



KUIVATUSPROSESSIN ENERGIATEHOKKUUDEN TARKASTELU

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

2024

Jussi Männistö

Tarkastaja(t): Professori / TkT Esa Vakkilainen

TkT Katja Kuparinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT energijärjestelmien tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Jussi Männistö

Kuivatusprosessin energiatehokkuuden tarkastelu

Diplomityö

2024

94 sivua, 59 kuvaa, 5 taulukkoa ja 6 liitettä

Tarkastaja(t): Professori Esa Vakkilainen ja TkT Katja Kuparinen

Avainsanat: energiatehokkuus, päällystyskone, maakaasu, lämmöntalteenotto

Paperiteollisuudessa markkinoiden ylitarjonta ja voimakkaasti nousevat kustannukset vaikuttavat merkittävästi paperiteollisuuden kustannuskilpailukykyyn. Viimeisenä koko metsäteollisuutta koskettanut energiakriisi vuonna 2022 aiheutti voimakkaita kustannuksien nousuja.

Tässä diplomityössä selvitettiin vuonna 2001 käyttöönotetulle päällystyskonelinjalle mahdollisia energiatehokkuutta parantavia kohteita. Energiatehokkuutta parantavia kohteita löydettiin prosessinajotavoista, sekä hukkalämpövirtauksista. Diplomityössä suoritettiin myös energiatehokkuutta parantava uusi kuivatustapa päällystyskoneella.

Työn kirjallisuusosassa käsitellään paperin jälkikäsitelyä päällystämisen, kuivaamisen ja kiillottamisen osalta. Diplomityön lähteinä ovat olleet erilaiset aiheeseen liittyvät tiedekirjallisuus ja internetlähteet, joita on sovellettu käytännön kokeissa tuotantolinjalla.

Diplomityössä onnistuttiin löytämään mahdollisia energiatehokkuuteen liittyviä kokonaisuuksia, ja selvitettiin kohteiden vaikutus energiatehokkuuden näkökannasta. Työn tuloksista saatiin tehtyä tehokkuuden parantamiseen liittyviä ehdotuksia ja ehdotuksiin liittyvät suositeltavat jatkotoimenpiteet. Diplomityössä ei otettu suoraa kantaa taloudellisiin vaikutuksiin, kuten investointi ja investoinnin takaisinmaksu aika.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Energy Technology

Jussi Männistö

Examination of the energy efficiency of drying process

Master's thesis

2024

94 pages, 59 figures, 5 tables and 6 appendices

Examiners: Professor Esa Vakkilainen and D.Sc (Tech.) Katja Kuparinen

Keywords: energy efficiency, coating machine, natural gas, heat recovery.

In the paper industry market oversupply and strongly rising costs significantly affect the cost competitiveness of the paper industry. The last energy crisis in 2022, which affected the entire forest industry caused strong cost increases.

In this Master Thesis potential targets for improving energy efficiency have been searched for the coating machine line which has started in 2001. Items that improve energy efficiency were found in process driving methods and waste heat flows. In this master's Thesis has also noticed new drying method with a coating machine what improves energy efficiency.

In the literature part of the work deals with the post-processing of paper in terms of coating, drying, and polishing. The sources of the master's thesis have been various scientific literature and internet sources related to the topic, which have been applied in practical experiments on the production line.

In the master's thesis it was possible to find possible entities related to energy efficiency, and the effect of the objects from the point of view of energy efficiency was clarified.

From results of the work, proposals related to improving efficiency and recommended follow up measures related to the proposals were made.

The master's thesis did not take a direct position on financial effects, such as investment and investment payback period.

KIITOKSET/ ACKNOWLEDGEMENTS

Tämä diplomityö on tehty UPM Communication Papers Oy:n Kymmin paperitehtaalle. Diplomityö oli antoisa ja silmiä avaava kokemus lämpöenergiaan liittyvässä optimoinnissa paperiteollisuudessa.

Haluan kiittää mielenkiintoisesta aiheesta Teemu Kiiskistä ja Jani Jokirantaa. Koeajoihin ja ajojärjestelyihin osallistunutta joustavaa henkilökuntaa, sekä automaatiokunnossapidon Mikko Forsell ja Teemu Henttu, jotka mahdollistivat päällystyskoneen automaatiojärjestelmään liittyvät muutokset koeajoja varten.

Lappeenrannan yliopistoa haluan kiittää yleisesti laadukkaasta opetuksesta, joka mahdollisti tämän diplomityön teoreettisen osaamisen.

Erityisesti haluan kiittää perheeltäni saamasta tuesta, jotka ovat kannustaneet minua opintojeni suorittamisessa.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

A	pinta-ala	[m ²]
p	paine	[bar, Pa]
R	ainekohtainen kaasuvakio	[J/(kg K)]
T	lämpötila	[°C, K]
U	kokonaislämmönsiirtokerroin	[W/m ² K]
V	tilavuus	[m ³]
v	nopeus	[m/s]
x	Ilmankosteus	[kgvettä/kgk.i]

Kreikkalaiset

α	absorptiokerroin	[-]
β	aineensiirtokerroin	[m/s]
ε	emissiviteetti, tilavuusosuus	[-]
η	hyötysuhde	[%]
μ	viskositeetti	[pa s]
ρ	tiheys	[m ³ /kg]
Δ	erotus	[-]
λ	lämmönjohtavuus	[W/(mK)]

Vakiot

g	painovoimakiihtyvyys	9,81 m/s
σ	Stefan-Boltzmannin vakio	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ [W/(m}^2\text{K}^4\text{)]}$
π	Pii	3,14

Dimensiottomat luvut

Re	Reynoldsin luku
	Mottling

Lyhenteet

NDS	naturalistic design science
WFU	Woodfree uncoated
WFC	Woodfree coated

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

(Kiitokset)

(Symboli- ja lyhenneluettelo)

1	Johdanto.....	11
1.1	Tutkimuksen tausta	11
1.2	Tutkimustavoitteet ja laajuus	14
2	Hienopaperit	15
2.1	Puuvapaat päällystämättömät hienopaperit	15
2.2	Puuvapaat päällystetyt hienopaperit	16
3	Paperin jälkikäsitteily	17
3.1	Pintaliimaus	17
3.2	Päällystyspasta.....	19
3.2.1	Pigmentit.....	19
3.2.2	Sideaineet.....	21
3.2.3	Lisäaineet.....	22
4	Päällystysmenetelmät	24
4.1	Lyhytviipymäapplikointi	24
4.2	Suutinapplikointi.....	25
4.3	Filmipäällystys.....	26
5	Paperin kiillottaminen	27
5.1	Superkalanterointi.....	28
6	Paperin päällysteen kuivaaminen	32
6.1	Sylinterikuivaus	34
6.2	Ilmakuivaimet	35
6.3	Infrapunakuivatus	37
6.4	Yhdistelmäkuivatus	39
6.5	Välisylinterit	40
7	Kuivatuksen energian valmistus ja siirtäminen.....	41

7.1	Maakaasupolttimet.....	41
7.1.1	Atmosfääripoltin	41
7.1.2	Puhallinpoltin.....	42
7.1.3	Polttimen käynnistäminen ja säätö	43
7.2	Lämmönsiirto.....	47
7.2.1	Johtuminen.....	47
7.2.2	Konvektio.....	50
7.2.3	Säteily	51
7.2.4	Lämmönsiirto ilmakeivaimissa.....	53
7.2.5	Lämmönsiirto säteilykuivaimissa	53
7.2.6	Hukkalämpöenergia	53
7.3	Kuumaöljykattila	56
7.4	Lämmöntalteenotto ja hyödyntäminen	57
7.5	Kosteaa ilma	60
8	Maakaasu.....	63
8.1	Maakaasun ominaisuudet.....	63
8.2	Maakaasun palaminen.....	64
9	Kuivatusprosessien tarkastelu	67
9.1	Päällystyskoneen tarkastelu	67
9.1.1	Päällystyskoneen kuivatusprosessi	69
9.1.2	Energiätehokkaampi säätöprosessi	73
9.1.3	Vaihtoehtoinen kuivatustapa.....	75
9.1.4	Kaasuinfrakuivaimien koeajot	76
9.1.5	Sähköinfrakuivaimen koeajo	81
9.2	Kuumaöljykattilan tarkastelu.....	82
10	Johtopäätökset	89
	Lähteet	92

Liitteet

Liite 1. Kuumaöljykattilan poltinhuoltoraportti 2023.

Liite 2. Kuumaöljykattilan poltinhuoltoraportti 2024.

Liite 3. Kuumaöljykattilan käyttötarkastus 2023.

Liite 4. Mobiltherm 605 ominaisuudet.

Liite 5. Ohje vaihtoehtoiselle kuivatukselle C3 Päällystyskoneella.

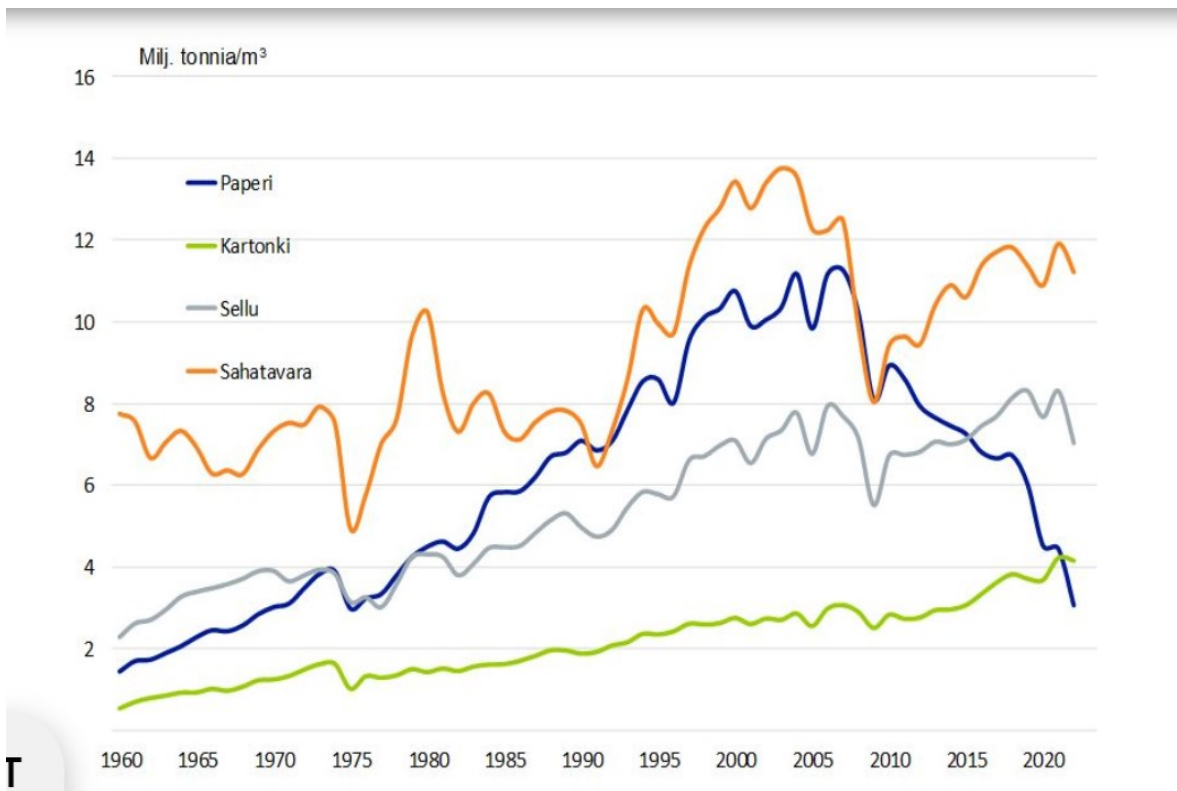
Liite 6. Koeajojen mittauspöytäkirjat.

1 Johdanto

Tämän diplomityön tarkoituksena on ollut etsiä uusia energiatehokkaampia kuivatustapoja UPM Kymin paperitehtaan jälkikäsitellyssä käytettävän päällystyskoneen, sekä kiillotuska-
lanterin energiankäsitelyssä.

1.1 Tutkimuksen tausta

Paperiteollisuudessa kysynnän ja tuotantomäärien suhde on laskenut viimeisillä vuosikym-
menillä merkittävästi ja paperin kysynnän laskeminen on jatkunut vielä 2020 luvullakin. Pa-
perin tuotantomäärät onkin enää noin 26 % tuotantohuipusta. Kysynnän laskemisen vuoksi
paperiteollisuudessa on jouduttu supistamaan tuotantoa merkittävästi viimeisen 15 vuoden
aikana. Kuvassa 1 esitetään metsäteollisuuden tuotantomäärät 1960 luvulta alkaen (metsäte-
ollisuuden tuotantomäärät, 2023).



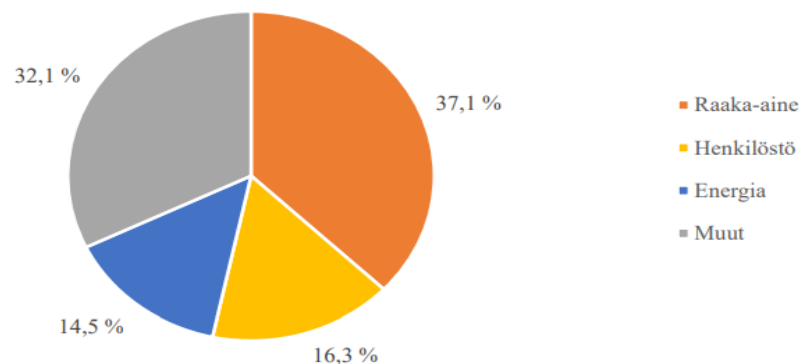
Kuva 1. Metsäteollisuuden tuotantomäärät (metsäteollisuuden tuotantomäärät, 2023).

Metsäteollisuuden yritykset ovatkin kovan paineen alla, ja osa yhtiöistä onkin luopunut paperin valmistamisesta kokonaan ja keskittänyt tuotantonsa muun muassa kartongin valmistukseen. Yritykset, jotka jatkavat paperinvalmistusta markkinoilla on oltava tuotantotehokkaita, sekä kilpailukykyisiä maailman markkinoilla.

Paperin valmistuksessa kilpailukykyyn vaikuttaa useat erilaiset tekijät, joista tuotantokustannukset koostuvat, kuten raaka-aineet, laitteiston kunnossapito, energiakustannukset, kuljetuskustannukset ym.

Suurena kustannuseränä on energia, jota käytetään paperin valmistuksessa sähköenergian ja lämmitysenergian muodossa. Energiakustannukset näkyvät myös kuljetukseen liittyvissä kustannuksissa polttoaineiden hintojen nousun vuoksi. Kuvassa 2 esitetään paperi- ja selluteollisuuden keskimääräinen kustannusrakenne Euroopassa vuonna 2017 (Lindkvist, 2023, 18–26).

Keskimääräinen kustannusrakenne paperi- ja selluteollisuudessa Euroopassa



Kuva 2. Paperi- ja selluteollisuuden keskimääräinen kustannusrakenne (Lindkvist, 2023).

Nousseiden kustannuksien lisäksi teollisuutta ohjaa kestävä kehitys ja ilmastonmuutoksen torjunta. Euroopan unioni onkin sitoutunut Euroopan ilmastolain myötä olemaan hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä (Hiilineutraalisuus, 2019).

UPM on ilmoittanut yhtiön 2030 vastuullisuustavoitteiden myötä, että yhtiön tavoitteena on vähentää energiantuotannon ja ostosähkön fossiilisia hiilidioksidi päästöjä 30 % vuoden 2019 päästöistä (vastuullisuustavoitteet, 2019).

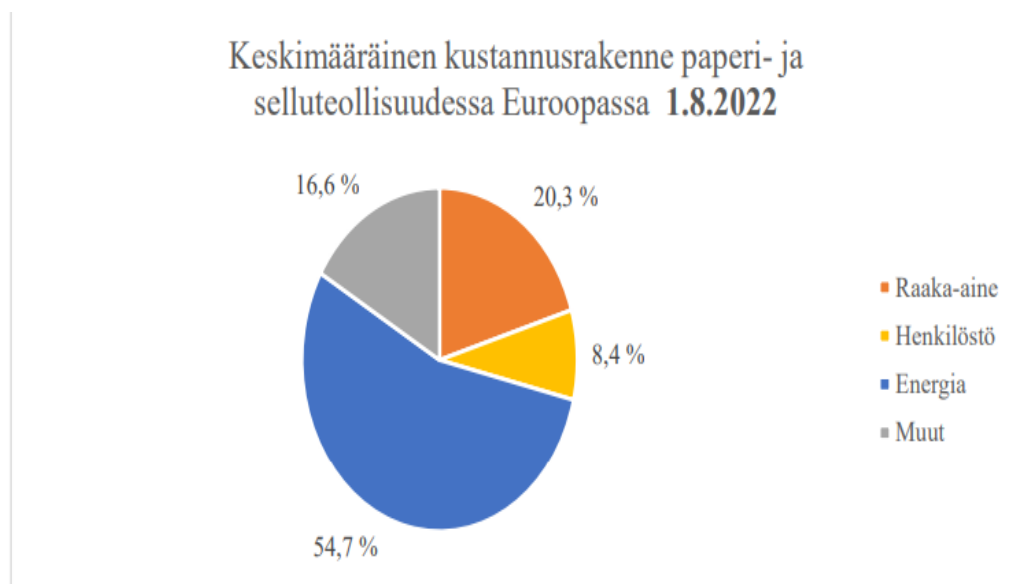
Tuotantoyhtiöiden tulevaisuuden haasteet ovat siis fossiilisten polttoaineiden kulutuksen vähentämisessä ja korvaamisessa tuotantoyksiköissä.

Vuosina 2019–2023 nousseet energiakustannukset ovat vaikuttaneet merkittävästi paperiteollisuuden tuotantokustannuksiin. Polttoaineiden hintojen nousut vaikuttavat merkittävästi kuljetuskustannuksiin, etenkin tuotantolaitoksissa, joissa pääsääntöinen logistiikka toteutetaan rekka-autoilla, jos alueen läheisyydessä ole junaterminaalia tai satamaa. Sähköenergian sekä lämmitysenergian tuotannossa käytettävien polttoaineiden hinnan muutokset näkyvät taas suorissa tuotantokustannuksissa.

Vuonna 2020 alkaneiden energian hinnan nousut ovatkin aiheuttaneet paperiteollisuudelle merkittäviä tuotantokustannuksien nousuja. Energian hinta onkin heilunut viimeiset 5 vuotta suhteellisen voimakkaasti.

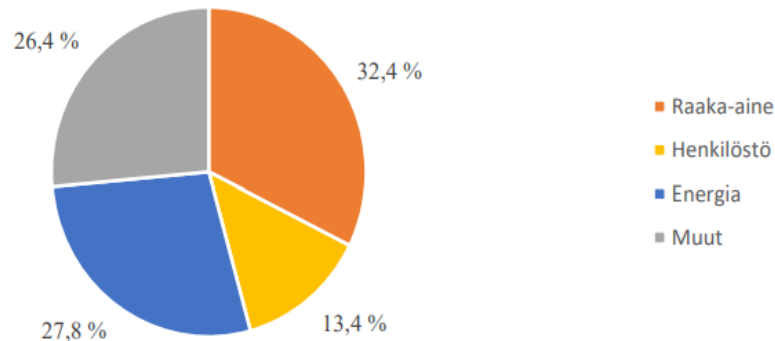
Vuonna 2022 koko Eurooppaa koskettanut energiakriisi nosti kaikkia energiakustannuksiin vaikuttavia tekijöitä voimakkaasti, kuten polttoaineiden ja sähköenergian hintaan. Suurimmat hinnan nousut nähtiin maakaasun ja sähköenergian hinnoissa.

Energian hintojen tasaannuttua vuoden 2022 jälkeenkin energian hinta on noussut merkittävästi, kun tarkastellaan paperi- ja selluteollisuuden keskimääräisiä kustannuksia. Kuvissa 3 ja 4 esitetään vuosien 2022 ja 2023 keskimääräiset kustannusmuutokset, joihin on vaikuttanut muun muassa vuoden 2022 energiakriisi (Lindkvist, 2023, 18–26).



Kuva 3. Paperi- ja selluteollisuuden keskimääräiset kustannukset vuonna 2022 (Lindkvist, 2023).

Keskimääräinen kustannusrakenne paperi- ja selluteollisuudessa Euroopassa 1.2.2023



Kuva 4. Paperi- ja selluteollisuuden keskimääräiset kustannukset vuonna 2023 (Lindkvist, 2023).

1.2 Tutkimustavoitteet ja laajuus

Diplomityön tavoitteena on ollut tutkia energiatehokkaampaa kuivatusprosessia paperin jälkikäsitellyssä käytettävälle päällystyskoneelle, sekä kiillotuskalanterin lämmitysenergian siirrossa käytettävälle kuumaöljykattilalle.

Diplomityön tavoitteena on selvittää nykyiseen kuivatusprosessiin uusia energiatehokkaita ratkaisuja. Tässä työssä etsitään energiatehokkaita ratkaisuja prosessinajotavoista sekä prosessista syntyvien hukkalämpöenergian virtauksien hyödyntämistä.

Diplomityö käsittelee vuonna 2001 käyttöönotettua kuivatuslaitteistoa. Tutkimustyönäineisto koostuu paperin valmistukseen, energiantuotantoon ja energiansiirtoon käsittelevistä tieteellisestä kirjallisuudesta, artikkeleista, internet pohjaisesta oppimisympäristöstä nimeltä knowpap, sekä alkuperäisen laitevalmistajan toimittavista toimintakäsikirjoista.

Diplomityöhön liittyvä laskenta perustuu prosessikohteista saatujen kenttämittausten, kuten infrapunalämpötila mittausten ja siirrettävän termoelementin avulla. Laskennoissa on myös hyödynnetty prosessikohteiden automaatiojärjestelmän mittausdatan historiatietoja, sekä laitevalmistajan tekemiä mittauksia.

Työn toteuttamisessa käytetään naturalistic design science (NDS) menetelmää, jossa teoreettista tutkimusta verrataan kenttätutkimukseen eli todelliseen tuotantoympäristössä tehtäviin kokeisiin. (Naukkari, 2015, 152–154.)

2 Hienopaperit

Hienopaperit voidaan jakaa kahteen pääryhmään, jotka ovat puupitoiset hienopaperit ja puuvapaat hienopaperit. Näiden ryhmien sisällä on useita erilaisia paperilajeja kuten SC, LWC, MWC ovat puupitoisia paperilajeja ja WFU ja WFC ovat puuvapaita paperilajeja. Näiden lajien erona on massanvalmistus, joka on puupitoisissa papereissa mekaanisesti hiomalla tai hiertämällä valmistettua. Puuvapaiden paperilajien massa on valmistettu kemiallisessa prosessissa sellutehtaalla (Knowpap, 2023).

2.1 Puuvapaat päällystämättömät hienopaperit

Puuvapaat päällystämättömät papereista käytetään nimeä Woodfree Uncoated (WFU) ovat sellupohjaisia paperilajeja, joihin kuuluvat muun muassa offset-, toimisto, ja raamattupaperit ja kirjekuoret. Lajiryhmänä sellupohjaiset painopaperit ovat todella laajat MF- tai superkalanteriviimeistelyjä papereita. Paperin käyttö tarkoitukseen vaikuttaa sen pinnan karheus ja sileys. WFU papereilla lopputuotteet voivat olla erityyppisiä offset painomenetelmän vuoksi.

Neliömassaltaan WFU – papereiden alue on laaja. Pienimmät lajit voivat olla jopa 25 g/m² ja suurimmat lajit taas jopa 300 g/m². WFU- paperit koostuvat sellusta, josta osa on armeerausmassaa ja täyteaineita. Normaalisti paperit pintaliimataan ja pigmentoidaan kalanteroinnin lisäksi. Taulukossa 1. on esitetty WFU papereiden tärkeimpiä ominaisuuksia. (Knowpap, 2023.)

Taulukko 1. WFU papereiden tärkeimmät ominaisuudet.

WFU Paperit		
Ajettavuus	Painettavuus	Kuva-ominaisuudet
Bulkki	Painovärin absorptio	Kiilto
Kosteusprofiili	Mustesuihku-ominaisuudet	Sileys
Jäykkyys	Pintalujuus	Formaatio
KS/PS-vetosuhde	Käyristyminen	Opasiteetti
Orientaatioprofiilit	Kutistuma	Vaaleus
PS profiilit	Pysyvä venymä	

2.2 Puuvapaat päällystetyt hienopaperit

Puuvapaista päällystetyistä papereista käytetään nimeä Woodfree Coated (WFC), jotka ovat sellupohjaisia päällystettyjä paperilajeja. WFC- paperit ovat tarkoitettuja vaativiin painatuksiin. Käyttökohteina WFC- papereilla ovat aikakauslehdet, mainostuotteet, taidekirjat, korkealaatuiset luettelot ja kartat. Papereiden käyttötarkoitukset vaikuttavat paperien päällystemääriin, kiillotusasteeseen, ja muihin erikoisominaisuuksiin (Knowpap, 2023).

Neliömassat vaihtelevat myös laajasti WFC- papereilla. Neliömassat ovat tyypillisesti 70–350 g/m² välillä. Graafisia papereita voidaan päällystää tarvittaessa 1–3 kertaa, jonka jälkeen paperit voidaan pintakäsitellä kone, matta tai superkalanteroinnilla (Knowpap, 2023). Taulukossa 2. on esitetty WFC papereiden tärkeimpiä ominaisuuksia.

Taulukko 2. WFC Papereiden tärkeimmät ominaisuudet.

WFC Paperit		
Ajettavuus	Painettavuus	Kuva-ominaisuudet
Huokoisuus	Painovärin absorptio	Kiilto
Bulkki	Absorption toispuoleisuus	Sileyys
Kosteusprofiili	Öljyn absorptio	Formaatio
Jäykkyys	Pintalujuus	Mottling taipumus
KS/PS-vetosuhde	Märkälujuus	Opasiteetti
Orientaatioprofiilit	Palstautumislujuus	Vaaleus
PS Profiilit	Käyristyminen	Paperin symmetrisyys
	Kutistuma	Mittapysyvyys
		Kupruilu-taipumus
		Viiruisuus

3 Paperin jälkikäsitely

Tämän kappaleen tarkoituksena on esittää lyhyesti mistä hienopaperin päällystäminen, sekä kalanterointi koostuvat.

3.1 Pintaliimaus

Hienopaperin tuotannossa tyypillinen osaprosessi on pintaliimaus, jossa käytetään liimapuristinta. Liimapuristimella paperin pintaan lisätään tärkkelyspintaliimaa, jonka tarkoituksena on parantaa paperin pintalujuutta, jäykkyyttä, pölyämättömyyttä sekä, absorptio-ominaisuuksia.

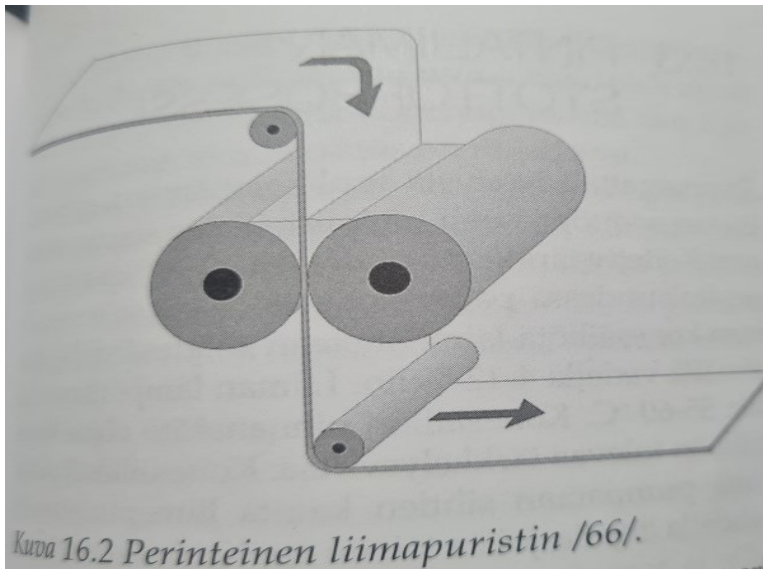
Pintaliimauksella on myös mahdollista ohjata lujuuden kehittymistä haluttuun suuntaan, kahdella tavalla lisäämällä kevyesti penetroituvalla liimauksella, tai palstautumislujuutta syvemmälle tunkeutuvalla liimauksella. Pintaliimauksen etuina on myös halvempien ja lujuudeltaan heikompien massojen ja täyteaineiden käyttö. Pintaliimana voidaan käyttää muitakin lujuusliimoja, kuten karboksimeetyyliselluloosaa (CMC), polyvinyylialkoholia (PVA) tai näiden yhdistelmien sekoitusta (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 180).

Liimapuristin sijoitetaan yleisesti paperikoneen kuivatusosalle niin että pintaliimauksen jälkeen paperikoneen kuivatuskapasiteetistä on noin kolmasosa jäljellä. Liimapuristimet voidaan jakaa kahteen perustyyppiin, lammikkoliimapuristimet ja filminsiirtopuristimet. Liimapuristimet ovat yleisesti sijoitettu kaltevaan asentoon. Telojen vaipat voivat olla kumia tai polyuretaania.

Useissa liimapuristimissa alatelan halkaisija on ylätelaa suurempi. Ylätelana voidaan käyttää leveillä paperikoneilla metallivaippaista taipumakompensoitua telaa, jonka taipuma säädetään nippikuormituksen mukaisesti (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 180).

Lammikkoliimapuristimissa paperiraina kulkee kahden telan välistä, joiden välissä on lammikkona tärkkelysluosta. Lammikkoliimapuristimessa imeytyvän kuivan tärkkelysmäärän kasvuun vaikuttavia tekijöitä ovat tärkkelysluoksen väkevyys, viskositeetti, rainan neliömassa, huokoisuus, karheus tai kosteus. Kuiva-ainepitoisuus on yleisesti pintaliimalla tyypillisesti 5–6 % ja rainaan jäävän pintaliiman määrä on alle 4 g/m². Tätä suuremmat kuiva-

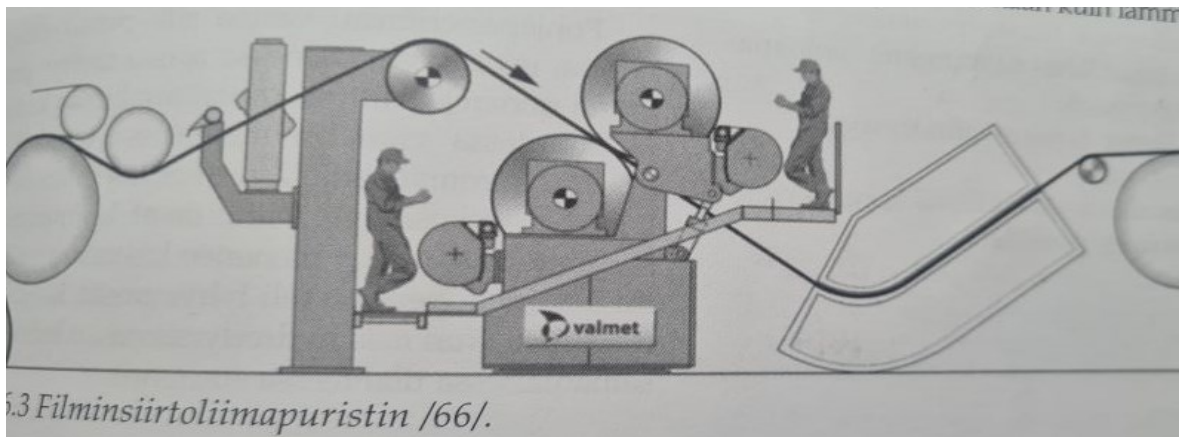
ainepitoisuudet aiheuttavat tyypillisesti prosessin ajovaikeuksia ja laatuongelmia (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001). Kuvassa 5 esitetään perinteisen lammikkoliimapuristin rakenne (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 180).



Kuva 5. Perinteinen liimapuristin (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001).

Lammikkopuristimien suurin ongelma on nopeusrajoitteisuus, joka on tyypillisesti 1000 m/min. Nopeuksien noustessa liian korkeiksi lammikko muuttuu rauhattomaksi ja aiheuttaa prosessia häiritseviä roiskeita. Korkeiden nopeuksien ongelmana on myös lammikon huono virtausprofiili (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001,180).

Filminsiirtoliimapuristin eroaa lammikkoliimapuristimesta liimanannostelulla, jossa lammikon sijasta liima annostellaan telojenpäälle levitettävänä ohuena liimafilminä. Filminsiirtopuristimen liimanannostelulla saadaan poistettua nopeuteen liittyviä rajoituksia. Filminsiirtopuristimella tärkkelyksen sekaan voidaan lisätä pigmenttejä, jonka vuoksi voidaan tuottaa pigmentoituja paperilajeja, joiden optiset ominaisuudet ovat parempia. Filmiliimauksella voidaan myös käyttää suurempia kuiva-ainepitoisuuksia verrattuna lammikkoliimaukseen, jolloin jälkikuivatusosan höyryn käyttöä voidaan pienentää (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 181). Kuvassa 6 esitetään filminsiirtopäällystimen rakenne (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001).



Kuva 6. Filminsiirtopäällystin (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001).

Filminsiirtopuristimien ongelmana ovat huonompi paperin palstautumislujuus. Huonompi palstautumislujuus johtuu tärkkelyksen jäädessä rainan pinnalle, eikä penetroidu yhtä syvälle kuin lammikkoliimapuristimessa (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 181).

3.2 Päällystypasta

Paperin päällystämällä tarkoitetaan paperin pinnoittamista erilaisilla aineilla. Aineita ovat pigmentit, sideaineet, vahat ja muovit sekä niistä valmistetut yhdistelmät, jota kutsutaan päällystypastaksi. Päällystypasta muodostetaan pigmenttien, sideaineiden ja lisäaineiden vesiseoksella. Pastanvalmistukseen vaikuttavia tekijöitä on useita kuten, paino tai tuotantolaitteiston asettamat vaatimukset, pastan vaikutus paperin ominaisuuksiin tai taloudelliset tekijät (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 184–186).

3.2.1 Pigmentit

Pigmenttien tarkoituksena on peittää paperin pinta ja parantaa optisia ominaisuuksia, sekä toimia painovärin absorboijana. Päällystypastasta suurin ja tärkein osa koostuu pigmentistä, jota on tyypillisesti 85–95 %. Pigmentit voidaan jakaa pää-, erikois- ja apupigmentteihin, mutta pigmenttien erottelu ei ole tarkka (knowpap, 2023).

Pigmenttejä ovat:

- Kaoliini on koostumukseltaan alumiinisisilikaattia ($\text{H}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8\text{H}_2\text{O}$), joka muodostuu kuusikulmaisesta levymäisistä partikkeleista. Päällystyksessä käytettävien

hiukkasten ovat kooltaan alle 2 μm . Partikkelit asettuvat päällystyksessä paperin pinnan suuntaisesti, heijastaen hyvin valoa ja antaen hyvän kiillon kalanteroinnissa. Kaoliini on vaaleudeltaan samaa luokkaa kuin sellu, mutta huomattavasti vaaleampi kuin puupitoisen paperin. Kalsinoidun kaoliinin lisääminen pigmenttiseokseen lisää päällysteen bulkkisuutta, vaaleutta, kiiltoa ja opasiteettia (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 187).

- Kalsiumkarbonaattit (CaCO_3) käytetään jauhattuna tai saostettuna. Jauhettu karbonaatti valmistetaan kalkkikivestä tai marmorista jauhamalla. Saostettu kalsiumkarbonaatti (PCC) kemiallisesti kalkkikivestä. Jauhetun ja saostetun kalsiumkarbonaatin ominaisuuksien erot ovat hiukkaskoot ja muodot. Kemiallisesti saostettu karbonaatti on puhtaampaa, hienojakoisempaa, sekä sen partikkelijakauma on kapeampi kuin jauhetulla karbonaatilla. Saostetulla karbonaatilla voidaan nostaa päällystyspastan viskositeettia ja jauhetulla laskea viskositeettia. Karbonaattia esiintyy useina kideyypeinä, joista kalsiitti ja aragoniitti ovat tärkeimpiä tyyppejä. Kalsiitti voi esiintyä muodoltaan kuutiona, prismaattisena tai levymäisenä. Aragoniitin muodot esiintyvät pitkänomaisina neulasina ja prismoina. Karbonaattien käyttötarkoituksena on parantaa päällystepastan vaaleutta, opasiteettia, sekä painoväriin absorptiota ja huokoisuutta. Karkeat karbonaattit parantavat paperin pintalujuutta kaoliinia paremmin samalla sideainemäärällä. Karbonaateilla voidaan lisätä päällysteen huokoisuutta, pienentää paperin blistering ilmiötä, sekä parantaa väriabsorptiota. Esipäällystyksessä käytetty karbonaatti parantaa pintapäällysteen tarttumista (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 187).
- Talkki on koostumukseltaan magnesiumisilikaattia (Kaava), jota valmistetaan rikastamalla vuolukiveä ja jauhamalla talkki haluttuun hienousasteeseen. Talkin hiukkaset ovat muodoltaan kaoliinia levymäisempi. Talkki antaa päällysteelle tyypillisiä ominaisuuksia kuten tiiviys ja sileys. Tiiveys vaikuttaa painoväriin absorptioon pienentymisellä. Talkki sopii erityisesti syväpainopapereiden valmistukseen. Talkin käytöllä parannetaan paperin sileyttä ja märkäljuutta. Talkki kuitenkin heikentää paperin kiiltoa, vaaleutta, ja painoväri absorptiota. Talkin käyttö vaikuttaa myös paperin pintalujuuteen, joka lisää sideaineiden käytön tarvetta (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 187).

- Titaanidioksidi (TiO) käytetään muiden pigmenttien kanssa enintään 10 % pigmentin määrästä. Dioksidilla on selvästi muita suurempi taitekerroin ja pienten hiukkaskokojen ansioista käyttötarkoituksena on lisätä päällysteen vaaleutta ja opasiteettia. Lisäksi dioksidilla on vaikutusta kiiltoon ja sileyteen. Dioksidia esiintyy kahtena erilaisena kidemuotona, jotka ovat anataasi ja rutiili (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 187).
- Satiinivalkoinen (Kaava) on vanhin käytössä ollut erikoispigmentti. Satiinivalkoisen käyttö parantaa painoväriabsorptiota, kiiltoa, opasiteettia ja vaaleutta. Alhaisen ominaispainon vuoksi se lisää päällysteen bulkkia. Partikkeli muodoltaan se on neulamainen, jonka seurauksena pastan viskositeetti kasvaa ja lisää samalla dispergointiaineen tarvetta. Satiinivalkoisen käyttö lisää sideaineiden tarvetta ja rajoittaa pastan kuiva-ainepitoisuutta (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 187).

3.2.2 Sideaineet

Sideaineiden osuus päällystys pastassa on tyypillisesti 5–25 %.

- Tärkkelys on yleisin käytössä oleva vesiliukoinen sideaine. Tärkkelyksen kemiallinen koostumus on polysakkaridi ja sitä saadaan muun muassa perunasta, maissista ja vehnästä. Tärkkelys ei kelpaa sellaisenaan sideaineeksi vaan sen rakenneketjuja on pilkottava lyhyemmiksi ja niihin on liitettävä erilaisia kemiallisia ryhmiä. Toimenpiteillä tärkkelyksen liukoisuus ja liuksen viskositeettiominaisuudet paranevat. Tärkkelystä käytetään yleisesti lateksin kanssa. Yksinään tärkkelyksellä on huono sitomislujuus ja lateksia sisältävässä päällystyspastassa se toimii viskositeetin nostajana, sekä vesiretention parantajana. Tärkkelys muodostaa kuivuessaan kovan ja joustamattoman kalvon, minkä vuoksi se ei sovellu hyvin syväpainopastoihin. Tärkkelyspäällystyspastojen heikkoutena on niiden huono vedenkesto, jota voidaan kuitenkin parantaa lisäämällä hartsia. Kuivatusvaiheessa vesiliukoisella tärkkelyksellä on taipumus nousta veden mukana päällysteen pintaan, joka aiheuttaa epätasaista painoväriabsorptiota eli mottlingia (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 188).
- Karboksimeetyyliselluloosa, josta käytetään lyhennettä CMC on synteettinen vesiliukoinen sideaine, jota valmistetaan monokloorietikkahaposta ja selluloosasta.

CMC: n käyttötarkoituksena on vaikuttaa päällystyspaston stabilointi ja dispergointiaineena, sekä viskositeetin nostajana ja vesiretention parantajana. CMCllä parannetaan päällystyspaston mekaanista ja kemiallista kestävyyttä sekä pintalujuuutta (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 188).

- Polyvinyylialkoholi josta käytetään lyhennettä PVA valmistetaan polyvinyyliasetaatista. PVA: lla on paras sidosvoima käytetyistä sidosaineista, jonka avulla voidaan vähentää kokonaissideainemäärää. PVA:ta yhdistäessä tietyissä olosuhteissa pigmenttilietteeseen ilmenee ns. shokki, joka ilmenee voimakkaalla ja äkillisellä viskositeetin kasvuna (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 189).
- Styreeni-butadieenilateksi on käytetyin lateksi, jossa styreenin osuus on yleensä 60 +/- 15% ja butadieenin osuus 40 +/- 15% Styreeni vaikuttaa pinnan kiiltoon ja kovuuteen. Butadieenin määrä antaa taas pinnalle joustavuutta sekä pehmeyttä. Styreeni-butadieenilateksit antavat paperille hyvän märkä- ja kuivapintalujouden, mutta huonontaa painoväriabsorptiota. Lisäksi styreeni-butadieenilateksi aiheuttaa kellastumista auringonvalossa (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 189).
- Akryylilatekseilla saadaan päällystyspastalle hyvä vedenkesto. Akryylilateksit ovat hajuttomia ja kirkkaita sekä antavat kalanteroinnissa hyvän kiillon paperille. Akryylilateksit eivät kellastu auringon valossa, joten ne soveltuvat hyvin pakkauksiin ja ulkomainontaan (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 189).
- Polyvinyyliasetaattilateksit kestävät myös hyvin auringonvaloa ja ovat hajuttomia. Polyvinyyliasetaattilatekseilla saadaan päällystyspastalle huokoisin pinta muihin lateksihin verrattuna, mutta muita huonompi sitomislujuus (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 189).

3.2.3 Lisäaineet

Päällystyspasta sisältää luikuisia lisäaineita, joita kutsutaan myös tippakemikaalit nimellä, koska niiden osuus on yleensä alle 1 % päällystyspastasta. Lisäaineiden tehtävänä on optisten ominaisuuksien tai värisävyn säätö, kuiva- tai märkälujouden parantaminen, vaahdonesto tai poisto, kalanteroitavuuden parantaminen, sekä limantorjunta (Knowpap, 2023).

- Vaahdonestonaineilla pyritään estämään tai poistamaan vaahdonmuodostusta päällystyspastan valmistus ja käsittelylaitteissa. Vaahdonestoaineilla pienennetään pastan pintajännitystä, jolloin ilmakuplat poistuvat seoksesta. Käyttämällä aineita, jotka estävät stabiilin kerroksen syntymisen ilmakuplien ympärille estävät vaahdon syntymisen. Tyypillisiä vaahdonpoistoaineita ovat alkoholit, eetterit, ja kasviöljyt (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 189).
- Säilöntäaineita käytetään yleisesti, kun päällystyspasta sisältää luonnonside aineita, jotka ovat alttiita bakteerien vaikutukselle, kuten tärkkelys ja kaseiini. Bakteereista johtuva pilaantuminen vaikuttaa pastan viskositeettiin, hajuun, pH arvoihin ja väriin haitallisesti. Yleisin käytetty säilöntäaine on booraksi (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 189).
- Voiteluaineilla vaikutetaan pastan sisäisiin virtausominaisuuksiin ja vähennetään pastan ja päällystyslaitteiden välistä, sekä lisätään päällystyskerroksien joustavuutta, jotka estävät kerroksien murtumista. Voiteluaineilla vähennetään myös kuivatus- ja kalanterointi teloihin pastan tarttumista. Tavallisimmat voiteluaineet ovat rasvahappojen suolat, kalsiumstearaatti, polyetyleeniglykolit ja vahaemulsiot (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 189).
- pH:n säätöaineita käytetään päällystyspastan tai painatuksen ominaisuuksilta vaadittavan pH- arvon saavuttamiseksi. Säätöaineina käytetään natriumhydroksidiä tai ammoniakkia (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 189).
- Dispergointiaineita lisätään veteen kuivan pigmentin liettämisen yhteydessä. Dispergointiaineen tehtävänä on muuttaa pigmenttihiukkasten vuorovaikutusta, siten ettei hiukkaset saostuisi vaan pysyisivät erillään. Yleisesti dispergointiaineena käytetään polyakrylaatteja, polykarbonihapon natriumsuoloja ja alkaleja (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 190).

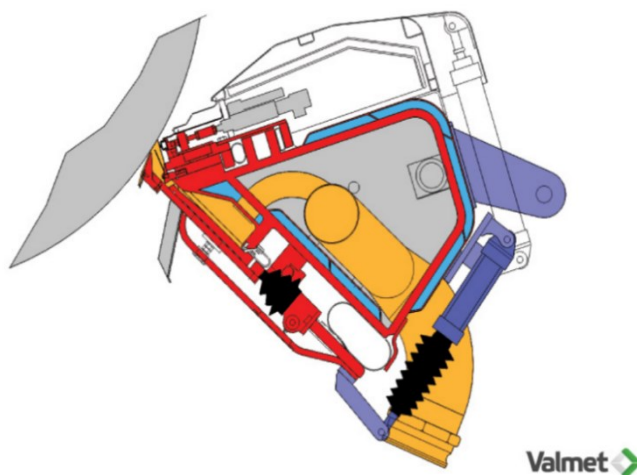
4 Päälylystysmenetelmät

Paperin päälylystämislä tarkoitetaan sen pinnoittamista lisääineella, jonka tarkoituksena on parantaa paperin pinnan ominaisuuksia loppukäyttäjän toiveiden mukaisesti (Parpala K, 1976, 199).

4.1 Lyhytviipymäapplikointi

Lyhytviipymäapplikoinnissa päälylystysseos johdetaan patoterän takana olevaan applikointikammioon. Kammion yksi sivu koostuu vastatelasta, johon paperirata tukeutuu. Liikkuva paperirata muodostaa applikointikammioon pyörteitä (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001). Päälylystysseoksen syöttö tapahtuu kammion pohjassa olevan syöttöraon kautta, mitä ennen seoksen jakautuminen on varmistettu tasaiseksi koneen poikkisuunnassa. Suurin osa syötettävästä päälylysteseoksesta johdetaan takaisin konekiertoon säätöreunan kärjen ja paperin väliin muodostuvasta raosta (Knowpap, 2023). Kuvassa 7 esitetään lyhytviipymäpäälylystimen teräpalkin rakenne (Knowpap, 2023).

Lyhytviipymäpäälylystimen teräpalkki



Kuva 7. lyhytviipymäapplikointi (Knowpap, 2023).

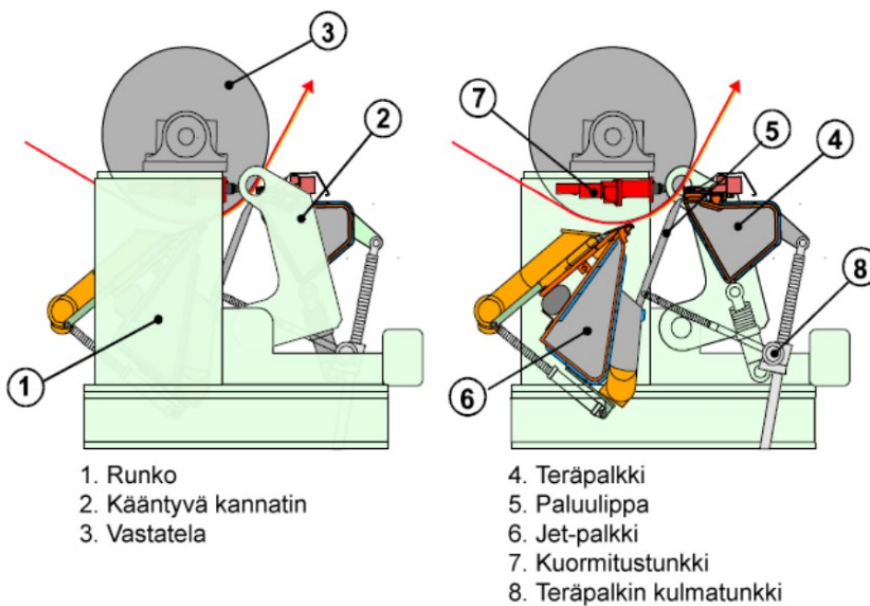
Riittäväällä ulosvirtauksella vähennetään paperin mukana tulevan ilman pääsyä applikointialueelle, joka takaa tasaisen virtauksen jakautumisen sekä seoksen vaihtuvuuden. Säätöraon

suuruus vaihtelee tyypillisesti 3–7 mm välillä. Keskimääräinen paine kammiossa on noin 10 kPa (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 192).

4.2 Suutinapplikointi

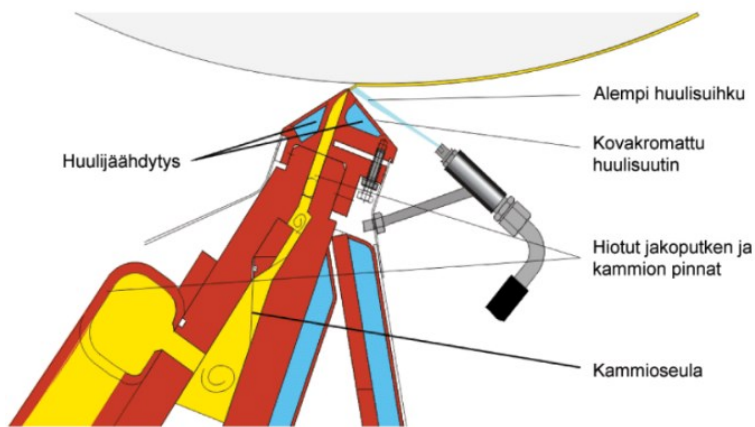
Suutinapplikoinnissa päällystysseos syötetään suoraan radan pinnalle suuttimen avulla. Suutinapplikoinnin etuina ovat paremmat soveltuvuudet suuremmille ajonopeuksille. Jet-applikointi soveltuu etenkin suurille päällystysnopeuksille paperin päällystyksessä. Jet-tekniikan käyttämisen hyötyinä ovat pienempi päällysteen pumppaustarve verrattuna sivelytelapäälylytykseen. Jet-tekniikkaa käytetään tuotannossa aina 1800 m/min nopeuksiin saakka. Suuremmat nopeudet aiheuttavat radan mukanaan kuljettaman ilmakerroksen häiritsemistä laitteen stabiilisuuteen (Knowpap, 2023). Kuvissa 8 ja 9 esitetään Jet-päällyste aseman ja jet suutin palkin rakenteet ja sijoitukset päällystysasemalla (Knowpap, 2023).

Jet-päällystysaseman pääosat



Kuva 8. Jet-päällyste aseman kokoonpano (Knowpap, 2023).

OptiCoat Jet - päällystys

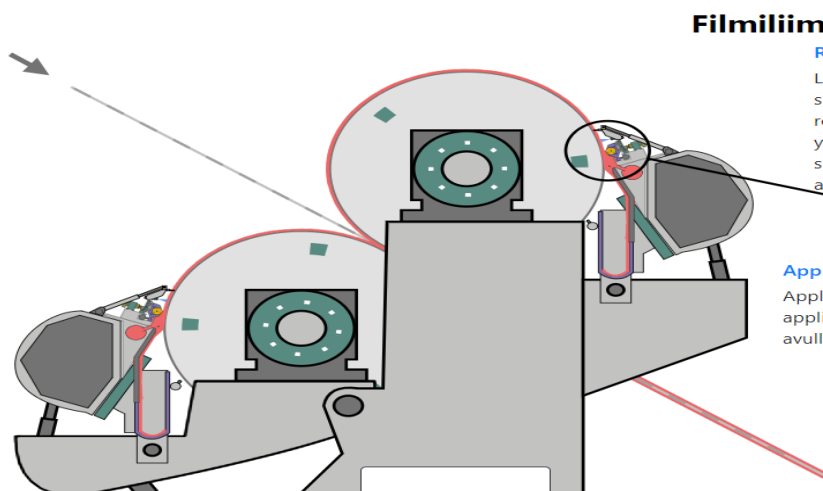


Valmet

Kuva 9. Jet-suutin palkki (Knowpap, 2023).

4.3 Filmipäällystys

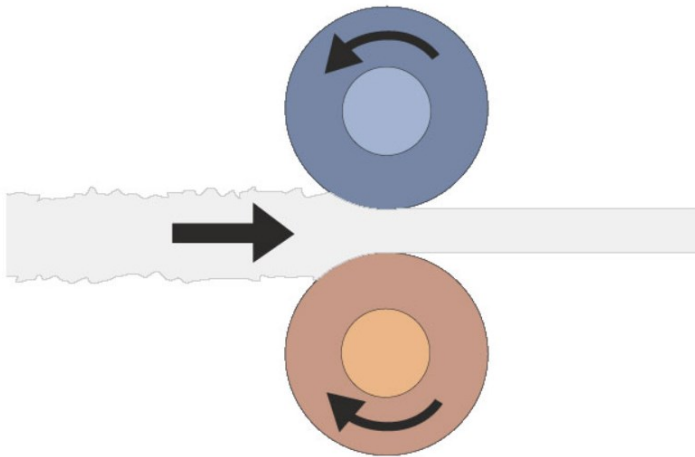
Lyhytviipymäapplikointiin perustuvat filminsiirtolaitteet kehitettiin ensin paperin pintaliimaukseen, jonka jälkeen käyttöä jatkettiin pigmentointiin ja pigmenttipäällystykseen. Filmipäällystykseen kiinnostuksen syynä oli paperin molempien puolien päällystäminen samanaikaisesti. Filminsiirtopäällystyksessä etuina olivat myös laitteiden pieni tilantarve, pienemmät investointi kustannukset ja helpompi päänvienti (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 196). Kuvassa 6 ja 10 havainnollistetaan filminsiirtopäällystimen rakennetta.



Kuva 10. Filminsiirtopäällystimen toiminta (Knowpap, 2023).

5 Paperin kiillottaminen

Paperin kiillotusta, kutsutaan kalanteroinniksi, jossa paperi puristetaan kahden tai useamman telan välissä. Puristuksella saadaan muutettua paperin muotoa taso ja paksuussuunnassa. Kalanteroinnin tulekseen vaikuttavat puristusaine, sekä leikkaus- ja kitkavoimat. Paperin plastisoitumista voidaan edistää lisäämällä paperiin lämpöä tai kosteutta. Kalanteroinnin puristuksen periaate, sekä alapuolella paperiin lämpöä lisäävä termotela esitetään kuvassa 11.



Kuva 11. Kalanteroinnin periaate (Knowpap, 2023).

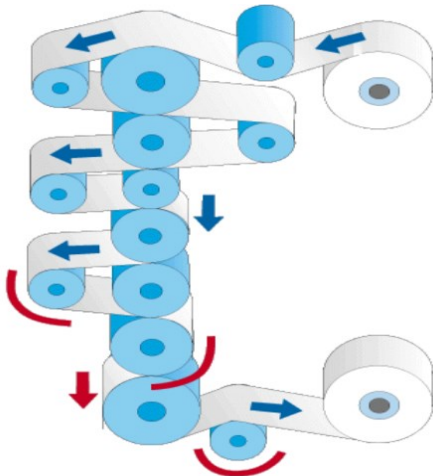
Päällystettyjen papereiden kalanterointi toteutetaan tavallisesti kahdessa vaiheessa: esikalanterointi tehdään ennen päällystystä yleisesti paperikoneen online kalanterilla. Loppukalanterointi toteutetaan päällystysten jälkeen erillisellä off-line kalanterilla.

Kalanterointi on merkittävä vaihe paperin valmistuksessa, koska yleisesti kalanterointi on viimeinen vaihe, jolla voidaan vaikuttaa merkittävästi paperin ominaisuuksiin.

Paperin kalanteroinnissa on kaksi päätehtävää, joista ensimmäinen on muokata paperin pintaominaisuudet vastaamaan painomenetelmän asettamia vaatimuksia. Toisena tehtävänä on paperin paksuusprofiilin hallinta (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 204).

5.1 Superkalanterointi

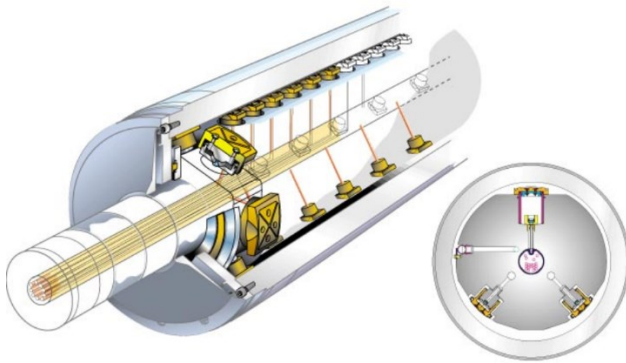
Kiillotuskalanteri eli superkalanteri koostuu tavallisesti 10–16: sta päällekkäin olevista teloista. Tavallisesti telastossa on aina parillinen määrä teloja (Parpala K, 1976). Telaston telat ovat erilaisia ja telasto koostuu pääsääntöisesti kokilli tai polymeeri pintaiset taipumakompensoidut ylä ja alatelasta. Kahden tyyppisistä vastakkain olevista väliteloista, jotka ovat pehmeä pintaiset välitelat, sekä kokillipintaiset termotelat. Telastossa on myös ns. kääntönippi, jonka kohdalla on kaksi pehmeä pintaista välitelaa. Kääntönipin tarkoituksena on paperin molemmin puolinen käsittely (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001). Telastoon on yleisesti myös sijoitettuna ulosveto ja levitysteloja (Parpala K, 1976). Kuvassa 12 esitetään superkalanterin rakenne.



Kuva 12. Superkalanteri (Knowpap, 2023).

Taipumakompensoituina teloina voidaan käyttää monivyöhyketeloja, kuten SYM CD/CDS teloja. Tela on rakenteeltaan lähes sama kuin tavallinen vyöhyketela. Vyöhykesäädettävässä telassa vaippa tuetaan hydrostaattisilla kuormituselementeillä, joiden avulla vaippaan kohdistuva nippivoima siirretään telan akselin kannatettavaksi. Kuvassa 13 esitetään taipumakompensoidun telan rakenne (Knowpap, 2023).

Monivyöhykesäädettävä tela (SymCDS)



Kuva 13. Taipumakompensoitutela (Knowpap, 2023).

Männän alle syötetään öljy halutulla paineella, jonka tarkoituksena on työntää liukukengän vaippaa vasten paineeseen verrannollisella voimalla. Männän alapuolelle syötetty öljy kulkee männän kanavien ja kuristussuuttimien kautta liukukengän öljytaskuihin. Öljy purkaantuu pois kengän reunoilta, jolloin vaipan ja kengän välille muodostuu öljykalvo. Tällä ominaisuudella saadaan purkautuvalla öljyllä pidettyä kengän etäisyys vaipasta vakiona kuormituspaineesta huolimatta.

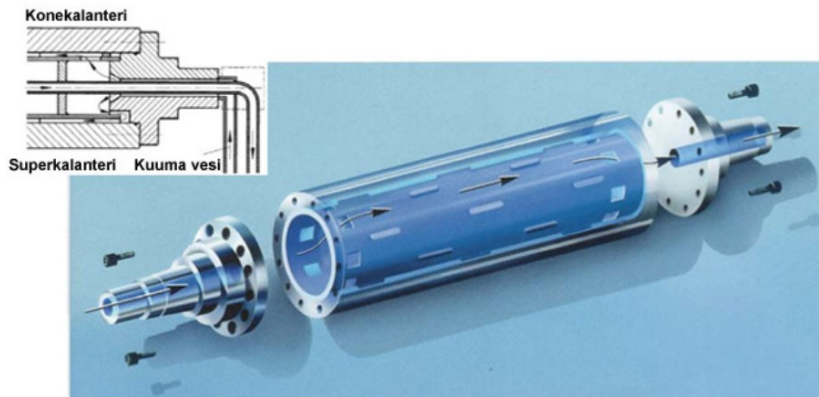
Kengän muotoilu on symmetrinen, jolloin vaippaa voidaan pyörittää molempiin suuntiin. Kengän päästä löytyvät hydrodynaamiset viisteet, joilla öljykalvoa kasvatetaan. Viisteiden käyttötarkoituksena on pienentää tarvittavaa tehonkulutusta suurilla nopeuksilla.

Kuormituselementit on tyypillisesti jaettu vyöhykkeisiin, joka mahdollistaa kuormituspainojen säädön paperin profiloititarpeiden mukaisesti. Rakenteiden erona on vyöhykkeiden määrä, perinteisessä vyöhyketelassa on tavallisesti 8 vyöhykettä, kun taas monivyöhyketelossa määrä voi olla yli 60 vyöhykettä (Knowpap, 2023).

Termotelojen käyttötarkoituksena on lämmöntuominen paperirataan paremman kalanterointituloksen saamiseksi. Telan vaippa koostuu kokillivaluraudasta, jonka ominaisuutena on suuri kovuus ja sille voidaan saavuttaa erittäin hieno pinnankarheus hiomalla.

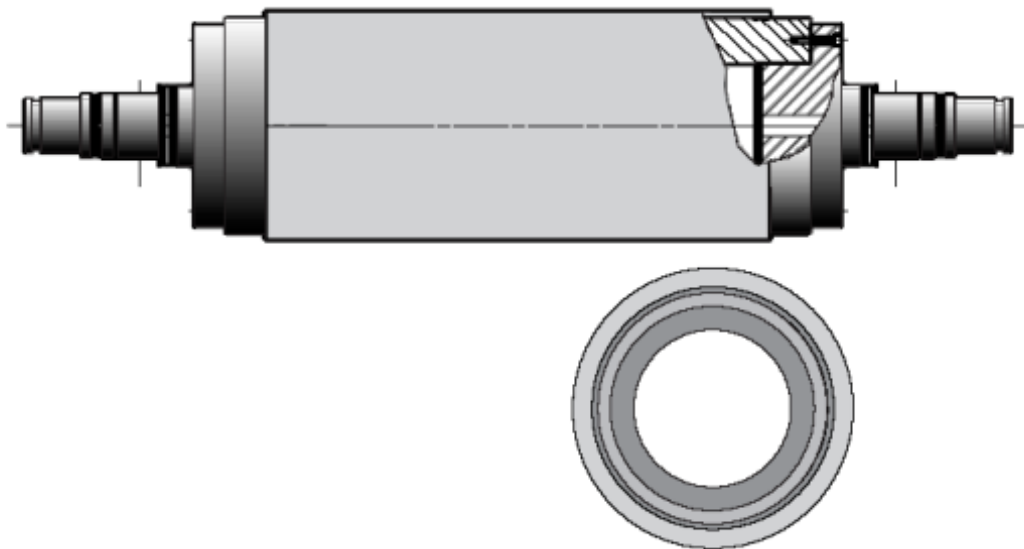
Termotelojen lämmönsiirron väliaineena käytetään tyypillisesti vettä, öljyä tai höyryä, riippuen termotelan rakenteesta. Termotelojen rakenteet voidaan jakaa kahteen ryhmään, jossa toisessa ryhmässä lämmönsiirron väliaine kiertää vaippaan poratuissa kehäporauksissa (Knowpap, 2023). Kehäporattuja toteutuksia ovat single, duo tai tri-pass telat, jossa väliaineen kiertosyklien määrä kertoo toteutustyyppin, esimerkiksi single tyyppissä väliaine kiertää vaipan yhden kerran (Valmet, 2018). Kuvassa 14 on esitettyä termotelan rakenne.

Termotela



Kuva 14. Termotela (Knowpap, 2023).

Pehmeät välitelat ovat kovien kokili telojen vastapareina, jotta kalanterin nippiin saadaan muodostettua laatuvaatimuksien mukainen puristusaine (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 207). Kuvassa 15 esitetään välitelan rakenne (Ilves, 2009).



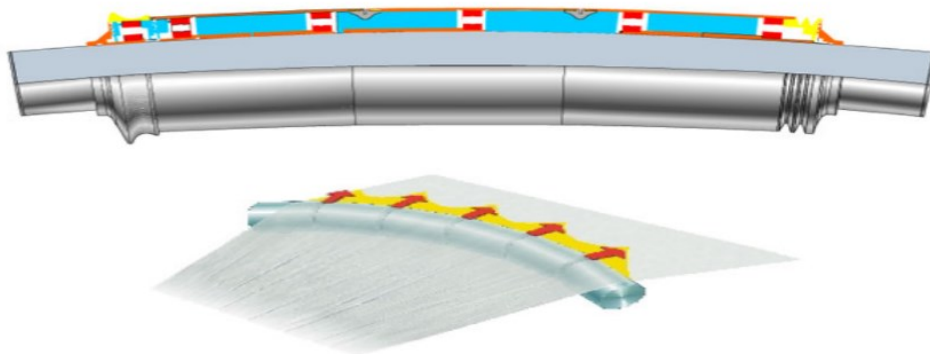
Kuva 15. Välitelan rakenne (Ilves, 2009).

Kuva 15. Välitelan rakenne (Ilves, 2009).

Mahdollisten paperin rynkkäämistä poistoon on kalanteriin lisätty ulosvetoteloja. Paperirainan poistuessa puristusnivistä se ohjataan ulosvetoteloille, joiden pintaan on sorvattu keskeltä telanpäätyihin kulkeva kierre tai telaa voidaan käyristää. Telojen kierteiden tarkoituksena on työntää paperirainaa telan reunoja kohden, jolloin mahdolliset rynkyt oikenevat paperirainassa (Parpala K, 1976, 208).

Levitysteloilla on sama käyttötarkoitus, kun ulosvetoteloilla (Parpala K, 1976). Levitystela on rakenteeltaan erilainen verrattuna ulosvetotelaan. Levitystela rakenne koostuu kaarevasta akselista, jonka päälle vaippa on koottuna laakeroiduista yksittäisholkeista (Knowpap, 2023). Kuva 16 esittää levitystelan rakennetta ja toimintaperiaatetta (Knowpap, 2023).

Kaareva levitystela



Kuva 16. Levitystela (Knowpap, 2023).

6 Paperin päällysteen kuivaaminen

Paperin tulesa päällystykseseen, sen vesipitoisuus on tavallisesti 10–20 %. Päällystyksessä paperin vesipitoisuus nousee päällystysseoksesta. Paperin jälkikuivatuksessa tulee huomioida oikeat lämpötilat. Liian suuri lämpötila sylinterikuivauksessa, saa päällysteen tarttumaan sylinteriin, joka aiheuttaa sylinterin likaantumista ja paperin pintavaurioita. Liian nopea kuivatus taas aiheuttaa sideaineiden siirtymisen paperin pintakerrokseen, joka heikentää painomusteen tarttumista paperiin. Liian hitaassa kuivatuksessa sideaineet tunkeutuvat pohjapaperin sisään, mikä lisää sideaineen kulutusta ja päällysteen pölyämistä. (Parpala K, 1976, 205–207.)

Päällystettä voidaan kuivattaa ennen sylinterille tuloa sijoittamalla päällystimen ja kuivatussylinterin väliin laitteet, joilla puhalletaan lämmintä ilmaa paperirainalle. Laitteina voidaan käyttää sähkö tai kaasulämmitteisiä säteilylaitteita. (Parpala K, 1976, 205–207.)

Kuivatessa päällystettyä paperia voidaan koko kuivatusprosessi useisiin vaiheisiin.

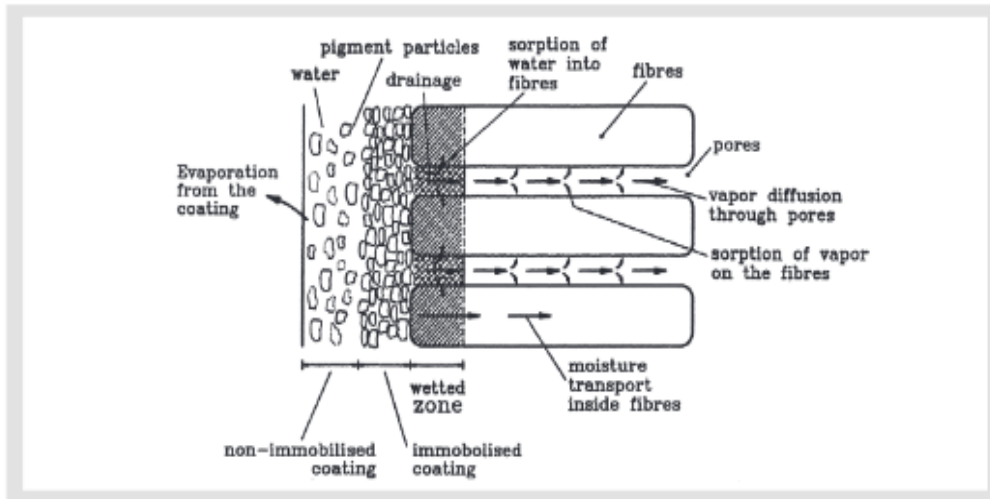
Kuivatuksen alussa rainan pinnoitteesta poistetaan vettä pohjarainaan valusta vedestä. Kuivatusosan alussa päällystettävässä pinnassa vesi on kylläistä ja haihdutus tapahtuu kuten miltä tahansa vedeltä kyllästetyltä pinnalta. Kuivatusta jatketaan, kunnes pinnoitteen kiintoaineet immobilisoituvat. Pinnoitteen immobilisoitumisen jälkeen kapillaari-ilmiö ei enää pysty kuljettamaan vettä pinnoitteen pinnalle ja haihtumisvyöhyke painuu pinnoitteen sisäpuolelle. Kuivumista voidaankin kutsua laskevaksi haihdutusrintamaksi.

Haihdutusrintama kulkee pinnoitteen ja pohjapaperin märän alueen lävitse. Haihdutusrintama sisältää edelleen vettä, mutta pinnoite muodostaa haihdutukselle diffuusiovastuksen, jonka vastus on voimakkaasti riippuvainen kuivan pinnoitteen huokoisuudesta ja paksuudesta.

Kostutetulla vyöhykkeellä haihtunut vesihöyry poistetaan osittain pinnoitteen lävitse ja osittain ohjataan pohjapaperiin. Jälkimmäinen fraktio absorboituu osittain pohjapaperin kuituihin ja loput diffusoituvat pohjapaperin lävitse, eli haihtuvat paperin takapuolelta.

Kuivatuksen loppuvaiheessa pohjamassan kuidusta haihdutetaan vettä yleisesti hygroskooppisesti sidotun veden alueella, joka on vaikein alue kuivatuksessa.

Kuivatessa kaksipuoleisesti päällystettyä paperia kuivatusprosessi etenee myös edellä kuvattulla tavalla paperiradan molemmilta puolilta. Kuvassa 17 esitetään lämmön ja aineen siirtymää päällystetyssä paperissa. (Paltakari, 2009, 559–560.)



Kuva 17. Lämmön ja aineensiirtymä (Paltakari, 2009, 559–560).

Päällystyksen kuivatusta suunniteltaessa tulee myös huomioida kuivatuksen vaikutus paperinlaadussa. Yleisimpiä laatuvirheitä ovat, tarttuminen mottling, päällysteen kupliminen ja murtuminen. Tutkimuksissa ja käytännön kokeissa on kuitenkin todettu, että kuivatuksella suurin vaikutus paperinlaadussa on mottlingissa, painojäljen epätasaisuudessa, eli laikullisuudessa (Knowpap, 2023). Laikut ovat matalakontrastia epätasaisuuksia ja ovat tyypillisesti kooltaan 0,5–10 mm kokoisia (Paltakari, 2009, 577).

Mottling on tunnettu päällystetyn offsetpainopaperin laatuongelma, jossa tummuus ja kiiltovaihtelut näkyvät painojäljen epätasaisuutena. Mottling näkyy myös painamattomassa paperissa, eikä sitä voida painatuksella peittää.

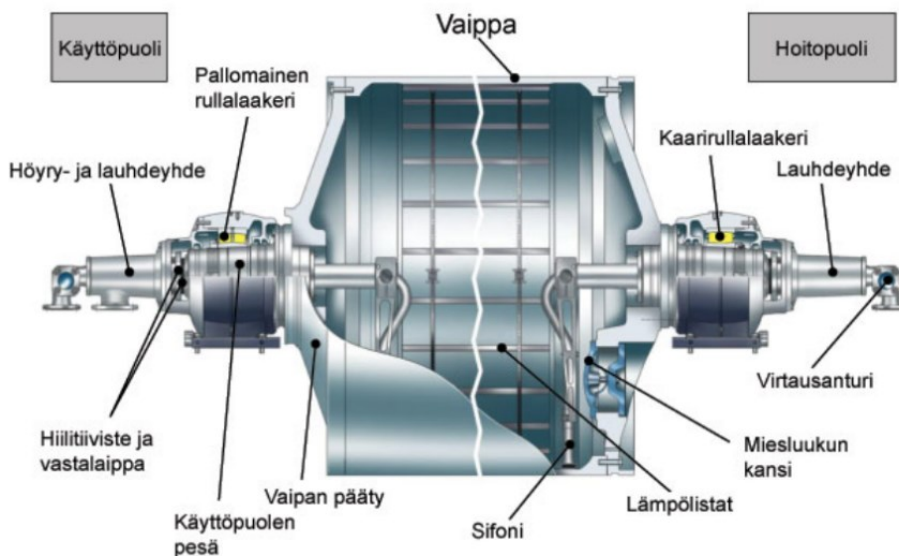
Pintapäällystyksen kuivatuksessa on pitkään ajateltu, että liian nopea veden poistaminen paperiradasta huonontaa lopputuotteen laatua. Tämän vuoksi kuivatuksessa on suositeltu miedompaa alkukuivatusta ja päällysteen saavuttaessa jähmepisteen siirrytään täyden kapasiteetin kuivatukseen.

Uusissa tutkimuksissa on esitetty, että kyse voikin johtua avoimista vienneistä ja haihdutustehon muutoksista. Tutkimuksissa tasaisella korkealla haihdutusteholla ja suurella alkukuivatusteholla on saavutettu myös laadukkaita kuivatustuloksia. (knowpap, 2023).

6.1 Sylinterikuivaus

Päällystyskoneissa voidaan käyttää myös paperikoneissa tyypillisesti käytettävää sylinterikuivausta. Sylinterikuivaus koostuu usean sylinterin ryhmistä, joiden pinta on lämmitettyä kuumaksi höyryllä, öljyllä tai sähköllä.

Höyryn syöttö kuivatuksessa toteutetaan johtamalla höyry tietyssä paineessa sylinterin sisään. Höyryn sisältämä lämpöenergia johtuu sylinterin seinämään, jonka jälkeen höyry lauhuu vedeksi. Sylinterin lauhteen poisto toteutetaan sylinterin toisessa päässä olevalla erillisellä lauhteenpoistimella. Sylinterien lämmönsiirron hyötysuhdetta voidaan parantaa asentamalla sylinterin sisään erilliset lämpölistat. Lämpölistojen vaikuttavana tekijänä on ajonopeus, eikä niitä voida asentaa hitaille koneille. Kuvassa 18 esitetään höyrykäyttöinen kuivatussylinteri (Knowpap, 2023).



Kuva 18. Kuivatussylinteri (Knowpap, 2023).

Sylinterien sijoittamiseen liittyy myös rajoituksia, jotka ovat paperin päällystysaineen kosteus. Päällystysaineen ollessa liian kosteata päällysteaine kiinnittyy sylinterin pintaan aiheuttaen valmistukseen likaantumisen- ja laatueroja. Sylinterit sijoitetaan tyypillisesti päällysteen alkukuivatuksen esimerkiksi infrakuivaimien jälkeen, jolloin päällysteen pinta on riittävän kuiva, eikä sylinterin pintaan päällysteaineen tartuntaa enää pääse tapahtumaan.

Sylinteriryhmällä saavutetaan myös hyvä pito paperirainaan, jonka avulla voidaan vaikuttaa paperin kireyteen. Kireyden hallinnalla voidaan parantaa päällystyskoneen ajettavuutta (Knowpap, 2023).

6.2 Ilmakuivaimet

Ilmakuivaimet, eli leijukuivaimet tai suorapuhallinkuivain haihdutus tapahtuu suittimilla syötettävän kuumen ilman avulla. Ilman lämmityksessä käytetään korkeapainehöyryä tai kaasua. Suurin osa ilmasta pyritään kierrättämään takaisin energiansäästämiseksi. Poistuva puhallusilma on kostea haihdutuksen takia. Poistettu ilmamäärä korvataan palamisilmalla ja konesali-ilmalla. Kuivaimen suittimet koostuvat tyypillisesti kahdesta suutintyypistä, jotka ovat ylipaine- ja alipainesuittimet. Alipainesuittimen toiminta eli foili perustuu Coanda ilmiöön ja Bernoullin lakiin. Coanda ilmiössä ilmavirtaus seuraa kaarevaa pintaa (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 201). Kuvassa 19 esitetään erilaisia Valmet Oy:n rakentamia ilmakuivain toteutuksia (Knowpap, 2023). Ilmakuivaimet ovat yleisesti toimintavarmoja, luotettavia ja energiatehokkaita. Ilmakuivaimien hyötysuhde on tyypillisesti noin 70 %. (Karlsson, 2010, 26.)



Kuva 19 Ilmakuivain toteutukset (Knowpap, 2023).

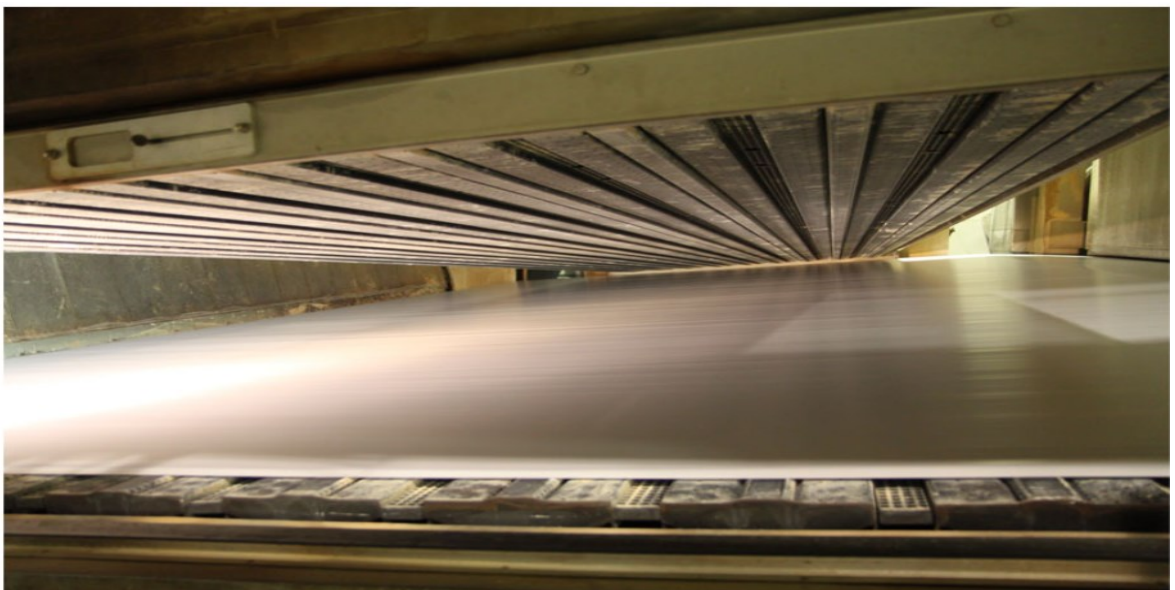
Suuttimen muotoilulla saadaan purkautuva ilmavirta käännettyä paperirainan kulkusuunnan mukaiseksi tai kulkusuunnan vastaiseksi. Suuren nopeuden vuoksi ilmavirralla on suuri dynaaminen paine (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 201).

Dynaamisen paineen kasvaessa paperin rainan pinnassa oleva staattinen paine pienenee vastaavassa suhteessa. Tällöin staattinen paine vallitsee rainan ylä- ja alapuolella, jonka vuoksi paperiraina pyrkii imeytymään lähemmäs suuttimien pintaa (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 201).

Kulkusuunnan vastaisessa foilissa kuivatusteho on nopeuden mukaan noin 15 % tehokkaampaa, tosin ajettavuus on tyypillisesti parempaa kulkusuunnan mukaisessa toteutuksessa.

Ylipainesuuttimissa purkautuva ilma purkautuu suuttimen molemmilta puolilta. Ylipainesuuttimella muodostetaan rainan ja suuttimen väliin ilmatyyny. Sijoittamalla paperirainan toiselle puolelle samanlaiset suuttimet lomittain edellisten suuttimien kanssa saadaan paperiraina leijumaan siniaallon muodossa. Siniaallon vaikutuksena voidaan vähentää paperirainan syntyvien vekkien ja kireysheittojen määrää (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 201).

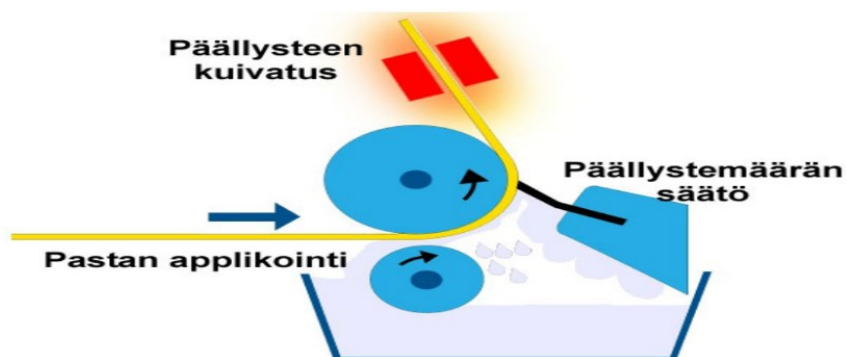
Ylipainesuuttimilla saavutetaan suuria haihdutustehoja. Ilmakuivaimen ominaishaihdutukseen vaikuttaa koneen nopeus, puhallettavan ilman lämpötila, suuttimien puhallusnopeudet ja kuivatuslohkojen määrä (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 201). Kuva 20 esitetään ilmakuivaimen rakenne, jonka välissä paperirata kulkee.



Kuva 20. ilmakuivain ja paperirata (Knowpap, 2023).

6.3 Infrapunakuivatus

Lämpösäteilyllä tarkoitetaan väliaineesta riippumatonta sähkömagneettista säteilyä, jota lämpimät pinnat lähettävät. Säteily kohdatessaan paperirainan osa säteilystä läpäisee paperirainan, osa heijastuu paperirainan pinnasta takaisin sekä osa absorboituu paperirainaan muuttuen lämmöksi. Infrapunäsäteilyä käytetään tyypillisesti alkukuivatuksessa. Säteilijät ovat joko kaasu tai sähkö käyttöisiä. Kuvassa 21 esitetään tyypillinen päällystysaseman layout ja infrakuivaimen sijoittaminen.



Kuva 21. Infrakuivaimen sijoittaminen (Knowpap, 2023).

Käyttötarkoituksena on nostaa päällysteen lämpötila nopeasti haihdutusalueelle. Säteilysäteilijät koostuvat useista yksittäisistä elementeistä, joiden kuivatustehoa voidaan säätämällä vaikuttaa paperirainan poikkisuuntaisen kosteusprofiiliin.

Kaasuinfratoteutuksissa paloilma ja kaasu sekoitetaan, jonka jälkeen seos syötetään palotilaan. Huokoista säteilijää hehkutetaan liekillä, jolloin se toimii primäärisenä säteilyn lähettäjänä. Myös liekistä emmitoituu osittain säteilyä, jonka lämpötila on tyypillisesti 600–1200 °C. Kuumen säteilijän ympäristöön lähettävän säteilyn aallonpituuden maksimi sijaitsee 1,8–2,1 µm:ssä. Huokoiset säteilijät ovat tyypillisesti valmistettu keraamista, teräksestä tai sintratusta metallista. 1100 °C pintalämpötilalla saatava lämpöteho on 80–90 kW/m².

Palokaasujen sekä rainasta poistuvan kosteuden poistoon käytetään kaasuinfran reunoilta puhallettavaa yhdensuuntaista ilmavirtaa. Puhallusta käytetään myös ratakatkon yhteydessä tulipalon estämiseksi (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 202). Kuvassa 22 esitetään kuivatuskäytössä oleva infrakuivain (Knowpap, 2023). Kaasukäyttöisten infrakuivaimien

höytysuhteet ovat ilmakeivaimia huomattavasti alhaisempia kuivaimien höytysuhteet jäävät 28–55 % tasolle (Paltakari, 2009, 564).



Kuva 22. Infrakuivain (Knowpap, 2023).

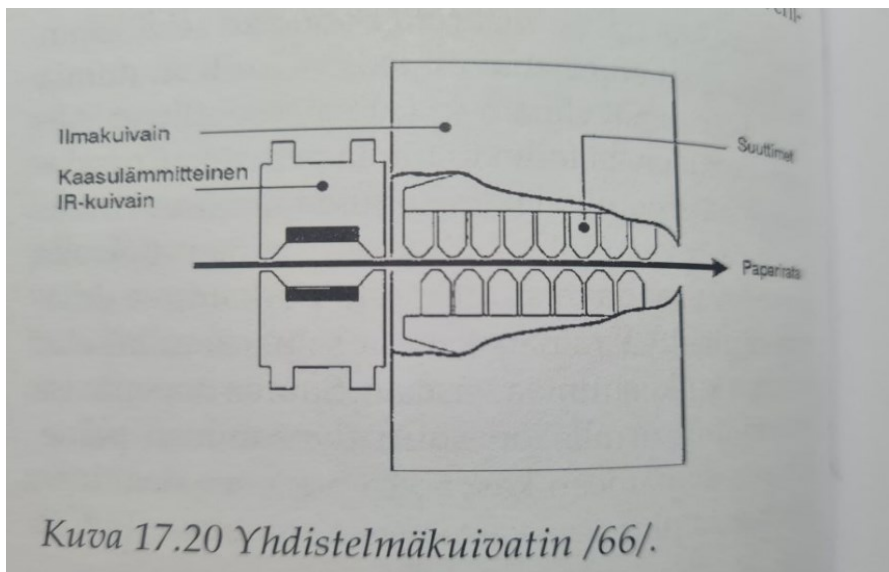
Korkealämpöisissä sähköinfroissa käytetään lyhytaaltokvartsiputkisäteilijöitä, joiden lämpötila voi olla jopa 2200 °C. Sähköinfrojen aallonpituuden maksimi sijaitsee 1µm. Säteilijöiden taakse sijoitetaan tyypillisesti taustaheijastin, jonka tehtävänä on suunnata paperirainasta pois heijastuva säteily takaisin paperirainaan. Heijastimia käytetään joko tasomaisia tai parabolisia kultaheijastimia tai keraamisia rakenteita (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 202).

Tyypillisesti sähköinfran infrarivi on valmistettu 140–150 mm leveistä moduuleista, jotka sisältävät 7–9 lamppua. Yhden lampun teho on tyypillisesti 1–2 kW. Maksimitehot vaihtelevat rivikohtaisesti 114 kW ja 210 kW:n välillä. Kosteusvaihteluita voidaan korjata profiloinnilla. Profilointia voidaan suorittaa joko kuivatuksen alkupäässä tai ennen kuivatussylintereitä. Sähköinfran profilointikyky on parempi kuin kaasuinfralla tehty profilointi. Sähköinfran säteilyn ollessa hyvin läpionkeutuvaa, joudutaan ohuilla paperilajeilla käyttämään

keraamisia vastaheijastimia paperirainan vastapuolella, jolla parannetaan sähköinfran hyötysuhdetta (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 201). Tyypillisesti myös sähköinfra-kuivaimen hyötysuhteet ovat huomattavasti ilmakeivaimia alhaisemmat. Sähköinfra-kuivaimien hyötysuhde jäävät 25–40 % tasolle (Paltakari, 2009, 563).

6.4 Yhdistelmäkuivatus

Infra ja leijukuivaimet voidaan yhdistää yhdeksi kuivaimeksi. Laitteiden yhdistämisellä säästetään infra ja leijukuivaimien edut samassa kuivaimessa. Infraleiju-kuivaimella tarkoitetaan yhdistelmäkuivatinta, jonka rakenteessa sijaitsee ensin infrakuivatusosa ja välittömästi tämän jälkeen leijukuivatusosa. Kuvassa 23 esitetään yhdistelmäkuivain toteutus (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 202).



Kuva 23. Yhdistelmäkuivain (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001).

Infraosa voidaan toteuttaa kaasu tai sähköinfra toteutuksella, jotka voivat sisältää useamman säteilijärivin. Leijukuivaimen osaa voidaan käyttää perinteisesti höyryllä tai kaasulla. Sähköinfran jäädytysilmaa voidaan hyödyntää liitettyssä leijukuivaimessa. Perinteisten infrakuivaimien vuotoilmat johdetaan konesaliin (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001).

Yhdistelmäkuivaimien energianhyötysuhde on perinteisiä infrakuivaimia parempi, johtuen vuotoilmojen hyödyntämisestä. Infraosassa syötetään voimakkaalla intensiteetillä energiaa, jonka vuoksi raina on jo lämmin tullessaan leijukuivaimen. Yhdistelmäkuivaimen haihduttava vesihöyry johdetaan leijuosan ilmankierron kautta poistoilmaksi. Kyseisellä

ilmanpoisto menetelmällä poistoilmaa voidaan hyödyntää lämmönvaihtimilla palamis- ilman lämmityksessä, jolla yhdistelmäkuivaimen hyötysuhde kasvaa merkittävästi verrattuna perinteiseen infrakuivaimen (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 202).

6.5 Välisyylinterit

Kontaktikuivatusta käytetään yleisesti jähmealueen jälkeen, koska siellä ei esiinny enää tarttumisongelmia. Jälkikuivatus toteutetaan yleensä päällystyksen jälkeen 2–8: lla sylinteriryhmällä. Sylinteri ryhmien tarkoituksena on kuivatuksen lisäksi vetää paperirainaa ja saada rainalle tarvittava kireys.

Off-machine päällystyskoneissa on tyypillisesti sylinteriryhmä korvattu pelkällä vetoryhmällä. Ryhmien ominaishaihdutun vaihtelee 3–8 kgH₂O/m²h välillä. (Hägglom-Ahnger Komulainen, 2001, 203).

7 Kuivatuksen energian valmistus ja siirtäminen

Lämpöenergiaa voidaan tuottaa teollisuuden tarpeisiin erilaisilla menetelmillä, joista yleinen menetelmä on polttaminen. Polttoprosesseja on erilaisia, eri energialähteiden vuoksi. Tässä kappaleessa käsitellään maakaasun polttoon liittyviä tekijöitä, sekä kuinka poltosta saatava lämpöenergia saadaan siirrettyä tuotannon prosessikohteeseen.

7.1 Maakaasupolttimet

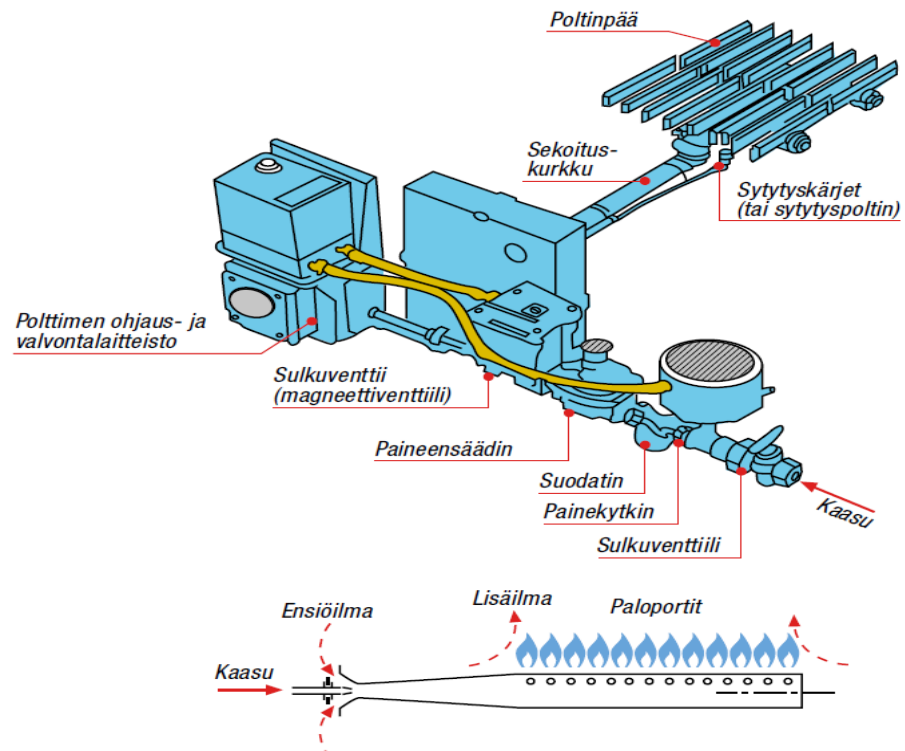
Maakaasun sekä nestekaasun polttoon tarkoitettut polttimet jaetaan polttokaasun ja palamisilman sekoitussuhteiden perusteella kahteen poltinryhmään, jotka ovat atmosfääripolttimet ja puhallinpolttimet

7.1.1 Atmosfääripoltin

Atmosfääripolttimen käyttämä palamisilma imetään polttimen ympäristöstä polttokaasun virtauksen ja kattilan vedon aiheuttaman virtauksen avulla. Polttimen ventuuriputkessa primääri-ilma sekoittuu ja sekundääri-ilma virtaa vapaasti polttimen liekin ympärillä.

Poltin on rakenteeltaan yksinkertainen ja sen tehon säätö on helposti toteutettavissa. Atmosfääripolttimilla varustettujen kattiloiden paine-ero on palamisilman ja ympäristön välillä tyypillisesti pieni, jolloin palaminen on altis ulkoisille häiriöille. Kuvassa 24. Esitetään tyypillisen atmosfääripolttimen rakenne (Maakaasukäsikirja, 2023).

9.2 Atmosfääripoltin



Kuva 24. Atmosfääripoltin (Maakaasukäsikirja, 2023).

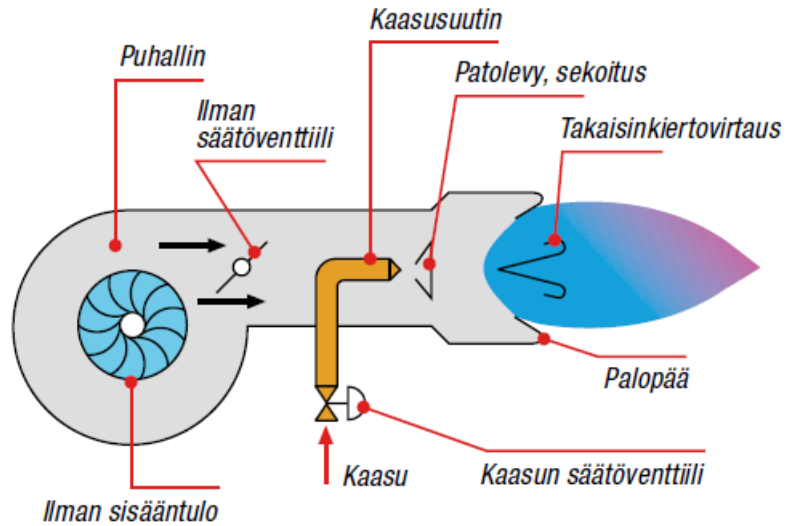
Atmosfääripolttimien tyypillisimmät käyttökohteet ovat kotitaloudet ja teollisuuden pientehoiset teollisuuden kohteet (R Raiko, 1995, 378).

7.1.2 Puhallinpoltin

Puhallinpolttimen palamisilma sekoitetaan puhaltimen avulla polttokaasuun. Puhaltimen ansioista tulipesään saadaan helposti haluttu painetaso sekä optimit virtausolosuhteet. Tällöin palaminen on tehokasta ja lämmönsiirto-ominaisuudet ovat hyvät.

Puhallinpolttimen rakenne on atmosfääripoltinta monimutkaisempi, mutta sillä on huomattavasti parempi hyötysuhde. Yleisesti kaikki suuremmat teollisuuspolttimet ovat puhallinpolttimia (R Raiko, 1995, 378). Kuvassa 25 esitetään tyypillisen puhallinpolttimen rakenne (Maakaasukäsikirja, 2023).

Puhallinpoltin



Kuva 25. Puhallinpoltin (Maakaasukäsikirja, 2023).

Suurilla tehoilla polttoaineteho on jaettava usealle polttimelle, joille on usein 1–2 ilmaa syöttävää puhallinta. Yhden polttimen maksimi teho voi olla korkeintaan 70 MW.

7.1.3 Polttimen käynnistäminen ja säätö

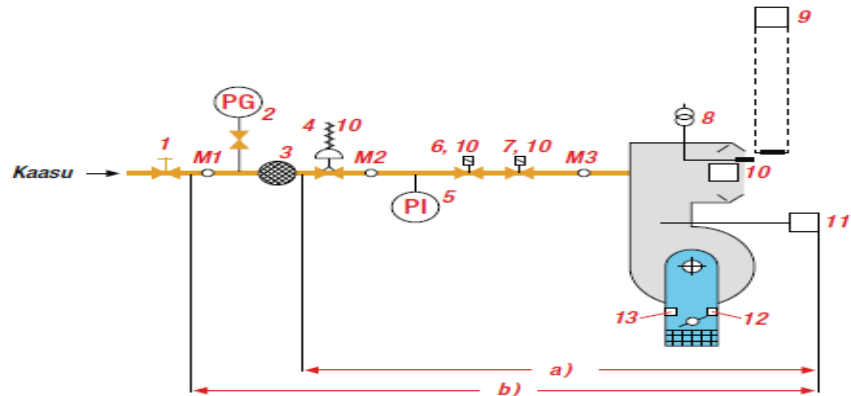
Kaasupolttimen toiminta ja käyttöturvallisuus asettavat polttimelle vähimmäisvarustuksen polttimen tehon mukaisesti. Kaasupolttimen perusvarusteet ovat esitettynä taulukossa 3.

Taulukko 3. Kaasupolttimen perusvarusteet (Maakaasukäsikirja, 2023).

Kaasupolttimen varusteet	
Sulkuventtiili	Paineensäädin
Suodatin	Kaasunpainekeytkimet
Sytytyslaitteet	Liekinvalvontalaitteet
Automaattiset sulkuventtiilit	Sulkuventtiileiden testausjärjestelmä

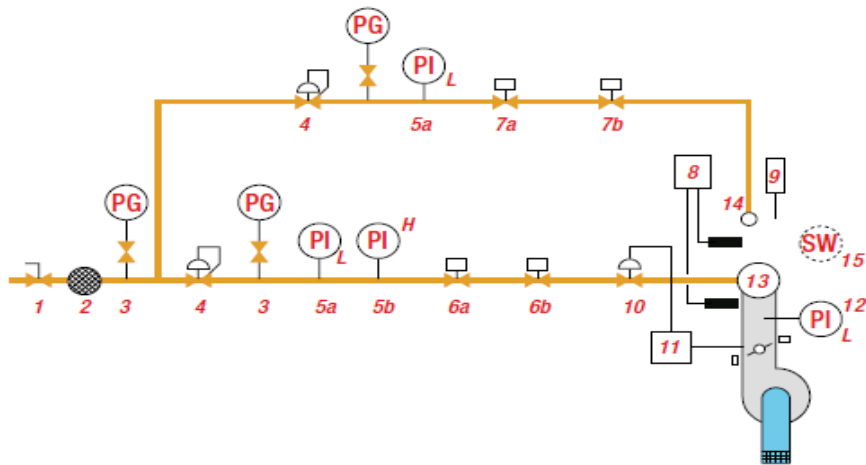
Pienten puhallinpolttimien täytyy noudattaa kuvassa 26 esitettyä vähimmäis- varustusta. Suuret polttimet tarvitsevat erillisen sytytyspolttimen, jonka käyttö edellyttää oman ohjaus- säätö- ja valvontalaitteiston. Kuvassa 27. esitetään erillisellä sytytyspolttimella varustettu kaasupoltin järjestelmä (Maakaasukäsikirja, 2023).

Puhallinpolttimen vähimmäisvarustus



- | | | | |
|----|-------------------------------|----|------------------------------------------|
| 1 | Käsikäyttöinen sulkuventtiili | 11 | Puhaltimen valvontalaite |
| 2 | Painemittari | 12 | Ilmavirtauksen alarajakytkin |
| 3 | Suodatin | 13 | Ilmavirtauksen ylärajakytkin |
| 4 | Paineensäädin | M1 | Tulopaineen mittauspiste |
| 5 | Kaasunpainekeytkin | M2 | Säätöpaineen mittauspiste |
| 6 | Sulkuventtiili | M3 | Polttinpään mittauspiste |
| 7 | Säätöventtiili | a) | Vähimmäisvarustus tyyppitestausta varten |
| 8 | Sytytyslaite | b) | Polttimen varustus |
| 9 | Liekinvalvontalaite | | |
| 10 | Esisäätölaite | | |

Kuva 26. Puhallinpolttimen vähimmäisvarustus (Maakaasukäsikirja, 2023).



1	Pääsulkuventtiili	10	Tehonsäätöventtiili (kaasu)
2	Suodatin	11	Palamisilman säätö- ja ohjauslaitteisto
3	Painemittausliitäntä	12	Palamisilman minimipainekytkin (puhaltimen valvontalaite)
4	Paineensäädin (tarvittaessa)	13	Pääpoltin
5 a, b	Kaasunpainekytkimet	14	Sytytyspoltin
6 a, b	Pääkaasun sulkuventtiilit	15	Polttimen mahdollinen asentokytkin
7 a, b	Sytytyskaasun sulkuventtiilit		
8	Liekinvalvontalaitteisto		
9	Sytytyslaitteisto		

Kuva 27. Erillisellä sytytyspolttimella varustettu poltinjärjestelmä (Maakaasukäsikirja, 2023).

Kaasupolttimen sytyttäminen voidaan toteuttaa kahdella tavalla suoraan täydellä teholla tai vähennetyllä teholla. Täyden tehon sytytystavan rajoittavana tekijänä on polttimen enimmäis- teho, joka on enintään 120 kW. Suurempi tehoiset polttimet on sytytettävä vähennetyllä teholla. Polttimien sytytysjärjestelmä on tyypillisesti sähköinen sytytysjärjestelmä, joka muodostuu sytytysmuuntajasta ja sytytyskärjistä.

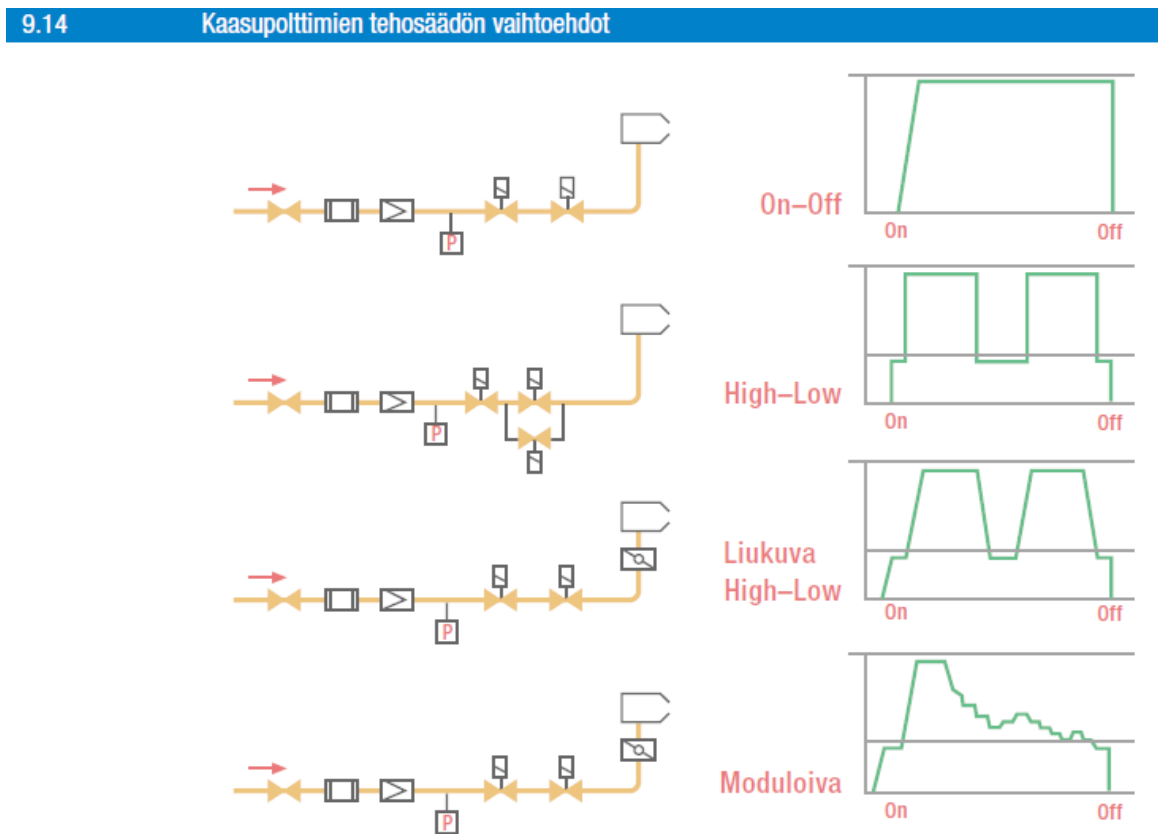
Polttimen käynnistäminen tapahtuu käynnistysohjelman mukaisesti, jolla varmistetaan polttimen automaatiojärjestelmän lukitusehtojen täytyminen oikeassa järjestyksessä. Taulukossa 4 on listattuna yleisimmät polttimien lukitusehdot. Lisäksi polttimen palotilan tuuletus on tehtävä ennen sytyttämistä. Tuuletusaika määräytyy polttimen nimellistehoa vastaavan palamisilmamäärän mukaisesti. Palotilan minimituuletus aika on vähintään 20 sekuntia, kun ilmamäärä vastaa polttimen täyden tehon tarvittavaa ilmamäärää. Tuuletusilma määrän laskeessa 50 %:lla tuuletusaika nousee 40 sekuntiin. Tuuletusilma määrä ei saa alittaa 33 % täyden tehon tarvitsemasta ilmamäärästä (Maakaasukäsikirja, 2023).

Taulukko 4. Polttimien yleisimmät lukitusehdot.

Polttimien lukitukset
Polttimen asento
Kaasun paine
Palamisilman paine
Liekkisignaalin olemassaolo
Savukaasupellin asento

Polttimen käytön aikainen tehonsäätötapa määräytyvät lämmitettävän kohteen edellyttämien tarpeiden mukaisesti. Yksinkertainen tehonsäätö toteutetaan on/off- ratkaisulla. Vaativammissa kohteissa käytetään portaatonta moduloivaa tehonsäätö ratkaisuja. Käytettäessä portaatonta tehonsäätö ratkaisuja järjestelmä edellyttää aina samanaikaista ilma- ja kaasumäärän ohjausta. Puhallinpolttimien säätöratkaisut tarvitsevat kaasuilmasuhteen omat kaasulaitteet kaasulle, sekä ilmalle. Atmösfäärisien polttimien säätö toteutetaan pelkästään kuristamalla kaasuvirtausta venttiilin avulla (Maakaasukäsikirja, 2023).

Kuvassa 28 on esitetty kaasupolttimen tehonsäätövaihtoehtoja.



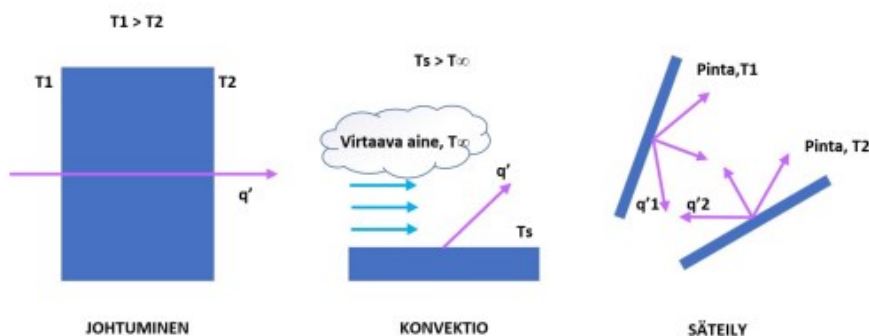
Kuva 28. Kaasupolttimien tehonsäätö (Maakaasukäsikirja, 2023).

7.2 Lämmönsiirto

Paperin kuivatusprosessi perustuu tuomalla paperirainaan ulkopuolelta lämpöenergiaa. Lämpöenergian avulla höyrystetään rainaan sitoutunut vesi. Kuivatusprosessista höyrystynyt vesi siirtyy ympäröivään ilmaan (kvick, 2023).

Kuivatusprosessissa käytetään erilaisia lämmön- ja aineensiirtimiä, joilla tuotettu lämpöenergia siirretään prosessilaitteeseen.

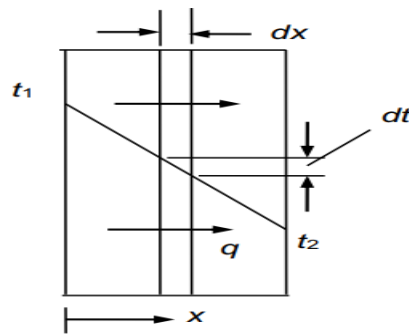
Lämpöenergiansiirtämisellä tarkoitetaan lämpöenergian siirtämistä aineen sisällä tai aineesta toiseen aineeseen. Lämmönsiirtoa voidaan toteuttaa kolmella tavalla johtumalla, konvektiolla tai säteilyllä. Lämmönsiirto voidaan toteuttaa myös kyseisten tapojen yhdistelmällä. Kuvassa 29 esitetään lämmönsiirto esimerkkejä (kvick, 2023).



Kuva 29. Lämmönsiirtoesimerkit (kvick, 2023).

7.2.1 Johtuminen

Lämmönsiirtämistä konduktiolla, eli johtumalla tarkoitetaan lämmönsiirtoa väliaineen sisällä, jossa korkea lämpötila siirtyy matalaan lämpötilaan (Termodynamiikka ja lämmönsiirto, 2023,). Johtumista tapahtuu paikoillaan olevassa väliaineissa, kuten kiinteät aineet, nesteet ja kaasut. Kuvassa 30 esitetään lämpövirtausta kiinteän aineen lävitse.



Kuva 30. Lämpövirtaus (Karwa, 2020, 2.)

Johtuminen muodostuu atomien ja molekyylien välisestä vuorovaikutuksesta, jossa korkeamman energiatilan hiukkaset siirtyvät matalamman energiatilan hiukkasiin. Fourierin lain avulla kuvataan johtumisella tapahtuvaa lämmönsiirtoa (Karwa, 2020, 1).

Fourierin laki:

$$q = -kA \frac{dT}{dx}$$

jossa:

(1)

q on lämpövirta [W],

k on lämmönjohtavuus [W/mK],

A on lämmönsiirtoa vasteenoleva pinta-ala [m²]

dT/dx on lämpötilagradientti.

Yksiulotteisessa stationäärisessä johtumisessa Fourierin laki voidaan yksinkertaistaa muotoon:

$$q = \frac{kA}{L} (T_{s,1} - T_{s,2})$$

jossa:

(2)

L on väliaineen paksuus [m]

$T_{s,1}$ ja $T_{s,2}$ väliaineen pintalämpötilat [C].

Aineen lämmönjohtavuudella (k) ilmoitetaan aineen kyvystä johtaa lämpöenergiaa. Lämmönjohtavuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat lämpötila, paine ja aineen luonne.

Lämmönjohtavuudessa parhaimmat materiaalit ovat metallit ja tiiviit keraamiset materiaalit, myös orgaanisilla aineilla ja nesteillä on hyvä lämmönjohtavuus. Kaasuilla puolestaan on alhaisimmat lämmönjohtavuudet. Erikoiseristykseen on kehitetty kryogeenisiin lämpösovel-
luksiin, joiden lämmönjohtavuus on alhaisimmillaan jopa 0,3 mW (Karwa, 2020, 9).

Lämmönsiirtoa tarkasteltaessa tietyssä rakenteessa, joka koostuu erilaisista kiinteistä ai-
neista rinnan sekä sarjassa voidaan laskennassa käyttää lämpövastuksia ja kokonais- läm-
mönsiirtokerroimia (Kvick, 2023).

Johtumisen lämpövastus:

$$R_{t,cond} = \frac{L}{kA} \quad (3)$$

Kahden pinnan välille syntyvää lämpövastusta kutsutaan kontaktilämpövastukseksi, joka
muodostuu pintojen karheudesta. Pintojen karheuden vuoksi pintojen väliin muodostuu ra-
koja, jotka täyttyvät ilmalla. Tämän vuoksi lämmönsiirto muodostuu pintojen välillä johtu-
malla suorista kontakti kohdista, sekä johtumalla tai säteilemällä ilmarakojen välistä. Alhai-
sen lämmönjohtavuuden omaava ilman vuoksi ilmaraot huonontavat lämmönsiirtoa pintojen
välillä. Kontaktilämpövastus voidaan ratkaista kaavalla:

$$R_{t,c} = \frac{1}{h_c A} \quad (4)$$

Jossa:

$R_{t,c}$ on Kontaktilämpövastus

h_c on kontaktilämmönsiirtokerroin [W/m²K].

Lämpövastuksien ollessa tiedossa voidaan ne laskea yhteen rinnan- ja sarjaankytkennöillä,
joilla saadaan selvitettyä kokonaislämmönsiirtokerroimen kokonaisresistanssi. Lämpövas-
tusten kokonaisresistanssi sarjaankytkettynä:

$$R_{t,tot} = \sum_i R_{t,i} \quad (5)$$

Jossa:

$R_{t,tot}$ on kokonaisresistanssi

$R_{t,i}$ on lämpövastus [K/W].

Kokonaisresistanssi rinnankytkettynä:

$$\frac{1}{R_{t,tot}} = \sum_i \frac{1}{R_{t,i}} \quad (6)$$

Kokonaislämmönsiirtokerroin saadaan ratkaistua kokonaisresistanssin avulla:

$$U = \frac{1}{R_{t,tot}A} \quad (7)$$

Jossa:

U on kokonaislämmönsiirtokerroin.

Kokonaislämpövirta saadaan ratkaistua kokonaislämmönsiirtokertoimen avulla:

$$q = UA(T_1 - T_2) \quad (8)$$

7.2.2 Konvektio

Konvektiossa lämpöenergia siirtyy liikkuvassa aineessa, kuten nesteessä tai kaasussa, liikkuvasta aineesta puhutaan yleisesti fluidina (Termodynamiikka ja lämmönsiirto, 2023). Myös konvektiossa lämpöenergia siirtyy korkeammasta lämpötilasta matalampaan lämpötilaan. Konvektiota on kahdentyyppiistä: vapaa konvektio, sekä pakotettu konvektio.

Vapaa konvektio muodostuu virtaavan aineen muodostavista nostevoimista, jotka syntyvät virtaavan aineen lämpötilavaihteluista ja tiheyseroista. Pakotettu konvektio muodostetaan taas ulkoisilla keinoilla, kuten pumpuilla ja puhaltimilla. Konvektiivisessa lämmönsiirrossa muodostuvat erikoistapaukset ovat kiehuminen ja lauhtuminen.

Isaac Newtonin esittämästä yhtälöstä voidaan laskea lämpövirta kiinteästä pinnasta ohivirtaavaan fluidiin tai päinvastoin (Jokilaakso, 1987, 97.). Newtonin jäähtymislaki kuvaa konvektiivista lämmönsiirtoa.

Newtonin jäähtymislaki:

$$Q = \alpha A(T_s - T_f)$$

Jossa: (9)

α on konvektiolämmönsiirtokerroin [W/m²K]

T_s pinnan lämpötila [C] ja

T_f virtaavan aineen lämpötila [C].

Konvektiolämmönsiirtokertoimen avulla tiedetään kuinka paljon lämpöä siirtyy tietyllä aikavälillä virtaavan aineen ja lämmitettävän pinnan pinta-alaa ja lämpötilayksikköä kohden. Konvektiolämmönsiirtokertoimen määrittäminen tapahtuu tyypillisesti kokeellisesti, koska se on riippuvainen useasta tekijästä.

Konvektiolämmönsiirtokertoimeen vaikuttavia tekijöitä vapaassa konvektiossa esitetään:

$$h = f(\mu, \rho, k, c_p, \Delta T, l, v)$$

Jossa: (10)

v tarkoittaa virtaavan aineen nopeutta [m/s].

Konvektiossa lämpövastusta voidaan käyttää samoin kuin johtumisessa. Konvektion lämpövastus:

$$R_{t,conv} = \frac{1}{hA}$$
(11)

7.2.3 Säteily

Säteilyä tapahtuu jokaisella pinnalla, jonka lämpötila ylittää nollapistettä korkeamman lämpötilan. Säteilevä pinta lähettää ympärilleen, eli emittoi sähkömagneettista lämpösäteilyä, jonka aallonpituus on riippuvainen lämpötilasta. Säteilyä voi tapahtua myös tyhjiössä (Termodynamiikka ja lämmönsiirto, 2023). Lämpösäteilyä lähettävät kaikki kappaleet, jotka ovat absoluuttisen nollapisteen yläpuolella. Lämpösäteilyn aaltoliikkeet ovat samanlaista kuin radioaalloilla, röntgensäteilyllä ja valolla, mutta eri aallonpituudella. Lämpösäteilyssä

pätevät samat lait kuin valolla, kuten eteneminen suorilla linjoilla, heijastumisen lakien noudattaminen, polarisointi ja heikentyminen säteen neliöjuuren käänteisluvun suhteessa etäisyyden kasvaessa säteilylähteeseen. (Jokilaakso, 1987, 109.)

Emittoiva säteily syntyy molekyylien elektronien siirtymisestä ja värähtelystä. Säteilyn voimakkuuteen vaikuttaa lämpötila, sekä lähteen emissiviteetti. Emissiviteetillä kuvataan kappaleen kykyä emittoida säteily verrattuna mustaan kappaleeseen vastaavassa lämpötilassa. Kappaleeseen siirtyvä säteily voi absorboitua, heijastua tai läpäistä kappaleen. Se kuinka paljon kappaleeseen absorboituu, heijastuu tai läpäisee säteilyä, on riippuvaista kappaleen pinnan ominaisuuksista. Absorptiokertoimen avulla voidaan selvittää kuinka suuri kappaleen absorptiokyky on. Pinnan emittoiva lämpösäteily pinnan välittömässä läheisyydessä esitetään kaavalla:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4$$

Jossa: (12)

E on , ε on emissiviteetti [-]

σ on Stefan-Boltzmannin vakio [$W/(m^2K^4)$].

Kappaleeseen absorboitunut säteily esitetään kaavalla:

$$G_{abs} = aG$$

jossa: (13)

G_{abs} on, a on absorptiokerroin [-]

G on tulevan säteilyn voimakkuus [W/m^2].

Kappaleen emissiviteetin ja absorptiokertoimen ollessa yhtä suuret voidaan kappaleen säteilyteho ilmaista Kirchoffin lain avulla:

$$q = \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4)$$

jossa: (14)

T_{sur} on ympäristön lämpötila [C].

7.2.4 Lämmönsiirto ilmakeivaimissa

Ilmakeivaimissa kuuma ilmavirta siirretään kuivatus kohteeseen puhaltimien avulla. Lämmönsiirto kuumasta ilmavirrasta paperiin tapahtuu konvektion avulla. Siirtyvä lämpövirta ilmasta paperiin esitetään kaavalla:

$$q = h_{a-p} A_w (T_a - T_w)$$

jossa: (15)

h_{a-p} on konvektiolämmönsiirtokerroin ilmavirrasta paperiin [W/m^2K],

A_w on ilmavirran ja rainan kosketuspinta-ala [m^2]

T_w on rainan pintalämpötila [C].

7.2.5 Lämmönsiirto säteilykuivaimissa

Paperiradan kuivaamista sähkömagneettisen säteilyn avulla kutsutaan säteilykuivaamiseksi. Säteilystä osa absorboituu paperirataan. Tyypillisin tapa selvittää radan absorboitunut säteily on käyttämällä empiirisiä absorptiohyötysuhteita. Rataan absorboitunut säteily saadaan lasketta kaavalla:

$$q_{abs} = q_{input} n_{gen} n_{abs}$$

jossa (16)

q_{input} on kuivaimen käyttämä kaasu- tai sähköteho [W],

n_{gen} on sähkötehon tai kaasutehon muuntamisen hyötysuhde [-] ja

n_{abs} on rainan siirtyvän säteilyn absorboitumisen hyötysuhde [-].

7.2.6 Hukkalämpöenergia

Monissa energiatehokkaissa sovellutuksissa hyödynnetään kuuma poistoilma. Poistoilmojen lämpötilat ja kosteus pitoisuudet vaihtelevat prosessikohteiden mukaan. Poistoilmasta voidaan kuitenkin määrittää ilman sisältämä energiamäärä, kun prosessin poistoilmasta ja

lämpöä siirrettävästä kohteesta tiedetään virtausnopeudet, lämpötilaerot sekä aineominaisuudet. Kaavojen 17–21 avulla voidaan määrittää hukkalämpövirtauksesta saatava teho, siirrettävän aineen virtausnopeus, sekä lämmönvaihtimelle tarvittava lämmönsiirtopinta-ala. Lämmönvaihtimien koot vaihtelevat merkittävästi etenkin hukkalämpöenergian lähteen ja hyödynnettävän aineen lämpöenergian ominaisuuksien mukaan. (Konthandaraman, 2006 522–531.)

Esimerkiksi tyypillinen ilma/ilma lämmönvaihdin tarvitsee huomattavasti suuremman lämmönsiirtopinta-alan verrattuna ilma/vesi lämmönvaihtimeen ilman ja veden ominaislämpökapasiteetti erojen vuoksi. Tämän vuoksi lämmönvaihtimien esisuunnitelmissa on hyvä tarkastella tarvittavaa lämmönsiirto pinta-alaa. Lämmönsiirtopinta-alan kasvaessa liian suureksi voi vaihtimen rakennuskustannukset nousta suunnattomasti muun muassa tilanpuutteesta johtuvien tilojen rakennuskustannuksien vuoksi.

$$\phi = UA\Delta T_{ln}$$

jossa: (17)

ϕ = Lämpöteho [W]

U = kokonaislämmönsiirto kerroin [W/m²K]

A = Tarvittava lämmönsiirtopinta-ala [m²]

ΔT_{ln} = *Kuuman ja kylmän logaritminen lämpötilaero* [C]

Kuuman ja kylmän puolen logaritminen lämpötilaero saadaan ratkaistua kaavalla:

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_{kuuma} - \Delta T_{kylmä}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{kuuma}}{\Delta T_{kylmä}}\right)}$$

jossa: (18)

ΔT_{ln} = *Kuuman ja kylmänpuolen logaritminen lämpötilaero* [C]

ΔT_{kuuma} = *Kuumanpuolen lämpötilaero* [C]

$\Delta T_{kylmä}$ = *Kylmänpuolen lämpötilaero* [C]

Hukkalämpöenergia virtauksista voidaan virtauksen sisältämä lämpöenergia laskea kaavalla:

$$\phi = qmcp\Delta T$$

jossa: (19)

$$\phi = \text{Lämpöteho [W]}$$

$$qm = \text{Massavirtaus [kg/s]}$$

$$cp = \text{virtaavan aineen ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]}$$

$$\Delta T = \text{Hukkavirtauksesta hyödynnetty lämpötilaero [C]}$$

Lämpövirtauksen kaavasta voidaan soveltaa tarvittava lämmönsiirto pinta-ala kaavalla:

$$A = \frac{\phi}{(U\Delta T_{ln})}$$

jossa: (20)

$$A = \text{Tarvittava lämmönsiirtopinta-ala [m^2]}$$

$$U = \text{Kokonaislämmönsiirtokerroin [W/m^2K]}$$

$$\Delta T_{ln} = \text{Kuuman ja kylmän logaritminen lämpötilaero [C]}$$

Kokonaislämmönsiirtokerroin voidaan ratkaista kaavalla:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{a_h} + \frac{d_{liika}}{\lambda_{liika}} + \frac{d_{teräs}}{\lambda_{teräs}} + \frac{1}{a_c}$$

jossa: (21)

$$U = \text{Kokonaislämmönsiirtokerroin [W/m^2K]}$$

$$a_h = \text{Kuumanpuolen konvektiokerroin [W/m^2K]}$$

$$d_{liika} = \text{Epäpuhtauksien paksuus [m]}$$

$$d_{teräs} = \text{Lämmönsiirtimen seinämän paksuus [m]}$$

$$a_c = \text{Kylmänpuolen konvektiokerroin [W/m^2K]}$$

Poistoilman sisältämä energia voidaan hyödyntää useilla tavoilla, kuten kierrättämällä se takaisin alkuperäiseen käyttökohteeseen, siirtämällä hukkaenergia toiseen kohteeseen, tai nostamalla hukkalämpöenergian lämpötilaa esimerkiksi lämpöpumpun avulla, jonka jälkeen siirtämällä se toiseen kohteeseen.

Hukkalämpövirtoja tutkiessa ainevirran koostumus on erityisen tärkeää huomioida arvioi-
dessa hukkalämmöstä saatavaa hyötyä. Esimerkiksi paperiteollisuudessa poistoilma on kui-
vatusprosessista poistuvaa kosteaa ilmaa, jonka energiasisältö on korkeampi verrattuna kui-
vaan ilmaan, veden höyrystymisen takia. Kosteuden vuoksi sitä ei voida välttämättä hyö-
dyntää kuivatuksessa ilman lisäenergian käyttöä. Kosteuspitoisuudet tulee myös huomioida
prosessien materiaalien valinnoissa.

7.3 Kuumaöljykattila

Kuuma öljy on lämmönsiirrossa käytettävää mineraalipohjaista tai synteettistä öljyä. Kuuma öljyä käytetään pääosin teollisuuden korkeita lämpötiloja tarvitsevista prosesseista sekä merenkulkualuksissa.

Kuuma öljy kierrätetään järjestelmässä lämmitysyksikön ja käyttöyksikön välillä. Lämmi-
tysyksikössä öljy lämmitetään haluttuun lämpötilaan, jonka jälkeen öljy siirretään pumpulla
käyttöyksikköön, jossa öljy luovuttaa lämpöenergiaa käyttöyksikköön (Mitä on kuumaöljy?
2023).

Kuumaöljykattilat ovat tehokkaita kuuma öljyn lämmitysyksiköitä. Kattiloilla voidaan kuu-
mentaa lämmönsiirto öljyä jopa 350 C asteeseen merkittävästi muita kattiloita pienessä
paineessa. Esimerkiksi kuumaöljykattiloiden kiertoöljypumpun paine on tyypillisesti 3–8
baarissa kun taas höyrykattiloiden paine voi olla samassa lämpötilassa 180 baaria.

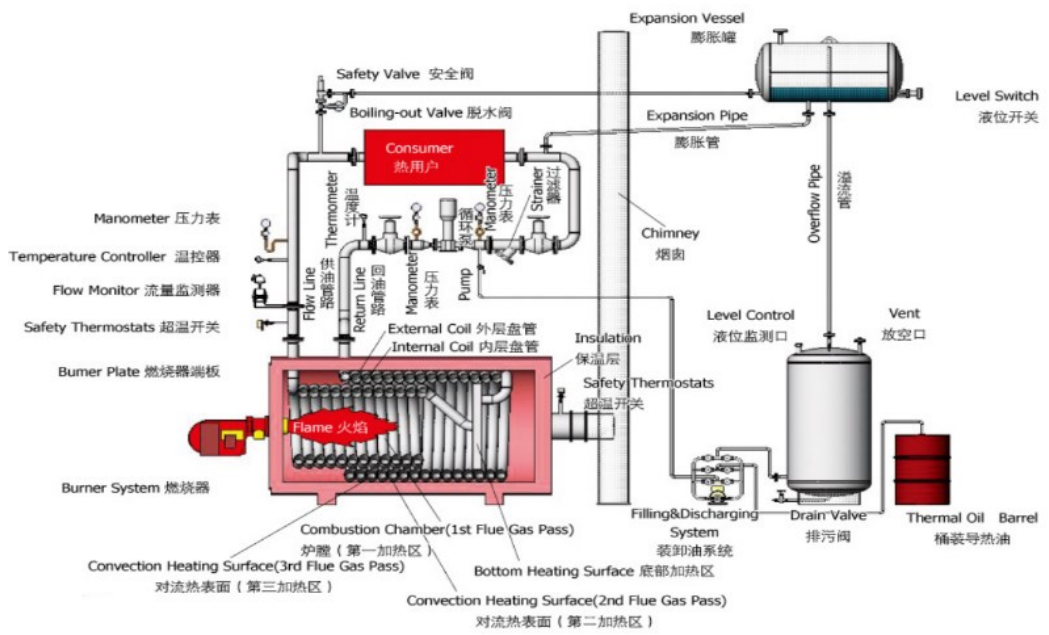
Suljetun kierron ansioista kattila omaa normaalia pienemmät lämpöhäviöt ja omaa korkean
hyötysuhteen. Kattilan vedettömyyden ansioista prosessissa ei tarvita erillistä veden esikä-
sittelyä tai käsittelykemikaaleja. Samalla vedettömyys poistaa kattilalta jäätymisvaaran.
Kunnossapidon kannalta kattilatyypit suhteellisen huoltovapaita, muun muassa korroosiotto-
muuden vuoksi (Käyttö ja käytönvalvonta, 2023).

Kattila valmistajia on useita, mutta kattilatyypit eivät poikkea suunnattomasti toisistaan.
Yleisin muuttuja onkin energianlähde, joka voi olla esimerkiksi sähkö tai maakaasu. Usein

kattiloissa käytetään puhallinpolttimella varustettua maakaasu poltinta, kuten tutkimuskoh-teessakin.

Tyypillisesti poltin on sijoitettuna kattilan etuosaan. Poltin lämmittää kaasuliekillä poltto-kammiossa olevia kierukoita, joiden sisällä kuumaöljy kiertää lämmitysvaiheessa. Savukaa-sut ohjataan suoraan polttokammion jälkeen savupiipun kautta ulkoilmaan.

Lämmitetty öljy siirretään pumpun avulla lämmitysyksikköön, jonka jälkeen se johdetaan paisunta-astian kautta viilentyneenä takaisin kattilaan lämmitykseen. Kuvassa 31 esitetään Aura GmBh toteuttama kuumaöljyjärjestelmä (Aura GmBh, 2023).



Kuva 31. Kuumaöljyjärjestelmä (Aura GmBh, 2023).

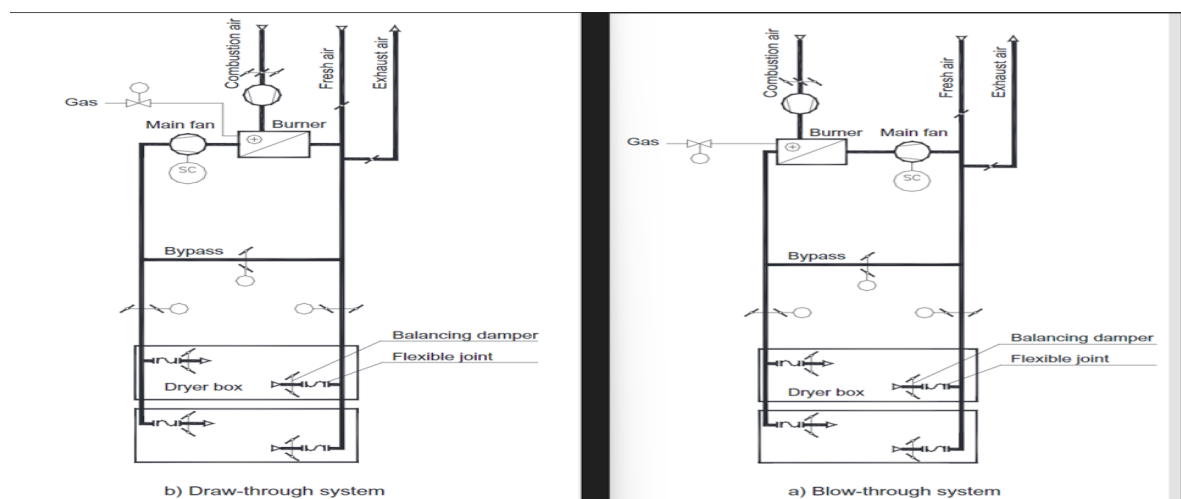
7.4 Lämmöntalteenotto ja hyödyntäminen

Energianvalmistuksessa kuten poltossa prosessiin syötettävä ilma syötetään suoraan ulkoil-masta tai poltinhuoneen sisäilmasta. Syötettävän palamis- ilman lämpötila voi vaihdella etenkin talviolosuhteissa voimakkaasti.

Ilman lämpötila vaikuttaa muun muassa merkittävästi polttoaineen kulutukseen, koska mitä kylmempää prosessiin syötettävä ilma on sitä enemmän, tarvitsemme energianlähteitä sen lämmittämiseen.

Tuotantoprosessista poistettavan ilman loppulämpötilaa voidaan usein hyödyntää kierrättämällä loppuenergia takaisin alkuperäiseen prosessiin, jolla syöttöilman lämpötilaa voidaan nostaa, jolloin prosessin energiatehokkuus nousee. Poistoilmaa voidaan myös tarvittaessa hyödyntää, jonkin toisen prosessikohteen energianlähteenä sellaisenaan tai nostamalla poistoilmanlämpötilaa.

Ilmankiertojärjestelmät ovat tyypillisiä, kun kuivatusprosessi on kaasulämmitteinen. Yleisesti kiertojärjestelmiä on kahden tyyppisiä, jotka ovat läpipuhallusjärjestelmä ja läpivientijärjestelmä. Järjestelmien eroina ovat pääpuhaltimen sijoittaminen. Läpivientijärjestelmässä puhallin sijoitetaan ennen lämmönlähdettä ja läpivientijärjestelmässä lämmönlähteen jälkeen. (Paltakari, 2009, 569.) Läpipuhallus ja läpivienti kiertoilmajärjestelmät esitetään kuvassa 32.



Kuva 32. Kiertoilmajärjestelmät (Paltakari, 2009, 569).

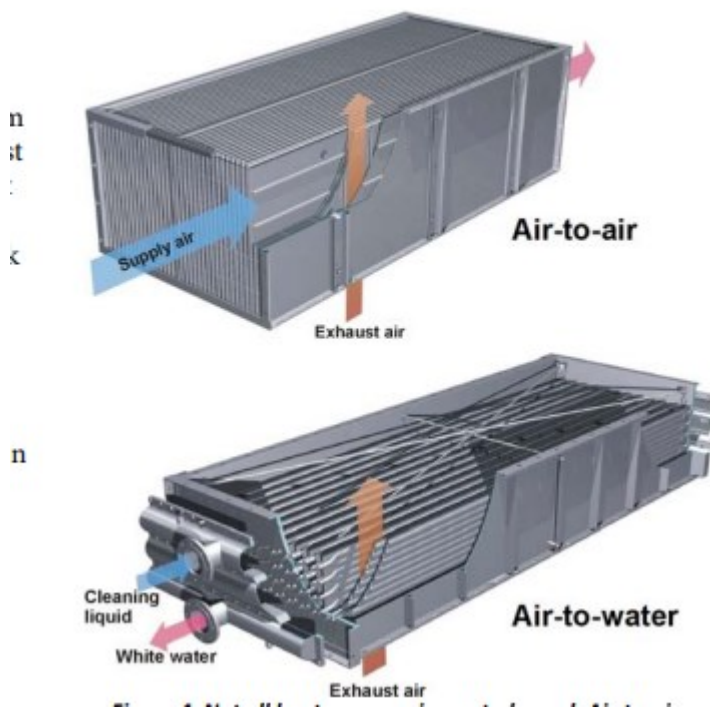
Läpipuhallusjärjestelmän etuina ovat puhaltimen sijainti prosessin kylmällä puolella, jolloin puhallin ei altistu polttimen lämmölle, sekä ilman tilavuusvirta on polttimen jälkeen noin 25 % suurempaa korkean lämpötilan ja palamisilman lisäämisen takia.

Puhaltimen sijoittaminen taloudellisessa näkökulmassa on edullisinta sijoittaa polttimen eteen, koska tällöin puhaltimen koko ja tehon tarve on pienempi.

Kaikkiin kiertojärjestelmiin on rakennettuna lyhyt kiertojärjestelmä, jolla ilmaa voidaan kierrättää muun muassa tuotantokatkoissa, ja päänvienneissä, jolloin ilmaa ei saa puhaltaa ilmakeivaimelle. Lyhytkiertojärjestelmät koostuvat tulo- ja paluuilmanakanavat yhdistävästä ohituskanavasta sekä ohitusventtiileistä. Tuotanto tilanteessa ilmakeivain on kuitenkin kytkettävä nopeasti päälle, jonka kiertolinjat mahdollistavat.

Kierrätysjärjestelmissä noin 80–90 % paluuilmausta kierrätetään lämmityksen jälkeen takaisin kuivaimeen. Poistoilman määrä on tyypillisesti 10–20 %, joka lisätään järjestelmään tulo- ja palamisilmana. Tyypillisesti palamisilma otetaan suoraan poltinhuoneesta ja siinä voidaan käyttää esilämmitystä.

Lämpöisen poistoilman talteenotossa käytetään erilaisia talteenottomenetelmiä. Paperiteollisuudessa esiintyy eniten kolmea talteenotto menetelmää. Yleisimpinä menetelminä paperiteollisuudessa ovat talteenottokennot, josta lämpöenergia siirretään ilma/ilma menetelmällä tai ilma/vesi menetelmällä kolmantena toteutuksena on suora ilma/vesi lämmönsiirrin, jota kutsutaan skrubberiksi. Kuvassa 33. esitetään ilma/ilma ja ilma/vesi kennojen toiminta (Valmet savings in the air, 2012).



Kuva 33. Lämmöntalteenotto kennojen toiminta (Valmet savings in the air, 2012).

Ilma/ilma lämmönsiirrin toteutuksia käytetään, kun halutaan hyödyntää lämpöisen poistoilman sisältämä energia toiseen ilmavirtaan, kuten konosalin tuuletusilmaan tai korvausilman lämmittämiseen. Ilma/ilma lämmönsiirtimet voidaan toteuttaa levylämmönsiirtimenä tai putkilämmönsiirtimenä.

Ilma/vesi lämmönsiirrin toteutuksia käytetään, kun halutaan hyödyntää lämpöisen poistoilman sisältämä energia vesivirtaan, kuten prosessiveden lämmittämiseen. Vesi on

lämmönsiirto aineena tehokas ja sen avulla voidaan siirtää suuria lämpömääriä pitkien matkojen päähän koko paperitehtaan alueella oleviin kulutuskohteisiin. Ilma/vesi lämmönsiirtimet voidaan toteuttaa kenno tai putkilämmönsiirtiminä.

Suora koste ilma/vesi lämmönsiirrin eli skrubberi koostuu kammioista, jossa suuttimien avulla suihkutetaan lämmitettävä vesi poistoilmavirtaukseen. Suuttimet ovat sijoitettuna kammiossa 3-4 metrin korkeuteen vesi suihkun vapaapudotusta varten. Kammiossa lämmitetty vesi valuu pohja-altaaseen, josta se siirretään eteenpäin. Ennen pohja-allasta skrubberiin on voitu lisätä lämmönsiirtoa tehostavia levystöjä. Skrubberit ovat todella tehokkaita lämmönsiirtimiä, mutta tarvitsevat suuren tilan rakenteensa vuoksi (knowpap, 2023).

7.5 Kosteaa ilmaa

Paperin kuivatuksessa käytettävässä ilmassa siirtyy aina ulkopuolisesta ympäristöstä tai paperiradasta kuivatuksen takia kosteutta. Kostean ilman merkitys on hyvä huomioida aina kuivatusprosesseja suunniteltaessa. Tämän takia kuivatusprosessista poistettavan ilman sisältämä energia poikkeaa huomattavasti kuivasta ilmasta, ilman ja veden ominaisuuksien vuoksi. Poistoilman kuivan ilman ja veden seos tietyssä lämpötilassa ja paineessa voidaan määrittää kaavalla:

$$x = \frac{m_v}{m_a} = \frac{m_v + m_w}{m_a} = x_v + x_w$$

jossa:

(22)

x = Kuivain ilman ja veden seos [%]

m_v = Höyryn massa [kg]

m_a = Ilman massa [kg]

x_v = Höyryn kosteus [%]

x_w = Veden kosteus [%]

Kostean ilman tulkitsemisessa voidaan käyttää ideaalikaasun laskentaan perustuvia sääntöjä. Tällöin voimme kostean ilman kaavaa ideaalikaasun yhtälön mukaisesti:

$$\left(\frac{P_a}{P_v}\right) \left(\frac{m_v}{m_a}\right) = \left[\frac{p - p_v}{p_v}\right] (x_v) = \frac{R_a}{R_v}$$

Tai (23)

$$x_v = \left(\frac{R_a}{R_v}\right) \left[\frac{p_v}{p - p_v}\right]$$

(24)

jossa:

$$p_a = \text{Ilmanpaine [Pa]}$$

$$p_v = \text{Höyrynpaine [Pa]}$$

$$R_a = \text{Ilman reaali}$$

$$R_v = \text{Höyryn reaali}$$

Kostean ilman ominaisentalpia saadaan ratkaistua seuraavalla yhtälöllä:

$$m_a i = m_a c_a \vartheta + m_v (r_v + c_v \vartheta) m_w + c_w \vartheta$$

jossa: (25)

$$m_a i = \text{Ominaisentalpia } \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$$

$$C_a = \text{Ilman ominaislämpökapasiteetti } \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}\right]$$

$$C_v = \text{Höyryn ominaislämpökapasiteetti } \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}\right]$$

$$C_w = \text{Veden ominaislämpökapasiteetti } \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}\right]$$

$$r_v = \text{Vedenhöyrystymisenergia 0 asteessa } \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$$

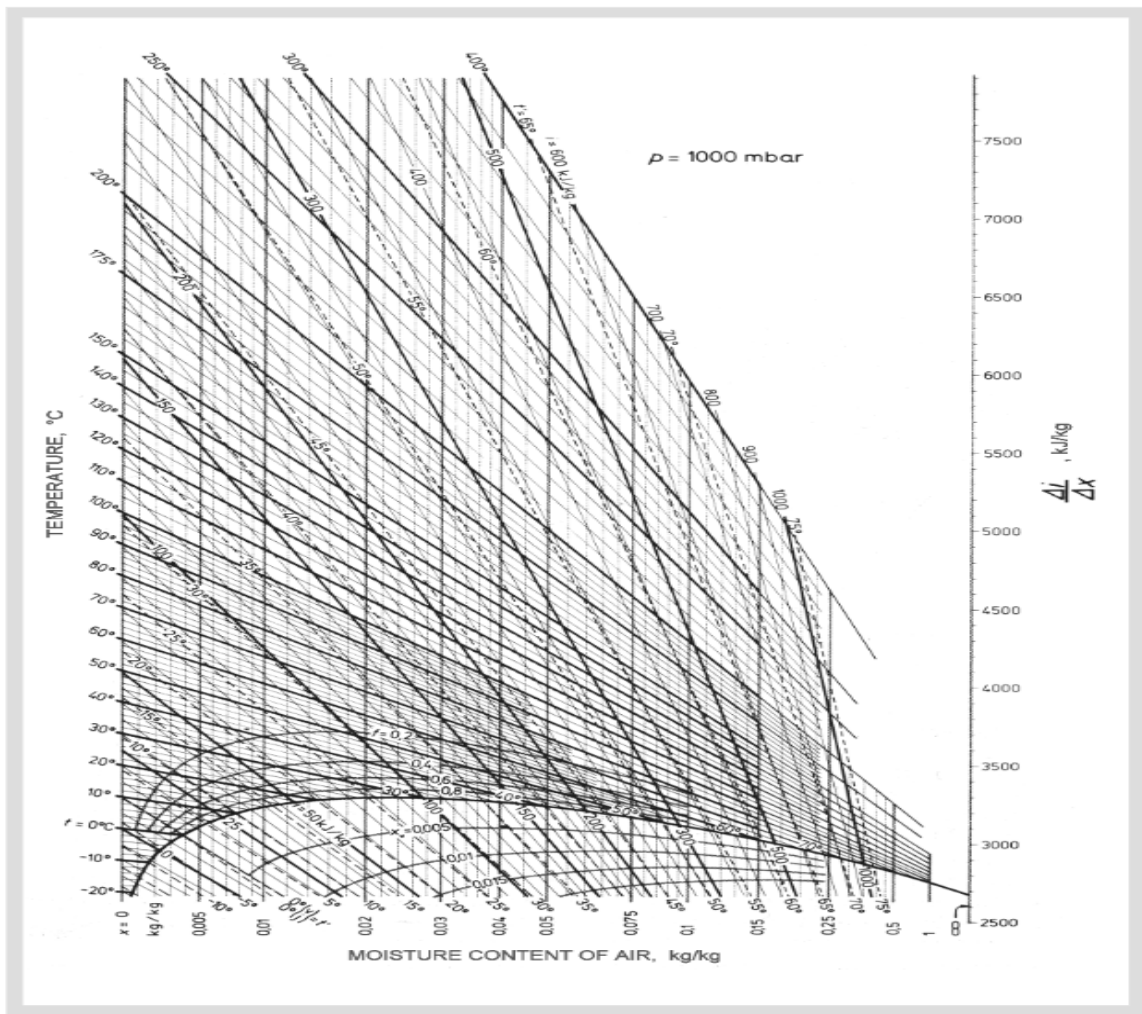
$$\vartheta = \text{Sekoituksen lämpötila [C]}$$

Yhtälöistä voidaan soveltaa kostean ilman ominaislämpökapasiteetti:

$$i = C_a \vartheta + x_v (r_v + c_v \vartheta)$$

(26)

Kostean ilman sisältämää energiamäärää voidaan tutkia myös i/x molliers kaavioiden avulla. Kaaviot ovat hyödyllinen apuväline tutkiessa kosteiden pintojen välistä lämmön ja massan siirtymistä. Luettaessa i/x kaavioita x-akselille on sijoitettuna ilman kosteuspiitoisuus ja y-akselille on sijoitettuna lämpötilan ja entalpian kaltevat viivat. Viivojen leikkauspisteistä voidaan tulkita kostean ilman energiasisältö. Kuvassa 34 esitetään kostean ilman i/x kaavio. (Karlsson, 2010, 40–44.)



Kuva 34. Kostean ilman i/x mollier kaavio (Karlsson, 2010, 44).

8 Maakaasu

Maakaasu on pääasialliselta koostumukseltaan hiilivetyä (CH₄) eli metaania, sekä vaihtelevin määrin muita hiilivetyjä kuten rikkivetyä ja hiilidioksidia. Maakaasu muodostuu eloperäisen aineen hajotessa vähä happisessa tilassa, joka esiintyy tyypillisesti suuren paineen alaisissa maankuoren kerrostumissa, joko yksin tai öljyyn sekoittuneena.

Puhdistettuna maakaasu on väritön, hajuton ja palaa heikosti sinertävällä liekillä. Maakaasu omaa korkean lämpöarvon, joka on 50 MJ/kg (A Parpola, 2004, 9).

Maakaasulla on yhteensä kolme hyvän polttoaineen ominaisuutta, jotka ovat puhdas palaminen, helppo palamisprosessin säädettävyys, ja joustava saatavuus. Maakaasun perinteisin käyttötarkoitus onkin ollut polttoaineena teollisuudessa lämmön ja höyryn tuotannossa. Suurimmat teollisuuden maakaasun kuluttajat ovat kemian teollisuus, öljyn jalostus, elintarvike teollisuus sekä sellu ja paperiteollisuus (V Smil, 2019, 103–106).

8.1 Maakaasun ominaisuudet

Maakaasun käyttöä ajatellen keskeisin ominaisuus maakaasulle on sen lämpöarvo. Polttoaineilla on kaksi lämpöarvoa, jotka ovat alempi tehollinen lämpöarvo ja ylempi kalorimetrinen lämpöarvo. Ylempi lämpöarvo poikkeaa alemmasta lämpöarvosta sisältämällä savukaasujen sisältämän vesihöyryn lauhtumislämpötilan. Puhdistettu maakaasu on rikitöntä, joten osa lauhtumislämmöstä voidaan hyödyntää jäädyttämällä savukaasu vesikastepisteen alle, jonka avulla hyötysuhdetta voidaan parantaa merkittävästi (Maakaasukäsikirja, 2023).

Maakaasun tiheys voidaan määrittää normaaliolotilassa jakamalla molekyylipaino moolin tilavuudella. Suhteellisella tiheydellä verrataan kaasun tiheyttä ilman tiheyteen. Suhteellinen tiheys vaikuttaa suutinvirtauksien mitoitukseen tai kaasun käyttäytymisen arviointiin vuoto-tapauksissa. Maakaasun suhteellinen tiheys on lähes puolet ilman tiheydestä 0,56 (maakaasukäsikirja, 2023).

Kaasuryhmät luokitellaan kolmeen kaasuryhmään, sekä niiden alaryhmiin. Ryhmien luokittelu muodostuu lämpöarvon ja tiheyden perusteella lasketun Wobbe-arvon mukaan. Suomessa käytettävä maakaasun Wobbe-arvon sallittu vaihteluväli on 39,1–54,7 MJ/m³.

Kyseinen Wobbe-arvo määrittää käytettävän maakaasun toiseen kaasuryhmän alaryhmään H, joka on korkean lämpöarvon maakaasut.

Kaasujen luokittelu on tärkeässä roolissa, koska ainoastaan saman Wobbe-arvon omaavia kaasuja voidaan käyttää samassa kaasulaitteessa tai polttimessa ilman erillistä suuttimen tai paineensäätimeen tehtävää muutosta. Kaasulaitteet jaetaan eri laiteluokkiin samasta syystä.

8.2 Maakaasun palaminen

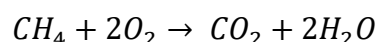
Maakaasun palamisen edellytyksenä on palamiskelpoinen seos. Yleinen ohje maakaasun palamiseen on ollut, että maakaasua tulisi olla vähintään 5 % ilman tilavuudesta, mutta alle 15 %. Syttymisrajoihin vaikuttavat palamisilman lämpötila ja happipitoisuus. Happea lisäämällä voidaan laajentaa maakaasun syttymisaluetta.

Kapean syttymisalueen omaavan kaasumaisille polttoaineille toinen ominaisuus on korkea syttymislämpötila, joka on maakaasulla 600–650 C. Maakaasun sytytys energianmäärä on kuitenkin pieni.

Kaasuseoksesta voidaan tehdä myös palamiskelvotonta lisäämällä ilmaan inerttikaasu, kuten hiilidioksidia tai typpeä, esimerkiksi lisäämällä typpeä ilman tilavuuteen 37 % se tekee metaanista palamiskelvotonta. Kaasun tekeminen palamiskelvottomaksi voidaan tehdä muun muassa huoltotöiden vuoksi.

Liekin muodostumiseen ja hallintaan vaikuttavin tekijä on palamisnopeus, joka on tavallisesti alle 0,5 m/s. Polttimen palopään ja kaasusuuttimen muotoilulla ja mitoituksella voidaan vaikuttaa liekin muotoon ja stabiilisuuteen, myös palamisilman ja kaasun paineella, nopeudella ja sekoitustavalla on vaikutusta liekin muotoon ja stabiilisuuteen.

Maakaasun palaminen voidaan yksinkertaistaa seuraavanlaiseen reaktioyhtälöön:



jossa:

CH₄ = Metaani

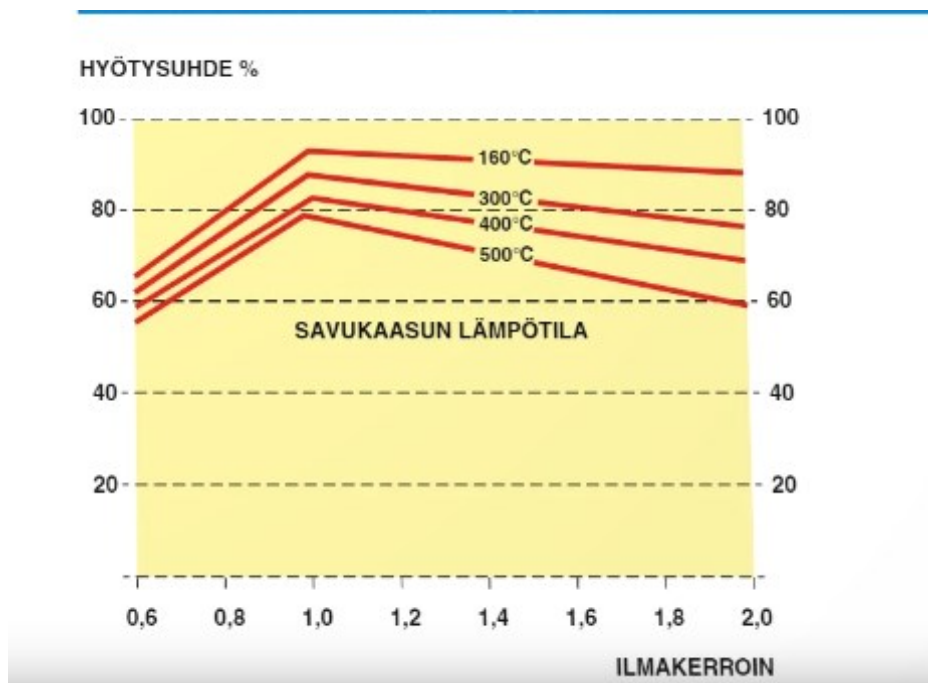
O₂ = Happi

CO₂ = Hiilidioksidi

H₂O = Vesi

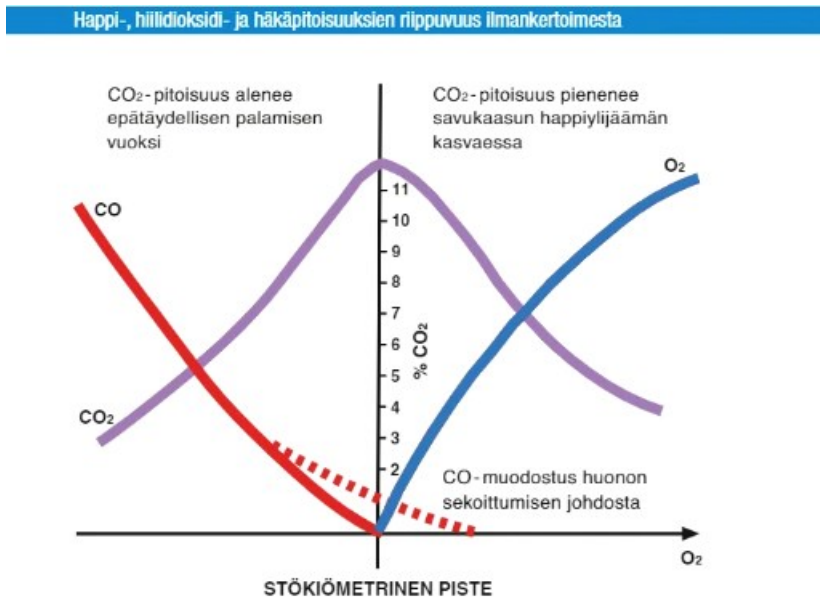
Reaktioyhtälöstä voidaankin päätellä, että maakaasun palamistuotteina ovat palamisprosessissa hiilidioksidi ja vesi.

Käytännössä maakaasun täydellinen palaminen vaatii enemmän palamisilmaa, kuin teoreettinen palaminen. Maakaasun ilmaylimäärää on kuitenkin pieni ja tyypillisesti palamisen tehokkain hyötysuhde saavutetaan ilmakerroimen ollessa 1,1. Kuvassa 35 esitetään palamisilmakerroimen vaikutus maakaasun palamisen hyötysuhteeseen (Maakaasukäsikirja, 2023).



Kuva 35. Maakaasun palamisen ilmakerroin / hyötysuhde taulukko (Maakaasukäsikirja, 2023).

Väärin asetettu ilmakerroin vaikuttaa oleellisesti palamisen hyötysuhteeseen ja hiilidioksidi päästöihin. Palamisen toteutuessa ali-ilmalla muodostuu häkää, sekä savukaasuihin jää palamattomia hiilivetyjä, tällöin poltossa voi muodostua myös nokea. Liian suuri ilmakerroin taas pienentää palamisprosessin hyötysuhdetta, muttei aiheuta muita reaktioita, niin kuin palamisen ali-ilmalla. Kuvassa 36 esitetään happi, hiilidioksidi ja häkäpitoisuuksien riippuvuus ilmakerroimeen (Maakaasukäsikirja, 2023).

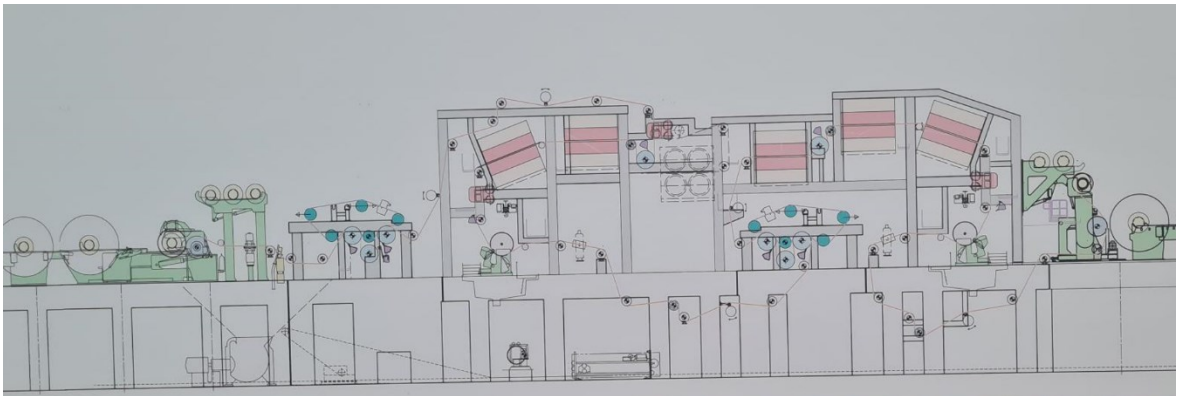


Kuva 36. Ilmakertoimen riippuvuus päästöihin (Maakaasukäsikirja, 2023).

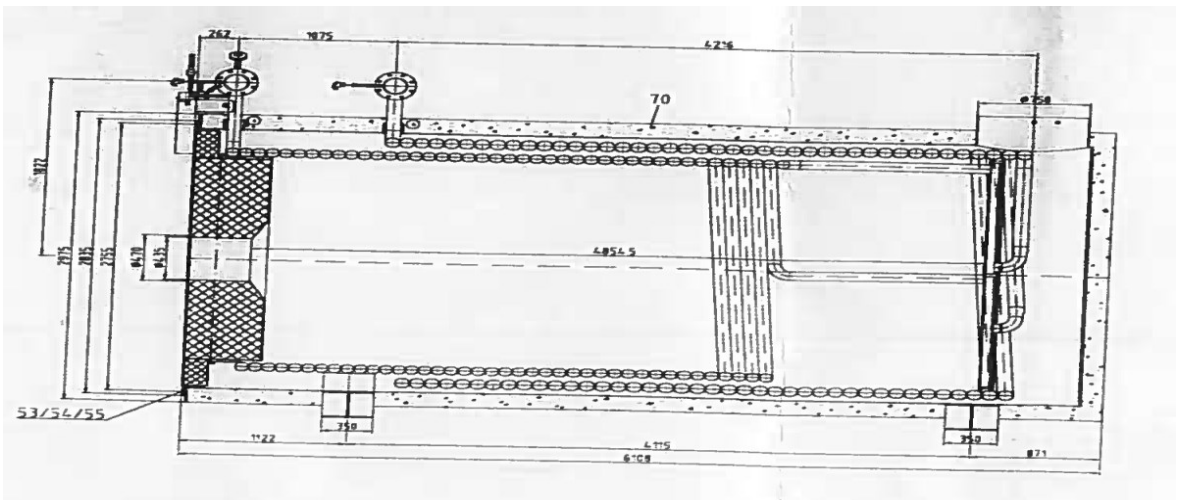
Palamista voidaan säätää muun muassa savukaasu mittauksien avulla mittaamalla happi- että häkäpitoisuudet. Mittaukset eivät kuitenkaan takaa täydellistä palamista, koska kaasun ja palamisilman huonon sekoittumisen takia voi muodostua häkää. Jos savukaasun happijäännökseen perustuvaa mittausta ei ole käytössä, ilmakerrointa suositellaan nostettavaksi 1,2:teen (maakaasukäsikirja, 2023).

9 Kuivatusprosessien tarkastelu

Paperin jälkikäsitellyssä kuivatuksen optimointia tutkittiin UPM Kymin paperitehtaalla C3 päällystyskone tuotantolinjalla sekä K1 kiillotuskalanterin termotelojen lämmönsiirto öljyä lämmittävää kuumaöljykattilaa. Kuvassa 37 esitetään päällystyskoneen layout piirros. Kuvassa 38 esitetään kuumaöljykattilan rakennetta.



Kuva 37. C3 päällystyskoneen layout.

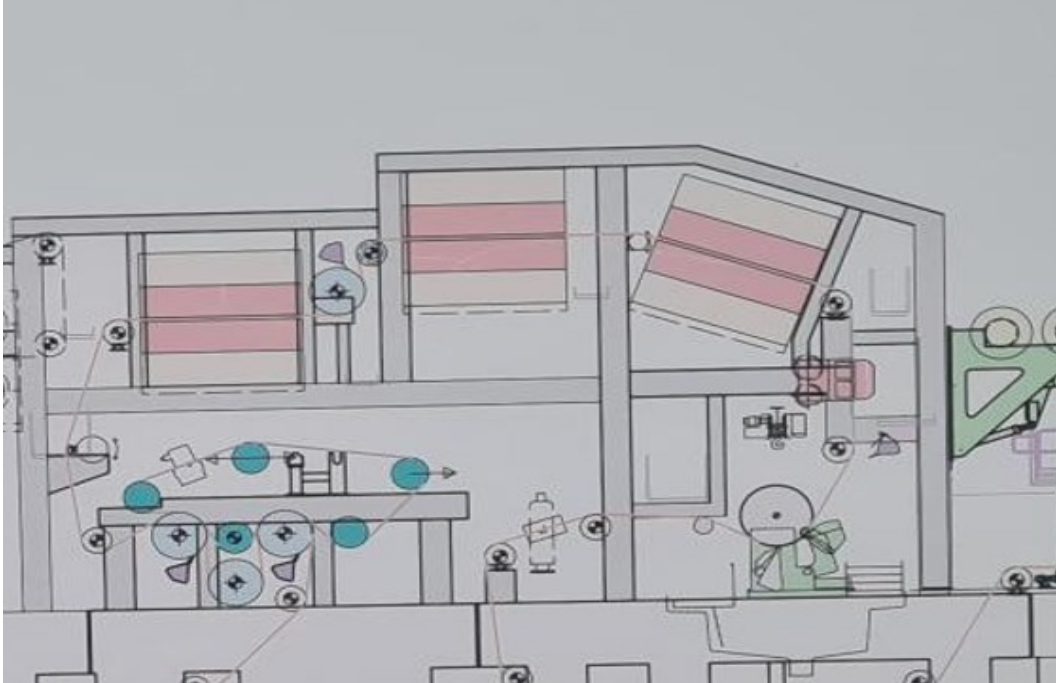


Kuva 38. K1 Kuumaöljykattilan rakenne.

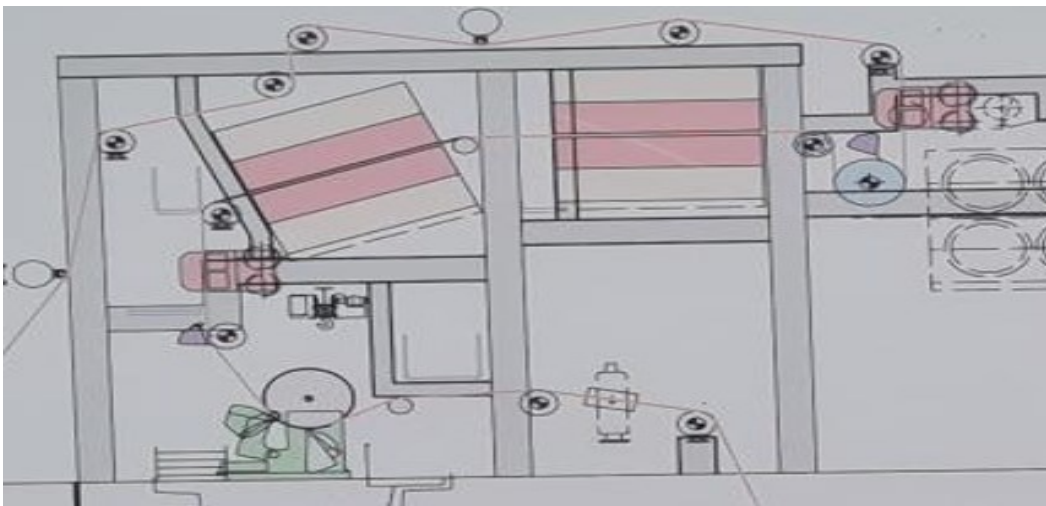
9.1 Päällystyskoneen tarkastelu

Tutkimuksen kohteena olevassa päällystyskoneessa on kaksi päällystysasemaa, joissa paperia päällystetään. Paperi voidaan siis päällystää yksi- tai kaksi puoleisesti. Päällystäminen

toteutetaan suutinapplikointi asemilla. Kuvissa 39 ja 40 on esitettyä ensimmäinen, sekä toinen päällystysasema päällystyskoneen layout piirroksesta.



Kuva 39. Päällystyskoneen ensimmäinen päällystysasema ja kuivaimet.



Kuva 40. Päällystyskoneen toinen päällystysasema ja kuivaimet.

Päällystyksen kuivatusprosessi koostuu ilma, sekä infrapunakuivaimista, lisäksi päällystysasemaan kuuluvat vetotelaryhmät. Päällysteen kuivaamisessa käytettävät prosessilaitteet ja niiden huipputehot ovat esitettyä Taulukossa 5.

Taulukko 5. Päälystyskoneen kuivaimet ja huipputehot.

Päälystysasema 1	Energialähde	Teho [MW]
Infrakuivain 1	Maakaasu	1,83
Ilmakuivain 1	Maakaasu	4,9
Ilmakuivain 2	Maakaasu	4,9
Ilmakuivain 3	Maakaasu	4,9
Päälystysasema 2		
Infrakuivain 2	Maakaasu	1,83
Ilmakuivain 4	Maakaasu	4,9
Ilmakuivain 5	Maakaasu	4,9
Infrakuivain 3	Sähkö	2,8

Päälystyskoneeseen liittyvässä optimoinnissa kuivausprosesseista tarkasteltiin seuraavia asioita.

- Maakaasu polttimien säätöprosessi.
- Kuivaimien lämmöntalteenotto mahdollisuudet, eli hukkavirtauksien hyödyntäminen.
- Vaihtoehtoinen kuivatusprosessi päälystyskoneella.

9.1.1 Päälystyskoneen kuivatusprosessi

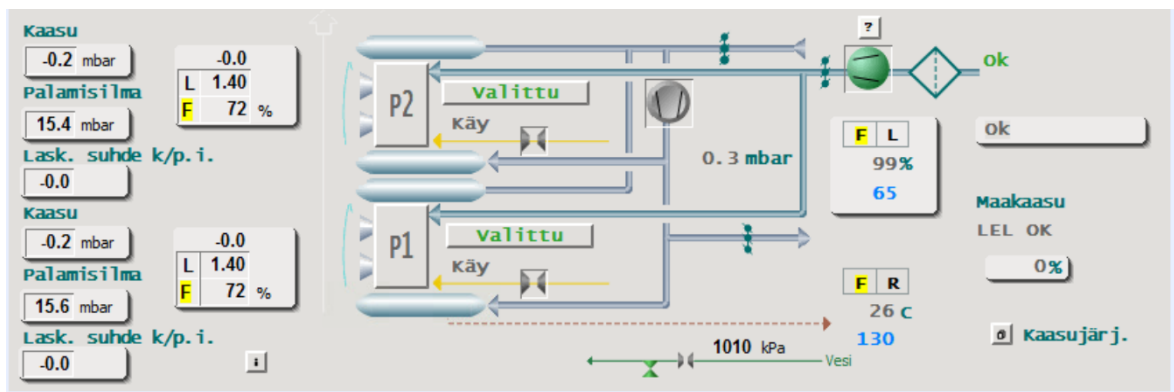
Päälystyskoneella on yhteensä kolme infrapunakuivainta, joista kaksi käyttävät polttoaineena maakaasua, ja yksi on sähkökäyttöinen. Kaasukäyttöiset infrakuivaimet sijaitsevat omilla päälystysasemilla applikointiaseman välittömässä läheisyydessä. Sähköinfrapuna kuivain taas sijaitsee päälystysaseman 2:den ilmakuivaimien jälkeen. Kuvasta 41 nähdään käytössä oleva kaasuinfrakuivain.



Kuva 41. Ensimmäisen päällystysaseman käytössä oleva kaasuinfrakuivain

Kaasuinfrakuivaimilla palamis- ilma syötetään puhaltimen avulla polttokammioon. Infra-kuivaimelta poistuva ilma kierrätetään kierrätyspuhaltimen avulla takaisin palamis- ilman sekaan, sekä poistetaan ulkoilmaan.

Kaasuinfrakuivaimilla on kaksi poltinlohkoa kuivainta kohden. Poltinlohkot koostuvat emittereistä, joita on yhteensä 122 kappaletta poltinlohkossa. Emitterien tehot ovat suuruudeltaan 7,5 kW, joten kuivaimen kokonaisteho on yhteensä 1,8 MW. Kuvassa 42 on esitettyä infrakuivaimen ohjaus automaatiojärjestelmästä.



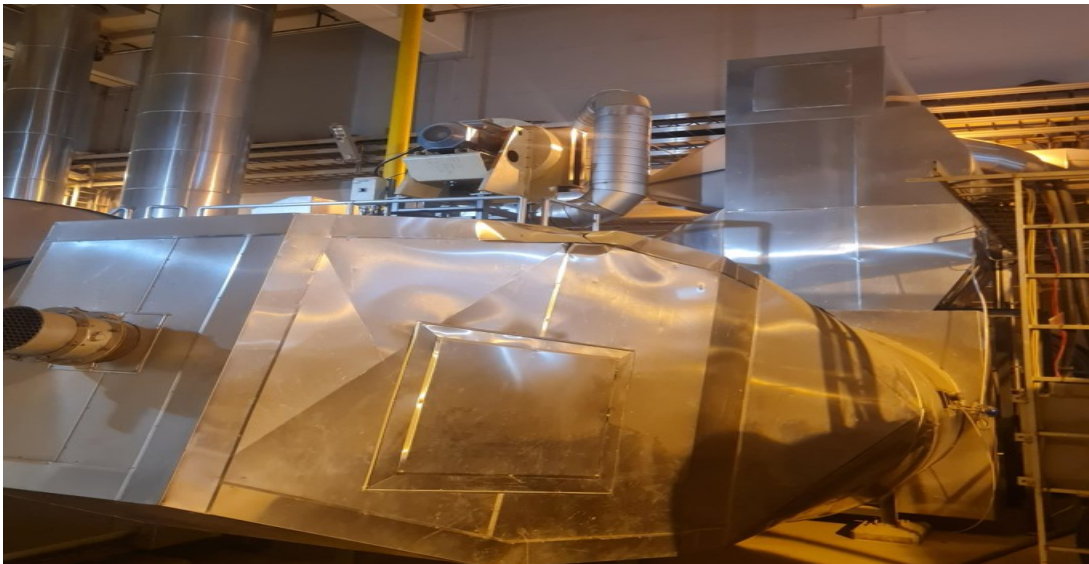
Kuva 42. Kaasuinfrakuivaimen ohjaus.

Polttoprosessia säädetään maakaasun säätöventtiilin, sekä puhaltimien kierrosnopeutta muuttamalla taajuusmuuttajien avulla. Poltinlohkoille syötettävää maakaasun määrää mitataan, jonka mukaan automaatiojärjestelmä säätelee sille asetetun palamissuhteen. Säädetävän palamisilman suhteen avulla voidaan polttoa ohjata mahdollisimman energiatehokkaaksi ja hallita hiilidioksidi päästöjä. Kuivaimella on käytettävän palamisilman suhde on 1,4 eli yli-ilmainen.

Kaasuinfrakuivaimien poistoilmasta osa syötetään infrakuivaimen kierrätyslinjaan, jonka avulla kuuma poistoilma kierrätetään takaisin poltinlohkoille. Kuumanpoistoilman avulla saadaan vähennettyä maakaasunkulutusta. Poistoilman lämpötila vaihtelee 100–120 asteen välillä. Loppu infrakuivaimen poistoilma poistetaan ulkoilmaan.

Sähköinfrakuivaimella on oma jäähdytysilma puhallin, jolla hallitaan infrakuivaimen sisäistä lämpötilaa. Infrakuivaimelta poistettava ilma poistetaan poistoilmapuhaltimen avulla. Sähköinfra kuivaimen poistoilma poistetaan suoraan prosessista ulkoilmaan, eikä kierrätetä erikseen muun prosessin lävitse. Poistoilman lämpötilaa ei mitata erikseen vaan ilman lämpötila tarkastettiin poistoilma kanavasta termoelementti mittauksella. Poistoilman lämpötila vaihtelee 80–115 asteen välillä.

Päällystyskoneen ilmakeivaimet käyttävät puhallinpolttimia, joiden polttoaineena on maakaasu. Polttoprosessissa palamis- ilma syötetään poltinhuoneen sisäilmasta puhaltimen välityksellä. Polttokammiossa ilma lämmitetään maakaasuliekin avulla haluttuun lämpötilaan. Kiertoilmapuhallin kierrättävät prosessista poistuvan ilman polttimen lävitse, puhaltimet ovat sijoitettuna ennen poltinta kyseessä on siis läpipuhallusjärjestelmä. Kuvissa 43 ja 44 nähdään yhden polttimen sijoitus poltintasolla, sekä polttimen maakaasun syöttö.



Kuva 43. Polttimensijoitus poltintasolla.



Kuva 44. Maakaasun syöttö polttimelle.

Kuivatusprosessista poistettava ilma poistetaan puhaltimen avulla. Osa poistoilmasta kierrätetään takaisin kiertoilma kanavaan, josta se syötetään maakaasu polttimen lävitse uudestaan kuivatusprosessiin.

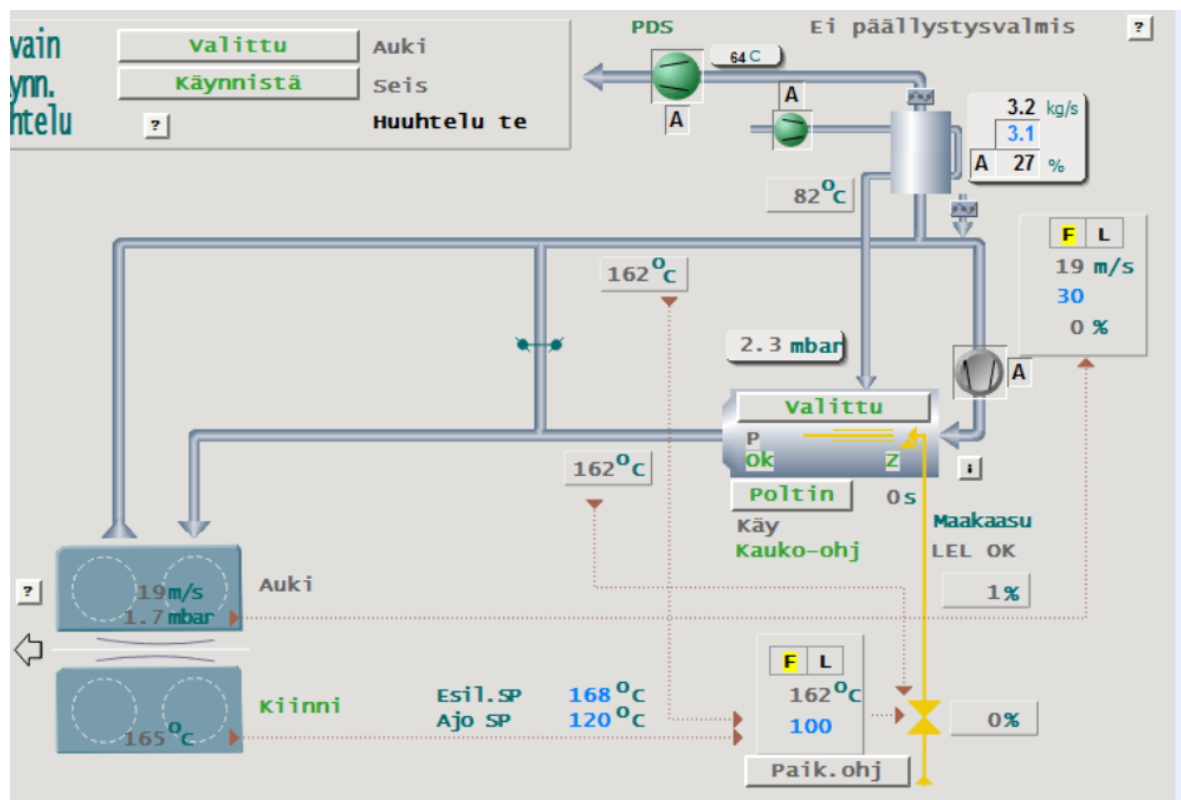
Kiertoilmakanavassa on lyhyt kierto toteutus, joka mahdollistaa muun muassa tuotantokatkoissa ilmankierrättämisen, ilman, että ilmaa syötetään ilmakeivaimelle sammuttamatta järjestelmää.

Poistoilma kierrätetään lämmönvaihtimen lävitse, jonka avulla polttimelle syötettävän palamisilman lämpötilaa saadaan nostettua ennen polttoprosessia. Lämmönvaihtimen avulla palamisilman lämpötila saadaan nostettua jopa 90–195 asteiseksi.

Lämmönvaihtimen jälkeen poistoilma poistetaan poistoilmakanavan kautta ulkoilmaan. Ilmakeivaimien poistoilman lämpötila vaihtelee 90–205 asteen välillä palamisilman lämmönvaihtimisesta huolimatta. Poistoilman määrä on noin 10–20 % kiertoilman määrästä. Palamisilman määrä riippuu poistoilman määrästä ja sillä korvataan prosessista poistuva ilmamäärä. Kaikkia prosessin puhaltimia ohjataan taajuusmuuttajilla, joilla pystytään asettamaan haluttu virtausnopeus puhaltimen pyörimisnopeuden muutoksilla.

Ilmakuivaimille syötettävän maakaasun virtausta mitataan kokonaisuudessaan jokaisen polttimen summana, eikä poltinkohtaisesti. Polttimen kaasun syötöstä löytyvän säätöventtiilin avulla kaasunvirtausta säädetään poltinkohtaisesti.

Koko kuivatusprosessia ohjataan automaatiojärjestelmästä, jonka avulla kuivaimia voidaan ohjata käsiohjauksella tai automaatio ohjauksella. Ohjaus valinnat ovat operaattorikohtaisia. Kuvassa 45. esitetään yhden ilmakuivaimen ohjaus.



Kuva 45. ilmakuivaimien ohjaus automaatiojärjestelmästä käsin.

Kuivatusprosessin ohjaavana suureena on paperin kosteus %, jota mitataan kuivatusosien jälkeisillä Paper IQ mittausjärjestelmällä. Asetetun kosteus tavoitteen saavuttamiseksi automaatio järjestelmästä ohjataan joko kuivatusprosessin lämpötilaa tai kuivatusilman virtausnopeutta.

9.1.2 Energiatehokkaampi säätöprosessi

Kaasuinfrakuivaimien palamisilman ollessa yli-ilmainen palamisilman määrää vähentämällä voitaisiin hieman parantaa polttoprosessin hyötysuhdetta entisestään.

Kuvan 35 mukaisesta hyötysuhdekuvaajasta voidaan päätellä, että pudottamalla palamisilmaeroa 1,4:stä 1,2:teen palamishyötysuhde parantuisi noin 5 prosenttia. Kaasuinfrakuivaimien maakaasun kulutus on keskimäärin 300 m³/h. Ilmanmäärää säättämällä säästövaikutus voisi olla noin 15 m³/h.

Päällystyskoneen mahdolliset vuosittaiset ajotunnit huomioituna kaasuinfrakuivaimen säästöpotentiaaliin kokonais- maakaasun kulutuksen vähentyminen olisi noin 99 600 m³.

Maakaasu käyttöisten infrakuivaimien poistoilman ollessa keskimäärin yli 100 C, sekä syötettävän palamisilman lämpötilan ollessa noin 22 astetta. Energiatohokkuuden kannalta kannattavaa lisätä poistoilma kanavaan ilma/ilma lämmönvaihdin, jonka lävitse palamisilma johdettaisiin ennen polttoprosessiin syöttöä.

Palamisilman lämmittäminen 80 asteiseksi vähentäisi lämmitykseen käytettävää polttotehoa noin 0,10 MW, joka on noin 5,5 % kaasuinfrakuivaimen huipputehosta. Tehon väheneminen suhteutettiin maakaasun energiasisältöön 36 MJ/m³.

Palamisilman lämmittäminen vähentäisi teoreettisesti maakaasun kulutusta noin 8,3 m³/h ja vuositasolla noin 54780 m³. Tehtaessa lämmönvaihdin molemmille kaasuinfrakuivaimille maakaasun vähentyminen vuositasolla olisi noin 109560 m³.

Ilma/ilma lämmönvaihtimelle laskettiin tarvittava palamisilman virtausmäärä, joka olisi 12,41 kg/s, sekä tarvittava lämmönsiirto pinta-ala, joka olisi 656 m².

Ilmakuivaimien maakaasun syöttöön ja säätöparametreihin voitaisiin tehdä muutos, jotta polttoprosessi pysyisi energiatehokkaana ja aiheuttaisi mahdollisimman vähän päästöjä. Polttoprosessiin lisäämällä poltinkohtaiset maakaasu mittaukset mahdollistaisivat polttoprosessin ilmakertoimen tarkan säätämisen, kuten kaasuinfrakuivaimissa.

Vaikka poistoilmavirtaukset lämmittävätkin jo ilmakuivaimien palamis- ilmaa on poistoilman lämpötila todella lämmintä. Koeajonaikana poistoilman loppulämpötilat vaihtelivat 90–205 asteen lämpötiloissa.

Poistuva ilma on kostea ja poistuvan ilman massavirran mukaisesti tämä vastaa noin 2–4,5MW lämpöenergiaa. Ilmakuivaimilla on yhteensä kaksi poistoilma kanavaa, voisi hukkalämpöenergiaa hyödyntää yhtä tai kahta prosessikohdetta.

Tässä diplomityössä pohdittiin kahta prosessikohdetta, johon hukkalämpöenergiasta voitaisiin lämmönvaihtimen avulla siirtää energiaa ja vähentää prosessikohteiden alkuperäistä energiankulutusta. Diplomityössä laskettiin, ilma/vesi lämmönvaihtimille, sekä ilma/öljy lämmönvaihtimelle tarvittavat virtausnopeudet, sekä kuinka suuren pinta-alan kyseiset lämmönvaihtimet tarvitsisivat.

Ensimmäinen hyödyntämis- kohde olisi päällystyskoneen lämpöinen prosessivesi, jonka varastosäiliö sijaitsee 2 kerrosta alempana poistoilmakanavoista. Päällystyskoneen vaihtelevan poistoilman lämpötilan vuoksi hukkalämpötilan tehona käytettiin kanavasta poistuvan ilman keskimääräistä lämpötilaa, joka oli noin 135 astetta.

Valmet Oy teki myös poistoilmaan liittyviä tarkasteluita, jolloin poistoilmakanavan kosteuspitoisuus saatiin määritettyä juuri 136,6 asteessa. Mittaushetkellä poistoilman ilmamäärä oli 9,4 kg/s, jonka kosteuspitoisuus oli 76 g/kg, kastepiste 47,7 ja teho kyseisenä mittaushetkenä 3,28 MW.

Lämmönvaihtimen laskennassa käytettiin Valmetin mittauksista todennettua tehoa 3,3 MW. Vedelle tarvittavaksi virtausnopeukseksi saatiin: 13,10 kg/s. Ilma/vesi lämmönvaihtimen tarvittavaksi lämmönsiirtopinta-alaksi saatiin 714,3 m².

Toisena hyödyntämis- kohteena oli diplomityössä käsitelty kuumaöljykattilan kuumaöljy. Kuumaöljykattilalle syötettävä paluuöljyn paisunta-astia sijaitsee samassa tasossa, kuin poistoilma kanavat, joten poistoilmaa voitaisiin hyödyntää kuumaöljyn esilämmittämisessä, ennen kuin se syötetään takaisin kattilaan.

Öljy-esilämmittimen laskennassa käytettiin hukkalämpötilan tehona 3,3 MW. Öljylle tarvittava virtausnopeus ratkaistiin edellä mainitulla kaavalla. Öljylle tarvittavaksi virtausnopeudeksi saatiin: 16,30 kg/s. Ilma/öljy lämmönvaihtimen tarvittavaksi pinta-alaksi saatiin: 758,1 m²

9.1.3 Vaihtoehtoinen kuivatustapa

Kirjallisuus lähteiden mukaan, jota myös UPM:n tutkimuskeskuksen tutkimukset tukevat infrakuivaimien kuivatusprosessin hyötysuhde on merkittävästi pienempi verrattuna

ilmakuivaimien hyötysuhteeseen muun muassa vuotoilmojen vuoksi. Koko kuivatusprosessin keskimääräinen kaasun kulutus on noin 1000 m³/h, josta infrakuivaimien osuus on 30 %.

Kuivaimien alhaisien hyötysuhteiden vuoksi diplomityössä selvitettiin, voisiko kaasuinfrakuivaimien roolia muuttaa kuivatusprosessissa.

Automaatiojärjestelmästä katsottuna infrakuivaimet ovat usein asetettuna manuaali ohjauksella huipputeholle. Syynä infrakuivaimien kovalle tehontarpeelle on ollut varmuus päällysteen nopealle kuivaukselle.

Toisena infrakuivaimien ohjaukseen liittyvänä tekijänä oli sähköinfran ajettavuus, profiloivasta ajosta huolimatta sähköinfrakuivaimen teho on usein säädettyä ainoastaan 15 % tasolle huipputehosta.

Vaihtoehtoisessa kuivatusmallissa selvitettiin voisiko päällysteaineen kuivauksessa vähentää kaasuinfrakuivaimien kuivatuskapasiteettia osittain tai kokonaan ja täten siirtää kuivatuskapasiteettia ilmakeivaimille. Kaasuinfrakuivaimien kapasiteetti muutoksiin tehtiin yhteensä kolme koeajoa.

Sähköinfrakuivaimen ohjaukseen liittyen tehtiin tehokoeajo, jolla selvitettiin mahdollinen maksimi kuivatuskapasiteetti sähköinfrakuivaimelle, sekä voisiko sähköinfrakuivaimella vähentää maakaasun kulutusta, ja täten ohjata infrakuivaimen käyttöä enemmän sähkömarkkinan hintaan mukautuvaksi kuivaimeksi.

Koeajojen päätteeksi vaihtoehtoiselle kuivatustavalla tehtiin ohjeet, jotta kyseistä ajomallia voitaisiin toteuttaa turvallisesti tulevaisuudessa.

9.1.4 Kaasuinfrakuivaimien koeajot

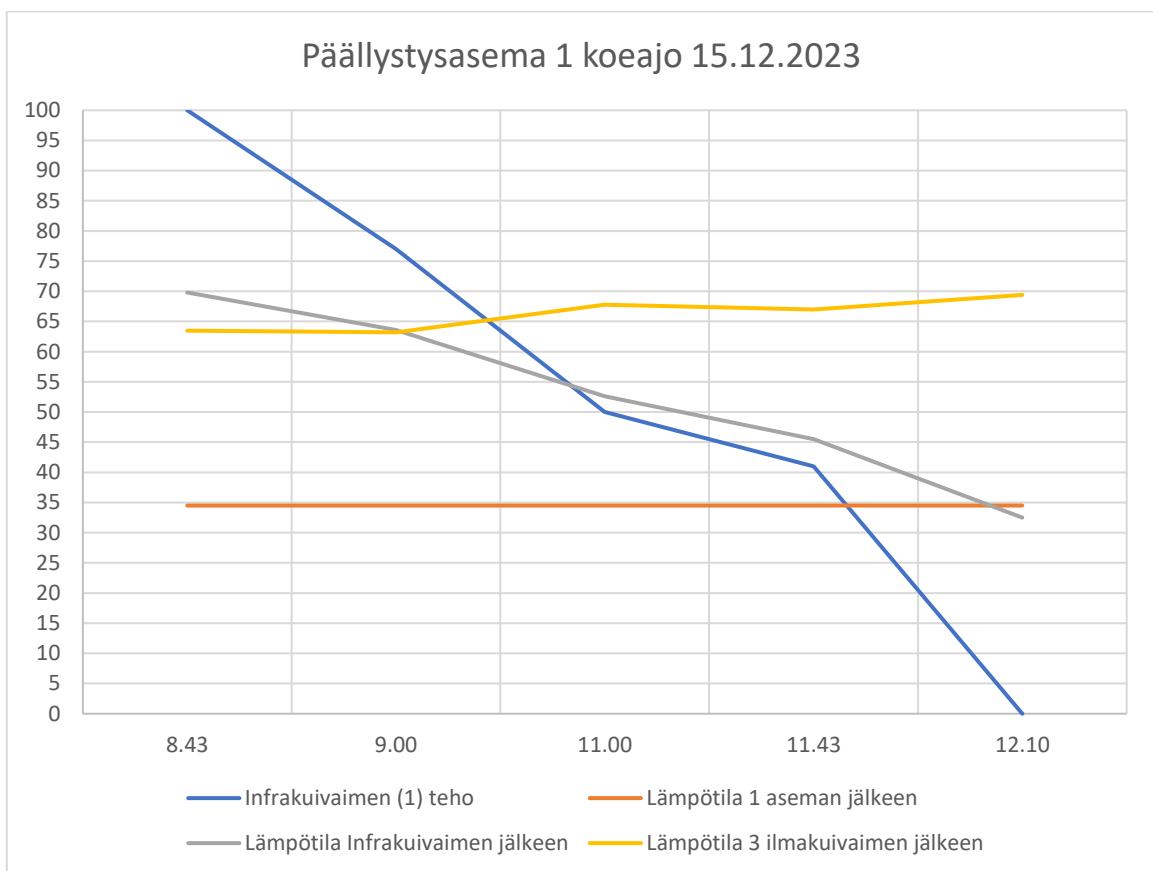
Vaihtoehtoiseen kuivatusprosessiin liittyvät koeajot suoritettiin joulukuussa 2023 – helmikuussa 2024 aikana.

Ensimmäinen kaasuinfrakuivaimien koeajo suoritettiin päällystyskoneen ensimmäisellä päällystysasemalla. Ensimmäisessä koeajossa infrakuivaimen tehoa laskettiin neljässä portaassa päällystyskoneen ollessa normaalissa tuotannossa. Infrakuivaimen tehomuutoksien

jälkeen prosessia ja siinä mahdollisesti syntyviä muutoksia seurattiin noin 20 minuutin ajan. Lopuksi infrakuivain sammutettiin kokonaan pois kuivatusprosessista.

Koeajoon liittyviä vaikutuksia seurattiin päällystyskoneella silmämääräisesti, sekä mittamalla paperiradan lämpötiloja infrapuna käyttöisellä lämpömittarilla.

Kuvassa 46 esitetään kuvaajien avulla ensimmäisestä koeajosta saadut mittaustulokset, josta voidaan todeta ilmakeivaimen 3 lämpötilan nouseminen infrakuivaimen tehonrajoituksen yhteydessä.



Kuva 46. Ensimmäisen koeajot mittaustulokset.

Prosessiin liittyviä säätömuutoksia seurattiin Valmet DNA automaatio järjestelmästä. Tuotannosta valmistuneista paperirullista otettiin näytekappaleet, josta UPM:n laboratorio teki analyysit, liittyen paperin painettavuuteen.

Koeajoon liittyviä riskejä oli tunnistettuna päällysteenirtoaminen paperista, sekä liian hidas päällysteen kuivaaminen. Päällysteaineen irtoaminen paperista aiheuttaisi paperin laatuun poikkeamia, likaisi päällystyskonetta tai ratakatkon. Liian hidas päällysteen kuivaaminen,

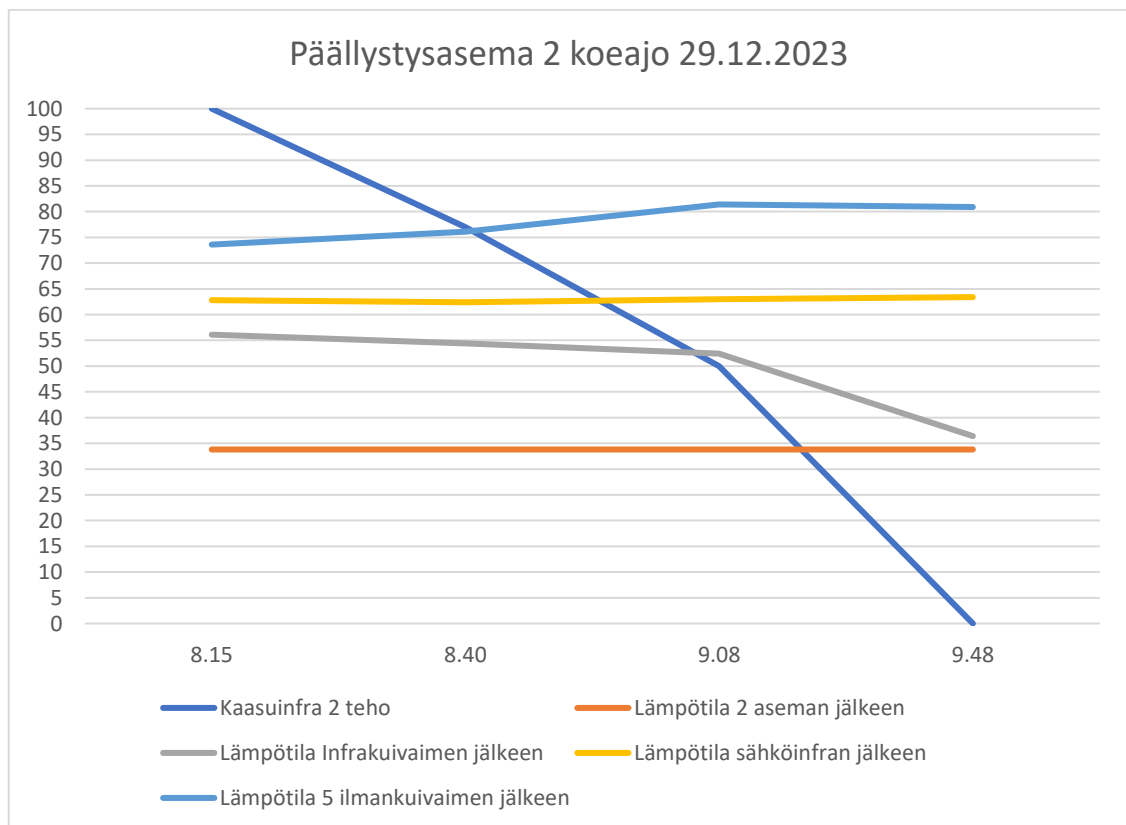
aiheuttaisi päällysten tarttumista vetotelaryhmän teloihin, sekä voisi aiheuttaa painettavuuteen ongelmia asiakasrullissa.

Koeajo onnistui visuaalisesti hyvin, eikä tuotannossa ilmentynyt laatuun vaikuttavia heikentäviä tekijöitä, kuten pölyämistä, päällysteen irtoamista tai päällystyskoneeseen liittyvää liikaantumisia.

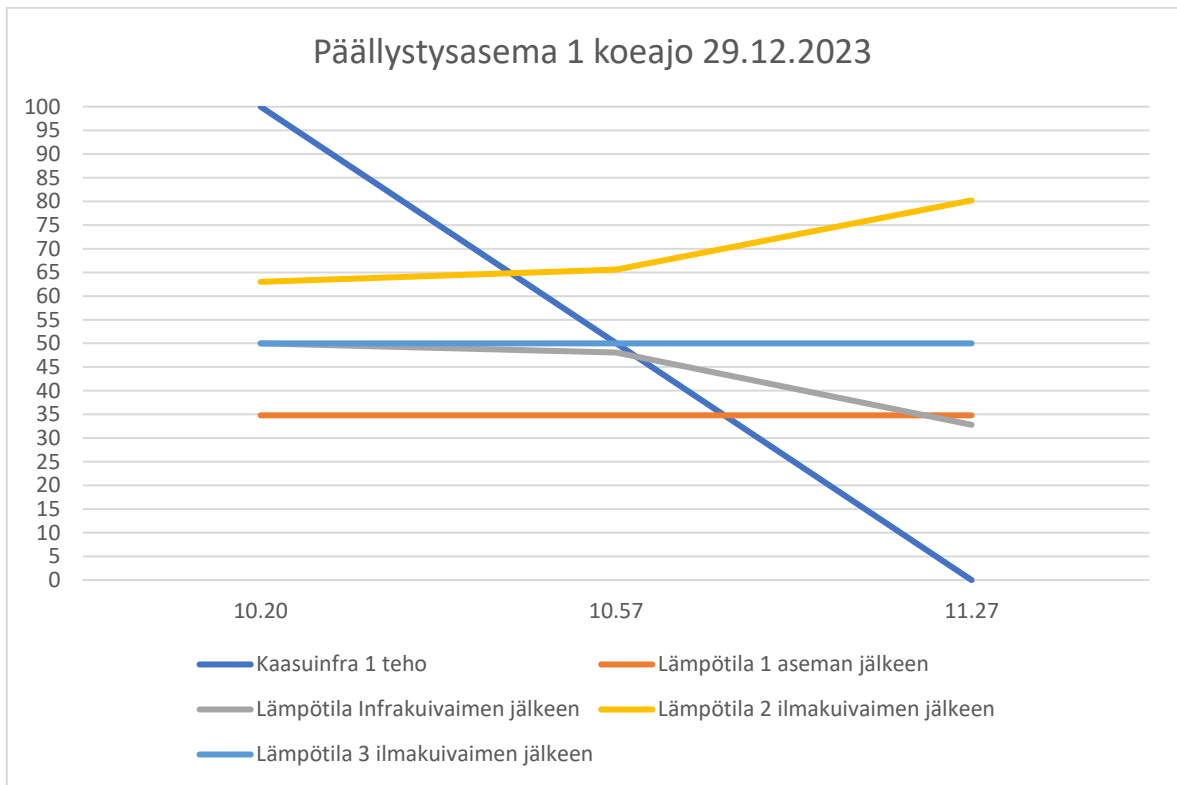
Ensimmäisen koeajon tuloksista voidaan päätellä, että infrakuivainta voidaan käyttää kuivatusprosessissa alhaisemmalla teholla tai kytkeä kokonaan pois ensimmäisellä päällystysasemalla tietyillä paperilaaduilla.

Seuraava koeajo toteutettiin kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa toistettiin ensimmäisen koeajo päällystysasema 2:lla. Toisessa vaiheessa myös päällystysasema 1:den koeajo toistettiin. Koeajon molemmat vaiheet onnistuivat visuaalisesti hyvin, eikä tuotannossa ilmentynyt laatuun vaikuttavia heikentäviä tekijöitä.

Kuvissa 47 ja 48 esitetään kuvaajien avulla koeajon ensimmäisen ja toisen vaiheen mittauksien tulokset. Myös toisen koeajon tuloksista voidaan todeta ilmakuivaimien 5 ja 2 lämpötilojen nouseminen infrakuivaimien tehoja rajoitettaessa.



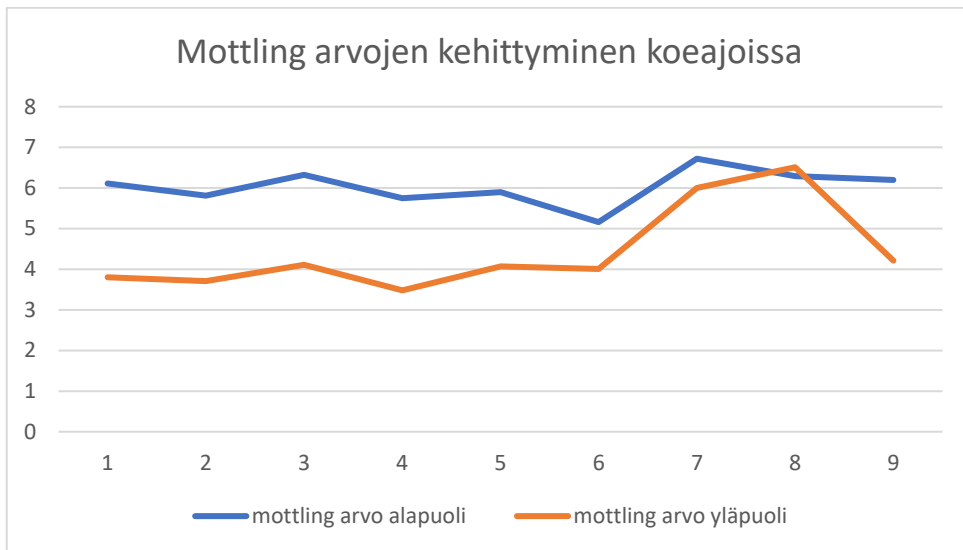
Kuva 47. Koeajon 2 vaihe 1 mittaustulokset.



Kuva 48. Koeajon 2 vaihe 2 mittaustulokset.

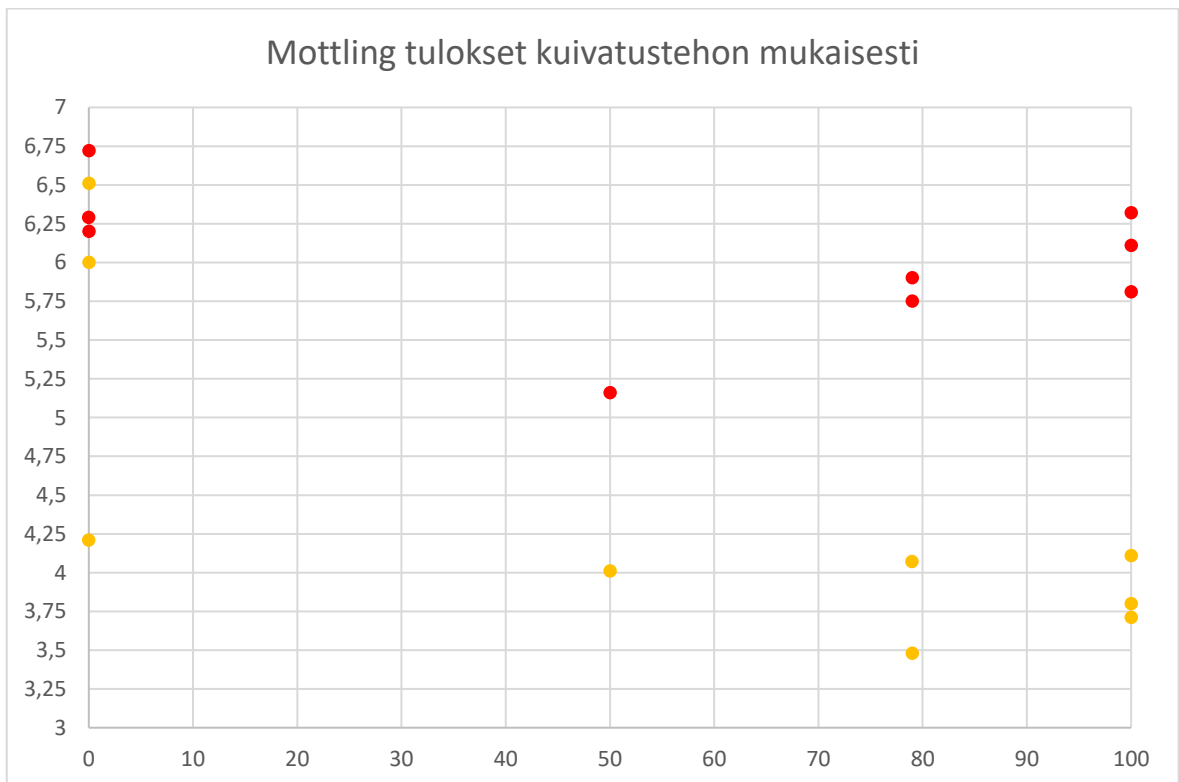
Kaikista koeajosta valmistuneista rullista tehtyjen laboratorio analyysien tuloksista huomattiin nousua paperin mottling arvossa, mutta arvo pysyi sallittujen arvojen sisällä. Kuvassa 49 esitetään mottling arvojen paperin kehittyminen koeaikojen aikana. Mittaukset ovat tehty paperin ylä- sekä alapuolelta.

Kuvaajan y-akselilta löytyvät mottling tulokset ja x akselilla näytemäärät. Näytteet 1–3 on mitattuna perinteisellä kuivatustavalla, näytteissä 4–6 infrakuivaimien tehot on rajoitettu 79–50 % kuivatusteholle ja näytteissä 7–9 infrakuivaimet ovat olleet sammutettuina.



Kuva 49. Mottling muodostuminen koeajoissa.

Mottling arvojen muutosta esitetään myös kuvan 50 pistekuvaajassa. Pistekuvaajan tarkoituksena on esittää näytteistä saatujen mottling arvojen esiintyminen infrakuivaimien tehon mukaisesti. Kuvaajan punaiset näytetulokset esittävät paperin alapuolelta otettuja näytteitä ja keltaiset esittävät paperin yläpuolelta otettuja näytteitä.



Kuva 50. Mottling tulokset infrakuivaimien tehon mukaisesti.

9.1.5 Sähköinfrakuivaimen koeajo

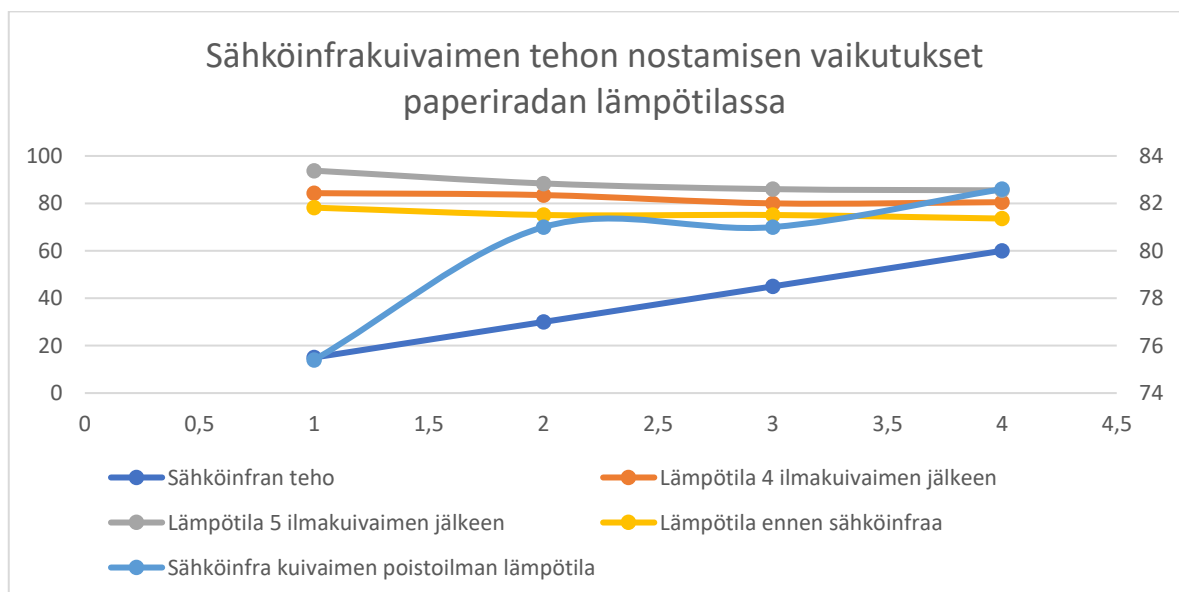
Kolmannessa koeajossa tutkittiin ensimmäiseksi sähköinfrakuivaimen kapasiteetin nostamista. Alkuperäisessä kuivatusprosessissa teho oli asetettuna 15 %, joka vastaa noin 0,460 MW tehoa.

Tuotannon operaattoreita haastateltaessa tehon valinnaksi kerrottiin, ettei infrakuivaimella voisi käyttää suurempaa tehoa. Infrakuivaimen tehoa lähdettiin nostamaan 15 %: n asteilla ja ensimmäinen koeajo jouduttiinkin keskeyttämään 35 % kohdalla infrakuivaimen lämmitysmoduulin ylikuumentumisen vuoksi.

UPM:n sähkö ja automaatio kunnossapito tarkasti kuivaimen ja löysivät sen heijastinfolioista reikiä, jonka vuoksi kuivaimen halogeeni valaisimen tuottama lämpöenergia johtui infrakuivaimen mitta-antureihin.

Kunnossapito suoritti kuivaimelle huollon, jonka jälkeen tehokoe uusittiin. Uudessa koeajossa päästiin tasolle 60 % asti, joka vastasi noin 1,8 MW tehoa. Tämän jälkeen lämpötila mittaukset nousivat lähelle kuivaimen hälytysrajoja, eikä tehoa nostettu enempää mahdollisten laite tai laatu poikkeamien vuoksi.

Paperiradasta tehdyistä lämpötilamittauksista huomattiin, että paperiradan lämpötila laski 3–8 astetta ilmakeivaimien jälkeen ja nousi noin 8 astetta infrakuivaimen jälkeen. Koeajoista saadut mittaustulokset esitetään kuvassa 51.



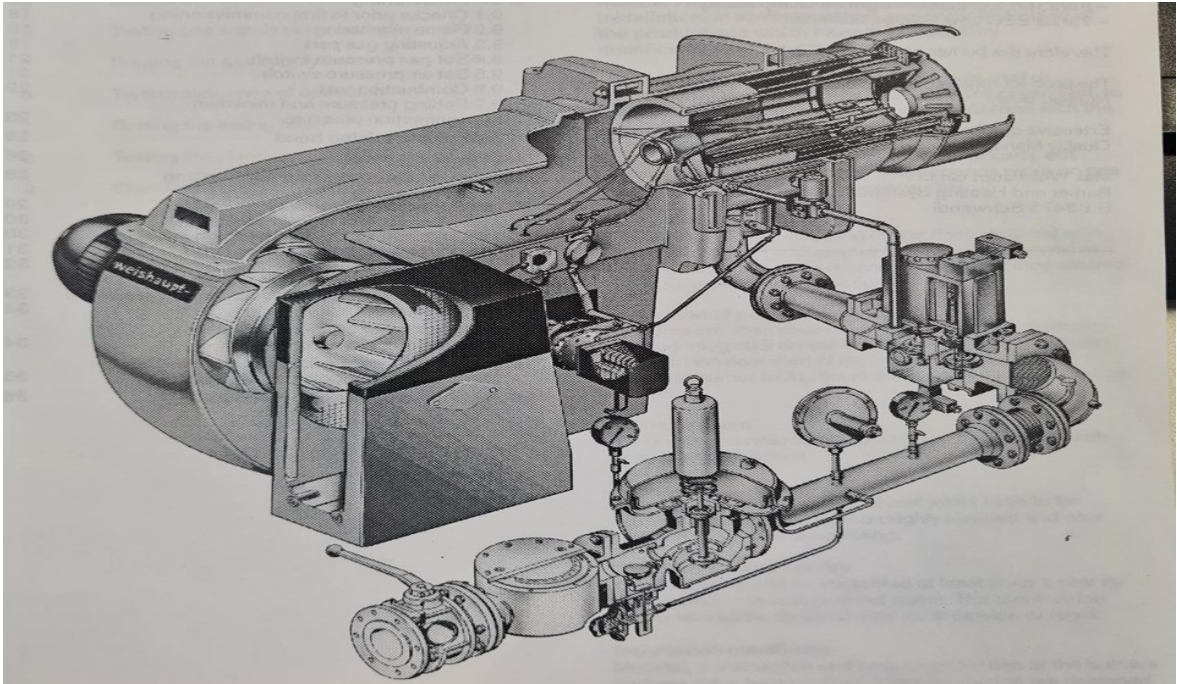
Kuva 51. Sähköinfran kapasiteetin vaikutus paperiradan lämpötilaan.

Koeajossa saatiin selvitettyä, että sähköinfrakuivaimen tehoa nostamalla voidaan vaikuttaa ilmakeivaimien 4 ja 5 kiertoilmanlämpötilaan. Koeajon aikana molempien ilmakeivaimien kiertoilmanlämpötilat yhteensä noin 50 astetta. Laskemalla lämpötilan muutos ilmakeivaimen syöttöilman virtausmäärän ja kuivan ilman lämpökapasiteetin mukaan muutokset tehona vastaa 1,11 MW ja 1,00 MW päällystysaseman ilmakeivaimien kiertoilman teho laskee yhteensä siis 2,11 MW.

Maakaasun osittainen korvaaminen sähköenergialla mahdollistaisi infrakuivaimen yksikkösäätimen muuttamisen kustannus tehokkaammaksi. Uuden säätimen tarkoituksena olisi hyödyntää sähkömarkkina hintoja ja ohjata kuivatusprosessia aina kustannustehokkaamman energianlähteen mukaiseksi. Kuivatustavassa voitaisiin myös tulevaisuudessa käyttää korkeampaa kuivatuskapasiteettia sähköinfrakuivaimella ja sähköenergian hintapiikkien aikana laskea kuivaimen tehoa.

9.2 Kuumaöljykattilan tarkastelu

Kiillotuskalanterissa olevien neljän termotelan lämmönsiirtoaineena käytetään Mobiltherm 605 kuumaöljyä, jota lämmitetään kuumaöljykattilassa 6.1 MW puhallinpolttimella. Polttimen polttoaineena käytetään maakaasua. Kuvassa 52 nähdään kattilan käyttämä maakaasupoltin. Kuumaöljykattilaa liittyvässä tutkimuksessa vuonna 2019 polttimen hyötysuhteeksi on määritetty 87–90 % (Savurinne, 2019, 30).



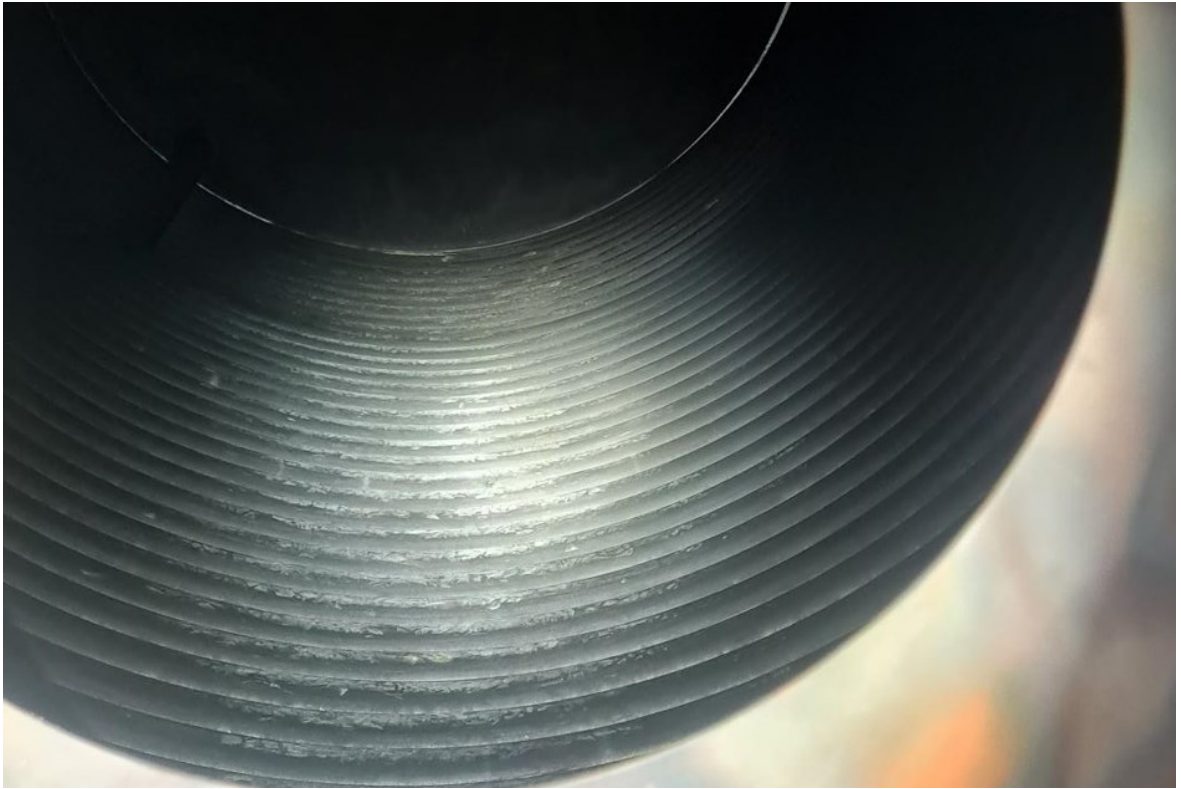
Kuva 52. Kuumaöljykattilan käytössä oleva maakaasupoltin.

Kalanterin lämmitysjärjestelmää lähdettiin tutkimaan aikaisempien käyttötarkastuksien, sekä polttimen huoltoraporttien vuoksi. Kattilan lämmönlähteen vaihtamista höyryyn on myös tutkittu aikaisemmin vuonna 2019.

Kuumaöljykattilan vuonna 2023 suoritetun käyttötarkastuksen yhteydessä kattilan sisäpuolisissa kierukoissa esiintyi todella voimakasta likaantumista. Likaantumisen syyksi epäiltiin ali-ilmaista polttoprosessia tai mahdollista öljyvuotoa lämmityskierukassa.

Käyttötarkastuksen yhteydessä suoritettiin myös kattilan painekoe, jossa kattilan kierukat paineistettiin 1,5 kertaisella ylipaineella. Onnistunut painekoe poissulki kierukan vuotoon liittyvän epäilyn, ja kattilan polttoprosessia lähdettiin tutkimaan tarkemmin. Kattilalle viimeisin puhtaanapitoon liittyvä imurointi on tehty tammikuussa 2023.

Helmikuussa vuonna 2024 kattilan poltinhuollon yhteydessä kattilan sisemmän kierukan puhtaus tarkastettiin. Tarkastuksessa huomattiin kierukan pinnassa likaantumista, muttei yhtä voimakasta likaantumista, kuin vuonna 2023. Kuvassa 53 nähdään kattilan sisempi kierukka kattilan palotilasta nähden.



Kuva 53. Kierukan puhtauden tarkistaminen vuonna 2024.

Kattilan ohjaus on toteutettuna Valmet DNA automaatiojärjestelmän, sekä kuumaöljykattilan Aura GmbH:n ohjauslogiikan avulla. Valmet DNA automaatiojärjestelmän kautta kattilan ohjauslogiikalle annetaan lämmityslupa, muuten kattilan ohjaus toteutetaan kokonaisuudessaan kattilan omalla ohjaimella. Ohjain noudattaa sille määritettyä turvalogiikkaa, jonka ehdot tulee täyttyä, jotta kaasupoltin voidaan sytyttää. Turvalogiikan ehtoina ovat:

1. Liekinvalvonta
2. Kaasunpaine minimi 45 mbar
3. Palamisilmanpaine minimi 9 mbar
4. Savukaasunlämpötila yläraja 340 C.

Kattilan teho määritetään kierrätyspumpun massavirran ja kattilalta lähtevän ja tulevan öljynlämpötilaerotuksen sekä kuuma öljyn ominaislämpökapasiteetin avulla. Poltinta ohjaa kattilan kuuma öljyn lämpötila mittaukset, ja logiikan lämpötilaeron asetusarvo.

Kattilalta lähtevä kuuma öljy syötetään kiertopumpun avulla ensiö ja toisiolämmityspiiriin. Ensiöpiirissä lämmitetään termotela 1–2 ja toisiopiirissä termotelat 3-4.

Molemmat lämmityspiirit ovat identtiset, jossa kuumaöljyn lämpötilaa voidaan laskea öljy/vesi lämmönvaihtimen avulla. Lisäksi termoteloilla kiertävän öljynlämpötilaa säädetään ainoastaan tarvittaessa lisäämällä kattilalta tulevaa öljyä, toisin sanoen kattilan ja termotelojen lämmityspiirit ovat suljettuja, jos teloilla ei ole lämmitystarvetta.

Lämmitystarpeen tullessa järjestelmän automaattiventtiilit yhdistävät piirit, jolloin kuumaa öljyä lisätään termoteloja kiertävään öljypiiriin, tämän jälkeen kierto öljy palautuu paisuntaastian kautta kattilalle.

Prosessia tarkasteltaessa suurimpana huomiona oli kattilan polttimen ohjaaminen. Kattilan poltin käy usein ainoastaan osakuormalla, sen suuren kokonsa vuoksi. Kattilan keskimääräinen teho on automaatiojärjestelmän historian mittausdatan mukaan noin 1,5 MW, joka on ainoastaan 24 % huipputehosta.

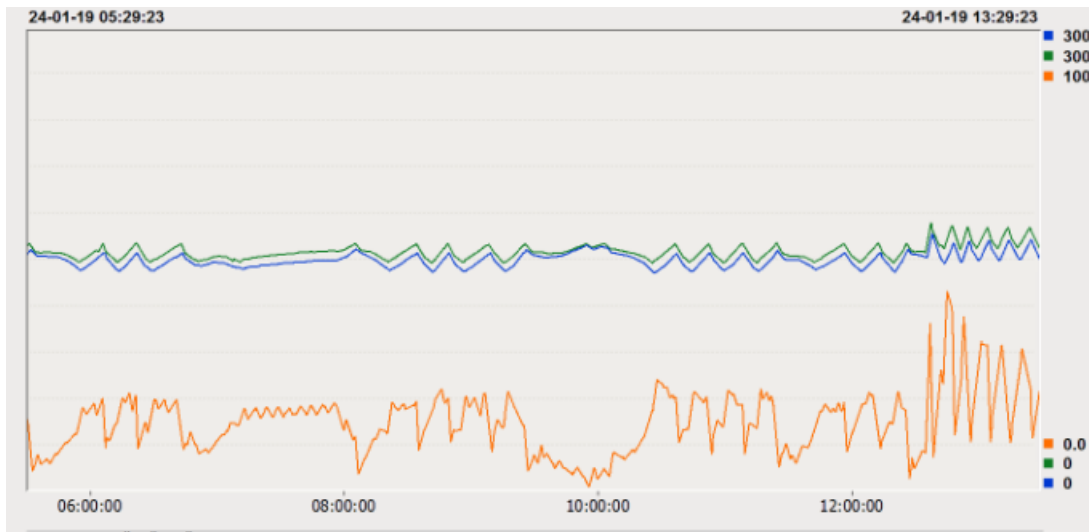
Pienen kuorman vuoksi polttimen palamis- ilmasäädin ei juurikaan reagoi polttimen toimintaan vaan pysyy 0 tai 1 asennossa. Poltin ei myöskään suuren kokonsa vuoksi käy pitkään, eikä saavuta tasaista kuormaa. Kuvassa 54 esitetään kattilan ajotapaa energiankäytön muodossa, kuvasta voidaan todeta kattilan epätasainen kuormitus.



Kuva 54. Kattilan epätasainen kuormitus.

Toisena prosessin huomiona oli kattilan lähtevän öljyn ja palaavan öljyn lämpötila erot. Poltin reagoi pieneen lämpötilaeroon ja käynnistää polttimen jo noin 5 asteen lämpötilaeron jälkeen.

Lisäksi kattilan ja polttimen ohjauslogiikka ei huomioi ensiö ja toisiopiirissä tapahtuvia muutoksia. Kuvassa 55 esitetään kattilan epätasainen kuormitus, sekä kattilalta lähtevän ja palaavan öljyn lämpötila mittaukset.



Kuva 55. Kattilan kuormitus, sekä lämpötilamittaukset.

Tutkimuspäivänä kattilan lähtevän öljyn lämpötila oli 170 astetta ja palaavan öljyn lämpötila oli noin 165 astetta. Kattilan poltin kävi koko tutkimuksen ajan osakuormalla.

Termotelojen lämpötilat olivat asetettuna 80 asteeseen eikä ensiö ja toisiopiirissä ollut lämmitys tarvetta. Kiertoöljyn kiertäessä kuitenkin ensiö ja toisiopiirin kautta, jäähdytysvesiventtiilit viilensivät öljyä hieman ennen paluuta takaisin kattilaan. Kattilan poltin kävi koko tutkimuksen ajan eli yhden 8 tunnin vuoron ajan, vaikka termoteloilla ei ollut lämmitykselle tarvetta.

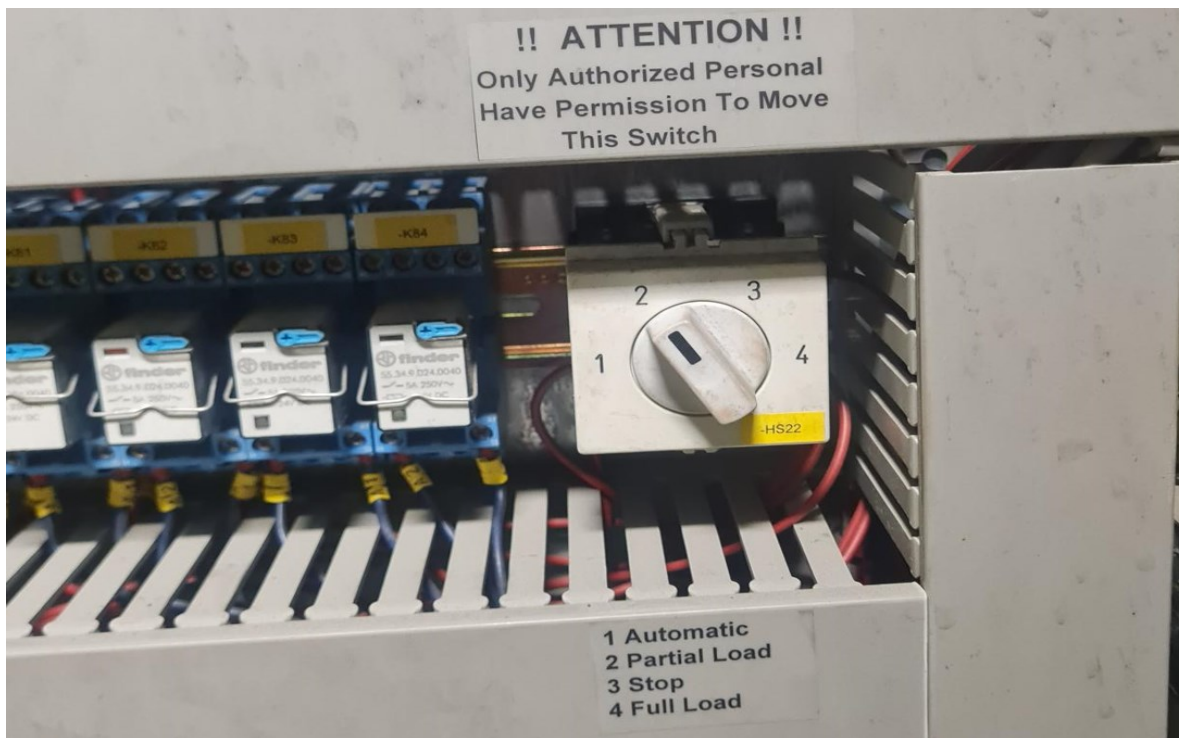
Tutkimuksessa selvisi myöhemmin, että kattila tarvitsee aina käynnistää ja sammuttaa paikallisesti kattilahuoneesta, ja täten operaattori jättää sen yleisesti käyntiasentoon. Jatkossa operaattoreiden tulisi kiinnittää enemmän huomiota kattilan, sekä telaston lämmitystarpeisiin. Operaattoreiden tulisi reagoida enemmän ns. kattilan tyhjäkäynteihin ja sammuttaa kattila, jos lämmitystarpeita ei ole.

Diplomityön aikana polttimelle tehtiin määräaikais- huolto. Huollossa ei löydetty normaaliin huoltoon kuulumattomia poikkeamia, mutta huollon yhteydessä päätettiin suorittaa savukaasu analyysi kattilan käynnistysvaiheessa. Savukaasu analyysissä poltin käynnistettiin paikallis- kytkimestä. Kuvasta 50 nähdään kattilan ohjauspaneeli ja paikallis- kytkimet.



Kuva 56. Kattilan paikallis- ohjaus.

Polttimen kuorma asetettiin käsiohjauksella osakuormalle, sekä täydelle kuormalle, jotta palamisilman säädin voitaisiin säätää molemmille kuormille. Kuvassa 57 nähdään polttimen kuormanvalitsin ohjauskaapissa.



Kuva 58. Kattilan Kuormanvalitsin.

Savukaasu analyysissä selvisi, että savukaasun seassa on muun muassa häkää, sekä hapen määrä poltossa on normaalia suurempaa. Polttimen ilmasäätimessä olevien säätöruuvien

avulla säädettiin polttimen palamisilma suhdetta. Palamisilman säätimen rakenne on esitettyä kuvassa 59.



Kuva 59. Polttimen palamisilmansäädin.

Säätöjen avulla savukaasusta saatiin poistettua häikäpitoisuudet, mutta happipitoisuus liikkui voimakkaasti mittauksessa. Polttimen ilmasäädintä tutkittiin lisää, ja sen kääntöakselista löydettiin vaurio, joka aiheutti happipitoisuuden heilunnan.

Säätimen kääntöakselin huollolle sovittiin jatkotoimenpiteet huoltoyhtiön kanssa. Säätimen kääntöakseli saatiin korjattua 28.2.2024, jonka jälkeen savukaasu analyysi uusittiin, ja polttoprosessi saatiin säädettyä energiatehokkaammaksi.

10 Johtopäätökset

Tämän diplomityön tarkoituksena oli etsiä uusia toimintatapoja, sekä mahdollisia energiatehokkuuteen vaikuttavia kohteita päällystyskoneen tuotantolinjalla. Energiatehokkuuden avulla voidaan vaikuttaa olennaisesti paperin kustannuskilpailukykyyn tulevaisuudessa.

Työn aihe oli mielenkiintoinen ja todella laaja. Laajuuden vuoksi energiatehokkuuden parantamiseen liittyen ehdotuksia rajattiin hukkalämpöenergian hyödyntämisessä ainoastaan lämmönvaihtimiin, jotta työnosuus ei kasva liian suureksi. Tulevaisuudessa hukkalämpöenergian hyödyntämistä voidaan siis tarkastella myös muilla vaihtoehdoilla, kuin tässä työssä on esitettyä.

Vaikka alkuperäinen kokoonpano on yli 20 vuotta vanha on alkuperäisessä kokoonpanossa huomioituna energiatehokkuus. Kokoonpanossa on huomioitu muun muassa palamis- ilman säätimien, kierrätysprosessien ja lämmöntalteenoton johdosta. Suuren kapasiteetin johdosta pienien muutosten avulla voidaankin vaikuttaa merkittävästi polttoaineen kulutukseen.

Työn suorituksena omat haasteensa antoi myös vuoden 2023 markkinatilanne metsäteollisuudessa, jonka vuoksi tuotantoa oli jouduttu rajoittamaan tuotantolinjalla. Tämän vuoksi koeajot keskitettiin enemmän paperilajeihin, joissa päällystemäärät ovat tuotantolinjan alhaisimmat kokonais- päällystys kapasiteetista. Haastavien tilausmääräin takia koeajojen pituuksia ja määriä jouduttiin sopeuttamaan tilauskannan mukaiseksi. Työssä esitettyjä kuivatustapoja olisi hyvä tarkastella myös tulevaisuudessa korkeammilla päällystemäärillä päällystettyjen paperilaatujen tuotannossa.

Haastavista tilauskannoista huolimatta tässä diplomityössä pääsimme asetettuun tavoitteeseen ja löysimme useita energiatehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä. Tutkimuksissa löysimme prosessin säätöön liittyviä tekijöitä, joilla on mahdollista parantaa tuotantolinjan energiatehokkuutta säätämällä käytössä olevaa laitteistoa, ilman uusia laiteinvestointeja. Investointeja vaatimattomilla toimenpiteillä on mahdollista säästää maakaasua vuositasolla noin 4 %, joka on vastaa noin 183 680 m³ maakaasua.

Vaihtoehtoisen kuivatustavan koeajoista saimme positiivisia tuloksia, joiden avulla päällystyskonelinjalla voidaan tulevaisuudessa hyödyntää tutkimustuloksia mahdollisten kuivatustapamuutoksien johdosta. Vaihtoehtoisen kuivatustavan etuina onkin sovelluttaminen

tulevaisuudessa paperilaji kohtaiseksi. Kuivatustapa tarvitseekin vielä lisää koeajoja muilla tuotantolinjalla tuotetuilla paperilaaduilla, jotta se saadaan tarvittaessa optimoitua kattamaan kaikki tuotetut paperilaadut.

Vaihtoehtoisella kuivatustavalla on myös suurin säästöpotentiaali maakaasun kulutuksessa. Koeajotilanteissa maakaasun kulutus oli noin 30 % koko päällystyskoneen käyttämästä kuivatusenergiasta, joka oli koeajojen yhteydessä 300 m³n/h. Kuivatustapamuutokset eivät myöskään tarvitse investointeja, vaan automaatiojärjestelmään lisättiin koeajojen yhteydessä ohituksiin tarvittavat muutokset.

Sähköinfrakuivaimen kapasiteetin nostoa suositellaan myös vaihtoehtoisen kuivatustavan lisäksi. Infrakuivaimen kapasiteetin nostoon liittyvät koeajot suoritettiin kuivatuskapasiteetin ollessa maksimi kuormituksella ja koeajojen tulokset olivat positiivisia. Infrakuivaimen kapasiteettia nostettaessa olisikin hyvä tulevaisuudessa seurata myös alemman kuivatuskapasiteetin hyödyt. Maakaasun tasaisen hinnan vuoksi sähköinfrakuivaimelle olisikin hyvä asettaa ainoastaan sähköenergian hinnalle maksimi raja, milloin kuivaimen tehoa rajoitettaisiin. Lyhyen koeajon vuoksi sähköinfran kapasiteetin nostoon liittyen ei voida ottaa kantaa lisääntykö kuivaimen kunnossapidolliset tarpeet, joita tulee myös tulevaisuudessa huomioida.

Vaikka alkuperäisessä kokoonpanossa hukkalämpöenergiaa hyödynnetään palamisilman lämmittämässä huomattiin, että prosessissa on vielä potentiaalista hyödynnettävää lämpöenergiaa, joita kannattaa tulevaisuudessa huomioida. Tässä työssä tarkasteltavien lämmönvaihtimien suurten lämmönsiirtopinta-alojen vuoksi tulevaisuudessa olisi kannattavaa myös tarkastella muita hukkalämpöenergian hyödyntämiseen soveltuvia laitteistoja.

Jatkotoimenpiteinä ehdotan, että tuotantolinjalla aloitetaan energiatehokkuuden parantamiseen liittyvät toimenpiteet investointeja vaatimattomissa kohteissa, kuten kaasuinfrakuivaimine palamisilma suhteiden säätämällä.

Toisena jatkotoimenpiteenä ehdotan, että vaihtoehtoista kuivatustapaa laajennetaan kaikille tuotantolinjalla tuotetuille paperilaaduille diplomityössä tehdyn kuivatustapaohjeen mukaisesti. Vasta koko tuotantokapasiteetin kattavan koeajojen jälkeen prosessista syntyvät hukkalämpöenergiat olisivat huomioitava uudelleen. Esimerkiksi kaasuinfrakuivaimien käyttökapasiteetin pienentyessä infrakuivaimille ehdotettujen palamisilman lämmönvaihtimista saatava hyöty supistuu merkittävästi. Prosessin ajotapa muutosten takia en suosittelen

jatkamaan lämmönvaihtimien kannattavuus hanketta ennen kuin vaihtoehtoisen kuivatustavan lopulliset tulokset valmistuvat.

Kuumaöljy kattilan energiatehokkuuteen voidaan tulevaisuudessa vaikuttaa merkittävästi operaattoreiden prosessin seuraamiseen liittyvällä aktiivisuudella. Vuorokohtaisen tyhjäkäynnin maakaasun kulutus oli järjestelmän mukaan jopa 2500 m³ maakaasua. Automaatiojärjestelmän ja tuotannosuunnittelu järjestelmän poikkeavaisuuksien vuoksi vuositason tyhjäkäynnin kulutusta ei voitu arvioida, mutta automaatiojärjestelmään lisäämällä kalanterrilla vuodessa tuotetun paperin ajomäärät tunteina voitaisiin tyhjäkäyntien osuus selvittää vuositasolla.

Kattilan liian suuri poltin prosessin tarvitsemaan lämpötehoon liittyen aiheuttaa tulevaisuudessaakin omat haasteensa. Polttoprosessia haluttaessa tasaisemmalle kuormalle, olisi pienempää poltinta tarkasteltava. Nykyiselle polttimelle tehdyistä toimenpiteistä huolimatta säätöprosessia ei saatu tasaiseksi.

Kuumaöljyn lämmitykseen liittyen olisikin tulevaisuudessa järkevää tarkastella onko kyseinen lämmitystapa korvattavissa, muilla lämmitysmuodoilla, joissa voitaisiin samalla hyödyntää päällystyskoneen kuivatusprosessin hukkaenergiälämpövirtauksia.

Lähteet

Aura GmbH <http://www.aurachina.com/en/judge.php?id=23>

Erityyppiset lämmönsiirtimet https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/107660/sini-vuori_mika.pdf?sequence=1

Hiilineutraalisuus [verkkoaineisto] [viitattu 20.01.2024] Saatavissa: <https://www.euro-parl.europa.eu/topics/fi/article/20190926STO62270/mita-hiilineutraalius-tarkoittaa-ja-miten-se-saavutetaan-2050-menessa>

Hägglom-Ahnger U and Komulainen P (2001) Paperin ja Kartongin Valmistus. Helsinki: Opetushallitus 279 s.

Jokilaakso A (1987) Virtaustekniikan, lämmönsiirron ja aineensiirron perusteet. Hämeenlinna: Tekijä ja Otakustantamo 191 s.

Karlsson M. (2010) Papermaking Part 2, Drying. Helsinki. Paperi ja Puu Oy. 643 s. [verkkoaineisto] [Viitattu 18.01.2024] Saatavissa: https://forestbiofacts.com/wp-content/plugins/pdf-poster-pro/pdfjs/web/pviewer.php?file=https://forestbiofacts.com/wp-content/uploads/2020/11/VOL9_P1.pdf&download=false&print=false&side=true&open=false

KnowPap (2023): Paperinvalmistuksen oppimisympäristö [verkkoaineisto] [viitattu 26.09.2023] Saatavissa: <http://www.knowpap.com/>

Kothandaraman C. (2006) Fundamentals of Heat and Mass transfer. New Age international Ltd. 729 s.

Kuumaöljykattilat <https://www.hansapower.fi/kuumaoljykattilat/>

Kvick K. (2022). Kartonkikoneen kuivatusosan tehostaminen simulointiohjelmalla. [verkkoaineisto] [viitattu 05.01.2024] Saatavissa: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/164474/diplomityo_kvick_kaisa.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Käytönvalvoja- ja käytön valvonta [verkkoaineisto] [viitattu 26.09.2023] Saatavissa: <https://hotoil.fi/wp-content/uploads/2019/04/TUKES-kuuma%C3%B6ljy-1.pdf>

Maakaasunkäsikirja 2023. [verkkoaineisto] [viitattu 16.12.2023] Saatavissa: <https://tu-kes.fi/documents/5470659/63219859/Maakaasuk%C3%A4si-kirja,+k%C3%A4yt%C3%A4nn%C3%B6n+toimintaan+liittyv%C3%A4%C3%A4+oh-jeistusta+ja+maakaasutekniikkaan+liittyvi%C3%A4+kysymyksi%C3%A4.pdf/29aa322e-fda6-7855-61c4-587c8a4ccda9/Maakaasuk%C3%A4si-kirja,+k%C3%A4yt%C3%A4nn%C3%B6n+toimintaan+liittyv%C3%A4%C3%A4+oh-jeistusta+ja+maakaasutekniikkaan+liittyvi%C3%A4+kysymyksi%C3%A4.pdf?version=1.0&t=1614670827029&download=true>

Metsäteollisuuden työnantajaliitto (vuosi) Puusta paperiin M-120 Prosessin ohjaus. Helsinki: Metsäteollisuuden työnantajaliitto 109 s.

Mitä kuumaöljy on? [verkkoaineisto] [viitattu 26.09.2023] Saatavissa: <https://hotoil.fi/kuumaoljy/mita-kuumaoljy-on/>

Naukkarinen J (2015) What engineerin scientists know and how they know it [verkkoaineisto] [viitattu 08.01.2024] Saatavissa: https://cris.tuni.fi/ws/portalfiles/portal/4265046/naukkarinen_1344.pdf

Paltakari J. (2009) Pigment coating and surface sizing of paper. Helsinki. Paperi ja Puu Oy. 615 s.

Parpala K (1976) Paperin Valmistus. Porvoo: Werner Söderström Osakeyhtiöt. 258 s.

Parpola A and Åberg V (2004). Kaasua! Helsinki: Edita Prima Oy 127 s.

Raiko R, Kurki-Suonio I, Saastamoinen J and Hupa M (1995). Poltto ja Palaminen. Jyväskylä: Teknillisten Tieteiden Akatemia 629 s.

Rajendra Karwa. (2020) [verkkoaineisto] [viitattu 08.01.2024] Saatavissa: [Heat and Mass Transfer | SpringerLink](#)

Savurinne P. (2019). Kalanterin kuumaöljykattilan optimointi. [Verkkoaineisto] [viitattu 06.01.2024] Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/340392/pekko_savurinne.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Seppälä A, Markku J. Lampinen. (2004) Aineensiirto-oppi. Helsinki 219 s.

Sepsilva Ltd Oy (1999) Paperikoneet yleistä. Helsinki 200 s.

Smil V (2015) Maakaasu kohti kestävämpää energiataloutta. Tallinna: Gaudeamus Oy. 328 s.

Termodynamiikka ja lämmönsiirto [verkkoaineisto] [viitattu 26.12.2023] Saatavissa: https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1386307/mod_resource/content/1/LAMMON-SIIRTO4.pdf

Vastuullisuustavoitteet [verkkoaineisto] [viitattu 20.01.2024] Saatavissa: <https://www.upm.com/siteassets/documents/responsibility/1-fundamentals/upm-vastuullisuustavoitteet-2019.pdf>

Vuorinen A (2009) Energiankäyttäjän käsikirja. Espoo: Ekoenergo Oy 204 s.

World energy outlook 2022 [verkkoaineisto] [viitattu 29.09.2023] Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022#previous-editions>

Liite 1. Kuumaöljykattilan poltinhuolto 2023



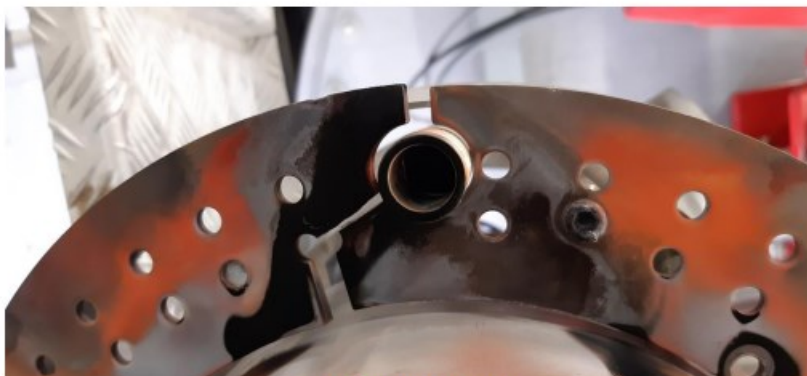
Huoltoraportti
17.5.2021 Päivitetty
19-20.1-2023

UPM Kymi kuumaöljykattilan kaasupoltin 8522 7201

Poltin: Weishaupt G60/2-A
Malli: ZM
Valmistusno: 5002730
Valmistusvuosi: 2001
Teho min: 800kW
Teho max: 6100kW

Huoltotoimenpiteet:

- Kipinätikut puhdistettu
- Liekkivahti QRA2 kunto tarkistettu, ok
- Ulompi ahtolevy vaihdettu uuteen (vanha haljennut)
- Testiajoa suoritettu
- Ohjauskeskuksen hälytin- ja tilatietopaneelit vaihdettu uusiin (pelaa ok)



Ahtolevyn halkeama

KLVOY

Kotkan Lämpö- ja Vesityö Oy



Uusi ahtolevy asennettu



Uudet tilatieto- ja hälytyspaneelit vaihdettu ohjauskeskukseen

KLVOY

Kotkan Lämpö- ja Vesityö Oy

Kymi UPM Kuumaöljy kattila poltin huolto 12.07-2022

- Poltin irroitettu ja ahtolevystä oli kaksi pulttia mennyt poikki, vaihdettu uudet pultit 4kpl.
- Sytytys kärjet puhdistettu, ok
- Vaihdettu uusi QR2 liekkiwahti
- Tarkistettu kaasusuodin, ok
- Paineilmalla puhdistettu sisä ja ulkopuolelta poltin
- Koeajo suoritettu, ok

19.1-23

- Ahtolevystä irronnut kiinnityspultit 2kpl, poltinta purettu sen verran että saatu pultit vaihdettua. Poltin on huomenna käyttövalmis ja käynnissä, jonka jälkeen tehdään savukaasuanalyysi.

20.1-23 savukaasuanalyysi



- kattilan kuumaöljyputkien pinnassa on nopea aika paljon mutta ei palokammiossa, analyysissä polttimen arvot on hapen osalta liian korkeat pitäisi olla noin 3-5% nyt 10,42%, häkä 6ppm mikä on hyvä. Kattila puhdistetaan keväällä jonka jälkeen säädetään happiarvo 3-5% välille. Nokikerros on ehkä tullut vuosien saatossa liikkeisestä palamisilmasta.

Kotkan Lämpö- ja Vesityö Oy
Pulttikatu 1
48770 Kotka



y-tunnus 0752765-7
KP Kotka
alv rek

Liite 2. Kuumaöljykattilan poltinhuolto raportti 2024



- poltin irroitettu, ahtolevy ehjä. Yksi tukiholkki on poissa, laitettu uusi, nyt ok.
- Qra2 liekkivahti vaihdettu
- Sytytys kärjet puhdistettu
- Puhallinmoottori ok
- Koeajo ok

5.2-24 poltin säätö

- Happi ja häkä arvot ennen säätöä vähän korkeat
- Happi ja häkä arvot minimi/ kolmen tehoalueen, saatu alaspäin, mutta kattilan lämpötila nousi tavotelämpötilaan nopeasti kun ei ole kulutusta ja kattila oli jo lämmin ennen säätöä. Samalla huomattu palamisilmansäätömoottorin ja säätökamman kytkinholkissa/pultissa kulumaa. Sovittu että korjataan vika seuraavassa säätö huollossa.

28.2-24 poltin säätö

- Kytkin/väliholkki on kulunut, tilattu uusi. Korjattu vanha väliaikaisesti, vaihdetaan seuraavassa huollossa.

Poltin säätö

-Minimiliekkin arvot nyt	Happi 6,16%	Häkä 5ppm
- 1 tehoalue	Happi 3,70%	Häkä 15ppm
- 2 tehoalue	Happi 3,87%	Häkä 19ppm
- 3 tehoalue	Happi 5,80%	Häkä 23ppm

- Savukaasuarvot on nyt hyvät

Kotkan Lämpö- ja Vesityö Oy
Pulttikatu 1
48770 Kotka
05-266562



y-tunnus 0752765-7
KP Kotka
alv rek


Liite 3. Kuumaöljykattilan käyttötarkastus 2022.

Julkaisupäivä: 28.9.2022

TODISTUS painelaitteen määräaikaistarkastuksesta
Painelaitelaki 1144/2016 ja VNa 1549/2016

Tarkastuspäivä: 22.09.2022 Valmistusvuosi: 2001 Rekisterinumero: K-20181
Tarkastuksen järjestysnumero: 13 Valmistusno: 002033/1 Todistusnumero: 1172-8323924-22092022

FINAS
Finnish Accreditation Service
1001 [EN ISO/IEC 17020]
(Tyyppi A / Type A)

Omistaja / Haltija	Omistajan nimi UPM Communication Papers Oyj, K	Omistajan osoite Selluntie 1	Postinumero 45700	Postitoimipaikka KUUSANKOSKI
	Haltijan nimi UPM Communication Papers Oyj, K	Haltijan osoite Selluntie 1	Postinumero 45700	Postitoimipaikka KUUSANKOSKI
Käytön valvoja	Nimi Jussi männistö	Yrityksen nimi UPM-Communication Papers Oyj, Kymi	Postinumero 45700	Postitoimipaikka KUUSANKOSKI
	Pätevyys Riittävä asiantuntemus	Yrityksen osoite Selluntie 1	Postinumero 45700	Postitoimipaikka KUUSANKOSKI
Käytön varavaltvoja	Nimi Haanu Jarva	Yrityksen nimi UPM-Communication Papers Oyj, Kymi	Postinumero 45700	Postitoimipaikka KUUSANKOSKI
	Pätevyys Yrityksen mestari	Yrityksen osoite Selluntie 1	Postinumero 45700	Postitoimipaikka KUUSANKOSKI
Painelaite	Painelaitelaji Kuumaöljykattila	Sijainti Ksnk: PPL3 kuumaöljykatt	Sijainnkunnan koodi Kouvola_286	
<input checked="" type="checkbox"/> Kattila	Laitenumero / postio 54 8574 6101	PI-kaavio ja versio RB100.09175		
<input type="checkbox"/> Painestödi	Kattilan käyttötapa Jatkuva käytönvalvonta 1	Kattilan rakenne Muu kattila 3	Pääenergiälähde Kaasu 7	
<input type="checkbox"/> Ei-relesteröity				
Tarkastusväli (vuotta)	Suurin / alin sall. käyttöpaino bar	Tile I	Tile II	Tile III
0 Käyttö	10 0	0 0	0 0	0 0
0 Sisäpuolinen	Korkein / alin sall. lämpötila °C	300 0	0 0	0 0
0 Painekoe	Tilavuus m ³	4	0	0
Tilojen lkm	Sisätilä	öljyt, polttoöljyt_1270		
1	Teho MW	4,5	0	0
Tarkastus	Painekokeen koepaine (I, II, III) bar	Painekokeen päivämäärä	Painekokeen väliaine	
<input type="checkbox"/> 1. määräaikaistarkastus	I II III			
<input checked="" type="checkbox"/> Käyttö (KI)	Varoitteen asetusarvo (I, II, III) bar	Muu varotoiminto (lukitus/suojus) tai lisätoito		
<input checked="" type="checkbox"/> Sisäpuolinen (Sp)	I 8.9 II 0 III 0	Käytetyt mittalaitteet		
<input type="checkbox"/> Painekoe (PK)	Sopimuslaidot (esim. seurantasopimuksen nro.)			
<input type="checkbox"/> Muutos	Painelaitteen kunto: havaitut poikkeamat ja seuraavassa tarkastuksessa huomioon otettavat asiat			
<input type="checkbox"/> Muu	Käyttötarkastus 22-09-2022:			
<input type="checkbox"/> Ylimääräinen	Maakaasu:			
<input type="checkbox"/> Siirto	* Liekinvalvonta ---> poltin seis.			
(K)	* Kaasunpaine min. 45 mbar ---> poltin seis.			
	* Palamisilmanpaine min 9 mbar ---> poltin seis.			
	* Savukaasun lämpötilan yläraja 340 C ---> poltin seis.			
<input type="checkbox"/> Seurantasopimus	Muut tarkastuksen muuttamiset			
<input type="checkbox"/> Muu sopimus				
Tarkastuksen päätös: Kattila täyttää vaatimukset				
Seuraava tarkastus:	Tarkastusaj Käyttötarkastus	Tarkastus tehtävä 22.09.2024 mennessä	Liitteet	kpl
<p>Tarkastaja Jarmo Lehtinen  Asiakas</p> <p>Muutoksenhaku: Jos olet tyytymätön Inspectan tarkastuspäätökseen, voit tehdä muutoksenhakuilmoituksen käyttämällä lomakkeen osoitteessa www.kiwa.com/fi/ots-ylevytta/</p> <p>Inspecta Tarkastus Oy Osoite Y-tunnus PL1000 Sörnälstenkatu 2 2047308-3 00581 Helsinki, Finland 00580 Helsinki, Finland</p> <p>kiwa</p>				

Liite 4. Mobiltherm 605 ominaisuudet

Mobiltherm 605[Back](#)*Data was calculated based on typical properties and does not constitute a specification.*

Temperature	Kinematic viscosity	Density	Specific heat capacity	Thermal conductivity
[°C]	[cSt]	[kg/m ³]	[kJ/(kg.K)]	[W/(m.K)]
0	289.6	865.3	1.820	0.1371
10	143.5	859.8	1.856	0.1364
20	78.9	854.3	1.893	0.1356
30	47.3	848.9	1.929	0.1349
40	30.4	843.5	1.966	0.1342
50	20.7	838.2	2.003	0.1334
60	14.8	833.0	2.039	0.1327
70	11.0	827.9	2.076	0.1320
80	8.4	822.8	2.113	0.1312
90	6.7	817.7	2.149	0.1305
100	5.4	812.8	2.186	0.1298
110	4.5	807.9	2.222	0.1290
120	3.8	803.0	2.259	0.1283
130	3.2	798.2	2.296	0.1275
140	2.8	793.5	2.332	0.1268
150	2.4	788.8	2.369	0.1261
160	2.1	784.2	2.406	0.1253
170	< 2,0	779.7	2.442	0.1246
180	< 2,0	775.1	2.479	0.1239
190	< 2,0	770.7	2.515	0.1231
200	< 2,0	766.3	2.552	0.1224

LIITE

Päivämäärä: 22.09.2022

Rekisterinumero: K-20181

Todistusnumero: 1172-8323924-22092022

Numero:

Lisätiedot tarkastuksesta

- * Hätäseiskeytkin ulko-oven pielessä ----> poltin sammui
- * Hätäseiskeytkin ohjaustaulussa ----> poltin sammui
- * Hätäseiskeytkin tehtaan puolen oven pielessä ----> poltin sammui
- * Valvomon hätäseiskeytkin ----> poltin sammui
- * Maakaasun hätäseiskeytkin poltin sammui viiveellä pitkä putki.

- * Flow Plus Oy koesti varoventtiilin Kiwa Inspecta Tarkastusken [Saku Partasen](#)läsnä ollessa avp 8.03 bar.
- * Vuotokaasuilmamaisimet koestetetaan automaatio-osaton toimesta n. kuuden kuukausen välein. Hälytys 20% LEL ja lukitus 46% LEL.
- * Ulkopuolinen putkisto, kannakointi ja eristeet kunnossa.
- * Käyttötarkastuksessa ei huomautettavaa.

Liite 5. Ohje vaihtoehtoiselle kuivatukselle C3 Päällystyskoneella

Ohje vaihtoehtoiselle kuivatukselle C3 Päällystyskoneella

Sisällysluettelo

Kuivatusprosessi ilman kaasuinfrakuivaimia	2
Sähköinfrakuivaimen kapasiteetin nostaminen.....	4

Kuivatusprosessi ilman kaasuinfrakuivaimia

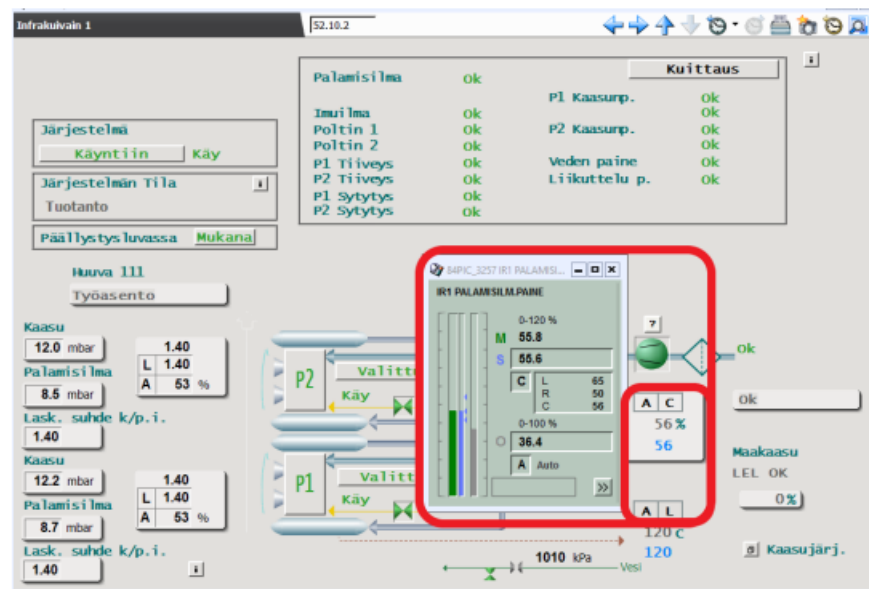
Päällystyskoneella tehdyissä koeajoissa todettiin, että päällystäminen on mahdollista ilman kaasuinfrakuivaimia. Tässä ohjeessa kerrotaan kuinka asemien kaasuinfrakuivaimet sammutetaan tuotannon aikana, sekä kuinka syyttäminen tehdään tuotantotilanteessa.

Infrakuivaimien ohjaukset löytyvät sivuilta:

Infrakuivain 1: 52.10.2

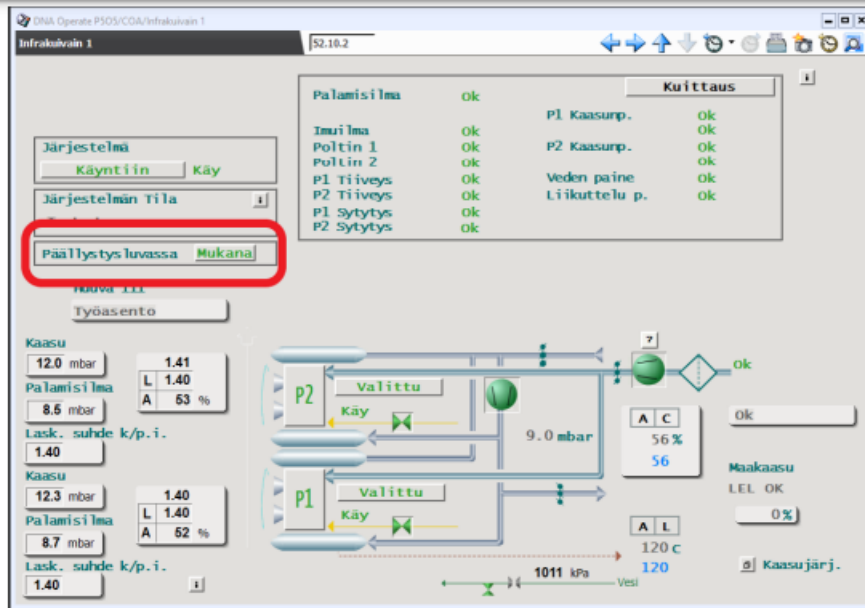
Infrakuivain 2: 52.14.2

Kaasuinfrakuivaimen tehoa rajoitettaessa tarvitsee huomioida päällystysaseman mahdollinen aukeaminen. Teho voidaan rajoittaa käsiohjauksella turvallisesti 50 % ilman lisätoimenpiteitä. Tehoa voidaan rajoittaa säätimen 84PIC_3257 ja 84PIC_3357 avulla. Säädin on esiteetään kuvassa 1.



Kuva 1. Infrakuivaimen säädin.

Infrakuivaimelta lähtevän säätimen käyntitieto on yhdistettynä päällystysaseman päällystyslupa. Kuivainta sammutettaessa päällystyslupa voidaan ohittaa valitsemalla infrakuivaimen ohjaussivulta kohdasta Päällystyslupassa mukana -> Ei mukana. Ohitus on merkittynä kuvassa 2.



Kuva 2. Päällystysluvasta poistaminen.

Infrakuivaimen päällystyslupaun liittyvän poistamisen jälkeen kuivain voidaan sammuttaa asettamalla säätimen teho 0 %.

Infrakuivainta käynnistettäessä tuotantotilanteessa joudutaan rajoittamaan tuotantonopeutta sytytyksen ajaksi tuotannosta syntyvän ilmavirtauksen vuoksi. Asettamalla ratanopeus 600 m/min. Mahdollisissa sytytysongelmissa on huomioitava päällystyslupa, jonka vuoksi ratanopeutta ei voida laskea alle 500 m/min nopeuteen. Ratanopeuden ollessa 600 m/min ilmavirtauksen määrä putoaa riittävästi, jotta sytytys voidaan tehdä ilman tuotantokatkoa.

Päällystettäessä ilman kaasuinfrakuivaimia laaduntarkkailussa tulee huomioida:

Ilmakuivaimien 1 mahdollinen pastan irtoaminen aiheuttaa ylimääräistä päällystyskoneen likaantumista.

Ilmakuivaimien 4 mahdollinen pastan irtoaminen aiheuttaa ylimääräistä päällystyskoneen likaantumista, sekä pasta voi kulkeutua yläpuolella kulkevaan paperirataan.

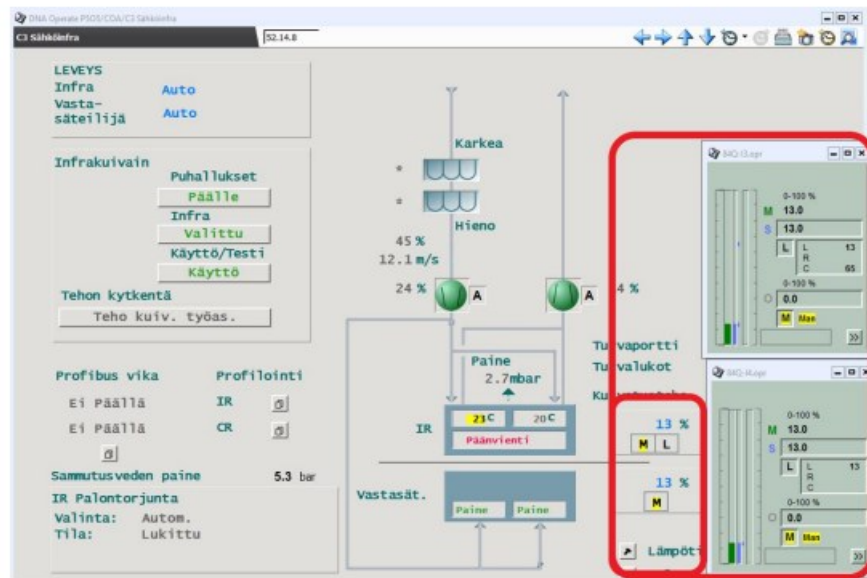
Terästelöjen 18, sekä 38 kontaktipintaa tulee seurata mahdollisen likaantumisen välttämiseksi.

Sähköinfrakuivaimen kapasiteetin nostaminen

Sähköinfrakuivaimen tehoa voidaan nostaa normaalia tasoa korkeammalle seuraamalla palkin sisäistä lämpötilaa. Tehon säätämällä voidaan vaikuttaa ilmakehän kiertoilmanlämpötiloihin.

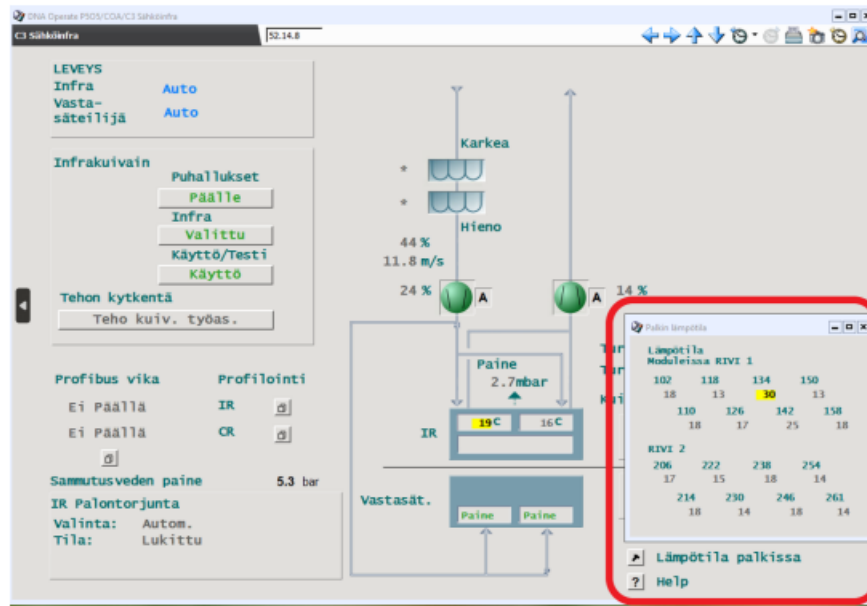
Infrakuivaimen ohjaus löytyy sivulta: 52.14.8

Infrakuivaimen tehoa voidaan nostaa säätimien 84Q-13.opr ja 84Q-14.opr avulla. Ohjaukset ja säätimet on esitettyä kuvassa 3.



Kuva 3. Sähköinfrakuivaimen säätimet.

Tehoa nostatettaessa nostaminen on tehtävä vaiheittain, jotta vältetään mahdolliset suuret poikkeamat tuotannossa ja laitevaurio riskit. Tehon noston yhteydessä on seurattava kuivaimen sisäistä lämpötilaa. Tehon noston yhteydessä mahdolliset lämpötilamuutokset mittauksessa on tasaannuttava, ennen seuraavaa kapasiteetin nostoa. Lämpötila rajoitukset ovat 110, jolloin automaatiojärjestelmä antaa hälytyksen. Lämpötilan noustessa 120 asteeseen infrakuivain aloittaa automaattisen jäähtyksen. Lämpötila seuranta on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Sähköinfrakuivaimen lämpötila seuranta.

Liite 6. Koeajojen mittauspöytäkirjat.

Koeajo 1			
Mittaukset 5.12.2023	8:43		9:00
Infrakuivaimen (1) teho	100 %	Infrakuivaimen (1) teho	77 %
Lämpötila 1 aseman jälkeen	34,5 C	Lämpötila 1 aseman jälkeen	34,5 C
Lämpötila Infrakuivaimen jälkeen	69,8 C	Lämpötila Infrakuivaimen jälkeen	63,6 C
Lämpötila 3 ilmakuivaimen jälkeen	63,5 C	Lämpötila 3 ilmakuivaimen jälkeen	63,2 C
	11:00		11:43
Infrakuivaimen (1) teho	50 %	Infrakuivaimen (1) teho	41 %
Lämpötila 1 aseman jälkeen	34,5 C	Lämpötila 1 aseman jälkeen	34,5 C
Lämpötila Infrakuivaimen jälkeen	52,6 C	Lämpötila Infrakuivaimen jälkeen	45,5 C
Lämpötila 3 ilmakuivaimen jälkeen	67,8 C	Lämpötila 3 ilmakuivaimen jälkeen	67 C
	12:10		
Infrakuivaimen (1) teho	0 %		
Lämpötila 1 aseman jälkeen	34,5 C		
Lämpötila Infrakuivaimen jälkeen	32,5 C		
Lämpötila 3 ilmakuivaimen jälkeen	69,4 C		

Koeajo 2			
Mittaukset 29.12.2024	8:15		8:40
Kaasuinfra 2 teho	100 %	Kaasuinfra 2 teho	77 %
Lämpötila 2 aseman jälkeen	33,8 C	Lämpötila 2 aseman jälkeen	33,8 C
Lämpötila Infrakuivaimen jälkeen	56,1 C	Lämpötila Infrakuivaimen jälkeen	54,4 C
Lämpötila sähköinfran jälkeen	62,8 C	Lämpötila sähköinfran jälkeen	62,4 C
Lämpötila 5 ilmakuivaimen jälkeen	73,6 C	Lämpötila 5 ilmakuivaimen jälkeen	76,1 C
	9:08		9:48
Kaasuinfra 2 teho	50 %	Kaasuinfra 2 teho	0 %
Lämpötila 2 aseman jälkeen	33,8 C	Lämpötila 2 aseman jälkeen	33,8 C
Lämpötila Infrakuivaimen jälkeen	52,4 C	Lämpötila Infrakuivaimen jälkeen	36,4 C
Lämpötila sähköinfran jälkeen	63 C	Lämpötila sähköinfran jälkeen	63,4 C
Lämpötila 5 ilmakuivaimen jälkeen	81,4 C	Lämpötila 5 ilmakuivaimen jälkeen	80,9 C
	10:20		10:57
Kaasuinfra 1 teho	100 %	Kaasuinfra 1 teho	50 %
Lämpötila 1 aseman jälkeen	34,8 C	Lämpötila 1 aseman jälkeen	34,8 C
Lämpötila Infrakuivaimen jälkeen	50 C	Lämpötila Infrakuivaimen jälkeen	48,1 C
Lämpötila 2 ilmakuivaimen jälkeen	63 C	Lämpötila 2 ilmakuivaimen jälkeen	65,6 C
Lämpötila 3 ilmakuivaimen jälkeen	50 C	Lämpötila 3 ilmakuivaimen jälkeen	50 C
	11:27		
Kaasuinfra 1 teho	0 %		
Lämpötila 1 aseman jälkeen	34,8 C		
Lämpötila Infrakuivaimen jälkeen	32,8 C		
Lämpötila 2 ilmakuivaimen jälkeen	80,2 C		
Lämpötila 3 ilmakuivaimen jälkeen	50 C		

Koeajo	9 helmi		Koeajo	9 helmi	
Kello	9:30		Kello	9:40	
Sähköinfran teho	15	%	Sähköinfran teho	30	%
Lämpötila 4 ilmakeivaimen jälkeen	84,3	C	Lämpötila 4 ilmakeivaimen jälkeen	83,5	C
Lämpötila 5 ilmakeivaimen jälkeen	93,8	C	Lämpötila 5 ilmakeivaimen jälkeen	88,4	C
Lämpötila ennen sähköinfraa	78,2	C	Lämpötila ennen sähköinfraa	75,1	C
Lämpötila sähköinfran jälkeen	75,4	C	Lämpötila sähköinfran jälkeen	81	C
Sähköinfra kuivaimen poistoilman lämpötila	95	C			

Koeajo	9 helmi		Koeajo	9 helmi	
Kello	9:55		Kello	10:02	
Sähköinfran teho	45	%	Sähköinfran teho	60	%
Lämpötila 4 ilmakeivaimen jälkeen	80	C	Lämpötila 4 ilmakeivaimen jälkeen	80,5	C
Lämpötila 5 ilmakeivaimen jälkeen	86	C	Lämpötila 5 ilmakeivaimen jälkeen	85,5	C
Lämpötila ennen sähköinfraa	75,1	C	Lämpötila ennen sähköinfraa	73,6	C
Lämpötila sähköinfran jälkeen	81	C	Lämpötila sähköinfran jälkeen	82,6	C
			Poistoilman lämpötila	115	C

Kiertoilman lämpötila mittaukset	9:30	9:40	9:55	10:02
Ilmakeivain 4	406	406	390	377
Ilmakeivain 5	404	400	387	378
	C	C	C	C
Kiertoilman muutos yhteensä	55	C		
IK 4 tehontarpeen muutos	1,11	MW		
IK 5 tehontarpeen muutos	1,00	MW		
Päällystysaseman ilmakeivaimien kiertoilman muutos tehona	2,11	MW		