

Autoklaavin lämpötilan säädön ja jäähdytyksen kehittäminen



Sähkö- ja automaatiotekniikan opinnäytetyö
Sähkö- ja automaatiotekniikka, insinööri (AMK)

Kevät 2023

Pauliina Pääskynkivi

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Tekijä Pauliina Pääskynkivi

Työn nimi Autoklaavin lämpötilan säädön ja jäähdytyksen kehittäminen

Ohjaaja Tommi Keikko

Tiivistelmä

Vuosi 2023

Opinnäytetyö on laadittu Terrafame Oy:lle. Työ on tehty Terrafamen akkukemikaalitehtaan paineliuotuksen autoklaavista. Työn lähtökohtana olivat ongelmat, jotka autoklaavin lämpötilan säätö aiheuttaa. Lämpötilan säätöä rajaavat tekijät ovat reunaehtoja.

Toimeksiantajan autoklaavin lämpötilan säätö ei toimi kunnolla. Se vaikeuttaa jokapäiväistä prosessin ohjausta, koska nykyinen lämpötilan säätö ei ole toimiva eikä oikein mitoitettu.

Opinnäytetyön tavoitteena on luoda ehdotus, kuinka nykyistä autoklaavin lämpötilan ja jäähdytyksen säätöä voidaan kehittää paremmaksi.

Opinnäytetyössä selvitettiin laskemalla autoklaaviin tulevien energioiden lämpömäärät.

Tuoteliete, jäähdytysvesi ja hönkäkaasu olivat oleellisimmat energiaa autoklaaviin kuljettavat sekä energiaa sieltä poistavat aineet. Laskelmat toteutettiin Terrafamelta saatujen arvojen ja aiheeseen liittyvän kirjallisuuden avulla. Laskelmien teossa hyödynnettiin Wedge-ohjelmaa.

Lämpömäärän kautta voitiin tarkastella autoklaavin jäähdytysjärjestelmän mitoitusta. Osa lasketuista lämpömääristä ei ollut alkuperäisen oletuksen mukainen. Näiden avulla selvitettiin lämpötilan säädön taustatekijöitä, jotka pitää olla kunnossa ennen onnistunutta säätöä. Toimeksiantajan kanssa toteutettiin mittaus, jossa mitattiin jäähdytysveden tilavuusvirtausta. Mittauksen lopputuloksella oli suuri vaikutus opinnäytetyöhön.

Työn parannusehdotusosiossa vedettiin yhteen jäähdytysjärjestelmän mitoituksesta ja itse lämpötilan säädöstä aiheutuvat ongelmat. Parannusehdotuksena ehdotettiin kahta erilaista istukkaventtiiliä jäähdytysjärjestelmään säätöventtiiliksi ja kehoitettiin vähentämään jäähdytyslementtien määrää. Myös ehdotettiin lisäämään virtausmittausten määrää jäähdytysjärjestelmässä, koska nykyisellä määrällä ei saada kattavasti tietoa, kuinka paljon jäähdytysvettä virtaa. Näiden pohjalta esiteltiin säädin, joka olisi sopiva kohteeseen.

Avainsanat Autoklaavi, lämpötila, säätöjärjestelmä, venttiilimitoitus

Sivut 39 sivua ja liitteitä 1 sivua

Electrical and Automation Engineering

Author Pauliina Pääskynkivi

Subject Development of autoclave temperature control and cooling

Supervisors Tommi Keikko

Abstract

Year 2023

This thesis was commissioned by Terrafame Oy. This thesis focused on the pressure leaching's autoclave of Terrafame's battery chemical factory. The starting point of the project were the problems caused by autoclave temperature control. There are boundary conditions arising from limiting factors in temperature regulation. The commissioner's temperature control of the autoclave does not function properly, which complicates everyday process control, because the current temperature control does not either function correctly or is incorrectly proportioned. The aim of this thesis is to create a suggestion on how the current autoclave temperature and cooling control can be improved.

In this thesis, the heat quantities were calculated by energy entering the autoclave. Substances that transport energy in and out of the autoclave were product sludge, cooling water and flue gas. The calculations were implemented with the help of the values obtained from Terrafame and the related literature. The calculations were made by using the Wedge program. The dimensioning of the autoclave cooling system could be viewed through the amount of heat. Some of the calculated values were not in accordance with the original assumption. With the help of these calculations the background factors of temperature regulation were clarified, which must be in order before regulation can be carried out successfully. A measurement was carried out with the commissioner, in which the volume flow of cooling water was measured. The final result of this measurement had a great impact on the thesis.

The improvement suggestion section of the thesis summarizes the problems caused by the dimensioning of the cooling system and the temperature control itself. To improve the cooling system, two different poppet valves were suggested for as control valves, and it was suggested in order to reduce the number of cooling elements. It was also suggested to increase the number of flow measurements in the cooling system, because the current number does not provide comprehensive information on how much cooling water is flowing. On the basis of this information, a suitable regulator was suggested.

Keywords Autoclave, temperature, control system, valve dimensioning

Pages 39 pages and appendices 1 pages

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Metallien tuotantoprosessi	2
3	Akkukemikaalitehdas.....	4
3.1	Paineliuotus.....	5
3.2	Autoklaavi	6
3.2.1	Paineliuotuksen autoklaavi	6
3.2.2	Autoklaavin jäähdytys	8
4	Säätö tuotantoprosessissa	10
4.1	Säätöpiirin rakenne	10
4.1.1	Peruskomponentit.....	11
4.1.2	Takaisinkytkentä.....	12
4.1.3	Kaskadikytkentä	13
4.2	Säädinyhdistelmät.....	15
4.2.1	PID-säädin.....	16
4.2.2	P-osa	17
4.2.3	I-osa	18
4.2.4	D-osa.....	18
5	Kavitaatio.....	20
6	Lähtötilanteen selvitys	22
6.1	Reunaehdot.....	22
6.2	Olemassa oleva säätö.....	23
6.3	Nykytilanteen ongelmat.....	24
6.3.1	Aine- ja energiatase.....	25
6.3.2	Laite- ja venttiilimitoitus	29
6.4	Jäähdytysveden virtauksen mittaus.....	31
7	Parannusehdotus.....	33
7.1	Venttiilimitoitus	33
7.2	Jäähdytys-elementit	35
7.3	Lämpötilan säätö.....	36

8	Yhteenveto	38
	Lähteet.....	40

Liitteet

Liite 1	Jäähdytysveden virtausmittauksen tulokset
---------	---

1 Johdanto

Tämän työn tarkoituksena on tehdä parannusehdotus Terrafamen akkukemikaalitehtaan autoklaavin lämpötilan ja jäähdytyksen säädölle. Työn aihe on poikkeuksellinen, koska Suomen teollisuudessa autoklaavi ei ole vielä suhteellisen yleinen. Terrafamen akkukemikaalitehtaalla oleva autoklaavi on kooltaan suuri. Työssä tutustutaan nykyiseen säätöön ja pohditaan, miksi olemassa oleva ratkaisu ei toimi. Säädön ongelmien lisäksi pitää huomioida aine- ja energiataseet sekä laitemitoitus. Kun nämä ovat kunnossa, saadaan kartoitettua, mitkä ovat lämpötilan säädön oikeat tarpeet ja saadaan selville, mitä on aiemmin mitoitettu väärin. Sitten voidaan huomioida reunaehdot lämpötilan säätöä suunnitellessa. Autoklaavi koostuu lohkoista ja tässä työssä tutkittavassa Terrafamen akkukemikaalitehtaan autoklaavissa on viisi lohkoa. Työssä tarkastellaan pääasiassa toista lohkoa, koska kyseisellä loholla on suurin jäähdytyksen tarve. Työtä on rajattu työn vaativuuden takia.

Paineliuotuksen operaattorit kertoivat ongelmista, jotka liittyvät autoklaavin lämpötilan säätöön. Lämpötilan säätö ei ole käyttäjäystävällinen eikä säätö toimi kuten pitäisi. Toimimaton autoklaavin lämpötilan säätö on merkittävä ongelma ja siten oivallinen työn aihe. Koska työ vastaa todelliseen ongelmaan, on Terrafamella suurikin mahdollisuus hyötyä työstä. Tämän työn avulla on mahdollista ratkaista hyvin keskeinen ja pitkään jatkunut ongelma. Työ tuo vastauksia ongelmaan, miksi nykyinen autoklaavin lämpötilan säätö ei toimi.

Terrafame louhii ja tuottaa nikkeliä, kobolttia, sinkkiä sekä kuparia. Lisäksi se on suomalainen akkukemikaaleja valmistava yritys. Kaivos- ja tehdasalue sijaitsevat 6000 hehtaarin alueella Sotkamossa. (Terrafame Oy, n.d.-a) Terrafamen akkukemikaalitehdas on tulevaisuuden edelläkävijä. Sähkö- ja hybridiajoneuvojen osuus kasvaa merkittävästi vuosi vuodelta. Arviolta noin neljännes liikenteessä olevista autoista on sähkö- ja hybridiajoneuvoja seuraavaan vuosikymmeneen mennessä. Onkin siis perusteltua sanoa, että akkujen materiaalien kysyntä nousee hetki hetkeltä. (Terrafame Oy, 2017)

2 Metallien tuotantoprosessi

Metallien tuotantoprosessi koostuu avolouhinnasta, malminkäsittelystä, bioliuotuksesta ja metallien talteenotosta. Avolouhinnalla tarkoitetaan louhintaa, joka tapahtuu maanpäällä eikä maan sisällä. (Ahonen, 2017, s. 7) Avolouhoksella tehdään räjäytyksiä, jotta saadaan malmia. Malmi kuljetetaan malminkäsittelyyn. Siellä malmia murskataan ja seulotaan useasti. Tämän jälkeen malmirakeiden koko saadaan tasalaatuiseksi agglomeroinnilla, jossa hienoaines muokkaa malmiraketta. (Terrafame Oy, n.d.-c) Kuvassa 1 ylhäällä näkyy Terrafamen kaivosaluetta.

Kuva 1. Ilmakuva Terrafamen tehdas- ja kaivosalueesta (Terrafame Oy, n.d.-b).



Malmi kuljetetaan bioliuotuksen ensimmäiseen vaiheeseen eli primäärिकासalle. Malmikasaa liuotetaan siellä usean kuukauden ajan. Sen jälkeen malmi kuljetetaan sekundäärिकासalle, joka on bioliuotuksen toinen vaihe. Kuvassa 1 sekundäärिकासat ovat oikealla.

Sekundääriliuotus kestää 3–4 vuotta. Loppujen lopuksi sekundäärikasaa jää paikoilleen, joka maisemoidaan. (Terrafame Oy, n.d.-c)

Bioliuotuksen tavoitteena on saada metalli erotettua malmin joukosta ja tähän käytetään mikrobeja. Jotta mikrobeilla on ihanteelliset olosuhteet, primääri- ja sekundäärikasoa sekä kastellaan happamalla prosessin kiertoliuoksella, että puhalletaan ilmaa. (Terrafame Oy, n.d.-d)

Bioliuotusprosessi tekee Terrafamesta edelläkävijän nikkelisulfaatin valmistuksessa. Yrityksen hiilijalanjälki on 60 % pienempi mitä muilla perinteisillä nikkelisulfaatin tuotantoprosesseilla. Bioliuotukseen pohjautuva prosessi tarvitsee vain noin 10 % sekä sähköä että lämpöenergiaa verrattuna siihen, mitä suunnilleen tyyppillinen nikkelisulfaatin tuottaminen vaatii. (Terrafame Oy, 2020)

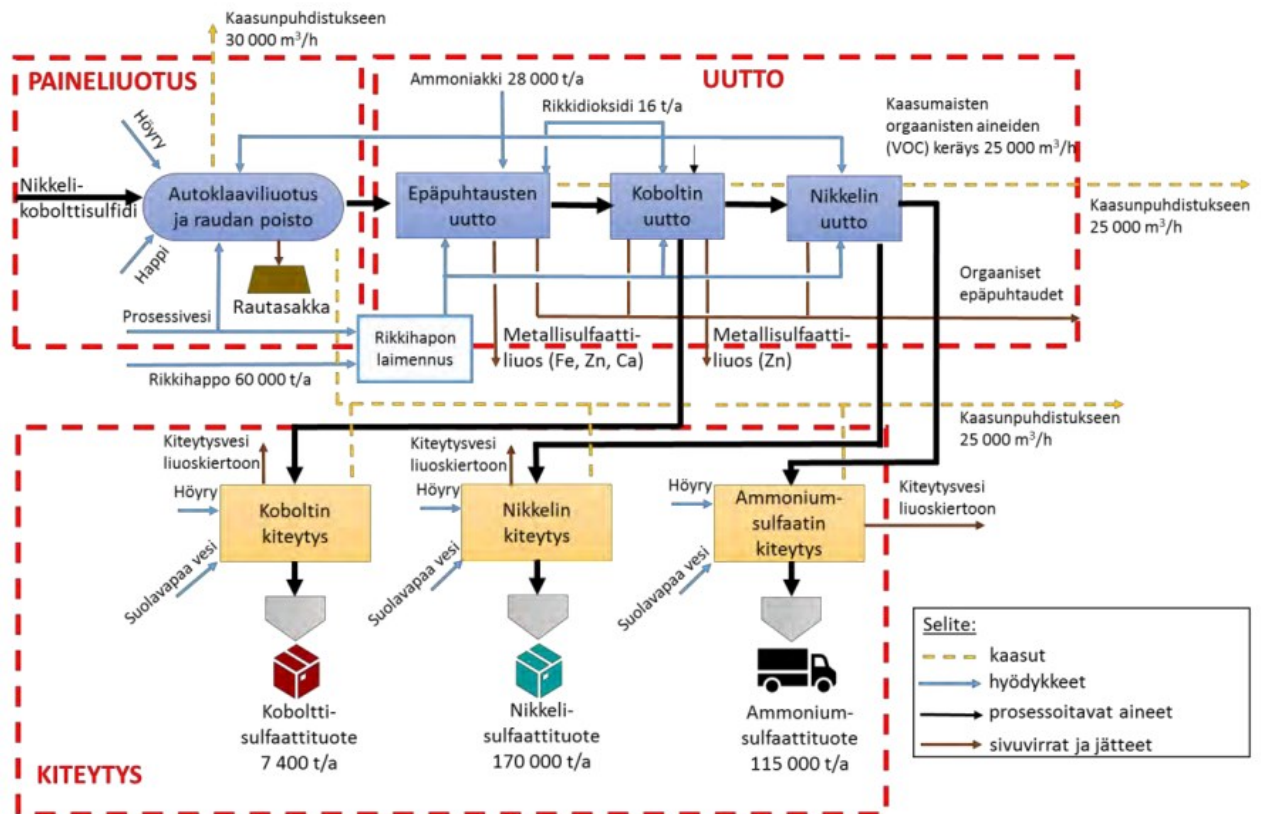
Metallien talteenotossa sulfidit erotetaan liuoksesta erilaisten kemikaalien avulla. Reaktoreissa metallisulfidit erotellaan. Tuotannosta saadut metallit ovat kupari-, sinkki ja nikkeli-kobolttisulfidi. (Terrafame Oy, n.d.-c) Nikkeli-kobolttisulfidia jatkojalostetaan akkukemikaalitehtaalla.

3 Akkukemikaalitehdas

Vuonna 2017 Terrafame ilmoitti aikovansa sijoittaa nikkeli- ja kobolttikemikaalien tuotantoon, joita tarvitaan sähkö- ja hybridiajoneuvojen akuissa. Sijoitus kannatti, koska Terrafamen akkukemikaalitehtaan liikevaihto tammikuusta syyskuuhun oli melkein 35 % koko Terrafamen liikevaihdosta. (Terrafame Oy, 2022) Syynä on sähkö- ja hybridiajoneuvojen akkujen nouseva kysyntä, joka kasvattaa huomasti nikkelin kysyntää. Raaka-aineena käytetään metallien talteenotossa valmistettua nikkeli-kobolttisulfidia. Tästä saadaan nikkeli- ja kobolttisulfaattia akkujen jatkojalostusta varten. Nykyään Terrafamen akkukemikaalitehdas on yksi maailman suurimmista nikkelisulfaattia tuottavista tehtaista. (Terrafame Oy, 2017)

Paineliuotuksen materiaalina käytetään metallien talteenotosta tuotettua nikkeli-kobolttisulfidiä. Akkukemikaalitehtaan tuotantoprosessi koostuu kolmesta vaiheesta: paineliuotus, uutto ja kiteytys. Lopputuotteena saadaan nikkeli- ja kobolttisulfaattia, joita tarvitaan sähköajoneuvojen akuissa. (Ramboll Finland Oy, 2018, ss. 3, 22) Lisäksi sivutuotteena saadaan ammoniumsulfaattia, joka myydään eteenpäin. Tuotantoprosessissa tarvitaan erilaisia hyödykkeitä muilta ulkopuolisilta toimittajilta, joista paineliuotukselle tärkein on happi. Akkukemikaalitehtaalla hyödynnetään myös reagensseja, joita tarvitaan eniten uuttoprosessissa. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto, 2020, s. 11) Kuva 2 havainnollistaa akkukemikaalitehtaan prosessia. Kuitenkin tässä työssä tarkastellaan paineliuotusta.

Kuva 2. Terrafamen akkukemikaalitehtaan prosessikaavio (Ramboll Finland Oy, 2018, s. 24).



3.1 Paineliuotus

Paineliuotus on ensimmäinen osa hydrometallurgista prosessia. Hydrometallurgian tarkoituksena on irrottaa metalleja malmista ja tässä prosessissa hyödynnetään nestemäisiä liuoksia. Prosessin vaiheet määräytyvät metallin mukaan. Yleensä prosessi on kolmivaiheinen. Pääsääntöisesti metallin erottaminen malmista tapahtuu liuottamalla, uuttamalla ja talteenotolla. Talteenotto voi olla esimerkiksi elektrolyyttinen. (Kantonen, 2021) Tämä työ rajautuu liuottamiseen, eli tässä tapauksessa paineliuotukseen.

Paineliuotusreaktio tapahtuu autoklaavissa. Yleisesti paineliuotusreaktiossa käytetään todella korkeaa painetta. Vastaavasti lämpötilakin on korkea, suunnilleen 200 °C. Kemiallinen reaktio pohjautuu hapettumiseen. Tämän takia paineliuotuksen kriittiset muuttujat ovat lämpötila, paine ja happi, jota käytetään liuotuksessa hapettimena. Liukeneminen kiihtyy kriittisten parametrien seurauksena. (Kantonen, 2021)

3.2 Autoklaavi

Autoklaavi, jota kutsutaan myös painereaktoriksi, kuuluu painelaitteisiin. Painelaitteisiin liittyy oleellisesti painelaitelaki (1144/2016), joka määrittelee painelaitteen. Painelaitelain mukaan painelaitteella tarkoitetaan *säiliötä, putkistoa ja muuta teknistä kokonaisuutta, jossa on tai johon voi kehittyä ylipainetta, sekä painelaitteen suojaamiseksi tarkoitettuja teknisiä kokonaisuuksia* (painelaitelaki 1: 2). Kyseisessä laissa annetaan myös määräykset laitteiden suunnitteluun ja valmistukseen sekä painelaitteiden käytön valvontaa.

(Painelaitelaki (1144/2016))

Painelaitteita hyödynnetään eniten teollisuudessa, mutta myös kotitaloudet ja työpaikat käyttävät hyväksi painelaitteita. Kotitaloudet käyttävät höyry- ja kuumavesikattiloita, jotka kuuluvat painelaitteisiin. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto, n.d.)

3.2.1 Paineliuotuksen autoklaavi

Paineliuotuksen kriittisin ja tärkein laite on autoklaavi, koska siellä tapahtuu liuotusreaktio. Autoklaavissa tapahtuu nikkeli-koboltilietteen hapettuminen korkeassa paineessa ja lämpötilassa. Lisäksi siellä tapahtuu hapettumisreaktio. (Kantonen, 2021) Seuraavaksi keskitytään Terrafamen autoklaavissa tapahtuvaan metallien liuotusprosessiin eli tässä tapauksessa sulfidien hapetusreaktioon. Kuvassa 3 näkyy paineliuotus ja autoklaavi, joka on alemman keltaisen aidan takana.

Kuva 3. Terrafamella käytössä oleva autoklaavi (Merinova, 2021).



Terrafamen akkukemikaalitehtaalla ennen nikkeli-koboltilietteen siirtymistä autoklaaviin, nikkeli-kobolttisulfidi sekoitetaan prosessiveteen sille tarkoitettussa säiliössä. Tämän jälkeen liete kulkee syöttöpumpuilta autoklaaviin, jossa kiinteä aine muuttuu liukoisiksi metalleiksi ja sulfaatiksi hyödyntäen happiylimäärää. Nikkeli-sulfaatti on koboltti- ja ammoniumsulfaatin kanssa akkukemikaalitehtaan valmistama lopputuote. Kokonaispaineeseen verrattuna tulee hapen osapaineen olla 5–6 bar. Kyseisessä Terrafamen autoklaavissa paineen arvoa ylläpidetään 15 ja 20 baarin välillä (Ramboll Finland Oy, 2018, s. 24). Lämpötila puolestaan vaihtelee 150–200 °C välissä. Prosessilietteen kuuluu olla autoklaavissa noin 2,5 h. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto, 2020)

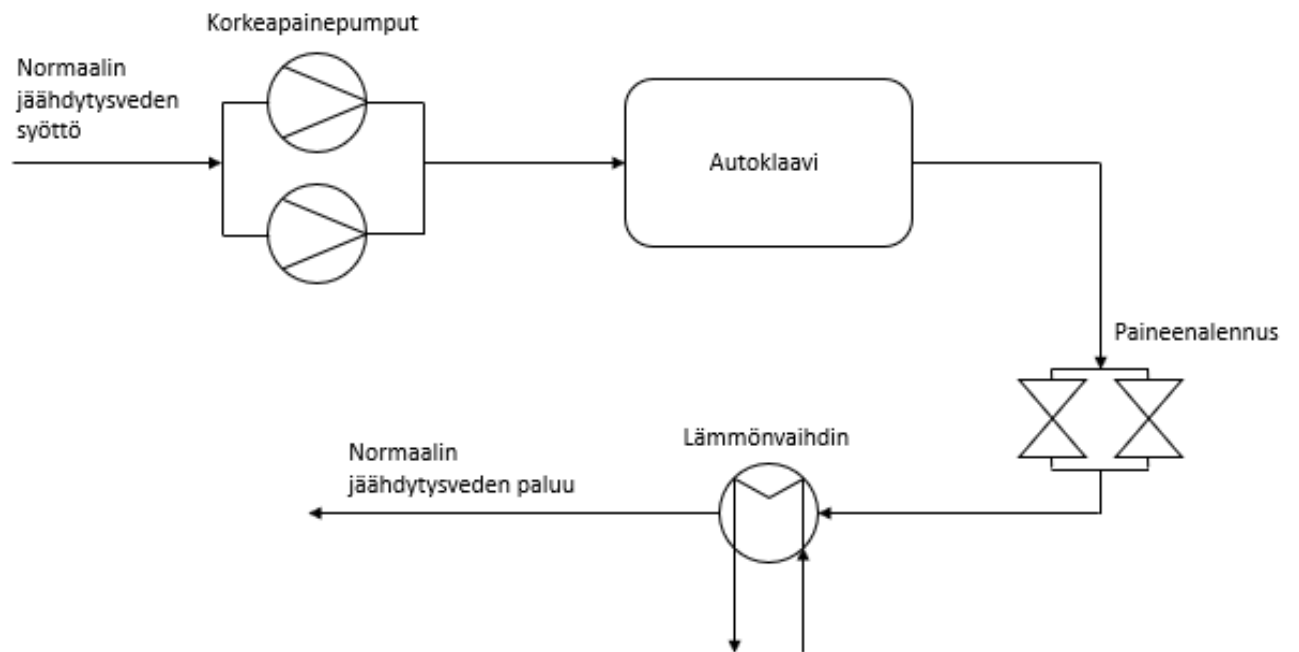
Paineliuotuksen jälkeen prosessiin kuuluu raudan poisto, josta paineliuotuksen tuotelius eli PLS-liuos (engl. Pregnant Leach Solution) kulkeutuu uuttoon. Raudan poistoa ei käsitellä tässä työssä. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto, 2020) Autoklaaviprosessin mukana syntyy hönkäkaasua. Hönkäkaasut virtaavat venturipesurille, jossa hönkäkaasut puhdistetaan. Tämän jälkeen puhtaan höngän voi päästää ulkoilmaan ja puhdistamaton pesuvesi syötetään takaisin autoklaaviin uusiokäyttöön. (Aluehallintovirasto, 2021, s. 15)

3.2.2 Autoklaavin jäähdytys

Autoklaaviliuotus on eksoterminen eli autoklaavissa täytyy olla jäähdytysjärjestelmä (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto, 2020, s. 13). Terrafamen sisäiseltä kokousmuistiosta löytynyt tieto, että paineliuotuksen autoklaavin jäähdytyksessä käytetään korkeapainejäähdytystä. Jäähdytysvesikierrossa käytetään autoklaavin käyttöpainetta korkeampaa jäähdytysveden painetta. Mahdollisissa jäähdytysveden vuototapauksissa vuoto tapahtuu jäähdytysveden vuotona autoklaavin sisään eikä toisinpäin, koska muuten autoklaavin sisältä prosessilietettä päätyisi jäähdytysvesikiertoon. Tämä on järjestelmältään suora jäähdytys. (Terrafame Oy, Henkilökohtainen tiedonanto, 2019)

Ensimmäisenä jäähdytysveden paineensyöttöpumput nostavat normaalin jäähdytysveden painetta. Tämän jälkeen jäähdytysvesi, joka on korkeapaineistettu, voidaan syöttää autoklaaviin. Autoklaavin jokaisessa viidessä lohossa on oma määrä jäähdytyslementtejä eli jäähdytyskierukoita. Jäähdytyskierukoiden määrä on lohkoittainen, koska jokaisessa lohossa on eri tarve jäähdytykselle. Kun paineistettujäähdytysvesi tulee autoklaavista, täytyy jäähdytysveden sekä painetta että lämpötilaa laskea. Muuten jäähdytysveden ominaisuudet eivät sovi yhteen normaalin jäähdytysveden kanssa. Paineenalennuksen voi tehdä kahdella eri tekniikalla: reikälevy- ja säätöventtiilitekniikalla. Tässä jäähdytysjärjestelmässä hyödynnetään säätöventtiilitekniikkaa. Jäähdytysveden paluusta otetaan myös talteen lämpöä, jota hyödynnetään rakennusten lämmittämisessä. Koska lämpimään aikaan ei ole tarpeen erikseen lämmittää rakennuksia, lämmönvaihdin on mahdollista ohittaa. Kuva 4 havainnoinnillista jäähdytysprosessin kulkua. (Terrafame Oy, Henkilökohtainen tiedonanto, 2019)

Kuva 4. Suora korkeapainejäähdytys lohkokaaviona.



4 Sääto tuotantoprosessissa

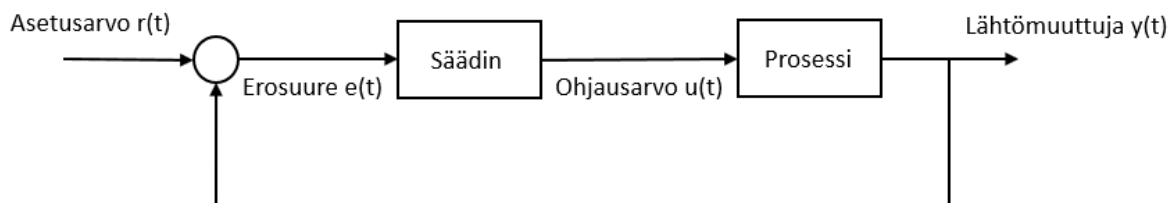
Jokaisessa tuotantoprosessissa on kannattavaa pohtia säädön sekä ohjauksen tarvetta. Kun tuotantoprosessin järjestelmälle määrätään jokin ohjaussignaali eikä tiedetä prosessin mitattua arvoa, on kyseessä ohjaus. Automaattisen säädön ohjaussignaali puolestaan pohjautuu prosessin avulla saatuun mittauksiin. (Harju & Marttinen, 2000, s. 9) Ohjauksen ja automaattisen säädön erona on se, että ohjauksessa oletetaan ohjaussignaali jokin arvo ja säädössä ohjaussignaali perustuu jo tehtyihin mittauksiin.

Säätimellä tarkoitetaan joko yksittäistä laitetta tai järjestelmää. Säädön tarkoituksena on seurata ja tarkkailla tavoitearvoa, joka voi olla mitattava tai prosessissa oleva laskennallinen suure. Ennalta määritettyä tavoitearvoa kutsutaan asetusarvoksi. (Kippo & Tikka, 2008, ss. 35,36)

Kuvassa 5 on havainnollistettu pelkistetyn lohkokaaavion avulla säätimen toimintaa.

Säätöpiirin perusmuuttujat ovat lähtömuuttuja $y(t)$, asetusarvoon $r(t)$, erosuureen $e(t)$ ja ohjausarvon $u(t)$. Luvussa 4.1.2 tarkastellaan säätöpiirin peruskomponentteja tarkemmin.

Kuva 5. Yksinkertainen lohkokaavio säätöpiiristä.



4.1 Säätöpiirin rakenne

Säätöpiiri on yksi tärkeimmistä osista automaatiotekniikkaa. Säätöpiiri mittaa prosessin lähtömuuttujaa $y(t)$ ja siten varmistaa asetusarvon $r(t)$ samankaltaisuuden. Lähtömuuttujaa mitataan prosessin jälkeen. Säätöpiiriin tehtäviin kuuluu myös mittauksen takaisinkytkentä. (Kippo & Tikka, 2008, s. 38) Kuva 6 havainnollistaa takaisinkytkentää visuaalisesti.

Edellä on käyty läpi yksinkertainen lohkokaavio säätöpiiristä sekä kerrottu, mikä ero säädöllä ja ohjauksella on. Seuraavissa luvuissa paneudutaan tarkemmin, mistä osista säätöpiiri muodostuu. Luvuissa käydään myös läpi takaisinkytkennän tärkeyttä sekä sen tuomia ongelmia säätöpiirissä. Myös paneudutaan kaskadikytkennän merkittävään hyötyyn.

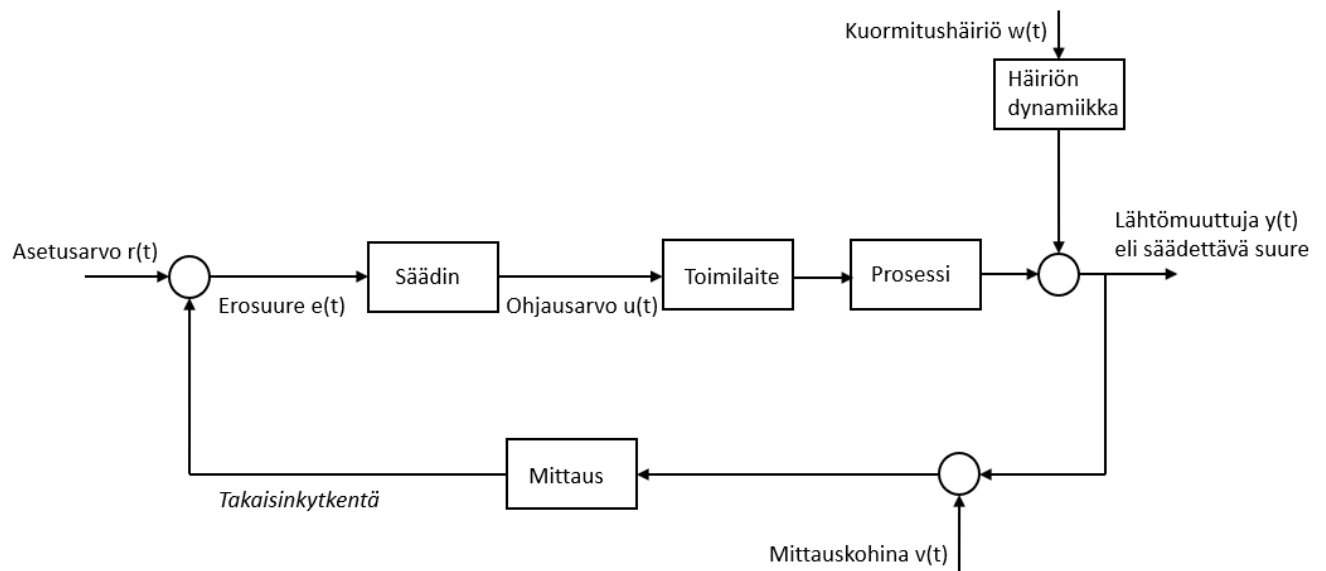
4.1.1 Peruskomponentit

Tarkastellaan ensin säätöpiirin muuttujia, jonka jälkeen siirrytään säätöpiirin toimintaan.

Lähtömuuttujaa $y(t)$ verrataan asetusrvoon $r(t)$, joiden avulla säädin laskee säätöpoikkeaman eli erosuureen $e(t)$. Säädin laskee vitysparetrejä käyttämällä lähtömuuttujalle ohjausarvon $u(t)$. (Kippo & Tikka, 2008, s. 36) Vitysparetreistä tarkemmin luvussa 4.2.

Erosuure on erotus, jossa lähtömuuttujan asetusrvosta vähennetään lähtömuuttujan mitattu arvo. Kun järjestelmälle tai toimilaitteelle tuodaan signaali, joka on aikariippuvainen, on kyseessä ohjausmuuttuja $u(t)$. (Kippo & Tikka, 2008, s. 36)

Kuva 6. Säätöpiiristä koostuvat komponentit.



Säätöpiiri muodostuu viidestä osasta, joista yksi on prosessia. Loput osat ovat toimilaite, mittausanturi, -lähetin ja säädin. (Harju & Marttinen, 2000) Kuvassa 6 ovat kaikki peruskomponentit, joista säätöpiiri muodostuu.

Seuraavaksi tarkastellaan viestin kulkua säätöpiirissä. Säätimeltä lähtee viesti toimilaitteelle. Viesti on joko analoginen, jolloin kyseessä on virtaviesti, tai digitaalinen, jolloin hyödynnetään kenttäväylää. Viestin saava ohjauksen toimilaite voi olla hydraulinen, pneumaattinen, mekaaninen tai sähköinen, kuten säätöventtiili tai pumppu. Toimilaite muuttaa prosessissa olevia suureiden arvoja ja mahdollisesti montaa arvoa samanaikaisesti. Suureet voivat olla esimerkiksi lämpötilaa, painetta tai pinnankorkeutta. Mittauksesta saatu viesti yhdistetään takaisin säätimelle takaisinkytkennän avulla. Säätimessä sitä vertaillaan asetusarvon $r(t)$ kanssa. Ohjaus toimilaitteelle $u(t)$ saadaan, kun säädin laskee erosuureen $e(t)$ avulla ohjauksen. (Harju & Marttinen, 2000, s. 13)

Käytännössä järjestelmiin vaikuttaa myös häiriöitä niin kuin kuvassa 6 havaitaan. Nämä ovat mittauskohina ja kuormitushäiriöt. Kuormitushäiriöt ovat tyypillisesti askelmaisia tai jaksollisia. Käytännössä ne voivat esiintyä esimerkiksi satunnaisina ja sykkivinä painevaihteluina, turbulenssina putkistoissa tai aaltona nesteen pinnankorkeudessa. Häiriöitä aiheuttaa myös ristikkäisvaikutukset, joita tulee toisilta säätöpiireiltä. (Harju & Marttinen, 2000, s. 19) Myötäkytkentää hyödyntäen on mahdollista oikaista kuormitushäiriöt, jos kuormituksen koko, vaikuttavuus ja esiintyminen on mahdollista mitata (Kippo & Tikka, 2008, s. 36).

Mittauskohinaa esiintyy lähtömuuttujan mittauksissa, joka on kuvassa 5 nimellä "lähtömuuttuja $y(t)$ ". Kohina on korkeataajuisia ja satunnaista. Mittauskohina on mahdollista poistaa suodatuksen, kuten alipäästö-, kaistanpäästö- tai ylipäästösuotimen avulla. (Kippo & Tikka, 2008, ss. 22,36)

4.1.2 Takaisinkytkentä

Tässä luvussa takaisinkytkentää tarkastellaan ensin yleisen ilmiön tasolla, jonka jälkeen takaisinkytkentää käydään säätötekniikan näkökulmasta. Järjestelmässä, joka on

takaisinkytketty, täytyy olla ainakin kaksi keskenään yhdistettyä prosessia tai laitetta. Kyseistä prosessia tai laitetta, joka on takaisinkytketty, kutsutaan dynaamiseksi järjestelmäksi. Dynaamisen järjestelmän vuorovaikutus on haastava, sillä molemmat systeemit vaikuttavat toisiinsa vuorovaikutteisesti kokonaisuutena. Ensimmäisen systeemin muutokset aiheuttavat muutoksia toiseen systeemiin ja päinvastoin. (Kippo & Tikka, 2008, s. 21)

Säätötekniikassa yksi tärkeimmistä peruskytkennöistä on takaisinkytkentä, joka on havaittavissa aikaisemmin esitetystä kuvassa 6. Takaisinkytkentää hyväksi käyttäen säädin hyödyntää mittaustietoja lähtömuuttujan eli säädettävän suureen käyttäytymisestä. Mittaustietoja sovelletaan prosessinohjauksessa. Takaisinkytkennän käytön syynä on häiriöiden vaikutusten pienentäminen ja poisto. Nämä häiriöt ovat säätöpiirin ulkopuolelta tulevia haittoja, kuten ulkoisen ympäristön muutoksia tai muiden säätöpiirien vaikutuksia tarkasteltavaan säätöpiiriin. (Harju & Marttinen, 2000)

Säätötekniikassa stabiilisuudella tarkoitetaan säätöpiirin värähtelyn vaimenemista. Säätöpiirin ollessa stabiili tapahtuu jokaisessa piirissä värähtelyä vaimentuen. Stabiilisuutta voidaan parantaa säätöparametrien valinnalla. (Kippo & Tikka, 2008, s. 40)

Merkittävin haittapuoli takaisinkytkennällä on epästabiili käyttäytyminen. Tämä tarkoittaa ohjauksen kautta tapahtuvaa jatkuvasti voimistuvaa värähtelyä säätöpiiriin siihen saakka, kunnes se ei ole enää hallittavissa. Kun säätöpiiri on suljettu, takaisinkytkentää hyödynnetään. Silloin säädin on automaattiohjauksella. Puolestaan, kun takaisinkytkentää ei hyödynnetä, on säädin käsinohjauksella. Käsinohjauksella olevaa säädintä kutsutaan avoimeksi systeemiksi. (Harju & Marttinen, 2000)

4.1.3 Kaskadikytkeä

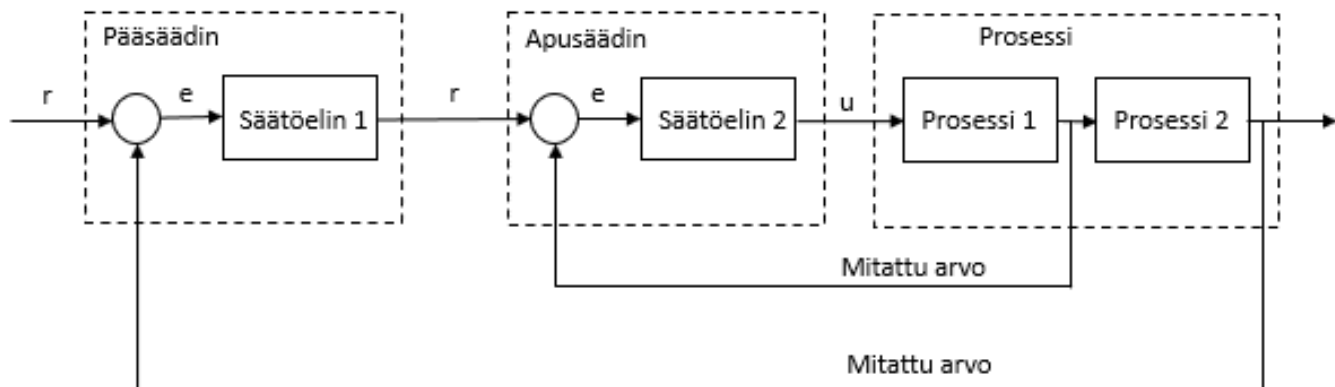
Kaskadikytkeä koostuu monesta ohjausarvosta $u(t)$ ja vain yhdestä säädettävästä suureesta eli lähtömuuttujasta $y(t)$. Halutun suureen ohjaus tapahtuu säätämällä ensin toista suuretta. Kaskadikytkeä koostuu sisäkkäisistä silmukoista, joilla säätö tapahtuu. Ensimmäistä eli ulointa säädintä kutsutaan pääsäätimeksi. Myös muita nimityksiä ovat

yläsäädin ja isäntäsäädin. Sisempänä on apusäätimeksi nimetty säädin, jota kutsutaan sekä alasäätimeksi että renkisäätimeksi. Kuva 7 havainnollistaa, kuinka pää- ja apusäädin asettuu kaskadisäätöön. (Harju & Marttinen, 2000, s. 33)

Koska apusäädin saa asetusarvonsa pääsäätimen ohjauksesta, on apusäätimen asetusarvo koko ajan muuttuva arvo. Tätä kuva 7 selkeyttää. Näin ollen apusäätimen asetusarvo on tilaltaan remote. Remote asetusarvosta enemmän luvussa 4.2.1. Yleensä kaskadikytkennässä apusäätimenä toimii P-säädin, koska sen säätäminen on vaivatonta. (Harju & Marttinen, 2000, s. 33)

Jos käytettävän säätimen eli pääsäätimen ohella käytetään myös apusäätäjää, on mahdollista kiihdyttää olemassa olevaa säätöä. Sekä pääsäädin että apusäädin on mahdollista virittää eri aikaan. Tärkeintä on virittää ensimmäiseksi apusäädin, jonka jälkeen viritetään pääsäädin. Apusäätimen tärkein ominaisuus on vastata mahdollisimman nopeasti pääsäätäjän määäämiin muutoksiin, jotka liittyvät asetusarvoon. Joten esimerkiksi huomattavaa tarkkuutta ei apusäätimen ominaisuuksilta vaadita. (Harju & Marttinen, 2000, s. 33)

Kuva 7. Lohkokaavio muodossa esitetty kaskadisäätö. Asetusarvoa merkitään r -kirjaimella, eroisuutta e -kirjaimella ja ohjausarvoa u -kirjaimella



Kaskadikytkennän yhtenä etuna on se, että apusäätimen piirissä havaittavat ongelmat ja häiriöt on mahdollista eliminoida jo ennen kuin ne pääsevät vaikuttamaan muuhun prosessiin. Apusäätimessä aikaisin havaitut ongelmat eivät pitkitä muuta prosessia ja näin ollen kasvattaa säädön nopeutta. Sekä massa- että energivirtauksia on mahdollista ohjata yksityiskohtaisesti. (Harju & Marttinen, 2000, s. 33)

4.2 Säädinyhdistelmät

Seuraavissa luvuissa paneudutaan tarkemmin PID-säätimeen, joka on säätöprosesseissa käytetyin säädin. Tarkastellaan myös osia, joista PID-säädin muodostuu. Myös syvennytään kolmeen eri viritysparametriin. Ne vaikuttavat säätimeen eri tavoin.

Säätimiä on erityyppisiä eli erilaisia säädinyhdistelmiä. P-, PI-, PD- ja PID-säädin ovat käytettävissä olevat säätimet. Oikean säädinyhdistelmän valinnan lisäksi on tärkeää valita sopivat viritysparametrit. Viritysparameitrit ovat vahvistus (K_p), integrointiaika (T_i) ja derivointiaika (T_d). Vahvistuskerroin on säätimen ohjauksen ja erosuureen suhdekerroin. Vahvistus on havaittavissa erosuureen askelmuutoksessa, jota suurentamalla nopeutuu järjestelmän käyttäytyminen. Integrointiaika hyödyntää säätimen ohjauksessa aikaisempia erosuureen arvoja, jonka avulla pienennetään jatkuvuustilan virhettä. Derivointiaika koostuu

joko ohjauksen erosuureen tai säädettävän suureen muutosnopeuden pohjautuen. (Harju & Marttinen, 2000)

4.2.1 PID-säädin

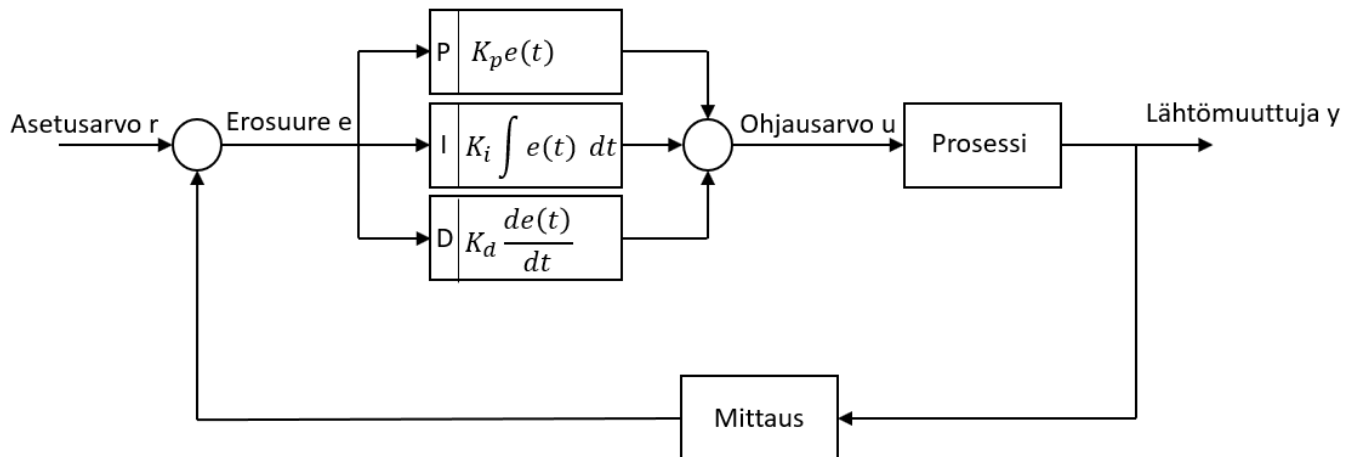
Kaikkein yleisin varsinkin teollisuudessa on PID-säädin. PID-säätimen selkeyden ja yksinkertaisuuden ansiosta voidaan säädintä hyödyntää piireissä, joissa on havaittavissa häiriö- ja epävarmuustekijöitä. Säätimen etuna ovat myös sen edulliset toteutus- ja huoltokustannukset. PID-säädin toimii perustana muille eri säädinyhdistelmille, jotka ovat P-, PI- ja PD-säädin. (Harju & Marttinen, 2000, ss. 11, 67) Säätimien osista tarkemmin luvuissa 4.2.2, 4.2.3 ja 4.2.4.

Säädin perustuu takaisinkytkentään sekä säätimen ohjaus koostuu kolmesta osasta. Niitä kutsutaan suhdetermiksi, integroivaksi sekä derivoivaksi termiksi. Kuvassa 8 näkyy osat, joista PID-säädin koostuu. PID-säädin käsittelee erosuureta neljällä tavalla, jotka ovat arvo, etumerkki, kesto aika ja muutosnopeus. (Harju & Marttinen, 2000) PID-säätimen ohjausmuuttuja saadaan kaavalla (Nuotio, 2020, s. 4)

$$u(t) = K_c \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t') dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

missä K_c on koko säätimen vahvistus, e on erosuure, T_i on integrointiaikavakio ja T_d on derivointiaikavakio.

Kuva 8. Osat, joista PID-säädin muodostuu



Säätimen asetusarvoja on kolme, jotka ovat local (L), remote (R) sekä computer (C). Local tarkoittaa paikallista asetusarvoa, joka käyttäjän syöttämä vakioasetusarvo. Kaksi muuta ovat vaihtuvia asetusarvoja ja niiden arvot saadaan säätimen ohjaukselta ylemmältä tasolta. Remote on luonteeltaan vaihtuva asetusarvo, joka saa arvonsa järjestelmän sisältä. Remote on yhteydessä kaskadikytkentään. Computer puolestaan saa asetusarvonsa tietokoneelta, joka on järjestelmän ulkopuolelta. (Harju & Marttinen, 2000, ss. 67-68)

4.2.2 P-osa

P-säätö eli suhdetermi perustuu säätimen lähdön $u(t)$ erosuuren arvoon $e(t)$. Edellä mainittu vahvistus onkin siis olennainen osa P-osaa. P-säädin voidaan esittää seuraavana ohjausmuuttujan u kaavana (Harju & Marttinen, 2000)

$$u(t) = K_p e(t) + u_0$$

missä säätimen vahvistus on K_p sekä $e(t) = 0$, kun ohjaussignaalin vakiotaso on u_0 .

4.2.3 I-osa

I-osa on integroiva termi. Viritysparametrin integrointiajan (T_i) merkitys on mitätöidä jatkuvuustilan virhe, koska olematonkin erosuureen arvo suurentaa integrointiosaa, jonka avulla säätimen lähtö kasvaa. Integrointiajan kasvaessa supistuu I-säätimen osuuden vaikutus. I-säätimen ohjausmuuttuja u voidaan esittää kaavana (Harju & Marttinen, 2000)

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int e(t) dt$$

missä integrointiaika on T_i . I-osaa hyödynnetään yhtenä P-osan kanssa, jolloin I-osan takia P-osan asentovirhe poistuu. Nämä yhdessä muodostavat PI-säätimen.

Niin kuin P-osan vahvistuksella myös I-osan integroivalla termillä on vahvistus. Sitä kutsutaan integrointitermin vahvistukseksi (K_i). Integrointiaika on mahdollista muuttaa integrointitermin vahvistukseksi. Integrointitermin vahvistus saadaan oheisella kaavalla (Nuotio, 2020)

$$K_i = \frac{K_c}{T_i}$$

missä T_i on integrointiaika ja K_c on koko säätimen vahvistus. Kuvassa 8 käytetään I-osan kaavassa integrointitermin vahvistusta eikä integrointiaikaa.

4.2.4 D-osa

D-osa on derivoiva termi. D-säätimen voimakkuus kasvaa suoraan viritysparametrin derivointiajan (T_d) kasvaessa. Jos tuotantoprosessissa on havaittavissa viivettä, on tärkeää kyseenalaistaa derivaatta. D-säätimen ohjausmuuttuja u voidaan esittää kaavana (Harju & Marttinen, 2000)

$$u(t) = T_d \frac{de(t)}{dt}$$

missä derivointiaika on T_d . D-säädin luonnollisesti voimistaa korkeita taajuuksia mukaan lukien mittauskohinaa. Jotta tämä voidaan poistaa, on välttämätöntä suodattaa signaaleja tai mahdollisesti laskea derivaatta jollain toisella kaavalla. Tämän takia D-säädintä yksinään ei juurikaan käytetä teollisuudenprosesseissa, koska mittaussignaalit ovat alttiita kohinalle. D-osaa hyödynnetään P-osan kanssa, jolloin säädin on muotoa PD. Lisäksi käytetään osana PID-säädintä. (Harju & Marttinen, 2000)

D-osan derivointiajalla on vastaava oma vahvistus. Se on nimeltään derivointitermin vahvistus (K_d). Kuvassa 8 derivointiaika on korvattu derivointitermin vahvistuksella. Derivointitermin vahvistus saadaan laskettua kaavalla (Nuotio, 2020)

$$K_d = K_c \cdot T_d$$

missä K_d on derivointitermin vahvistus ja K_c on koko säätimen vahvistus.

5 Kavitaatio

Kavitaatio tarkoittaa kulumista, jota voi tapahtua putkistossa ja toimilaitteessa. Kavitaatio syntyy putkessa jännitysiskun seurauksena. (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 2004, s. 120)

Putkistossa nesteen paine kasvaa höyrystymispaineeksi, joka saa aikaan kuplia. Kun tämä tila saavutetaan monta kertaa, saavat kuplat aikaan jännitysiskun eli tässä tapauksessa kuplat saavat aikaan iskevän jännityksen. Jännitysiskut kohdistuvat usein samalla pienelle alueelle. (Jalava, 2021, s. 13) Paineiskun seurauksena putken materiaali kuluu ja pinnasta tulee karkea (Kivioja;Kivivuori;& Salonen, 2004). Kuvassa 9 näkyy, kuinka paineiskut kohdistuvat tietylle alueelle ja kulumaa on paljon. Kulumassa näkyy kuplista aiheutuva paine.

Kuva 9. Kavitaation aiheuttamaa kulumista (Rodelta, n.d.).



Myös toimilaitteessa on huomioitava kavitaation mahdollisuus, joka syntyy paineiskujen kertymästä. Toimilaitteessa paineisku muodostuu joko ulkoisista tai sisäisistä syistä. Nämä aiheuttavat liikkeen välittömän ja nopean pysähtymisen. Ulkoinen syy voi olla jokin fyysinen

haitta toimilaitteen toiminta-alueella. Hyvänä esimerkkinä sisäisestä syystä on venttiilin sulkeutuminen. (Kauranne;Kajaste;& Vilenius, 2004, s. 72)

6 Lähtötilanteen selvitys

Tässä työssä tarkoituksena on tutkia Terrafamen akkukemikaalitehtaan paineliuotuksen autoklaavin säätöä. Ensin tarkastellaan säädön reunaehtoja, jotka määrittelevät säädön raamit. Seuraavaksi käsitellään, kuinka nykyinen lämpötilan säätö toimii ja mitkä ovat sen ongelmat. Tämän jälkeen paneudutaan kahteen taseeseen ja laitemitoitukseen. Luvussa 6.3.1 lasketaan autoklaaviproessiin saapuvat energiat. Seuraavassa luvussa 6.3.2 käsitellään, mitä pitää huomioida venttiilimitoituksessa. Luvussa käydään läpi, minkälainen mitoitus on nykyään autoklaaviproessissa. Viimeisessä luvussa 6.4 käydään läpi mittaus, joka suoritettiin tähän työhön liittyen.

Terrafamen akkukemikaalitehtaan paineliuotuksen autoklaavissa on viisi lohkoa. Lähtötilanteen selvityksessä otetaan huomioon kaikki autoklaavin lohkot. Tämän jälkeen työtä rajataan ja syvennyttään yhteen lohkoon työmäärän vähentämiseksi. Työssä tarkastellaan autoklaavin 2. lohkoa. Tähän päädyttiin, koska toisessa lohkoissa on eniten tarvetta jäähdytykselle, kun verrataan kaikkia lohkoja. Eli 2. lohkoissa on eniten jäähdytys-elementtejä. Näin ollen, jos työn parannusehdotus otetaan käyttöön, on tulevaisuudessa tehtävät testaukset käynnistysvaiheessa helpoin tehdä kyseiselle lohkolle.

Työssä hyödynnetään Wedge-prosessinanalyysijärjestelmää, josta saadaan tietoja lämpötilan säädön toiminnasta. Wedgen avulla tiedot on mahdollista muodostaa ja havainnollistaa sellaiseen muotoon kuin käyttäjälle on paras. Wedgeä hyödynnettiin luvussa 6.3 ja sen alaluvuissa.

6.1 Reunaehdot

Autoklaavin lämpötilan säädön suunnitellun pohjana on reunaehdot, joiden mukaan säätö rakennetaan. Työssä käsiteltävän autoklaavin reunaehtoja on neljä. Nämä ehdot ovat

1. Kavitaationriski on mahdollinen
2. Autoklaavin kokolämpötilan pitää pysyä tasaisena
3. Autoklaavin paluulinjan lämpötila ei saa nousta liian korkealle

4. Säättöä rajoittaa se, että jokaisessa linjassa on paine- ja lämpötilamittaus eikä ollenkaan virtausmittausta

Kavitaation todennäköisyyttä pienennetään oikeilla laitemitoituksilla sekä prosessiarvoilla. Ehkäisevää kunnossapitoa hyödyntäen saadaan aktiivisesti tietoa linjaston ja toimilaitteiden kuntoa, kuten erilaisilla kenttäkierroksilla. Autoklaavin keskilämpötilan yläraja on 195 °C ja alaraja on 160 °C. Vastaavasti autoklaavilta pois tulevan jäähdytysveden lämpötilan yläraja on 80 °C ja alaraja on 5 °C.

6.2 Olemassa oleva säätö

Terrafamen sisäisestä tiedostojenhallinnasta löytynyt dokumentti kertoo autoklaavin lämpötilan säädön toiminnan. Paineliuotuksessa käytettävän autoklaavin lämpötilan mittaus, muodostuu neljästä lämpötilanmittauksesta. Ensimmäiset kolme lämpötilanmittausta mittaavat autoklaavin lämpötilaa. Neljäs mittaus laskee edellisten kolmen mittauksen keskiarvon. Jos jokin kolmesta mittauksesta eroaa ± 10 °C keskiarvomittauksesta, jätetään kyseinen mittaus huomiotta. Tällöin keskiarvo lasketaan kahdesta jäljelle jääneestä mittauksesta. Laskenta tapahtuu turvalogiikassa. (Terrafame Oy, Henkilökohtainen tiedonanto, 2023)

Edellä mainitussa Terrafamen sisäisessä dokumentissa kerrotaan että, paineliuotuksen autoklaavi koostuu viidestä lohokosta, jossa jokaisella loholla on oma lämpötilan säätäjä. Eli lämpötilan säätäjiä on yhteensä viisi. Lämpötilan säätäjät toimivat sekä käyttö- että lämmitysvaiheessa. Jokaiselle viiden lämpötilan säätäjille on oma jäähdytysvesien yläsäätäjä, jota hyödynnetään hapensyötön aloitettua. Sekä lämpötilan säätäjille, että jäähdytysvesien yläsäätäjille on yksi yhteinen lämpötilan asetusarvo lohkoittain. Yhteisen asetusarvon avulla jokaisen lohkon lämpötila ja jäähdytysvesi pysyvät keskenään tasapainossa. (Terrafame Oy, Henkilökohtainen tiedonanto, 2023)

Jäähdytysvesisäädöt koostuvat yläsäätäjistä sekä alasäätäjistä. Jäähdytysvesien yläsäätäjät ovat keskenään rinnakkaissäätäjiä. Ne ohjaavat kaskadina oman lohkonsa suljettuja vesikiertoja asetusarvoja, jotka puolestaan ovat alasäätäjiä. Alasäätäjät ohjaavat

lämmönvaihtimia eli jäädytyslementtejä säätöventtiileillä. Alasäättäjien määrä on sama kuin lämmönvaihtimilla, joita on lohossa yksi tai useampi. Lämmönvaihtimet ovat rinnakkain kytketty. (Terrafame Oy, Henkilökohtainen tiedonanto, 2023)

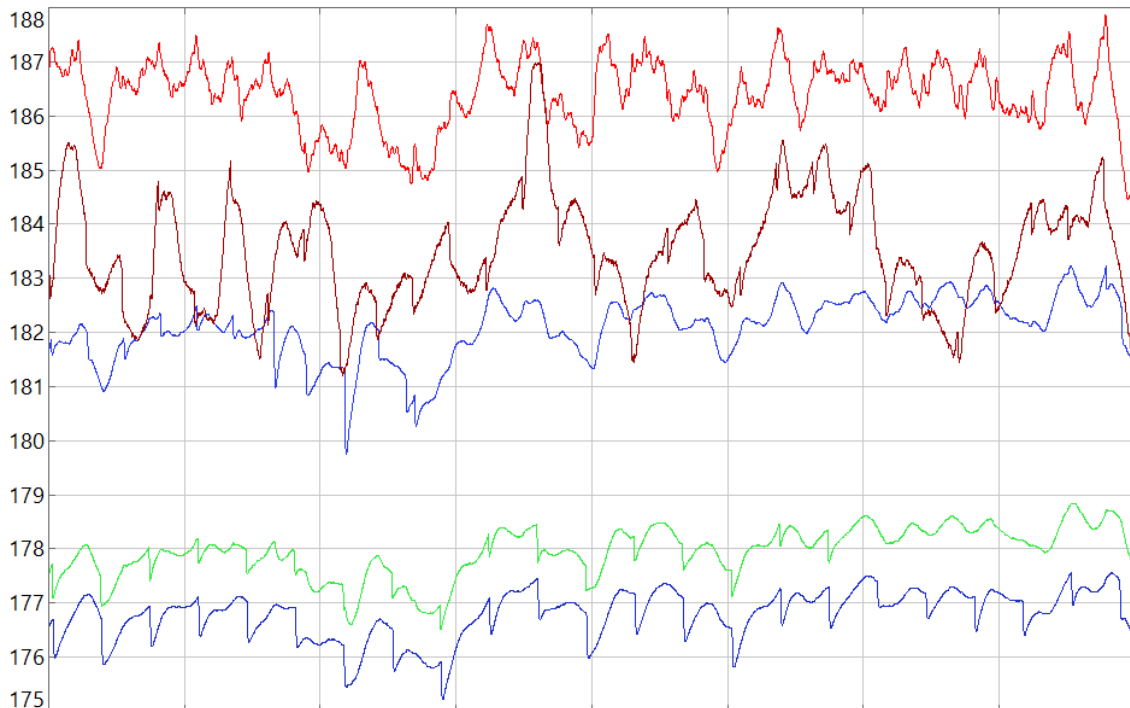
Lämpötilan rajut muutokset estetään maksimimuutosnopeudella, joka on ± 30 °C/h. Se on autoklaavin lämpötilan luvallinen muutosnopeus. Tämä rajoite on voimassa vain automatiikassa. Edellä mainitut lämpötilan säätäjät saavat erkaantua asetusarvosta vain ± 10 °C. Tällöin lämpötilan nousu tai lasku eli muutosrampin asetusarvo jäädytetään. Myös operaattori tasolla rajoitetaan lämpötilan muutoksia, joka on enintään 0,5 °C/min. (Terrafame Oy, Henkilökohtainen tiedonanto, 2023)

6.3 Nykytilanteen ongelmat

Koska nykyinen lämpötilan säätö ei toimi kunnolla, aiheutuu siitä ongelmia. Isoin ongelma nykyisessä lämpötilan säädössä on lämpötilan suuri vaihtelevuus yhden lohkon sisällä. Kuvassa 10 on noin 88 tunnin ajalta trendiä, jossa näkyy jokaisen viiden lohkon lämpötilan säätäjän lämpötilajakaumaa kyseiseltä ajalta. Kolme ylempää käyrää ovat autoklaavin lohkon kolme ensimmäistä lohkoa, joiden normaali lämpötila on suurempi kuin kahden viimeisen lohkon lämpötila. Lohkot 4 ja 5 ovat kuvan 10 kaksi alinta käyrää. Pystyakselilla on lämpötila celsiusena ja vaaka-akselilla yksi ruutu on/vastaa noin 11 tuntia.

Yhden lohkon sisäistä huojuntaa tapahtuu paljon ja kyseessä on prosessin normaalia ohjausta. Lisäksi on paljon jyrkkiä lämpötilamuutoksia. Esimerkiksi ruskealla käyrällä on 33 ja 44 tunnin välissä hyvin korkea ja nopea nousu. Huojunta johtuu siitä, ettei säädön virittäminen ole oikeanlainen kohteeseen. Jotta säätö voi olla kunnossa, edellyttää se sopivaa laitemitoitusta.

Kuva 10. Autoklaavin viiden lämpötilan säätäjän lämpötilajakauma 88 tunnin ajalta.



Lämpötilan säädön toimimattomuuden takia aiheutuu siitä ongelmia prosessin ohjaukseen. Prosessia on mahdollista ohjata automaattilla, mutta se ei ole vakaata johtuen säädön toimimattomuudesta. Tämän takia prosessia ohjataan enemmän manuaalilla.

Nykyisten säädön ongelmien takia on oleellista paneutua myös energia- ja ainetaseeseen sekä laitemitoitukseen. Autoklaavin lämpötilan säätöä ei voida kunnolla parantaa, jos energia-, ainetaseita ja laitemitoitusta ei korjata. Ensin käsitellään aiheita yleisesti, jonka jälkeen aiheisiin paneudutaan Terrafamen näkökulmasta.

6.3.1 Aine- ja energiatase

Tämän työn kannalta on tärkeää ymmärtää sekä aine- että energiatase, jotta käsitetään prosessissa syntyvä energia ja prosessiin tarvittava jäähdytys. Ainetase perustuu siihen, että prosessiin eli systeemiin ja systeemistä pois virtaa saman verran tilavuusvirtauksia.

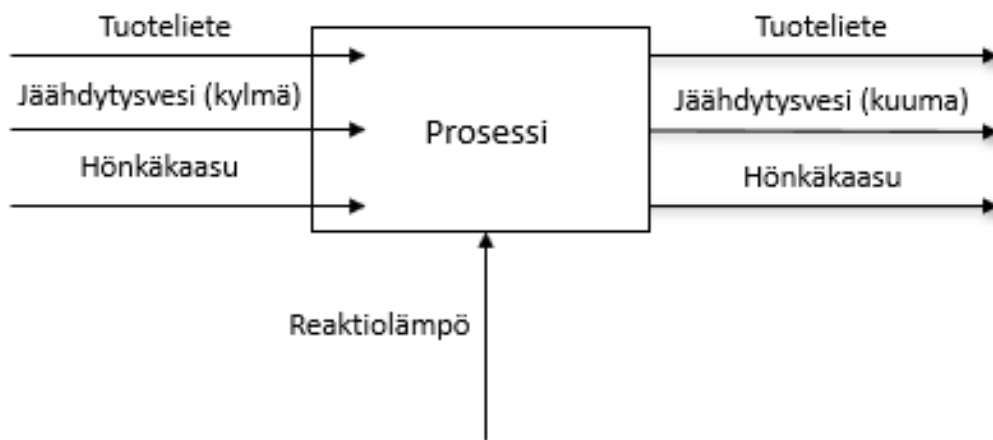
Systeemin täytyy olla tasapainotilassa, jolloin virtausten suhde pysyy muuttumattomana.

(Malinen, 2018, s. 13)

Energiatase tarkoittaa käytännössä samaa kuin ainetase, mutta virtauksen sijaan tarkastellaan energiaa. Eli systeemiin tulevan ja lähtevän energian on pysyttävä vakiona, kun systeemi on tasapainossa. Systeemiin on mahdollista saada energiaa esimerkiksi lämmön tai työn avulla. (Malinen, 2018, s. 16)

Autoklaaviprosessissa tarkastellaan tuotelietettä, jäähdytysvettä ja hönkäkaasua, jotka kuljettavat energiaa prosessiin ja sieltä pois. Kuva 11 havainnollistaa prosessiin virtaavaa ja pois virtaavaa energiaa. Tuotelietettä, jäähdytysvettä sekä hönkäkaasua käsitellään tässä työssä ja niiden lämpömäärät selvitetään. Lämpömäärien avulla ratkaistaan aineiden mukana tuleva energia. Lämpömäärien avulla selvitetään, kuinka paljon energiaa kukin tuote tarvitsee. Sen avulla saadaan selville, ovatko lämpömäärät alkuperäisen oletuksen mukaiset. Prosessiin vaikuttavat myös happi ja hukkalämpö, mutta näiden osuus on pieni kokonaisuuteen nähden. Sen takia niitä ei huomioida laskennassa.

Kuva 11. Autoklaaviprosessiin tulevat ja lähtevät aineet.



Suurin osa laskennan arvoista on Terrafamen omista mittauksista, joita ei tässä työssä esitellä. Tuotelietteen ja jäähdytysveden lämpömäärä lasketaan massavirran avulla. Lähtötietona on tilavuusvirta, jota hyödynnetään massavirran laskennassa. Massavirta saadaan laskettua kaavalla (White, 2011, s. 146)

$$q_m = \rho \cdot q_v$$

missä q_m on massavirta, ρ on tiheys ja q_v on tilavuusvirta.

Massavirran ratkaisemisen jälkeen, voidaan massavirta sijoittaa lämpömäärän kaavaan. Näin ollen lämpömääräksi saadaan (Motiva, 2016, s. 4)

$$Q = q_m \cdot c (T_2 - T_1)$$

missä Q on lämpömäärä, q_m on massavirta, c on ominaislämpökapasiteetti, T_1 on alkulämpötila sekä T_2 on loppulämpötila.

Höikäkaasun tapauksessa pitää se jakaa kahteen tarkasteltavaan osaan: höyry ja happi. Molemmille saadaan oma tilavuusvirtaus tietyssä tarkasteluajalla, kun kerrotaan aineen oma pitoisuus kokonaisvirtauksella. Työn tilaajan kanssa käydyssä sähköpostikeskustelussa saatu kaava on muotoa (Terrafame Oy, Henkilökohtainen tiedonanto, 2023)

$$q_H = x \cdot q_v$$

missä kokonaisvirtaus jaettuna tarkasteluajalla q_v on tässä tapauksessa vakio. q_H on höyryn tai hapen tilavuusvirtaus jaettuna tarkasteluajalla, ja x on höyryn tai hapen pitoisuus.

Sähköpostikeskustelussa työn tilaajan kanssa saadusta kaavassa hyödynnetään ideaalikaasun tilanyhtälöä. Kaavan avulla lasketaan sekä höyrylle että hapelle ainemäärä, jolloin kaava on muotoa (Terrafame Oy, Henkilökohtainen tiedonanto, 2023)

$$n/t = \frac{p \cdot q_H}{RT}$$

missä n/t on ainemäärä jaettuna tarkasteluajalla, p on paine, q_H on tilavuusvirtaus, R on moolinen kaasuvakio ja T on lämpötila. Näin ollen ainemäärän yksiköksi saadaan mol/h. Koska höyrylle ja hapelle lasketaan oma ainemäärä, pitää käyttää juuri sen kaasun arvoja.

Aika kohtaisen ainemäärän jälkeen lasketaan höyryn ja hapen massavirta seuraavalla kaavalla (Turpeenoja & Lehtiniemi, 2016, s. 24)

$$q_m = n/t \cdot M$$

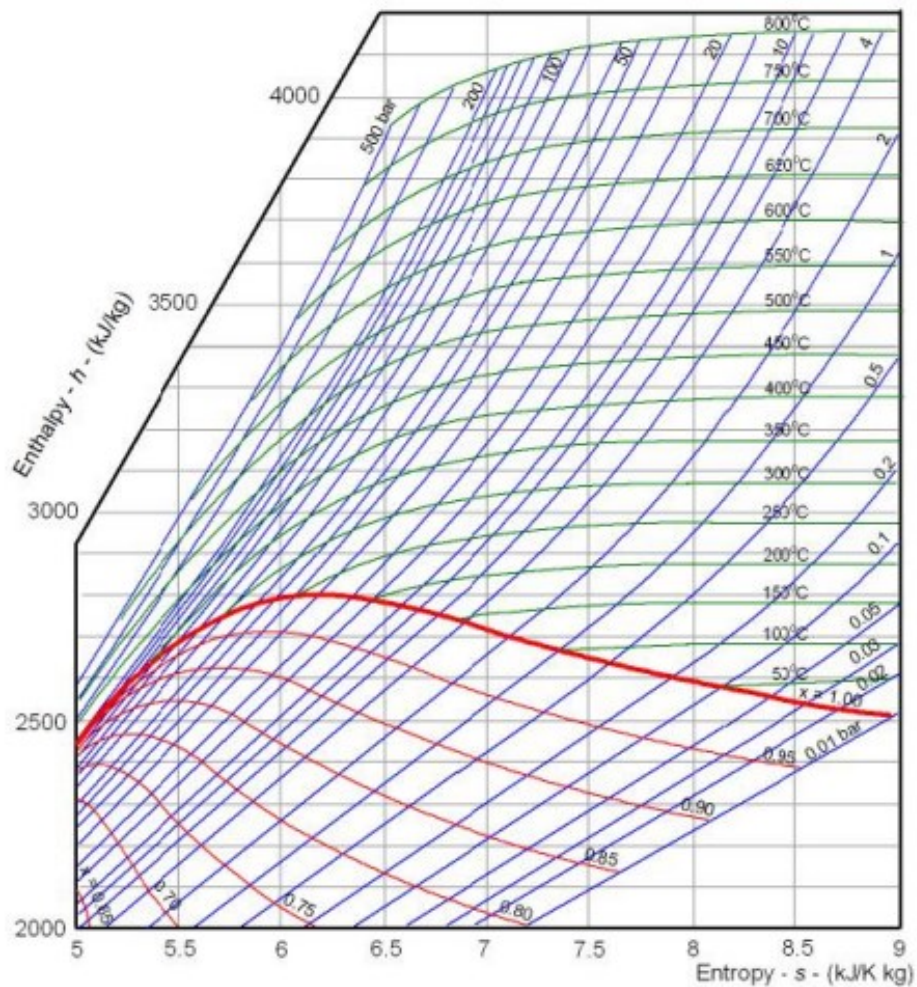
missä q_m on massavirtaus, n/t on ainemäärää tarkasteluajalla ja M on moolimassa. Koska ainemäärän yksikössä on aikamääre mukana, saadaan massavirtauksen yksiköksi g/h.

Hapen lämmitysteho P saadaan samalla kaavalla kuin tuotelietteen ja jäähdytysveden tapauksessa, kun massavirta korvataan massalla. Höyryn lämmitysteho P lasketaan höyryn entalpian kautta, joka saadaan kaavalla (Terrafame Oy, Henkilökohtainen tiedonanto, 2023)

$$P = q_m \cdot H$$

missä P on lämmitysteho, q_m on massavirtaus ja H on entalpia. Entalpian arvona on käytetty 2077 kJ/kg. Tämä on määritettävissä kuvasta 12.

Kuva 12. Höyryn entalpiian määrittäminen (The engineering toolbox, n.d.).



Näiden laskelmien perusteella voidaan todeta, että aiemmin tehty mitoitus varsinkin hönkäkaasun höyrylle ei ole oikein. Tuotelietteen ja jäähdytysveden osalta laskelmat ovat suhteellisen paikkaansa pitäviä, joten niihin ei tarvitse tehdä muutoksia. Tämä voidaan todeta, koska tuotelietteen ja jäähdytysveden osalta lämpömäärät ovat alkuperäisten olettamuksien mukainen. Näin ei kuitenkaan ollut hönkäkaasun höyryn osalta.

6.3.2 Laite- ja venttiilimitoitus

Koska laitemitoitus on laaja termi, on tarpeellista rajata sitä tähän työhön sopivaksi. Tärkeimmät mitoitusta vaativat laitteet ovat säätöventtiilit. Hyvällä säätöventtiilin valinnalla on sekä selkeä vaikutus prosessin sujuvuuteen että laitteiston kestoikään (Konwell, 2017).

Säätöventtiilin valintaa varten täytyy tietää putken nimelliskoko, paineluokka, toimilaitteen käyttövoima ja väliaine. Muut lisätiedot paineesta, lämpötilasta ja muista mahdollisista fysikaalisista ominaisuuksista on tärkeää ilmoittaa ennen lopullista säätöventtiilin valintaa. Säätöventtiilintyyppi on mahdollista valita näiden tietojen mukaan. Myös paineluokan, runko- ja tiivistemateriaalin sekä sulkuelimen muodon määrittäminen on mahdollista näiden tietojen pohjalta. (Konwell, 2017)

Suuri vaikutus säätöventtiilien mitoituksessa on venttiilin KVS-arvo, joka on venttiilivalmistajan määrittelemä arvo. Arvo ilmaisee venttiilin kaikkein suurimman läpipääsykyvyn, kun venttiili on kokonaan auki-asennossa. KVS-arvon yksiköksi saadaan m^3/h . (Konwell, 2017) Venttiilin läpi virtaavan aineen maksimimäärää voidaan kuvata myös Kv- ja Cv-arvoilla. Kv-arvoa kutsutaan venttiilin kapasiteettikertoimeksi. Kerroin lasketaan mittauksilla, jossa venttiilin läpi virtaa 5–40 °C vettä. Mittauksessa mitataan ensin veden virtausmäärä erilaisissa venttiilin sulkuelimen asennoissa. Kun virtausmäärä on selvillä, voidaan laskea venttiilin Kv-arvo. Cv-arvon kohdalla mittaus suoritetaan minuutissa ja silloin yksikkö ilmoitetaan yhdysvaltalaisen mittayksiköiden avulla. (Ilmonen, 2019, ss. 15-16)

Toinen tärkeä huomioitava asia säätöventtiilien mitoituksessa käyttötarkoitus. Eli säätääkö säätöventtiili pinnankorkeutta, virtausmäärää, painetta vai lämpötilaa. Säätöventtiilien toimilaitteet ovat kolmas mitoitukseseen vaikuttava tekijä. Suosituimmat toimilaitteet ovat sähköinen ja sähköpneumaattinen. Sähköistä toimilaitetta tarvitaan, kun venttiilin eropaine on liian suuri sekä sulkuvoimaa tarvitaan runsaasti. Sähköpneumaattinen toimilaitte sopii haastaviin olosuhteisiin, kuten täriseviin ympäristöihin. (Konwell, 2017)

Terrafamen jäähdytysjärjestelmän säätöventtiileinä käytetään v-aukkoista segmenttiventtiiliä, joiden mitoituksissa hyödynnetään Cv-arvoa. Jäähdytysjärjestelmän säätöventtiilit säätävät jäähdytysvettä, joka virtaa jäähdytys-elementeissä. Säätöventtiilejä ohjataan autoklaavin lämpötilan mukaan. Luvussa 6.3.1 todettiin laskelmien avulla, että hönkäkaasun höyryn lämpöenergia on laskettu väärin. Tästä syystä autoklaavin jäähdytysjärjestelmän laitemitoitusta on parannettava. Tällä hetkellä säätöventtiilit ovat mitoitettu liian suuriksi.

6.4 Jäähdytysveden virtauksen mittaus

Tähän työhön liittyen suoritettiin mittaus Terrafamen tehtaalla, jossa mitattiin jäähdytysveden tilavuusvirtausta. Virtausmittaus toteutettiin 10 %–84 % välisellä venttiilin ohjauksella. Mittaus suoritettiin autoklaavin toisen lohkon toisen jäähdytys-elementin jäähdytysveden syöttölinjasta autoklaaviin. Mittalaite kiinnitettiin kyseiseen syöttölinjaan, jota kuva 13 havainnollistaa. Työ toteutettiin Siemens Sitrans F laiteella, joka näkyy kuvassa 14.

Kuva 13. Mittalaitteen sijainti linjastossa.



Kuva 14. Mittauksissa käytettävä Siemens Sitrans F -mittalaite.



Mittauksesta saatu tieto oli sekä Terrafamelle että tälle työlle erittäin tarpeellista ja hyödyllistä. Autoklaavin lohkoille kulkevan jäähdytysveden linjastoissa ei ole yhtään virtausmittausta. Tästä syystä ei aiemmin voitu olla varmoja, kuinka paljon lohko- tai jäähdytyslementtikohtaisesti jäähdytysvettä syötetään. Liitteenä 1 on mittauksesta saadut tulokset. Virtausmittaus toteutettiin veden lämpötilan arvolla 50 °C. Ohjauksen ollessa 10–19 % on venttiilin virtaus yksiköltään l/h, koska virtaus oli suuruudeltaan pieni. Kun virtaus kasvoi tarpeeksi suureksi, vaihdettiin yksiköksi m^3/h . Mittauksen lopputuloksena saatiin se, että jäähdytysveden virtaus on paljon pienempi mitä aiemmin oletettiin. Mittauksen tuloksia Terrafame voi hyödyntää esimerkiksi prosessia ajaessa ja erilaisissa ongelmatilanteissa.

7 Parannusehdotus

Nykyisessä autoklaavin lämpötilan säädössä on isoja puutteita itse lämpötilan säädön lisäksi laitemitoituksissa. Näin ollen muutoksia on tarpeen tehdä myös laitemitoituksiin, koska pelkästään lämpötilan säätöön tehtävät muutokset eivät ole riittävät. Suurimmat puutteet ovat autoklaavin jäähdytysjärjestelmässä, jossa täytyy parantaa olemassa olevaa laitemitoitusta. Autoklaavin jäähdytysprosessin säätöventtiilit ovat liian suuriksi mitoitettuja. Myös jäähdytys-elementit ovat ylimitoitettu.

Ensin käydään läpi parannusehdotuksia venttiilimitoitukseen sekä jäähdytys-elementtejä koskien. Venttiilimitoituksessa tarkastellaan eri venttiilivalmistajien venttiileitä. Tämän jälkeen tarkastellaan lämpötilan säädölle korvaavaa ratkaisua.

7.1 Venttiilimitoitus

Käytössä oleva jäähdytysjärjestelmän säätöventtiili on v-aukkoinen segmenttiventtiili. Venttiilit ovat mitoitettu liian suuriksi ja nykyinen segmenttiventtiili ei ole kohteeseen paras mahdollinen. Venttiilimitoituksen parantamiseksi on suositeltavaa vaihtaa venttiili. Kohteen haastavuuteen nähden istukkaventtiili sopisi säätöventtiiliksi jäähdytysjärjestelmään. Kohteessa esiintyy paineenvaihteluita ja ominaisuuksiltaan istukkaventtiili kestää hyvin painetta. Säätöventtiiliksi kyseinen venttiili sopii ihanteellisesti, koska venttiilin avautuessa vesi pääsee virtaamaan välittömästi täydellä paineella. Seuraavaksi erilaisia istukkaventtiileitä.

Ensimmäinen vaihtoehto on Konwell-toimittajan tarjoama ARI-STEVI -säätöventtiilisarja. Kuvassa 15 esimerkki sarjasta 441. Sarjan venttiilit ovat tarkoitettu juuri säätöventtiileiksi ja siten säätöventtiili on mahdollista mitoitaa juuri sopivaksi kattavan valikoiman avulla. Venttiilit kestävät painetta, joka on kohteen kannalta tärkeää. Oikealla materiaalivalinnalla saadaan venttiilimitoitettua juuri sopivaksi. Kuvassa 15 oleva säätöventtiili on ruostumatonta terästä. 2-tiesäätöventtiilit, jota suositellaan käytettäväksi kohteessa, on mahdollista saada joko lineaarisella tai 100 %:lla säätökäyrällä. (Konwell Oy Ab, n.d.)

Säätöventtiiliin kuuluu toimilaite, joka mitoitetaan hyödyntäen tehtaan nykyisiä toimilaitteita. Näin ollen säätöventtiili on räätälöity jokaiselle toimilaitteelle. Toimilaitteita on mahdollista hankkia myös aivan uutena säätöventtiilin kanssa. Kuvan 15 toimilaite on sähköinen. (Konwell Oy Ab, n.d.)

Kuva 15. ARI-STEVI 441 -säätöventtiili sähköisellä toimilaitteella (Virtualexpo group, n.d.).



Toinen ehdotettava säätöventtiili on GEMÜ:n 530 -istukkaventtiili, joka on kuvassa 16. Istukkaventtiili kestää hyvin painetta sekä lämpötilaa. Kyseinen venttiili on oivallinen valinta haastaviin ja monimutkaisiin sovelluksiin. Venttiili on tehty kestävästä ja laadukkaista materiaaleista. Venttiilille on valittavissa hätävirtalähdemoduuli, joka on ulkoinen. Istukkaventtiili on kommunikaatiokykyinen, koska se on mahdollista liittää selainpohjaiseen Ethernetiin. (GEMÜ Group, n.d.)

Istukkaventtiilin toimilaite on onttoakselitoimilaite. Toimilaite on mahdollista saada joko yhdistettynä asento- tai prosessisäätimeen tai avaus/sulku-toimilaitteena. Venttiiliin kuuluu itsestään säätävä tiiviste. (GEMÜ Group, n.d.)

Kuva 16. GEMÜ 530 2-tieistukkaventtiili (GEMÜ Group, n.d.).



7.2 Jäähdytyselementit

Nykyinen jäähdytysjärjestelmän mitoitus ei ole toimiva, koska järjestelmä on ylimitoitettu. Jäähdytyslementtejä on liikaa siihen nähden, kuinka paljon todellisuudessa tarvitaan jäähdytystä. Tästä syystä pitää jäähdytyslementtien määrää vähentää.

Se, kuinka paljon jäähdytyslementtejä pitäisi vähentää, ei ole helposti ratkaistavissa. Lohkossa kaksi on neljä jäähdytyslementtiä. Jokaisessa lohkossa on sama määrä säätöventtiileitä kuin jäähdytyslementtejä. Toisessa lohkossa on siis neljä säätöventtiiliä. Terrafamalla tehdyssä jäähdytysveden virtausmittauksessa saatiin selville toisen lohkon toisen jäähdytyslementin tilavuusvirtaus. Kun prosessia ohjataan, yleensä toisen lohkon säätöventtiili on 10 %:n ohjauksella. Toisessa lohkossa on neljä säätöventtiiliä, jolloin säätöventtiilien ohjauksen summa on 40 %. Liitteestä 1 nähdään, mikä on venttiilin virtaus kyseisellä ohjauksella, kun oletetaan toisen lohkon säätöventtiilien olevan ominaisuuksiltaan samanlaiset. Tämä tarkoittaa, että toiseen lohkoon virtaa yhteensä $6,2 \text{ m}^3/h$ jäähdytysvettä. Autoklaaviin syötetään noin $90 \text{ m}^3/h$ jäähdytysvettä, josta hyvin pieni osa menee toiseen

lohkoon, jonka jäähdytyksen tarve on yksi suurimmista. Näillä tiedoilla ei pystytäkään määrittämään tarkasti, kuinka monta jäähdytyslementtiä pitää vähentää toisesta lohkokosta.

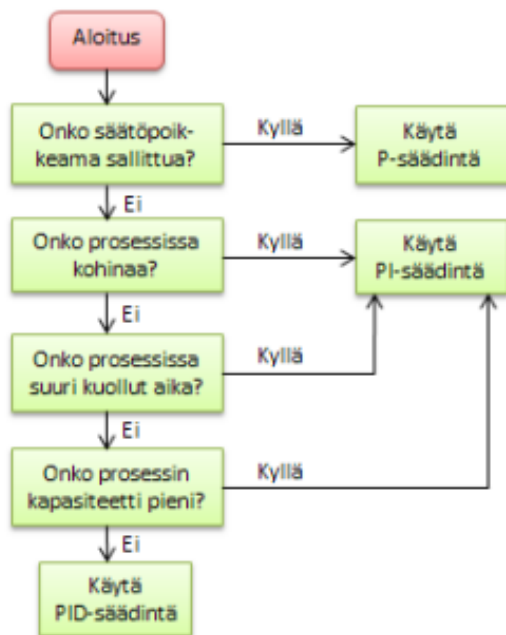
Tästä syystä on erittäin tarpeellista tietää, kuinka paljon jäähdytysvettä todellisuudessa virtaa, koska yhteen jäähdytyslementtiin virtaava jäähdytysvesi oli odotettua pienempi. Tämä saatiin selville suoritettujen virtausmittauksen tuloksena. On siis tärkeää saada jokaiselle jäähdytyslementin syöttölinjalle virtausmittaus. Tällä tavalla mikään tieto ei jää pimentoon ja myös operaattoreiden työ helpottuu prosessin ohjauksen kannalta. Virtausmittauksia on vain kaksi kappaletta: järjestelmän syöttölinjassa ennen 1. lohkoa ja paluulinjassa 5. lohkon jälkeen.

7.3 Lämpötilan säätö

Nykyisessä autoklaavin lämpötilan säädössä on kolme lämpötilaa mittaavaa mittausta. Neljäs mittaus laskee keskiarvon kolmesta mittauksesta. Jos keskiarvomittauksesta jonkin mittauksen ero on ± 10 °C, ei kyseinen mittaus ole mukana keskiarvomittauksessa. Silloin keskiarvo lasketaan vain kahden mittauksen avulla. Autoklaavin jokaisessa viidessä lohkokossa on yksi lämpötilan säätäjä sekä yksi jäähdytysveden yläsäätäjä. Molemmilla on yhteinen asetusarvo lohkoittain. Jäähdytysvesisäädöt muodostuvat yläsäätäjistä ja alasäätäjistä, joiden ohjauksessa hyödynnetään kaskadia. Yhdessä ne ohjaavat lohkoittain jäähdytysveden säätöä. Alasäädöt ohjaavat jäähdytyslementtien säätöventtiileitä.

Nykyisessä autoklaavin lämpötilan ja jäähdytyksen säädössä on ongelmia. Säädössä ilmenee lämpötilan huojuntaa, josta aiheutuu prosessin epätasainen ja vaikea ohjaus. Huojuntaa on mahdollista rajoittaa oikeanlaisella mitoituksella ja tässä tapauksessa myös säätimen vaihto on tarpeen. Säätimen valinnan apuna toimii kuva 17.

Kuva 17. Kaavio, jonka avulla valitaan sopiva säädin (Svrcek ym., 2000, s. 114).



Kuvaa 17 hyödyntäen päästään PI-säätimeen. Sen avulla voidaan pienentää lohko kohtaisten lämpötilasäätäjien huojuntaa ja kohinaa. Silloin saadaan lämpötilan säädöstä tasaisempaa. Luvun 4.2 kaavoja hyödyntäen on mahdollista laskea ohjausmuuttujat u . Prosessin säätimen vahvistus ja integrointiaika tulee määrittellä uudestaan parhaan mahdollisen lopputuloksen saamiseksi.

8 Yhteenveto

Työn tarkoituksena oli luoda Terrafamen akkukemikaalitehtaalle parannusehdotus liittyen autoklaavin lämpötilan ja jäähdytyksen säätöön. Aiheeltaan työ oli poikkeuksellinen ja erityinen siihen nähden, kuinka ainutlaatuinen työn tilaajan autoklaavi on. Kyseinen autoklaavi on mittakaavaltaan kookas ja sen käyttöönottossa on tarvittu paljon asiansa osaavaa henkilöstöä. Muualla Suomessa ei ole autoklaaveja samassa mittakaavassa kuin Terrafamella.

Jotta tavoitteeseen päästiin, piti tarkastella taseita ja prosessin laitemitoituksia. Kun aine- ja energiataseiden lämpömääriä laskettiin, kehittyivät minun käyttötaitoni Wedge-järjestelmään entisestään. Minulla oli hieman aikaisempaa osaamista kyseisestä järjestelmästä, koska olin ollut kesätöissä Terrafamella. Työhön liittyen suoritettiin Terrafamella mittaus jäähdytysveden virtaukseen. Mittauksella oli tärkeä rooli työn tavoitteeseen pääsemiseksi. Virtausmittauksia lisäämällä parannetaan autoklaaviprosessia. Autoklaavin lämpötilan säätimeksi valittiin PI-säädin, jolla voitaisiin vähentää lämpötilan ohjauksessa syntyvää kohinaa ja huojuntaa. Tällöin prosessia on helpompi ohjata automaattilla, kun lämpötilan säätäjät eivät huoju niin usein ja paljon.

Työn tavoitteeseen päästiin eli työn tilaajalle saatiin parannusehdotus lämpötilan säädölle. Tosin parannusehdotuksen PI-säädintä ei viritetty, koska se rajattiin työn ulkopuolelle. Työ on kattava, vaikka työtä rajattiin autoklaavin lämpötilaan ja jäähdytykseen. Työhön on otettu mukaan kaikki oleellinen, mitä autoklaavin lämpötilan säätöön vaaditaan. Nämä oleellisimmat asiat ovat reunaehdot, taseet sekä laitemitoitus, joita työssä tarkasteltiin.

Työtä tehdessä opin uusia asioita laitemitoituksesta, kuten mitä mitoituksissa pitää ottaa huomioon. Kehitin myös omaa lähdekriittisyyttäni. Muutenkin oppimista tapahtui koko työprosessin ajan, oli kyseessä tiedon hankkiminen tai työn kirjoitus. Vaikka ongelmia matkan varrella tuli, olen silti tyytyväinen työhöni ja siihen mitä olen itse tuottanut.

Terrafamelle tästä työstä on ollut apua. Työn tilaaja on saanut vastaukset kysymyksiin, miksi nykyinen autoklaavin lämpötilan säätö ei toimi sekä, miten säätöä voidaan kehittää.

Autoklaavin lämpötilan säätäjien huojuntaa ja kohinaa saadaan pienennettyä näillä työssä esitetyillä kehitysehdotuksilla.

Lähteet

- Ahonen, T. (2017). *Lohkarekoon ja siirtymän hallinta avolouhinnassa* [Insinööriyö, Metropolia ammattikorkeakoulu].
https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/125924/Ahonen_Tuomas.pdf;jsessionid=681F3BFC56877455E5AD7BE84C1812AC?sequence=1
- Aluehallintovirasto. (2021). *Akkukemikaalitehtaan ympäristölupa*. Ympäristölupa. Haettu 5.4.2023 osoitteesta <https://avi.fi/tiedote/-/tiedote/69898723>
- GEMÜ Group. (n.d.). *GEMÜ 530*. [kuva]. Haettu 10.5.2023 osoitteesta https://www.gemu-group.com/fi_FI/venttiilitekniikka/istukkaventtiilit/istukkaventtiili-530/
- Harju, T.; & Marttinen, A. (2000). *Säätötekniikan koulutusmateriaali*. Suomen automaatioseura.
https://www.automatioseura.fi/site/assets/files/1426/pid_kirja_1-1.pdf
- Ilmonen, K. (2019). *Venttiilikavitaatio* [Opinnäytetyö, Turun ammattikorkeakoulu].
https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/166022/Ilmonen_Kaisa.pdf;jsessionid=AC498C950B9347390E274E073285552F?sequence=2
- Jalava, S. (2021). *Kriittisten venttiilien linkkaarisuunnittelu* [Opinnäytetyö, Satakunnan ammattikorkeakoulu].
https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/495742/Jalava_Samuli.pdf?sequence=2
- Kanttonen, K. (2021). *Venttiilimäärittelyn kehittäminen* [Insinööriyö, Metropolia Ammattikorkeakoulu].
https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/493489/Kanttonen_Kasper.pdf?sequence=2
- Kauranne, H., Kajaste, J. & Vilenius, M. (2004). *Hydraulitekniikan perusteet*. WSOY.
- Kippo, A. & Tikka, A. (2008). *Automaatiotekniikan perusteet*. Edita Prima Oy.
- Kivioja, S., Kivivuori, S. & Salonen, P. (2004). *Tribologia - Kitka, kuluminen ja voitelu*.
- Konwell. (9.2.2017). Säätöventtiilin valinnan perusteet. *Vierailijablogi*.
<https://www.konwell.fi/fi/viestinta-ja-julkaisut/blogit/kuinka-hankkia-saatoventtiili>
- Konwell Oy Ab. (n.d.). *Toimilaitteelliset säätöventtiilit prosessiväliaineille*.
<https://www.konwell.fi/fi/tuotteet/prosessi/prosessiventtiilit/istukkaventtiilit/toimilaitteelliset-saatoventtiilit>

- Malinen, K. (2018). *Tulipesätase FluidProp-ohjelmalla* [Opinnäytetyö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto].
https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/149442/Kandidaatinty%C3%B6_Malinen_Kalle.pdf?sequence=2
- Motiva. (2016). *Energiatehokas lämmönsiirto*.
https://www.motiva.fi/files/11078/Energiatehokas_lammonsiirto_opas.pdf
- Nuotio, V. (2020). *Sumeiden säätöjen käyttö kemianteollisuuden* [Diplomityö, Aalto-yliopisto].
https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/47172/master_Nuotio_Ville_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Painelaitelaki 1144/2016. <https://www.finlex.fi/fi/laki/smur/2016/20161144>
- Ramboll Finland Oy. (8.10.2018). *Terrafame nikkeli- ja kobolttisulfaattien tuotanto*. [kuva].
Ympäristövaikutusten arviointiselostus.
<https://www.terrafame.fi/media/naapureille/yvat/akkukemikaali-yva/selostus/00-terrafame-akkukemikaalituotanto-yva-selostus.pdf>
- Rodelta. (n.d.). *Pump cavitation what happens and what causes it?* [kuva].
<https://www.rodelta.com/pump-cavitation/>
- Svrcek, W., Mahoney, D. & Young, B. (2000). *A Real-Time Approach to Process Control*.
[kuva].
- Terrafame Oy. (10.11.2017). *Terrafame Oy suunnittelee akkujen valmistuksessa käytettävien nikkeli- ja kobolttikemikaalien tuotantoa*.
<https://www.terrafame.fi/ajankohtaista/mediatiedotteet/terrafame-oy-suunnittelee-akkujen-valmistuksessa-kayttavien-nikkeli-ja-kobolttikemikaalien-tuotantoa.html?p78=18>
- Terrafame Oy. (18.9.2020). *Terrafamen tuottaman nikkelisulfaatin hiilijalanjälki teollisuuden pienin, kaikkiaan 60 % matalampi kuin tavanomaisilla tuotantoteknologioilla*.
<https://www.terrafame.fi/ajankohtaista/mediatiedotteet/terrafamen-tuottaman-nikkelisulfaatin-hiilijalanjalki-teollisuuden-pienin-kaikkiaan-60-matalampi-kuin-tavanomaisilla-tuotantoteknologioilla.html?p78=7>
- Merinova. (1.7.2021). *Terrafamen akkukemikaalitehtaan tuotannon ylösajo on käynnistynyt*.
[kuva].

<https://www.merinova.fi/uutiset/terrafamen-akkukemikaalitehtaan-tuotannon-ylosajo-on-kaynnistynyt/>

Terrafame Oy. (28.10.2022). *Terrafamen tammi–syyskuun 2022 liikevaihto ja liiketulos kasvoivat selvästi.*

<https://www.terrafame.fi/ajankohtaista/mediatiedotteet/terrafamen-tammi-e2-88-92syyskuun-2022-liikevaihto-ja-liiketulos-kasvoivat-selvasti.html>

Terrafame Oy. (n.d.-a). *Terrafame Oy*. Strategiset tavoitteet.

<https://www.terrafame.fi/yritys.html>

Terrafame Oy. (n.d.-b). *Kuvapankki*. [kuva].

<https://www.terrafame.fi/medialle/kuvapankki-ja-logot.html>

Terrafame Oy. (n.d.-c). *Terrafamen tuotantoprosessi*.

<https://dreambroker.com/channel/ug5a9plz/iframe/4i0y5ue9?quality=720p>

Terrafame Oy. (n.d.-d). *Tuotantomenetelmämme*. Bioliuotus:

<https://www.terrafame.fi/tuotteemme/tuotteemme-matka.html>

The engineering toolbox. (n.d.). *Water-Steam Mollier Diagram*. [kuva]. Haettu 20.4.2023

osoitteesta https://www.engineeringtoolbox.com/mollier-diagram-water-d_308.html

Turpeenoja, L. & Lehtiniemi, K. (2016). *Mooli – Ihmisen ja elinympäristön kemia*.

Turvallisuus- ja kemikaalivirasto. (2020). *Vaarallisten kemikaalien laajamittainen teollinen käsittely ja varastointi*. Lupahakemus.

<https://tukes.fi/documents/5470659/20429854/Hakemus%20Terrafame/52cd928e-b5c7-b0d2-4ac1-2218e2d1552a/Hakemus%20Terrafame.pdf>

Turvallisuus- ja kemikaalivirasto. (n.d.). *Painelaitteet*.

<https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/painelaitteet>

Virtualexpo group. (n.d.). *Control valve ARI-STEVI Smart 440 / 441*. [kuva]. Haettu 31.3.2023 osoitteesta

<https://www.directindustry.com/prod/ari-armaturen/product-13874-1947019.html>

White, F. (2011). *Fluid Mechanics*.

Liite 1: Jäähdytysveden virtausmittauksen tulokset

Venttilin ohjaus	Venttiilin virtaus
10 %	-100 – 200 l/h
14 %	450 l/h
17 %	740 l/h
19 %	850 l/h
21 %	1,3 m3/h
23 %	1,6 m3/h
25 %	2,2 m3/h
27 %	2,6 m3/h
29 %	3,2 m3/h
31 %	3,6 m3/h
32 %	3,7 m3/h
34 %	4,6 m3/h
36 %	5,0 m3/h
38 %	5,7 m3/h
40 %	6,2 m3/h
42 %	6,9 m3/h
44 %	7,4 m3/h
46 %	8,2 m3/h
48 %	8,8 m3/h
50 %	9,4 m3/h
52 %	10,2 m3/h
54 %	11,1 m3/h
56 %	12,5 m3/h
58 %	13,5 m3/h
60 %	14,6 m3/h
62 %	15,5 m3/h
64 %	16,6 m3/h
66 %	17,6 m3/h
68 %	18,4 m3/h
70 %	19,5 m3/h
72 %	20,2 m3/h
74 %	21,1 m3/h
76 %	22,9 m3/h
78 %	23,8 m3/h
80 %	24,6 m3/h
82 %	25,6 m3/h
84 %	26,5 m3/h