



Teemu Torvinen

Savukaasun lauhdutinjärjestelmän käyttö ja käytön optimointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

29.11.2022

Tiivistelmä

Tekijä:	Teemu Torvinen
Otsikko:	Savukaasun lauhdutinjärjestelmän käyttö ja käytön optimointi
Sivumäärä:	43 sivua + 2 liitettä
Aika:	29.11.2022
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine:	Energiatekniikka
Ohjaajat:	Prosessi-insinööri Eetu Villikka Lehtori Juha Kotamies Lehtori Tomi Hämäläinen

Insinööriyössä selvitettiin Keravan Energialle savukaasun lauhdutusjärjestelmän käytön kannalta sen olennaisimpia prosessinosia, sekä laskettiin järjestelmän kannattavuutta eri sähkön hinnoilla. Sähkön hinnan nousun takia sähköntuotannon optimointi on voimalaitoksilla tärkeää, jotta toiminta pysyy mahdollisimman tuottavana.

Työssä käytiin läpi järjestelmän valmistajadokumentteja, ja luotiin niiden pohjalta katsaus toiminnalle kriittisimpiin järjestelmänosiin, sekä kattava käynnissäpito-ohje käyttökonekunnan tueksi päivittäisiä ja kuukausittaisia kierroksia varten. Käytön optimointiosiossa laskettiin ensin, kuinka paljon 0–20 MW:n tehoalueella järjestelmä pysyy vaikuttamaan kaukolämmön paluuveden lämpötilaan ja lämpötilan nousun vaikutus sähkön tuotantoon. Vaikutusta tutkittiin ilman tuorehöyryn tuotannon säätöä ja sen kanssa.

Lopputuloksena päästiin laskelmiin, joissa paluulämpötilan nosto yhdellä celsiusasteella vaikutti vastapainevoimalaitoksella tuotettuun sähkötehoon noin 0,2 %, jos tuorehöyryn tuotantoa ei muutettu. Tuorehöyryn tuotantoa muutettaessa järjestelmän tuottamat sähkötehohäviöt kasvoivat. Järjestelmän sähkötehohäviöt ja omakäyttökustannukset vähennettynä polttoainesäästöistä kääntyivät tappiolliseksi, kun sähkön Spot-hinta saavutti 113,125 e/MWh.

Avainsanat: biovoimalaitos, kannattavuus, savukaasulauhdutin, kaukolämpö, CHP-laitos

Abstract

Author: Teemu Torvinen
Title: Use and optimization of flue gas condensing system
Number of Pages: 43 pages + 2 appendices
Date: 29 November 2022

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Energy and Environmental Engineering
Professional Major: Energy Engineering
Supervisors: Eetu Villikka, Process Engineer
Juha Kotamies, Senior Lecturer
Tomi Hämäläinen, Senior Lecturer

The goal of this bachelor's thesis was to examine the most crucial parts of a flue gas condensing system and calculate the profitability at different prices of electricity. With the rise of electricity prices, optimizing electricity production is vital to a powerplant to maintain as profitable as possible operation.

A review of critical parts of the process and an operational instructions for daily and monthly maintenance checks were created based on manufacturer's documents. Optimization for use was calculated on 0 – 20 MW power range for the system. The goal was to find how much the flue gas condensing system affects district heating's return water temperature and how the rise of the return water temperature affects electricity production on the CHP-plant. The effect was examined with and without modifications to the production of live steam.

Increasing the return water temperature of the district heat system by one Celsius lowers the electricity output of a CHP-plant by 0,2 % when live steam production is left unaltered. The loss of electricity production rose drastically when the production rate of live steam was altered to counterbalance the power input of the system. Calculating the system's profitability by taking losses from electricity production and operating costs of the system and subtracting them from fuel savings, the system's net profitability turned to zero at 113,125 e/MWh

Keywords: bio powerplant, profitability, flue gas condensing system, district heating, CHP-plant

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Keravan Energia ja biovoimalaitos	1
2.1	Keravan energia -yhtiöt	1
2.1.1	Keravan Biovoimalaitos	2
2.1.2	Muut voimalat	3
2.2	Savukaasun lauhdutusjärjestelmä	3
2.2.1	Toimintaperiaate	4
2.2.2	Vesikemia	5
2.3	Kaukolämpö	9
2.3.1	Kaukolämpö ja sähköntuotanto	11
2.3.2	Lämmön varastointi kaukolämpöverkkoon	12
3	Savukaasun lauhdutusjärjestelmän käyttö	15
3.1	Prosessikuvaus savukaasun lauhdutusjärjestelmästä	15
3.1.1	Savukaasun pesuprosessi	15
3.1.2	Lauhteenkäsittelyprosessi	16
3.2	Pumput	17
3.3	Kemikaalit	23
3.4	Hiekkasuodattimet	23
3.5	UF- ja RO-laitteisto	24
3.6	Lamelliselkeytin	26
3.7	Prosessin käynnistys ja pysäytys	27
4	Käytön optimointi	28
4.1	Savukaasulauhduttimen kannattavuuden laskenta	28
4.2	Kannattavuuden parantaminen	39
5	Yhteenveto	41
	Lähteet	43
	Liitteet	
	Liite 1: Käynnissäpito-ohje	

Liite 2: Prosessikaaviot

Lyhenteet

CFD-ohjelmisto:	Computational fluid dynamics-ohjelmisto. Virtauksien mallintamiseen käytettävä ohjelmisto.
CHP-laitos:	Combined heat and power-laitos. Voimalaitos, jolla tuotetaan lämpöä ja sähköä.
DEMI-vesi:	De-mineralisoitu vesi. Vettä, josta on suodatettu mineraalit pois.
UF:	Ultrasuodatus
RO:	Käänteisosmoosi

1 Johdanto

Insinööriyö käsittelee Keravan Biovoimalaitoksen uuden savukaasun lauhdutinjärjestelmän käyttöä ja sen vaikutusta vastapainevoimalaitoksen sähköntuotantoon. Tämänhetkisen sähkömarkkinan hinnanheittelyn takia tuotannosuunnittelu on ensiarvoisen tärkeää, jotta voimalaitos säilyy kilpailukykyisenä.

Savukaasun lauhdutinjärjestelmän tarkoitus on puhdistaa savukaasuja sekä kerätä talteen savukaasuissa oleva lämpöenergia. Lauhdutinjärjestelmän käyttö on suotuisaa ympäristölle, mutta vaikuttaa sähköntuotantoon negatiivisesti vastapainevoimalaitoksella. Sähkön hinnan nousu vaikuttaa suuresti järjestelmän kannattavuuteen.

Tavoitteena on luoda katsaus prosessin osan käytöstä, käydä läpi sen käyttöön ja kunnossapitoon liittyviä riskejä ja tarkastella savukaasun lauhdutinjärjestelmän nettotuottoa eri sähkön hinnoilla.

2 Keravan Energia ja biovoimalaitos

2.1 Keravan energia -yhtiöt

Insinööriyö tehdään Keravan Energia Oy:lle, joka on Keravan kaupungin (96,5 %) ja Sipoon kunnan (3,5 %) yhteisomistama energia-alan yritys. Yhtiön historia ulottuu 1900-luvulle asti, ja se koostuu Keravan Energia Oy:stä, joka on emoyhtiö, sekä Keravan Lämpövoima Oy:stä ja Sipoon Energia Oy:stä, jotka ovat sisaryhtiöitä. Emoyhtiö on kuntaomistajuutensa kautta siis asiakkaidensa omistama, ja tämän voi esimerkiksi nähdä osinkojen maksun kautta. Osinkoja ei makseta suoraan kunnille, vaan ne hyvitetään henkilö- ja yritysasiakkaille edullisempina sähkönsiirtomaksuina. (Tietoa Keravan Energiasta. 2021.)

Vuonna 2021 liikevaihtoa yhtiöllä oli 65,6 milj.€, josta liikevoittoa 1,5 milj.€. Suurin osa liikevaihdosta tulee kaukolämmöstä (41 %), sähkön myynnistä (29 %), ja

sähkönsiirrosta (24 %). Loput 6 % tulee kaasun myynnistä, ja siirrosta, sekä muusta toiminnasta, kuten aurinkopaneelien ja sähköautojen latauspisteiden myynnistä. (Tietoa Keravan Energiasta. 2021.)

Keravalla ja Sipoossa käytettävästä sähköstä yhtiö pystyy tuottamaan itsenäisesti n. 17 %, ja erinäisten voimalaitosten osaomistajuuden kautta saadaan 8 %, jolloin noin 75 % Keravan ja Sipoon alueen sähkötarpeesta ostetaan sähköpörssistä. Yhtiön myymän sähkön alkuperä on 18,8 % uusiutuvaa, 37,4 % fossiilista, ja 43,8 % ydinvoimaa. (Tietoa Keravan Energiasta. 2021.)

2.1.1 Keravan Biovoimalaitos

Keravan Biovoimalaitos on 2009 valmistunut leijupetikattilallinen Bio-CHP-laitos. Pääpolttoaineena toimii puuhake, jota saadaan muun muassa metsänhoidosta syntyneistä sivuvirroista. Hake pyritään tuomaan 200 kilometrin säteen sisältä käyttökohteeseen paremman hiilijalanjäljen ja kannattavuuden saavuttamiseksi. Laitokselle tuodaan myös tukkipuuta varapolttoaineeksi, mikäli hakkeen saatavuudessa on lyhytaikaisia ongelmia. Tukkipuuta voidaan tällöin hakettaa paikan päällä, ja tästä syntynyttä haketta voidaan käyttää primääripolttoaineena. Polttoainetta varastoidaan polttoainekentällä, päävarastosiiilossa sekä kahdessa päiväsiilossa. Polttoainekentältä pyöräkuormain kuljettaa hakkeen vastaanottoon, josta neljä linjastoa ajaa polttoaineen murskaimen läpi kohti seulomoa. Seulomossa poistetaan mahdolliset metalliset esineet ja valmistellaan polttoaine käytettävään muotoon. Seulomosta hake kuljetetaan kuljettimella varastosiiiloon, jossa säilytetään noin 12 tunnin polttoainevarannot. Normaaliikäytössä talvikuu-kausina täydellä teholla polttoainetta kuluu noin rekkalastillinen tuntiin.

Biovoimalaitoksella on käytössä leijupetikattila, jonka höyryteho on 72,5 MW, kaukolämpöteho 50 MW ja sähköteho 21 MW. Biovoimalalla tuotetaan tämän lisäksi myös prosessihöyryä teollisuuskäyttöön. Leijupetikattilan käynnistys tapahtuu maakaasulla. Hiekkapedin lämpötilaa nostetaan käynnistyksessä riittävän korkealle, jotta se pystyy sytyttämään polttoaineena käytettävän hakkeen. Maakaasua voidaan myös käyttää tarvittaessa tukipolttoaineena, mikäli pedin

lämpötila on liian alhainen ja polttoaineen kanssa on ongelmia mm. jäätämisen kanssa. Voimalaitoksella saadaan tuotettua 75 % Keravan kaukolämmön tarpeesta ja noin 25 % Keravan Energian sähköhankinnoista. (Keravan Energian tuotantolaitokset. 2021.)

2.1.2 Muut voimalat

Keravan ja Sipoon alueella on käytössä yhteensä 4 voimalaitosta, 13 lämpökeskusta, 2 siirrinasemaa ja aurinkovoimala. Keravan biovoimalaitoksen lisäksi voimalaitoksiin lukeutuu Yli-Keravalla sijaitseva vanha päävoimalaitos, Ali-Keravalla sijaitseva varavoimalaitos sekä Nikkilässä sijaitseva varavoimalaitos. Lämpökeskukset ovat maakaasu ja osin kevytöljykäyttöisiä, ja näitä käytetään lähinnä, jos talvella kaukolämmön kulutuspiikkien kattamiseen päävoimalaitokset eivät riitä tai mikäli näiden kahden prosesseissa on häiriöitä. Siirrinasemat ovat Keravan ja Vantaan sekä Keravan ja Tuusulan kaukolämpöverkkojen välillä, ja mahdollistavat lämmön myynnin ja oston Vantaan ja Tuusulan verkoista. Aurinkovoimala valmistui vuonna 2016 ja sijaitsee Keravalla moottoritien varressa. Vuotuinen kokonaisenergiantuotanto on n. 230 MWh. Tämän lisäksi Keravan ja Nikkilän välille on rakennettu siirtolinja kaukolämmölle, jolla saadaan myös siirrettyä kaukolämpövettä suoraan Keravalta Sipoon kaukolämpöverkkoon.

2.2 Savukaasun lauhdutusjärjestelmä

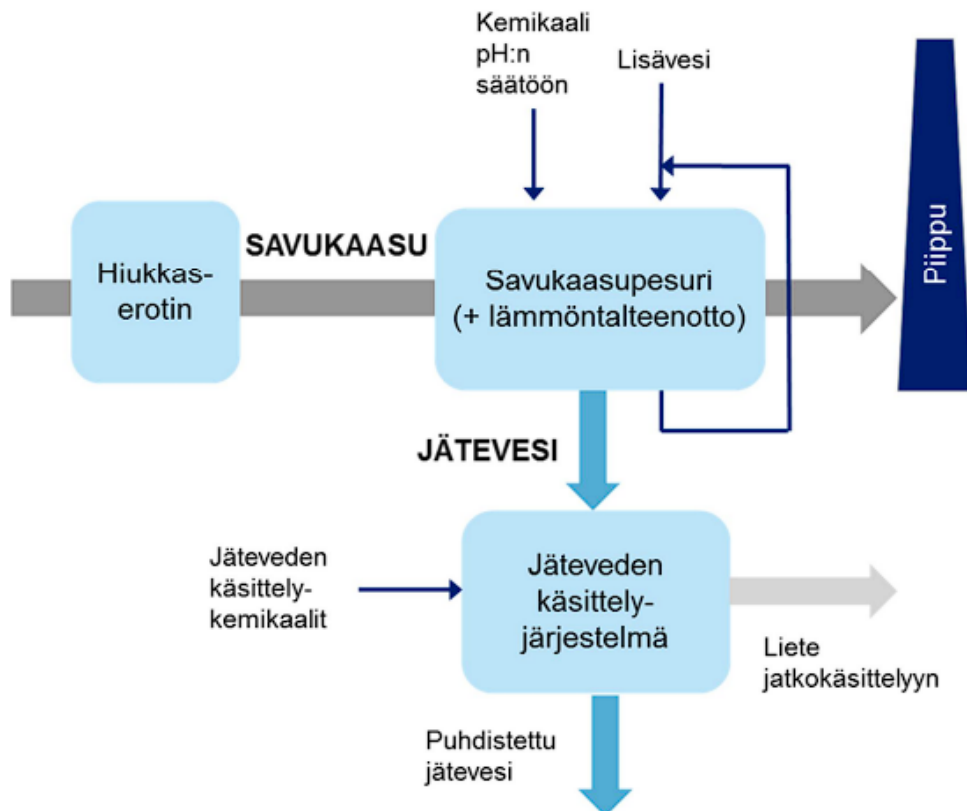
Savukaasun lauhdutusjärjestelmä, myöhemmin tekstissä savukaasulauhdutin, on prosessinosa, jonka tarkoituksena on puhdistaa savukaasuista hiukkasia sekä muita epäpuhtauksia mekaanisesti ja kemiallisesti. Energiategokkuuden näkökulmasta pesuri tuottaa säästöjä voimalaitokselle, koska savukaasujen mukana kulkeva lämpö menisi muuten hukkaan. Pesurilla napattu lämpöenergia savukaasuista voidaan hyödyntää kaukolämpöverkossa, jolloin parannetaan voimalaitoksen energiatehokkuutta.

2.2.1 Toimintaperiaate

Savukaasulauhduttimen tarkoitus on kaksiosainen: Puhdistaa piipusta ulos virtaavaa savukaasua, sekä kerätä talteen muuten hukkaan menevää lämpöenergiaa savukaasuista. Savukaasuihin ruiskutetaan pesurissa kierrätettävää pesuvettä, johon on sekoitettu kemikaaleja, jolloin erotellaan tyypillisesti epäpuhtauksia, kuten rikkidioksidi (SO_2), vetykloridi (HCl), pienhiukkasia ja raskasmetalleja. Typen oksideja voidaan myös vähentää savukaasulauhduttimella, mutta nykyteknikalla näiden määrä on hyvin vähäinen. Savukaasujen pesun jälkeen lämpötilaa lasketaan alle kastepisteen, jolloin savukaasuissa oleva höyrystynyt vesi lauhtuu. (Energiateollisuuden ympäristöpooli 2016)

Kuvassa 1 nähdään yksinkertaistettu piirros savukaasulauhduttimesta ja sen toiminnasta. Savukaasut kulkevat hiukkaserottimen läpi, joka karsii suurimman osan hiukkasista pois. Tämän jälkeen savukaasut kulkeutuvat pesurin läpi, jossa ne puhdistetaan kemiallisesti ja savukaasuissa oleva lämpö otetaan talteen. Puhdistetut savukaasut ajetaan piipusta ulos. Pesuprosessista syntyneet jätevedet käsitellään, ja riippuen prosessista ajetaan osittain takaisin kiertoon puhdistettuina ja viemäriin. Viemäriin laskettava vesi on pH- ja

lämpötilakontrolloitu. (Energiateollisuuden ympäristöpooli 2016)



Kuva 1: Savukaasulauhduttimen toiminta (Energiateollisuuden ympäristöpooli 2016: 3.)

2.2.2 Vesikemia

Taulukossa 1 on esimerkkejä savukaasulauhduttimen jätevesien kemikaalipitoisuuksista. Pitoisuudet vaihtelevat riippuen polttoaineesta, ja kyseisen esimerkin arvot ovat biopolttoaineita ja turvetta polttavan voimalaitoksen savukaasulauhduttimen jätevesistä. (Energiateollisuuden ympäristöpooli 2016: 4.)

Taulukko 1: Savukaasulauhduttimen lauhdevesien ominaisuudet (Energiateollisuuden ympäristöpooli 2016: 4.)

Aine	Pitoisuus jätevedessä mg/l
Kiintoaine	<10–1000
Sulfaatti (SO ₄)	1500–2500
Kloridi (Cl)	100–800
Kokonaistyyppi (N)	10–50
Ammoniumtyppi (NH ₄ -N)	10–20
Kokonaisfosfori	0,1–15
Arseeni (As)	<0,1
Elohopea (Hg)	<0,001
Kadmium (Cd)	<0,005
Kromi (Cr)	<0,01
Tallium (Tl)	<0,001
Lyijy (Pb)	<0,1
Kupari (Cu)	<0,02
Nikkeli (Ni)	<0,03
Sinkki (Zn)	<0,4
CODCr	10–50
BOD ₇ ATU	3–70

Huomioitavaa on, että pelkkää biopolttoainetta polttavilla voimalaitoksilla raskasmetallien pitoisuus jätevesissä on pienempi. Biopolttoaineet sisältävät alkaleita ja kalsiumia, jotka sitovat muiden mahdollisten polttoaineiden sisältämää rikkiä itseensä. Alkalit neutraloivat savukaasulauhduttimessa jätevettä, mikä vähentää erikseen neutralointiin vaadittavien kemikaalien määrää. (Energiateollisuuden ympäristöpooli 2016: 4.)

Jätevesien seuranta tehdään Keravan Energian Biovoimalaitoksella neljä kertaa vuodessa. Taulukoissa 2 ja 3 esitetään Keravalla vaaditut raja-arvot jätevedelle, jota voi laskea jätevesiviemäriin.

Taulukko 2: Metallien raja-arvot (Keravan Kaupunkiteknikka, Vesihuolto)

Metalli	Enimmäispitoisuus (mg/l)
Arseeni (As)	0,1
Elohopea (Hg)	0,01
Hopea (Ag)	0,2
Kadmium (Cd)	0,01
Kokonaiskromi (Cr)	1,0
Kromi VI (Cr6+)	0,1
Kupari (Cu)	2,0
Lyijy (Pb)	0,5
Nikkeli (Ni)	0,5
Sinkki (Zn)	3,0
Tina (Sn)	2,0

Taulukko 3: Muut ainekohtaiset raja-arvot (Keravan Kaupunkiteknikka, Vesihuolto)

pH-luku	6,0–11,0
Lämpötila	40 C
Sulfaatti	400 mg/l
Kokonaissyaniidi CN	0,5 mg/l
PAH-yhdisteet	0,05 mg/l
Rasva (elintarviketeollisuus)	150 mg/l
Kiintoaine: Elintarviketeollisuus	500 mg/l
Kiintoaine: Työmaavedet	300 mg/l

Näytteet kerätään jätevesipumppaamon kaivosta, ja testataan akkreditoitussa laboratoriossa. Kuvassa 2 on joulukuussa 2021 tehty mittaus jätevesien raja-arvoista.

Analyysi	Jätevesipumppaamo kokoomanäyte	Luparaja	Yksikkö	Kuormitus (kg/d)
Lauhteen virtaama	86,4		m ³ /d	
Kokonaisvirtaama	89,4		m ³ /d	
Lämpötila (näytteenottajan mittaama)	35		°C	
pH	7,6			
Sähkönjohtavuus 25 C	97		mS/m	
Sulfaatti, SO ₄	240	400	mg/l	21,5
Kokonaistyyppi, N	4		mg/l	0,4
Kokonaisfosfori, P	0,13		mg/l	0,01
Kiintoaine	< 2		mg/l	0,09*
BHK-7-ATU, biologinen hapenkulutus	2,1		mg/l	0,2
COD _C , kemiallinen hapenkulutus	< 15		mg/l	0,7*
Syanidi, CN	< 0,005	0,5	mg/l	0,0002*
Arseeni, As, kokonais	< 0,0001	0,1	mg/l	0,000004*
Elohopea, Hg, kokonais	0,0001	0,2	mg/l	0,000009
Hopea, Ag, kokonais	< 0,001	0,2	mg/l	0,00004*
Kadmium, Cd, kokonais	< 0,00002	0,01	mg/l	0,0000009*
Kromi 6+	< 0,05	0,1	mg/l	0,002*
Kromi, Cr, kokonais	0,00011	1	mg/l	0,00001
Kupari, Cu, kokonais	0,006	2	mg/l	0,0005
Lyijy, Pb, kokonais	< 0,0001	0,5	mg/l	0,000004*
Nikkeli, Ni, kokonais	0,0002	0,5	mg/l	0,00002
Sinkki, Zn, kokonais	0,012	3	mg/l	0,001
Tina, Sn, kokonais	< 0,001	2	mg/l	0,000004*
Öljyhiilivedyt C10-C40				
- Keskiraskaat C10-C21	< 0,025		mg/l	0,001*
- Raskaat C21-C40	0,038		mg/l	0,003
- Öljyhiilivedyt C10-C40	< 0,05		mg/l	0,002*
Öljyt ja rasvat				
- Kokonaishiilivedyt	< 0,5		mg/l	0,02*
- Mineraaliöljyt	< 0,5	100	mg/l	0,02*
- Laskennallinen rasvapitoisuus	< 0,5	150	mg/l	0,02*

*Analyysitulokset ovat alle määrittämissä rajoissa, joten laskennassa käytetty arvo 0,5 x määrittämissä rajoissa

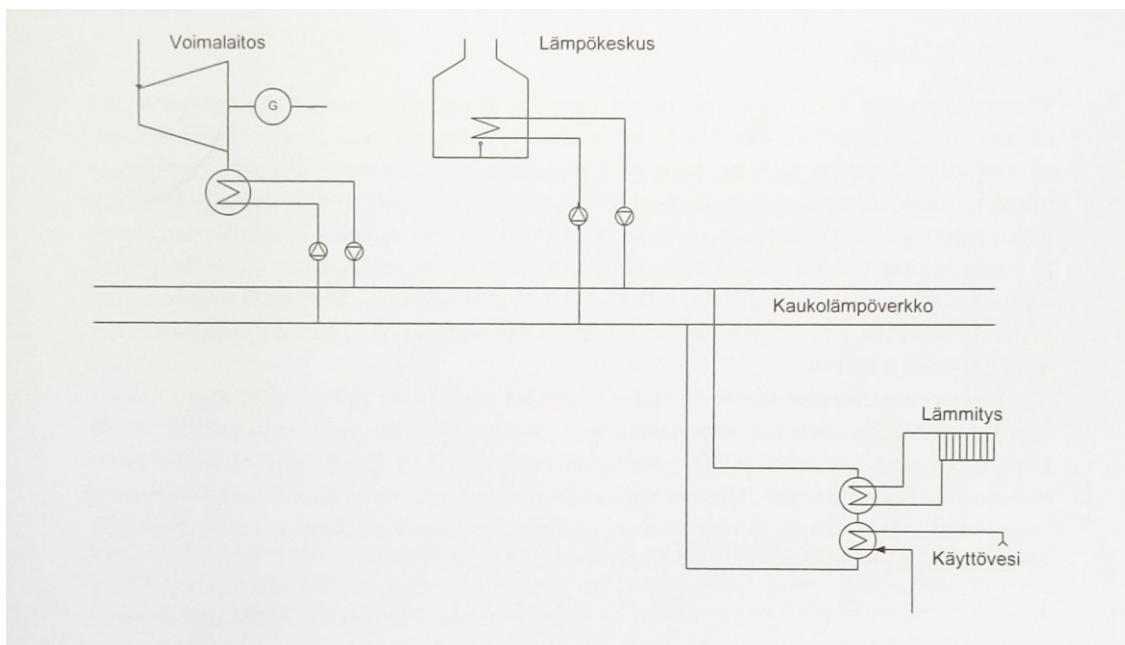
Kuva 2: Jätevesien mittauksien tulokset joulukuussa 2021 (Teollisuuden Vesi Oy 2021)

Kuvan 2 kohdassa luparaja on sallitut ainepitoisuudet, ja jätevesipumppaamo kokoomanäyte kohdasta nähdään voimalaitoksella mitatut arvot. Jäteveden näytteenoton suoritti Teollisuuden Vesi Oy ja näytteiden analysoinnin Metropolilab Oy.

2.3 Kaukolämpö

Kerava on hyvin pieni kaupunki, ja tälle ominainen etu on sen tiheä asutus. Tiheä asutus tarkoittaa, että kaukolämpöverkkoa saadaan rakennettua helposti niin, että sen piiriin voi liittyä huomattavasti paljon helpommin, kuin isommissa, harvemmin asutuissa kaupungeissa. Keravan ja Sipoon alueella kaukolämpöverkkoa on 153 km ja kaukolämpöasiakkaita noin 1 500.

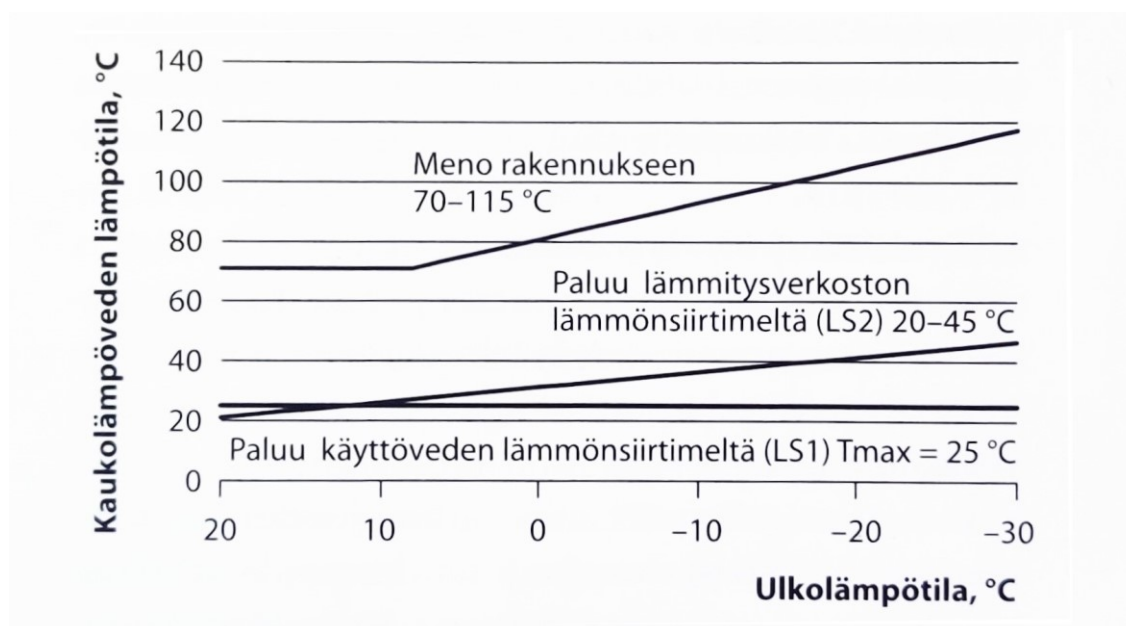
Kaukolämpöverkossa ideana on kierrättää suljetussa piirissä vettä, jota lämmitetään lämmityslaitoksella ja käytetään kuljettamaan lämpöä loppukuluttajalle. Luovutettuaan lämpöenergian loppukuluttajalle vesi palaa takaisin lämmityslaitokselle uudelleenlämmitettäväksi. Suomessa on yleisesti käytössä kaksiputki-järjestelmä, jossa on yksi meno- ja yksi paluuputki. Kuvassa 3 voidaan nähdä, miten prosessi toimii pelkistetysti. Lämpövoimala lämmittää kaukolämpöveden, pumppaa sen menoputkea pitkin loppukäyttäjälle, jossa lämmönvaihtimet lämmittävät asiakkaan käyttöveden ja hoitaa muun lämmityksen. Vesi palaa paluuputkea pitkin lämpövoimalalle, jossa se lämmitetään uudestaan. (Koskelainen ym. 2006: 43.)



Kuva 3: Kaukolämpöverkon toiminta ja komponentit. (Koskelainen ym. 2006: 43.)

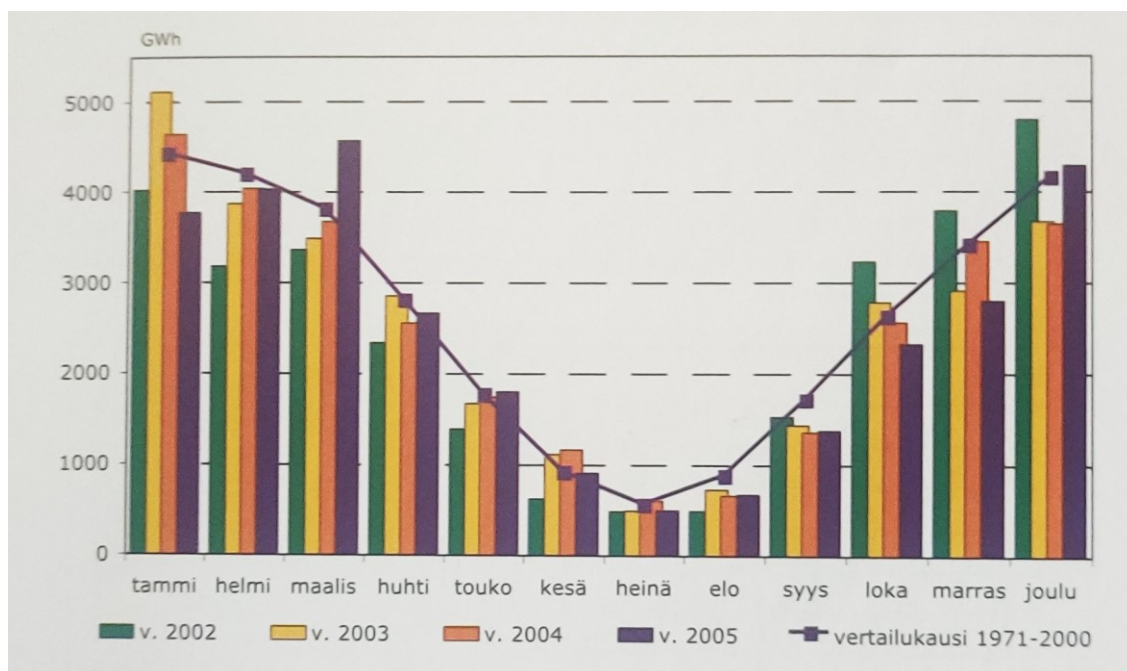
Kaukolämpöä tuottavat laitokset yleisesti mitoitetaan kattamaan 50 % tarvittavasta kaukolämmön huipputehosta. Mitoitus auttaa voimalaitoksen käyttöiän kanssa, ja heijastuu täten investoinnin tuottavuuteen. Suurin osa kaukolämmöstä saadaan tuotettua halpoja perusenergiälähteitä hyödyntäen, ja vain pieni osa joudutaan tuottamaan käyttämällä kalliimpia energialähteitä, kuten maakaasua tai öljyä. Tällä 80/20-metodilla saadaan energian tuotantokustannukset minimoitua. (Huhtinen ym. 2013: 14.)

Lämpötilan säätö kaukolämpöverkossa toteutetaan menoveden lämpötilaa säätämällä. Ulkolämpötila on suurin vaikuttaja siihen, minkä lämpöistä vettä kaukolämpöverkkoon tulisi ajaa. Kesäaikoina voi hyvinkin riittää 65 °C, ja talvella kiireillä pakkasilla joudutaan lämmittämään menovesi 115 °C:seen. Uudisrakennukset on suunniteltu niin, että kaukolämpöverkon paluuvesi olisi noin 45 °C. Paluulämpötila voi kuitenkin vaihdella 45 °C ja 60 °C:n välillä. Kuvassa 4 voidaan nähdä missä suhteessa ulkolämpötila vaikuttaa kaukolämpöverkon meno-, ja paluulämpötiloihin. (Hillamo, H.; Huhtinen ym. 2013: 14.)



Kuva 4: Kaukolämpöverkon meno- ja paluueden lämpötilavaihtelu (Huhtinen ym. 2013: 15.)

Kuvassa 5 nähdään vuosivaihtelun vaikutus kaukolämmön tarpeeseen. Kesäkausina kaukolämpöä tarvitaan lähinnä lämpimän käyttöveden lämmitykseen, johon kuluu noin 10 % liittymistehosta. Talvisin keskilämpötilan ollessa -5 °C:n luokkaa kaukolämmön tarve on 50 % liittymistehosta. (Koskelainen ym. 2006: 41.)



Kuva 5: Kaukolämmön tarpeen vaihtelu kuukausittain. (Huhtinen ym. 2013: 15.)

Verkossa täytyy myös ylläpitää painetta, jotta vesi ei pääse höyrystymään. Tähän tarkoitukseen käytetään paineenpitopumppuja, jotka pumppaavat lisävettä verkon paluuputkeen. Paineenpitopumpuilla voidaan korvata myös muun muassa lämmöntuotannon häiriötä, joka aiheuttaa kaukolämpöverkon jäähtymisen ja paineen putoamisen. Pumpuilla voidaan korvata myös kaukolämpöputkistojen vuodoista aiheutunutta vesihukkaa. (Huhtinen ym. 2013: 14.)

2.3.1 Kaukolämpö ja sähköntuotanto

Sähköntuotanto riippuu turbiinin ja generaattorin hyötysuhteiden lisäksi höyryn massavirrasta ja entalpiaerosta turbiinin yli. Turbiinia ennen tapahtuva entalpi-

nosto on riippuvainen käytettävästä polttoaineesta, polttotekniikasta, sekä materiaalien kestävydestä. Vastapainevoimalaitoksella höyryn lauhtumispaineeseen vaikuttaa kaukolämpöverkon paluuveden lämpötila. Sähköntuotannon riippuvuus entalpiaerosta turbiinin yli voidaan osoittaa kaavalla 1.

$$P_{s-brutto} = \eta_{mg} \dot{m} (h_t - h_l) \quad (1)$$

jossa

η_{mg} on turbogeneraattorin hyötysuhde

\dot{m} on höyryn massavirta

h_t on höyryn entalpia ennen turbiinia

h_l on höyryn entalpia lauhduttimessa

Tämä voidaan toteuttaa helpoiten alentamalla entalpiaa turbiinin jälkeen laskeamalla kaukolämmön paluuveden lämpötilaa mahdollisimman alas, kun sähkön pörssihinta on korkealla. Pesuri lämmittää kaukolämpöverkon paluuvettä, joten säätämällä pesurilta otettavaa lämpöenergiaa voidaan nostaa tai laskea riippuen tarvittavasta kaukolämpömäärästä ja sähkön pörssihinnasta.

2.3.2 Lämmön varastointi kaukolämpöverkkoon

Yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa etuna on, että tuotantoa pystytään optimoimaan lataamalla lämpöä kaukolämpöä suoraan kaukolämpöverkkoon nostamalla hetkellisesti menoveden lämpötilaa korkeammaksi. Muutokset verkossa eivät tapahdu hetkessä, ja kaukolämpöverkko itsessään voi toimia energian välivarastona. Tällä tavalla saadaan esimerkiksi varauduttua aamun kulutuspiikkiin, jolloin käyttöveden tarve kasvaa. (Koskelainen ym. 2006: 389.)

Kaukolämpöverkossa olevaa energiaa voidaan esittää kaavan 2 (Koskelainen ym. 2006: 390.) mukaisesti:

$$Q_{KL} = C_p V \rho (T_m + T_p - 2T_{ref})/2 \quad (2)$$

jossa

C_p on veden ominaislämpökapasiteetti

V on kaukolämpöverkon vesitilavuus

ρ on veden tiheys

T_m on kaukolämpöveden menolämpötila

T_p on kaukolämpöveden paluulämpötila

T_{ref} on referenssilämpötila

Referenssilämpötilana voidaan käyttää kaukolämpöverkoston keskimääräistä paluulämpötilaa, joka mitataan voimalaitokselta.

Kaukolämpöverkon menolinjan lämpötilan maksimiarvo on Koskelan ym. mukaan 115–120 °C riippuen siitä, miten putken käyttöikä on määritetty. Pitkäaikaisen lämpötilakestävyyden tulee olla jatkuvassa 120 °C:n käyttölämpötilassa vähintään 30 vuotta, ja vähintään 50 vuotta 115 °C:ssa. Korkeammassa lämpötilassa oleva kaukolämpövesi on korkeammassa paineessa, mikä vaikuttaa putken käyttöikään.

Verkon maksimilatausteho voidaan esittää kaavalla 3:

$$\Phi_{max} = \dot{m} C_p \Delta T_m = \Phi \Delta T_m / (T_m - T_p) \quad (3)$$

jossa

\dot{m} on menoputken massavirta

Φ on kaukolämpöteho

Maksimi ladattu energia on:

$$Q_{max} = \Phi_{max} * t = 0,5C_p V \rho / \Delta T_m \quad (4)$$

Verkkoon tuotettu kuuma vesi on loppukuluttajilla eri aikoina, joten viivettä voidaan kuvata latauksen keskiviiveellä:

$$t = 0,5 V \rho / \dot{m} \quad (5)$$

Kaukolämpöverkkoa ladattaessa verkon meno- ja paluulämpötilat kasvavat. Kuluttajan päässä lämmönjakokeskus säätää tällöin kuluttajan verkon virtausta pienemmäksi, jotta normaali paluulämpötila saavutetaan. Verkon lämpötehoa purkaessa voimalaitoksella vähennetään kaukolämmön tuotantoa. Kuluttajan päässä menolämpötila laskee, joten lämmönsäädin nostaa verkon virtausta ja palauttaa näin normaalin paluulämpötilan kaukolämpöverkkoon. (Koskelainen ym. 2006: 390.)

Verkon purussa vapautunutta energiaa voidaan tarkistella vähentämällä verkkoon ladatusta energiasta lämpöhäviöt. Pumppaukseen vaadittava energia on myös ladatussa verkossa pienempi, koska vaadittava virtaus on pienempi johdettua korkeammasta menolämpötilasta. (Koskelainen ym. 2006: 390.)

$$\Delta P_p = P_p (1 - (\dot{m}/\dot{m}_{norm})^3) \quad (6)$$

jossa

\dot{m} on yllämpöisen kaukolämpöveden massavirta

\dot{m}_{norm} on normaalitilanteen kaukolämpöveden massavirta

P_p on pumppausteho normaalitilanteessa

Lämpöhäviöitä voidaan arvioida käyttämällä kaukolämpöverkon lämpöhäviökerrointa ja menovesien lämpötilaeroa normaali ja lataustilanteessa.

$$\Delta q = K\Delta T_m \quad (7)$$

jossa

K on kaukolämpöverkon lämpöhäviökerroin

3 Savukaasun lauhdutusjärjestelmän käyttö

Pesuri on valmistunut vuonna 2019, ja sen ajaminen on vielä hienosäätövaiheessa. Prosessiosalle ei ollut tehty käyttöhenkilökuntaa varten erillistä käynnissäpito-ohjetta, joten työn aikana koottiin myös koulutuksen tueksi ohjeistus siitä, mitä pitää tarkistaa päivittäin ja kuukausittain. Tässä luvussa käydään läpi biovoimalan savukaasulauhdutin ja sen komponentit sekä niiden potentiaaliset viat, joihin käyttöhenkilökunnan tulisi olla varautuneita. Komponenttien vikaantumisen saattaa vaikuttaa savukaasulauhduttimen käytettävyyteen ja näin aiheuttaa lisäkustannuksia laitoksen tuotantomenetyksinä sekä potentiaalisesti kalliimpina korjauksina, jos vikaan ei päästä vaikuttamaan tarpeeksi ajoissa.

3.1 Prosessikuvaus savukaasun lauhdutusjärjestelmästä

Pesurin prosessi koostuu biopolttolaitoksen savukaasujen pesu- ja lämmöntalteenottolaitteistosta, sekä lauhteen käsittelystä. Lauhde käsitellään osittain demineralisoiduksi vedeksi, eli DEMI-vedeksi. Loput jätevedet ohjataan viemäriin sen jälkeen, kun veden pH ja lämpötila on käsitelty säädetylle tasolle. Laitteistossa on mahdollisuus myös ohjata savukaasujen ohitusta, eli pesuria voidaan käyttää 0–50–100 % teholla. Ohjaus tapahtuu savukaasupelleillä, jotka ovat kuumailmatiivistettyjä kaksoispeltejä. (Käyttö- ja huolto-ohje 2021: 10.)

3.1.1 Savukaasun pesuprosessi

Savukaasut ohjataan tuloyhteen kautta pesuriin, jossa aloitetaan savukaasujen lauhduttaminen kohti kastepistettä. Tämä parantaa auttaa kiintoaineen

erottelussa ja parantaa laitoksen materiaalien kestävyyttä. (Käyttö- ja huolto-ohje 2021: 10.)

Pesuvaiheessa savukaasuihin sumutetaan pesuputkiston kautta pesunestettä, joka vähentää kiintoaine-, SO₂- ja HCl-pitoisuuksia savukaasuissa. Pesunesteseen lisätään myös natriumhydroksidiä (NaOH) sen pH:n kontrolloimiseksi. Pesuvaiheessa syntyneet kiintoaine, ja muut jätteet pumpataan takaisin kattilaan poltettavaksi rejektisyötön kautta. (Käyttö- ja huolto-ohje 2021: 10.)

Lämmöntalteenotto-vaiheessa (LTO-vaihe) savukaasu jakautuu tasaisesti koko pesurin poikkipinta-alalle ja kulkeutuu ylöspäin täytekappaleiden läpi. Täytekappaleiden läpi virtaava vesi sitoo lämpöenergiaa savukaasuista ja lauhduttaa höyrystynyttä vettä kohti kastepistettä, jolloin kastepisteen ylittänyt vesi kondensoituu mukaan LTO-vaiheessa. Lämmennyt vesi pumpataan lämmönvaihtimelle, ja takaisin pesuriin. Lopullinen lauhde ohjataan lauhteenkäsittelyyn, ja savukaasut jatkavat pisaraerottimen läpi savupiipusta ulos. Kiertoan lisätään myös NaOH-liuosta, ja pH pyritään pitämään 4–6. (Käyttö- ja huolto-ohje 2021: 11.)

3.1.2 Lauhteenkäsittelyprosessi

Lauhteenkäsittelyssä osa lauhteesta puhdistetaan DEMI-vesilaatuiseksi, ja loput ohjataan viemäriin. Lauhde pumpataan saostussäiliöön, jossa siihen lisätään koagulointiainetta, sekä polymeeriä. Saostussäiliön jälkeen lauhde pumpataan eteenpäin kohti lamelliselkeytintä. Aiemmin lauhteeseen sekoitetut koagulointiaine ja polymeeri saostavat metallit, ja muut epäpuhtaudet lamelliselkeyttimessä, jolloin ne putoavat sen pohjalle, josta ne pumpataan tuhkan säkiytykseen. Selkeyttimessä puhdistettu vesi valuu ylivuotona pumppaussäiliöön, josta se pumpataan eteenpäin hiekkasuodattimille. Hiekkasuodattimien tarkoitus on sitoa lauhteessa oleva kiintoaine kvartsihiekalla itseensä. Suodattimia on kaksi, joista toinen on kerralla käytössä, kun toista puhdistetaan. Puhdistus tapahtuu paineilmailla ja vedellä, jolloin hiekkaan jäänyt kiintoaine kulkeutuu pois jäteveden mukana. Hiekkaa täytyy myös vaihtaa aina vuosittaisen seisakin

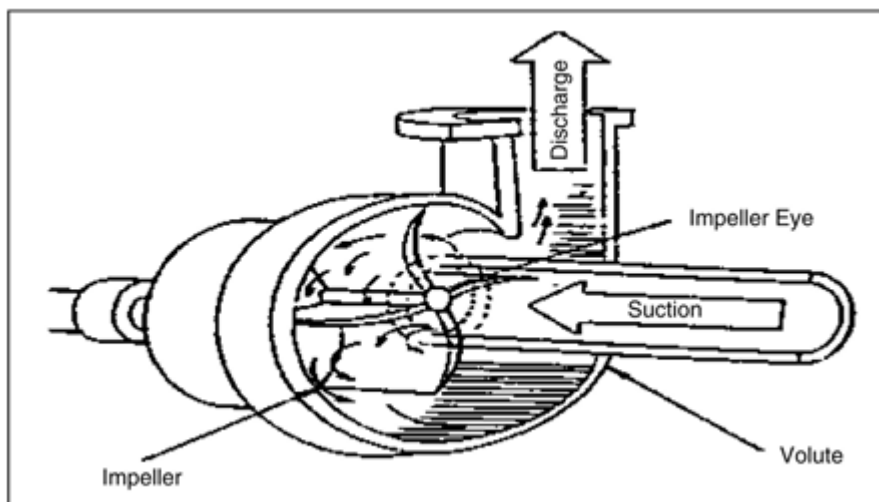
aikana. Lauhteeseen lisätään NaOH-liuosta, ja pH pyritään pitämään 5–7 välillä. Tässä vaiheessa puhdistettu lauhde ohjataan lauhdelämmönvaihtimen kautta joko viemäriin tai DEMI-veden valmistukseen. Glykolijäähdytteinen lauhdelämmönvaihdin jäähdyttää kaiken veden ensin noin alle 40°C:n lämpötilaan, ja DEMI-vedeksi jatkettava lauhde noin alle 30°C:n lämpötilaan. (Käyttö- ja huolto-ohje 2021: 11–12.)

DEMI-veden valmistukseen ohjataan puhdistetusta lauhteesta noin 10 m³/h. Puhdistettu lauhde ohjataan jäähdytyksen jälkeen lauhdesäiliöön, josta se pumpataan ultrasuodatukseen (UF). UF:lla lauhteesta poistetaan kiintoaineita, ja saostuneita metalleja, jotka ovat päässeet aiempien puhdistusmenetelmien läpi. UF suodattaa veden puoliläpäisevän kalvon läpi, johon kiintoaineet jäävät. Suodatuksen jälkeen vesi ohjataan käänteisosmoosilaitteistolle (RO, reverse osmosis), jossa ennen itse RO-laitteistoa patruunasuodatin esisuodattaa veden. Itse RO-laitteisto poistaa vedestä siihen liuenneita suoloja. Prosesseista syntyneet jätteet, eli rejektit ohjataan kierrätysvesisäiliöön, josta ne pumpataan kattilaan. Suodatettu puhdas vesi ohjataan raakavesisäiliöön, josta sitä voidaan pumpata takaisin voimalaitoksen prosesseihin. (Käyttö- ja huolto-ohje 2021: 12.)

3.2 Pumput

Prosessista löytyy keskipakoispumppuja sekä annostelupumppuja. Keskipakoispumppuja käytetään laitoksella veden kierrätykseen prosessissa, ja annostelupumput vastaavat kemikaalien syöttämisestä prosessiin.

Keskipakoispumput koostuvat yksinkertaisuudessaan pumpun kotelosta, sekä akselilla pyörivästä juoksupyörästä. Kuten kuvassa 6 voidaan nähdä, kotelo muodostaa pumpulle painerajat, ja siihen tehdyt kanavat ohjaavat imu- ja poistovirtauksia. (Moblely 2004: 331.)



Kuva 6: Keskipakoispumpun osat ja toiminta (Mobley 2004: 332.)

Keskipakoispumppujen yleisin ongelma on kavitaatio, joka syntyy veden olotila-
muutoksesta, nesteeseen jääneestä kaasusta tai turbulenttisesta virtauksesta.
Seuraavassa kuvassa 7 nähdään kavitaation lisäksi muita yleisimpiä ongelmia.
(Mobley 2004: 358)

THE CAUSES	THE PROBLEM												
	Insufficient Discharge Pressure	Intermittent Operation	Insufficient Capacity	No Liquid Delivery	High Bearing Temperatures	Short Bearing Life	Short Mechanical Seal Life	High Vibration	High Noise Levels	Power Demand Excessive	Motor Trips	Elevated Motor Temperature	Elevated Liquid Temperature
Bent Shaft					●	●	●	●		●			
Casing Distorted from Excessive Pipe Strain					●	●	●	●		●		●	
Cavitation	●	●	●	●	●		●	●	●				●
Clogged Impeller	●		●	●			●			●			
Driver Imbalance						●	●	●					
Electrical Problems (Driver)						●	●	●		●	●	●	
Entrained Air (Suction or Seal Leaks)	●	●	●				●	●	●			●	
Hydraulic Instability					●	●	●	●					
Impeller Installed Backward (Double-Suction Only)	●		●							●			
Improper Mechanical Seal							●						
Inlet Strainer Partially Clogged	●		●					●	●				●
Insufficient Flow Through Pump													●
Insufficient Suction Pressure (NPSH)	●	●	●	●				●	●				
Insufficient Suction Volume	●	●	●	●	●			●	●				●
Internal Wear	●		●					●		●			
Leakage in Piping, Valves, Vessels	●		●	●									
Mechanical Defects, Worn, Rusted, Defective Bearings					●		●			●			
Misalignment					●	●	●	●		●		●	
Misalignment (Pump and Driver)								●		●	●		●
Mismatched Pumps in Series	●		●			●		●		●			
Non-condensables in Liquid	●	●	●					●	●			●	
Obstructions in Lines or Pump Housing	●		●	●				●				●	●
Rotor Imbalance						●	●	●					
Specific Gravity Too High	●									●		●	
Speed Too High										●	●		
Speed Too Low	●		●	●								●	
Total System Head Higher Than Design	●	●	●	●			●					●	●
Total System Head Lower Than Design							●	●	●	●			●
Unsuitable Pumps in Parallel Operation	●		●	●	●			●	●		●		●
Viscosity Too High	●		●							●		●	
Wrong Rotation	●			●						●		●	

Kuva 7: Keskipakoispumpuissa yleisimmin esiintyvät ongelmat (Mobley 2004: 358)

Keskipakoispumput on usein suunniteltu niin, että ne voivat toimia keskeytyksettä monia kuukausia, tai jopa vuosia. Ongelmia tulee vastaan siinä kohtaa, kun pumpattavassa aineessa aineen olomuoto pääsee vaihtumaan. Virtausala juoksupyörän silmässä on yleisesti ottaen pienempi, kuin juoksupyörän siivittössä tai pumpun imupuolen putkistossa. Pumpattavan nesteen saavuttaessa juoksupyörän keskikohdan tai "silmän" virtausala pienenee, mikä merkitsee pumpattavan nesteen virtausnopeuden kohoamista ja paineen putoamista tämän jälkeen. Mikäli paineen pudotus tai lämpötila on pumpattavassa nesteessä

tarpeeksi iso, se voi olla tarpeeksi aiheuttamaan nesteelle olotilamuutoksen, jolloin aine pääsee höyrystymään äkillisesti. Pienet höyrykuplat kulkeutuvat juoksupyörän silmän läpi ja tiivistyvät äkillisesti takaisin nesteeksi, kun ne saavuttavat pisteen, jossa paine on tarpeeksi korkea. (Mobley 2004: 353–354.)

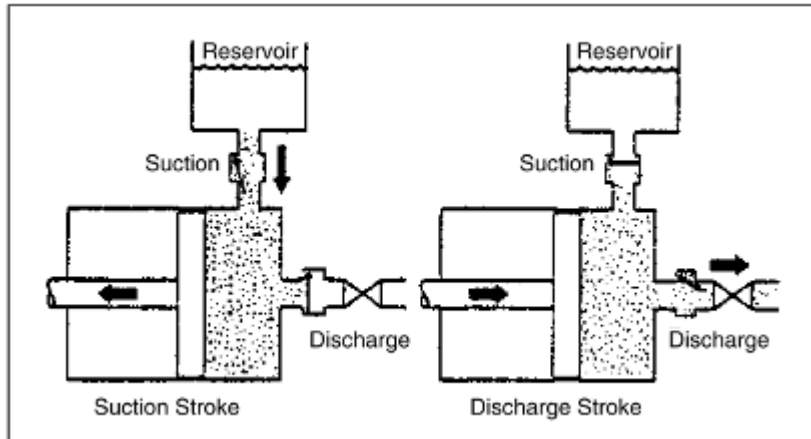
Höyrykuplien muodostuminen ja hajoaminen aiheuttaa tehohäviöiden lisäksi pumpun juoksupyörään ja sisäosiin kulumaa ja voi tuhota pumpun. Kavitaatio aiheuttaa myös värähtelyä, joka kuluttaa ajan myötä myös laakereita, kulutuslevyjä sekä tiivisteitä. Pumpun kavitaation voi huomata siitä syntyvästä äänestä, joka on kuin marmorikuulia pyörittäisi metallipurkissa, sekä vaihtelevasta purkauspaineesta, virtausnopeudesta ja pumpun moottorin vaatimasta virrasta. (Mobley 2004: 354.)

Kavitaatio voidaan korjata (Mobley 2004: 342.) seuraavilla tavoilla:

- nostamalla imupäädyn painetta
- laskemalla pumpattavan nesteen lämpötilaa
- vähentämällä painehäviöitä imuputkissa
- madaltamalla pumpun virtausnopeutta
- hidastamalla pumpun juoksupyörän vauhtia

Keravan Energialla on käytössä voitelujärjestelmä, jossa käydään läpi moottorit, ja kaikki komponentit, joissa voitelua tarvitaan. Tämän lisäksi pumpuilla on valmistajan antamat käyttöajat, joiden mukaan voitelua hoidetaan. Esimerkkinä boosteripumpulla ja LTO-pumpuilla on lieriörullalaakerien voitelu 2 000 käyttötunnin välein ja viistokuulalaakerien voitelu 4 500 käyttötunnin välein.

Kemikaalien syötössä prosessissa käytetään annostelupumppuja, jotka ovat syrjäytuspumppuja. Pumpun toimintaperiaate on kuvan 8 mukaisesti paluuis-kulla imeä neste syöttöreservistä pumpun sylinteriin, ja paineiskulla pumpata neste poistolinjaan. Pumpattavan nesteen määrä on yhtä suuri, kuin sylinterin tilavuus, ja näin pumpun asetuksia muuttamalla saadaan tarkasti annosteltua haluttua nestettä ja tämän takia syrjäytuspumppuja käytetään muun muassa kemikaalien annostelussa. (Mobley 2004: 344.)



Kuva 8: Männällisen syrjäytyspumpun toiminta (Mobley 2004: 344.)

Annostelupumput ovat toiminnaltaan varmempia ja kestävät enemmän muuttujia prosessissa, kuin keskipakopumput. Suurin vaatimus annostelupumpuilla on kuitenkin, että niillä on saatavilla tasalaatuista puhdasta nestettä koko ajan. Mahdollisia syitä männällisen syrjäytyspumpun vikaantumiseen esitetään kuvassa 9. (Mobley 2004: 362.)

THE CAUSES	THE PROBLEM								
	No Liquid Delivery	Insufficient Capacity	Short Packing Life	Excessive Wear Liquid End	Excessive Wear Power End	Excessive Heat Power End	Excessive Vibration and Noise	Persistent Knocking	Motor Trips
Abrasives or Corrosives in Liquid			●	●					
Broken Valve Springs		●		●			●		
Cylinders Not Filling		●	●	●			●		
Drive-train Problems							●		●
Excessive Suction Lift	●	●							
Gear Drive Problem							●	●	●
Improper Packing Selection			●						
Inadequate Lubrication						●	●		●
Liquid Entry into Power End of Pump						●			
Loose Cross-head Pin or Crank Pin								●	
Loose Piston or Rod								●	
Low Volumetric Efficiency		●	●						
Misalignment of Rod or Packing			●						●
Non-condensables (Air) in Liquid	●	●	●				●		●
Not Enough Suction Pressure	●	●							
Obstructions in Lines	●						●		●
One or More Cylinders Not Operating		●							
Other Mechanical Problems: Wear, Rusted, etc.					●	●	●	●	
Overloading					●				●
Pump Speed Incorrect		●				●			
Pump Valve(s) Stuck Open		●							
Relief or Bypass Valve(s) Leaking		●							
Scored Rod or Plunger		●							●
Supply Tank Empty	●								
Worn Cross-head or Guides			●			●			
Worn Valves, Seats, Liners, Rods, or Plungers	●	●		●					

Kuva 9: Männällisten syrjäytyspumppujen yleisimmät ongelmat (Mobley 2004: 362.)

Suurimmat heikkoudet männällisissä syrjäytyspumpeissa ovat sisäänotto ja anosteluventtiilit, joiden suurin hajoamisen syy on materiaalin väsyminen. Helppoin tapa välttää tältä on seurata valmistajan antamaa ohjeistusta pumpun tarpeellisista huolloista. Toisena heikkoutena on pumpattavan nesteen puhtaus. Toleranssit männän ja sylinterin seinän välillä on tarkkaan laskettu, joten kaikki kiinteät epäpuhtaudet aiheuttavat kulumaa. (Mobley 2004: 364.)

3.3 Kemikaalit

Savukaasun pesulaitoksella käytetään paljon kemikaaleja prosessissa, ja monet näistä ovat terveydelle erittäin haitallisia. Kaikki kemikaalit ovat nimettyjä, ja varoitukset ovat nähtävissä. Tämän lisäksi käytössä on QR-koodi, jonka skannaamalla saa näkyviin laitoksella käytettävät kemikaalit, ja näiden käyttöturvallisuustiedotteet. Peruskoulutus siis kemikaaliturvallisuudesta on riittävä, ja uudet työntekijät perehdytetään kemikaalien käyttöön.

Laitoksella käytettävät kemikaalit:

- suolahappo (HCl)
- natriumhydroksidi (NaOH)
- natriumhypokloriitti (NaClO)
- PIX-105
- Hypersperse msi140 antiscalantti
- Superfloc a- 125 v polymeeri
- ultrasil-110
- ultrasil-75
- KK-inhimeg 40 glykoli

Suolahappoja, natriumyhdisteitä käytetään veden pH:n kontrollointiin sekä prosessiosien, kuten ultrasuodattimen (UF) ja käänteisosmoosilaitteiston (RO), pesuun. Kemikaaliseoksia, kuten PIX-105, hypersperse, superfloc, käytetään veden käsittelyyn prosessissa.

3.4 Hiekkasuodattimet

Hiekkasuodattimien tehtävä on suodattaa lamelliselkeyttimeltä tullut lauhde puhaltamalla se hienojakoisen (0,7–1,2 mm) kvartsihiekan läpi. Tällöin lauhteessa olevat kiintoainepartikkelit jäävät kvartsihiekaan, ja lauhde jatkaa lämmönvaihtimelle, josta se ohjataan lämpötilakontrolloituna joko viemäriin tai DEMI-veden valmistukseen.

Hiekkasuodattimia on kaksi, joista vain toinen on kerralla käytössä. Tämä mahdollistaa kokoaikaisen ajon, ja hiekkasuodattimia pystytään vuorotellen elvyttämään, vaikka laitos on päällä. Hiekkasuodatin elvytetään, kun paine-ero sen yli kasvaa yli asetusarvon. Huomattavaa on, että jos elvytysväli tiheytyy, ja sitä joutuu elvyttämään n. kerran päivässä, olisi syytä tarkistaa hiekka. Hiekan likaantuminen riippuu hyvin paljon käytettävästä polttoaineesta ja siitä, kuinka paljon laitosta käytetään. Keravan Biovoimalaitoksella hiekat vaihdetaan normaalisti kerran vuodessa seisakin aikana, ja muuten tarpeen mukaan.

Hiekka voidaan vaihtaa avaamalla miesluukku, ja imemällä hiekka pois imuaukolla. Työskennellessä kvartsihiekan kanssa on tärkeää muistaa suojautuminen. Kvartsipöly aiheuttaa keuhkosairauksia, kuten pölykeuhkoa, silikoosia ja keuhkosityöpää. Tapauksia on vuosittain useita, ja kvartsipöly aiheuttaa toiseksi eniten työperäistä keuhkosityöpää heti asbestin jälkeen. (Keuhkosairauksia aiheuttava kvartsipöly on teollisuuden ongelma 2008.)

Suotimet ovat jatkuvassa käytössä, kun laitos on päällä. Kaikki laitoksen tuottama jätevesi kulkee hiekkasuotimien kautta, joten suotimien toiminnan jatkuva tarkkailu valvomosta (paine-ero suotimen yli) on tärkeää.

3.5 UF- ja RO-laitteisto

Ultrasuodatus- ja käänteisosmoosilaitteiston tehtävä on tuottaa prosessiin DEMI-tasoista raakavettä keskimäärin 7 m³/h. Ultrasuodatuksen tehtävä on poistaa lauhteesta kiintoainejäämiä ja kolloidit suodattamalla ne puoliläpäisevän kalvon läpi. (Lauhteenkäsittelykoulutus 2021.)

Lauhde on lämpötilakontrolloitu prosessiin saapuessaan, mikä auttaa pidentämään UF- ja RO-laitteistojen kalvojen käyttöikä. Lauhteen lämpötila pyritään pitämään 25–30 °C:ssa, ja maksimissaan 35 °C. (Lauhteenkäsittelykoulutus 2021.)

UF-laitteiston toiminta on suurelta osin automatisoitua. Muutaman kerran tunnissa kalvot huuhdellaan myötävirtahuuhteluna omalla permeaatillaan. Riippuen kokemuksesta, päivän tai muutaman päivän välein tehdään vastavirta CEB-huuhtelu (Chemically Enhanced Backwash). CEB-huuhtelussa voidaan käyttää happoa (CEB-A), emästä (CEB-B) tai hypokloriittia (CEB-C), ja pesuluokat on nimetty kemikaalien mukaan. Happoa käytetään peruspesussa, emästä mikäli happopesu ei riitä, ja natriumhypokloriittia tulee käyttää vain, jos on merkkejä biofoulingista. (Lauhteenkäsittelykoulutus 2021.)

Tärkeää on huomioida eri kemikaalien reaktiot, mikäli tehdään CEB-pesu useammalla kemikaalilla. Emäsvaihe tulee aina ennen happovaihetta, ja natriumhypokloriitti voi muodostaa kloorikaasua happamassa vedessä, joten riittävä huuhtelu vaiheiden välillä on ensiarvoisen tärkeää. Desinfiointi hypokloriitilla kannattaa tehdä mieluiten kokonaan omana vaiheenaan. (Lauhteenkäsittelykoulutus 2021.)

CEB-vaiheiden kemikaaliarvot:

- CEB-A pH 2,0 – 2,5
- CEB-B pH 12 (+)
- CEB-C klooripitoisuus 5 – 10 ppm

CIP-pesussa (Cleaning in place) pestään kaikki osat, jotka ovat kosketuksissa veden kanssa, eli lähestulkoon koko suodatin. Kemikaalit ja vedet syötetään aluksi suotimen alaosasta, ja onttokuidun sisäpuoli huuhdellaan. Tämän jälkeen pestään kalvon läpi, ja lopuksi suodin huuhdellaan kemikaaleista pesemällä kalvon läpi pelkällä vedellä. (Lauhteenkäsittelykoulutus 2021.)

Käänteisosmoosilaitteiston (RO) tarkoitus on poistaa lauhteesta suoloja. Lauhde suodatetaan paineen avulla puoliläpäisevän kalvon läpi, samalla tavalla kuin ultrasuodatuksessa, mutta läpäisevien molekyylien partikkelikoko on huomattavasti pienempi. (Lauhteenkäsittelykoulutus 2021.)

RO-laitteistolla ei ole yhtä tarkkoja pesuvaiheita, kuin ultrasuodattimella, koska likaantuminen on hyvin paljon vähäisempää. Laitteisto tulee kuitenkin puhdistaa CIP-pesulla noin kuukausittain, tai kokemuksen mukaan arvioituna. (Lauhteenkäsittelykoulutus 2021.)

3.6 Lamelliselkeytin

Lauhteen saapuessa lamelliselkeyttimeen siihen on pumpattu koaguloitkemikaaleja ja polymeeriä, jotka sitovat kiintoainepartikkeleita lauhdesta. Lauhde johdetaan selkeyttimessä olevien lamellipakkojen sivusta sisälle kanaviin, josta se virtaa ylöspäin. Kiintoaine putoaa vinoille levyille ja liukuu alaspäin selkeyttimen pohjalle lietetaskuun, josta se imetään ajoittain märkätuhkan säkitykseen. Selkeytin toimii ilmanpaineessa, joten puhdas vesi valuu ylivuotona poistokouruun ja siitä eteenpäin prosessissa.

Selkeyttimen yläosassa on kurkistusluukku, josta voi nähdä selkeytetyn neste ylivuodon ennen sen menoa hiekkasuodattimelle. Tämä olisi syytä tarkistaa aina silloin tällöin ja varmistaa, että selkeytetty neste on kirkasta. Nesteen ollessa likaista se voi tarkoittaa, että joko lauhde ei ole saostunut tarpeeksi tai suodatin on liian likainen ja se täytyy puhdistaa. Suodattimen avaus tapahtuu avaamalla 2. kerroksen lattiaritilät ja irrottamalla hönkäyhde, minkä jälkeen voidaan työntää muovinen päällyyslevy lepäämään 1. kerroksen katossa olevien kiskojen päälle. Näin päästään 2. kerroksesta helposti pesemään selkeytin yläpuolelta.

Lamelliselkeyttimen läpi pystyy kulkemaan noin 25 m³/h lauhdetta, eli kaikki lauhde mikä prosessissa syntyy. Riippuen hieman tilanteesta, vaikka selkeyttimen ylivuoto lauhde ei olisikaan aivan täysin kirkasta, ei prosessia tarvitse laittaa heti kiinni. Lauhde menee selkeyttimen jälkeen vielä hiekkasuodattimille, joihin jää myös kiintoainetta lauhdesta. Tämä voi kuitenkin vaikuttaa hiekkasuodattimien likaantumiseen, ja ylimääräiset elvytykset voivat tulla tarpeen, mikäli lauhde on kovin likaista. Puhdistus tulisi tehdä tarpeen mukaan ja mieluiten

päiväsaikaan, kun kaukolämmön kysynnässä ei ole piikkiä ja sähkön tuotanto on myös kannattavampaa.

3.7 Prosessin käynnistys ja pysäytys

Prosessia käynnistettäessä on hyvä huomioida, kuinka pitkään se on ollut pois päältä, ja mahdolliset toimenpiteet, joita laitoksella on tehty sen oltua pois päältä. Mikäli laitoksella on tehty korjauksia putkistoihin, tai pumppuihin esimerkiksi seisakin aikana, nämä on syytä koekäyttää ennen laitoksen ajamista ylös. Pidemmän, yli 12 tuntia kestävänsä seisakin aikana laitoksesta on myös syytä ottaa vedet pois, joten prosessiin täytyy ajaa myös vedet sisään, mikäli seisakki on kestänyt pidempään. Pumppujen korjauksien jälkeen on syytä puhdistaa pumpun imupuolen putkisto huolellisesti ja tarvittaessa varmistaa lyhytaikaisella käynnistyksellä juoksupyörän oikea pyörimissuunta. Putkistojen tiiveys tulee myös tarkistaa ennen käyttöä, mikäli näihin on tehty korjaustöitä seisakin aikana.

Ennen jokaista käynnistystä on myös syytä varmistaa, että prosessiin käytettävät apuaineet ovat saatavilla:

- sähkö
- paineilma
- vesi
- kemikaalit

Operaattori pystyy tarkistamaan jokaisen askeleen käynnistyksessä prosessille kirjoitetusta sekvenssiohjeesta. Komponentit ja järjestys on nimetty tarkasti, jotta virheitä säästyttäisiin mahdollisimman hyvin. Pesuri voidaan käynnistää joko niin sanotusti kokonaan kuivana käyttäen kaukolämpövettä tai osittain kuivana käyttäen laitoksella olemassa olevaa raakavettä ja tarpeen tullen lisäksi kaukolämpövettä. Pesuriprosessin käynnistys kestää noin 30 minuuttia. Pysäytysprosessille on kirjoitettu myös sekvenssit riippuen siitä, halutaanko jättää pesuvedet pesuriin vai halutaanko pesuri tyhjentää. Yleisesti ottaen alle 12 tuntia

kestävissä seisakeissa, joissa ei tarvitse tehdä korjaustöitä pesurille, voidaan vedet jättää pesurin sisälle. Prosessin pysäytys kestää noin puolitoista tuntia.

Pesurilaitosta voidaan käyttää 50 %:n tai 100 %:n teholla. Ohjaus tapahtuu säättämällä savukaasupeltejä, jotka päästävät savukaasun sisään pesurilaitokselle. Laitoksen pienin sallittu teho toimittajan puolesta on 5 MW, ja maksimitehot koviilla pakkasilla ovat 15–20 MW:n luokkaa. Syys- ja kevätkaleilla oletettavat tehot ovat 100 %:n ajolla 10 MW ja 50 %:n teholla 5 MW:n luokkaa, riippuen ulkolämpötiloista, kaukolämpötehon tarpeesta ja kattilan kuormasta. Keravan Biovoimalaitos pystyy tuottamaan kaukolämpöä tarpeeksi ulkolämpötilojen ollessa melkein nollassa, joten sähköntuotantoa pystytään optimoimaan käyttäen savukaasulauhdutinta säätämään tuotantoa syys- ja kevätkausina. Optimointia käydään tarkemmin läpi luvussa 4.

4 Käytön optimointi

Savukaasulauhduttimen käytön optimointiin perehdytään tässä työssä lähinnä sähköntuotannon ja kaukolämmön optimaalisen tuotantosuhteen kautta. Sähkön hinta on ollut nousussa jo alkuvuodesta 2022, ja savukaasulauhduttimen kaukolämpöverkkoon tuottaman lämpöenergian kautta turbiinin sähköntuotanto heikkenee.

4.1 Savukaasulauhduttimen kannattavuuden laskenta

Savukaasulauhduttimen kannattavuuteen vaikuttavat kaukolämmön kysyntä, sähkön pörssihinta ja polttoaineen hinta sekä saatavuus. Kaukolämmön kysyntä on tässä työssä yksi suurin raja-arvo, koska kannattavuuteen keskitytään laitospöytäkohtaisesti, eli muiden laitosten ajamista kaukolämmön tuotantoa varten ei katsota vaihtoehdoksi. Sähkön pörssihinta vaikuttaa suuresti siihen, mihin aikaan voidaan arvioida, että sähkö on halvempaa ja kannattaa tuottaa enemmän kaukolämpöä. Polttoaineen hinta lasketaan työssä 24,6 €/MWh mukaan, joka on tilastokeskuksen antama hinta vuoden 2022 toiselle kvartaalille. (Kotimaisten polttoaineiden käyttäjähinnat energiantuotannossa -99Q3 /22Q2. 2022.)

Polttoaineen saatavuus on biovoimalaitoksilla tulevaisuudessa yhä suurempi haaste hakkeen korvatesa turvetta ja kivihiihtä. Suomessa on arvioitu, että vuoteen 2030 mennessä puuperäisen polttoaineen kysyntä energiantuotantolaitoksilla kasvaa 30–40 % tämänhetkiseen tasoon nähden. Kyse on 6,4–8,3 miljoonan kuutiometrin lisäyksestä. (Afry. 2021.)

Savukaasulauhduttimen kannattavuutta voidaan lähteä selvittämään laskemalla kaavan 8 mukaisesti pesurilaitoksen tuottamaa nettoarvoa:

$$\epsilon_{netto} = \epsilon_{sähkö} + \epsilon_{PA-säästö} + \epsilon_{omakäyttö} \quad (8)$$

Kaavassa 8 $\epsilon_{sähkö}$ merkitsee sähköntuotannosta saatavaa rahallista hyötyä ja lasketaan negatiivisena, kun taas $\epsilon_{PA-säästö}$ tarkoittaa pesurilaitoksen tuottamaa polttoainesäästöä prosessissa. ϵ_{Netto} on näiden kahden yhteenlaskettu lopputulos, ja mikäli siitä saatu luku on negatiivinen, niin sähköntuotannosta saa sillä hetkellä enemmän rahaa. Luvun ollessa positiivinen on tuloksellisempaa ajaa pesurilaitosta ja tuottaa enemmän kaukolämpöä. Pesurilaitoksella on myös tiettyjä omakäyttökustannuksia, kuten vesi, kemikaalit ja sähkö. Kyseisessä laitoksessa omakäyttökustannukset ovat muutaman euron luokkaa per megawattitunti.

Pesurilaitoksen vaikutusta sähköntuotantoon voidaan laskea selvittämällä sähköstä saatava rahallinen tuotto laitoksen rakennusasteen ja sähkön SPOT-hinnoittelun perusteella kaavan 9 mukaisesti:

$$\epsilon_{sähkö} = -(R * P_{pesuri} * \epsilon_{SPOT}) \quad (9)$$

Kaavassa 9 R on rakennusaste, jolla tarkoitetaan sähkön- ja lämmöntuotannon suhdetta. P_{pesuri} kuvaa pesurin tehoa, joka esimerkkilaskuissa lasketaan 1 MW:lla. Realistista tehoa ei tarvita esimerkkilaskuissa, koska laskenta tehdään säästönäkökulmasta megawattitasolla. ϵ_{SPOT} tarkoittaa ennustettua sähkön SPOT-markkinahintaa.

Polttoainesäästöt tuotetulle megawattitunnille lasketaan kaavassa 10:

$$\epsilon_{PA\text{-säästö}} = \frac{(1+R)*P_{pesuri}}{\eta} * \epsilon_{PA} \quad (10)$$

Kaavassa η on kattilan hyötysuhde, ja ϵ_{PA} on polttoaineen hinta.

Näillä kaavoilla voidaan lähteä selvittämään sähkön Spot-hintaa, jolloin tase alkaa kääntymään sähköntuotannon suosimisen puolelle.

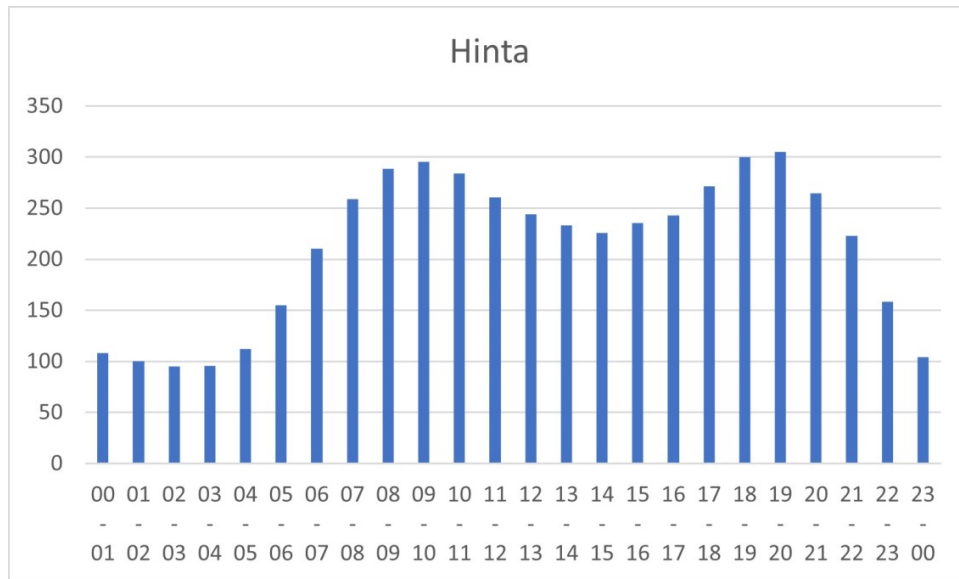
$$\epsilon_{SPOT} = 113,125\text{€/MW}$$

Käytettävien muuttujien arvot:

- R: 0,32
- P_{pesuri} : 1MW
- $\epsilon_{omakäyttö}$: 2e/MWh
- η : 85 %
- ϵ_{PA} : 24,6e/MWh

Kyseinen lasku on tehty olettaen, että laitosta käytetään 0 %:n tai 100 %:n käytöllä. Savukaasulauhdutinta pystytään kuitenkin ajamaan myös 50 %:n tehoilla. Laitoksen käyttö 50–100 %:n tehoilla on todennäköisempi vaihtoehto normaaliolosuhteissa, koska sen ollessa noin 12 tuntia 0 %:n käytöllä siitä pitää tyhjentää vedet, mikä lisää henkilötuntien käyttöä ja hidastaa laitoksen uudelleenkäynnistystä, mikäli sähkön hinta laskee, tai kaukolämmön tarve nousee. Savukaasujen määrää pystytään säätämään suoraan valvomosta ohjauspeltien avulla, joten 50–100 %:n käyttö ei vaadi yhtä paljon suunnittelua, ja seurantaa, kuin 0–100 %:n käyttö.

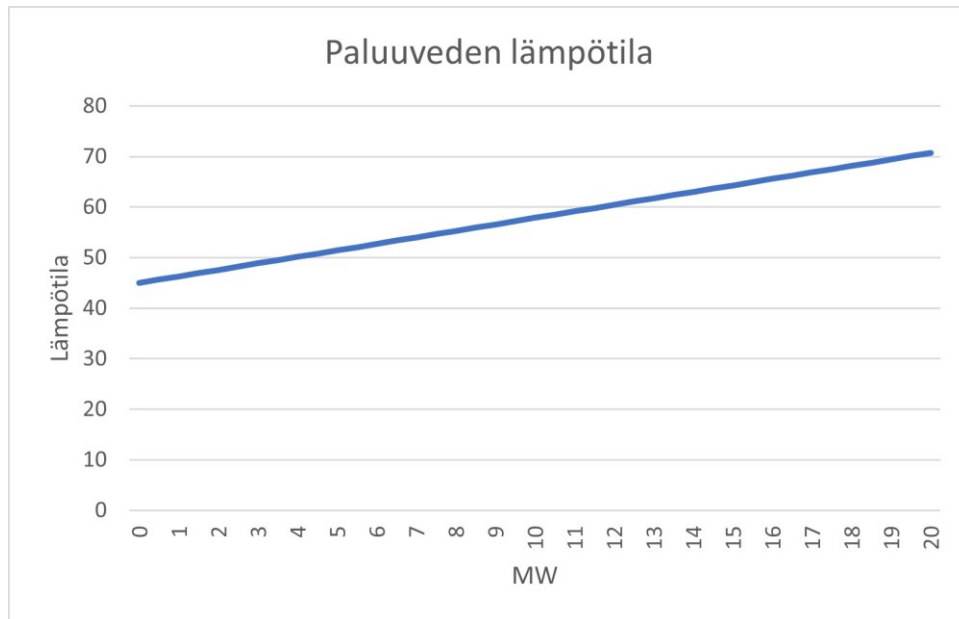
Sähkön pörssihinta riippuu kulutuksesta. Kuvassa 10 nähdään keskimääräinen sähkön hinta tunnin välein kokonaisen päivän aikana. Laskennassa käytetty Nord poolista eur/MWh hintaa 30.8. - 30.9.2022 ja laskettu hinnan keskiarvo tunneittain.



Kuva 10: Sähkön keskihinta tunneittain 30.8. - 30.9.2022. (Nord Pool day-ahead prices 30.8. – 30.9.2022.)

Keski- ja aamuyöstä sähkö on halvimmillaan, ja sen hinta lähtee nousemaan aamulla. Kulutuspiikit ovat selvästi painottuneet aamuun ja iltaan. Huomioitavaa on, että hintojen vaihtelut päivien väleillä ovat suuria, joten yllä olevaa kuvaa tulee tulkita vain sähkön käytön trendinä.

Pesurilaitoksen lämmönvaihtimesta tuleva vesi syötetään kaukolämpölinjan paluulinjaan, jolloin se pienentää turbiinilta tulevan höyryn paisuntaeroa pienentäen sähkötehoa. Kuvassa 11 nähdään 0—20 MW:n vaikutus kaukolämpölinjan paluuveden lämpötilaan.



Kuva 11: Savukaasulauhduttimen vaikutus kaukolämmön paluulämpötilaan 0–20 MW tehoilla.

Vaikutus paluuveden lämpötilaan voidaan laskea kaavalla 11.

$$\Delta T = \frac{Q_{\text{lisäys}}}{\dot{m} \cdot c_p} \quad (11)$$

jossa

ΔT on paluuveden lämpötilan muutos

$Q_{\text{lisäys}}$ on savukaasulauhduttimelta tuleva lämpöenergia 0–20 MW

\dot{m} on kaukolämpöverkon massavirta

c_p on veden ominaislämpökapasiteetti

Tuloksessa on hyvä ottaa huomioon, että veden ominaislämpökapasiteetti riippuu veden lämpötilasta paineen ollessa vakio. Laskettaessa veden ominaislämpökapasiteetilla 4,18 kJ/kg·K loppulämpötilaksi saadaan 70,72 °C. Veden todellinen ominaislämpökapasiteetti on kuitenkin tällöin noin 4,1882 kJ/kg·K. Ottamalla

muutoksen keskiarvo voidaan laskea tarkempi lämpötilamuutos 0–20 MW:n tehovälille, jolloin saadaan loppulämpötilaksi 70,67 °C.

Savukaasulauhduttimen aiheuttama teholisäys kaukolämpöverkon paluuveteen voidaan laskea pesurin tehotaseena kaavan 12 mukaisesti.

$$Q_{\text{paluu}+\text{lisäys}} = Q_{\text{paluu}} + Q_{\text{lisäys}} \quad (12)$$

jossa

$Q_{\text{paluu}+\text{lisäys}}$ on kaukolämpöverkon sisältämä lämpöenergia savukaasulauhduttimen jälkeen

Q_{paluu} on kaukolämpöverkon sisältämä lämpöenergia ennen savukaasulauhdutinta

$Q_{\text{lisäys}}$ on savukaasulauhduttimen lisäämä lämpöenergia

Vastapainevoimallaitoksella sähköntuotantoon vaikuttaa kaukolämpöverkon paluuveden lämpötila, koska se rajoittaa turbiinista tulevan matalapainehöyryn lauhtumista. Lauhduttimessa tapahtuvan faasimuutoksen takia lämpötilaero on nolla matalapainehöyryn ja lauhteen välillä, joten KL1: tä täytyy tutkia entalpioiden kautta.

Matalapainehöyry tulee turbiinin perästä kaukolämmönsiirrin 1:lle alhaisessa lämpötilassa. KL1 toimii alipaineessa, koska höyryn saturaatiopaine on alhaisilla lämpötiloilla alle atmosfäärin paineen. Matalapainehöyryn entalpia selvitettiin KL1: n taseesta kaavan 13 mukaisesti.

$$h_{mp} = \frac{\dot{m}_{mp} \cdot (h_{kl1-out} - h_{kl1-in})}{\dot{m}_{mp}} + h_{kl1-lauhde} \quad (13)$$

jossa

h_{mp} on matalapainehöyryn entalpia

\dot{m}_{mp} on matalapainehöyryn massavirta

$h_{kl1-out}$ on KL1:ltä lähtevän kaukolämpöveden entalpia

h_{kl1-in} on KL1:lle tulevan kaukolämpöveden entalpia

$h_{kl1lauhde}$ on KL1:ltä lähtevän lauhteen entalpia

Kaukolämmönsiirrin 1: n hyötysuhde ε laskettu todellisen lämmönsiirron ja maksimilämmönsiirron kautta kaavalla 14:

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_{mp}(h_{mp}-h_{kl1lauhde})}{\dot{m}_{mp}(h_{mp}-h_{kl1-in})} \quad (14)$$

jossa

ε on kaukolämmönsiirrin 1:n hyötysuhde

\dot{m}_{mp} on matalapainehöyryn massavirta

h_{mp} on matalapainehöyryn entalpia

$h_{kl1lauhde}$ on lauhteen entalpia

h_{kl1-in} on kaukolämpöverkon paluulinjan veden entalpia

Mikäli KL1:n hyötysuhteen oletetaan pysyvän suhteellisen muuttumattomana, voidaan myös turbiinilta tulevan matalapainehöyryn entalpiamuutosta laskea käyttäen KL1: n hyötysuhdetta.

$$\varepsilon = \frac{m_{kl}*(h_{kl1-out}-h_{kl1-in})}{m_{mp}*(h_{mp}-h_{kl1-in})} \quad (15)$$

$$h_{mp} = \frac{\frac{m_{kl}*(h_{kl1-out}-h_{kl1-in})}{\varepsilon} + (m_{mp} * h_{kl1-in})}{m_{mp}}$$

Tämän jälkeen voidaan johtaa kaavasta 14 ratkaisu KL1:n lauhteen entalpian muutokselle.

$$h_{kl1lauhde} = \frac{\varepsilon \cdot \dot{m}_{mp} \cdot (h_{mp} - h_{kl1-in}) - (\dot{m}_{mp} \cdot h_{mp})}{-\dot{m}_{mp}} \quad (16)$$

Lämmön siirtyessä aina kuumasta kylmään lämpöenergian lisääminen kaukolämpöverkon paluuveteen vaikuttaa tällöin myös kaukolämmönsiirtimessä tapahtuvaan lämmönsiirtoon. Aiemmin lisätty lämpöenergia säilyy, ja jatkaa KL1:n läpi rajoittaen turbiinilta tulevan höyryn lauhtumista. Olettamalla hyötysuhteen KL1:ssä vakioksi, tai hyvin vähän muuttuvaksi voidaan laskea energianlisäyksen vaikutus matalapainehöyryyn, sekä KL1:n lauhteeseen.

Turbiinille on otettu yhteensä kolme väliottoa, väliotto 2, -3, ja kaukolämmönsiirrin 2:n tuleva väliotto, joka lämmittää kaukolämpöverkon menovettä. Kaukolämmönsiirrin 1:lle höyry tulee turbiinin perästä. Turbiinissa vapautuva energia laskettiin kaavalla 17:

$$W_{höyry} = \dot{m}_{th} \cdot (h_{th} - h_2) + (\dot{m}_{th} - \dot{m}_2) \cdot (h_2 - h_3) + (\dot{m}_{th} - \dot{m}_2 - \dot{m}_3) \cdot (h_3 - h_4) + (\dot{m}_{th} - \dot{m}_2 - \dot{m}_3 - \dot{m}_4) \cdot (h_4 - h_5) \quad (17)$$

jossa

\dot{W}_{out} on höyrystä vapautuva energiamäärä

\dot{m}_{th} on tuorehöyryn massavirta

h_{th} on tuorehöyryn entalpia

h_2 on väliotto 2:n entalpia

\dot{m}_2 on väliotto 2:n massavirta

h_3 on väliotto 3:n entalpia

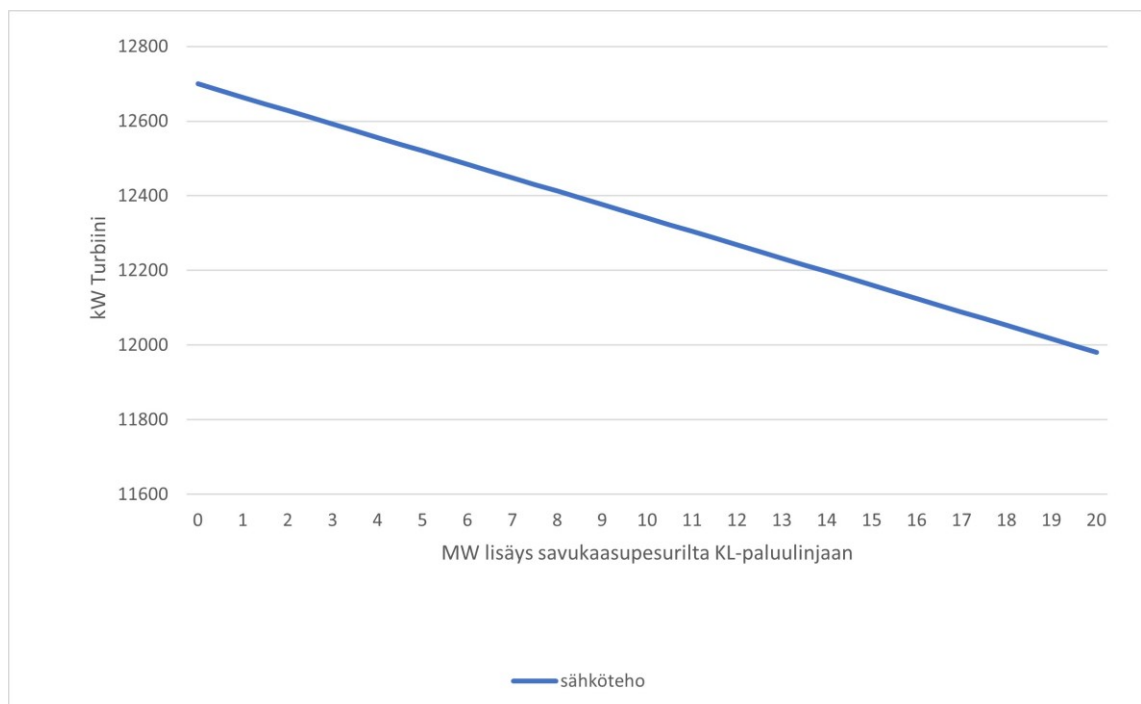
\dot{m}_3 on väliotto 3:n massavirta

h_4 on kaukolämmönsiirrin 2:n entalpia

\dot{m}_4 on kaukolämmönsiirrin 2:n massavirta

h_5 on kaukolämmönsiirrin 1:n tulevan höyryn entalpia

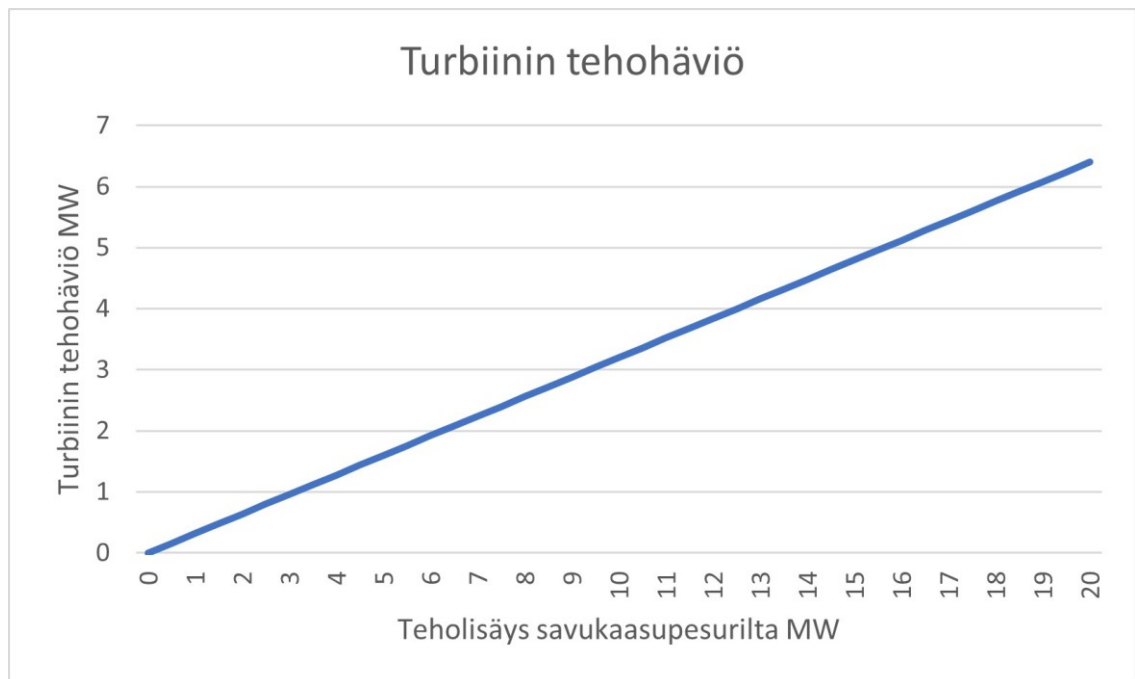
Koskelainen ym. (2006: 298) mukaan kaukolämpöveden nosto asteella tulisi vaikuttaa vastapainevoimalaitoksen sähköntuotantoon n. 0,2 % per nostettu aste. Kuvassa 12 on esitetty, miten tämä vaikuttaa turbiinissa. Kuvan 0–20 MW:n lisäyksessä paluuveden lämpötila nousee 45 °C:stä noin 71 °C:seen, jolloin menetetty teho turbiinilla olisi n. 0,2 %:n luokkaa per nostettu aste. Tämä laskutapa kuitenkin olettaa, että prosessiin lisättyä energiaa käytettäisiin kaukolämpöverkon lämmittämiseen, joka voi olla validi ajotapa esimerkiksi kaukolämpöverkon lataustilanteessa.



Kuva 12: Turbiinin tehon ja KL-paluulinjaan lisätyn tehon suhde

Höyryn tehohäviötä turbiinissa tulisi laskujen perusteella 0–20 MW:n välillä noin 775 kW, joka olettaen noin 91 %:n hyötysuhteen generaattorin ja turbiinin välillä olisi 705,25 kW häviötä sähkötehossa savukaasulauhduttimen toimiessa 20 MW:n teholla.

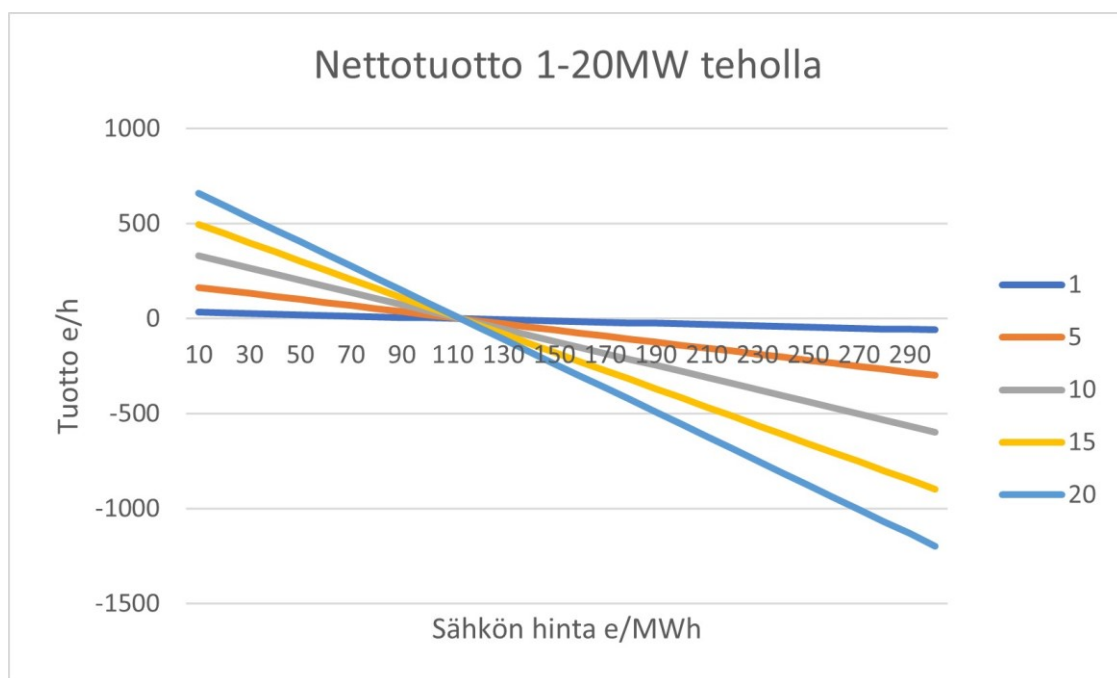
Normaalissa ajotilanteessa kaukolämpöverkon lämpötilat halutaan pitää kuitenkin tasaisena. Tällöin on tehtävä säätöjä tuorehöyryn tuotantoon, jotta voidaan tasapainottaa prosessi korkeamman paluueden lämpötilan kanssa. Pienempi tuorehöyryntuotanto tarkoittaa vähemmän sähköntuotantoa, mutta enemmän polttoainesäästöjä. Tuorehöyryn tuotannon vähentämisen vaikutuksen mallintaminen olisi ollut liian työlästä Excelillä, koska massavirtojen jakautumista turbiinissa on vaikea mallintaa ilman CFD-ohjelmistoa. Tästä syystä tehohäviöt ja polttoainesäästöt on laskettu kaavojen 9 ja 10 perusteella. Kuvassa 13 on paluulinjaan lisätyn lämpöenergian vaikutus sähkötehoon, jos prosessi tasapainotetaan tuottamalla vähemmän tuorehöyryä.



Kuva 13: Sähkötehohäviö, kun tuorehöyryn tuotantoa säädetään.

Tehohäviö seuraa lineaarisesti teholisäystä savukaasulauhduttimelta. Häviöt laskettu kaavan 9 perusteella.

Kuvassa 14 on pesurin nettotuotto eli sähköntuotannon- ja omakäytön kustannukset vähennettynä polttoainesäästöistä. Pesurin käyttö muuttuu tappiolliseksi, kun sähkön SPOT-hinta on 113,125e/MWh.



Kuva 14: Savukaasulauhduttimen käytön kannattavuus 1—20 MW teholla

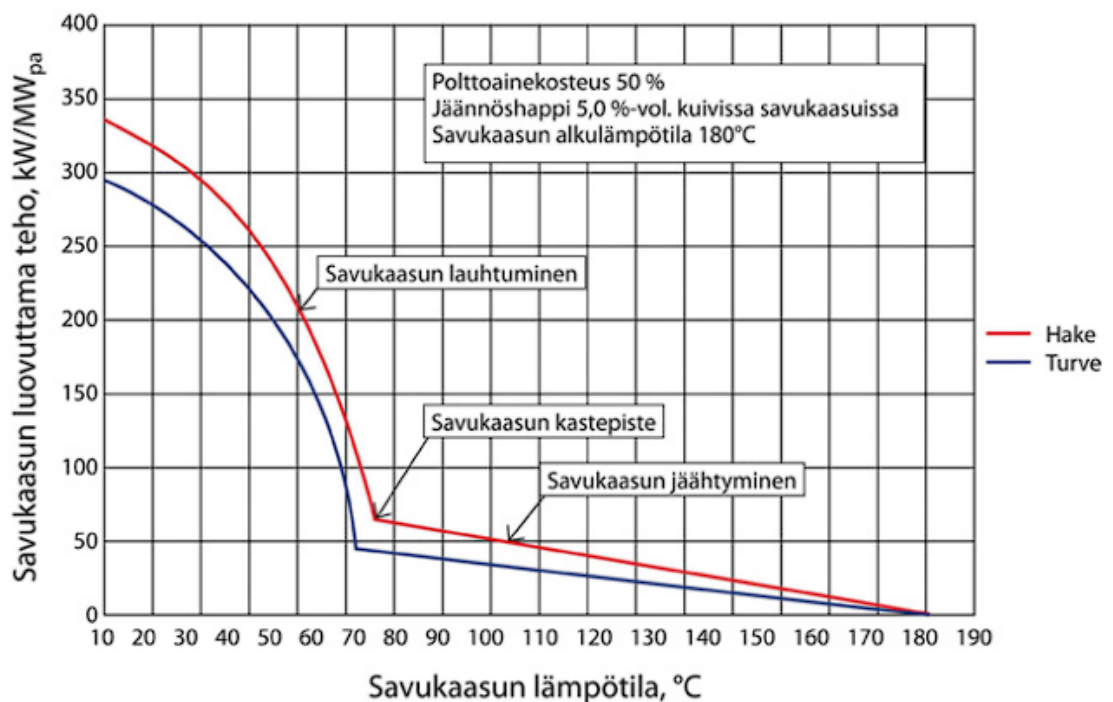
Laskelmat ovat tehty 0–20 MW:n tehovälille antamaan kuvaa, miten pesuri vaikuttaa sähköntuotantoon. Pesurin todellinen teho kuitenkin riippuu savukaasun sisältämästä lämpövirrasta, jota pesuri pystyy hyödyntämään tietyllä hyötysuhteella. Tämän lisäksi operaattori pystyy ohjaamaan savukaasupelleillä savukaasun virtausta lauhduttimelle, jolloin saadaan 0–50–100 % savukaasuista ohjattua pesuriin, tai sen ohi.

Tämän lisäksi prosessissa on rajoittavina tekijöinä muun muassa tuorehöyryn tarve prosessilämpöön, eli tuotantoa ei pystytä rajoittamaan tietyn pisteen jälkeen. Tuorehöyryn tuotanto on operaattoreiden mukaan pakko olla yli 10 kg/s, jotta höyryä riittäisi muun muassa prosessilämpöön läheiselle tehtaalle.

4.2 Kannattavuuden parantaminen

Tuotannon kannattavuutta voidaan optimoida säätämällä savukaasulauhduttimesta otettavaa tehoa pienemmäksi korkeiden sähköhintojen aikana. Optimointia voidaan tehdä myös pienentämällä kaukolämpöveden paluulämpötilaa.

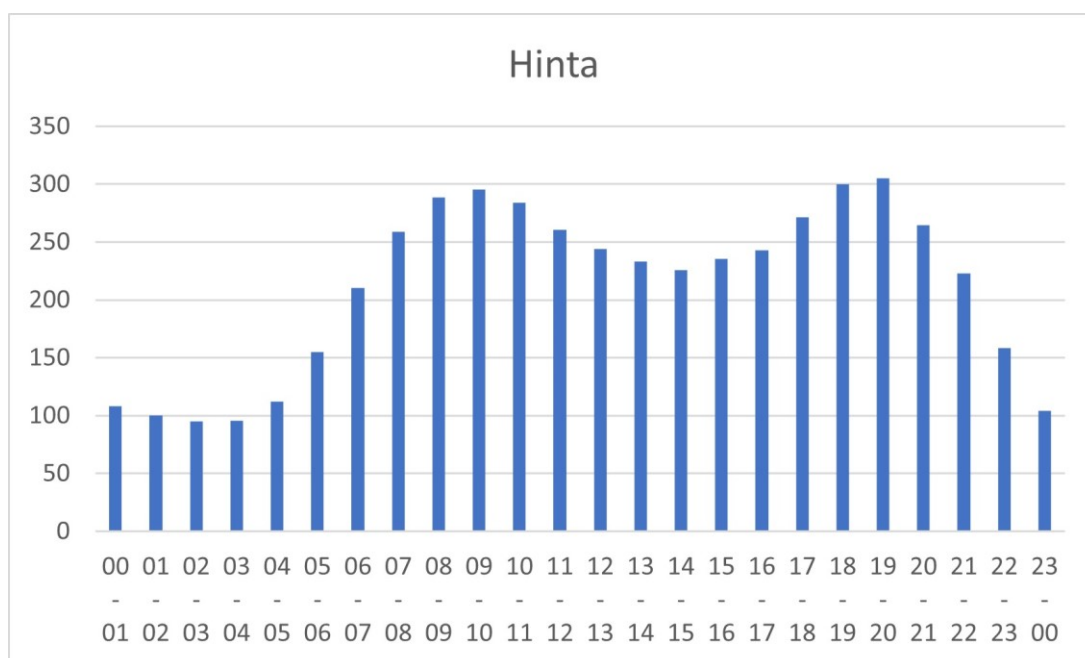
Kuvassa 15 esitetään savukaasujen luovuttamaa energiaa riippuen siitä, mihin lämpötilaan ne jäädytetään. Yleisesti pesurin jälkeinen savukaasun lämpötila rajoittuu 3–5 °C kaukolämmön paluulinjan lämpötilaa korkeammaksi, joten mitä alemmaksi paluulinjan lämpötila saadaan, sitä enemmän saadaan energiaa talteen savukaasulauhduttimesta. Kaukolämpölinjan paluulämpötila vaikuttaa myös CHP-laitoksella tuotettuun sähköön, koska höyryn lopullinen lauhdutuslämpötila on riippuvainen kaukolämpölinjan paluulämpötilasta. (Järvenreuna 2014.)



Kuva 15: Savukaasun luovuttaman tehon riippuvuus lämpötilasta. (Järvenreuna 2014.)

Sähkön pörssihinta vaihtelee päivän aikana luonnollisesti sen kysynnän ja toimituksen mukaan. Yöaikaan kysyntä on pienempää, ja tuotanto perustuotolla on kuitenkin tasaista, jolloin sähkön hinta laskee. Kaukolämmön tuotannon suosiminen on täten luonnollista, koska sähköstä ei saada yhtä hyvää hintaa, kuin sen huippukulutustunteina.

Ongelmana on kuitenkin, että kaukolämmön tarve seuraa hyvin paljon sähkönkulutusta eli aamusta ja iltapäivästä on kulutuspiikit. Ratkaisuna tähän on säätää voimalaitoksella tuotanto vastaamaan kysyntään tai käyttää kaukolämpöverkkoa akkuna, joka ladataan täyteen ja puretaan, kun kaukolämmön tarve taas nousee.



Kuva 16: Sähkön keskimääräinen tuntihinta 30.8.–30.9.2022.

30.8.–30.9. tunneittain keskiarvotetun sähkön tuntihintojen mukaan sähkön hinta alkaa laskemaan keskimäärin kello 20 illasta. Alimmat hinnat saavutetaan aamuyöstä, mutta hinta on kello 23:00 lähtien melkein samaa tasoa läpi yön aina kello 05:00:een asti, jolloin hinnat alkavat taas nousta. Tämä jättää yöstä kuusi tuntia aikaa tuottaa kaukolämpöverkkoon lisäenergiaa, jota voidaan

purkaa aamun kulutuspiikin aikaan ja samalla suosia sähköntuotantoa, kun sähkön hinta on myös korkeammalla.

Kaukolämmön tarve määrää optimointia. Mikäli voidaan tuottaa tarpeeksi kaukolämpöä ilman apulaitoksia, ja päävoimalaitoksen peruskuorma riittää siihen, niin voidaan optimoida tuotantoa käyttämällä savukaasulauhduttimelta tulevaa tehosisäystä, kun sähkön hinta on noin alle 113e/MWh.

5 Yhteenveto

Insinööriyön tarkoituksena oli tarkastella savukaasun lauhdutusjärjestelmää sen käytön optimoinnin kannalta. Työ tehtiin Keravan Energia Oy:lle ja työn aiheena ollut savukaasujen lauhdutinjärjestelmä sijaitsee Keravan biovoimalaitoksella. Kunnossapidon tehtävä on varmistaa häiriötön käyttö ja laskennallisesti pystyttiin määrittämään milloin laitosta kannattaa käyttää.

Kunnossapidon kannalta järjestelmän kriittisimmät osat käytiin läpi ja valmistajadokumenttien pohjalta luotiin käyttöhenkilökunnalle käynnissäpito-ohje, joka varmistaa, että häiriötilanteisiin pystytään puuttumaan ajoissa. Prosessin kuvausta sekä käynnissäpito-ohjetta voidaan käyttää esimerkiksi uuden käyttöhenkilökunnan koulutuksessa.

Laskennassa päästiin järkeviin tuloksiin. Sähkötehohäviöt kasvoivat noin 0,2 %, kun savukaasun lauhdutusjärjestelmä nosti paluuveden lämpötilaa 1 °C:lla, joka on linjassa kirjallisuuden kanssa. Tuorehöyryn tuotannon muuttaminen vaikutti huomattavasti suuremmin sähkötehohäviöihin. Savukaasun lauhdutusjärjestelmän nettotuoton kääntyminen tappiolliseksi laskettiin tapahtuvan, kun sähkön spot-hinta saavutti 113,125 e/MWh. Laskennassa haasteeksi osoittautui tuorehöyryn tuotannon muutoksen mallinnus Excelissä. Tuorehöyryn jakautumista turbiinissa oli vaikea laskea pelkästään Exceliä käyttäen, joten sähköhäviöt päätettiin laskemaan rakennusasteen kautta. Tarkempia laskutuloksia olisi mahdollista lähteä selvittämään muun muassa virtauksen mallinnus -ohjelmistolla, jolla

saisi mallinnettua turbiinin massavirtojen jakautumista tarkemmin. Nykyiset las-
kutulokset ovat kuitenkin riittävät työn tarkoitusta varten.

Järjestelmän nettotuotto riippuu hyvin paljon sähkön spot-hinnasta, savukaasu-
jen energiamäärästä sekä polttoaineen hinnasta. Optimointiin on syytä kiinnittää
huomiota varsinkin kevät- ja syyskausina, kun lämpötilat vaihtelevat paljon päi-
vän aikana, sekä yön ja päivän välisiin tehotarpeisiin. Optimaalinen ajotapa ke-
vät- ja syyskausille yli +1 °C:een lämpötiloille olisi ladata savukaasun lauhdutin-
järjestelmällä kaukolämpöverkkoon lisälämpöä yöllä, kun sähkön hinta on alhai-
nen. Aamulla verkkoa voidaan alkaa purkamaan, ja kattilan polttoainekuorma
voidaan nostaa päivän kaukolämmön tarpeen tasolle. Savukaasun lauhdutus-
järjestelmä voidaan kytkeä pois, mikäli sähkön spot-hinta on yli 113,125 e/MWh.
Näin saavutetaan maksimaalinen hyöty savukaasun lauhdutusjärjestelmän net-
totuoton kannalta.

Lähteet

Energiateollisuuden ympäristöpooli: Selvitys polttolaitosten savukaasupesureiden jätevesien ja lietteiden laadusta, hyötykäytöstä ja siihen liittyvästä luvituksesta. 2016. Verkkoaineisto. AFRY Group Finland. <https://energia.fi/files/1442/Savukaasupesurit_raportti_201216.pdf>

Hillamo, Harri. Kaukolämpöverkot. Verkkoaineisto. Energiateollisuus ry. <<https://energia.fi/energiasta/energiaverkot/kaukolampoverkot>> Luettu 31.10.2022.

Huhtinen, Markku. Korhonen, Risto. Pimiä, Tuomo. Urpalainen, Samu. 2013. Voimalaitostekniikka. Helsinki: Opetushallitus

Järvenreuna, Juha. 2014. Savukaasupesuri parantaa lämpöyhtiön kannattavuutta. Promaint-lehti, 21.10.2014. <<https://promaintlehti.fi/Tuotantotehokkuuden-kehittaminen/Savukaasupesuri-parantaa-lampoyhtion-kannattavuutta>>

Jätevesiviemäriin johdettavien jätevesien raja-arvot. Keravan kaupunkitekniikka, vesihuolto. 2021. Yrityksen sisäinen dokumentti. Keravan Lämpövoima Oy.

Keravan Energian tuotantolaitokset. 2021. Verkkoaineisto. Keravan Energia Oy. <<https://www.keravanenergia.fi/keravan-energia-yhtiot/tuotantolaitokset/>> Luettu 12.9.2022.

Keravan Lämpövoima Oy:n kiinteistön jäteveden tarkkailu 15.-16.12.2021. Teollisuuden Vesi Oy. 2021. Yrityksen sisäinen dokumentti. Keravan Lämpövoima Oy.

Keuhkosairauksia aiheuttava kvartsipöly on teollisuuden ongelma. 2008. YLE. <<https://yle.fi/a/3-5827758>> 25.3.2008. Päivitetty 31.10.2008. Luettu 25.11.2022

Koskelainen, Lasse. Saarela, Rauli. Sipilä, Kari. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki: Libris Oy

Kotimaisten polttoaineiden käyttäjähinnat energiantuotannossa (ei sis. alv), 1999Q3 – 2022Q2. 2022. Verkkodokumentti. Tilastokeskus.
<https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ehi/statfin_ehi_pxt_12gb.px/> Päivitetty 9.8.2022. Luettu 15.10.2022.

Käyttö- ja huolto-ohje. Kpa Unicon Oy. 2021. Yrityksen sisäinen dokumentti. Savukaasujen pesu- ja lauhdutuslaitos, Keravan Lämpövoima Oy.

Lauhteenkäsittelykoulutus. HyXo Oy. 2021. Yrityksen sisäinen dokumentti. Keravan Lämpövoima Oy.

Metsähakkeen kysynnän kehitys ja riittävyys Suomessa. 2021. Verkkoaineisto. Afry. <https://valtioneuvosto.fi/documents/1410877/53440649/Mets%C3%A4hakkeen+kysynn%C3%A4n+kehitys+ja+riitt%C3%A4vyys+Suomessa_LOPPURAPORTTI.pdf/61b5eaa4-ca1f-2ccd-0922-221326959e41/Mets%C3%A4hakkeen+kysynn%C3%A4n+kehitys+ja+riitt%C3%A4vyys+Suomessa_LOPPURAPORTTI.pdf?t=1620822103773> Luettu 20.10.2022.

Mobley, R. Keith. 2004. Maintenance Fundamentals, 2nd edition. Oxford: Elsevier

Tietoa Keravan Energiasta. 2021. Verkkodokumentti. Keravan Energia Oy.
<<https://www.keravanenergia.fi/keravan-energia-yhtiot/>> Luettu 12.9.2022.

Käynnissäpito-ohje



1 / 9

[dokumentin nimi]
26.11.2022

Käynnissäpito-ohje

Kohde

Keravan Biovoimalaitoksen savukaasulauhdutin

Myllykorventie 20, 04250 Kerava

Kohteen yleistiedot

Laitos:

Savukaasulauhdutin on Keravan Biovoimalaitoksen yhteydessä.

Käytönvalvoja: Toni Korpikoski

Varavalvoja: Mikko Juvonen

Kemikaalit:

Laitoksella käytetään seuraavia kemikaaleja:

Suolahappo, natriumhydroksidi, natriumhypokloriitti, PIX-105, hypersperse msi410 antiscalantti, superfloc a-125v polymeeri, ultrasil-110, ultrasil-75, kk-inhimeg 40 glykoli

Turvallisuuslaitteisto:

Hätäsuihkut löytyvät savukaasulauhduttimen ulkoseinustalta parkkipaikan puolelta, pohjakerroksesta (2kpl), 2. kerroksesta, sekä 3. kerroksesta. Hätäsuihkujen lisäksi kohteessa on erikseen silmähuuhteita pohjakerroksessa (2kpl), ja 2. kerroksessa.

Käsisammuttimet löytyvät ensimmäisestä, toisesta, ja kolmannelta kerroksesta, sekä katolta.

Kohteesta löytyy myös paloilmaisimet, sekä ylivuotoanturi ulkopuolelta ylivuotokaivosta.

Muuta:

Työskentelystä savukaasulauhduttimella on ilmoitettava valvomoon, ja Toni Korpikoskelta on saatava tarvittavat luvat tehtäville työtoimenpiteille.

Käynnissäpitotoimenpiteet

Käynnissäpitotoimenpiteisiin lukeutuu alla olevat toimenpiteet:

Käynnissäpitokäynti:

- Savukaasulauhdutin käydään läpi päivittäin Keravan Biovoimalaitoksen käpi-kierroksen yhteydessä kerran päivässä ajokauden aikana.



Kuukausitarkistukset:

- Kuukausitarkistukset tehdään ajokaudella aina kuun viimeisenä päivänä käpi-kierroksen yhteydessä.

Käynnissäpitokäynnin toimenpiteet**Raportointimerkinnot:**

- Mahdolliset merkinnot tehdään Kelvon käynnissäpitokierroksen yhteyteen Noviiin.

Turvallisuus, siisteys ja järjestys:

- Tarkista laitoksen yleinen siisteys ja järjestys, jos huomaat puutteita, niin tee tarvittavat korjaustoimenpiteet.

Pohjakerros:

1. Tarkista savukanavan tiiveys
2. Koaguloitinpumpun 1HTS60AP001 toiminta
 - o Tarkista pumpun toiminta silmämääräisesti vuotojen varalta ja kuuntele poikkeavia ääniä
 - Pumpun käyttö- ja huolto-ohjeessa tarkemmat ohjeet vikadiagnosointia varten
3. Tarkista tuhkan määrä ja palautuspumppauksen toiminta säkityksessä 1GNB40AT001
 - o Säkkiin tulevasta letkusta tarkistetaan säkkiin tuleva neste
 - o Mikäli nesteen kiintoainepitoisuus on selkeästi noussut, pitää märkätuhkapumpun pumppausta nostaa pumppauksen asetuksista
 - o Säkin vaihto, jos säkki on täyttynyt n. puoleen väliin
4. Tarkista pesupumppujen toiminta
 - o Pumpussa on yksi lieriörullalaakeri (urakuulalaakeri akselikoolla 7) ja kaksi yksirivistä viistokuulalaakeria
 - o Lieriörullalaakerin voitelu; 50g voiteluainetta / 4000 käyttötunnin välein
 - o Viistokuulalaakereiden voitelu; 50g voiteluainetta / 8000 käyttötunnin välein
 - o Tarkemmat voiteluohjeet ja -aineet pumpun manuaalissa
5. Tarkista ja rekisteröi polymeerin määrä säiliössä
 - o Käyttöönnotossa käytettävälle polymeerijauheelle sekoitussuhde 0,5 til-%, eli 2,5 dl polymeeriä 50 litraan vettä
6. Tarkista UF-pumppujen toiminta
Tarkista lipeäpumput vuotojen varalta
7. Tarkista kemikaalipumppujen toiminta pumppausyksikössä
8. Tarkista pumppaus-säiliö ja kirkastepumput
9. Tarkista lamelliselkeyttimen alaosa ja märkätuhkapumppu 1GNR01AP001
 - o Tarkista lamelliselkeyttimen silmämääräisesti vuotojen varalta
 - o Tarkista pumpun toiminta silmämääräisesti vuotojen varalta ja kuuntele poikkeavia ääniä
 - Pumpun käyttö- ja huolto-ohjeessa tarkemmat ohjeet vikadiagnosointia varten



2. kerros:

10. Tarkista prosessin tilanne, ja hälytykset prosessinäytöltä
11. Pesupumpun 1HTD10AP001/1HTD20AP001 paine
 - Paikallismittari on tasolla +4.000
 - Jos paine 3bar tulee pesurin suuttimet tarkistaa ja tarvittaessa vaihtaa/puhdistaa seuraavassa seisakissa
12. LTO-pumppujen toiminta
 - Pumpussa on yksi lieriörullalaakeri (urakuulalaakeri akseliokoolla 7) ja kaksi yksirivistä viistokuulalaakeria
 - Lieriörullalaakerin voitelu: 60g voiteluainetta 2000 käyttötunnin välein
 - Viistokuulalaakereiden voitelu: 60g voiteluainetta 4500 käyttötunnin välein
 - Tarkemmat voiteluohjeet ja voiteluaineet pumpun manuaalissa
13. Tarkistetaan rejektin syöttö voimalalle
Tarkistetaan rejektipumppujen toiminta
14. Tarkistetaan päälauhdelämmönvaihdin
 - Tarkista glykolipiirin paine (oltava 2.0 – 3.0 bar) Varoventiili aukeaa 4.0 bar:ssa
 - Virtaus viemäriin ja lauhde Demivedeksi
 - pH viemäriin oltava 6 – 9 ja lämpötila alle 40°C, huom. pH-mittauksen lauhde virtaa viemäriin
 - Demi-vesilämmönvaihdin, lämpötila Demi-vedeksi oltava alle 30°C
 - Tarkastetaan pH-mittauksen toiminta, säädä virtausta tarvittaessa
 - Tarkista glykolipiirin paine (oltava 2.0 – 3.0 bar, varoventiili aukeaa 4.0bar:ssa) Lisätään tarvittaessa vesi-glykoliliuosta
15. Tarkistetaan hiekkasuodattimet
16. Tarkistetaan Boosteripumppaus, suodatus, ja KL-lämmönvaihdin
 - Pumpussa yksi lieriörullalaakeri ja kaksi yksirivistä viistokuulalaakeria
 - Lieriörullalaakerin voitelu: 60g voiteluainetta 2000 käyttötunnin välein
 - Viistokuulalaakereiden voitelu: 60g voiteluainetta 4500 käyttötunnin välein
 - Tarkemmat voiteluohjeet ja -aineet pumpun manuaalissa

3. kerros

17. Tarkista tehdasvesi- ja palovesilaitteistojen kunto
 - Paloveden paine oltava yli 5.0 bar
18. Sähkötilan tarkistus
 - Lämpötilan oltava alle 22°C
 - Ilmanvaihtosäädön tarkistus oltava merkityssä arvossaan, kun tilassa oleskellaan. Ilmanvaihto voidaan puolittaa kun tilassa ei oleskella
 - Tarkista silmämääräisesti sähkötilan kunto, ja kuuntele mahdollisia poikkeavia ääniä
 - Tarkista taajuusmuuntajat häiriöiden varalta
19. Tarkista hätäsuihkujenvaraajan toiminta
20. Tarkista saostussäiliön toiminta
21. UF-suodatin



- Tarkista näyttöpäätteeltä laitteiston toiminta, ja mahdolliset hälytykset
- 22. RO-laitteisto
 - Tarkista näyttöpäätteeltä laitteiston toiminta, ja mahdolliset hälytykset
- 23. Omakäyttölämmönsäädin
 - Tarkista kierrätysilmapuhaltimen toiminta
 - Tarkista omakäyttöpiirin kiertovesipumpun toiminta
 - Lämpötila omakäyttöpiirissä +30°C ja tarvittaessa talvella +60°C
 - Omakäyttöpiirin paine oltava 1.0 – 2.5 bar:n välillä. Varoventtiili aukeaa 4.0bar:ssa
- 24. Instrumentti-ilma, ja kaukolämpöveden syöttö
 - Instrumentti-ilman paineen tarkistus. Paineen on oltava yli 6.0 bar
 - Kaukolämpöveden syötössä pesuriin on hyvä varmistaa, että normaalikäytössä palloventtiilit ovat kiinni. Käytetään pesurin täyttöön lämpimällä KL-vedellä kylmästartissa.
- Savukaasupeltien tiivistysilma
 - Tarkista, että tiivistysilman paine on yli 200 Pa ja lämpötila 120°C
 - Tarkista, että suljetuille savukaasupelleille tiivistysilventiilit ovat auki, ja avoimille savukaasupelleille tiivistysilma on kiinni.

Katto, päästömittaustaso ja ulkoalue

Katto

- 25. Tarkistetaan savukanavan ja pellin kunto
 - 26. Tarkistetaan vasemmanpuoleinen päälauhduttimen toiminta
 - 27. Tarkistetaan oikeanpuoleinen Demi-vedeksi lauhduttimen toiminta
 - Tarkistetaan katon yleiskunto, sadeviemäreiden toiminta, ja puhtaus
- Päästömittaustaso, pääsy katolta kulkusillan kautta rappusia pitkin.
- Tarkistetaan laippaliitosten tiiveys silmämääräisesti

Kuukausikierroksen toimenpiteet

Kuukausikierroksen tarkistukset suoritetaan normaali käynnissäpitokierroksen yhteydessä kuun viimeisenä päivänä.

Pohjakerros

- Tarkista ja rekisteröi kemikaalimäärät (Merkkkaus mm. teipillä + pvm, viikoittain/kuukausittain pinnankorkeudet)
- Tarkista lamelliselkeyttimen alaosa ja märkätuhkapumppu 1GNR01AP001
- Tarkista lamelliselkeytin silmämääräisesti vuotojen varalta
 - Käsiventtiilien toiminta



2. kerros

LTO-pumppujen toiminta

- Tarkistetaan pH-mittausten toiminta, säädä virtausta tarvittaessa
- pH-mittausten tarkistusväli 1x kuukaudessa
- 28. Tarkastetaan selkeytin 1GNB10AT001 1x kuukaudessa
 - Tarkistetaan selkeyttimen kurkistusluukun läpinäkyvyys, ja putsataan jos on mahdollista. Kurkistusluukku löytyy 2. kerroksesta selkeyttimen kannesta, LTO putkien ja näyttöpäätteen puoleisesta päädyistä.
 - Veden tulee valua tasaisesti ylivuodosta
 - Jos pinnalla runsaasti kiintoainetta tulee selkeytin tyhjentää

3. kerros

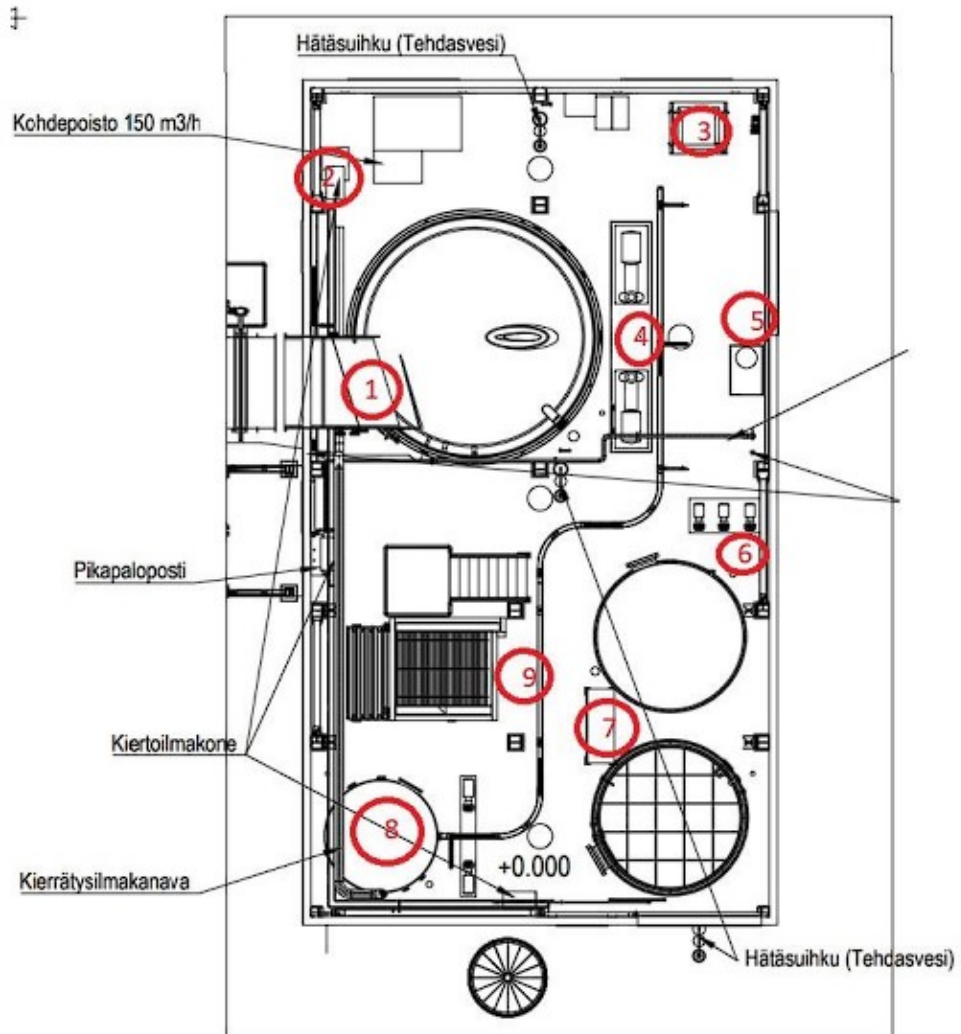
UF-suodatin

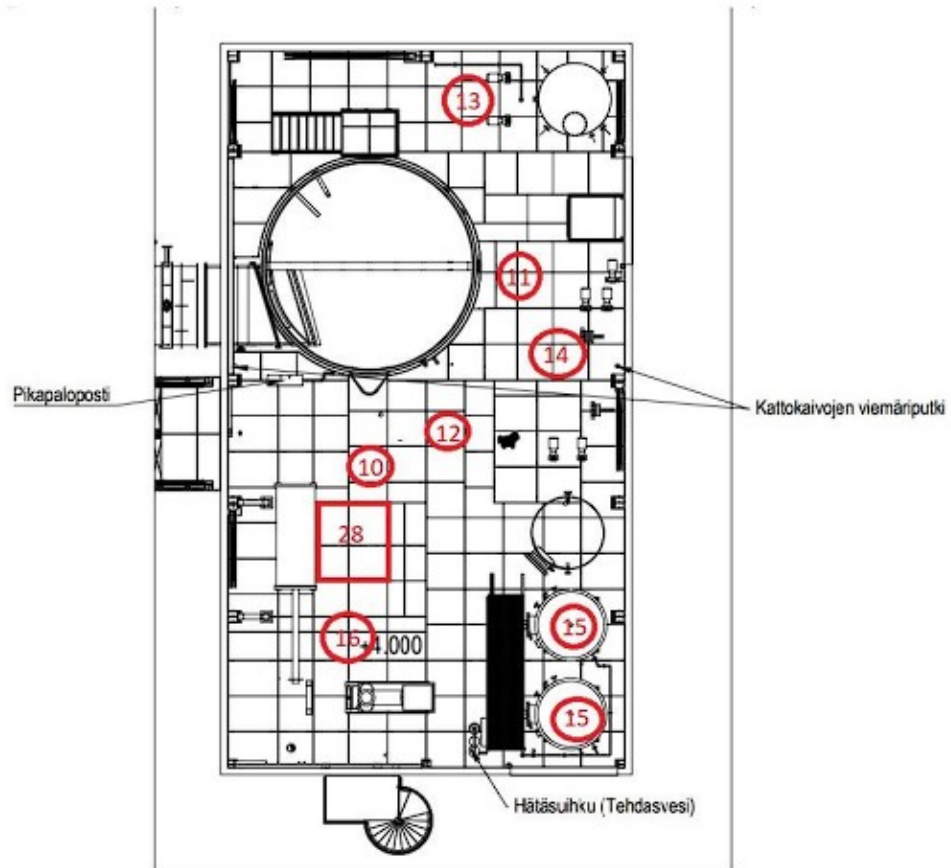
- Tarkista näyttöpäätteeltä laitteiston toiminta, ja mahdolliset hälytykset
- Suoritetaan laitteiston CIP-pesu HyXo:n koulutuksen mukaan. Aluksi pesu 1x kuukaudessa, mutta väliä voidaan pidentää, mikäli laitteiston toiminta näyttää tämän sallivan

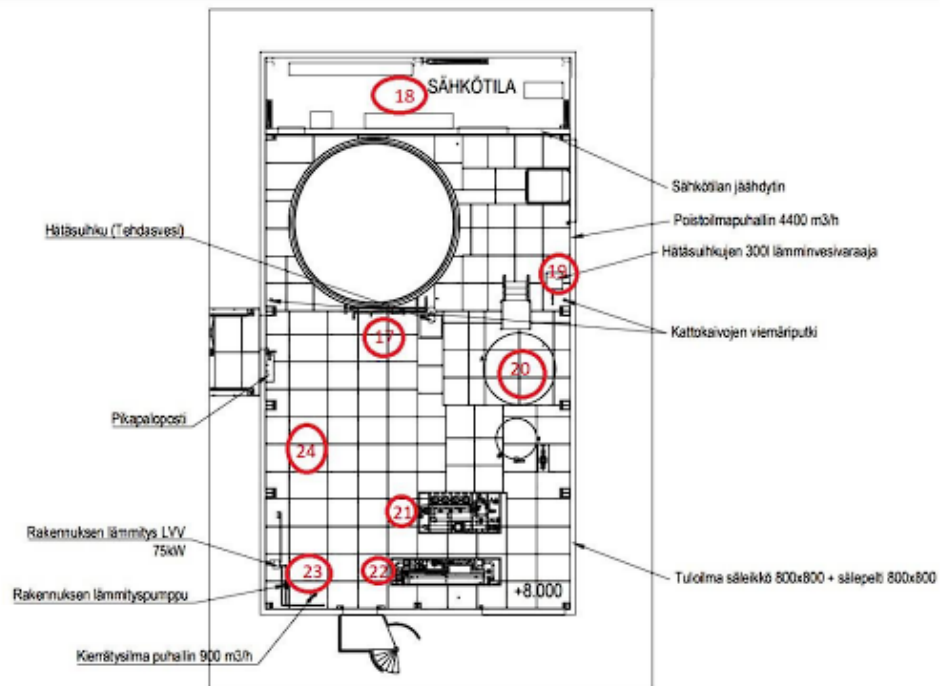
RO-laitteisto

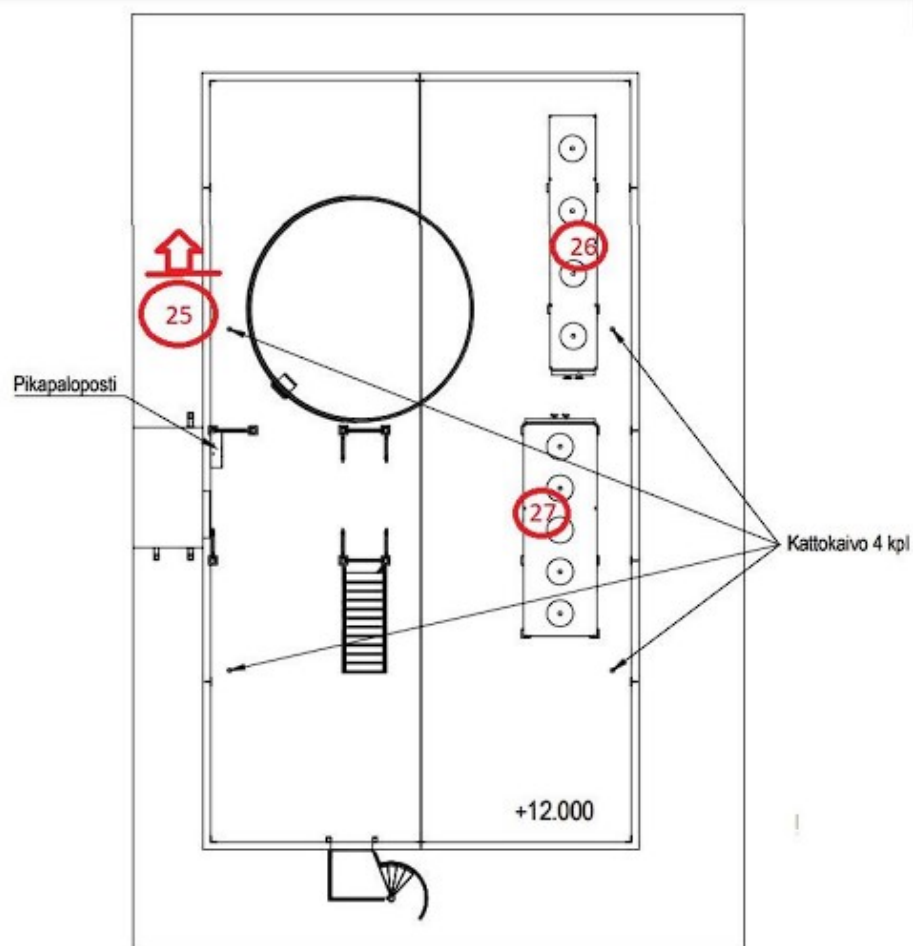
- Tarkista näyttöpäätteeltä laitteiston toiminta, ja mahdolliset hälytykset
- Suoritetaan laitteiston CIP-pesu HyXo:n koulutuksen mukaan. Aluksi pesu 1x kuukaudessa, mutta väliä voidaan pidentää, mikäli laitteiston toiminta näyttää tämän sallivan



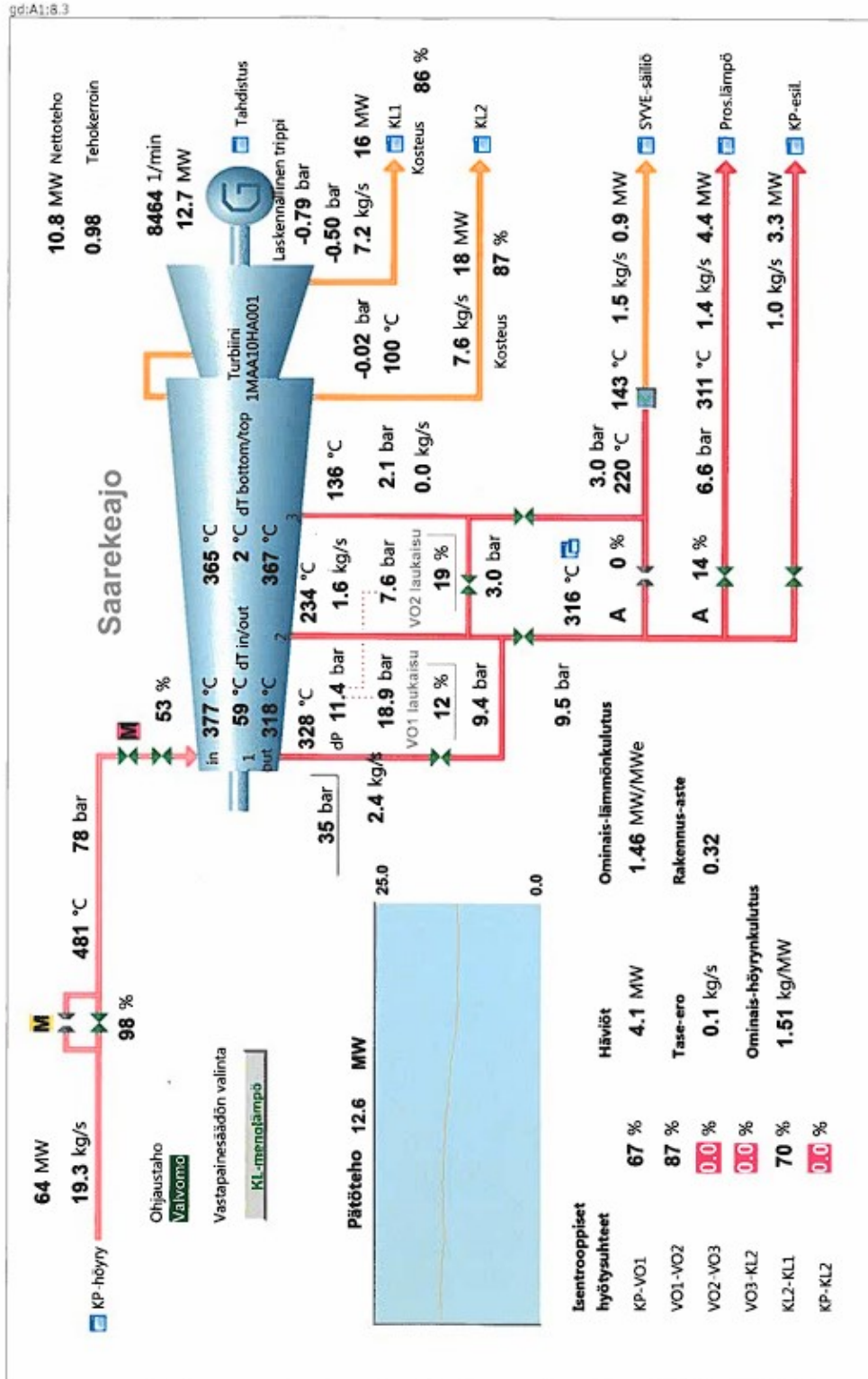








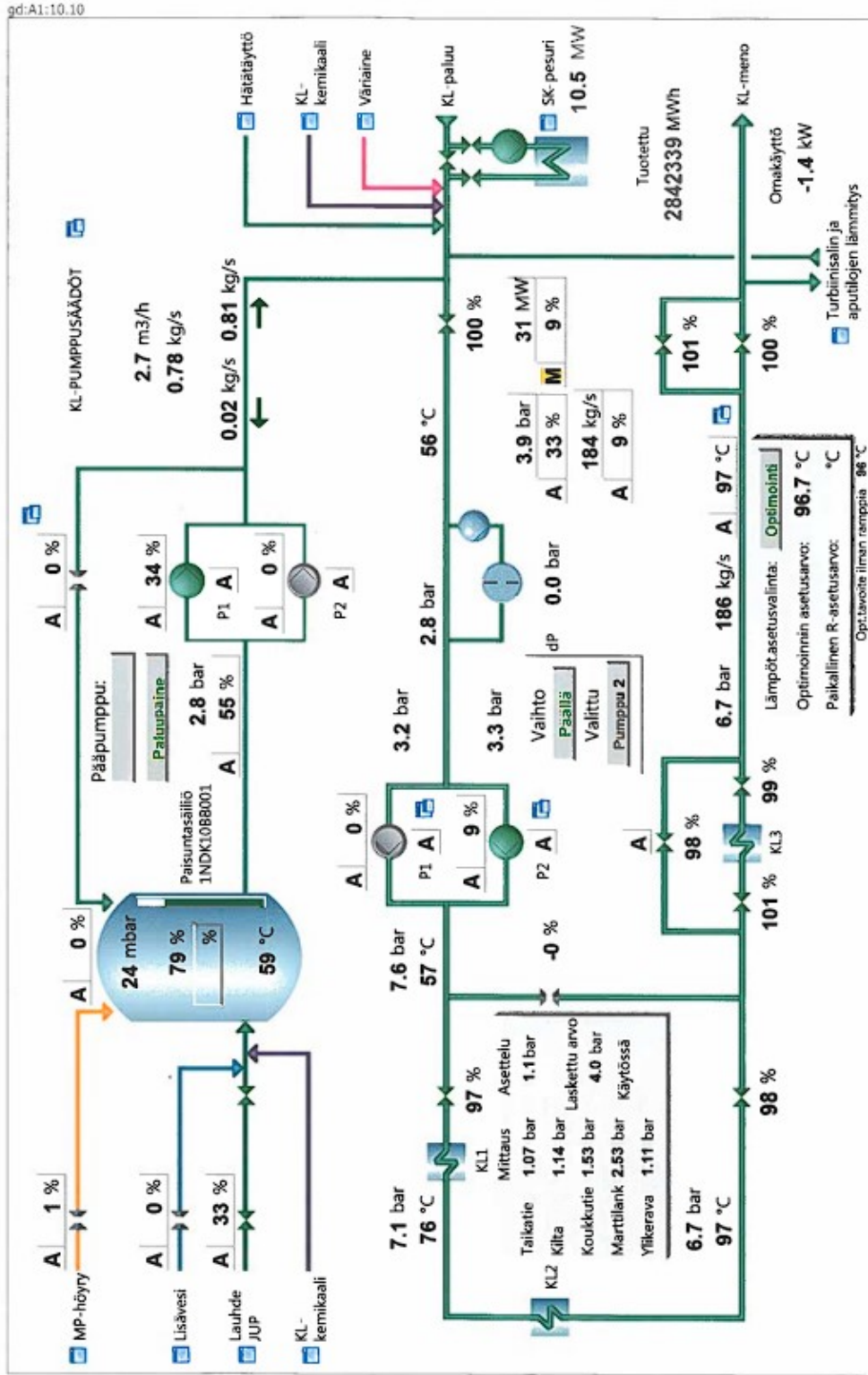
Prosessikaaviot



09.11.22 14:31:11

Turbiinin Suorituskyky

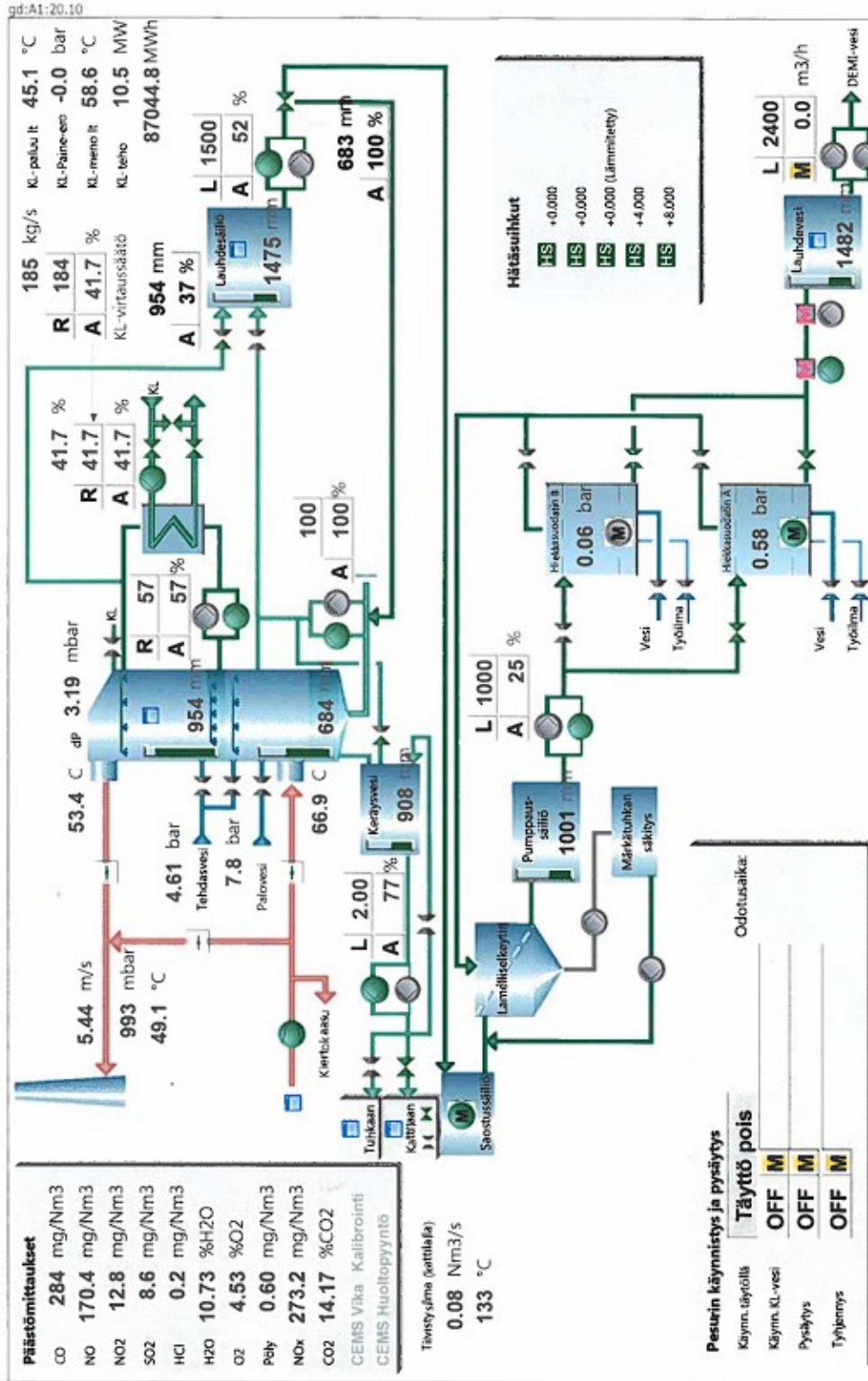
8.3



10.10

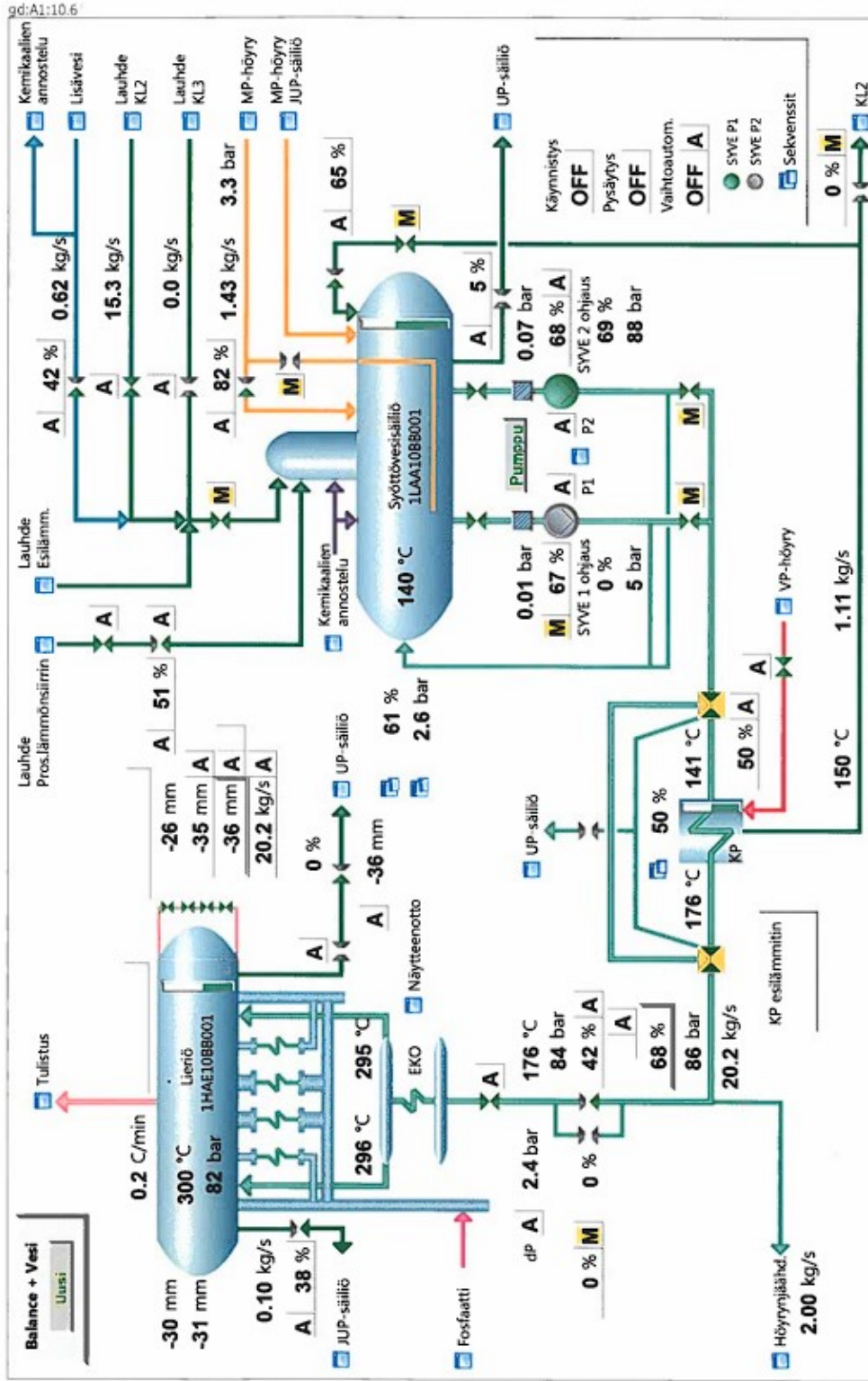
Kaukolämpö

09.11.22 14:31:11



Savukaasupesuri ja lauhde

20.10



09.11.22 14:31:11

Syöttövesi

10.6