SEKUNDÄÄRIENERGIAN HYÖDYNTÄMINEN MODERNISSA BIOTUOTETEHTAASSA VALKAISUN HAPPAMAN SUODOKSEN HAIHDUTUKSESSA: PROSESSITEKNINEN TARKASTELU

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

Energy conversion

2025

Juha Jäkärä

Tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen

Tutkijatohtori Katja Kuparinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energiajärjestelmien tiedekunta

Energiatekniikka

Juha Jäkärä

Sekundäärienergian hyödyntäminen modernissa biotuotetehtaassa valkaisun happaman suodoksen haihdutuksessa: Prosessitekninen tarkastelu

Energiatekniikan diplomityö

2025

72 sivua, 21 kuvaa, 6 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen ja Tutkijatohtori Katja Kuparinen

Avainsanat: metsäteollisuus, kestävä kehitys, energiatehokkuus, sekundäärienergia, vedenkäyttö, biotuotetehdas, haihdutus

Metsäteollisuus on ollut Suomen tärkeimpiä teollisuuden aloja yli sata vuotta. Tehtaat työllistävät tuhansia ihmisiä, sekä tuottavat sähköä ja lämpöä pääasiallisten tuotteiden ohella. Tuotantoprosessit ovat energiaintensiivisiä ja vettä kuluu paljon jäähdytyksiin sekä prosessien eri vaiheissa. Vesien mukana vesistöön päätyy suuria määriä lämpöenergiaa.

Valkaisu on vielä moderneillakin tehtailla merkittävä jätevesien lähde. Alkalisia pesusuodoksia voidaan käyttää uudelleen ja kierrättää, mutta happamille suodoksille ei ole jatkokäyttöä. Happaman suodoksen kierrätys on haastavaa niihin liuenneiden aineiden, kuten suolojen ja metallien takia.

Jos hapanta suodosta voitaisiin haihduttaa tehokkaasti, jätevedenpuhdistamolle johdettavan jakeen tilavuusvirta pienenisi. Sekundäärilämmön hyödyntäminen haihdutuksessa parantaisi tehtaan energiatehokkuutta. Haihdutuksessa syntyvät lauhteet ovat melko puhtaita, joten haihdutettava neste voitaisiin hyödyntää uudelleen esimerkiksi valkaisussa pesuvetenä.

Tässä työssä haihdutukseen kehitetään erilaisia prosessikytkentöjä. Kytkentöjen komponenteista lupaavimmilta vaikuttavat MVR-haihdutin ja jäähdytystorni. Ne ovat kompakteja ja yksinkertaisia laitteita, joilla suodosta saadaan haihdutettua ja jäähdytettyä tehokkaasti.

Tehokkaimmilla kytkennöillä saadaan haihdutettua suodoksen vedestä puolet. Suunnitellut sekundäärienergialähteet osoittautuivat kuitenkin liian viileiksi, jotta niitä voitaisiin tehokkaasti hyödyntää haihdutuksessa. Siksi sähkö on olennainen resurssi haihdutuksen toteuttamiseksi. Sähköä kuluu kaikissa kytkennöissä, joissain suuriakin määriä. Sekundäärilämpöä voidaan hyödyntää suodoksen uudelleenlämmityksessä haihdutusyksiköiden välissä.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Energy Technology

Juha Jäkärä

Utilization of secondary energy in evaporation of acidic filtrate from the bleaching plant of a modern bioproduct mill: A process engineering review

Master's thesis

2025

72 pages, 21 figures, 6 tables and 1 appendix

Examiners: Professor Esa Vakkilainen and Post-doctoral researcher Katja Kuparinen

Keywords: forest industry, sustainable development, energy efficiency, secondary energy, water usage, bioproduct mill, evaporation

Forest industry has been one of the most important fields of industry for over a hundred years. The mills employ thousands of people and produce electricity and heat in addition to the main products. The processes are energy intensive and require lots of water. Water is used as a cooling agent and in the processes. Lots of heat end up into the wild in the waters.

Even in the modern mills bleaching is still a significant source of effluent. The alkali wash filtrates can be recycled and reused. Whereas the acidic filtrates are not reused. They are difficult to reuse due to the dissolved salts and metal ions.

If the acidic filtrate could be evaporated the effluent flow to the effluent treatment plant could be reduced. Utilizing secondary energy as a heat source in the evaporation would decrease the primary energy demand and increase energy efficiency. The resulting condensates are rather clean so the water evaporated could be collected. The condensates could be reused for example, in the washing stages of bleach plant.

In this thesis several process connections are developed. Of the components used in the connections, an MVR-evaporator and cooling tower seem the most promising. They are compact and simple yet quite effective. With them the filtrate can be evaporated and cooled efficiently.

The most efficient connections are capable of evaporating half of the water in the filtrate. The planned secondary heat sources turned out to be too cool to provide great effect in the evaporation. This is why electricity is an essential resource to achieve effect in the system. Electricity is required in each of the invented connections. Some demand more of it, some less. Secondary heat could be used mainly in reheating of the filtrate between evaporators.

KIITOKSET

Onpahan ollut kokemus tämä yliopisto. Matkan varrelle on mahtunut tuhansia töitä, valvottuja öitä, viisi vuotta täynnä ~~ylimääräistä härväämistä~~ tiukkaa opiskelua, neljä missattua Wappua, kolme asuntoa, kaksi työnantajaa ja yksi maailmanlaajuinen pandemia. Kaikesta tästä ja paaaaljon muusta on kuitenkin suoriuduttu. Ja kaikki se kulminoituu tähän työhön. Tämä työ on se, johon lähes 18 vuoden koulu-urani päättyy, ainakin toistaiseksi.

Ja kiitos siitä tulee antaa kaikille mukana olleille. Iso kiitos Lappeenrannan-Lahden tekninen yliopisto LUT-yliopistolle, jonka ansiosta Lappeenrantaan päädyin. Kiitos myös kaikille assareille, opettajille ja professoreille. Erityisesti Esa Vakkilaiselle, joka tätä diplomityötä minulle tarjosi ja sen minulle ohjasi. Erityiskiitoksen ansaitsevat myös kaikki mielenkiinnolla työssä mukana olleet henkilöt Andritzilta ja Metsältä. Etenkin Kari Ala-Kaila, jonka ajatus tutkimus oli ja joka mielenkiinnolla seurasi työn etenemistä.

Kaikkein suurin kiitos kuuluu kuitenkin perheelleni ja ystävilleni. Kiitos vanhemmilleni, jotka ovat jaksaneet tukea ja avittaa, kun on tuntunut siltä, ettei mikään etene. Ja silloin, kun eteni liian kovaa. Ja sitten vielä ne kaverit. Ne kaverit, joita en olisi voinut kuvitellakaan saavani, kun vielä yksin fuksikursseja pähkäilin. Nimittäin ”Laksurymhä” on jotain erityistä.

Eipä sitä muut varmaankaan ymmärrä, sillä emme mekään ymmärtäneet. Välillä toisiamme, mutta useimmiten tehtäviä. Kuitenkin muutaman tunnin pöhinän jälkeen, kun kopin ilmapiiri oli niin tiivis, että siihen pystyi piirtämään käyriä, olimme kaikki ymmärtäneet täysin mistä oli kyse. Joskus tulos oli kuitenkin yks Jaska Watti. Silti vapaa-ajallakin muistettiin osoittaa aina vahvaa osaamista. Ja useimmiten myös jaksamista.

Vanhemman tieteenharjoittajan arvonimi jää minulta saavuttamatta, sillä kovista yrityksistä huolimatta valmistuminen uhkaa. Porukkamme jälkipuoliskolla, mutta kuitenkin. Älkää muut huoliko, kyllä se siitä. Nyt on aika jatkaa matkaa Eforttikäyrän™ suuntaisesti.

Lappeenrannassa 4.2.2025

Juha Jäkärä

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

a_n	kerroin	
B	kerroin	g/kg
C_{pg}	ilman ominaislämpökapasiteetti	J/ (kg K)
C_{pw}	veden ominaislämpökapasiteetti	J/ (kg K)
E	energia	J
h	entalpia	kJ/kg
h_{we}	veden haihtumisenergia	kJ/kg
m	massa	kg
P	teho	W
p	paine	bar, Pa
p_w	vesihöyryn paine	Pa
p_{ws}	kylläisen vesihöyryn paine veden pinnalla	Pa
q_m	massavirta	kg/s
Rh	suhteellinen kosteus	
s	entropia	J/K
T	lämpötila	ºC, K
x	sekoitussuhde	g/kg

Kreikkalaiset

Δ	muutos	
η	hyötysuhde	
ρ	tiheys	kg/m^3

Alaindeksit

0	ensimmäinen
1	toinen, sisään
2	ulos
i	ilma
K	Kelvin
max	maksimi
min	minimi
op	vetyperoksidi
p	primääri
s	suodos, sekundääri

Lyhenteet

ADt	Ilmakuiva tonni (engl. Air dry tonne)
AOX	Aktiivihiileen absorboituvat orgaaniset halogeenit (engl. Adsorbable organic halogens)
BOD	Biologinen hapenkulutus (engl. Biochemical Oxygen Demand)
COD	Kemiallinen hapenkulutus (engl. Chemical Oxygen Demand)
D	Dioksidi
DCA	Jälkiasteisuus (engl. Drain Cooler Approach)
ECF	Kloorikaasuton valkaisu (engl. Elemental Chlorine Free)
ELY	Elinkeino, liikenne ja ympäristö
EOP	Valkaisuvaihe, jossa on alkalinen uutto, happi ja vetyperoksidi (engl. Alkaline Extraction, Oxygen, Hydrogen Peroxide)
MVR	Termokompressorihaihdutin (engl. Mechanical Vapor Recompression)
PO	Paineistettu vetyperoksidivaihe (engl. Pressurized Hydrogen Peroxide)
TCF	Klooriton valkaisu (engl. Total Chlorine Free)
TOCl	Orgaaniset klooriyhdisteet (engl. Total Organic Chlorine compounds)
TTD	Asteisuus (engl. Terminal Temperature Difference)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboli- ja lyhenneluettelo

1 Johdanto ... 10
2 Sellutehtaasta biotuotetehtaaksi ... 12
2.1 Sulfiitti ja sulfaatti ... 12
2.2 Tuotevalikoiman laajeneminen ... 14
2.3 Tehtaiden päästökehitys ... 16
2.4 Energiaa myyntiin ... 18
3 Moderni biotuotetehdas ... 20
3.1 Energiaa ylimäärin ... 20
3.2 Ympäristö asettaa reunaehdot toiminnalle ... 20
3.3 Biotuotteet ... 22
3.4 Fossiilittomuus ... 23
4 Valkaisu ... 25
4.1 Nykyiset valkaisuprosessit ... 25
4.1.1 ECF-Valkaisu ... 26
4.1.2 TCF-Valkaisu ... 28
4.2 Valkaisun vedet ja niiden käsittely ... 28
4.2.1 Valkaisun pesuvedet ... 29
4.2.2 Valkaisun jätevedet ... 31
5 Haihdutuslaitteistot ... 33
5.1 Höyryhaihdutus ... 33
5.1.1 Höyryhaihdutusyksikkö ... 33
5.1.2 Sarjahaihduttamo ... 34
5.1.3 Pintalauhdutin ... 35
5.2 Flash-haihdutus ... 36
5.2.1 Flash-haihdutusyksikkö ... 36

5.2.2 Flash-sarjahaihdutin ... 37
5.3 Jäähdytystorni ... 38
5.4 MVR-haihdutin ... 39
6 Valkaisun happaman suodoksen haihduttaminen ... 40
6.1 Valkaisusta poistuva suodos ... 40
6.1.1 Suodoksen laatu ... 41
6.2 Sekundäärienergian lähteet ... 41
6.2.1 Sekundäärienergian reunaehdot ... 42
6.3 Haihdutus ... 43
6.3.1 Valitut haihdutuslaitteet ... 44
7 Laskennallinen mallinnus ... 46
7.1 Yksinkertaistukset ja oletukset ... 46
7.2 Komponenttien laskenta ... 47
7.2.1 Yleispätevät taseet ... 47
7.2.2 Jäähdytystorni ... 48
7.2.3 MVR-Haihdutin ... 51
7.2.4 Flash-haihdutin ... 52
7.2.5 Lämmönvaihtimet, sekoittimet ja jakajat ... 52
8 Prosessikytkennät ... 54
8.1 Suorat kytkentävaihtoehdot ... 54
8.2 Kytkentävaihtoehdot kierrätyksellä ... 57
8.3 Yhteenvetotaulukko kytkentöjen tehokkuuksista ... 60
9 Johtopäätökset ... 61
9.1 Valintaperusteita ... 62
9.2 Epävarmuustekijät ... 64
9.3 Jatkotutkimuskohteet ... 65
10 Yhteenveto ... 66
Lähteet ... 67

Liitteet

Liite 1. Kehitetyt prosessikytkennät

Kuvaluettelo

Kuva 1 Kemiallisen sellun tuotantomääriä Suomessa vuosilta 1900–2021. (Häggblom & Ranta 1966 s. 66 ja 152.) (Metsäntutkimuslaitos 2012.) (Tilastotietokanta 2021.)

Kuva 2 Metsäteollisuuden kiintoaine- ja BOD7-päästöt vesistöihin 1950–2023. (Tilastot 2023.)

Kuva 3 Metsäteollisuuden ilmapäästöjä 1992–2023. (Tilastot 2023.)

Kuva 4 Metsäteollisuuden sähkön tuotanto ja kulutus 1996–2022. (Tilastot 2023.)

Kuva 5 Metsä Groupin biotuotetehdaskonseptin pää- ja sivuainevirrat. (Biotuotetehdaskonsepti n.d.)

Kuva 6 Esimerkki ECF-valkaisusta. (KnowPulp 2024.)

Kuva 7 Pesuvesien kierto valkaisun vaiheesta toiseen. (KnowPulp 2024.)

Kuva 8 Yksinkertaistettu kaaviokuva haihdutusyksiköstä.

Kuva 9 Yksinkertaistettu kaaviokuva kolmen haihdutusyksikön sarjahaihduttamosta.

Kuva 10 Yksinkertaistettu kaaviokuva pintalauhduttimesta.

Kuva 11 Yksinkertaistettu kaaviokuva flash-haihdutinyksiköstä.

Kuva 12 Yksinkertaistettu kaaviokuva flash-sarjahaihduttamosta.

Kuva 13 Yksinkertaistettu kaaviokuva jäähdytysvesitornista.

Kuva 14 Yksinkertaistettu kaaviokuva MVR-haihduttimesta.

Kuva 15 Vaisalan vuokaavio märkälämpötilan laskemiseksi. (Vaisala 2021.)

Kuva 16 Kytkentä 7A.

Kuva 17 Kytkentä 10A.

Kuva 18 Kytkentä 0.

Kuva 19 Kytkentä 7B.

Kuva 20 Kytkentä 10B.

Kuva 21 Kytkentä 9B.

Taulukkoluettelo

Taulukko 1 Klooriyhdisteitä valkaisun jätevesissä. (Dence & Reeve 1996.)

Taulukko 2 Valkaisun happaman suodoksen ominaisuuksia.

Taulukko 3 Sekundäärienergian reunaehdot.

Taulukko 4 Jäähdytystornin tuloilman arvoja.

Taulukko 5 Kylläisen vesihöyryn paineen eli yhtälön 4 kertoimet a0-a6. (Vaisala 2021.)

Taulukko 6 Kytkentöjen tehokkuustaulukko.

1 Johdanto

Metsäteollisuus on ollut Suomen tärkeimpiä teollisuuden aloja yli sata vuotta, ja tehtaat ovat tuttu näky Suomessa, jopa kaupunkiympäristössä. Tehtaat työllistävät suoraan ja välillisesti tuhansia ihmisiä, sekä tuottavat sähköä ja lämpöä muille käyttäjille pääasiallisten tuotteiden ohella. Tuotantoprosessit ovat energiaintensiivisiä ja vettä kuluu suuria määriä jäähdytyksiin sekä prosessien eri vaiheissa.

Tehtailla on kuitenkin myös varjopuolensa. 1900-luvun alkupuoliskolla tehtaiden päästöt ilmaan ja vesistöön olivat suuria. Ne aiheuttivat ongelmia paikallisiin vesistöihin ja ilmanlaatuun. Vuosisadan loppupuoliskolla asiat alkoivat muuttua ja etenkin 1970-luvun jälkeen tehtaiden ympäristöystävällisyys on parantunut suurin harppauksin. Vuosituhannen vaihteeseen mennessä päästöt olivat laskeneet merkittävästi, kun tehtailla investoitiin uusiin puhdistusjärjestelmiin ympäristölupavaatimusten täyttämiseksi. Sittemmin parannukset ovat kohdistuneet pienempiin kohteisiin, jolloin parannukset ovat olleet maltillisempia.

Sellun valmistuksen olennainen osa on mustalipeän polttaminen. Polttaminen tapahtuu soodakattiloissa. Samalla tuotetaan suuri määrä lämpöenergiaa, jota voidaan käyttää sähkön tuottamiseen. Korkeat lämpötilat vaativat paljon jäähdytystä. Puhtaat jäähdytysvedet on tyypillisesti johdettu sellaisenaan vesistöihin, jolloin vesistöjen lämpötilat ovat paikallisesti nousseet. Aiemmin asia ei ole juurikaan vaatinut suurempia toimenpiteitä, mutta viime aikoina vesistön lämpökuormitus ja raakaveden kulutus on noussut vahvasti esille ympäristöluvituksessa.

Samalla kun ympäristöluvat ja päästörajat ovat tiukentuneet, on tehtaiden kapasiteetit ja tehokkuudet kasvaneet. Nykyisin tehtaiden kapasiteetit ovat kymmenkertaisia 1900-luvun puoliväliin nähden. Samalla tuotevalikoima on laajentunut. Sellutehtaat eivät ole enää vain sellutehtaita, vaan biotuotetehtaita, joissa puuraaka-aine käytetään kokonaan monien erilaisten tuotteiden valmistuksessa.

Tehtaiden ympäristökuormituksen pienentämiseksi tulee niiden päästöjä vähentää ja energiankäyttöä tehostaa. Suurimpia yksittäisiä jäteveden lähteitä moderneilla tehtailla on massanvalmistuksen valkaisuvaihe eli valkaisimo ja sieltä tuleva hapan suodos, jota on haastavaa hyödyntää uudelleen.

Valkaisun suodoksen haihdutusta on tutkittu jo aiemmin. Tutkimukset ovat lähestyneet ongelmaa kemian kannalta. Niissä on tutkittu suodoksen käyttäytymistä haihdutettaessa, sekä suodoksesta saatavien lauhteiden ja konsentraattien ominaisuuksia. Sekundäärienergian hyödyntämistä ei ole kovin laajasti tutkittu, mutta virtoja on analysoitu ja niille on pohdittu erilaisia käyttökohteita. Sekundäärienergian hyödyntämistä suodoksen haihdutuksessa ei ole tiettävästi aiemmin tutkittu.

Tässä diplomityössä tutkitaan laskennallisesti, miten valkaisun hapanta suodosta voitaisiin haihduttaa ja miten paljon sekundäärienergiaa voitaisiin hyödyntää haihdutuksessa. Tutkimuksessa tavoitteena on keksiä keinoja hyödyntää sekundäärienergiaa siten, että jäteveden ja kuumien tehtaalta poistuvien vesien määrä ja lämpötila laskisi. Tällä tavoin voitaisiin pienentää vesistöön kohdistuvaa kuormitusta. Työssä kehitetään useita erilaisia prosessikytkentöjä lämmön talteenottamiseksi ja suodoksen haihduttamiseksi. Prosessikytkentöjä suunniteltaessa lämmönsiirtoa on yksinkertaistettu eikä taloudellista näkökulmaa ole huomioitu. Todellisuudessa virtausmäärät vaihtelevat vuodenaikojen ja tuotannon mukaan, joten laskennassa on käytetty keskimääräisiä arvoja.

Työn kirjallisuusosuudessa käydään läpi Suomen selluteollisuuden historiaa ja tehtaiden kehityskaarta. Sen jälkeen esitellään nykytehtaiden erityispiirteitä ja nykytrendejä. Tämän jälkeen esitellään sellumassan valkaisimon toimintaa, jonka jälkeen käydään läpi erilaisia haihdutuslaitteita ja niiden toimintaperiaatteita. Laskentaosuuden alussa esitellään tutkimuksen reunaehtoja, jonka jälkeen käydään läpi tehdyt oletukset ja laskelmat. Lopuksi esitellään kehitetyt prosessikytkennät ja arvioidaan niiden tehokkuutta.

2 Sellutehtaasta biotuotetehtaaksi

Metsäteollisuuden historia Suomessa alkaa jo 1600-luvulta, mutta merkittäväksi teollisuudenalaksi se alkoi kasvamaan vasta 1860-luvulla (Sahakonttori 2020).

Nykyisen Suomen alueella ensimmäinen kemiallista sellua tuottanut tehdas oli Valkeakoskella (UPM juurilta lehvästöön 2019). Valkeakosken paperitehtaalla kiinnostuttiin uudesta kuitumateriaalista vuonna 1876, kun Saksasta saapui erä natronmenetelmällä valmistettua selluloosaa. Uudesta materiaalista innostuttiin, kun havaittiin, että sillä voitaisiin korvata kokonaan silloin käytetty lumppukuitu paperin valmistuksessa. Vuoden 1878 loppupuolella alkoivat suhdanteet elpyä ja seuraavana vuonna Valkeakoskella tehtiin päätös rakentaa oma selluloosatehdas. Se rakennettiin 1873 käynnistyneiden Walkiakoski Aktiebolagin puuhiomon ja paperitehtaan yhteyteen. Tehtaassa aloitettiin soodaselluloosan valmistus vuonna 1880 (Aamulehti 1932). (Tuuri 1999.)

2.1 Sulfiitti ja sulfaatti

Kemiallista sellua tuotetaan keittämällä puuhaketta korkeassa lämpötilassa ja paineessa. Prosessissa käytetään kemikaaliliuosta erottamaan puukuidut hemiselluloosasta ja ligniinistä. Erottamalla ligniini ja hemiselluloosa saavutetaan parempia massan lujuusominaisuuksia mekaanisiin massanvalmistusmenetelmiin verrattuna, joissa ne jäävät massaan.

Aikoinaan kemiallisen massan tuotantoprosessit perustuivat usein sulfiittimenetelmään. Vuosina 1884–1886 Suomeen perustettiin kolme sulfiittiselluloosatehdasta, Kymiin, Kuusankoskelle ja Nokialle (Häggblom & Ranta 1966). Sulfiittimenetelmässä keittokemikaalina käytetään ylimääräistä rikkidioksidia (SO_2) sisältävää kalsiumbisulfiittiliuosta ($Ca(HSO_3)_2$), jonka pH on noin 1,5. Kationina voidaan käyttää kalsiumin sijasta myös magnesiumia, ammoniumia tai natriumia (Häggblom & Ranta 1966). Käytetyt keittokemikaalit toimivat laajalla pH-alueella ja sulfiittikeitosta onkin olemassa muutama eri variaatio perustuen käytettyyn pH-tasoon ja keittoaikaan. Eri tavoin tuotettu massa vaihtelee muun muassa lujuusominaisuuksiltaan ja sävyltään. Tyypillisesti sulfiittimenetelmä soveltuu vähän uuteaineita sisältäville pehmeille puulajeille, kuten kuuselle. Menetelmän rajoitteena onkin, mitä

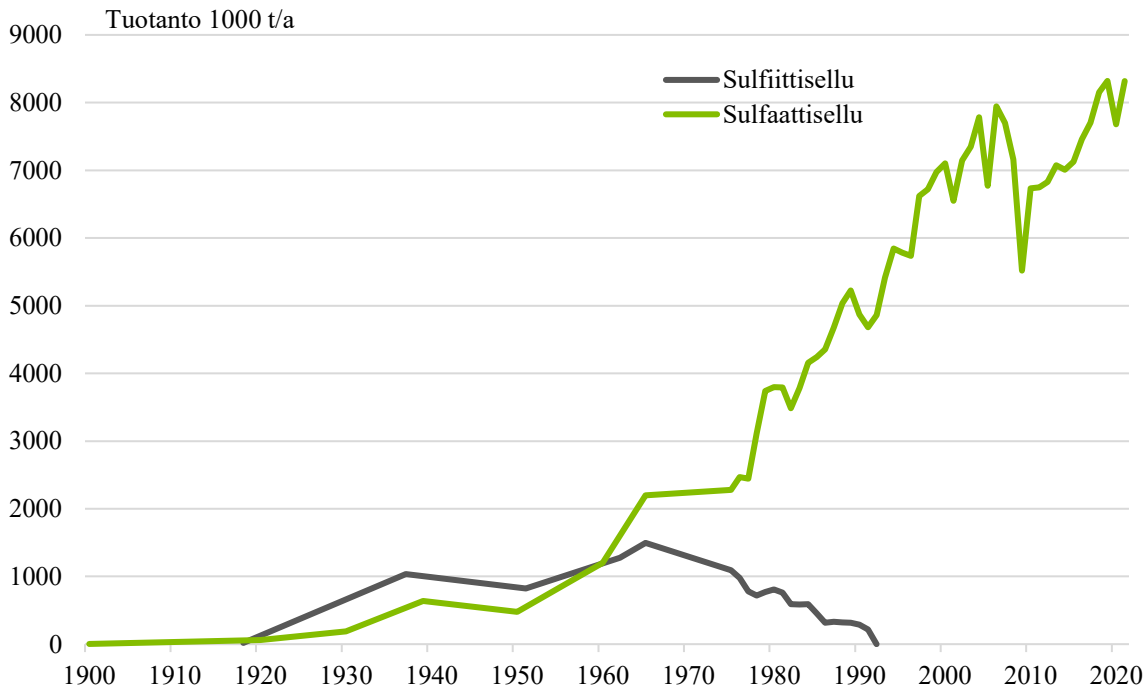
puulajeja voidaan käyttää raaka-aineena. Suurin ongelma sulfiittikeitossa on kuitenkin kemikaalikulutus. Kemikaaleja ei saada talteen sulfiittikeiton jäteliemistä, joten uusi keittoerä vaatii aina uudet kemikaalit. Lisäksi sellutehtaiden jätevedet laskettiin alkuaikoina suoraan vesistöihin, jolla oli paljon negatiivisia vaikutuksia ympäristöön. Myöhemmin jäteliemiä ruvettiin ottamaan talteen, ja niiden sisältämää vettä haihdutettiin ennen kuin liemi poltettiin, jolla saatiin energiaa prosessiin. Vaihtoehtoisesti jäteliemiä voitiin käyttää tienparannusaineena, sulfiittispriin tai hiivan valmistuksessa (Häggblom & Ranta 1966). Menetelmän rajoitteet havaittiin jo vuosisadan vaihteessa. Vaihtoehto sulfiittisellulle on sulfaattisellu. (Mboowa 2024.)

Valkeakosken tehtailla tehtiin investointeja 1880-luvulla. Vanhentunut Dreselin toinen keittomenetelmä korvattiin kolmannella menetelmällä. Valkeakoskella siirryttiin vuonna 1886 korvaamaan keittokemikaalina toiminutta soodaa natriumsulfaatilla, jolla saatiin vähennettyä kemikaalihäviöitä. Valkeakosken sellutehdas on siis Suomen vanhin sulfaattiselluloosatehdas ja vanhin kemiallista massaa tuottanut selluloosatehdas ylipäänsä. Seuraavat uudet sulfaattimenetelmää käyttävät tehtaat rakennettiin vasta 1900-luvun alussa (Häggblom & Ranta 1966). (Tuuri 1999).

Sekä sulfiitti-, että sulfaattimenetelmä ovat kemiallisia massantuotantokeinoja. Kummassakin massaa pidetään kemikaaliliuoksessa korkeassa paineessa ja lämpötilassa, mutta eroja sulfaattikeiton ja sulfiittikeiton välillä on useita. Ensimmäinen selkeä ero on keittokemikaaleissa ja niiden myötä pH-tasossa. Sulfiittikeitto tapahtuu matalalla pH-tasolla ja on siten hapan prosessi. Sulfaattikeitto puolestaan tapahtuu korkeassa pH-tasossa eli se on alkalinen prosessi. Sulfaattikeitossa käytetään kalsiumbisulfiitin ja rikkioksidin sijasta keittokemikaalina valkolipeää, jossa tärkeimmät kemikaalit ovat natriumhydroksidi (NaOH) ja natriumsulfidi (Na_2S). Vaikka sulfaattikeitossa saanto on keskimäärin hieman matalampi (40–48 %) kuin sulfiittimenetelmällä (45–54 %), on sillä silti muita etuja. (Häggblom & Ranta 1966).

Sulfaattikeitto soveltuu koville sekä pehmeille puulajeille. Tämän takia se on yleistynyt ja kasvanut maailman yleisimmäksi tavaksi valmistaa sellua. Sulfaattikeitolla saavutetaan myös parempia sellun lujuusominaisuuksia, eivätkä keittoajat ole yhtä pitkiä. Sulfiittisellusta voidaan valmistaa lujia pakkauskartonkeja, vaikkapa sementtisäkeiksi (Tikka & Mantela & Eerola 2022). Tärkeä etu on myös keittokemikaalien kierrätys. Kierrätyksen ansiosta samoja kemikaaleja voidaan käyttää uudelleen ja säästää huomattavasti kemikaalikuluissa. Käytetty keittolipeä eli mustalipeä sisältää kemikaalien lisäksi puusta irronnutta orgaanista ainetta,

kuten ligniiniä, hemiselluloosaa ja uuteaineita, kuten pihkaa. Lipeän keitto-ominaisuuksien palautusprosessi alkaa polttamalla. Mustalipeän palaessa orgaaninen aines palaa ja erottuu kattilan pohjasta ulos valuvista sulista suoloista. Suolat ohjataan kaustistamolle, jossa palanut mustalipeä eli viherlipeä kaustisoidaan valkolipeäksi. Siten sen ligniininerotuskyky palautetaan. Polttamisen ohessa tuotetaan suuria määriä höyryä, jota voidaan hyödyntää keitossa ja sähkön tuotannossa. Näin prosessista saadaan entistäkin kannattavampi. 1800-luvun lopussa sulfiitti- ja sulfaattimenetelmät kilpailivat suosiosta, mutta 1950-luvun jälkeen sulfaattimenetelmä osoittautui paremmaksi keinoksi ja ohitti tuotantomäärissä sulfiittimenetelmän (kuva 1). Nykyisin Suomessa ei valmisteta enää sellua sulfiittimenetelmällä. (Metsäntutkimuslaitos 2012). (Mboowa 2024)



Kuva 1 Kemiallisen sellun tuotantomääriä Suomessa vuosilta 1900–2021. (Häggblom & Ranta 1966 s. 66 ja 152.) (Metsäntutkimuslaitos 2012.) (Tilastotietokanta 2021.)

2.2 Tuotevalikoiman laajeneminen

Sulfiittikeiton jäteliemestä valmistettiin lähinnä sulfiittispriitä. Tälläkin saralla sulfaattikeitto on parempi, sillä mustalipeästä saadaan kemikaalit tehokkaasti talteen ja niistä voidaan erottaa orgaanisia jakeita jatkojalostukseen. (Tikka & Mantela & Eerola 2022.)

Enso-Gutzeitin kiinnostus kemialliseen metsäteollisuuteen on nimenomaisesti sulfaattikeiton ansiota. Sulfaattikeitossa muodostuvasta jäteliemestä, mustalipeästä, saatiin kemikaalit talteen. Liemeen liuenneet rasva- ja hartsihapot saatiin myös talteen. Seisovan mustalipeän päälle erottuu raakamäntysuopaa. Raakamäntysuopa on siten helppoa erottaa mustalipeästä ylikaadattamalla se pois säiliön nestepinnalta. Erottamisen jälkeen siitä voidaan jalostaa hartsiöljyä. Kotkan tehtaiden sivutuoteosaston johtaja, insinööri Alfons Hellström omisti juoksevan hartsin tislauspatentin, jonka mukaan Kotkassa ryhdyttiin jalostamaan raakasuopaa 1910-luvulla. Hartsiöljystä jatkojalostettiin mäntypikeä ja mäntyöljyä. Hellströmiä pidetäänkin mäntyöljyn keksijänä (Tikka & Mantela & Eerola 2022). Mäntyöljystä voitiin valmistaa kaikille tuttua mäntysuopaa. Mäntysuovasta kehittyi 1920-luvun puolivälissä Enso-Gutzeitin tärkein puukemian tuote. Kotkan tehtaiden sivutuoteosaston mäntyöljy ja etenkin siitä valmistettu mäntysuopa menestyivät erittäin hyvin. Mäntysuovan kysyntä kasvoi joinain vuosina niin suureksi, että mäntyöljyn tuotantokapasiteetin nostoista huolimatta lähes kaikki kului mäntysuovan valmistukseen. Mäntysuovan ja muiden pidemmälle jalostettujen tuotteiden myynti ulkomaille tyssäsi tullimaksuihin, mutta raaka-aineiksi luokiteltuja tuotteita myytiin parhaillaan jopa yli 15 maahan. Asiakkaita löytyi jopa Australiasta. Parhaimpina vuosina sivutuoteosaston bruttovoitot olivatkin jopa suuremmat kuin tehtaan sellutuotannon. (Ahvenainen 1992.)

Sittemmin mäntysuovan suosio on hiipunut ja suurin osa mäntyöljystä menee biodieselin raaka-aineeksi, mutta suopaa valmistetaan yhä jossain määrin. Raakamäntyöljystä voidaan jalostaa myös raaka-aineita esimerkiksi kosmetiikkaan. Mustalipeää haihdutettaessa haihtuvia nesteitä pystytään myös jatkojalostamaan. Likaislauhdetta strippaamalla voidaan siitä erotella metanolia ja raakatärpättiä, joille on myös omat käyttökohteensa teollisuudessa sekä kuluttajatuotteiden valmistuksessa. (Tikka & Mantela & Eerola 2022.)

Nykyisin sellun valmistuksen ohessa saadaan niin paljon muitakin tuotteita kuin sellua, että esimerkiksi Metsä Group on vaihtanut tehtaiden nimeämiskäytäntöä. Vanhemmat tehtaat ovat edelleen sellutehtaita, mutta uudempia tehtaita kutsutaan biotuotetahtaiksi. Metsä Groupin mukaan ”Biotuotetehdaskonseptissa puuraaka-aine ja tuotannon sivuvirrat hyödynnetään sataprosenttisesti selluna ja muina erilaisina biotuotteina, joilla voidaan korvata fossiilisia materiaaleja ja polttoaineita.” (Biotuotetehdaskonsepti n.d.)

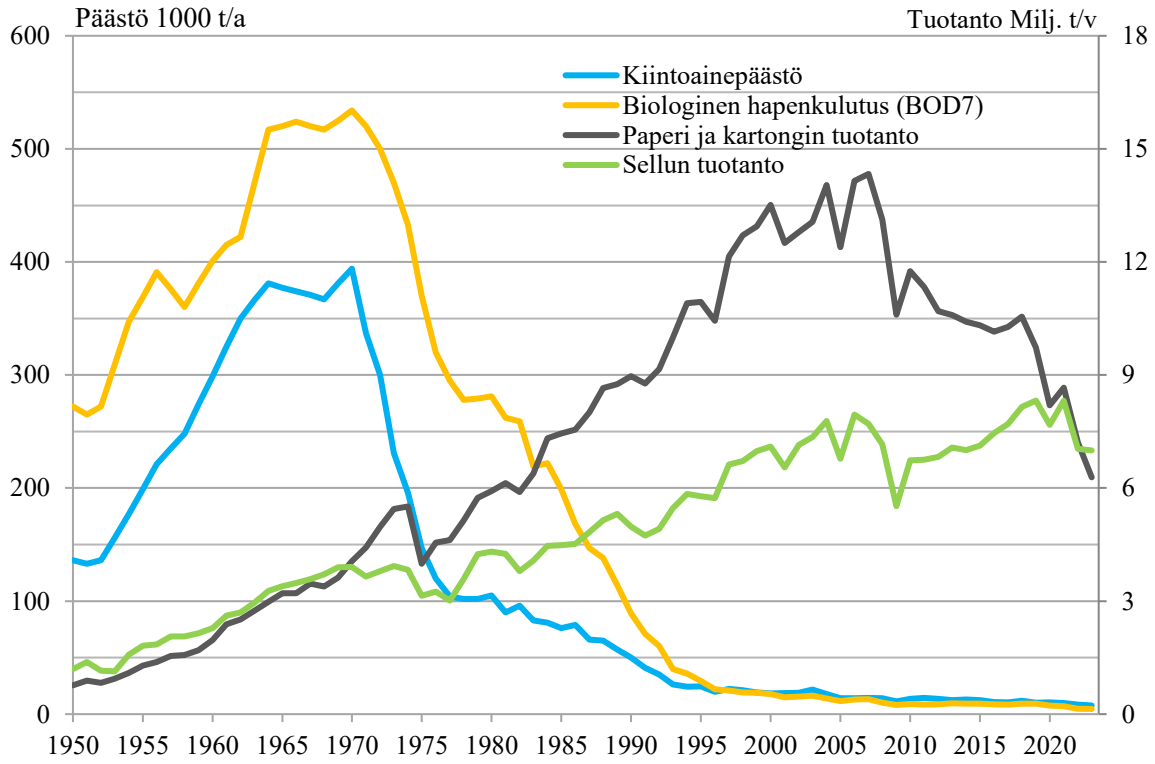
2.3 Tehtaiden päästökehitys

Sulfiittikeiton aikakaudella keittokemikaaleja ei voitu kierrättää, joten ne laskettiin usein aikakaudelle tyypilliseen tapaan sellaisenaan vesistöön. Tämä aiheutti suuria määriä päästöjä ja ongelmia alueiden vesistöihin, josta kärsivät niin luonto kuin ihmisetkin. (Mboowa 2024)

Syy suuriin jätevesipäästöihin löytyy tuotantolaitosten kehityksen prioriteeteistä. Raaka-aineiden ja prosessikemikaalien kierrätys ei ollut kannattavaa uusien hankkimiseen verrattuna, joten massanvalmistuksessa kiinnitettiin huomiota lähinnä kapasiteettien nostoon ja tuotannon tehostamiseen. Näin ollen raaka-aineiden ja kemikaalien talteenotto sekä uudelleenkäyttö jäivät vajavaisiksi. (Oikari & Soivio & Vuorinen & Vuorinen & Nyholm 1984.)

Metsäteollisuuden vesistövaikutuksiin herättiin 1960- ja 1970-luvuilla. Erityisesti vuonna 1970 laaditun vesiensuojeluohjelman vaikutukset alkoivat näkyä selvänä vesistökuormitusten laskuna. (Metsäteollisuus 2020 a.)

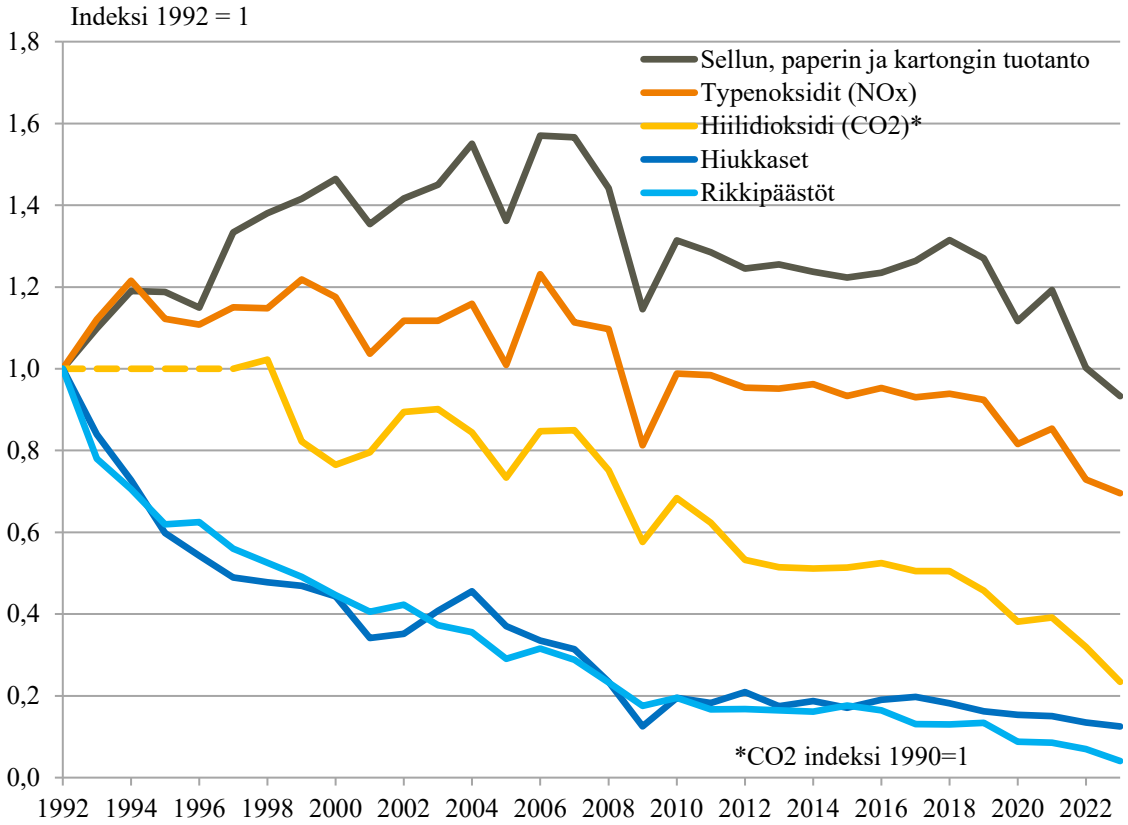
Kuva 2 esittää metsäteollisuuden aiheuttamaa vesistökuormitusta vuodesta 1950 vuoteen 2023. Siitä voidaan havaita kuormituksen voimakasta laskua 1970-luvun alusta alkaen.



Kuva 2 Metsäteollisuuden kiintoaine- ja BOD_7-päästöt vesistöihin 1950–2023. (Tilastot 2023.)

Nykyisin metsäteollisuuden tehtaiden osuus vesistökuormituksesta on pieni. Kaikista ravinnepäästöistä vain noin 3–4 prosenttia on metsäteollisuudesta aiheutuvia. Tähän on päästy tehostamalla tehtaiden vedenkäyttöä, prosessiveden kierrätystä ja jätevedenpuhdistamoiden toimintaa. Kuvasta 2 havaitaan, että 1990-luvun puolivälin jälkeen kiintoainepäästöt ja hapenkulutus ovat olleet vain murto-osan 1960-luvun tasosta. Parantuneesta tilanteesta huolimatta metsäteollisuudessa panostetaan edelleen prosessien ympäristöystävällisyyden kehittämiseen. Suurimmat harppaukset jätevedenpuhdistuslaitosten tehostuksessa on jo tehty, joten nykyään keskitytään enemmän tuotantoprosessin tehostamiseen, vedenkäytön vähentämiseen ja prosessiveden kierrätykseen, häiriöttömän käynnin varmistamiseen ja häiriöteiden ennakointiin ja niihin varautumiseen. (Metsäteollisuus 2020 a.)

Ihmisillä on usein mielikuva, että sellutehdas haisee aina pahalta (Nurmi 2015). Käsitys on lähtöisin alkuajoilta, jolloin hajukaasuja ei otettu talteen, vaan ne ovat päätyivät sellaisenaan ilmaan aina, kun tehdas oli käynnissä. Hajukaasuista pahalta haisevat erityisesti rikkiyhdisteet, joille ihmisnenä on herkistynyt (Väisänen 2015). Tämän takia hajut koetaan edelleen häiritsevinä, vaikka hajuja pääsee ilmaan nykyisin uusilta tehtailta huomattavasti vähemmän kuin vanhoilta (Lehtinen 2020). Hajuhaittaa esiintyy lähinnä häiriötilanteissa (Upmpulp 2024 a, b, c, d). Päästöjen väheneminen johtuu siitä, että nykyisin hajukaasut otetaan talteen ja poltetaan. Hajukaasujen talteenotto ja käsittely aloitettiin jo 1970-luvulla, mutta laajemmin laitteistoja on otettu käyttöön 1990-luvulla. Niiden ansiosta suhteelliset hajurikkiyhdistepäästöt ovat vähentyneet 97 % vertailuvuoteen 1992 verrattuna. Erilaisten päästövähennystoimenpiteiden ansiosta myös muut ilmapäästöt ovat vähentyneet huomattavasti. Kuvasta 3 havaitaan huomattavaa ilmapäästöjen vähenemistä. Erityisesti rikki- ja hiukkaspäästöt ovat laskeneet huomattavasti. Tämä on parantanut paikallista ilmanlaatua tehtaiden ympäristössä. Merkittävimmät muutokset, eli vuosina 2008 ja 2020 tapahtuneet suuremmat laskut, selittyvät tuotannon vähenemisellä ja tehtaiden alasajoilla. Kuitenkin kaikkien kehitystoimenpiteiden seurauksena metsäteollisuudesta on nykyisin peräisin alle 10 % Suomen rikki- ja typenoksideista sekä hiukkaspäästöistä. (Metsäteollisuus 2020 b.)



Kuva 3 Metsäteollisuuden ilmapäästöjä 1992–2023. (Tilastot 2023.)

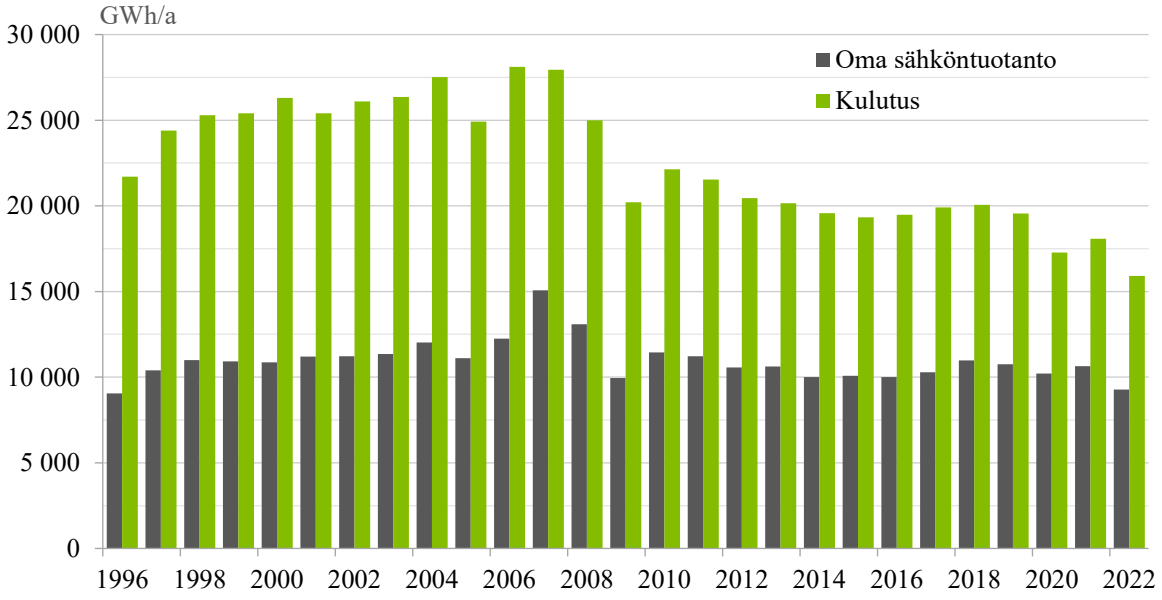
Jatkuvan parantamisen myötä metsäteollisuuden päästöt veteen ja ilmaan ovat vain murto-osia menneen vuosisadan tasosta ja etenkin metsäteollisuuden tuotantomäärään ja hyötyihin suhteutettuna päästöt ovat nykyisin vähäisiä.

2.4 Energiaa myyntiin

Jo ennen vuosituhannen vaihdetta herättiin ajatukseen, että sellutehtaan höyryntuotanto on selvästi yli oman tarpeen. Energiatehokkuustrendin mukaisesti ryhdyttiin kehittämään tapoja kasvattaa energiantuotantoa ja vähentämään kulutusta, jotta energiaa jäisi enemmän myytäväksi. Tällöin alkoi ns. nykyaikaisten sellutehtaiden aikakausi, jotka olivat selvästi sähköenergian suhteen yliomavaraisia ja vihreää sähköä jäi oman kulutuksen jälkeen huomattava määrä myytäväksi kansalliseen sähköverkkoon. (Vakkilainen & Sandergård & Veitola 1999.)

Sähkön kulutuksen ja käytön suhde suomalaisessa metsäteollisuudessa on parantunut viimeisen kolmenkymmenen vuoden aikana (kuva 4). Aikavälillä sähkön kulutus on laskenut

selvästi, mutta tuotanto on pysynyt käytännössä samana. Osa kulutuksen laskusta johtuu tuotantolaitosten alasajoista ja tuotannon vähenemisestä. Vuoden 2008 finanssikriisin vaikutukset näkyvätkin selvästi sähkön kulutuksen vähenemisenä. Metsäteollisuuden sähkön tuotanto ei kuitenkaan ole pitkällä aikavälillä juuri laskenut sellun tuotannon vähenemisestä huolimatta. Huippuvuosien luvuista on kuitenkin tultu alaspäin muutama tuhat gigawattituntia.



Kuva 4 Metsäteollisuuden sähkön tuotanto ja kulutus 1996–2022. (Tilastot 2023.)

Yli sadanviidenkymmenen vuoden aikana tapahtuneiden kehitysaskeleiden ansiosta puunjalostus on nykyisin tehokkaampaa, monipuolisempaa, ympäristöystävällisempää ja laadukkaampaa kuin koskaan ennen. Nykyiset uudet modernit tehtaat edustavat uutta tehdassukupolvea. Niiden suunnittelussa ja toteutuksessa on kiinnitetty erityistä huomiota, miten tehdas vaikuttaa ympäröivän alueen asukkaisiin, alueisiin, ympäristöön, luontoon, energiaan ja talouteen. (Biotalous 2016.)

3 Moderni biotuotetehdas

Modernit biotuotetehtaat ovat uudehko konsepti, jota ensimmäisenä käyttää Metsä Group. Uudet Metsän tehtaat ovat nimeltään biotuotetehtaita, kun taas vanhat ovat edelleen sellutehtaita. Biotuotetehtaan erottaa sellutehtaasta muutkin ominaisuudet kuin nimi. Biotuotetehtaiden suunnittelussa ja toteutuksessa on kiinnitetty eritysitä huomiota resurssitehokkuuteen ja kestävään kehitykseen. Uusilla tehtailla raaka-aineet hyödynnetään entistä tarkemmin ja energiaa tuotetaan ennätysmääriä myös myyntiin. Nykypäivän edellytysten myötä uusien tehtaiden ympäristövaikutukset ovat pienemmät kuin koskaan ennen. (Biotuotetehdaskonsepti n.d.)

3.1 Energiaa ylimäärin

Ydinajatuksena biotuotetehdaskonseptissa on itse tehdas. Tehdas on erittäin resurssitehokas moderni laitos, jossa selluntuotannon sivuvirrat hyödynnetään ja muutetaan arvokkaiksi biokemikaaleiksi, -tuotteiksi ja -energiaksi. Energiantuotannon suhteen laitokset ovat niin tehokkaita, että sähköä jää oman käytön yli runsaasti myytäväksi. Uudet Äänekosken ja Kemin biotuotetehtaat tuottavat sähköä 240 % ja 250 % oman kulutuksensa verran. Kemin tehdas tuottaakin vuosittain yli kaksi terawattituntia sähköä, josta valtakunnan verkkoon tulee reilut puolitoista terawattituntia. (Kemin biotuotetehdas n.d.) (Äänekosken biotuotetehdas n.d.)

3.2 Ympäristö asettaa reunaehdot toiminnalle

Vuosien saatossa ympäristöasioiden huomioiminen on tullut merkittäväksi ja olennaiseksi osaksi metsäteollisuuden toimintaympäristöä niin tiukentuneiden ympäristölupien kuin myös vapaaehtoisten ympäristötoimien myötä. Ympäristölupien vaatimukset ovat tiukentuneet ja ympäristövaikutusselvitysten tulee olla aiempaa laajempia. Tämä käy ilmi tehtaiden ympäristöluvista.

Äänekosken tehtaan ympäristövaikutusten arviointiselostuksessa on käyty läpi laajalti tehtaan vaikutuksia ympäristöön. Siinä myös verrataan vanhan sellutehtaan päästöjä uuden

biotuotetehtaan päästöihin. Tästä voidaan havaita, että uusi tehdas on paitsi huomattavasti isompi ja tehokkaampi, myös paljon ympäristöystävällisempi. Kokonaispäästöt luonnollisesti kasvavat, sillä uusi tehdas on kapasiteetiltaan yli 2,5 kertaa suurempi. Jätevesimäärä kokonaisuudessaan kuitenkin pysyy lähes samana. Tehtaan tuotannon ollessa huomattavasti suurempi, myös jäähdytystarve kasvaa. Käytännössä jäähdytysveden tarve nousisi noin 7–10 kertaiseksi. Tämän seurauksena lähistöllä olevan vesistön arvellaan lämpenevän. Mallinnusten mukaan vesistön pintalämpötila nousisi yli kahdella asteella puolen kilometrin päässä purkupaikasta. Kohonneen pintalämpötilan vaikutukset näkyvät vesistössä todennäköisesti rehevöitymisenä ja happikadon lisääntymisenä. Lämpökuorman ennustetaan myöhäistävän jääpeitteen syntymistä ja keväisin aikaistavan sen sulamista. (Metsä Fibre 2014.)

Viranomaisen lausunnon mukaan tehtaalla tulee olemaan vesistöä lämmittäviä vaikutuksia. Tämän takia alueen vesistöjen rehevyys kasvaa ja samalla ekosysteemin lajikannat saattavat muuttua. Asiaan voisi vaikuttaa lisäämällä jäähdytystorneja integraatin jäähdytykseen. Jäähdytystornien avulla vuodenaikaiset vaihtelut vähenisivät ja jäähdytysveden määrä olisi pienempi ja tasaisempi ympäri vuoden. Jäähdytystornivaihtoehdossa vesistöön laskettava jäähdytysvesimäärä olisi hieman vanhaa tehdasta matalampi. Tällöin torneista aiheutuva vesihöyry saattaisi etenkin talviaikaan aiheuttaa turvallisuus- ja viihtyvyysriskiä. Lausunnon mukaan jäähdytys voidaan toteuttaa vedellä ilman jäähdytystorneja. (Keski-Suomen ELY-keskus 2014.)

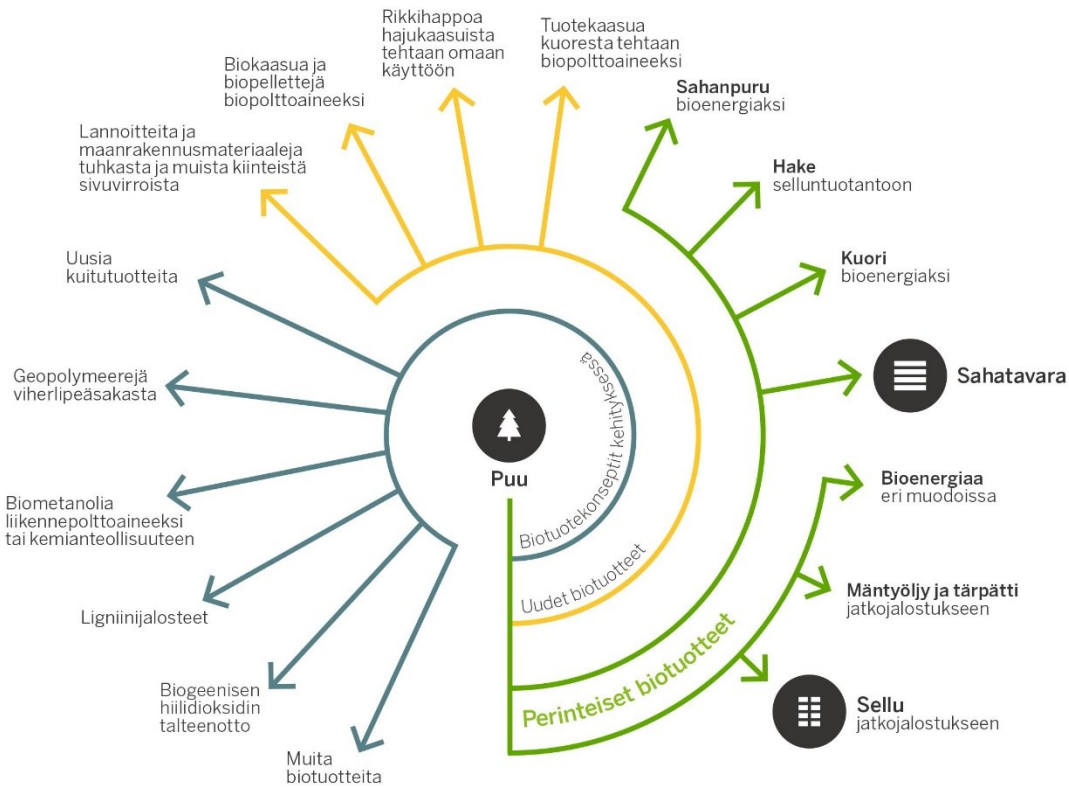
Kemin biotuotetehtaalla tilanne on hyvin samankaltainen kuin Äänekoskella. Vanhan tehtaan tilalle aiotaan rakentaa uusi, entistä huomattavasti isompi ja tehokkaampi tehdas. Kapasiteetin kasvun myötä jäähdytystarve kasvaa. Tuotantoon suhteutetut päästöt vähenevät, mutta kokonaispäästöt kasvavat. Jäteveden kokonaismäärä kasvaa noin 45 %. Myös jäähdytystarve kasvaa ja jäähdytysveden määrä olisi uudella tehtaalla miltei kuusinkertainen. Vaikutukset tällä olisi hyvin pitkälti samat kuin Äänekoskella. (Metsä Fibre 2019)

Lapin ELY-keskuksen kanta ei ollut asiaan yhtä hyväksyvä kuin Keski-Suomen ELY-keskus. Kemin tapauksessa yhteysviranomainen näki lämpökuorman vaikutukset yhtenä tehtaan suurimmista ympäristövaikutuksista. Muut lausunnon antaneet tahot olivat myös huolissaan lämpökuorman aiheuttamasta haitasta jääpeitteelle, jonka seurauksena alueen virkistys-, kalastus- ja matkailutoiminta kokisi suurta haittaa. Yhteysviranomainen oli samaa mieltä asiasta. Tämän takia tehtaan aiheuttamaa lämpökuormaa täytyy pienentää. Viranomainen ehdottaa vesien johtamista Ajoksen satamaan, joenhaarojen hyödyntämistä vesien

jäähdytyksessä tai jäähdytystornien käyttämistä. Biotuotetehtaista tulee siis suunnitella entistäkin ympäristöystävällisiä myös lämpökuormat huomioiden. (Lapin ELY-keskus 2020)

3.3 Biotuotteet

Metsäteollisuuden tuotteita ovat perinteisesti olleet sahatavara ja sellu. Näitä tuotteita on tuotettu Suomessa jo reippaasti yli sata vuotta. Myöhemmin mukaan ovat tullet yksinkertaiset puukemian tuotteet kuten mäntyöljy ja tärpätti. Biotuotetehtaan erottaakin perinteisestä sellutehtaasta tuotevalikoimasta, joka on uusilla tehtailla paljon kattavampi. Uusilla tehtailla päätuotteiden sivuvirrat hyödynnetään tarkoin. Kuten kuvasta 5 nähdään, on uusien tehtaiden tuotekattaus huomattavan laaja. (Biotuotetehdaskonsepti n.d.)



Kuva 5 Metsä Groupin biotuotetehdaskonseptin pää- ja sivuainevirrat. (Biotuotetehdaskonsepti n.d.)

Perinteiset biotuotteet ovat edelleen tehtaiden päätuotteita, mutta yhä tärkeämmiksi ovat nousseet näiden valmistamisessa syntyvistä sivuvirroista valmistettavat tuotteet. Etenkin sellun tuotannosta kertyy useita materiaalisivuvirtoja, joista on paljon mahdollista kehittää uusia biotuotteita. Esimerkiksi puun kuorinnassa syntyvä kuori on usein poltettu sellaisenaan

erillisessä kuorikattilassa. Nykyisin kuorta muun muassa kaasutetaan tuotekaasuksi, jolla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita muualla tehtaalla. Lisäksi ennen käyttökelvottomalle kalkille ja tuhkalle on löydetty käyttökohteita maataloudesta ja maanrakennusalalta. Metsä tekee yhteistyötä kumppaniyritysten kanssa kehittämällä uusia tuotteita, joiden avulla saadaan puuraaka-ainetta hyödynnettyä entistä monipuolisemmin. (Biotuotteet n.d.)

Avainasemassa uusien tuotteiden kehityksessä on Äänekosken biotuotetehdas, jonne on rakennettu ja rakennetaan useita erilaisia jalostuslaitoksia. Ensimmäinen uudenlainen jalostamo valmistui tehtaan kanssa samanaikaisesti vuonna 2017. Jalostamolla valmistetaan rikkihappoa tehtaan hajukaasuista (Biotuotetehdas 2017). Nyt Veolia rakentaa Äänekosken tehtaan yhteyteen raakametanolin jalostuslaitosta. Jalostuslaitoksella nostetaan tehtaalla syntyvän biometanolin jalostusarvoa, jonka jälkeen sitä voidaan käyttää muun muassa liikennepolttoaineena. Jalostamon on tarkoitus käynnistyä vielä vuonna 2024. Uusimpana projektina on Metsä Fibren ja Andritzin yhteistyössä rakentama koetehdas, jossa jalostetaan hapetettua ligniiniä uudenlaiseksi ligniinituotteeksi. Tätä voitaisiin käyttää lisäaineena rakennus- ja kaivosteollisuudessa sekä esimerkiksi vedenpuhdistuksessa. Uusi koelaitos valmistuu vuoden 2025 lopulla. (Metanoli n.d.) (Ligniini n.d.)

Uudempia kuitutuotteita on myös kehitteillä. Tällä hetkellä pisimmällä kehitys- ja testausvaiheessa ovat kevyt kuitumateriaali ja sellupohjainen biokomposiittikuitu. Kevyt kuitumateriaali on perinteisen eristekuidun kaltaista pehmeää ainetta, joka on täysin biopohjainen ja kierrätettävä vaihtoehto pehmusteille sekä ääni- ja lämpöeristeille. Biokomposiittikuitu puolestaan on muovin lujitekuitua, jolla voidaan parantaa bio- ja fossiilimuovien ominaisuuksia ja säästää painossa. Kuitu on täysin biopohjaista, eli biomuoviin sekoitettuna koko tuote olisi biohajoavaa. Mahdollisten käyttökohteiden kirjo on erittäin laaja, käytännössä yhtä laaja kuin muoveillakin. (Kuitumateriaali n.d.) (Selluloosapelletit n.d.)

3.4 Fossiilittomuus

Nykymaailman energiataloustilanne vaatii entistä tehokkaampia ratkaisuja metsäteollisuudelta. Ilmastokokouksissa tehdyt sopimukset edellyttävät yrityksiltä toimia fossiilisten polttoaineiden käytön vähentämiseksi ja hiilidioksidipäästöjen laskemiseksi. Nykytrendin mukaisesti maailmanmarkkinat siirtyvät kohti biotaloutta ja siten biopohjaisia raaka-aineita ja tuotteita. Tämä luo metsäteollisuudelle uusia mahdollisuuksia tuote- ja asiakaskunnan

laajentamiseen. Moderneilla biotuotetehtailla uusiutuvasti tuotettua lämpöä ja sähköä riittää yli oman tarpeen. Niitä hyödyntämällä päätuotteiden sivuainevirroista voidaan tuottaa biokaasua tai kiinteitä biopolttoaineita. Näillä biopolttoaineilla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita jo paikan päällä tehtailla. Meesauuni on useilla tehtailla suuri yksittäinen fossiilisten polttoaineiden kulutuskohde. Biomassan kaasutuslaitoksen avulla voidaan kuoresta tuottaa biokaasua, jolla voidaan korvata maakaasu tai raskas polttoöljy meesauunissa tai käynnistyspolttoaineena. Jo kauan ennen kaasutuslaitoksia pohjoismaissa on tuotettu mäntyöljyä ja tärpättiä selluntuotannon ohessa. Uusilla biotuotetehtailla tehdään vastaavia innovaatioita ja pienempiä jalostuslaitoksia rakennetaan tehtaiden yhteyteen hyödyntämään puuraaka-aine kokonaisuudessaan, ilman fossiilisia polttoaineita. (Vakkilainen 2018.)

Olennainen osa biotuotetehdaskonseptia on fossiilittomuus. Metsä Groupin sellu- ja biotuotetehtaat ovat jo nyt yliomavaraisia energian suhteen. Tämä tarkoittaa, että tehtaalla tuotetaan energiaa enemmän kuin mitä itse prosessiin tarvitaan. Tuotannon sivuvirtojen hyödyntämistä kehittämällä ja suljettuja kiertoja hyödyntämällä tehtaiden raaka-aine- ja energiatehokkuus paranevat. Yhtiön tavoitteena on toimia täysin ilman fossiilisia polttoaineita vuoteen 2030 mennessä. Osalla vanhemmista sellutehtaista normaalikäynnin aikana se toteutuu jo nyt (Joutsenon sellutehdas n.d.). (Biotuotetehdaskonsepti n.d.)

4 Valkaisu

Vanhanaikainen tapa valkaista sellua oli käyttää klooria kaasumuodossa eli elementaalimuodossa. Tällöin suurin osa valkaisusta ja jäännösligniinin poistosta tehtiin kloorikaasulla. Vasta viimeiset ligniinijäämät poistettiin klooridioksidilla, sillä se oli kalliimpaa kuin kloorikaasu. Tällöin suodosvesiä ei kierrätetty, vaan ne johdettiin sellaisenaan jätevesilaitoksille. Kun jätevesikuormia alettiin pienentää suodosten kierrätyksellä, alkoi kloorivaiheen lämpötila nousemaan. Se puolestaan heikensi massan lujuutta. Lämpötilan hillitsemiseksi ruvettiin klooridioksidia lisäämään jo alkupään kloorivaiheessa. (KnowPulp 2024.)

Kloorikaasua hyödyntävää valkaisua käytettiin pitkään. Vielä ennen vuotta 1990 noin 94 % massasta valkaistiin kloorilla. Sittemmin ympäristöasioihin alettiin kiinnittää enemmän huomiota. Jätevesien dioksiini- ja AOX-kuormia alettiin pienentää, jolloin kaasuklooriton ECF-valkaisu alkoi kasvattamaan nopeasti suosiota. Pohjoismaissa kaasukloorin käytöstä luovuttiin kokonaan vuoden 1994 loppuun mennessä. Suomessa alkuainekloorin käytöstä luovuttiin kokonaan vuonna 1993 (Tana & Ruonala & Ruoppa (1999). Sittemmin on kehitetty myös täysin kloorivapaa TCF-menetelmä, mutta 2000-luvulla ECF-valkaisu on ollut yleisin uusien tehtaiden valkaisumenetelmä. Esimerkiksi vuonna 2016 käynnistyneellä Metsä Fibren Äänekosken biotuotetehtaalla käytetään edistynyttä ECF-menetelmää (Metsä Group 2023 a). Uudella, keväällä 2024 käynnistyneellä, Kemin biotuotetehtaalla on myös käytössä ECF-menetelmä, jonka suunnittelulähtökohtana on ollut Äänekosken biotuotetehtaan valkaisimo (Metsä Fibre 2019). (KnowPulp 2024.)

4.1 Nykyiset valkaisuprosessit

Valkaisuvaiheessa pyritään valkaisemaan massaa. Tyypillisesti muina tavoitteena on valmiin massan ruskistumisen vähentäminen, puhdistaminen ja pihkan poisto. Suurin osa puun väristä tulee keittoreaktioiden värjäämästä jäännösligniinistä. Puhdas ligniini itsessään on hiilihydraattien ja uuteaineiden ohella vain hennosti värillistä. Tämän takia valkaisussa pyritään poistamaan erityisesti jäännösligniini. Kaikki tämä tulisi toteuttaa taloudellisesti, tehokkaasti ja ympäristöystävällisesti kaikkien sidosryhmien tavoitteiden mukaisesti. (Fardim 2011.)

Nykyiset valkaisimot koostuvat useista eri vaiheista, joiden välillä massa pestään. Pesu ja kemikaalivaiheiden muodostamaa kokonaisuutta kutsutaan valkaisusekvenssiksi. Kun massa vaalennetaan useassa eri vaiheessa, saadaan massasta hyvin vaaleaa ilman, että sen lujuusarvot romahtavat. Samalla massan laatu paranee ja kemikaalien kulutus on pienempää. Nykyisin valkaisu voidaan jakaa ECF- ja TCF-valkaisuun, riippuen käytetäänkö valkaisussa klooria sisältäviä kemikaaleja vai ei. Valkaisusekvenssiä valitessa tulee huomioida raaka-aine, haluttu lopputuote, laatu ja päästöt. Erilaisia sekvenssejä onkin kehitetty parisen kymmentä. Aikanaan valkaisussa käytettiin eniten klooripohjaisia kemikaaleja, mutta 1980-luvun jälkeen happipohjaiset kemikaalit ovat kasvattaneet suosiota. Klooridioksidia sisältävillä sekvensseillä saadaan vähän lujempaa massaa kuin täysin happipohjaisilla. Osa happikemikaaleista ovat tarkkoja olosuhteista ja siksi laatu ei ole aina taattua. (KnowPulp 2024.)

4.1.1 ECF-Valkaisu

ECF-valkaisussa tärkein valkaisukemikaali on klooridioksidi. Klooridioksidin hapetuskyky on noin 2,6 kertaa alkuainekloorin suurempi eli se on myös tehokkaampi valkaisuaine ja siten sitä kuluu prosessissa tavallista kloorikaasua vähemmän. (KnowPulp 2024.)

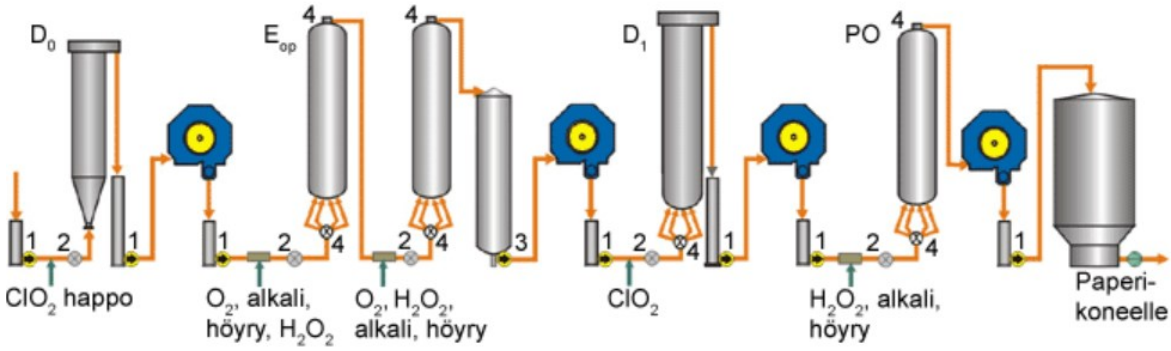
Klooridioksidi (ClO_2) on epäorgaaninen yhdiste, jota käytetään pääasiassa valkaisuun, mutta myös vedenkäsittelyssä. Sitä valmistetaan pelkistämällä natriumkloraattia ($NaClO_3$) tai natriumkloriittia ($NaClO_2$) happamassa liuoksessa. Kaasumainen klooridioksidi on epästabiilia ja erittäin reaktiivista. Se voi räjähtää herkästi sekoittuessaan monien yleisten aineiden, kuten maakaasun, rasvojen ja öljyjen tai vaikkapa ruosteen kanssa. Myös muutokset olosuhteissa kuten lämpötilamuutokset, iskut tai staattinen varaus saattavat aiheuttaa räjähdyksen. Korkeissa pitoisuuksissa se hajoaa räjähdyksenomaisesti jopa valon ja lämmön vaikutuksista. Turvallisuussyistä valmistusreaktiossa syntyvä kaasu liuotetaan veteen. Klooridioksidi on kaasuksi poikkeuksellisen vesiliukoinen. 20 °C lämpöiseen veteen sitä liukenee 8–10 g/l. Tyypillisesti varastointi hoidetaan hieman laimeampana 6–8 g/l vesiliuoksena. Laimean vesiliuoksen kuljettaminen on sallittua, mutta vaarallista. Klooridioksidikaasun kuljettaminen ei ole sallittua. Tämän takia käyttöpaikkojen yhteydessä on klooridioksidilaitos, jossa sitä valmistetaan. Selluteollisuudessa klooridioksidikaasu tuotetaan paikan päällä ja liuotetaan laimeaksi vesiliuokseksi, jollaisena se myös käytetään (KnowPulp 2024). Joissain

prosesseissa voidaan käyttää klooridioksidikaasua, joka laimennetaan höyryyn tai ilmaan räjähdysrajan alittavaan pitoisuuteen. (Työterveyslaitos 2022.)

Vaarallisuudesta ja haastavista ominaisuuksista huolimatta klooridioksidi on yksi parhaiten sellun valkaisuun soveltuvia aineita. Se on hyvin tehokasta, reaktiivista ja selektiivistä. Selektiivisyytensä ansiosta se ei vahingoita reagoidessaan massan hiilihydraatteja säilyttäen näin sellun kuidut ehjinä. Klooridioksidia voidaan käyttää täysvaaleuteen asti ja vaikeasti reagoivat ligniiniryhmät hapettuvat värittömiksi. (KnowPulp 2024.)

ECF-valkaisussa massa vaalenee, kun klooridioksidi hapettaa massan sisältämää ligniiniä, jolloin ligniini liukenee eli massa delignifioituu. Klooridioksidi myös hapettaa ligniinien sisältämiä kromoforeja, jolloin ligniini ja samalla massa vaalenevat. Kemikaali on tehokkaimmillaan lievästi happamassa liuoksessa. Valkaisureaktio on kuitenkin nopein alhaisessa pH tasossa. Myös korkea lämpötila kiihdyttää reaktiota. Siksi usein valkaisun alkuvaiheissa käytetään matalampaa pH:ta kuin loppupäässä. Liian matala pH ja korkea lämpötila voivat tosin pilkkoa massan hiilihydraatteja ja siten huonontaa laatua. Tyypillisesti alkupäässä syötetään pH:n laskemiseksi rikkihappoa, sillä se on tehokasta ja sitä on usein helposti saatavilla edullisesti (KnowPulp 2024). Rikkihapon sijasta voidaan käyttää myös muita happoja. Eräässä suomalaisessa sellutehtaassa käytetään suolahappoa (Ala-Kaila 2024). (KnowPulp 2024.)

Eräänlainen ECF-valkaisusekvenssi on esitetty kuvassa 6. Se koostuu neljästä eri vaiheesta. Vaiheita voi olla myös vain kolme. Yleisesti pidemmät sekvenssit soveltuvat paremmin havupuumassoille. Valkaisusekvenssissä on useita eri vaiheita, jotta saavutetaan vaaleampaa massaa ilman, että se menettää lujuutensa. Valkaisuvaiheiden pituudet ja kemikaaliannos riippuvat käytetystä puulajista ja keitto-oloista. Erityisesti klooridioksidin annostukseen, kappaluvulla on vaikutusta, sillä annos lasketaan kappaluvun mukaan. Kerroin vaihtelee puulajin ja halutun vaaleuden mukaan. Mikäli massasta halutaan vaaleampaa, on siihen annosteltava enemmän klooridioksidia. Alkaliuuttovaiheessa, massaan syötetään happea tai peroksidia. Vaiheiden välissä massa pestään, jotta reagoinut ligniini irtoaa ja uudet kemikaalit pääsevät reagoimaan tehokkaammin jäännösligniinin kanssa. (KnowPulp 2024.)



Kuva 6 Esimerkki ECF-valkaisusta. (KnowPulp 2024.)

4.1.2 TCF-Valkaisu

Tärkein ero, ja oikeastaan syy TCF-menetelmän olemassaoloon on se, ettei siinä käytetä ollenkaan klooria sisältäviä kemikaaleja massan valkaisuun. TCF-valkaisussa kloorikemikaalit on korvattu muilla valkaisuaineilla, kuten hapella, otsonilla, happipohjaisilla perhapoilla tai vetyperoksidilla. Prosessiolot ja kemikaalien annostus riippuvat puulajista, valmiin massan tavoiteominaisuuksista sekä halutuista prosessioloista. (KnowPulp 2024.)

Tyypillisesti peretikkahappoa tai otsonia voidaan käyttää alkuvalkaisussa, sillä ne ovat vetyperoksidia ja happea tehokkaampia delignifioinnissa. Peroksidia käytetään usein loppuvalkaisussa. Mikäli valkaisukemikaaleina käytetään pelkästään vetyperoksidia ja happea, on massasta usein mahdotonta saada erittäin vaaleaa. Yleensä toimiva ratkaisu tähän on lisätä otsonivaihe happivaiheen ja peroksidivaiheen väliin. (KnowPulp 2024.)

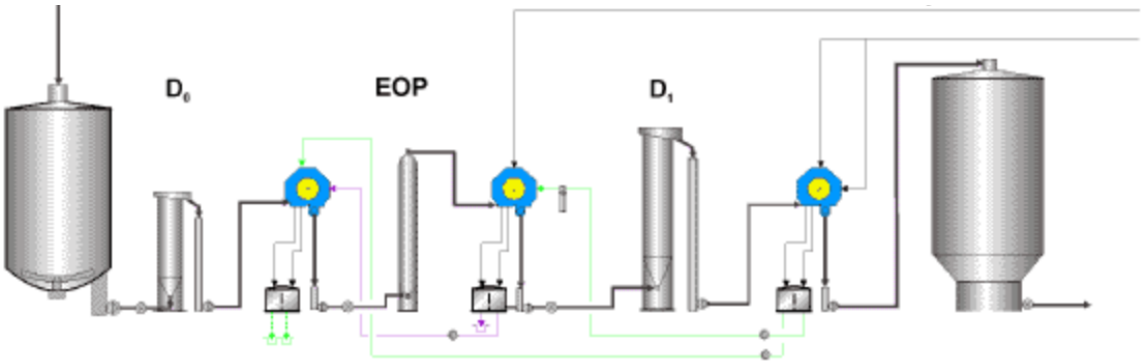
4.2 Valkaisun vedet ja niiden käsittely

Metsäteollisuudessa kehitetään jatkuvasti uusia keinoja vähentää tehtaiden negatiivisia ympäristövaikutuksia. Helpoimmat ja halvimmat keinot on jo käytetty, joten seuraavat kehitysaskeleet ovat haastavampia. Eräs tärkeä kehityskohde on vedenkäytön tehostaminen. Vielä 1960-luvulla valkaisun vedenkäyttö oli 100 m^3/t, kun taas 2000-luvulle tultaessa päästin jo alle 20 m^3/t (KnowPulp 2024). 2010-luvulla määrä oli 10 m^3/t. Moderneissa tehtaissa suunnitteluarvo on vain 5 m^3/t, joskin vettä kuluu todellisuudessa hieman enemmän (Ala-Kaila 2024). Tällaisiin lukemiin on päästy sulkemalla valkaisun vesikiertoa. Käytännössä tämä

tarkoittaa, että valkaisusta tuleva alkalinen suodos kierrätetään happivaiheen jälkeiseen pesuun. Happamat ja neutraalit suodokset vaativat erillistä käsittelyä. Veden kulutuksen vähentäminen on motivoinut toimittajia kehittämään entistä tehokkaampia pesureita. Niiden ansiosta myös pesuhäviöt ovat pienentyneet ja pesutulokset parantuneet. (Fardim 2011.)

4.2.1 Valkaisun pesuvedet

Valkaisussa massaa pestään eri vaiheiden välissä. Pesuvetenä käytetään usein jo kertaalleen muualla tehtaalla käytettyjä jakeita, kuten kuivauskoneen kiertovesiä tai sekundäärilauhdetta haihduttamolta. Myös kemiallisesti puhdistettua vettä voidaan käyttää pesuvetenä, mutta kiertovedet ja sekundäärilauhteet ovat parempia, sillä ne ovat kuumia vesiä. Kuumilla vesillä voidaan säätää lämpötilaa samalla ja siten säästää höyryä. Kuvassa 7 on esitetty eräs ratkaisu pesuvesien kierrätykseen. Tässä vielä pesuun käyttämätöntä vettä ohjataan D_1- ja EOP-vaiheen pesureihin. D_1-vaiheen pesuliemet erotellaan puhtaanpiin ja likaisempiin, joista puhtaammat käytetään uudelleen EOP-vaiheen pesurissa ja likaisemmat liemet käytetään D_0-vaiheen pesurissa. Myös EOP-vaiheen pesuliemet erotellaan puhtaanpiin ja likaisempiin. Puhtaammat johdetaan edelleen D_0-vaiheen pesuriin. Likaisemmat ohjataan jätevedenpuhdistukseen, kuten myös kaikki D_0-vaiheen pesuliemet, mikäli niitä ei käytetä happivaiheen pesurilla. (KnowPulp 2024.)



Kuva 7 Pesuvesien kierto valkaisun vaiheesta toiseen. (KnowPulp 2024.)

Suljetussa valkaisimossa on riskinä, että haitallisia aineita ja saostumia kertyy eri prosessivaiheisiin. Suljettua valkaisimoa suunnitellessa onkin tärkeää ottaa ongelma huomioon ja käyttää erottelulaitteistoja, jotta päästään haitta-aineista eroon. Yleisimmät ongelmaa aiheuttavat aineet ovat kloori, kalium ja kalsium. Happovaiheessa rikkihappoa käytettäessä barium muodostaa bariumsulfaattia, joka on muodostaa ongelmallista sakkaa valkaisun laitteistoihin

(Ala-Kaila 2024). TCF-valkaisussa kloori ei aiheuta ongelmia, mutta silloin kalsiumoksalaattisaostumat ovat oma haasteensa (KnowPulp 2024). Mikäli valkaisun ja koko tehtaan vesikiertoa halutaan sulkea, vaatii se kaikkien puun, veden ja kemikaalien mukana tulevien aineiden tunnistamista ja niiden puhdistusta. (Fardim 2011.)

Kun halutaan tehostaa vedenkäyttöä, kannattaa hyödyntää mahdollisimman paljon samoja vesiä uudelleen eri vaiheissa. Valkaisimolla tämä tarkoittaa puhtaiden neitseellisten pesuvesien ja höyryn korvaamista kuivauskoneen nollavesillä ja haihduttamon sekundäärilauhteella. Moderneissa tehtaissa syntyy myös paljon muita kuumia ja lämpimiä vesiä, joita kannattaa hyödyntää. Lämpimän veden käyttö vähentää höyryn tarvetta lämmityksessä ja valkaisun höyryt voidaan korvata jopa kokonaan kuumilla vesillä. (KnowPulp 2024.)

Valkaisussa kertaalleen hyödynnettyjä emäksisten alkalivaiheiden suodoksia voidaan käyttää uudelleen pesuvesinä emäksisen happidelignifioinnin tai keittimen jälkeisissä pesuissa. Tällöin emäksiset suodosvedet saadaan ohjattua tehtaan kemikaalikiertoon ja niissä olevat kemikaalit voidaan ottaa talteen. Rajoittavaksi tekijäksi kuitenkin tulee suodosten sisältämät kloorijäämät, joiden takia kaikkia suodoksia ei voida ottaa lipeäkiertoon sellaisenaan. Osa voidaan hyödyntää valkaisemattoman massan pesussa tai kaustistamolla. Talteenottolinjan kloorin ja vierasaineiden poistokyky määrää määrän. (KnowPulp 2024.)

Happamat suodokset ovat vielä haastavampia hyödyntää uudelleen. Happamat suodokset kelatointi-, klooridioksidi- ja otsonivaiheista soveltuvat lähinnä valkaisuun saapuvan massan laimennukseen. Valkaisun hapan vaihe on ensimmäinen hapan vaihe massan valmistuksessa, joten siihen kertyy suurin osa puun sisältämistä kivennäisaineista ja raskasmetalleista (KnowPulp 2024). Haaste happamissa suodoksissa on niiden sisältämät metallit ja positiivisesti varautuneet ionit eli kationit. Isoimmat ongelmanaiheuttajat ovat barium, kalsium ja magnesium (Ala-Kaila 2024). Nykyinen tyypillinen ratkaisu valkaisun happamien suodosten kierrätetykseen on hoitaa se valkaisussa itsessään mahdollisuuksien mukaan ja yli jäävä osa käsitellä erillisellä laitteistolla. Esimerkiksi haihduttamalla ja hapettamalla. (KnowPulp 2024.)

4.2.2 Valkaisun jätevedet

Tyypillisesti jätevedet sisältävät puukuituja sellaisenaan ja muuntuneina ns. ”puupolymeereinä”, prosessikemikaaleja, niiden reaktiotuotteita, täyteaineita ja muita lisäaineita. Jätevesien koostumus vaihtelee suuresti ja useimmiten seurattavia arvoja ovat niiden AOX-, BOD- ja COD-kuormitus, kiintoainepitoisuus, ravinteet kuten fosfori ja typpi, klooriorgaaniset aineet, väri ja myrkyllisyys. (Dahl 2008)

Valkaisun jätevesien BOD ja COD arvot riippuvat hyvin pitkälti valkaisuun tulevan massan kappaluvusta, eli karkeasti ligniinipitoisuudesta. Sen takia havupuusellun tuotannon jätevedet ovat yleensä kuormittavampia kuin lehtipuusellun. Kokonaisuutena valkaisun jätevesien koostumuksen tarkempi arviointi on erittäin hankalaa ja muutokset käytetyissä kemikaaliannoksissa voivat aiheuttaa hyvinkin arvaamattomia muutoksia tarkemmissa koostumusmittauksissa. (Dence & Reeve 1996)

Valkaisun jätevesissä haasteen tuo kloori. Prosessissa kloorin reagoidessa ligniinin kanssa muodostuu reaktiotuotteina orgaanisia klooriyhdisteitä eli TOCl:iä. Näitä yhdisteitä on löydetty valkaisun jätevesistä yli kolmeasataa erilaista (Dence & Reeve 1996). Tunnettuja yhdisteitä on eriteltynä taulukossa 1. Suuresta määrästä huolimatta yhdisteistä tunnetaan arviolta vain 10–30 % (Dahl 2008). Yhdisteitä määritetään jätevesistä aktiivihiilen avulla COD ja BOD mittareilla sekä AOX-menetelmällä. Vesistöjen kannalta haitallisimpia näistä ovat pienimolekyyliset klooriyhdisteet, jotka ovat myrkyllisiä. Pienimolekyylisiä yhdisteitä on haastavaa poistaa erikseen jätevesistä, joten nykyisin pyritään vähentämään kaikkia AOX-päästöjä. Klooripäästöt kasvoivat valkaisuasteen kasvaessa alkuajoilta aina 1980-luvulle asti. Elementaalikloorin käytön lopettaminen ja jätevedenkäsittelylaitosten yleistyminen käänsivät kuitenkin päästöt laskuun. Jätevesien AOX-kuormitus on laskenut 1992 ja 2022 välillä yli 90 %. Nykyisin on havaittu, että aktiivilietelaitos kykenee poistamaan AOX päästöistä 30–50 % ja tietyistä pienimolekyylisistä klooriyhdisteistä jopa 70–95 %. Prosessien kehittyessä myös biologiset ja kemialliset BOD- ja COD-päästöt ovat laskeneet huomattavasti. (KnowPulp 2024.)

Taulukko 1 Klooriyhdisteitä valkaisun jätevesissä. (Dence & Reeve 1996.)

Klooriyhdisteen tyyppi	Tunnettuja erilaisia yhdisteitä
Hapot, esterit, anhydridit, furanonit, pyronit	77
Fenolit ja fenoliesterit	52
Aldehydit ja ketonit	66
Hiilivedyt	75
Alkoholit	25
Dioksiinit ja furaanit	20
Sekalaiset	15
Yhteensä	330

TCF- ja ECF-valkaisimoiden jätevesissä ei ole havaittu suuria eroja ympäristövaikutusten kannalta. TCF-jätevesissä on havaittu olevan enemmän pienimolekyylistä ainesta, vaikkakin orgaanisen aineen kokonaismäärässä ei ole selkeitä eroja. AOX-kuormitus riippuu kokonaan käytetyistä kemikaaleista. Aktiivilietelaitoksen avulla jätevesistä voidaan poistaa tehokkaasti erilaisia orgaanisia yhdisteitä, jolloin jätevesien ympäristövaikutukset jäävät pieniksi. Puhdistamattomat jätevedet ovatkin alle 30 % laimennoksina myrkyllisiä. Jätevesi on siis tarpeen käsitellä ennen vesistöihin laskua. Tutkimusten mukaan havupuusellun valkaisusta tulevat jätevedet aiheuttavat hieman enemmän muutoksia ekosysteemissä, kuin lehtipuusellun. Kokonaisuutena jätevesien sisältämän orgaanisen aineen määrän on todettu vaikuttavan ympäristökuormitukseen, mutta AOX-päästöjen ja kuormituksen välistä yhteyttä ei ole voitu osoittaa. Valkaisujätevesien vaikutukset ympäristöön ovat lähinnä kemiallisia, eivätkä ne rehevöitä vesistöjä yhtä paljon kuin suovedet tai yhdyskuntajätevedet. (Tana et al. 1999.)

5 Haihdutuslaitteistot

Haihdutin on laite, jolla erotetaan vettä liuoksesta, joka sisältää kiintoainetta tai muita haihtumattomia aineita. Kun liuokseen tuodaan lämpöä, alkavat siinä olevat haihtuvat yhdisteet haihtua. Yleisin käyttökohde haihduttimille metsäteollisuudessa on mustalipeän haihduttaminen korkeampaan kuiva-ainepitoisuuteen. Tyypillisesti mustalipeähaihduttamot ovat sarjahaihduttamoita. Joissakin tapauksissa ensimmäisiä vaiheita on korvattu MVR-haihduttimilla (Adven n.d.). Haihdutusta voidaan hyödyntää myös jäähdytyksessä, mikäli jäähdytystehoa ei ole tarpeeksi saatavilla tai jäähdytyspiiriä halutaan sulkea (Metsä Group 2023 b). (Tikka 2008.)

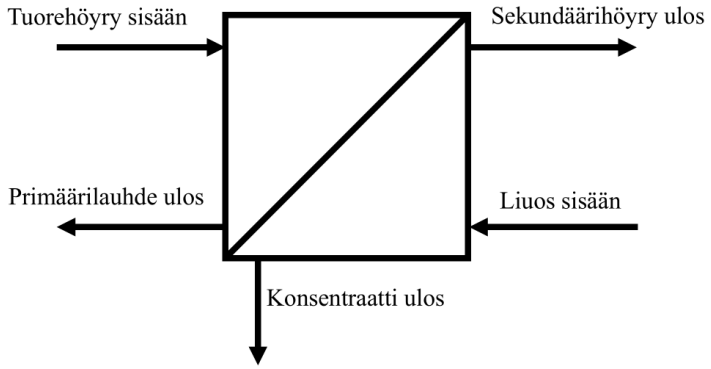
5.1 Höyryhaihdutus

Höyryhaihduttimella haihdutetaan liuoksesta haihtuvia aineita höyryn avulla. Haihduttimessa on kaksi toisistaan erillistä kiertoa, jotka ovat erotettu toisistaan lämmönsiirtopinnalla. Pinnan toiselle puolelle syötetään liuosta, jota halutaan haihduttaa. Toiselle puolelle syötetään höyryä. Yleensä höyrypuolella käytetään matala- tai välipainehöyryä. Myös muualta tehtaalta saatavia kuumia hönkiä voidaan käyttää haihduttimen lämmönlähteenä. Useimmiten haihduttamot koostuvat useasta eri yksiköstä, mutta haihdutustarpeen ollessa pieni myös yksittäisiä yksiköitä käytetään. (Tikka 2008.)

5.1.1 Höyryhaihdutusyksikkö

Yhdellä yksiköllä varustetun haihduttamon toimintaperiaate on hyvin yksinkertainen, kuva 8. Yksikön höyrypuolelle tuodaan tuorehöyryä. Tuorehöyry tiivistyy nesteeksi lämpöpinnoille ja luovuttaa sisältämänsä lämpöenergian pintaan. Muodostunut puhdas primäärilauhde laskeutuu yksikön höyrypuolen pohjalle, josta se voidaan kerätä talteen. Yksikön haihdutuspuolelle tuodaan liuosta, jota halutaan haihduttaa. Liuos ohjataan lämpöpinnalle, josta se vastaanottaa höyryn luovuttamaa lämpöä. Mikäli liuos ei ole kylläisessä tilassa se lämpenee ensin, mutta muutoin liuoksen sisältävät haihtuvat yhdisteet alkavat haihtua heti.

Liuoksesta syntyvä höyry, eli sekundäärihöyry, sisältää myös muita haihtuvia yhdisteitä kuin vettä. Muodostuneet höyryt ohjataan pois yksiköstä keräilyyn. (Tikka 2008.)

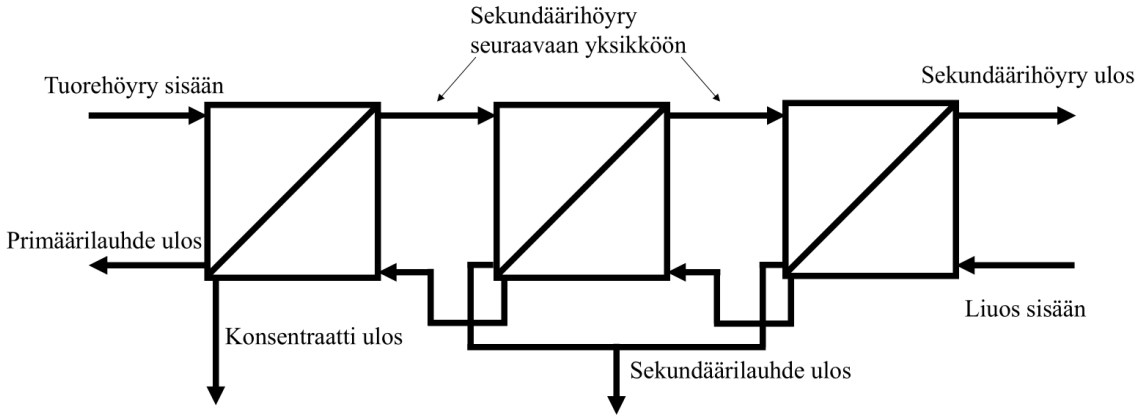


Kuva 8 Yksinkertaistettu kaaviokuva haihdutusyksiköstä.

Yhden yksikön haihdutuksessa höyrynkulutus on kutakuinkin sama tai hieman korkeampi, kuin haihdutukseen tarvittava, olettaen, että liuos on kylläistä. Höyrynkulutus kasvaa, jos liuosta pitää lämmittää ennen haihdutusta. (Tikka 2008.)

5.1.2 Sarjahaihduttamo

Sarjahaihduttamon toimintaperiaate on kutakuinkin sama kuin yhden yksikön haihduttamossa, kuva 9. Ensimmäiseen yksikköön tuodaan tuorehöyryä, josta muodostuneet lauhteet otetaan talteen primäärilauhteina. Liuoksesta muodostuneita sekundäärihöyryjä ei ohjata nyt keräilyyn, vaan seuraavaan, viileämpään ja matalammassa paineessa olevaan yksikköön. Seuraavassa yksikössä liemi ei ole vielä yhtä väkevää ja sen kiehumispiste on alhaisempi. Tässä yksikössä sekundäärihöyryllä korvataan primäärihöyry. Tapahtuvat ilmiöt ovat kuitenkin täysin samat. Erona on, että muodostuneet sekundäärihöyryt ohjataan edelleen seuraavaan yksikköön. Sekundäärihöyrystä muodostuneet sekundäärilauhteet otetaan keräilyyn erilleen primäärilauhteista, sillä ne sisältävät vesihöyryn lisäksi muita höyrystyneitä aineita. Kuumempien yksiköiden sekundäärihöyryt sisältävät näitä vähemmän kuin viileämpien. Viimeisestä yksiköstä, jonne liuos syötetään, ohjataan sekundäärihöyryt keräilyyn. Useimmiten viimeisen yksikön höngät lauhdutetaan pintalauhduttimella nesteeksi. (Tikka 2008.)

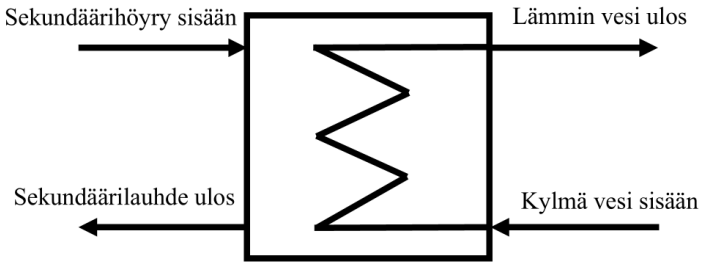


Kuva 9 Yksinkertaistettu kaaviokuva kolmen haihdutusyksikön sarjahaihduttamosta.

Sekundäärihöyryjen käytön ansiosta tuorehöyryn tarve laskee noin kolmannekseen kolmella yksiköllä varustetussa haihduttamossa ja neljännekseen neljällä jne. Todellisuudessa höyryä kuluu hieman enemmän, mutta höyrytaloutta voidaan edistää käyttämällä sarjassa useampaa yksikköä. Haihduttamo on yksi isoimmista höyrynkuluttajista sellutehtaalla. (Tikka 2008.)

5.1.3 Pintalauhdutin

Pintalauhduttimella lauhdutetaan sarjahaihduttamon viileimmästä yksiköstä tulevat sekundäärihöyryt. Samalla tuotetaan lämmintä vettä. Pintalauhduttimen yksinkertaistettu virtauskaavio on esitetty kuvassa 10. Höyryt imetään alipaineen avulla pintalauhduttimeen. Alipaine muodostuu, kun tuleva sekundäärihöyry lauhtuu lämpöpinnoille, jolloin sekundäärihöyrypuolella olevan aineen tilavuus pienenee. Lämpöpintojen toisella puolella virtaa kylmää vettä, joka vastaanottaa höyryjen sisältämän lämpöenergian. Alipaineen suuruus riippuu pintalauhduttimelta poistuvan lämpimän veden lämpötilasta. Poistuva lämmin vesi pyritään yleensä pitämään alle 50 °C lämpötilassa sopivan painetason ylläpitämiseksi. Sekundäärihöyryjen sisältämät lauhtumattomat kaasut poistetaan pintalauhduttimesta tyhjiön ylläpitämiseksi tyhjiöpumpulla. (Tikka 2008.)



Kuva 10 Yksinkertaistettu kaaviokuva pintalauhduttimesta.

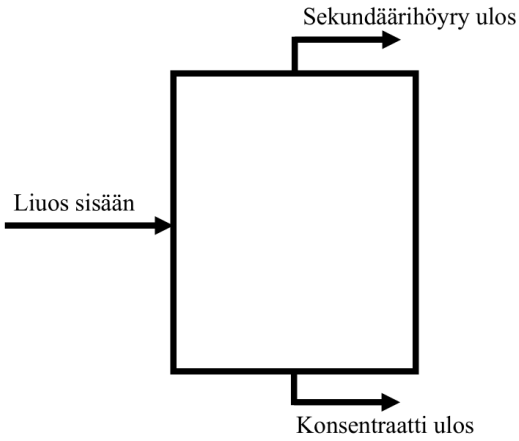
Pintalauhduttimelta tulee suuria määriä lämmintä vettä, joita voidaan käyttää muualla. Moderneilla biotuotetehtailla tuotetun lämpimän veden lämpötila on tyypillisesti 40–45 °C ja virtausmäärä noin 2 m^2/ADt (Saarinen 2024). Pintalauhduttimesta on olemassa myös erilaisia variaatioita erilaisilla kytkentä- ja lämmönsiirtoratkaisuilla. Tyypillisin kuitenkin on vesijäähdytteinen versio. Joissakin tapauksissa pintalauhduttimeen on yhdistetty puhaltimia, jolloin se toimii jäähdytysvesitornin tavoin. Tällöin pintalauhduttimella ei voida tuottaa lämmintä vettä. (Tikka 2008.)

5.2 Flash-haihdutus

Flash-haihdutus perustuu nimensä mukaisesti flashing-ilmiöön. Ilmiö on erittäin nopea faasimuutos, jossa neste alkaa kiehua paineen laskiessa nopeasti kylläisyyspisteen alle. Käytännössä ilmiö alkaa silloin, kun nesteen lämpötila on muutaman asteen korkeampi kuin sen paineen kylläisyyslämpötila. Reaktiossa syntyvä konsentraatti sekä haihtuva osuus jäähtyvät uuden paineen kylläisyyslämpötilaan. Yksivaiheista flash-haihdutusta hyödynnetään metsäteollisuudessa tyypillisesti keittimeltä tulevien kuumien virtojen haihdutuksessa ja mustalipeähaihduttamolla yksiköiden paisunta-astioissa (Tikka 2008). (Mansour & Müller 2019.)

5.2.1 Flash-haihdutusyksikkö

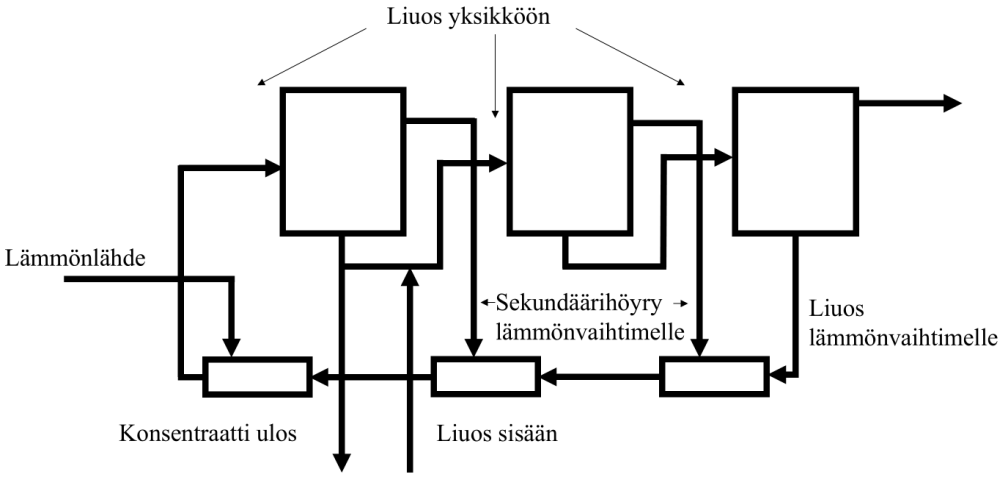
Haihdutuskäytössä paineenlasku toteutetaan yleensä suuttimilla. Liuos ohjataan suuttimen läpi paineastiaan, jossa on huomattavasti matalampi paine kuin putkilinjassa ennen suutinta. Kuvassa 11 on yksinkertaistettu flash-haihdutin. Liuoksen tulee olla ennen suutinta tarpeeksi kuumaa ja paine-eron suuttimen yli tarpeeksi korkea, että ilmiö tapahtuu. Vain osa suuttimen läpi tulevan liuoksen haihtuvista haihtuu. Nesteeksi jäävä osa viilenee sen luovuttaessa lämpöenergiaa faasimuutokseen. (Mansour & Müller 2019.)



Kuva 11 Yksinkertaistettu kaaviokuva flash-haihdutinyksiköstä.

5.2.2 Flash-sarjahaihdutin

Flash haihduttimia voidaan myös kytkeä sarjaan. Sarjaan kytkemällä haihdutettavaa nestettä ei tarvitse lämmittää niin paljoa ennen haihdutusta. Kuvassa 12 on yksinkertaistettu kaavio useamman flash-yksikön sarjahaihduttamosta. Teoriassa tarpeeksi suurella kierrolla kaikki muodostuva höyry voidaan käyttää tulevan liuoksen esilämmitykseen. (Tikka 2008.)

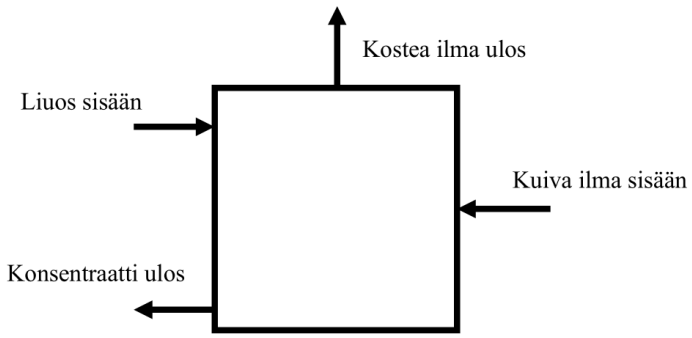


Kuva 12 Yksinkertaistettu kaaviokuva flash-sarjahaihduttamosta.

Flash-haihduttamon sarjakytkentä on monimutkainen. Yksiköstä poistuva liuos kulkee usean eri lämmönvaihtimen läpi. Kussakin lämmönvaihtimessa liuoksen lämpötila nousee, kun kuumemman yksikön höyryt luovuttavat siihen energiaa lauhtuessaan. (Tikka 2008.)

5.3 Jäähdytystorni

Jäähdytystornin päätehtävä on jäähdyttää sinne tuotavaa nestettä. Flash-haihduttimen tavoin se jäähdyttää liuosta höyrystämällä siitä osan, joten jäähdytystornia voidaan pitää myös eräänlaisena haihduttimena. Kuvassa 13 on havainnollistettu jäähdytystornin toiminta. Lämmin liuos syötetään jäähdytystorniin suuttimilla, jotka ruiskuttavat liuoksen pieninä pisaroina tornin sisälle. Haihdutusta usein tehostetaan käyttämällä tornin sisällä täytemateriaalia, johon liuos ruiskutetaan. Täytemateriaalina voidaan käyttää esimerkiksi metalliverkkoja tai kennorakenteita. Sen tehtävänä on kasvattaa lämmönsiirtopinta-alaa ja tehostaa haihtumista. Torniin luodaan ilmavirta, jonka avulla saadaan poistuvan tilalle tornin alaosasta tai sivuilta kuivaa ulkoilmaa. Kuiva ilma virtaa märän täyteaineen läpi, jolloin osa nesteestä haihtuu ilmaan loppujen tippuessa alaspäin tornin pohjalle. Haihtuminen kuluttaa nesteessä olevaa lämpöenergiaa ja haihtumatta jäänyt neste jäähtyy. Jäähtynyt neste voidaan palauttaa takaisin kiertoon. Kostea ilma jatkaa matkaa ylöspäin ulos tornista. Tämä on ilmeinen heikkous jäähdytystornien käytössä haihdutuksessa, sillä haihtuvaa jaetta ei saada talteen ilman erillistä talteenottolaitteistoa. (Deltacooling 2022.)



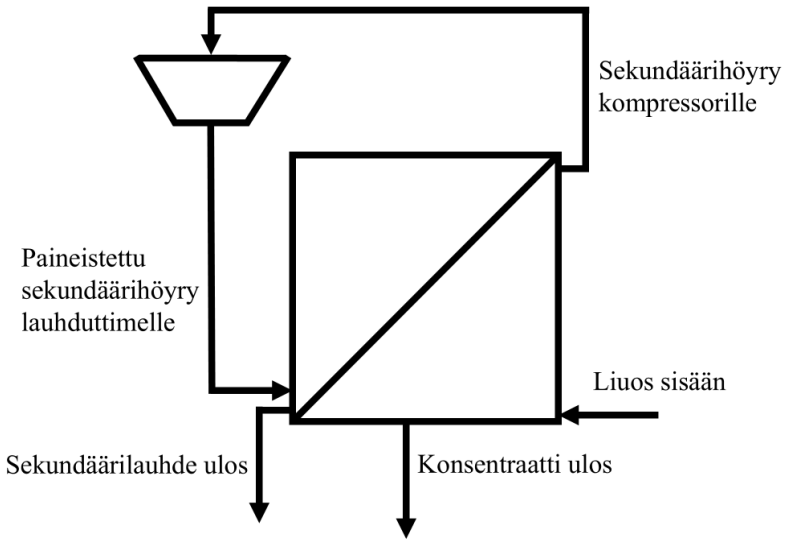
Kuva 13 Yksinkertaistettu kaaviokuva jäähdytysvesitornista.

Jäähdytystornin ilmakierrosta on olemassa erilaisia versioita. Yleisimmät ovat luonnonvedolla, puhaltimilla ja ristivedolla varustetut versiot. Luonnonveto perustuu savupiippuilmiöön. Tällaisissa torneissa liuoksen lämmittämä ilma kohoaa alhaalta ylös ja synnyttää ylipainetta tornin yläosiin. Tämä ilmiö tapahtuu luonnostaan ilman puhaltimia ja siten voidaan säästää käyttökuluissa. Luonnonvetoon perustuvat tornit ovat usein todella isoja. Puhaltimilla varustetut tornit käyttävät puhaltimia ilman liikuttamiseksi. Puhaltimet voidaan asentaa tornin yläpäähän, jolloin ne imevät kostean ilman lävitseen ja kuiva korvausilma tulee torniin sen alaosista. Toinen vaihtoehto on laittaa puhaltimia tornin alaosiin, jolloin ne

imevät lävitseen kuivaa ulkoilmaa ja puhaltavat sen tornin yläosista ulos. Ristiveto on tästä muunnelma, jossa puhaltimet on sijoitettu horisontaalisesti. Tällä tavoin tornista ei tule niin korkea, mutta se vaatii enemmän maapinta-alaa. Puhaltimilla varustetut tornit ovat kokoonsa nähden tehokkaampia, mutta niiden käyttökulut ovat korkeammat. (Gurney & Cotter 1966.)

5.4 MVR-haihdutin

MVR-haihdutin eli termokompressorihaihdutin perustuu sekundäärihöyryn paineen ja lämpötilan kohottamiseen kompressorin tai korkeapainepuhaltimen avulla. MVR-haihduttimen yksinkertaistettu virtauskaavio on kuvassa 14. Siinä imetään sekundääripuolelta höyryä kompressorille, joka paineistaa sekundäärihöyryn kasvattaen sen saturaatiolämpötilaa. Tämän jälkeen paineistettu höyry johdetaan primääripuolelle, jossa se lauhtuu lämpöpinnalle höyrystäen liuosta sekundääripuolella. Lauhtunut sekundäärihöyry poistetaan sekundäärilauhteenkäsittelyyn ja liemestä höyrystyvä sekundäärihöyry menee kompressorille. (Tikka 2008.)



Kuva 14 Yksinkertaistettu kaaviokuva MVR-haihduttimesta.

MVR-haihduttimia voidaan käyttää lähinnä laihoille liemille ja mustalipeälle, jonka kuiva-ainepitoisuus on alle 25 %. Haihduttimen kompaktin koon ansiosta se on helppo lisätä jälkikäteen jo olemassa olevaan järjestelmään, jos kaivataan lisähaihdutustehoa. Höyryä tarvitaan lähinnä vain käynnistysvaiheessa, eikä jäähdytysvettäkään juuri kulu. Kompressori kuitenkin kuluttaa jonkin verran sähköä. (Tikka 2008.)

6 Valkaisun happaman suodoksen haihduttaminen

Ympäristöluvat asettavat reunaehdot toiminnalle, joten luparajojen saavuttaminen on erittäin tärkeää. Vaikka modernit biotuotetehtaat ovat kehityksessä huimasti vanhoja edellä, on jatkuvalle parantamiselle edelleen tilaa. Kuten Kemin tapauksessa havaittiin, aiheuttavat myös puhtaat jäähdytysvedet lämpökuormansa puolesta haasteita ympäristölupaprosessissa. Haasteena on yhä jätevesimäärän vähentäminen. Helpot keinot suurien vesimäärien vähentämiseksi on käytetty, joten nykyisin tehtävät parannukset eivät ole yksittäin kovin näkyviä ja vaikuttavia. Useilla pienillä parannuksilla voidaan kuitenkin saavuttaa kokonaisuuden kannalta merkittäviä muutoksia, joten myös pienempiin kohteisiin on syytä panostaa. Yksi ratkaisu jäteveden määrän vähentämiseksi olisi haihduttaa siitä osa. Valkaisusta poistuva hapan jae on merkittävä osa tehtaan jätevesiä, eikä sillä ole jatkokäyttökohdetta. Se olisi varsin mielenkiintoinen haihdutettava liuos. Jos haihdutuksessa voidaan hyödyntää sekundäärienergiaa tai muutoin tehtaalta poistuvaa jäähdytysvettä, voitaisiin samalla pienentää vesistöön kohdistuvaa lämpökuormaa. Suodoksen ominaisuuksia ja sekundäärienergian reunaehtoja arvioitaessa lähtökohtana on käytetty erästä pohjoismaalaista modernia tuotantolaitosta.

6.1 Valkaisusta poistuva suodos

Tehtaan jätevesien suurimpia yksittäisiä lähteitä on valkaisu. Valkaisusta poistuu happaman suodoksen lisäksi alkalisia suodoksia. Valkaisun hapan vaihe on ensimmäinen hapan vaihe sellun valmistuksessa, joten metallit kertyvät happamiin pesuvesiin. Alkalisissa suodoksissa ei ole juurikaan metalleja ja siksi niitä on helppo kierrättää valkaisun vaiheesta toiseen.

Valkaisun happamat suodokset sisältävät metallien lisäksi erilaisia suoloja ja ioneita. Varsinkin rikkihappoa käyttäessä vesiin syntyy paljon erilaisia molekyylejä ja vedet ovat siksi koostumuksensa takia haastavia kierrätettäviä ja ne joudutaan usein ajamaan hyvinkin laimeina jätevedenpuhdistamolle. Puhdistamolle kuumien valkaisujakeiden ajaminen on ongelmallista, sillä korkeat lämpötilat haittaavat biologisen jätevedenpuhdistamon bakteerien toimintaa. Poistuvat jakeet saataisiin pidettyä kemiallisesti yksinkertaisempina käyttämällä rikkihapon sijasta suolahappoa. Suolahappoa käyttäessä ei poistuviin vesiin muodostu rikin yhdisteitä ja muun muassa bariumsulfaattia ei saostu laitteisiin.

6.1.1 Suodoksen laatu

Valkaisun hapan suodos on nimensä mukaisesti hapanta. Suodos on nestettä, jonka seassa on liuenneena massanvalmistuksessa puusta irronneita aineita ja kemikaaleja. Siksi sen tarkkaa koostumusta on haastavaa arvioida. Tärkeimmät ominaisuudet ovat liian korkea lämpötila, jotta sen voisi laskea sellaisenaan jätevedenpuhdistamolle, matala pH-taso ja liuenneet kuiva-aineet. Suodoksen laatu ja sen erityisominaisuudet tulee huomioida haihdutusta suunniteltaessa. Taulukossa 2 on esitetty tutkitun tapauksen kannalta olennaisia valkaisun happaman suodoksen ominaisuuksia.

Taulukko 2 Valkaisun happaman suodoksen ominaisuuksia.

Lämpötila [°C]	pH	Kuiva-ainepitoisuus [%]	Virtaama [m^3/ADt]	Virtaama [kg/ADt]	Energiamäärä [MJ/ADt]
60	3,0	5,0	5,0	5175	1235

Suodos sisältää massasta liuenneita kiintoaineita. Kiintoaineet lisäävät liuoksen massaa. Tämän takia sen tiheys on suurempi kuin puhtaan veden. Suurimmilta osin on suodos kuitenkin vettä, joten sen lämmönsiirrollisten ominaisuuksien voidaan olettaa olevan vettä vastaavat.

6.2 Sekundäärienergian lähteet

Energian säästämiseksi sekä jäähdytysveden lämpötilan ja määrän laskemiseksi haihduttamiseen on järkevää käyttää sekundäärienergiaa. Sekundäärienergia on peräisin jostain prosessin vaiheesta, jossa käytetään energiaa. Sekundäärienergia on yli jäävää energiaa, joka poistuu prosessin vaiheesta esimerkiksi kuumien pesuvesien tai jäähdytysveden mukana.

Valkaisun pesuvedet sisältävät paljon sekundäärienergiaa, sillä ne poistuvat kuumista valkaisuvaiheista. Happamat pesuvedet johdetaan jätevedenpuhdistamolle, jossa kuumat vedet voivat vahingoittaa biologisen puhdistamon eliökantaa, mikäli niitä ei jäähdytetä ennen biologista puhdistusta. Useimmiten puhdistamolle menee muita viileämpiä jakeita sen verran, ettei erillistä jäähdytystä tarvita. Kuitenkin joissain tapauksissa jätevesiä jäähdytetään ennen puhdistamoa (Ala-Kaila 2024). Jätevesiä jäähdytettäessä puhdistamon lämpötilat eivät pääse kohoamaan liian korkeiksi. Toisaalta samalla pienennetään vesistöön kohdistuvaa

lämpökuormaa, mikäli jäähdytyksessä käytetään jäähdytystornia tai muuta ratkaisua, jossa lämpökuormaa ei pureta vesistöön. Tällöin jätevesien sisältämä sekundäärienergia menetetään.

Jäte- ja jäähdytysvesien lisäksi sekundäärienergiaa jää käyttämättä kuumien ja lämpimien vesien mukana. Kuumia ja lämpimiä vesiä muodostuu tehtailla paljon. Normaalitilanteessa kaikki kuumat ja lämpimät vedet tuotetaan muiden prosessien ohessa. Esimerkiksi mustalipeähaihduttamolta saadaan suuria määriä primääri- ja sekundäärilauhteita talteen. Tällöin niiden valmistamiseen ei kulu primäärienergiaa. Primäärilauhteet muodostuvat lauhtuvasta tuorehöyrystä, joten ne voidaan palauttaa puhtaiden lauhteiden kiertoon. Sekundäärilauhteita käytetään esimerkiksi valkaisun pesuvesinä. Kuumia vesiä kuitenkin syntyy niin paljon, että koko määrää ei saada aina hyödynnettyä. Tällöin säiliöt tulevat täyteen ja kaatavat yli. Yli kaatava osuus menetetään ja se ohjautuu puhtauden mukaan joko suoraan tai jätevedenpuhdistamon kautta vesistöön.

Suurin yksittäinen lämpimän veden tuottaja tehtaalla on pintalauhdutin. Pintalauhduttimelta saadaan satoja, jopa tuhansia litroja sekunnissa noin 45 asteista vettä. Vettä kuluu, kun haihduttamon päässä viimeisen yksikön jälkeen lipeästä haihtunut höyry pitää saada lauhdutettua nesteeksi. Painetaso pintalauhduttimessa on matala, joten lauhduttamiseen tarvitaan verrattain viileää vettä. Käytännössä jäähdytykseen käytetään niin kylmää vettä, kuin vain on saatavilla. Jäähdytysveden lämpötila vaihtelee vuodenaikojen mukaan kesän kahdestakymmenestä asteesta talven miltei nollaan asteeseen (Ilmatieteenlaitos 2021).

6.2.1 Sekundäärienergian reunaehdot

Sekundäärienergian lähteitä on moderneilla tehtailla runsaasti. Suurin osa niistä on hyödynnetty tehokkaasti, eivätkä ne sisällä suuria määriä energiaa korkeissa lämpötiloissa. Käytännössä kaikki tehtaalta poistuvat jakeet ovat prosessinäkökulmasta viileitä, mutta määrältään suuria.

Tässä työssä tarkasteltaviksi sekundäärienergian lähteiksi on valittu valkaisusta poistuva hapan suodos, jota halutaan haihduttaa. Lisäksi pintalauhduttimelta saadaan suuri määrä lämmintä vettä, joten siinä on saatavan suuri määrä energiaa, joskin se on suhteellisen laimeassa muodossa. Korkeampia lämpötiloja saadaan sekundäärilauhteen, sekä kuuman veden

ylimääristä. Niiden haasteena on pienet virtausmäärät, jolloin energiamäärä jää melko vähäiseksi. Sekundäärienergian reunaehdot on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3 Sekundäärienergian reunaehdot.

Sekundäärienergian lähde	Lämpötila [°C]	Virtaama [m^3/ADt]	Energiamäärä [MJ/ADt]
Valkaisun hapan suodos	60	5,0	1235
Pintalauhduttimen lämmin vesi	45	30,0	5598
Sekundäärilauhteen ylijäämä 1	80	0,75	244
Sekundäärilauhteen ylijäämä 2	60	1,1	272
Kuuman veden ylijäämä	60	0,1	25

Selvästi suurin energiamäärä saadaan pintalauhduttimelta tulevasta lämpimästä vedestä. Haasteena siinä on matalahko lämpötila. Kuumemmista jakeista suodoksessa on hyvä määrä energiaa, mutta sekundäärilauhteiden ja kuuman veden virtausmäärät ovat niin pienet, että energiamäärät jäävät vähäisiksi.

6.3 Haihdutus

Haihdutettaessa käytetään energiaa nesteen olomuodon muuttamiseksi kaasuksi. Samalla nesteen määrä vähenee. Mikäli nesteen seassa on muuta haihtumatonta ainetta, sen määrä ei muutu. Käytännössä siis saadaan vähennettyä liuosten sisältämää vesimäärää, jolloin niissä olevat epäpuhtaudet rikastuvat ja kuiva-ainepitoisuus liuoksessa kasvaa. Keinoa on käytetty jo pitkään metsäteollisuudessa mustalipeän polttoa edeltävässä haihdutuksessa. Tällä tavoin mustalipeän lämpöarvo kasvaa, kun sen palaessa energiaa ei kulu veden haihtumiseen. Samalla lipeän sisältämä kuiva-ainemäärä mahtuu huomattavasti pienenpään tilaan vesimäärän vähentyessä. Samaa keinoa voitaisiin hyödyntää jätevesissä. Erilaisten haihduttimien avulla pystytään pienentämään valkaisusta poistuvan happaman suodoksen jätevedenpuhdistamolle päätyvää määrää. Jätevesimäärän pienentäminen vähentää biologisen jätevedenpuhdistamon hydraulista kuormitusta. Kiintoainemäärä pysyy samana, mutta nesteiden määrä vähenee.

Kun jätevesistä poistetaan vettä, myös niiden sisältämä lämpömäärä vähenee. Vedellä on korkea ominaislämpökapasiteetti ja haihtumisenergia, joten sen haihduttaminen kuluttaa paljon energiaa. Haihduttamalla voidaan pienentää jätevesien tilavuusvirtaa, sekä jätevedenpuhdistamoon kohdistuvaa lämpökuormaa. Valkaisun jätevedet ovat usein noin 60 asteisia.

Puhdistamon eliökannalle tämä on liian korkea lämpötila, jonka takia joillakin tehtailla vesiä joudutaan erikseen viilentämään. Yleinen ja helppo keino viilentää jätevesiä on lisätä joukkoon kylmää vettä. Mikäli lämpöä saadaan poistettua jätevesistä haihduttamalla, saadaan puhdistamolle tulevien jätevesien lämpötila pidettyä eliöiden kannalta turvallisella tasolla. Samalla vältytään jätevesien erilliseltä jäähdyttämiseltä. Haihdutettu neste voidaan ottaa talteen. Talteen otettua vettä voidaan hyödyntää uudestaan eri kohteissa.

Saatavien lauhteiden lämpötila ja määrä riippuvat käytetystä haihdutusmenetelmästä. Joillakin haihduttimilla tuotettava lauhde on tarpeeksi lämmintä suoraan käytettäväksi esimerkiksi valkaisun pesuvesinä. Näin ei tarvitse käyttää energiaa erikseen veden lämmitykseen. Kuuman veden tarve kokonaisuudessaan pienenee ja sitä voidaan hyödyntää muissa kohteissa. Samalla valkaisun vesikiertoa saadaan suljettua ja puhdistamolle päätyy vähemmän käyttökelpoista vettä. Näin vesistöön päätyvä lämpökuorma pienenee samalla kun raakaveden kulutus laskee.

6.3.1 Valitut haihdutuslaitteet

Tärkeimmäksi laitteeksi kytkentöihin valittiin jäähdytystorni. Jäähdytystorni ei ole uusi keksintö, vaan se on teknologialtaan yksinkertainen, hyvin tunnettu ja varmatoiminen. Suodoksia joudutaan joka tapauksessa jäähdyttämään ennen kuin ne voidaan ajaa jätevedenpuhdistamolle, jolloin jäähdytystorni on tähän järkevä ratkaisu. Sillä voidaan jäähdyttää suodosta ja samalla haihduttaa siitä osa, jolloin lämpötilat ja virtausmäärät jätevedenpuhdistamolla pienenevät. Jäähdytystornilla aikaan saatu haihdutus hyödyntää haihdutettavan nesteen sisältämää lämpöenergiaa. Lisäksi tarvitaan sähköä ilmavirran kehittämiseksi. Haittapuolena jäähdytystornissa on, ettei haihdutettua nestettä saada talteen, jolloin se karkaa ilmavirran mukana. Sopivissa oloissa tämä saattaa aiheuttaa sankkaa sumua alueelle, joka voi haitata näkyvyyttä. Talvisin sumu voi aiheuttaa liukkautta ja jäätä höyryn härmistyessä pinnoille. Jäähdytystornit voivat olla myös potentiaalisia legionellan levittäjiä.

Seuraava valittu haihdutuslaite on termokompressorihaihdutin. MVR on tehokas haihdutin, jolla saadaan haihdutettua liuoksesta vettä pois. Se on laitteena useimmiten pienikokoinen ja helppo sijoittaa tarvittuun paikkaan. Haihduttimen etuna on myös sen erinomainen soveltuvuus matalan kuiva-ainepitoisuuden liuoksille. MVR-haihduttimia käytetään usein mustalipeähaihduttamoiden esihaihduttimina, joten tässäkin tapauksessa kyseessä ei ole

mitenkään uusi ja vieras laite. Vesi poistuu laitteen primääripuolelta kuumana kylläisenä nesteenä. MVR:llä voidaan siis tuottaa suhteellisen puhdasta kuumaa vettä käytettäväksi tehtaan muissa käyttökohteissa. Myös sekundääripuolelta poistuva konsentraatti on kuumaa, joten sitä täytyy jäähdyttää ennen kuin sen voi johtaa jätevedenpuhdistamolle. Haihdutukseen MVR käyttää lähinnä sähköä, mutta liuos voidaan esilämmittää sekundäärienergialla sopivaan haihdutuslämpötilaan.

Selluteollisuuden tyypillisistä flash-ilmiön käyttökohteista keitin on hyvä esimerkki. Sen paine ja lämpötilat ovat korkeat, joten sieltä poistettava neste on helppo ”flashata” ilmakehän paineeseen. Flash-haihduttimia ei käytetä kovin monissa kohteissa, joissa loppulämpötila on alle 100 °C tai loppupaine on alle ilmakehän paineen. Pienemmän paineen luominen vaatii kaasunpoiston tai tyhjiöpumpun ja muodostuva höyry jonkinlaisen lauhduttimen. Tällöin lämpötilat ja painetasot ovat matalia, joten tilavuuksien on oltava suuria. Samalla myös lauhduttimen jäähdytysveden on oltava tarpeeksi kylmää, jotta matalaa painetta pystytään pitämään yllä. Flash-haihdutin on haastava vaihtoehto happaman suodoksen haihduttamiseen matalien lämpötilojen takia. Koska siinä haihdutukseen hyödynnetään suodoksen sisältämää sekundäärienergiaa, on se otettu mukaan vertailuun ja kytkentävaihtoehtoihin.

Höyryhaihdutin on yleisin jo käytössä oleva haihdutusjärjestelmä sellunvalmistuksessa. Höyryhaihduttimien selkeitä etuja ovat suuri kapasiteetti ja loppukonsentraatin korkea kuiva-ainepitoisuus. Siksi ne ovat oivallisia vaihtoehtoja mustalipeän haihdutukseen. Tässä tapauksessa hapanta suodosta ei haluta haihduttaa korkeaan kuiva-ainepitoisuuteen, joten höyryhaihduttimen tehokkuudelle ei ole tarvetta. Lisäksi sarjahaihduttamot vievät paljon tilaa ja ovat työläitä jälkiasentaa. Lämmönlähteenä niissä käytetään useimmiten tuorehöyryä. Sekundäärienergiaa ei voida juurikaan hyödyntää ja höyrylle on myös monia muita kannattavia käyttökohteita. Siksi höyryhaihdutinta ei ole valittu tarkasteltavaksi vaihtoehdoksi.

Lämmönvaihdin ei itsessään ole haihdutin, mutta on hyvin yleinen ja tärkeä laite tehtaan eri prosesseissa. Sen avulla saadaan siirrettyä lämpöä virtauksesta toiseen ilman, että virtaukset sekoittuvat keskenään. Vastavirtalämmönvaihtimella voidaan virtausten lämpötilat saada keskenään päinvastaisiksi vain muutaman asteen erotuksella. Mikäli virtaukset halutaan saada sekoittumaan, on virtaukset syytä yhdistää toisiinsa esimerkiksi sekoittimella. Sekoitin ei myöskään ole haihdutin, mutta on olennainen komponentti prosessikytkennöissä. Sillä saadaan yhdistettyä kaksi ainevirtaa yhdeksi eli ne saadaan sekoitettua. Tällöin virtausten lämpötila tasoittuu niiden virtausmäärien mukaiseksi keskiarvoksi.

7 Laskennallinen mallinnus

Valkaisun happaman suodoksen haihduttamiseksi kehitettiin useita erilaisia prosessikytkentöjä. Niiden toimintaa mallinnettiin yksinkertaistetusti laskemalla. Kytkentöjä arvioitiin niiden haihdutustehon, haihdutuksen sähkönkulutuksen ja sekundäärilämmön hyödyntämisen perusteella. Tässä kappaleessa käydään läpi laskenta ja kehitetyt kytkentävaihtoehdot.

7.1 Yksinkertaistukset ja oletukset

Tavoitteena oli kehittää useita erilaisia kytkentävaihtoehtoja suodoksen haihduttamiseksi, ei niinkään luoda tarkkoja simulaatioita laitteistoista. Useiden eri vaihtoehtojen arvioimiseksi ja tulosten vertailun kannalta on järkevää tehdä muutamia yleistyksiä. Näitä ovat:

1. Suodoksen lämmönsiirrolliset aineominaisuudet ovat vastaavat kuin vedellä.
2. Lämmönsiirrossa ei tapahdu häviöitä.
3. Lämmönsiirtoa ei tapahdu kytkentöjen komponenttien ulkopuolella.
4. Pumppujen vaikutusta lämmönsiirtoon tai sähkönkulutukseen ei ole huomioitu.
5. Lämmönvaihtimissa lämpötilaero on vähintään 2 °C.
6. MVR-haihduttimessa suodoksen lämpötila nousee 10 °C.
7. Jäähdytystornin puhaltimen hyötysuhde on 0,8 ja paineennousu 100 Pa.
8. Jäähdytystornista poistuva ilman kosteus on 99 % ja lämpötila on sama kuin tulevan suodoksen lämpötila.

Näiden lisäksi jäähdytystornissa käytettävän tuloilman arvot ovat taulukon 4 mukaiset.

Taulukko 4 Jäähdytystornin tuloilman arvoja.

Lämpötila [°C]	Suhteellinen kosteus [%]	Tiheys [kg/m^3]
20	65	1,2

Kytkentöjen laskenta ja suodoksen arvot kussakin kohdassa on tehty näiden oletusten ja yksinkertaistusten avulla.

7.2 Komponenttien laskenta

Kytkentöjä mallinnettiin laskennallisesti. Lähtökohtana laskennassa käytettiin aiemmin esiteltyjä valkaisun happaman suodoksen ominaisuuksia, sekundäärienergian reunaehtoja, tehtyjä oletuksia ja yksinkertaistuksia. Lisäksi h, s -piirrosta hyödynnettiin laskennassa.

7.2.1 Yleispätevät taseet

Oleellisimmat taseet, joiden tulee täsmätä ovat massa- ja energiatase. Kunkin komponentin kohdalla siihen tulevan ja poistuvan massa- ja energiavirran tulee olla yhtä suuret. Massatase on yhtälön 1 mukainen.

$$m_1 + m_2 = m_3 + m_4 \qquad 1$$

, jossa m_1 on primääripuolelle tuleva massavirta, m_2 on sekundääripuolelle tuleva massavirta, m_3 on primääripuolelta poistuva massavirta ja m_4 on sekundääripuolelta poistuva massavirta.

Kun massataseeseen lisätään virtausten sisältämä energia, saadaan yhtälö 2, joka on energiatase.

$$m_1 h_1 + m_2 h_2 = m_3 h_3 + m_4 h_4 \qquad 2$$

, jossa h_1 on primääripuolelle tulevan virran entalpia, h_2 on sekundääripuolelle tulevan virran entalpia, h_3 on primääripuolelta lähtevän virran entalpia ja h_4 on sekundääripuolelta lähtevän virran entalpia.

Virtauksen energiamäärä saadaan yhtälön 3 mukaisesti.

$$E = m \cdot h \qquad 3$$

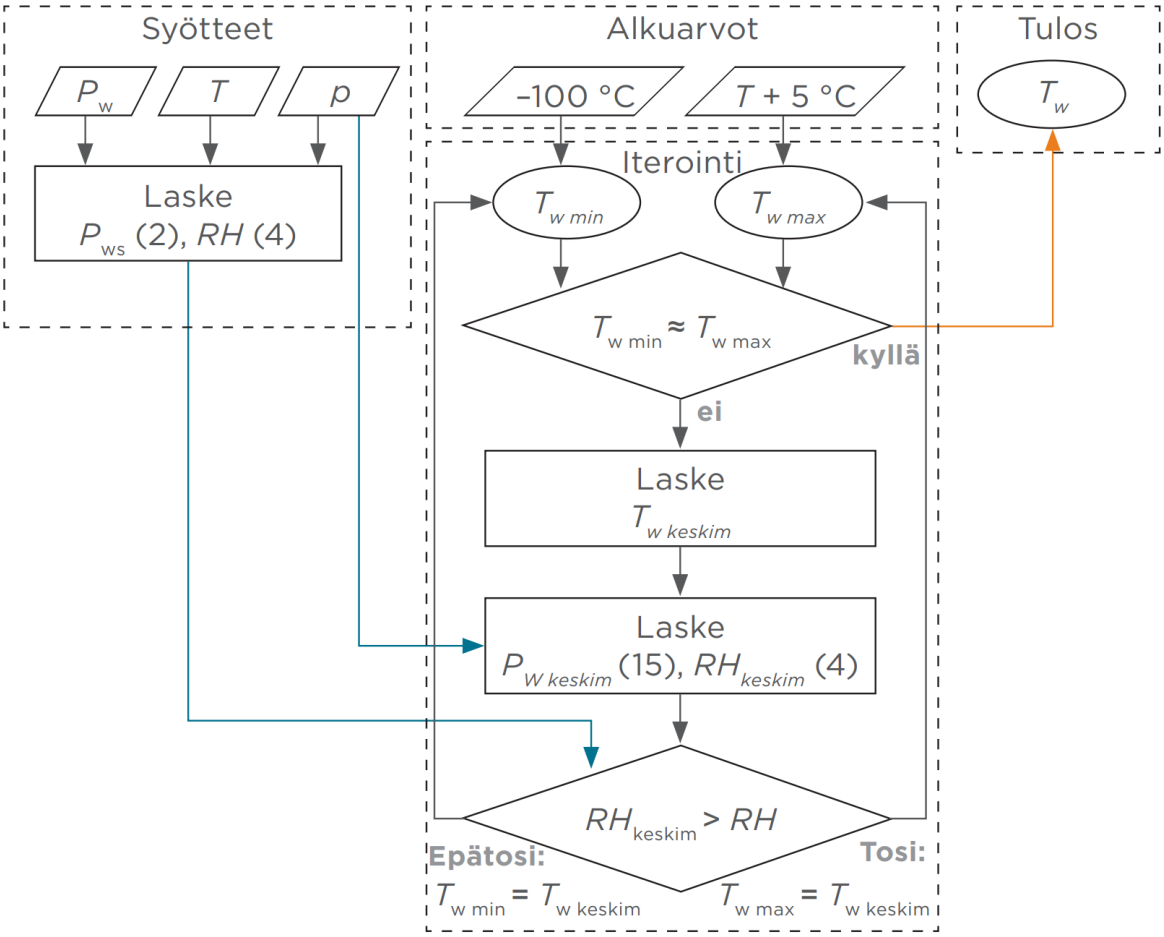
Kiertoaineen on oletettu vastaavan vettä, joten muutokset massa- ja tilavuusvirtoihin ja niiden vaikutukset toisiinsa on helppo laskea tiheyden kautta. Tiheys kussakin lämpötilassa saadaan selvitettyä esimerkiksi h, s -piirroksesta tai erilaisten korrelaatioiden avulla.

Suodoksen sisältämä kiintoaine ei haihdu, joten se kertyy ja kulkee nestemäisen virran mukana. Samalla suodoksen kuiva-ainepitoisuus kasvaa nesteen osuuden pienentyessä.

7.2.2 Jäähdytystorni

Jäähdytystornissa olennaisessa osassa on ilman kyky poistaa lämpöä haihdutettavasta suodoksesta ja kuljettaa haihtunut neste pois. Laitteessa sekoitetaan suodos ilmavirtaukseen, jolloin osa siitä haihtuu samalla kun konsentraatti jäähtyy. Tässä tapauksessa tuleva ilma on lämpötilaltaan 20 °C, kuten myös tornista poistuva suodos. Aina näin ei kuitenkaan tarvitse olla. Jäähdytystornilla voidaan viilentää jäähdytettävä aine saatavilla olevan ilman lämpötilaa matalammaksi. Alinta lämpötilaa, joka voidaan saavuttaa haihduttamalla, kutsutaan märkälämpötilaksi.

Märkälämpötilan laskenta ei ole yksinkertaista. Se täytyy iteroida, sillä laskentaan tarvittava korjauskerroin ja höyryn osapaine ilmassa riippuvat märkälämpötilasta. Kuvassa 15 on Vaisalan vuokaavio märkälämpötilan selvittämiseksi (Vaisala 2021).



Kuva 15 Vaisalan vuokaavio märkälämpötilan laskemiseksi. (Vaisala 2021.)

Kaavio pätee, kun lämpötila on yli -100 °C. Alle 0 °C lämpötiloissa ei kannata käyttää märkälämpötilaa vaan huurrelämpötilaa. Jäähdytystorneissa tämä harvemmin on ongelma, sillä torniin tulevat vedet ovat sen verran lämpimiä, että pakkasilmakin lämpenee reilusti nollan asteen yläpuolelle.

Jätevedenpuhdistamolle laskettavia jakeita ei yleensä jäähdytetä kylmäksi. Riittävä lämpötila on säästä ja altaiden lämpötiloista riippuen 20 … 25 °C. Talvisin puhdistamolle laskettavan suodoksen lämpötila kannattaa pitää korkeampana, jotta lämpötila pysyy tarpeeksi korkeana ja biologinen jätevedenpuhdistus toimii. Siksi tässä tutkimuksessa ei ole käytetty märkälämpötilaa, vaan puhdistamolle soveltuvaa lämpötilaa.

Jotta jäähdytystornin energiatase saadaan laskettua, tulee torniin tuleva ja poistuva energiavirta määrittää. Suodoksen lämmönsiirrollisten aineominaisuuksien on oletettu vastaavan vettä, joten sen entalpia voidaan lukea esimerkiksi h, s -piirroksesta. Tulevan suodoksen massavirta tiedetään, joten nestepuolen tuleva massa ja energia on tiedossa. Ilmapuolen tuleva massavirta riippuu haihdutustarpeesta, joka puolestaan määräytyy nestepuolelta poistettavan lämmön määrästä ja ilman kyvystä kuljettaa haihtunutta suodosta ulos tornista.

Tuloilman lämpötila on 20 °C ja suhteellinen kosteus 65 %. Suhteellinen kosteus kertoo ilman kosteuspitoisuuden suhteen suurimpaan mahdolliseen kosteuspitoisuuteen tietyssä lämpötilassa. Ilman sisältämä vesimäärä eli absoluuttinen kosteus voidaan laskea, kun tiedetään ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus.

Kosteuspitoisuuksien laskemiseksi tulee ensin määrittää kylläisen vesihöyryn paine veden pinnalla (p_{ws}) ja vesihöyryn paine (p_w). Kylläisen vesihöyryn paine voidaan laskea yhtälön 4 ja vesihöyryn paine yhtälön 5 avulla. Yhtälön 4 kertoimet ovat alla taulukossa 5. Yhtälö 4 on nimeltään Sonntagin yhtälö. (Vaisala 2021.)

$$p_{ws}(T_\mathrm{K}) = a_0 \cdot exp\left[\frac{a_1}{T_\mathrm{K}} + a_2 + a_3 T_\mathrm{K} + a_4 T_\mathrm{K}^2 + a_5 \ln(a_6 \cdot T_\mathrm{K})\right] \quad 4$$

, jossa T_K on lämpötila, ja a_n on kerroin.

$$p_w = Rh \cdot p_\mathrm{wS} \quad 5$$

, jossa Rh on suhteellinen kosteus.

Taulukko 5 Kylläisen vesihöyryn paineen eli yhtälön 4 kertoimet a_0-a_6. (Vaisala 2021.)

Kerroin a_n	Kun lämpötila on 0 … 100 °C
a_0	1 Pa
a_1	–6096,9385 K
a_2	21,2409642
a_3	–0,02711193 K^{-1}
a_4	0,00001673952 K^{-1}
a_5	2.433502
a_6	1 K^{-1}

Kylläisen vesihöyryn paineelle on olemassa korjauskerroin, jolla parannetaan yhtälön tarkkuutta suurissa painetasoissa. Sille ei ole tässä tapauksessa tarvetta, sillä paineennousu jäähdytystornin puhaltimessa on pieni ja siten paine on lähellä ilmanpainetta kaikkialla. Vesihöyryn paineiden avulla voidaan laskea ilman sisältämän kosteuden sekoitussuhde yhtälön 6 mukaisesti (Vaisala 2021).

$$x = B\frac{p_\mathrm{W}}{p - p_\mathrm{W}} \qquad 6$$

, jossa B on kerroin 621,97 g/kg ja p on kokonaispaine.

Jäähdytystornin energiataseen laskemiseen tarvitaan myös ilman entalpia. Se lasketaan vesihöyryn paineiden, sekoitussuhteen ja kahden muun tekijän avulla yhtälöllä 7 (Vaisala 2021).

$$h = C_\mathrm{pg} \cdot T + \frac{x}{1000}\left(C_\mathrm{pw} \cdot T + h_\mathrm{we}\right) \qquad 7$$

, jossa C_pg on ilman ominaislämpökapasiteetti, C_pw on vesihöyryn ominaislämpökapasiteetti ja h_we on veden haihtumisenergia.

Ilman entalpian ja sekoitussuhteen avulla voidaan laskea sen kyky jäähdyttää suodosta ja kuljettaa pois haihtunut osuus. Jäähdytystornista poistuvan, haihtumattoman suodoksen massa voidaan laskea yhtälön 8 mukaisesti.

$$m_\mathrm{s2} = m_\mathrm{s1} - (x_2 - x_1) \cdot m_\mathrm{i1} \qquad 8$$

, jossa m_s1 on tulevan nestemäisen suodoksen massa, x_1 on tulevan ilman sekoitussuhde, x_2 on poistuvan ilman sekoitussuhde ja m_i1 on tulevan ilman massavirta.

Tulevan ilman massavirtaa ei tiedetä, mutta se voidaan ratkaista iteroimalla yhtälöiden 2 ja 8 avulla. Poistuvan ilman massa on yksinkertaisesti tulevan ilman ja nestemäisen suodoksen massan muutoksen itseisarvon summa. Tärkeää on huomata, että suodoksesta poistuva energiamäärä on sama, kuin ilman vastaanottama energiamäärä. Näin saadaan jäähdytystornin energia- ja massataseet kohdalleen. Samalla tiedetään, kuinka suuri suodoksesta haihtuu jäähdytystornissa.

Loput arvot saadaan laskettua, kun poistuvan nesteen massavirta tiedetään. Sen tilavuus lukea h, s -piirroksesta lämpötilan avulla. Jäähdytystornista poistuvan suodoksen lämpötilaksi on määritetty 20 °C. Kiintoaineen massavirta ei muutu, joten kuiva-ainepitoisuus kasvaa nesteen määrän vähentyessä. Ilman mukana poistuva energiamäärä saadaan energiataseesta. Ilmaan poistuva energia on peräisin suodoksesta. Ilman kosteuspitoisuus ja sekoitussuhde nousevat huomattavasti jäähdytystornissa, sillä ilma kuljettaa haihtuneen nesteen pois.

Jäähdytystorni kuluttaa sähköä. Ilmaa liikutetaan tornin läpi puhaltimella. Virtaus jäähdytystornin läpi on vapaata ja vastus on pieni, joten sähkönkulutus on pientä suuresta tilavuusvirrasta huolimatta. Puhaltimen sähkötehoa on arvioitu yhtälön 9 mukaisesti.

$$P = \Delta p \cdot \frac{m_\mathrm{i}/\rho_\mathrm{i}}{\eta} \qquad 9$$

, jossa Δp on paineennousu puhaltimessa, m_i on ilman massavirta, ρ_i on ilman tiheys ja η on puhaltimen hyötysuhde.

7.2.3 MVR-Haihdutin

Termokompressorihaihduttimen laskenta on suhteellisen yksinkertainen. Sen on oletettu haihduttavan yhden kuutiometrin suodosta sellutonnia kohti. Tämä on viidennes valkaisusta tulevasta suodoksesta. Suodoksen lämpötilan on oletettu nousevan kymmenen Celsiusastetta. Haihduttimen sähkönkulutusta on arvioitu yhtälöllä 10 (Tikka 2008).

$$P = 2{,}2 \cdot \Delta T \cdot q_\mathrm{m} \qquad 10$$

, jossa dT on lämpötilannousu kompressorissa ja q_m on haihdutettava massavirta.

Lämpötilannousu kompressorissa kuluttaa enemmän energiaa, mutta mahdollistaa tehokkaamman haihdutuksen ja korkeamman painetason, jolloin haihduttimen alipaineen ei tarvitse olla aivan niin voimakas. Kasvava lämpötila myös hyödyttää myöhemmissä komponenteissa, kuten jäähdytystornissa. Kuumempi suodos lämmittää ilmaa enemmän, jolloin ilma pystyy kuljettamaan enemmän kosteutta. Sähköä siis säästyy myöhemmässä vaiheessa, kun jäähdytystorniin ei tarvitse ajaa yhtä paljon ilmaa.

7.2.4 Flash-haihdutin

Flash-haihdutuksessa haihtumiseen tarvittava energia on peräisin haihdutettavasta nesteestä. Tässä tapauksessa energia on siis peräisin suodoksesta. Mitä enemmän suodoksessa on varastoituneena energiaa, eli mitä kuumempaa se on, sitä enemmän suodosta saadaan haihdutettua. Flash-haihdutus tehdään 20 °C lämpötilaan. Tällöin suodos sekä muodostuva höyry ovat saman lämpöisiä. Kylläisyyspaine tässä lämpötilassa on matala 0,023 bar. Muodostuvan höyryn määrää on arvioitu yhtälön 11 avulla.

$$m_{\mathrm{h}} = m_{\mathrm{s1}} \cdot \frac{h_{\mathrm{s1}} - h_{\mathrm{s2}}}{h_{\mathrm{h}} - h_{\mathrm{s2}}} \qquad 11$$

, jossa h_{s1} on tulevan suodoksen entalpia, h_{s2} on poistuvan suodoksen entalpia, ja h_{h} on poistuvan höyryn entalpia.

7.2.5 Lämmönvaihtimet, sekoittimet ja jakajat

Lämmönvaihtimissa siirretään lämpöä virtauksesta toiseen. Niiden laskenta on yksinkertaista ja noudattaa energiataseen yhtälöä. Asteisuuden vaihtimissa on valittu olevan vähintään kaksi Celsiusastetta. Kuumien vesien kohdatessa kylmemmän suodoksen, on lämpötilaero suurempi. Näiden lähtötietojen avulla voidaan selvittää virtojen tulevat ja poistuvat lämpötilat.

Pintalauhduttimelta saatava energiamäärä on huomattavasti suurempi, mitä voidaan siirtää luonnollisesti viileämpään suodokseen. Tällöin kahden asteen lämpötilaero määrittää lämmönvaihtimesta poistuvan suodoksen lämpötilan. Kun saatavilla oleva lämpömäärä ylittää

hyödynnettävissä olevan, voidaan poistuvan suodoksen lämpötila laskea yhtälön 12 mukaisesti.

$$T_{\mathrm{p2}} = T_{\mathrm{s1}} + TTD \qquad 12$$

, jossa T_{s1} on sekundääripuolen tulolämpötila ja TTD on lämmönvaihtimen asteisuus, joka on 2 °C.

Tällöin lämmönvaihtimelta poistuvan sekundääripuolen lämpötila voidaan laskea yhtälön 13 mukaisesti. Yhtälöä täytyy iteroida, jotta entalpiamuutoksen saa täysin kohdalleen, mutta lämpötilojen ja siten myös entalpian arvojen muutokset ovat melko pieniä. Samaten ominaislämpökapasiteetin muutoksen voidaan olettaa pysyvän pienenä.

$$T_{\mathrm{s2}} = \frac{\Delta h}{m \cdot c_{\mathrm{p}}} \qquad 13$$

, jossa c_{p} on ominaislämpökapasiteetti.

Kuumien vesien virtausmäärät ovat niin pienet, että ne luovuttavat kaiken käytettävissä olevan lämpönsä ennen kuin suodos lämpenee lähelle kuumien vesien lämpötilaa. Tällöin poistuvan, viilenneen kuuman veden lämpötila lasketaan yhtälön 14 avulla.

$$T_{\mathrm{s2}} = T_{\mathrm{p1}} + DCA \qquad 14$$

, jossa T_{p1} on primääripuolen tulolämpötila ja DCA on lämmönvaihtimen jälkiasteisuus, joka on 2 °C.

Kuumien vesien vaihtimien tapauksessa täytyy suodoksen poistumislämpötila laskea erikseen. Se saadaan laskettua yhtälön 15 mukaisesti.

$$T_{\mathrm{p2}} = \frac{\Delta h}{m \cdot c_{\mathrm{p}}} \qquad 15$$

Sekoittimissa sekoitetaan kaksi virtausta toisiinsa, jolloin komponentista poistuu yksi virtaus. Tällöin niiden tilavuus- ja massavirrat lasketaan yhteen. Lämpötila ja kuiva-ainepitoisuus saadaan laskettua painotettuna keskiarvona.

Jakaja toimii käänteisesti sekoittimeen nähden, eli siinä jaetaan yksi virtaus kahdeksi. Tällöin jakautuvien virtausten on oletettu olevan yhtä suuret, jolloin uudet tilavuus- ja massavirrat saadaan jakamalla alkuperäinen kahdella. Lämpötila ja kuiva-ainepitoisuus pysyvät kahdessa uudessa virtauksessa samana kuin alkuperäisessäkin.

8 Prosessikytkennät

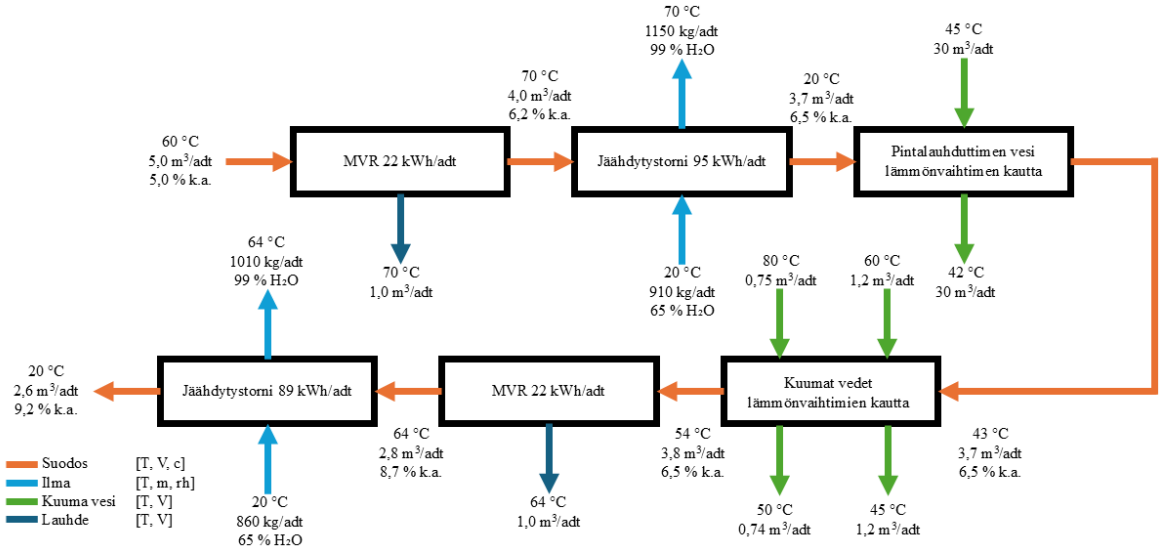
Prosessikytkentöjä kehitettiin yhteensä kaksikymmentä erilaista. Näistä yksitoista on erilaisia kytkentöjä ja yhdeksän on toisesta muunneltuja versioita. Muunnelmissa kaksi samaa komponenttia on kierrätyksen avulla muutettu yhdeksi suuremmaksi vastaavaksi komponentiksi. Muutoksella on tavoiteltu pienempää investointikustannusta ja sähkönkulutusta ilman, että haihdutusteho juurikaan muuttuisi. Tässä kappaleessa esitetään muutama kytkennöistä. Kaikki kytkennät löytyvät liitteestä 1. Tavanomaisesta SI-järjestelmän mukaisesta ilmoitustavasta poiketen virtausmäärät on ilmoitettu sellutonnia kohden sekunnin sijasta. Tällä tavoin tuloksia voidaan verrata ja skaalata eri tuotantoyksiköiden tuotantomäärien mukaan. Kuvissa suodoksen virtaus on osoitettu oranssilla värillä, kuumat vedet ovat vihreitä, ilma on vaaleansinistä, lauhde tummansinistä ja höyry violettia.

8.1 Suorat kytkentävaihtoehdot

Suoria kytkentävaihtoehtoja kehitettiin useita erilaisia. Näistä tehokkaimmaksi osoittautui kytkentä 7A, joka on kuvassa 16. Tällä kytkennällä saadaan haihdutettua 2,35 kuutiota vettä sellutonnia kohden pois suodoksen virtausmäärästä. Tämä tarkoittaa, että puhdistamolle päätyvä suodoksen tilavuusvirta on vain 53 % alkuperäisestä. Sen myötä myös kuiva-ainepitoisuus on noussut huomattavasti ja on 9,2 %. Sähkönkulutukseltaan kytkentä on myös paremmasta päästä, sillä sen kokonaiskulutus on 227 kWh/ADt. Ominaiskulutuksena tämä tarkoittaa 96,5 kWh/m^3.

Kytkennässä on kaksi MVR-haihdutinta, kaksi jäähdytystornia ja lämmönvaihtimet. MVR ja jäähdytystorni on kytketty sarjaan ja kahden sarjan välissä on lämmönvaihtimet. Niiden avulla suodos lämmitetään uudelleen haihdutuksen tehostamiseksi ennen jätevedenpuhdistamolle johtamista. Ensimmäisenä komponenttina on MVR-yksikkö, jolla saadaan tuotettua kuutio puhdasta vettä prosessissa käytettäväksi. Samalla jäähdytystornin puhaltimen kuorma pienenee, kun suodoksen virtausmäärä laskee ja lämpötila nousee. Myös tornissa virtauksesta osa haihtuu, jolloin lämmönvaihtimilla suodosta saadaan lämpimämmäksi vastaanottavan aineen massan laskiessa. Näin ollen toiselle MVR:lle syötettäessä suodoksen lämpötila on vain kuusi astetta matalampi kuin käsittelemättömän suodoksen. Myös tässä vaiheessa

saadaan kuutio puhdasta vettä talteen muualla käytettäväksi. Toisen MVR:n jälkeen suodoksen tilavuusvirta on jo alle kaksi kolmannesta alkuperäiseen verrattuna, joten matalammasta lämpötilasta huolimatta toisen jäähdytystornin ilmavirta ja siten myös sähkönkulutus on pienempi kuin ensimmäisen. Kytkennässä MVR-yksiköillä tuotetaan puhdasta vettä. Samalla niiden aiheuttama lämmönnousu saadaan tehokkaasti hyödynnettyä jäähdytystorneissa. Tällä on positiivisia vaikutuksia tornien ilmavirran vähentämiseksi ja samalla sähkönkulutuksen pienentämiseksi.

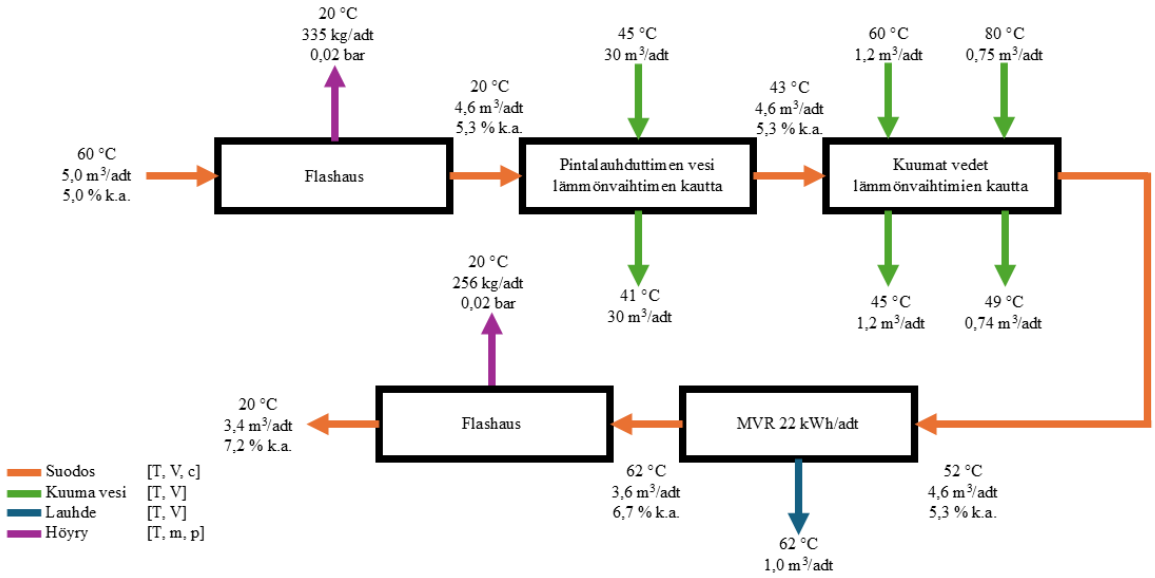


Kuva 16 Kytkentä 7A.

Ominaiskulutukseltaan tehokkain kytkentä on kytkentä 10A, jossa jäähdytys on toteutettu kahdella flash-haihduttimella. Kytkentä 10A on esitetty kuvassa 17. Haihdutusteholtaan tämä on kytkentä 7A:ta heikompi, haihduttaen vain 1,58 m^3/ADt. Sähkönkulutus on kuitenkin huomattavasti pienempi, jääden alle kymmenesosaan 7A:n kulutuksesta ollen 21,6 kWh/ADt. Poistuva tilavuusvirta on 70 % alkuperäisestä, joten kytkentä on tehokas. Tällöin poistuvan suodoksen kuiva-ainepitoisuus on 7,2 % ja kytkennän ominaiskulutus on 13,7 kWh/m^3.

Kytkennässä ensimmäisenä on flash-yksikkö, jolla kuuma suodos paisutetaan 0,02 bar paineeseen, jolloin siitä haihtuu noin 7 %. Tämän jälkeen suodos syötetään lämmönvaihtimille, jossa se lämpenee. Sen jälkeen MVR:llä haihdutetaan, jolloin saadaan kuutio vettä talteen. Lopuksi suodos flashataan uudestaan 0,02 bar paineeseen ja 20 °C lämpötilaan. Käytännössä kytkennässä on jäähdytystornit korvattu flash-haihduttimilla, joilla suodos viilennetään. Samalla osa siitä saadaan haihdutettua.

Kytkennän etuna on matala sähkönkulutus, jonka flash-haihduttimet mahdollistavat. Ongelma flashauksessa kuitenkin on, että miten alipaine luodaan ja miten muodostuva höyry lauhdutetaan talteenotettavaksi nesteeksi. Höyry olisi helppo lauhduttaa lauhduttimessa, mutta tällöin ei saada vesistön lämpökuormaa pienennettyä. Samalla kokonainen lauhdutin lisää merkittävästi järjestelmän monimutkaisuutta. Alipaineen luomiseksi tulisi kokonaisuuteen liittää tyhjiöpumppu tai jokin muu laite, jolla saadaan imettyä ilmat pois. Yksi keino olisi ”ryöstää” sitä jostain jo olemassa olevasta kohteesta, mutta se haittaisi muuta prosessia.

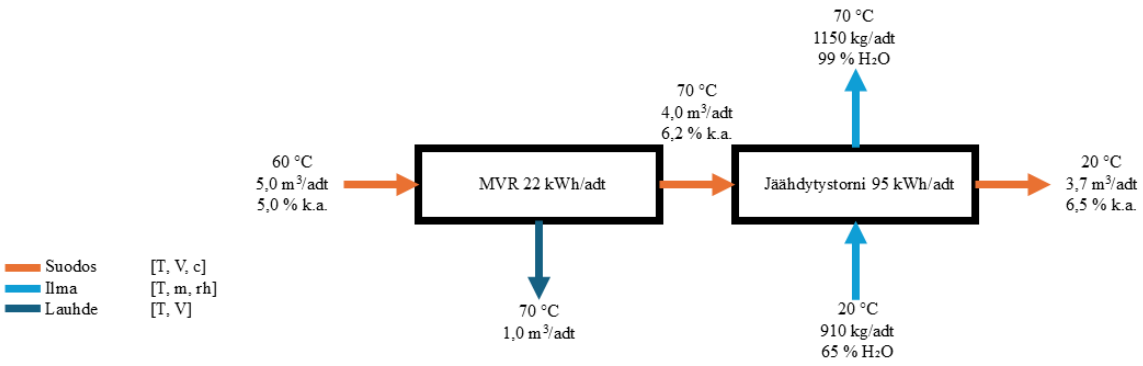


Kuva 17 Kytkentä 10A.

Ensimmäinen kehitetty ja yksinkertaisin kytkentä on kuvan 18 kytkentä 0. Koko kytkennässä on vain kaksi komponenttia. MVR-haihdutin ja jäähdytystorni. Ensin MVR:llä haihdutetaan kuutio pois suodoksesta, jolloin saadaan kuutio puhdasta vettä käytettäväksi. Samalla suodoksen massa- ja tilavuusvirrat pienenevät ja lämpötila nousee. Tämä puolestaan tehostaa jäähdytystornin toimintaa ja pienentää sen sähkönkulutusta. Kokonaisuudessaan kytkennällä saadaan haihdutettua vettä suodoksesta 1,22 m^3/ADt. Tähän kuluu sähköä 116 kWh/ADt, joten ominaiskulutus on 95,2 kWh/m^3. Poistuvan suodoksen kuiva aine on 6,5 %.

Kytkentä on hyvinkin tehokas haihdutuksen ja sähkönkulutuksen kannalta tarkasteltuna. Se on varsin yksinkertainen ja olisi helppo integroida jo olemassa olevalle tuotantolaitokselle. Heikkous kuitenkin piilee siinä, että tällä kytkennällä ei juuri hyödynnetä sekundäärilämpöä. Jäähdytystornissa käytetään suodoksen sisältämää sekundäärienergiaa, mutta pintalauhduttimelta tulevia tai kuumien vesien ylimääriä ei saada hyödynnettyä. Suodoksesta saadaan kuitenkin merkittävä osa haihdutettua ja puhdistamon lämpökuormaa pienennettyä

huomattavasti. Tämän, sekä yksinkertaisuutensa ansiosta kytkentää voidaan pitää hyvänä vaihtoehtona. Jälkiasennuksen kannalta jopa parhaana.



Kuva 18 Kytkentä 0.

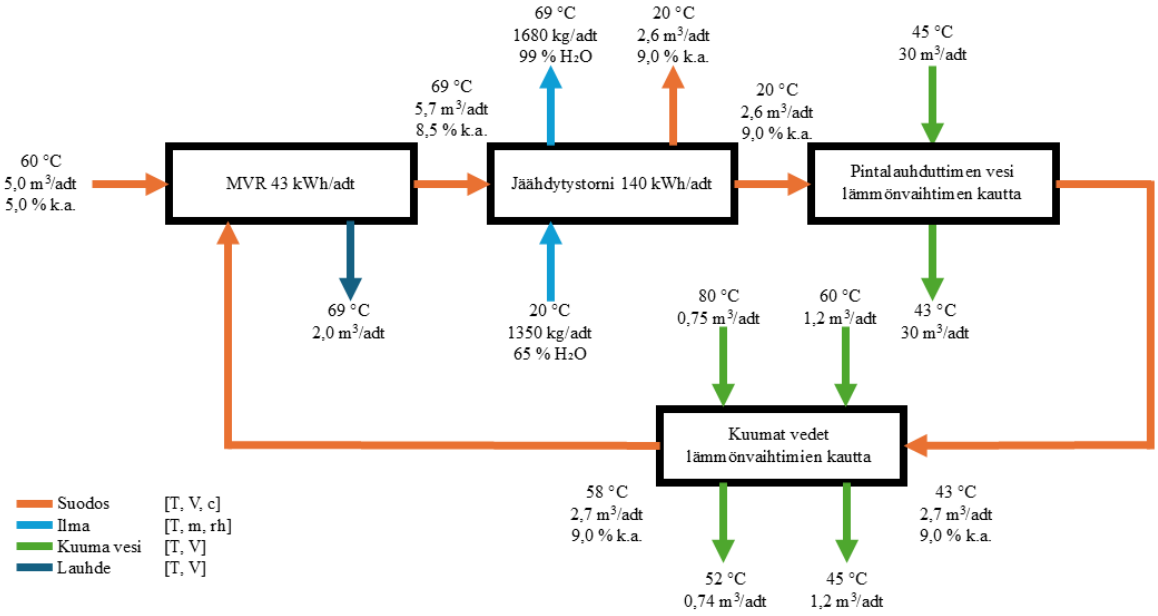
8.2 Kytkentävaihtoehdot kierrätyksellä

Kierrätyksellä varustetut kytkentävaihtoehdot on kehitetty suorista kytkennöistä. Ideana tässä on, ettei tarvita kahta samaa komponenttia, vaan yksi suurempi. Useimmissa tapauksissa tällä saavutettiin lähes sama haihdutuskapasiteetti pienemmällä sähkönkulutuksella. Joissain tapauksissa päästiin jopa parempiin haihdutustuloksiin. Samat trendit kuitenkin ilmenevät myös kierrätyksellä olevissa versioissa. Näistä 7B oli tehokkain.

Kuvan 19 kytkentä 7B on ajatukseltaan samanlainen 7A:n kanssa. 7B:ssä on korvattu aiemmat kaksi MVR:ää ja jäähdytystornia yhdellä isommalla. Tällä tavoin kytkentään tulee kierrätys. Kierrätys palauttaa lämmönvaihtimien jälkeen suodoksen takaisin MVR-haihduttimelle. Palautettavan suodoksen määrä on vain vähän yli puolet alkuperäisestä, joten se lämpenee tehokkaasti lämmönvaihtimissa. Palautuvan suodoksen lämpötila on vain kaksi astetta matalampi kuin raa'an suodoksen, ollen 58 °C. Sekoituksen ja haihduttamisen jälkeen suodos on 69 asteista ja sen virtaus on 5,7 m^3/ADt. Tämä syötetään jäähdytystornille, jonka jälkeen puolet siitä kulkee lämmönvaihtimille ja puolet johdetaan jätevedenpuhdistamolle.

Tällä tavoin toteutettuna menetetään haihdutustehoa vain noin 2 %, jolloin haihdutusta on 2,30 m^3/ADt. Sähkönkulutus laskee miltei 20 % arvoon 183 kWh/ADt. Siten myös ominaiskulutus laskee saman verran ollen nyt 79,9 kWh/m^3. Sähkönkulutuksen lasku johtuu jäähdytystarpeen laskusta. Kaksi MVR-haihdutinta on yhdistetty yhdeksi, joten niiden käyttämä teho pysyy samana. 7B kytkennässä yhdellä MVR-yksiköllä haihdutetaan kaksi kuutiota,

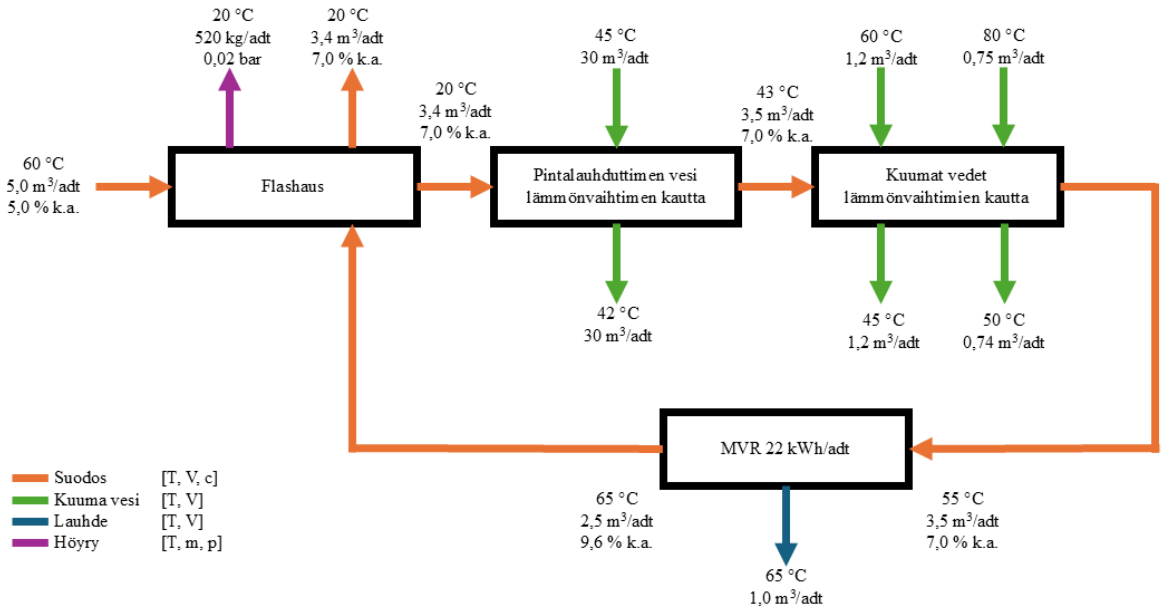
jolloin sillä saadaan myös tuotettua kaksi kuutiota puhdasta vettä. Jäähdytystornin ei tarvitse olla tuplasti isompi, sillä sille tuleva nestemäärä on pienempi kuin 7A:n tornien yhteenlaskettu syöttötilavuusvirta.



Kuva 19 Kytkentä 7B.

Sähkönkulutukseltaan tehokkain kytkentä noudattaa edellisen trendiä. Se on jalostettu tehokkaimmasta suorasta kytkennästä eli 10A:sta. Kuvan 20 kytkennässä 10B kaksi pienempää flash-haihdutinta on yhdistetty yhdeksi isommaksi. Tällä tavoin saadaan kytkentää yksinkertaisemmaksi. Samalla lämmönvaihtimille syötettävän suodoksen määrä vähenee, jolloin suodoksen lämpötilaa saadaan korkeammaksi. Tällä tavoin flashauksesta saadaan marginaalisesti tehokkaampi. Suodoksen syöttömäärä flashaukseen on tosin pienempi, joten haihdutusta on vähemmän.

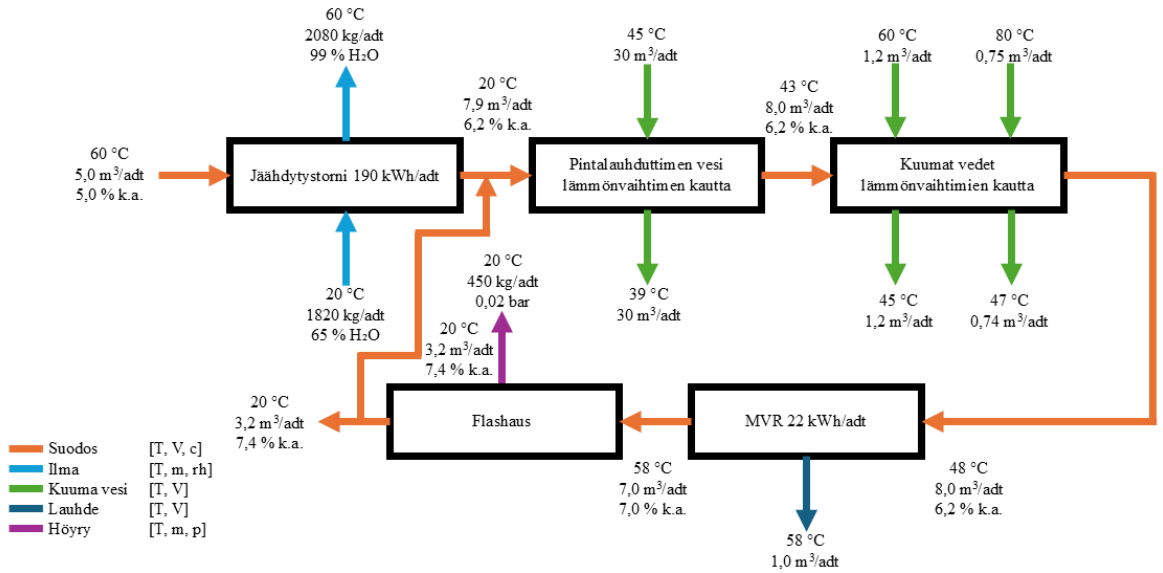
Kytkennällä saadaan haihdutettua 1,5 m^3/ADt käyttämällä 21,6 kWh/ADt sähköä. Tällöin ominaiskulutukseksi tulee 14,4 kWh/ADt. Sähkönkulutus on siis sama kuin kytkennässä 10A, mutta haihdutus on pienempää. Siksi ominaiskulutus on korkeampi. Kytkennän investointikustannukset ovat todennäköisesti pienemmät kuin kahdella flashauksella varustetun. Yhdellä haihduttimella saadaan myös prosessista yksinkertaisempi. Haasteet ovat kuitenkin samat kuin aiemmallakin. Eli ongelmana on, miten saadaan muodostuva höyry lauhdutettua.



Kuva 20 Kytkentä 10B.

Aiemmat kytkennät ovat tuottaneet MVR:llä kuumaa yli 60 asteista lauhdetta. Muutamilla tuotettu lauhde on lähempänä 70 astetta. Joissakin tapauksissa se on liian kuumaa, joten matalammalle lämpötilalle voisi olla tarvetta. Tässä tilanteessa Kuvan 21 kytkentä 9B olisi hyvä ratkaisu. Siinä oleva MVR tuottaa 58 asteista lauhdetta, joka on muita vaihtoehtoja viileämpää.

Tehokkuudeltaan kytkentä ei ole parhaasta päästä, sillä haihdutusta saadaan 1,69 m^3/ADt, kun sähkönkulutus on 212 kWh/ADt. Ominaiskulutus on tällöin 125 kWh/m^3.



Kuva 21 Kytkentä 9B.

Kytkennässä on yhdistettynä jäähdytystorni, lämmönvaihtimia, MVR- ja flash-haihdutin, joten se on melko monimutkainen ja kärsii flash-yksikön takia myös samoista ongelmista kuin 10A ja 10B. Kytkentä ei ole siis paras vaihtoehto ja muita vaihtoehtoja kannattaa harkita, mikäli viileämpi lauhde ei ole tarpeen.

8.3 Yhteenvetotaulukko kytkentöjen tehokkuuksista

Alla olevassa taulukossa 6 on esiteltynä kaikkien kytkentöjen haihdutustehot, sähkönkulutus, sähkön ominaiskulutus haihdutettua kuutiota kohden, sekä poistuvan suodoksen kuiva-ainepitoisuus. Kytkentäkaaviot kullekin löytyvät liitteestä 1.

Taulukko 6 Kytkentöjen tehokkuustaulukko.

Kytkentä	Haihdutusta [m^3/ADt]	Sähkönkulutus [kWh/ADt]	Ominaiskulutus [kWh/m^3]	Poistuva kuiva-ainepitoisuus [%]
0	1,22	116	95,2	6,5
1A	0,40	504	1250	5,4
1B	0,40	492	1220	5,4
2A	0,37	544	1490	5,4
2B	0,37	536	1440	5,4
3A	0,46	435	952	5,5
3B	0,45	421	931	5,5
4A	1,33	365	274	6,7
4B	1,35	346	256	6,8
5A	1,44	344	239	6,9
5B	1,39	294	212	6,8
6A	1,45	317	218	7,0
6B	1,39	283	203	6,8
7A	2,35	227	96,5	9,2
7B	2,30	183	79,9	9,0
8	1,52	151	99,4	7,1
9A	1,50	212	141	7,0
9B	1,69	212	125	7,4
10A	1,58	21,6	13,7	7,2
10B	1,50	21,6	14,4	7,0

Kytkentöjä kehitettiin useita erilaisia. Niistä parhaat valittiin lähemmin tarkasteltavaksi. Monilla saavutettiin hyviä haihdutustuloksia, mutta sähkönkulutus osoittautui osassa hyvin korkeaksi. Monet kytkennät ovat monimutkaisia ja sisältävät turhan monia prosessikomponentteja. Näistä moni osoittautui yksinkertaisempiin verrattuna heikommiksi. Esitellyt kytkennät ovat suhteellisen yksinkertaisia, sekä tehokkaita haihdutuksen ja sähkönkulutuksen kannalta.

9 Johtopäätökset

Tutkimuksen tavoitteena oli kehittää ja vertailla useita erilaisia prosessikytkentöjä, joiden avulla voitaisiin haihduttaa valkaisusta saatavaa hapanta suodosta sekundäärienergiaa hyödyntäen. Tutkimuksessa kehitettiin kaksikymmentä erilaista kytkentää. Jokaisessa määritettiin kunkin komponentin jälkeen suodoksen lämpötila, kuiva-aineen määrä ja pitoisuus, tilavuus- sekä massavirta ja suodoksen sisältämä energiamäärä. Lisäksi arvioitiin MVR:n ja jäähdytystornin sähkönkulutusta. Lopuksi määritettiin kunkin kytkennän kokonaishaihdutus ja -sähkönkulutus, joiden avulla määritettiin sähkön ominaiskulutus. Tutkimuksessa kehitettiin ja arvioitiin kattavasti useita erilaisia kytkentöjä, joten tutkimuksen tavoite saavutettiin.

Keskeisin tutkimustulos oli, etteivät monimutkaiset, useita prosessikomponentteja sisältävät kytkennät, ole merkittävästi yksinkertaisia kytkentöjä tehokkaampia. MVR-haihduttimesta ja jäähdytystornista koostuvalla yksinkertaisella kytkennällä saavutettiin lähes yhtä hyviä haihdutustuloksia kuin monimutkaisilla kytkennöillä, joissa oli useita haihduttimia, lämmönvaihtimia ja kierrätyskanavia. Sekundäärienergian hyödyntäminen itse haihdutuksessa osoittautui matalien lämpötilojen takia haastavaksi. Sekundäärienergia todettiin toimivaksi suodoksen uudelleenlämmittämisessä, mikäli suodosta on esihaihdutettu ja sen määrä on alkuperäistä pienempi.

Yksittäisiä komponentteja tarkastellessa termokompressorihaihdutin osoittautui tehokkaaksi haihdutuslaitteeksi. Sillä saavutetaan hyviä tuloksia haihdutuksen kannalta ilman, että sähkönkulutus kasvaa kohtuuttomaksi. Tärkeä etu MVR-haihduttimessa on, että haihdutettu neste saadaan helposti talteen. Lauhteet ovat suhteellisen puhtaita ja kuumia, jolloin niitä voitaisiin hyödyntää esimerkiksi valkaisun pesuvesinä.

Tutkimuksessa havaittiin, ettei jäähdytystorni ole kovinkaan tehokas haihduttamaan nestettä. Se vaatii suuria määriä ilmaa, jotta neste jäähtyy ja siten sen sähkönkulutus kasvaa varsin suureksi. Jäähdytystorni toimii paremmin, kun jäähdytettävä neste on kuumaa. Tällöin viileämpi ilma lämpenee enemmän ja kykenee sitomaan itseensä enemmän kosteutta. Siten jäähdytyskapasiteetin lisäksi tornin haihdutuskyky paranee ja sähköntarve laskee. Jäähdytystorni on suhteellisen yksinkertainen ja yleinen laite, jolla voidaan helposti jäähdyttää nesteitä. Jäähdytyksessä se on tehokas ja sitä voidaan samalla hyödyntää haihdutuksessa.

Flash-ilmiötä hyödynnetään laajasti metsäteollisuudessa mustalipeähaihduttamolla ja keittämöllä. Näissä kohteissa painetasot ovat normaalipainetta korkeampia, jolloin flash-ilmiö tapahtuu luonnollisesti, kun neste paisutetaan ilmanpaineeseen. Tutkimuksen tilanteessa suodoksen lämpötila on alle sata astetta ja se on normaalipaineessa. Mikäli kuusikymmenasteista suodosta haluttaisiin paisuttaa höyryksi, tulisi paineen olla korkeintaan 0,2 bar.

Tutkimuksessa sekundäärienergiaa saatiin suodoksen mukana. Lisäksi sekundäärienergiaa saatiin hyödynnettyä kasvattamalla jäähtyneen suodoksen lämpötilaa pintalauhduttimen lämpimän veden ja kuumien vesien ylijäämien avulla. Näitä puhtaita vesiä ei sekoitettu suodoksen joukkoon, vaan lämpöenergia otettiin talteen lämmönvaihtimien avulla. Ongelmaksi muodostui käytettävissä olevan lämmön laatu ja määrä. Valitettavasti pintalauhduttimelta saatava vesi oli suuresta energiamäärästään huolimatta sen verran viileää, ettei sillä saatu kuumennettua suodosta. Kuumien vesien ollessa lämpötilaltaan korkeampia, jäi niidenkin tuottama hyöty pieneksi virtaus- ja energiamäärän takia. Näistä syistä sekundäärienergiaa ei voitu suoraan käyttää haihdutuksessa, vaan enemmänkin haihdutuksen esilämmityksessä.

Pelkän valkaisun happaman suodoksen haihduttamista ei ole tiettävästi kokeiltu teollisessa mittakaavassa. Koelaitosta suunniteltaessa yksinkertainen ja tehokas vaihtoehto olisi kannattava. MVR:n ja jäähdytystornin yhdistelmä olisi erinomainen valinta pilottilaitokselle. Kytkentä on yksinkertainen, eikä se vaatisi paljoa tilaa. Sen liittäminen osaksi tehdasta ja jätevesijärjestelmää ei vaatisi putkiston lisäksi kuin sähköä. Mikäli kaikkea hapanta suodosta ei haluta ajaa koelaitoksen läpi tai halutaan pitää koko pienenä, voisi sen mitoittaa käsittelemään vain osan suodoksesta. Pilottilaitoksella saataisiin arvokasta tietoa laitteiston toimivuudesta käytännössä.

9.1 Valintaperusteita

Kukin tehdas on erilainen, eikä yksi tietty vaihtoehto ole välttämättä paras kaikkiin tapauksiin. Yleisesti ottaen jokainen kehitetyistä kytkennöistä helpottaisi merkittävästi jätevedenpuhdistamon lämpökuorman pienentämisessä. Jokainen kytkentä on suunniteltu siten, että jätevesilaitokselle poistuvan suodoksen lämpötila on 20 °C. Se on selvästi vähemmän kuin raa'an suodoksen lämpötila. Pienentynyt tilavuusvirta vähentää hydraulista kuormaa ja kasvattaa jätevesilaitoksen puhdistuskapasiteettia viipymän pidentyessä.

Tehtailla, joilla on paljon sekundäärienergiaa saatavilla korkeassa lämpötilassa, kannattaisi harkita flash-haihduttimien käyttöä. Jos saatavilla oleva sekundäärienergia on yli 100 asteista, suodoksen kuumentaminen ja sen paineen kohottaminen on selvästi kannattavampaa kuin tutkimuksen tapauksessa. Tällöin suodos voitaisiin paisuttaa ilmanpaineeseen, eikä haihdutusastian paineen tarvitse olla yhtä matala. Mikäli haihdutuspaine pidetään samana, saavutetaan korkeammalla suodoksen lämpötilalla huomattavasti parempia haihdutustuloksia. Korkeammalla painetasolla muodostuva höyry on myös helpompi lauhduttaa ja ottaa talteen.

Myös laitteiston sijoittelu ja koko on hyvä huomioida. Mikäli tehdasalue on ahdas tai muutoin halutaan kompakti laitos, on hyvä valita kytkentä, jossa on vain vähän komponentteja. Tällöin MVR on hyvä valinta pienehkön kokonsa takia. Jäähdytystornin kokoon vaikuttaa merkittävästi sen läpi johdettavan suodoksen virtaus. Suurella virtausmäärällä ja matalalla tulolämpötilalla tornin läpi johdettava ilmamäärä on suuri. Tällöin myös itse tornin on oltava suurempi. Siksi olisi syytä valita kytkentä, jossa jäähdytystornin sähkönkulutus sekä poistuvan suodoksen määrä on mahdollisimman pieni. Usein puhaltimilla varustetut tornit ovat luonnonvetoisia kompaktimpia, vaikkakin luonnonvetoiset kuluttavat vähemmän sähköä.

Mikäli tehtaalla on ylimäärin sähköä tai sitä on saatavilla edullisesti, ei haihdutusprosessin sähkönkulutuksella ole suurta merkitystä. Tällöin kannattaa valita kytkentä muiden kriteerien perusteella. Mikäli sähköä ei ole halvalla saatavilla, on syytä tarkastella kytkentöjä, joilla on mahdollisimman pieni sähkönkulutus. On syytä huomioida kytkennän tehokkuus. Ei ole järkevää investoida laitekokonaisuuteen, jos suodosta ei saada haihdutettua merkittävästi.

Tehtaille investoidaan jatkuvasti, jolloin osa komponenteista ylimitoitetaan tuotannon kasvattamista varten. Mikäli pintalauhdutin on ylimitoitettu, voisi sitä hyödyntää alipaineen muodostamiseen flash-haihduttimia varten. Pintalauhdutinta voitaisiin hyödyntää muodostuvan höyryn lauhduttamiseen, jolloin lauhde johdettaisiin lämminvesikiertoon. Jos taas höyryä on ylimäärin saatavilla, sitä voisi käyttää paineistetun suodoksen kuumentamiseen ennen flashausta. Toisaalta höyryä voisi tällöin hyödyntää myös suoraan haihdutuksessa.

Yleisesti ottaen suodoksen haihduttaminen on lähes poikkeuksetta kannattavaa, mikäli se mahdollistaa tehtaan tuotantokapasiteetin kasvattamisen. Tehtaiden päätuote on kuitenkin puujaloste, jonka tuotanto halutaan maksimoida.

9.2 Epävarmuustekijät

Lämpötilan on arvioitu kasvavan kymmenen astetta MVR-haihduttimessa. Lämpötilannousu on melko korkea. Korkeammalla lämpötilalla saadaan neste haihtumaan korkeammassa paineessa, eikä yhtä suurta alipainetta vaadita. Korkea lämpötilaero tulo- ja poistopuolen välillä kasvattaa sähkönkulutusta merkittävästi. Todellisuudessa sähkönkulutus saattaisi olla selvästi pienempi kuin laskennassa saatu arvo. Kuumat lauhteet ja poistuva suodos ovat hyödyllisiä jatkokäyttöä ajatellen. Kuuma suodos helpottaa jäähdytystornin kuormaa merkittävästi, joten korkeampi MVR:n sähkönkulutus pienentää jäähdytystornin sähkönkulutusta.

Laskennassa käytetty jäähdytystornin puhaltimen paineennousu on matala, sillä jäähdytystornin virtausvastuksen ilmalle on oletettu olevan pientä. Todellisuudessa vastus saattaa olla hyvinkin suurta, jolloin puhaltimelta vaaditaan paljon enemmän tehoa. Tällöin tornin sähkönkulutus nousee huomattavasti. Toisaalta jäähdytystorni voidaan suunnitella toimivaksi luonnonvedolla, jolloin puhaltimia ei tarvita. Tällöin sähköä ei kulu ilman liikuttamiseen.

Haihduttimien laskennassa on huomioitu ainoastaan haihduttimen oma sähkönkulutus. Se antaa hieman vääristyneen kuvan esimerkiksi flash-haihduttimesta. Jotta ilmiö saadaan tapahtumaan, tulee flashaussäiliön paine laskea ilmanpainetta matalammaksi suodoksen lämpötilan takia. Alipaine pitää muodostaa koneellisesti ja muodostunut konsentraatti paineistaa uudelleen sekä höyry lauhduttaa. Tutkimuksessa haihduttimen ei laskettu kuluttavan sähköä, mutta todellisuudessa sen apulaitteet kuluttaisivat sähköä jonkin verran.

Lämpötiloja laitteiden välillä tarkasteltaessa tulee ottaa huomioon, että pumput nostaisivat suodoksen lämpötilaa. Vaikutusta ei ole huomioitu tämän työn laskennassa. Vaikutus suodoksen lämpötilaan olisi kuitenkin todennäköisesti vähäinen. Siitä huolimatta pumpuilla olisi havaittava vaikutus kytkentöjen sähkönkulutukseen, vaikka kytkennöistä ja komponenteista mikään ei vaadi korkeaa painetta tai suurta nostokorkeutta. Tutkimusta verrattaessa todellisiin vastaaviin tapauksiin ja kytkentöihin, on syytä huomioida, ettei pumppuja tai muita laitteiston apulaitteita ole huomioitu laskennassa.

9.3 Jatkotutkimuskohteet

Valitut sekundäärienergian lähteet osoittautuivat turhan viileiksi ajateltuun käyttökohteeseen. 60 asteista suodosta on haastava haihduttaa, sillä veden höyrystyminen lämpötilassa vaatii paineen alentamista 0,2 bar:iin. Se vaatii suuria tilavuuksia ja tehokkaita tyhjiöpumppuja, joiden avulla tyhjiötä saadaan pidettyä yllä. Kuten laskennassa havaittiin, voidaan pelkästään MVR-haihduttimella ja jäähdytystornilla saavuttaa lähes yhtä hyviä haihdutustuloksia kuin monimutkaisemmilla kytkennöillä, joissa on useita lämmönvaihtimia ja kierrätyskanavia suodoksen palautukselle. Siksi sekundäärienergialle voisi olla hyödyllistä tutkia myös muita käyttökohteita tai etsiä uusia lähteitä korkeamman lämpötilan saavuttamiseksi.

60 asteinen saatikka 45 asteinen vesi ei ole prosessin kannalta kovin kuumaa. Sitä voitaisiin kuitenkin hyödyntää lämmitykseen. Lämpöä voisi mahdollisesti käyttää talvikausin kaukolämmön tuottamiseen. Toinen mahdollisuus olisi hyödyntää kuumat virrat suoraan paikallisesti rakennusten lämmitykseen. Lisäksi lämpimiä virtoja voisi hyödyntää talvikautena ulkoalueiden jäänpoistossa ja sulanapidossa. Samalla virroista poistettaisiin lämpöä, jolloin lämpökuorma pienenisi. Samaa ideaa voisi mahdollisesti hyödyntää jäähdytysvesien kanssa.

Sekundäärilämpöä voisi myös jalostaa kuumemmaksi lämpöpumppujen avulla. Lämpöpumpuilla voitaisiin siirtää lämpöä viileämmästä virrasta kuumempaan, jolloin niiden lämpötilaero kasvaisi entisestään. Prosessi kuluttaa kuitenkin huomattavia määriä sähköä. Siitä huolimatta tällä tavoin voitaisiin hyödyntää viileämpiäkin sekundäärienergioita. Näin saataisiin kehitettyä korkeampilämpöistä virtausta hyödynnettäväksi, jolloin haihdutuksen painetasoja ei tarvitsisi laskea välttämättä ollenkaan. Tällöin sekundäärienergiaa voitaisiin suoraan hyödyntää haihduttimissa. Tosin MVR-haihduttimen ollessa tehokas ja tunnettu teknologia, kasvaisi lämpöpumppuja hyödyntävän ratkaisun sähkönkulutus mahdollisesti korkeammaksi.

Lämmön talteenottoa pintalauhduttimelta voitaisiin tehostaa ohjaamalla jäähdytetty suodos suoraan sen läpi. Suodosta ei kuitenkaan kannata sekoittaa puhtaaseen veteen. Pintalauhdutin olisi siis syytä jakaa kahteen eri sektoriin, joista toisessa virtaisi jäähtynyt suodos ja toisessa puhdas vesi. Vesipuolen sektori voisi olla rakenteeltaan perinteinen, mutta hapan suodos todennäköisesti vaatisi erilaisen materiaalin, jotta korroosiovaurioilta vältytään. Ratkaisulla saataisiin suodoksesta hieman lämpimämpää, kuin tutkimuksessa käytetyllä lämmönvaihdinta hyödyntävällä menetelmällä. Tällöin saataisiin myös jäähdytysveden virtausta pienemmäksi ja sitä kautta vähennettyä puhtaiden vesien aiheuttamaa lämpökuormaa vesistöön.

10 Yhteenveto

Metsäteollisuus on ollut Suomen tärkeimpiä teollisuuden aloja yli sata vuotta. Sadan vuoden aikana tuotantoprosessit ovat tehostuneet merkittävästi ja samalla päästöt ympäristöön ovat pienentyneet murto-osaan. Muutoksessa prosessit ovat kehittyneet kaikin tavoin paremmiksi ja tehokkaammiksi. Energiaa ei enää tarvitse ostaa suuria määriä, vaan päinvastoin; sitä tuotetaan myytäväksi. Osa tehtaista toimii jo ilman fossiilisia polttoaineita. Raaka-aine eli puu hyödynnetään monipuolisemmin kuin koskaan historiassa ja tuotevalikoima on kasvanut huomattavasti. Puusta voidaan nykyään valmistaa lähes mitä tahansa kankaista muovinkorvikkeisiin. Puusta on moneksi muuksikin kuin vain paperiksi ja sahatavaraksi.

Tehtaat eivät kuitenkaan ole vielä täydellisiä. Tiukentuvat ympäristöluparajat määrittävät reunaehdot toiminnalle ja tehdasprosesseista aiheutuu edelleen päästöjä ympäristöön. Ilmapäästöt alkavat olla kehittyneiden savu- ja hajukaasujen puhdistus- ja keräilyjärjestelmien ansiosta lähinnä satunnaisia. Vesistökuormitusta aiheutuu edelleen, vaikka nekin ovat laskeneet huomattavasti. Yksittäisiä suuria päästölähteitä ei tehtailla juuri ole, joten pienetkin parannukset saattavat osoittautua työläiksi ja kalliiksi.

Valkaisun hapanta suodosta voitaisiin haihduttaa, jolloin saataisiin pienennettyä jätevedenpuhdistamon kuormitusta. Samalla sen mukana karkaavaa sekundäärienergiaa voitaisiin ottaa talteen, jolloin myös puhdistamoon ja vesistöön kohdistuva lämpökuorma pienenisi. Haihdutuksessa voitaisiin hyödyntää muita tehtaan sekundäärienergiavirtoja, jolloin lämpökuorma pienenisi entisestään ja haihdutus tehostuisi.

Sekundäärienergian lähteet on moderneilla tehtailla tehokkaasti hyödynnetty. Siksi kuumia virtoja ei juurikaan ole vapaana. Matalat lämpötilatasot tarkoittavat, että haihdutus edellyttää painetasojen alentamista keinotekoisesti. Sekundäärienergian hyödyntäminen ja suodoksen haihduttaminen vaatii paljon sähköä pumppujen, puhaltimien ja kompressorien käyttöön.

Tässä työssä tehtyjen laskelmien ja arviointien mukaan suodoksen haihdutus on mahdollista. Nykyisillä menetelmillä voitaisiin pienentää happaman suodoksen tilavuusvirtaa merkittävästi. Haihdutus kuluttaa kuitenkin paljon energiaa. Osa tarvittavasta energiasta voitaisiin ottaa sekundäärienergiavirroista. Haihdutusprosessi vaatii silti huomattavia määriä sähköä, joten on syytä tehdä tarkempaa tutkimusta, mikä keino on kussakin tapauksessa kannattava.

Lähteet

Aamulehti. [Verkkoaineisto] 27.2.1932. Kansalliskirjasto. [Viitattu 3.7.2024] Saatavilla: https://digi.kansalliskirjasto.fi/sanomalehti/binding/1720599?page=5

Adven. [Verkkoaineisto] n.d. Adven. [Viitattu 28.9.2024] Saatavilla: https://adven.com/fi/yhteistyotarinat/kotkamillsin-ymparistokuorma-pienenee-kierratyksella/

Ahvenainen, J. 1992. Enso-Gutzeit Oy 1872–1992. 2, 1924–1992. Imatra, Enso-Gutzeit. s. 357–361

Ala-Kaila, K. 2024. Diplomityöhön liittyvä suunnittelukokous. Henkilökohtainen tiedonanto. Julkaisematon.

Biokuitu. [Verkkoaineisto] n.d. Metsä Group. [Viitattu 2.10.2024] Saatavilla: https://www.metsagroup.com/fi/metsafibre/metsafibre/biotuotetehdaskonsepti/new-bioproduct-concepts-in-development-phase-fi/light-fibre-material-fi/

Bioligniini. [Verkkoaineisto] n.d. Metsä Group. [Viitattu 2.10.2024] Saatavilla: https://www.metsagroup.com/fi/metsafibre/metsafibre/biotuotetehdaskonsepti/new-bioproduct-concepts-in-development-phase-fi/oxidized-lignin-fi/

Biometanoli. [Verkkoaineisto] n.d. Metsä Group. [Viitattu 2.10.2024] Saatavilla: https://www.metsagroup.com/fi/metsafibre/metsafibre/biotuotetehdaskonsepti/new-bioproduct-concepts-in-development-phase-fi/methanol-fi/

Biopelletti. [Verkkoaineisto] n.d. Metsä Group. [Viitattu 2.10.2024] Saatavilla: https://www.metsagroup.com/fi/metsafibre/metsafibre/biotuotetehdaskonsepti/new-bioproduct-concepts-in-development-phase-fi/cellulose-fibre-pellets-fi/

Biotalous. [Verkkoaineisto] 21.4.2016. Biotalous. [Viitattu 13.7.2024] Saatavilla: https://www.biotalous.fi/metsa-group-rakentaa-maailman-ensimmaista-uuden-sukupolven-biotuotetehdasta/

Biotuotetehdas. [Verkkoaineisto] 16.8.2017. Metsä Group. [Viitattu 2.10.2024] Saatavilla: https://www.metsagroup.com/fi/metsafibre/uutiset-ja-julkaisut/uutiset/2017/metsa-groupin-biotuotetehdas-on-kaynnistetty/

Biotuotetehdaskonsepti. [Verkkoaineisto] n.d. Metsä Group. [Viitattu 8.7.2024] Saatavilla: https://www.metsagroup.com/fi/metsafibre/metsafibre/biotuotetehdaskonsepti/

Biotuotteet. [Verkkoaineisto] n.d. Metsä Group. [Viitattu 2.10.2024] Saatavilla: https://www.metsagroup.com/fi/metsafibre/metsafibre/biotuotetehdaskonsepti/mita-ovat-biotuotteet/

Dahl, O. 2008. Papermaking science and technology. Book 19, Environmental management and control. 2nd ed. totally updated version. Helsinki, Paper Engineers' association/Paperi ja Puu Oy. s. 86–89

Deltacooling. [Verkkoaineisto] 2.12.2022. Deltacooling. [Viitattu 12.10.2024] Saatavilla: https://deltacooling.com/resources/faqs/what-is-a-cooling-tower

Dence, C. W. & Reeve, D. W. 1996. Pulp bleaching. Principles and practice. Atlanta (GA), TAPPI Press. s. 749–765

Fardim, P. 2011. Papermaking science and technology. Book 6, Chemical pulping. Part 1, Fibre chemistry and technology. 2nd ed. totally updated version. Helsinki, Paper Engineers' association/Paperi ja Puu Oy. s. 459–587

Gurney, J. D. & Cotter, I. A. 1966. Cooling towers. Lontoo, McLaren

Häggblom, I & Ranta, V. 1966. Suulfiitti- ja sulfaattiselluloosan valmistus. Porvoo Helsinki, WSOY. s.66–240

Ilmatieteenlaitos. [Verkkoaineisto] 23.9.2021. Ilmatieteenlaitos. [Viitattu 23.10.2024] Saatavilla: https://www.ilmatieteenlaitos.fi/meriveden-lampotilatilastot

Joutsenon sellutehdas. [Verkkoaineisto] n.d. Metsä Group. [Viitattu 7.10.2024] Saatavilla: https://www.metsagroup.com/fi/metsafibre/metsafibre/sellun-tuotanto/joutsenon-sellutehdas/

Kemin biotuotetehdas. [Verkkoaineisto] n.d. Metsä Group. [Viitattu 2.10.2024] Saatavilla: https://www.metsagroup.com/fi/metsafibre/metsafibre/sellun-tuotanto/kemin-biotuotetehdas/

Keski-Suomen ELY-keskus. [Verkkoaineisto] 28.10.2014. Ympäristöhallinnon verkkopalvelu. [Viitattu 3.10.2024] Saatavilla:

https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/Yhteysviranomaisen_lausunto_Metsa_Fibren_Aanekosken_biotuotetehtaan_ymparistovaikutusten_arviointiselostuksesta.pdf

KnowPulp. [Verkkoaineisto] 2024. Sellunvalmistuksen oppimisympäristö, versio 22.0. [Viitattu 2.9.2024] Saatavilla: https://www.knowpulp.com/ (Vaatii käyttäjätunnuksen ja salasanan.)

Lapin ELY-keskus. [Verkkoaineisto] 6.3.2020. Ympäristöhallinnon verkkopalvelu. [Viitattu 3.10.2024] Saatavilla: https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/LAPPI_YVA_Metsa_Fibre_Kemin__biotuotetehdas__arviointiselostus_perusteltu_paatelma.pdf

Lehtinen, J. [Verkkoaineisto] 20.1.2020. Satakunnan kansa. [Viitattu 10.8.2024] Saatavilla: https://www.satakunnankansa.fi/satakunta/art-2000010176854.html

Mansour, A & Müller, N. 2019. A review of flash evaporation phenomena and resulting shock waves. Experimental thermal and fluid science. Philadelphia, Elsevier. nro. 107. s. 146–168

Mboowa, D. 2024. A review of the traditional pulping methods and the recent improvements in the pulping processes. Biomass conversion and biorefinery. Berlin Heidelberg, Springer. nro. 14. s. 1–12

Metsä Fibre. [Verkkoaineisto] 20.8.2014. Ympäristöhallinnon verkkopalvelu. [Viitattu 3.10.2024] Saatavilla: https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/MF_Biotuotetehdas_YVA_selostus_49645_1_0.pdf

Metsä Fibre. [Verkkoaineisto] 15.9.2019. Ympäristöhallinnon verkkopalvelu. [Viitattu 3.10.2024] Saatavilla: https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/LAPPI_YVA_Metsa_Fibre_Arviointiselostus_15_9_2019.pdf

Metsä Group. a. [Verkkoaineisto] 28.2.2023. Metsä Group. [Viitattu 28.7.2024] Saatavilla: https://www.metsagroup.com/fi/uutiset-ja-julkaisut/tiedotteet/2023/metsa-groupin-sellutuotannon-ymparistojalanjaljelle-erinomaiset-tutkimustulokset/

Metsä Group. b. [Verkkoaineisto] 16.6.2023. Metsä Group. [Viitattu 10.10.2024] Saatavilla: https://www.metsagroup.com/fi/metsafibre/uutiset-ja-julkaisut/uutiset-ja-

tiedotteet/artikkelit-videot/2023-fi/jaahdytysvesitornit-minimoivat-vedenottotarpeen-seka-lampokuorman-vesistoon/

Metsäntutkimuslaitos. [Verkkoaineisto] 2012. Luonnonvarakeskus. [Viitattu 14.10.2024] Saatavilla: http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-40-2391-0

Metsäteollisuus. a. [Verkkoaineisto] 2.12.2020. Metsäteollisuus Ry. [Viitattu 9.7.2024] Saatavilla: https://www.metsateollisuus.fi/uutishuone/metsateollisuus-on-tehnyt-pitkajanteista-vesiensuojelutyota

Metsäteollisuus. b. [Verkkoaineisto] 2.12.2020. Metsäteollisuus Ry. [Viitattu 8.8.2024] Saatavilla: https://www.metsateollisuus.fi/uutishuone/ilmapaastoja-vahennetty-tehokkaasti

Nurmi, R. [Verkkoaineisto] 16.6.2015. Yle. [Viitattu 10.8.2024] Saatavilla: https://yle.fi/a/3-8081459

Oikari, A & Soivio, A & Vuorinen, M & Vuorinen, P & Nyholm, K. 1984. Metsäteollisuuden jätevesistä ja jätevesikomponenteista sekä niiden vaikutuksista kaloihin. Monistettuja julkaisuja. Helsinki, Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos. nro. 23. s. 6–9

Saarinen, T. 2024. Diplomityöhön liittyvä suunnittelukokous. Henkilökohtainen tiedonanto. Julkaisematon.

Sahakonttori. [Verkkoaineisto] 26.10.2020. Internet Archive. [Viitattu 2.7.2024] Saatavilla: https://web.archive.org/web/20201026130846/https://sahakonttori.fi/suomen-seitseman-suurinta-paperitehdasta/

Tana, J & Ruonala, S & Ruoppa, M. 1999. Happikemikaalien käyttöön perustuvan massanvalkaisun ympäristövaikutuksia, yhteenvetoraportti. Suomen ympäristö. Helsinki, Suomen Ympärisökeskus. nro. 350

Tikka, K & Mantela, M & Eerola, V. [Verkkoaineisto] 2.6.2022. Stora Enso. [Viitattu 8.7.2024] Saatavilla: https://www.storaenso.com/fi-fi/newsroom/news/2022/6/stora-enso-suomessa-150-vuotta-mantysuopatehdas-hyodynsi-sellunkeiton-sivutuotteita

Tikka, P. 2008. Papermaking science and technology. Book 6, Chemical pulping. Part 2, Recovery of chemicals and energy. 2nd ed. totally updated version. Helsinki, Paper Engineers' association/Paperi ja Puu Oy. s. 36–84

Tilastot. [Verkkoaineisto] 2023. Metsäteollisuus Ry. [Viitattu 9.7.2024] Saatavilla: https://www.metsateollisuus.fi/tilastot

Tilastotietokanta. [Verkkoaineisto] 2021. Luonnonvarakeskus. [Viitattu 8.8.2024] Saatavilla: https://statdb.luke.fi/PxWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE__04%20Metsa__08%20Muut__Metsateollisuus/10.02_Puumassan_seka_paperin_ja_kartongin_tuota.px/

Tuuri, A. 1999. UPM-Kymmene: metsän jättiläisen synty. Helsinki, Otava. s. 39–59

Työterveyslaitos. [Verkkoaineisto] 12.8.2022. Työterveyslaitos. [Viitattu 28.7.2024] Saatavilla: https://ova.ttl.fi/klooridioksidi

UPM juurilta lehvästöön. [Verkkoaineisto] 2.6.2019. UPM. [Viitattu 2.7.2024] Saatavilla: https://www.upm.com/fi/ajankohtaista/artikkelit/2019/06/upm-juurilta-lehvastoon/

Upmpulp. a. [Verkkoaineisto] 13.5.2024. UPM. [Viitattu 10.8.2024] Saatavilla: https://www.upmpulp.com/fi/upm-kaukas/ajankohtaista/2024/hajuhaittaa-lahialueilla/

Upmpulp. b. [Verkkoaineisto] 28.5.2024. UPM. [Viitattu 10.8.2024] Saatavilla: https://www.upmpulp.com/fi/upm-kaukas/ajankohtaista/2024/hajuhaitta-sellutehtaalla/

Upmpulp. c. [Verkkoaineisto] 30.5.2024. UPM. [Viitattu 10.8.2024] Saatavilla: https://www.upmpulp.com/fi/upm-kaukas/ajankohtaista/2024/hajuhaittoja-sellutehtaalla/

Upmpulp. d. [Verkkoaineisto] 20.6.2024. UPM. [Viitattu 10.8.2024] Saatavilla: https://www.upmpulp.com/fi/upm-kaukas/ajankohtaista/2024/sellutehtaalta-hajuhaittoja-lahialueille/

Vaisala. [Verkkoaineisto] 2021. Vaisala. [Viitattu 10.11.2024] Saatavilla: https://www.vaisala.com/fi/lp/make-your-job-easier-humidity-conversion-formulas (Vaatii tilauksen. Saatavilla ilmaiseksi ilman käyttäjätunnusta.)

Vakkilainen, E & Sandegård, R & Veitola, J. 1999. New Ahlstrom recovery boiler at Metsä-Botnia Joutseno mill. Sodahus-konferenssen 1999. s. 73–82

Vakkilainen Esa. (2018). Towards large, fossil free mills with integrated biorefineries – trends in modern pulp mills. 51º ABTCP Congresso Internacional de Celulose e Papel e X Congresso Ibero-Americano de Pesquisa em Celulose e Papel Outubro, 23.-25.10.2018, São Paulo, Brazil.

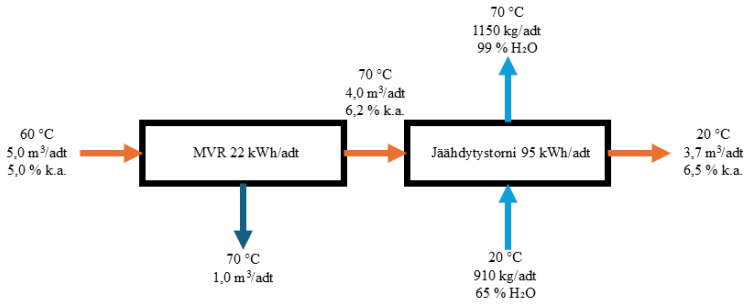
Väisänen, R. [Verkkoaineisto] 16.3.2015. Yle. [Viitattu 10.8.2024] Saatavilla: https://yle.fi/a/3-7870708

Äänekosken biotuotetehdas. [Verkkoaineisto] n.d. Metsä Group. [Viitattu 2.10.2024] Saatavilla: https://www.metsagroup.com/fi/metsafibre/metsafibre/sellun-tuotanto/aanekosken-biotuotetehdas/

Liite 1: Kehitetyt prosessikytkennät

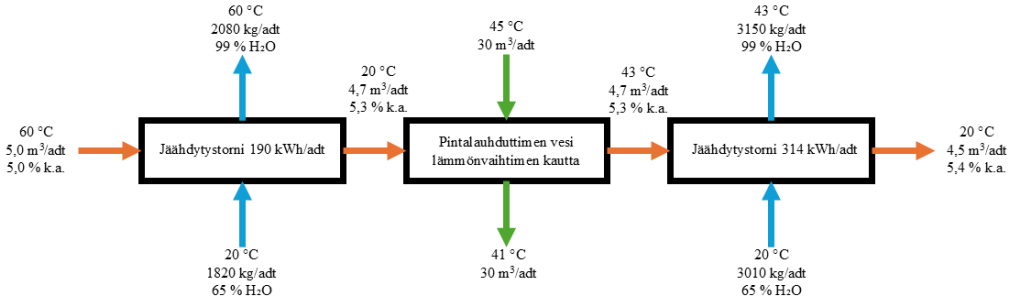
Kytkentä 0

Haihdutusta: 1,22 m^3/adt
Sähkönkulutus: 116 kWh/adt
Ominaiskulutus: 95,2 kWh/m^3



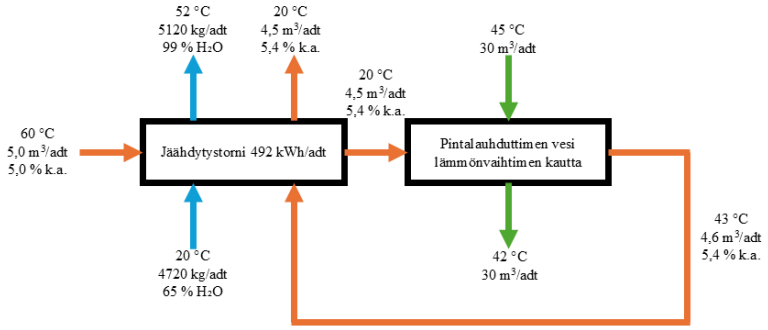
Kytkentä 1A

Haihdutusta: 0,400 m^3/adt
Sähkönkulutus: 504 kWh/adt
Ominaiskulutus: 1250 kWh/m^3



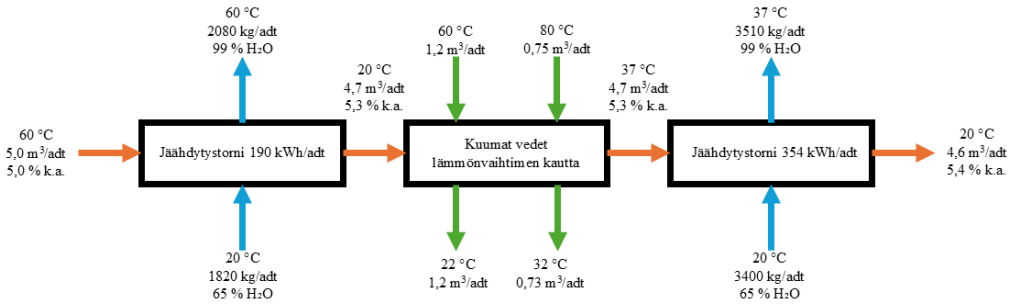
Kytkentä 1B

Haihdutusta: 0,400 m^3/adt
Sähkönkulutus: 492 kWh/adt
Ominaiskulutus: 1220 kWh/m^3



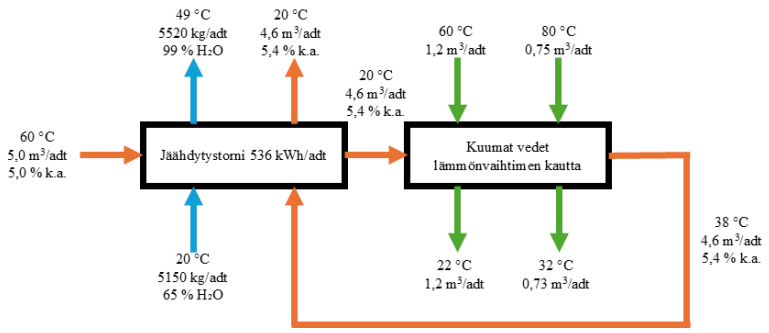
Kytkentä 2A

Haihdutusta: 0,366 m^3/adt
Sähkönkulutus: 544 kWh/adt
Ominaiskulutus: 1490 kWh/m^3



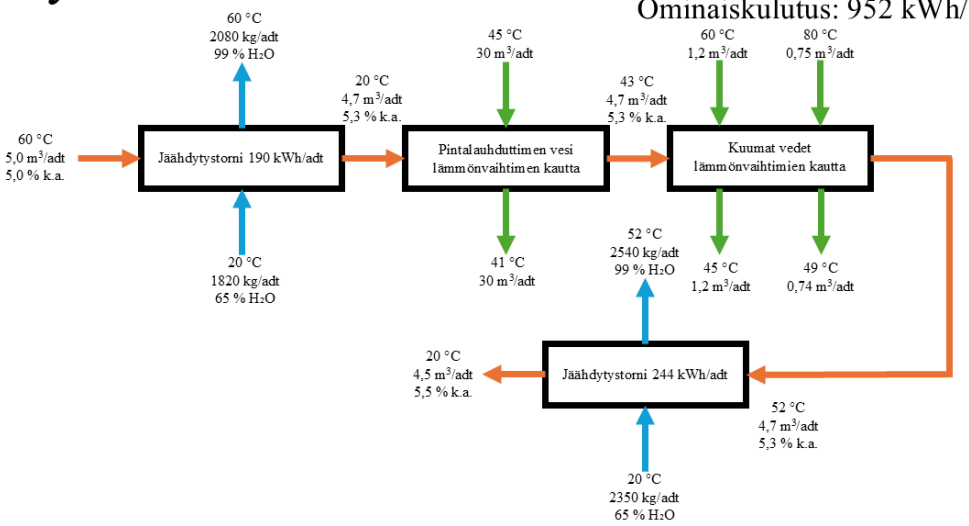
Kytkentä 2B

Haihdutusta: 0,373 m^3/adt
Sähkönkulutus: 536 kWh/adt
Ominaiskulutus: 1440 kWh/m^3



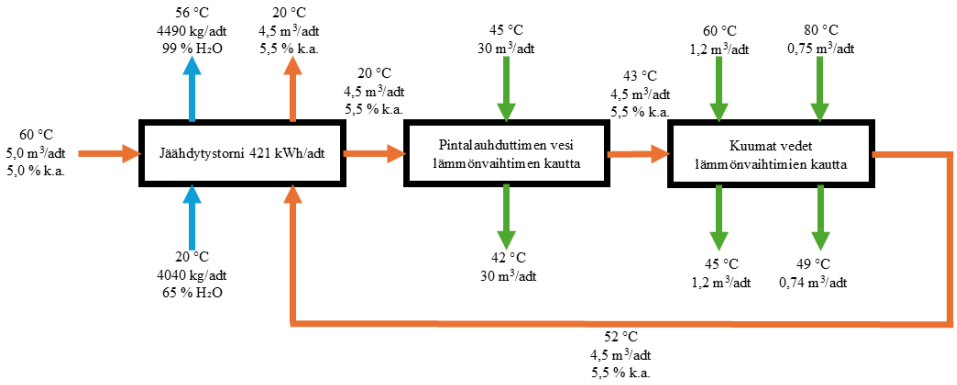
Kytkentä 3A

Haihdutusta: 0,456 m^3/adt
Sähkönkulutus: 435 kWh/adt
Ominaiskulutus: 952 kWh/m^3



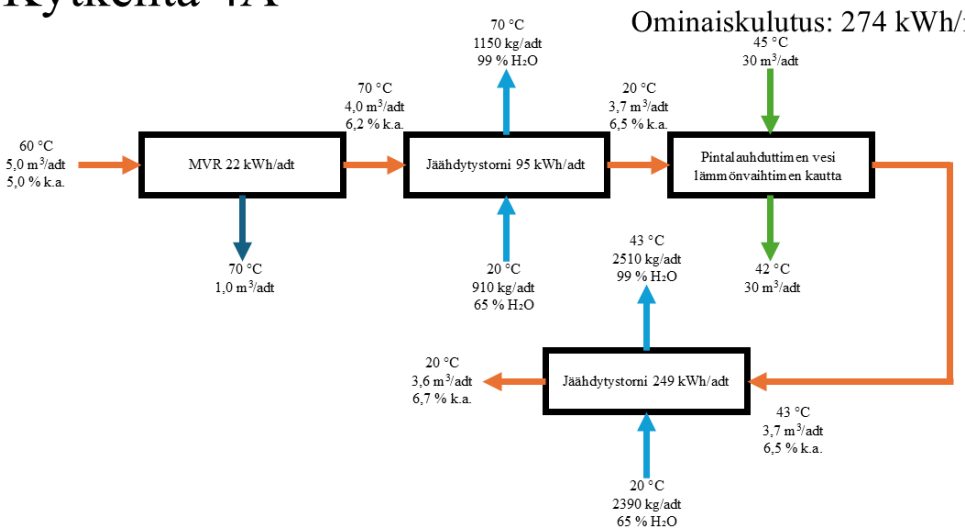
Kytkentä 3B

Haihdutusta: 0,452 m^3/adt
Sähkönkulutus: 421 kWh/adt
Ominaiskulutus: 931 kWh/m^3



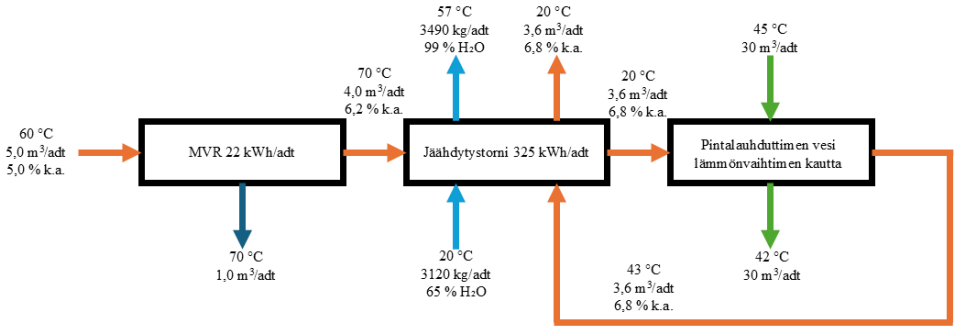
Kytkentä 4A

Haihdutusta: 1,33 m^3/adt
Sähkönkulutus: 365 kWh/adt
Ominaiskulutus: 274 kWh/m^3



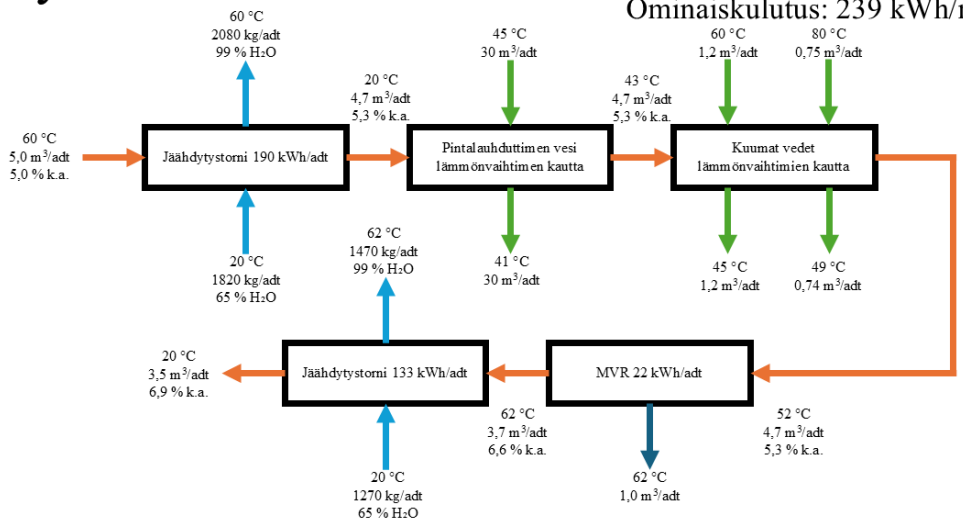
Kytkentä 4B

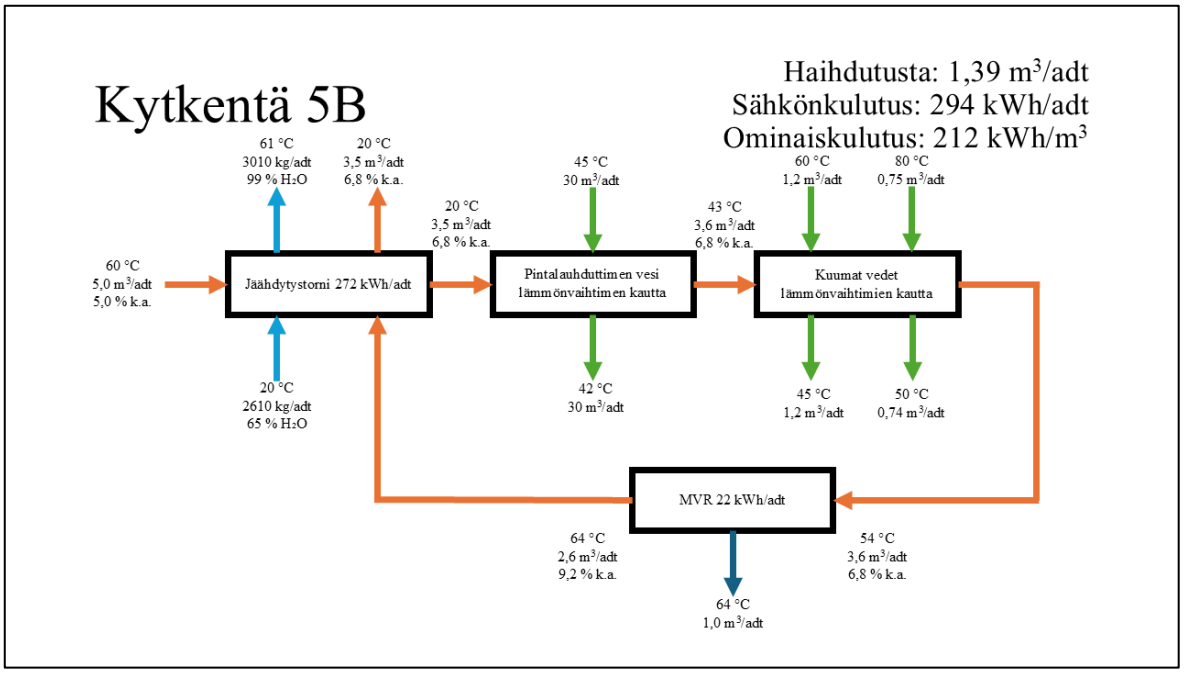
Haihdutusta: 1,35 m^3/adt
Sähkönkulutus: 346 kWh/adt
Ominaiskulutus: 256 kWh/m^3

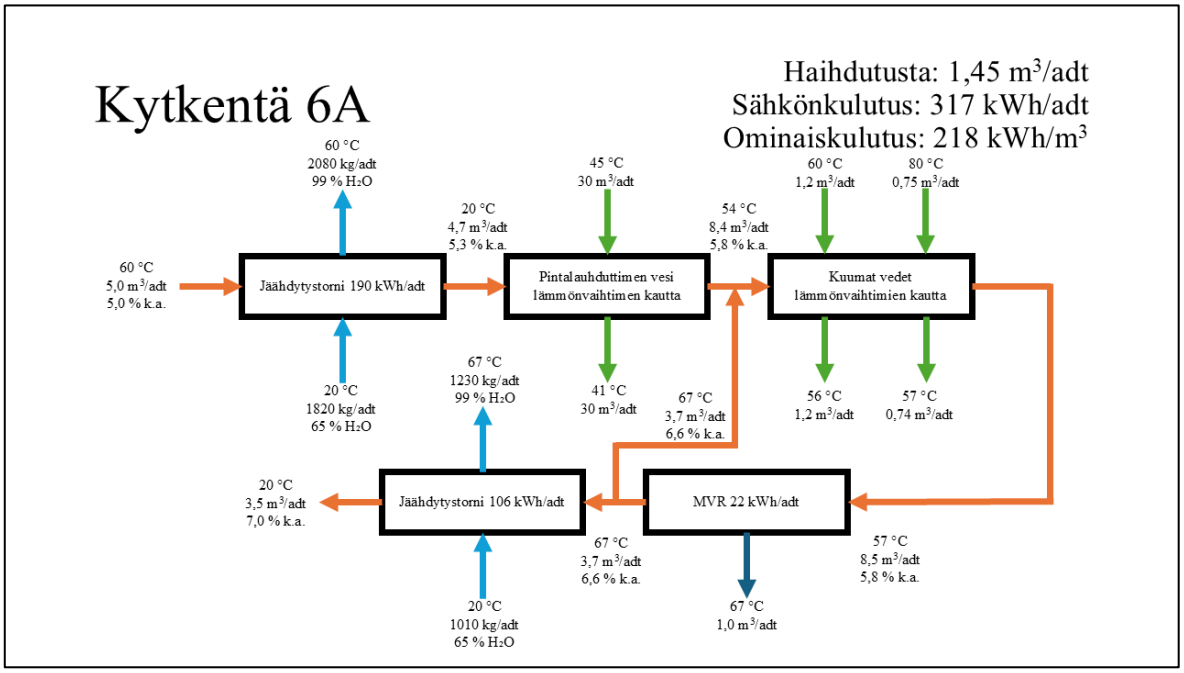


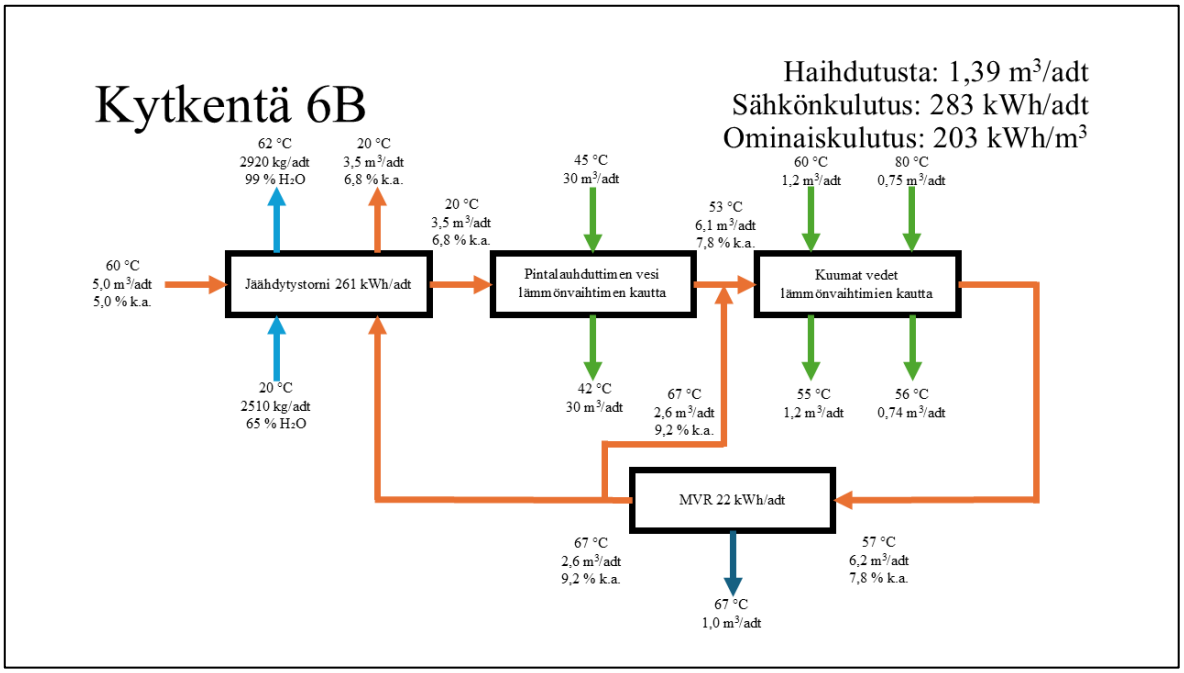
Kytkentä 5A

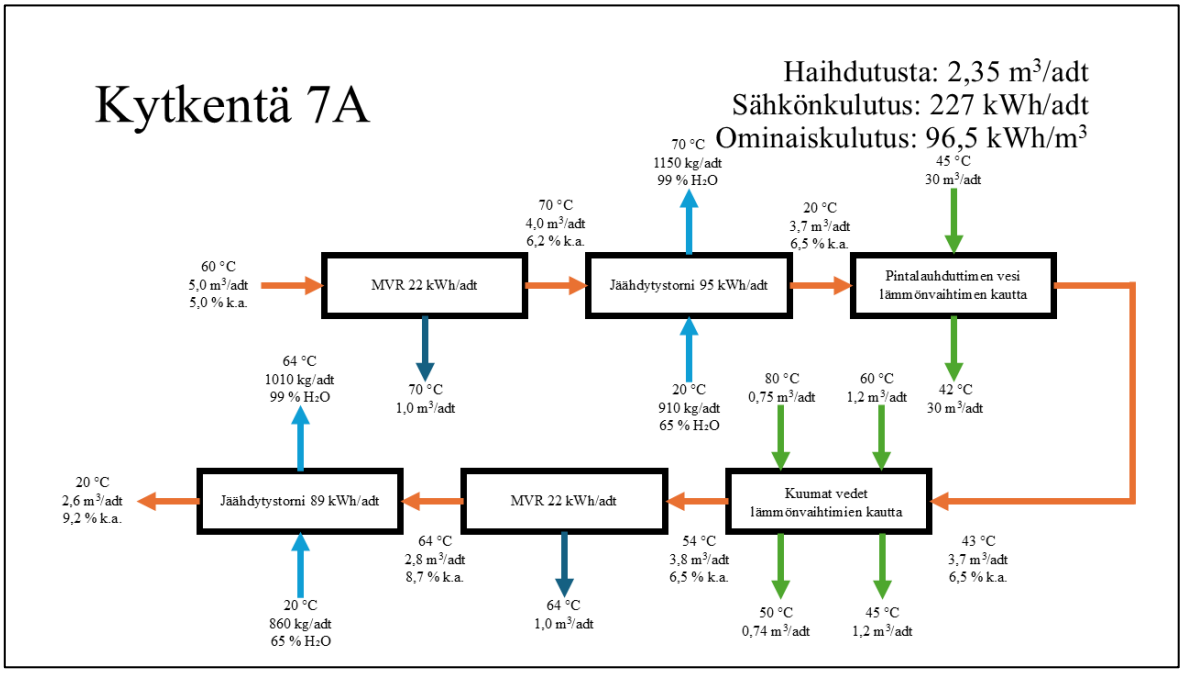
Haihdutusta: 1,44 m^3/adt
Sähkönkulutus: 344 kWh/adt
Ominaiskulutus: 239 kWh/m^3




Kytkentä 5B
Haihdutusta: 1,39 m³/adt
Sähkönkulutus: 294 kWh/adt
Ominaiskulutus: 212 kWh/m³
61 °C
3010 kg/adt
99 % H₂O
20 °C
3,5 m³/adt
6,8 % k.a.
45 °C
30 m³/adt
60 °C
1,2 m³/adt
80 °C
0,75 m³/adt
20 °C
3,5 m³/adt
6,8 % k.a.
43 °C
3,6 m³/adt
6,8 % k.a.
60 °C
5,0 m³/adt
5,0 % k.a.
Jäähdytystorni 272 kWh/adt
Pintalauhduttimen vesi lämmönvaihtimen kautta
Kuumat vedet lämmönvaihtimien kautta
20 °C
2610 kg/adt
65 % H₂O
42 °C
30 m³/adt
45 °C
1,2 m³/adt
50 °C
0,74 m³/adt
MVR 22 kWh/adt
64 °C
2,6 m³/adt
9,2 % k.a.
54 °C
3,6 m³/adt
6,8 % k.a.
64 °C
1,0 m³/adt

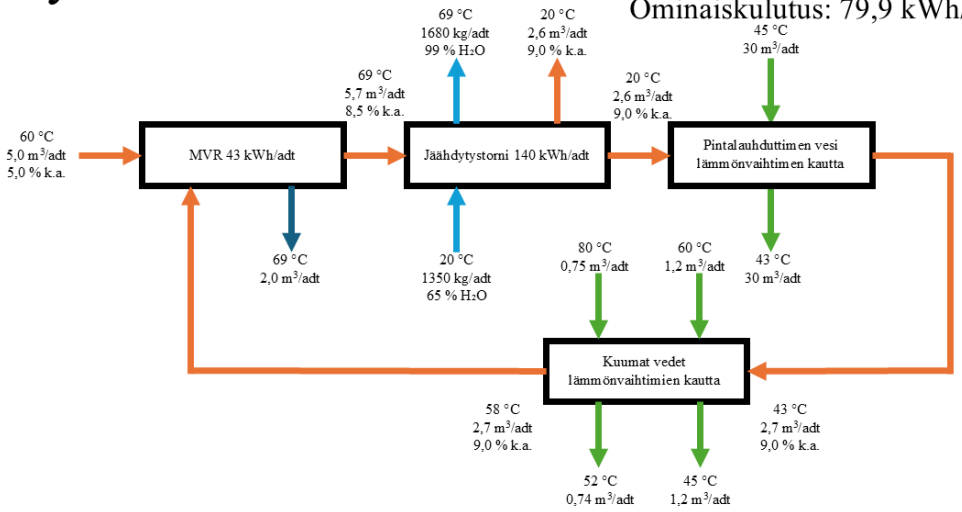

Kytkentä 6A
Haihdutusta: 1,45 m³/adt
Sähkönkulutus: 317 kWh/adt
Ominaiskulutus: 218 kWh/m³
60 °C
2080 kg/adt
99 % H₂O
45 °C
30 m³/adt
60 °C
1,2 m³/adt
80 °C
0,75 m³/adt
20 °C
4,7 m³/adt
5,3 % k.a.
54 °C
8,4 m³/adt
5,8 % k.a.
60 °C
5,0 m³/adt
5,0 % k.a.
Jäähdytystorni 190 kWh/adt
Pintalauhduttimen vesi lämmönvaihtimen kautta
Kuumat vedet lämmönvaihtimien kautta
20 °C
1820 kg/adt
65 % H₂O
67 °C
1230 kg/adt
99 % H₂O
41 °C
30 m³/adt
67 °C
3,7 m³/adt
6,6 % k.a.
56 °C
1,2 m³/adt
57 °C
0,74 m³/adt
20 °C
3,5 m³/adt
7,0 % k.a.
Jäähdytystorni 106 kWh/adt
MVR 22 kWh/adt
67 °C
3,7 m³/adt
6,6 % k.a.
57 °C
8,5 m³/adt
5,8 % k.a.
20 °C
1010 kg/adt
65 % H₂O
67 °C
1,0 m³/adt


Kytkentä 6B
Haihdutusta: 1,39 m³/adt
Sähkönkulutus: 283 kWh/adt
Ominaiskulutus: 203 kWh/m³
62 °C
2920 kg/adt
99 % H₂O
20 °C
3,5 m³/adt
6,8 % k.a.
45 °C
30 m³/adt
60 °C
1,2 m³/adt
80 °C
0,75 m³/adt
20 °C
3,5 m³/adt
6,8 % k.a.
53 °C
6,1 m³/adt
7,8 % k.a.
60 °C
5,0 m³/adt
5,0 % k.a.
Jäähdytystorni 261 kWh/adt
Pintalauhduttimen vesi lämmönvaihtimen kautta
Kuumat vedet lämmönvaihtimien kautta
20 °C
2510 kg/adt
65 % H₂O
42 °C
30 m³/adt
67 °C
2,6 m³/adt
9,2 % k.a.
55 °C
1,2 m³/adt
56 °C
0,74 m³/adt
MVR 22 kWh/adt
67 °C
2,6 m³/adt
9,2 % k.a.
57 °C
6,2 m³/adt
7,8 % k.a.
67 °C
1,0 m³/adt


Kytkentä 7A
Haihdutusta: 2,35 m³/adt
Sähkönkulutus: 227 kWh/adt
Ominaiskulutus: 96,5 kWh/m³
70 °C
1150 kg/adt
99 % H₂O
45 °C
30 m³/adt
70 °C
4,0 m³/adt
6,2 % k.a.
20 °C
3,7 m³/adt
6,5 % k.a.
60 °C
5,0 m³/adt
5,0 % k.a.
MVR 22 kWh/adt
Jäähdytystorni 95 kWh/adt
Pintalauhduttimen vesi lämmönvaihtimen kautta
64 °C
1010 kg/adt
99 % H₂O
70 °C
1,0 m³/adt
20 °C
910 kg/adt
65 % H₂O
80 °C
0,75 m³/adt
60 °C
1,2 m³/adt
42 °C
30 m³/adt
20 °C
2,6 m³/adt
9,2 % k.a.
Jäähdytystorni 89 kWh/adt
MVR 22 kWh/adt
Kuumat vedet lämmönvaihtimien kautta
64 °C
2,8 m³/adt
8,7 % k.a.
54 °C
3,8 m³/adt
6,5 % k.a.
43 °C
3,7 m³/adt
6,5 % k.a.
20 °C
860 kg/adt
65 % H₂O
64 °C
1,0 m³/adt
50 °C
0,74 m³/adt
45 °C
1,2 m³/adt

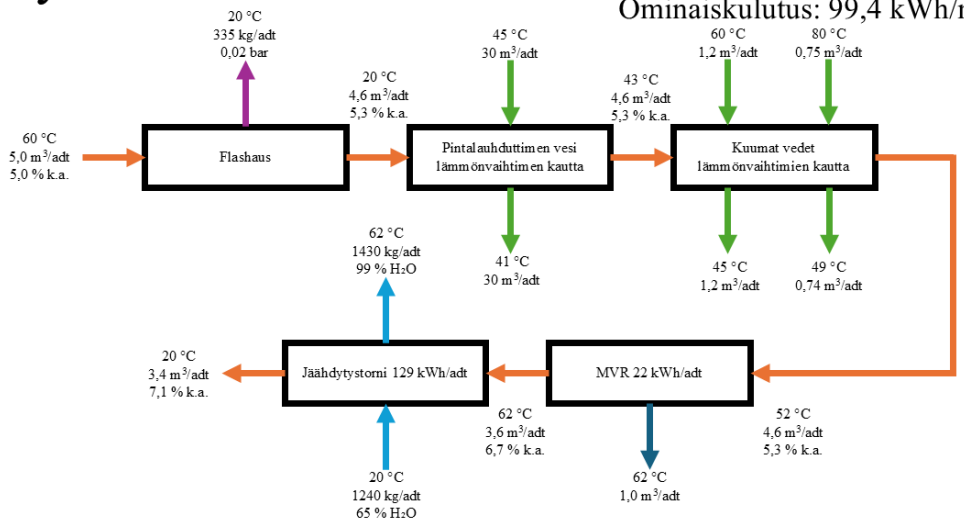
Kytkentä 7B

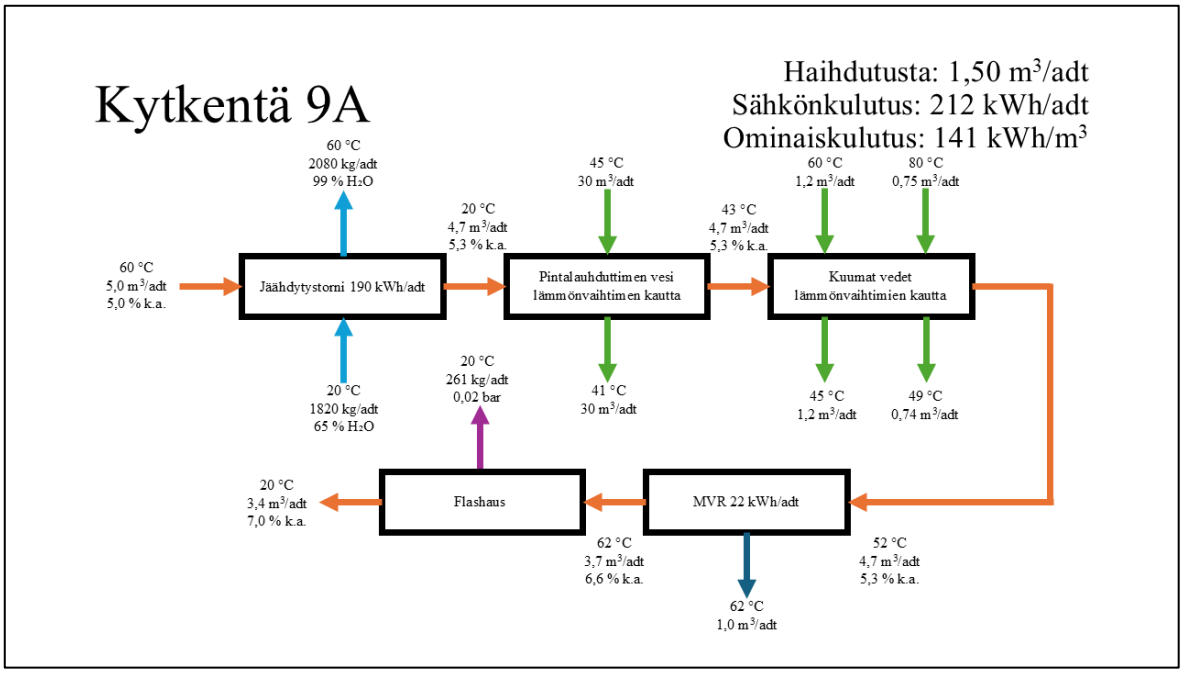
Haihdutusta: 2,30 m³/adt
Sähkönkulutus: 183 kWh/adt
Ominaiskulutus: 79,9 kWh/m³

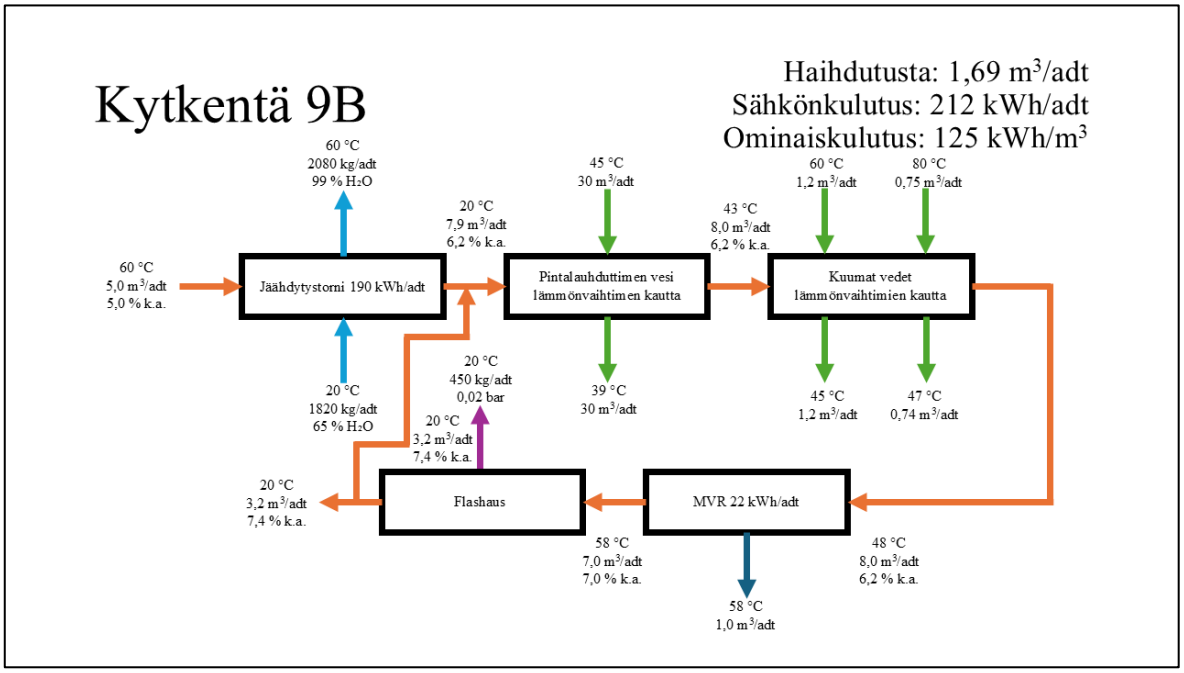


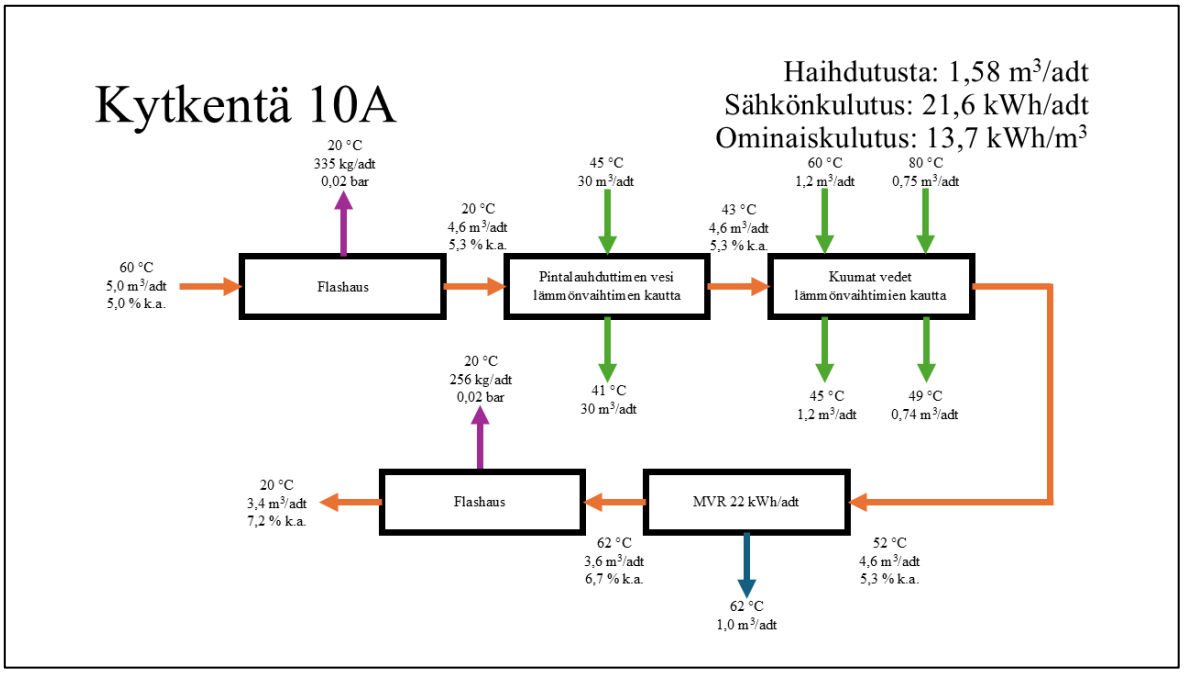
Kytkentä 8

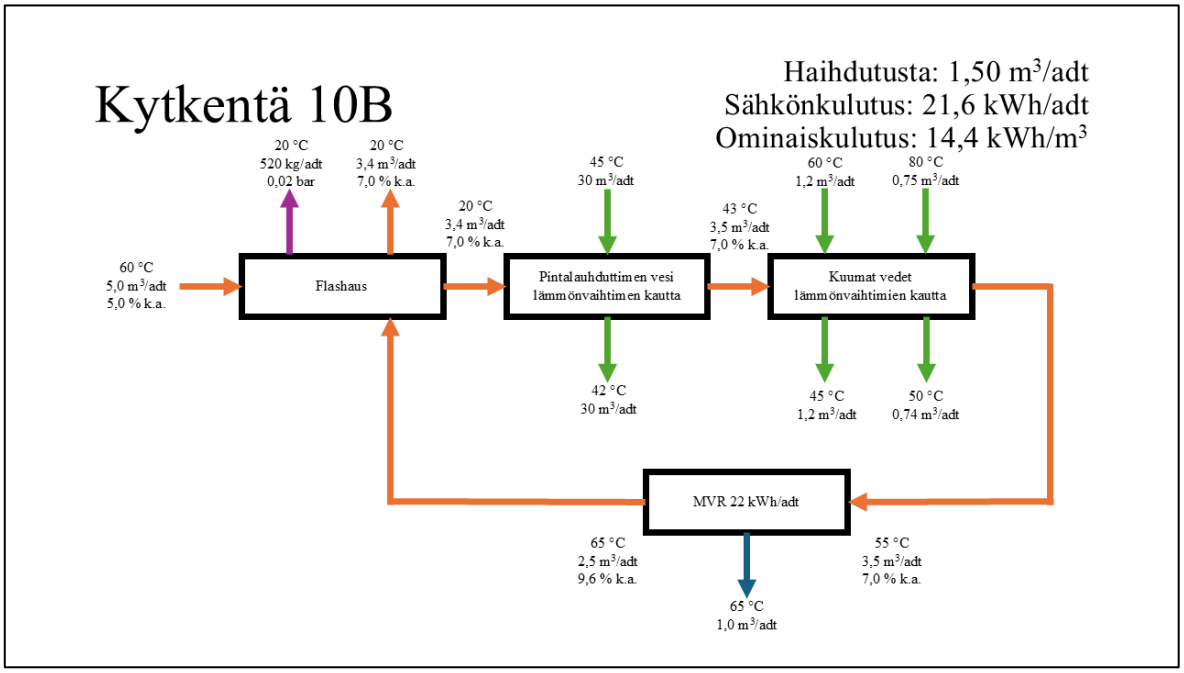
Haihdutusta: 1,52 m³/adt
Sähkönkulutus: 151 kWh/adt
Ominaiskulutus: 99,4 kWh/m³




Kytkentä 9A
Haihdutusta: 1,50 m³/adt
Sähkönkulutus: 212 kWh/adt
Ominaiskulutus: 141 kWh/m³
60 °C
2080 kg/adt
99 % H₂O
45 °C
30 m³/adt
60 °C
1,2 m³/adt
80 °C
0,75 m³/adt
20 °C
4,7 m³/adt
5,3 % k.a.
43 °C
4,7 m³/adt
5,3 % k.a.
60 °C
5,0 m³/adt
5,0 % k.a.
Jäähdytystorni 190 kWh/adt
Pintalauhduttimen vesi lämmönvaihtimen kautta
Kuumat vedet lämmönvaihtimien kautta
20 °C
1820 kg/adt
65 % H₂O
20 °C
261 kg/adt
0,02 bar
41 °C
30 m³/adt
45 °C
1,2 m³/adt
49 °C
0,74 m³/adt
20 °C
3,4 m³/adt
7,0 % k.a.
Flashaus
MVR 22 kWh/adt
62 °C
3,7 m³/adt
6,6 % k.a.
52 °C
4,7 m³/adt
5,3 % k.a.
62 °C
1,0 m³/adt


Kytkentä 9B
Haihdutusta: 1,69 m³/adt
Sähkönkulutus: 212 kWh/adt
Ominaiskulutus: 125 kWh/m³
60 °C
2080 kg/adt
99 % H₂O
45 °C
30 m³/adt
60 °C
1,2 m³/adt
80 °C
0,75 m³/adt
20 °C
7,9 m³/adt
6,2 % k.a.
43 °C
8,0 m³/adt
6,2 % k.a.
60 °C
5,0 m³/adt
5,0 % k.a.
Jäähdytystorni 190 kWh/adt
Pintalauhduttimen vesi lämmönvaihtimen kautta
Kuumat vedet lämmönvaihtimien kautta
20 °C
1820 kg/adt
65 % H₂O
20 °C
450 kg/adt
0,02 bar
39 °C
30 m³/adt
45 °C
1,2 m³/adt
47 °C
0,74 m³/adt
20 °C
3,2 m³/adt
7,4 % k.a.
20 °C
3,2 m³/adt
7,4 % k.a.
Flashaus
MVR 22 kWh/adt
58 °C
7,0 m³/adt
7,0 % k.a.
48 °C
8,0 m³/adt
6,2 % k.a.
58 °C
1,0 m³/adt


Kytkentä 10A
Haihdutusta: 1,58 m³/adt
Sähkönkulutus: 21,6 kWh/adt
Ominaiskulutus: 13,7 kWh/m³
20 °C
335 kg/adt
0,02 bar
45 °C
30 m³/adt
60 °C
1,2 m³/adt
80 °C
0,75 m³/adt
20 °C
4,6 m³/adt
5,3 % k.a.
43 °C
4,6 m³/adt
5,3 % k.a.
60 °C
5,0 m³/adt
5,0 % k.a.
Flashaus
Pintalauhduttimen vesi lämmönvaihtimen kautta
Kuumat vedet lämmönvaihtimien kautta
20 °C
256 kg/adt
0,02 bar
41 °C
30 m³/adt
45 °C
1,2 m³/adt
49 °C
0,74 m³/adt
20 °C
3,4 m³/adt
7,2 % k.a.
Flashaus
MVR 22 kWh/adt
62 °C
3,6 m³/adt
6,7 % k.a.
52 °C
4,6 m³/adt
5,3 % k.a.
62 °C
1,0 m³/adt


Kytkentä 10B
Haihdutusta: 1,50 m³/adt
Sähkönkulutus: 21,6 kWh/adt
Ominaiskulutus: 14,4 kWh/m³
20 °C
520 kg/adt
0,02 bar
20 °C
3,4 m³/adt
7,0 % k.a.
45 °C
30 m³/adt
60 °C
1,2 m³/adt
80 °C
0,75 m³/adt
20 °C
3,4 m³/adt
7,0 % k.a.
43 °C
3,5 m³/adt
7,0 % k.a.
60 °C
5,0 m³/adt
5,0 % k.a.
Flashaus
Pintalauhduttimen vesi lämmönvaihtimen kautta
Kuumat vedet lämmönvaihtimien kautta
42 °C
30 m³/adt
45 °C
1,2 m³/adt
50 °C
0,74 m³/adt
MVR 22 kWh/adt
65 °C
2,5 m³/adt
9,6 % k.a.
55 °C
3,5 m³/adt
7,0 % k.a.
65 °C
1,0 m³/adt