, jolla lauhde saadaan liikkumaan. Lauhdejärjestelmän paineistaminen ei ole mahdollista, sillä se vaatisi koko höyryjärjestelmän uudelleen suunnittelua, kuten höyryn paineen nostoa.

9 Lauhteen määrä

9.1 Lauhteen määrän arviointi

Lauhteen määrän arviointiin käytettiin RO-laitteelta höyrykehittimien syöttövedeksi virtaavan veden määrää. RO-laite eli käänteisosmoosilaitte on osa syöttöveden esikäsittelyä ja se poistaa veteen liuenneita ioneja ja partikkeleita.

Toimeksiantajan kiinteistöautomaatiojärjestelmästä saatiin veden kulutuksen kuvaaja sekä arvot taulukkomuodossa. Kulutusta mitataan yksikössä litraa tunnissa. Kulutusta mitataan viiden sekunnin välein, mutta pitkän aikavälin tarkastelussa viiden sekunnin mittausväli ei ole tarkoituksen mukainen. Siksi lauhteen määrän arvioinnissa käytettiin tunnin keskiarvoa. Tämä helpottaa datan käsittelyä, koska veden kulutuksen yksikkö on litraa tunnissa ja mittaus väli on yksi tunti, jolloin voidaan kumulatiivinen kulutus laskea suoraan keskiarvojen summana.

Höyrykehittimien vedenkulutuksen mittaus on aloitettu marraskuun lopulla 2023. Tämän takia opinnäytetyön tekohetkenä keväällä 2024 mittaus on ollut päällä vasta kolme kokonaista kuukautta, jonka takia otanta höyryn tuotosta on suppea. Mittaus on talvikuukausilta, jolloin höyryn kulutus on suurinta ja lauhtuminen pienintä eikä täten kuvasta koko vuoden höyryn tuotantoa.

Tuotantolaitoksen höyryjärjestelmä on avoin, joka tarkoittaa, että höyryä poistuu järjestelmästä. Suljetussa järjestelmässä kaikki tuotettu höyry lauhtuu ja palautuu höyrykehittimelle. Lauhteen määrän arvioinnissa täytyy arvioida, kuinka paljon höyryä kulutetaan kostutusprosessissa eli kuinka paljon höyryä poistuu järjestelmästä ja mikä osa höyrystä lauhtuu putkistossa. Koska kostutusprosessi kuluttaa höyryä tarpeen mukaan voi höyryn kulutus vaihdella todella paljon vain muutaman tunnin sisällä.

Lauhteen määrän arvioimiseksi täytyy määrittää lauhtumisprosentti eli mikä prosentuaalinen osa tuotetusta höyrystä lauhtuu putkistossa. Lauhtumisprosentin määrittämistä varten pyydettiin arvioinnissa Spirax Sarcolta

tekniistä neuvontaa. Höyrykehittimen syöttöveden määrästä laskettu lauhteen määrä on esitetty taulukossa 1.

Lauhde			
Kuukausi ▼	Lauhde l ▼	Lauhde m ³ ▼	keskiarvo kg/h ▼
Joulukuu	231934,72	231,93	291,17
Tammikuu	248233,65	248,23	311,63
Helmikuu	204239,09	204,24	274,08
Yhteensä	684407,46	684,41	292,29

Taulukko 1. Lauhteen määrä.

Lauhteen lauhtumisprosentiksi arvioitiin 30 % eli höyryn tuotantoon kuluvasta vedestä 30 % muuttuu lauhteeksi. Kiinteistöautomaatiosta saadusta datasta voitiin laskea veden kulutuksen keskiarvo tuntia kohden, jonka avulla määritettiin lauhtumisen keskiarvo tuntia kohden. Lauhteen lämpötila on sama kuin höyryllä eli 133°C kun höyryn paine on 2 bar suhteellista painetta. Lauhteen lämpötilassa 133°C käytettiin veden tiheyttä 965 kg/m³ lauhteen määrän muuttamiseksi tilavuusyksiköstä massayksikköön.

Lauhteen määrää verrattiin lauhteenpoistimien määrään. Järjestelmässä on 98 lauhteenpoistinta, jolloin yhden poistimen lauhteen määräksi saadaan keskiarvolta 3,0 kg/h poistinta kohden. Todellisuudessa lauhteen määrä vaihtelee paljon poistimien välillä. Lauhteen määrään vaikuttaa höyryputken pituus, laitteet, eristys ja ympäröivän ilman lämpötila.

9.2 Spirax Sarco laskentatyökalu

Lauhteen määrän arvioinnissa hyödynnettiin Spirax Sarcon laskentatyökalua, jolla voidaan määrittää muun muassa lauhtumisen määrä putkessa lähtötietojen perusteella.

Lähtötietoina tarvitaan käytettävä putkistandardi, putkikoko, putkenpituus, höyrynpaine, ympäristön lämpötila sekä putken sijainti. Käyttöönoton

lämmitys aika täytyy määrittää, kun halutaan tietää käyttöönotosta ja putkiston lämmityksestä syntyvän lauhteen määrä.

Koko höyryputkistossa lauhtuvan lauhteen määrän määrittäminen tällä laskentatyökalulla olisi tässä kohteessa erittäin työlästä ja epätarkkaa, koska tehtaalla putkisto on todella laaja ja monihaarainen sekä koostuu monista eri putkikoista eri eristyspaksuuksilla. Tehtaalla on kuitenkin yksi yhtenäinen runkolinja, jonka lauhteen määrä tietyissä olosuhteissa voidaan laskea laskentatyökalulla.

Runkolinjan pituus laskettiin isometristä piirustuksista ja linjan pituudeksi tuli 265 metriä. Linjan nimellishalkaisija on DN125 ja eristeen paksuus 120 mm. Runkolinja kulkee pääsääntöisesti tehtaalla katolla, joten laskentaa varten määritettiin keskilämpötila Ilmatieteen laitoksen kuukausitilastojen avulla. Kolmen kuukauden lämpötilan keskiarvoksi saatiin -5°C .

Pipe Standard	<input type="text" value="ANSI - Schedule 40"/>
Nominal Pipe Size	<input type="text" value="5 in, 125 mm"/>
Equivalent Pipe Length	<input type="text" value="265"/> <input type="text" value="m"/>
Steam Pressure	<input type="text" value="2"/> <input type="text" value="bar gauge"/>
Ambient Temperature	<input type="text" value="-5"/> <input type="text" value="°C"/>
Start Up Time	<input type="text" value="10"/> <input type="text" value="min"/>
Choose Pipe Location	<input type="radio"/> Indoor <input type="radio"/> Outdoor Sheltered <input checked="" type="radio"/> Outdoor Exposed
	<input type="button" value="Calculate"/> <input type="button" value="Reset"/> <input type="button" value="Print"/>

Start Up Condensing Rate

Start Up Condensing Rate	<input type="text" value="1087.38"/> <input type="text" value="kg/h"/>
Minimum Start Up Valve Capacity	<input type="text" value="30.0723"/> <input type="text" value="Kv"/>
Minimum Number of Traps Required	<input type="text" value="8.00000"/>

Running Condensing Rate

Un-insulated Pipe	<input type="text" value="1031.12"/> <input type="text" value="kg/h"/>
50mm Insulation	<input type="text" value="88.6468"/> <input type="text" value="kg/h"/>
75mm Insulation	<input type="text" value="66.8632"/> <input type="text" value="kg/h"/>
100mm Insulation	<input type="text" value="54.7238"/> <input type="text" value="kg/h"/>

Running Heat Loss

Un-insulated Pipe	<input type="text" value="619538"/> <input type="text" value="W"/>
50mm Insulation	<input type="text" value="53262.3"/> <input type="text" value="W"/>
75mm Insulation	<input type="text" value="40174.0"/> <input type="text" value="W"/>
100mm Insulation	<input type="text" value="32880.1"/> <input type="text" value="W"/>

Kuva 5. Runkolinjan lauhteenmäärä (Spirax Sarco, Start Up and Running Losses).

Laskentaohjelmassa ei ole laskentaa 120 mm eristykselle, joten lauhteen määrä pyöristetään alaspäin 50 kg/h paremman eristyksen takia. Laskennalla pyritään määrittämään jatkuva lauhteen tuotto, joten käyttöönottoajalla tai putkiston lämmittämisestä syntyvällä lauhteen määrällä ei tässä tapauksessa ole merkitystä.

Runkolinjassa on yhteensä 12 kpl lauhteenpoistimia, jolloin yhden poistimen lauhteen määräksi tulee 4,2 kg/h. Määrä on hyvin linjassa arvion kanssa ja oletetusti hieman suurempi, koska ulkona olevassa höyryputkessa syntyy lämpötilaeron takia enemmän lauhdetta.

9.3 Laskennan ja arvioinnin yhteneväisyys

Lauhteen määrän arvioinnissa keskimääräiseksi lauhteen määräksi arvioitiin noin 290 kg/h. Tästä määrästä voidaan vähentää runkolinjassa syntynyt lauhde, jolloin jäljelle jää noin 240 kg/h lauhdetta. Tämä lauhde syntyy putkiston haaroissa ja käyttöpisteillä. Haarojen linjavesitykset on toteutettu höyryn käyttöpisteiden yhteydessä. Höyryn käyttöpisteillä on prosessia varten kaksi lauhteenpoistinta. Voidaan siis todeta, että jokaisella höyryn käyttöpisteellä on yhteensä keskimäärin 3 lauhteenpoistinta joitakin poikkeuksia lukuun ottamatta. Höyryn käyttöpisteitä on yhteensä 26 kpl, joten lauhteenpoistimia on yhteensä 78 kpl. Jos jäljelle jäänyt lauhteen määrä jaetaan lauhteenpoistimille tasaisesti, on lauhteen määrä 3,1 kg/h lauhteenpoistinta kohden.

Lauhteenmäärä on erittäin lähellä arvioitua lauhteen määrää. Lukuja tarkasteltaessa on kuitenkin muistettava, ettei lauhde todellisuudessa jakaudu tasaisesti lauhteenpoistimien välillä, vaan lauhdetta syntyy eri määriä olosuhteiden ja putkiston ominaisuuksien perusteella.

10 Lauhteesta saatava energia

Lauhteesta saatava energia						
Kuukausi	Lauhde m ³	Lauhteen energia MWh	Paisuntahöyry kg	Paisuntahöyryn energia MWh	Yhteensä MWh	
Joulukuu	231,93	13,02	12997,62	8,15	21,17	
Tammikuu	248,23	13,94	13911,01	8,72	22,66	
Helmikuu	204,24	11,47	11445,56	7,17	18,64	
Yhteensä	684,41	38,43	38354,19	24,04	62,47	

Taulukko 2. Lauhteesta saatava energia

10.1 Paisuntahöyry

Kun lauhteesta otetaan energiaa talteen, on ehdottomasti hyödynnettävä paisuntahöyryä. Höyryn lämpöenergia veteen nähden on moninkertainen massan suhteen. Paisuntahöyryä käsittelevässä kappaleessa laskettiin tehtaalla järjestelmässä syntyvän paisuntahöyryn höyrystymisprosentiksi 6 %. Samaa höyrystymisprosenttia käytettiin laskemaan paisuntahöyryn määrää. Höyrystymisprosentti tarkoittaa, että 6 % lauhteen massasta höyrystyy, kun lauhde siirtyy paineellisesta höyryputkesta paineettomaan lauhdeputkeen.

Höyrytaulukosta voidaan lukea höyryn höyrystymislämpö normaalissa ilmanpaineessa, joka on 2256 kJ/kg. Höyrystä saatava lämpöenergia voidaan laskea lämpöenergiankaavalla (Mäkelä 2021, 107, kaava 8)

$$Q = mr$$

jossa

Q = höyrystymislämpöenergia

m = höyryn massa

r = höyrystymislämpö

Kertomalla paisuntahöyryn massa höyrystymislämmöllä saadaan paisuntahöyryn energia, joka voidaan ottaa talteen. Energiämäärien vertailun vuoksi taulukossa energian yksikkö on muutettu yksiköstä kJ yksikköön MWh.

10.2 Lauhteen energia

Lauhteen energian määrittämiseksi käytettiin lämpötilaa, jossa lauhde on lauhdesäiliössä, kun siitä on eroteltu paisuntahöyry. Lauhteen lämpötilaksi arvioitiin 90°C ja lauhteen lämpötilaksi jäädyttämisen jälkeen valittiin tavoite lämpötila 40°C. Massan määrittämistä varten lauhteen tiheyden arvona käytettiin $965 \frac{kg}{m^3}$. Lauhteen energian laskemiseen käytettiin lämpöenergiankaavaa (Mäkelä 2021, 107, kaava 5)

$$Q = mc\Delta T$$

Jossa

Q = lämpöenergia

m = lauhteen massa

c = lauhteen ominaislämpökapasiteetti

ΔT = lämpötilojen erotus

Tällä laskukaavalla saadaan lauhteen lämpöenergia yksikössä kJ. Jotta energian määrä olisi paremmin havainnollistettavissa muutettiin se yksikköön MWh.

10.3 Lauhteen jäädytykseen kuluva vesi

Lauhteen jäädyttämiseen tämänhetkisillä lämmönvaihtimilla kuluvan veden määrä voidaan laskea, kun tiedetään lauhteen määrä, lämpötila ennen ja jälkeen lämmönvaihtimen sekä jäädytysveden lämpötilat. Tämänhetkisessä jäädytysratkaisussa lauhde virtaa suoraan lämmönvaihtimeen ilman paisuntahöyryn erottelua tai lauhdesäiliötä, joten lauhteen lämpötila on sama kuin höyryllä eli 133°C. Viemäriin virtaavan veden tavoitelämpötilaksi on määrätty 40°C. Jäädytykseen käytetyn veden lämpötilaksi oletetaan 10°C. Jäädytys veden oletetaan lämpiävän lauhteen kanssa samaan lämpötilaan. Jäädytysveden määrän laskemiseksi sovelletaan energian säilymlakia ja

oletetaan, että energiaa ei poistu systeemistä. Jäähdytysveden määrän laskemiseksi käytetään yhtälöä:

$$m_{\text{lauhde}} * c * \Delta T_{\text{lauhde}} = m_{\text{vesi}} * c * \Delta T_{\text{vesi}}$$

jossa

m_{lauhde} = lauhteen massa

c = veden ominaislämpökapasiteetti

ΔT_{lauhde} = lauhteen lämpötilanmuutos

m_{vesi} = jäähdytysveden massa

ΔT_{vesi} = jäähdytysveden lämpötilanmuutos

Yhtälöstä voidaan supistaa ominaislämpökapasiteetti, koska se on yhtälön molemmin puolin sama.

$$m_{\text{lauhde}} * \Delta T_{\text{lauhde}} = m_{\text{vesi}} * \Delta T_{\text{vesi}}$$

$$\frac{m_{\text{vesi}}}{m_{\text{lauhde}}} = \frac{\Delta T_{\text{lauhde}}}{\Delta T_{\text{vesi}}}$$

$$\frac{m_{\text{vesi}}}{m_{\text{lauhde}}} = \frac{(133^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C})}{(40^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C})} = \frac{50^{\circ}\text{C}}{30^{\circ}\text{C}} \approx 3,1$$

Lauhteen ja jäähdytysveden suhde on noin 3,1 eli jäähdytysvettä kuluu 3,1 kertaisesti lauhteen massan verran. Syöttövedellä ja jäähdytysvedellä on sama lämpötila, joten niiden tiheys on sama.

10.4 Veden kulutus

Vedenkulutus			
Kuukausi	Syöttövesi m3	Jäähdytysvesi m3	Kokonaiskulutus m3
Joulukuu	773,12	719,00	1492,11
Tammikuu	827,45	769,52	1596,97
Helmikuu	680,80	633,14	1313,94
yhteensä	2281,36	2121,66	4403,02

Taulukko 3. Veden kulutus.

Höyry- ja lauhdejärjestelmän veden kulutus on yllättänyt toimeksiantajan ja siksi määritettiin koko järjestelmän veden kulutus. Höyrykehittimien syöttöveden määrä saatiin kiinteistöautomaatiojärjestelmästä ja jäähdytysveden määrä on laskettu kertomalla arvioitu lauhteen määrä kertoimella 3,1. Kokonaiskulutus on syöttöveden ja jäähdytysveden summa. Koska lauhteen määrä on arvio, tekee se myös kokonaiskulutuksesta arvion veden kulutuksesta.

11 Loppuluku

Tämän opinnäytetyön lopputuloksena saatiin esitettyä vaihtoehtoinen tapa toteuttaa lauhteenkäsittely, jolla säästetään vettä ja energiaa. Vaihtoehtoisia tapoja, jotka täyttäsivät molemmat kriteerit löytyi todella vähän. Lauhteen määrä ei seuraa kiinteistön tarvitsemaa lämmitystarvetta eikä tehtaalla ole muita prosesseja, jotka voisivat hyödyntää lämpöenergiaa siinä määrin, kun lauhteesta olisi saatavilla. Kaukolämmön hyödyntäminen oli ainoa käytännöllinen vaihtoehto, johon lauhteen lämpöä voisi siirtää siten, että siitä olisi tehtaalle hyötyä.

Työssä esitetty tapa hyödyntää lauhteen lämpö kaukolämpöverkon lämmittämiseen on haastava ja kallis järjestelmä toteuttaa ja siksi toimeksiantajan on syytä tarkastella esimerkiksi vain paisuntahöyryn hyödyntämistä. Paisuntahöyryssä on paljon käyttökelpoista energiaa, jonka hyödyntäminen esimerkeiksi lämpimän käyttöveden esilämmittämiseen toisi pieniä energiasäästöjä. Järjestelmä voisi kerätä vain muutaman osaston lauhteet tai paisuntahöyryt yhteen, josta lämpöä otettaisiin talteen. Tällaista paisuntahöyryn hyödyntämistä olisi pitänyt harkita tai tehdä varauksia tulevaisuuteen jo tämänhetkistä järjestelmää suunniteltaessa.

Lopuksi työssä saatiin määritettyä suuntaa antavia lukuja mahdollisista vesi- ja energiasäästöistä. Työn toimeksiantaja voi hyödyntää tätä opinnäytetyötä arvioimaan mahdollisten muutosten hyötyjä ja kannattavuutta. Opinnäytetyössä ei oteta kantaa muutosten taloudelliseen kannattavuuteen, vaan se jää toimeksiantajan arvioitavaksi.

Lähteet

Debasree Ghosh, Lecture notes on Heat Transfer, Module IV: Heat Exchanger, Koulutusmateriaali verkkodokumentti (viitattu 9.1.2024) saatavilla https://www.bitmesra.ac.in/UploadedDocuments/admince/files/HTO_Module%2003.pdf

Energiatehokas höyry- ja lauhdejärjestelmä 2015 koulutusmateriaali. Verkkodokumentti. Motiva Oy (viitattu 4.1.2024) Saatavilla: [Motiva Energiatehokas höyry- ja lauhdejärjestelmä KOULUTUSAINEISTO 2015](#)

Ilmatieteen laitos kuukausitilastot. Viitattu 21.3.2024 saatavissa <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/kuukausitilastot>

Kuppan Thulukkanam: Heat Exchanger Design Handbook, s. 1. CRC Press, 2013.

Mäkelä, M.; Soininen, L.; Tuomola, S.; Öistämö, J. 2021. Tekniikan Kaavasto. 22. painos. Tampere: AMK-Kustannus oy.

Sandberg, E. 2014. Ilmastointitekniikka: Osa 1, Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät: perustietoa ilmastointitekniikasta rakentamisen ja rakennusten käytön asiantuntijoille. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy.

Spirax Sarco Ltd. 2024, Condensate recovery. Viitattu 13.1.2024 Saatavissa: <https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/condensate-recovery/introduction-to-condensate-recovery>

Spirax Sarco Ltd. 2024, Condensate removal. Viitattu 26.1.2024 Saatavilla <https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/condensate-removal/practical-methods-of-preventing-stall#article-top>

Spirax Sarco Ltd. 2024, Flash Steam. Viitattu 26.1.2024 Saatavissa: <https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/condensate-recovery/flash-steam#article-top>

Spirax Sarco Ltd. 2024, Lauhteenpoistimet. Viitattu 26.1.2024 Saatavissa: <https://www.spiraxsarco.com/global/en-FI/products/steam-traps>

Spirax Sarco Ltd. 2024, Steam mains and drainage. Viitattu 10.1.2024.

Saatavissa: <https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/steam-distribution/steam-mains-and-drainage#article-top>

Teollisuuden höyry- ja lauhdejärjestelmät 1978. Oy E. Sarlin Ab. Lahti:
Painolahti Oy.

Höyrytaulukko

14.1.2024 13.47

Saturated Steam

Pressure bar gauge	Saturation Temperature °C	Specific Enthalpy of Water (h_f) kJ/kg	Specific Enthalpy of Evaporation (h_{fg}) kJ/kg	Specific Enthalpy of Steam (h_g) kJ/kg	Density of Steam kg/m ³	Specific Volume of Steam (v_g) m ³ /kg
0	99.9743	418.546	2256.47	2675.02	0.597657	1.67320
1.00000	120.419	505.080	2200.94	2706.02	1.13607	0.880224
2.00000	133.673	561.558	2163.02	2724.57	1.65766	0.603261
3.00000	143.728	604.656	2133.04	2737.69	2.16944	0.460948
4.00000	151.931	640.004	2107.71	2747.72	2.67471	0.373872
5.00000	158.913	670.240	2085.49	2755.73	3.17535	0.314926
6.00000	165.022	696.823	2065.50	2762.32	3.67259	0.272287
7.00000	170.475	720.653	2047.21	2767.86	4.16731	0.239963
8.00000	175.413	742.325	2030.25	2772.58	4.66013	0.214586
9.00000	179.936	762.258	2014.39	2776.65	5.15155	0.194117
10.0000	184.115	780.753	1999.43	2780.18	5.64194	0.177244
11.0000	188.007	798.039	1985.23	2783.27	6.13163	0.163089
12.0000	191.652	814.293	1971.69	2785.98	6.62087	0.151038
13.0000	195.084	829.654	1958.71	2788.37	7.10988	0.140649
14.0000	198.329	844.234	1946.24	2790.47	7.59886	0.131599