

Sylvia Korvajärvi

**BIOTUOTETEHTAAN YLIJÄÄMÄENERGIAN HYÖDYNTÄMINEN PUUN  
KUOREN KUIVAUKSESSA**

**BIOTUOTETEHTAAN YLIJÄÄMÄENERGIAN HYÖDYNTÄMINEN PUUN  
KUOREN KUIVAUKSESSA**

Sylvia Korvajärvi  
Opinnäytetyö  
Kevät 2023  
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

## TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma

---

Tekijä: Sylvia Korvajärvi  
Opinnäytetyön nimi: Biotuotetehtaan ylijäämäenergian hyödyntäminen puunkuoren kuivauksessa  
Työn ohjaajat: Jukka Ylikunnari, Vesa Mikkonen  
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2023  
Sivumäärä: 43

---

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää sellutehtaalla syntyvän kuoren kuivaamista ja kuivauksesta saatavia hyötyjä. Kuoren kuivaaminen toteutetaan hyödyntäen ylijäämälämpöä sekä höyryä. Työssä selvitettiin eri kuivausmenetelmien käyttökelpoisuutta sekä arvioitiin kuivauksen kustannuksia ja kuivauksella saavutettavaa lisäarvoa.

Työn toimeksiantaja oli Kaicell Fibers Oy, joka suunnittelee biotuotetehtaan perustamista Paltamoon. Toimeksiantaja halusi selvittää kuoren kuivaamisen hyötyjä sekä myös investointikustannuksia. Investointikustannuksien laskennassa käytettiin annuiteettilainamenetelmää, jossa korkona käytettiin 5 % ja laina-aikana 20 vuotta.

Kuorta syntyy biotuotetehtaan prosessissa paljon ja sille täytyi löytää jatkosuunnitelma. Kuoren kuivurin investoiminen on myös välttämätön prosessin meesauunin polttoaineena toimivan kuoren kuivaamisessa. Työssä kuitenkin käsiteltiin pääasiassa ylijäämäkuoren kuivaamista, joka on suunniteltu myytävän polttoaineeksi kaukolämmön tuotantoon. Kuivaamisen kustannukset aiheutuvat pääasiassa kuoren kuljetuksesta, sillä välimatkaa laitoksien välillä on 40 km. Työssä käsiteltiin myös kuoren kuivaamisesta aiheutuviin päästöihin.

Kun kuivaamisesta saatavia hyötyjä ja kustannuksia laskettiin yhteen, saatiin kuivauksen järjestämisestä taloudellisesti kannattavaa. Kuoren kuivaamisen avulla sen taloudellinen arvo kasvaa, sillä kuoren lämpöarvo kasvaa. Kuljetuskustannukset myös pienenevät kuivaamisen ansiosta, sillä kuori sisältää kuivattuna paljon vähemmän vettä kuin märkä kuori.

---

Asiasanat: puun kuori, biotuote, polttoaine, kuoren kuivaus

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Degree Programme in Energy Technology

---

Author: Sylvia Korvajärvi

Title of thesis: Utilization of the surplus energy of the bioproduct factory in the drying of wood bark

Supervisor: Jukka Ylikunnari, Vesa Mikkonen

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2023

Number of pages: 43

---

The aim of the thesis was to find out the drying of the bark produced at the pulp mill and the benefits of drying. Drying of the shell is carried out using surplus heat and steam. The work investigated the usability of different drying methods and evaluated the costs of drying and the added value achieved by drying.

The client of the work was Kaicell Fibers Oy, which plans to establish a bioproduct factory. The client wanted to find out the benefits of drying the bark and the investment costs. The annuity loan method was used in the calculation of investment costs, where the interest rate was 5% and the loan period was 20 years.

A lot of bark is produced in the bioproduct factory process, and a follow-up plan had to be found for it. Investing in a bark dryer is also necessary for drying the bark that serves as fuel for the lime kiln in the process. However, the work mainly dealt with drying the surplus bark, which is designed to be sold as fuel to produce district heat. The costs of drying are mainly caused by the transportation of the bark, as the distance between the plants is 40 kilometers. The work also dealt with the emissions caused by drying the bark.

When the benefits and costs of drying were added up, organizing the drying was economically profitable. By drying the bark, its economic value increases, as the calorific value of the bark increases. Transport costs are also reduced thanks to drying, as dried bark contains much less water than wet bark.

---

Keywords: bark, bioproduct, fuel, bark drying

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	7
2	KAICELL FIBERS OY .....	8
2.1	Puun käsittely .....	9
2.2	Sellun valmistus .....	9
2.3	Sellun kuivaus .....	10
2.4	Kemikaalien talteenotto .....	10
2.5	Energian tuotanto .....	11
2.6	Veden käsittely .....	12
3	PUUN KUORI .....	15
3.1	Kuoren kemialliset ominaisuudet .....	15
3.2	Kuori polttoaineena .....	16
4	POLTTOAINEEN LAATUOMINAISUUDET .....	17
4.1	Kosteus .....	17
4.2	Lämpöarvo .....	18
4.2.1	Kalorimetrinen lämpöarvo .....	18
4.2.2	Tehollinen lämpöarvo .....	18
4.2.3	Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa .....	19
4.2.4	Energiatehiheys saapumistilassa .....	19
4.2.5	Toimitettu energiamäärä .....	20
5	KUOREN KUIVAUS .....	21
5.1	Yksivaiheinen kuivaus .....	22
5.2	Poistoilman lämmöntalteenotto .....	23
5.3	Poistoilman takaisinkierätys .....	24
5.4	Monivaihekuivaus .....	25
6	KUIVAUSMENETELMIÄ .....	27
6.1	Rumpukuivaus .....	27
6.2	Viirakuivaus .....	28
6.3	Kerroskuivaus .....	29
7	KUIVAUSPROSESSIN LASKENTA .....	32
8	KUOREN KUIVAAMISEN KUSTANNUKSET .....	36
8.1	Kuoren arvo sekä kuljettamisen kustannukset .....	36

8.2	Investointi .....	37
9	PÄÄSTÖT .....	40
10	YHTEENVETO .....	41
	LÄHTEET .....	42

# 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön toimeksiantaja on Kaicell Fibers Oy. Yrityksellä on tarkoituksena toteuttaa sellu- ja biotuotetehtas Paltamoon. Sellutehtaalla sivutuotteena saadaan puun kuorta, joka menee myyntiin polttoaineeksi sekä meesauuniin polttoaineeksi. Polttoaineeksi menevä kuori kuivataan 35 %:n kosteuteen ja meesauuniin menevä kuori noin 10 %:n kosteuteen. Opinnäytetyössä käsitellään polttoaineeksi menevän kuoren kuivaamista.

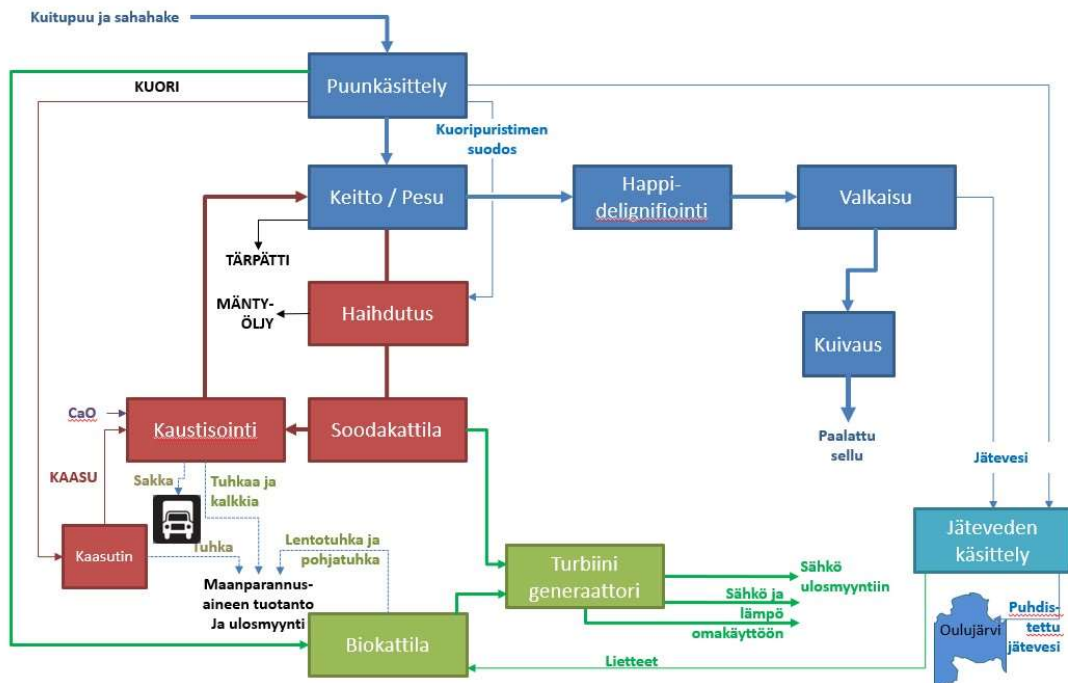
Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää ylijäämälämmön hyödyntämistä havupuun kuoren kuivaamisessa myyntiin polttoaineeksi ja kuivaamisesta saatavia hyötyjä sekä kustannuksia. Työssä esitellään eri kuivausmenetelmiä ja valitaan niistä sopivin. Kustannuksien laskussa keskitytään kuoren taloudellisen arvon nousuun, kuljetukseen sekä investointiin. Kuoren kuivaus nostaa kuoren lämpöarvoa, jonka ansiosta kuoren taloudellinen arvo nousee. Työssä käsitellään myös kuoren kuivauksesta syntyviä päästöjä.

## 2 KAICELL FIBERS OY

Kaicell Fibers Oy on yksityisten sijoittajien ja Kainuun liiton rahoittama yhtiö. Yrityksen tavoitteena on toteuttaa sellu- ja biotuotetehdas Paltamoon. Biotuotetehtaan pääkuitutuotteena on kemiallinen valkaistu selluloosa. Kun tehdas toteutetaan se tuottaa noin 600 000 tonnia valkaistua sellua, josta noin 85 % on pitkäkuituista havusellua ja 15 % lyhytkuituista koivusellua. Kemiallinen sellunvalmistusprosessi tuottaa sellua maailmanlaajuisille markkinoille pehmapaperin ja kartongin valmistukseen. Pääraaka-aineena käytetään Kainuun alueen kuitupuuta. (1; 2.)

Sellunvalmistuksessa sekä jatkojalostuksessa syntyy merkittävästi erilaisia sivuvirroja. Osalle näistä sivuvirroista on jo olemassa markkinat, ja osaa sivuvirroista pyritään jatkojalostamaan alueelle muodostuvassa ekosysteemissä. Näistä sivuvirroista olemassa olevia ovat mm. tärpähti, mäntyöljy ja sähkö. (2; 3.)

Tehtaalla on kuusi pääprosessiosastoa: puun käsittely, kuitulinja, sellun kuivaus, kemikaalien talteenotto, energian tuotanto sekä vedenkäsittely. Tehtaan pääprosessiosastot on esitetty kuvassa 1. (2.)



KUVA 1. Tehtaan prosessikaavio (2)

## 2.1 Puun käsittely

Puunkäsittelyn prosessilaitteita ovat rumpukuorimolinja ja kuoren käsittely, hakku, hakkeen seulonta, hakehasa sekä ostohakkeen vastaanottopiste. Suurimmaksi osaksi puuraaka-aine toimitetaan tehtaalte pyöreänä puuna. Sahahakkeen osuus puuraaka-aineesta on noin 20 %. Pyöreä puu puretaan kuorimon sulatuskuljettimelle tai puukentälle. (2.)

Kuorellinen raakapuu kuoritaan kuorimarummissa kuivakuorintana. Puunkäsittelylinjoja prosessissa on kaksi. Kuori kerätään kuorimalinjalta ja puristetaan kuoripuristimessa kuiva-ainepitoisuuden nostamiseksi. Kuori kuljetetaan varastoitavaksi kuorivarastoon ja hyödynnettäväksi bioenergian tuotannossa. Osa kuoresta ja seulontapuru kaasutetaan meesauunin polttoaineeksi ja loput kuoresta poltetaan kuorikattilassa tai kuivataan myyntiin polttoaineeksi. (2; 3.)

## 2.2 Sellun valmistus

Sellun valmistusprosessissa selluloosakuidut eli puulajien ainesosat, jotka antavat soluseinälle lujuuden erotetaan muusta puuaineesta. Kemiallisessa sellunkeitossa erottelu tapahtuu hyödyntäen keittokemikaaleja, jotka liuottavat ligniinin eli selluloosan ja hemiselluloosan sidosaineen käytettyyn keittoliemeen. Sellu valkaistaan valkaisukemikaaleja käyttäen ja lopuksi se kuivataan ja paalataan asiakkaille toimitettavaksi. Oleellisena osana prosessiin kuuluu keittokemikaalien ja ligniinin lämpöenergian talteenotto käytetystä keittoliemestä. (2; 4; 5.)

Keittämössä haketta keitetään keittoliemessä, joka liuottaa ligniiniä ja muita puun uuteaineita erottaen selluloosakuidut ligniinistä. Sulfaattikeiton keittoliemenä on valkolipeä, jossa natriumhydroksidi (NaOH) ja natriumsulfidi (Na<sub>2</sub>S) toimivat keittokemikaaleina. Lämpötila keittoprosessissa on noin 160–170 °C. (2.)

Sellun keittoprosesseja on kahdenlaista: jatkuvatoiminen- tai eräkeittoprosessi. Kummallakin keittotekniikalla saadaan sama keittotulos ja jäännösligniinipitoisuus. Jatkuvatoimisessa, toiselta nimeltään vuokeitossa, keittimen yläpähän syötetään jatkuvasti haketta sekä kemikaaleja ja alapäästä poistetaan massaa. Tällöin keitin on jaettu vyöhykkeisiin, jossa keiton eri vaiheet

tapahtuvat. Eräkeitossa keittämöllä on useita keittämiä, joissa sellun keitto tapahtuu vaihe kerrallaan. (2; 3.)

Suunnitellussa tehtaassa sellu keitetään jatkuvatoimisessa keittämössä kaksiasiakeittona. Siinä keitintä edeltää impregointiastia, jossa hakkeeseen imeytyy keittoneste ennen sellun keittoa. Tuotettaessa liukosellua imeytysastiassa tehdään esihydrolyysi, jossa esikeitetään haketta puusta irtoavien happojen avulla. Haihduttamolle väkevöitäväksi ja soodakattilaan poltettavaksi johdetaan esihydrolyysin hydrolysaatti sekä mustalipeä. Esihydrolyysivaihetta ei kuitenkaan tarvita, kun keitetään normaalia sellua. (2; 3.)

Sellua keitetäessä ligniini liukenee käytettyyn keittoliemeen sekä poistaa puussa olevaa hemiselluloosaa. Tästä käytetään nimitystä mustalipeä. Sellun keitossa erottuu myös puun sisältämää tärpättiä sekä hajukaasuja, josta tärpätti otetaan talteen ja hajukaasut poltetaan. (2.)

### **2.3 Sellun kuivaus**

Myytävän sellun kuiva-ainepitoisuus on oltava 90 %. Tähän päästään käyttämällä kolmea eri kuivausmenetelmää. Ensimmäisessä vaiheessa sellun massasulputa poistetaan vettä rainaus- ja kuivauskoneen viiraosalla painovoimaa ja alipaineimua hyödyntämällä. Toisessa vaiheessa päästään 50 %:n kuiva-ainepitoisuuteen mekaanista puristusta hyödyntäen. Kolmannessa vaiheessa päästään haluttuun 90 %:n kuiva-ainepitoisuuteen kuumailmapuhallukseen perustuvalla kuivausvaiheella, jossa haihdutetaan jäljellä oleva vesi pois. (2.)

### **2.4 Kemikaalien talteenotto**

Soodakattilassa poltetaan väkevöitetty mustalipeä. Mustalipeän orgaaninen aines palaa soodakattilassa lämpöä vapauttaen, mikä saadaan korkeapainehöyryä. Mustalipeän epäorgaaniset keittokemikaalit otetaan talteen sulana ja liuotetaan meesan eli kalsiumkarbonaatin ( $\text{CaCO}_3$ ) pesusta syntyneeseen laihavalkolipeään. Tuloksena syntyy viherlipeä. (2.)

Soodakattilasta syntyy savukaasuja, jotka johdetaan sähkösuotimille. Siellä kiintoainepartikkelit eli lentotuhka erotetaan savukaasuista ja palautetaan prosessiin sekoittamalla

vahvamustalipeään ennen soodakattilassa polttamista. Lentotuhkaa kerätään myös ennen sähkösuodinta esimerkiksi keittopinnalta. Sähkösuotimien lentotuhka on vesiliukoista ja sisältää natriumsulfaattia, natriumkarbonaattia sekä kaliumia ja kloridia. Lentosuolan sisältämä kalium on pääasiassa sulfaattina ja kloridi natriumkloridina. Osa sähkösuotimien tuhkasta sekä lentotuhkasta otetaan suolan puhdistukseen haitta-aineiden erottamiseksi. (2; 3.)

Kaustisointiprosessissa eli valkolipeän valmistusprosessissa soodakattilassa talteen saadun viherlipeän kemikaalit regeneroidaan eli puhdistetaan ja palautetaan käytettäväksi sellun keittoliemeksi, valkolipeäksi. Se suodatetaan poistamalla meesa valkolipeäsuotimilla ja on käytettävissä uudelleen sellun keittoprosessissa. Alkalihäviöt kemikaalikierrossa korvataan lisäämällä ostolipeää eli natriumhydroksidia (NaOH). Se lisätään happivaiheeseen, josta se kulkeutuu keittokemikaalien talteenottokiertoon. (2.)

Viherlipeästä poistetaan viherlipeäsakka eli kiintoaines suodattamalla. Siihen sekoitetaan poltettua kalkkia eli kalsiumoksidia (CaO) kalkin sammuttimessa. Poltettu kalkki saadaan kalkkikierrosta meesauunin kautta. Korvauskalkki, jota saadaan kattamaan prosessihäviöt lisätään myös kalkin sammuttimeen. Kaustisointiastioissa reaktiotuotteina syntyy valkolipeää sekä meesaa. (2.)

Kalsiumkarbonaatti eli meesa poltetaan meesa- eli kalkkiuunissa kalsiumoksidiksi. Ennen polttoa meesa pestään sekundäärilauhteella sekä kuumalla vedellä. Siitä syntyvä suodos eli laihavalkolipeä kierrätetään viherlipeän valmistukseen. Meesauunissa meesa palaa kalsiumoksidiksi, joka on kalkkikierrosta saatavaa poltettua kalkkia, joka syötetään sammuttimeen. Meesauunin polttoaineena käytetään biopohjaista kuoren kaasutuksesta saatua tuotekaasua ja savukaasut puhdistetaan sähkösuotimella. (2.)

## **2.5 Energian tuotanto**

Tehtaan suunnitteluvaiheeseen kuuluu biomassakattila, jolla tuotetaan korkeapainehöyryä. Pääpolttoaine kuorikattilassa on puun kuori sekä hienojae ja puru, joita tulee hakkeen seulonnasta. Jätevesilaitoksen esiselkeytyksestä syntyy kuitulietettä, joka voidaan polttaa kattilassa. Ylijäämäkuoren kuivaus kuitenkin tähtää siihen, että biomassakattilaa ei tarvita. (2.)

Soodakattilassa energiaa tuotetaan polttamalla keittoliuokseen liuenneet puun ainesosat. Kemikaalit, joita tarvitaan keitossa, saadaan talteen ja ne kierrätetään prosessissa uudelleen käytettäviksi. Kemikaalien regenerointitarpeen mukaan säädetään mustalipeän polttoa. Tehtaan energiantarpeen tyydyttämiseksi häiriö- ja käyntiinlähtötilanteissa soodakattilassa on mahdollista polttaa myös tukipolttoainetta. (2.)

Kaasutuksessa tuotetaan tuotekaasua meesauunin polttoaineeksi. Kaasutukseen käytetään noin puolet kuorimosta tulevasta kuoresta sekä kaikki hakkeen seulonnasta tuleva puru. Kaasutin on kiertoleijupetityyppinen ja siinä kaasutetaan kuori ja muu puuperäinen aines. Sen toimintaperiaate on sama kuin kiertoleijupetikattilalla, mutta se toimii vajaalla ilmamäärällä, jolloin syötettävä polttoaine kaasuuntuu eikä pala täydellisesti. Kaasutuksessa syntyvä tuotekaasu sisältää hiilimonoksidia (CO), vetyä (H<sub>2</sub>), metaania (CH<sub>4</sub>), typpeä (N<sub>2</sub>) ja hiilidioksidia (CO<sub>2</sub>). Näistä palavia ainesosia on hiilimonoksidi, vety sekä metaani. Tuotekaasu syötetään suoraan meesauunin polttoaineeksi. (2.)

Turbiinilaitos tuottaa sähköä, jonne johdetaan soodakattilan ja kuorikattilan tuottama korkeapainehöyry. Höyryturbiiniin on kytketty generaattori, joka tuottaa sähköenergiaa. (2.)

## **2.6 Veden käsittely**

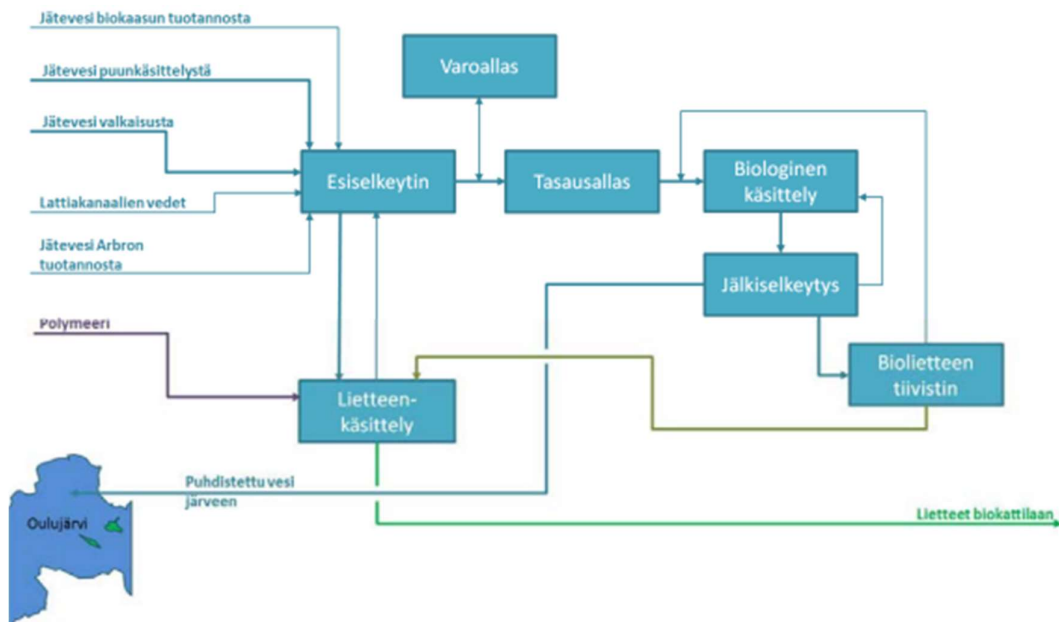
Raakavesilaitoksella tehdään prosessivettä puhdistamalla tehtaan ottamaa raakavettä. Puhdistusprosessissa humus ja kiintoaine poistetaan raakavedestä. (2.)

Päävaiheet prosessiveden käsittelyssä ovat mekaaninen sihtaus, flokkaus sekä suodatus. Humuksen ja kiintoaineen flokkulointia eli hiutaloitumista edesauttaa mekaanisesti siivilöityyn raakaveteen sekoitetut saostuskemikaalit ja pH:n säätökemikaalit. Saostuskemikaalina käytetään alumiinisulfaattia (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>). Vedestä saadaan erotettua kiintoainehiutaleet, jotka ovat muodostuneet selkeytsaltaassa. Flotaatioselkeytyksessä kiintoainehiutaleet nostetaan altaan pinnalle imukuplien avulla ja erotetaan kaapimalla tai ylijuoksuttamalla. (2.)

Hiekkasuodattimissa suodatetaan selkeytetty vesi. Siinä poistetaan kiintoainejäämiä, jotka ovat jääneet veteen selkeytysvaiheen jälkeen. (2.)

Täyssiulapoistettua vettä tarvitaan sooda- ja kuorikattilan syöttövedeksi. Syöttövesi valmistetaan prosessivedestä käänteisosmoosia tai kationi- ja anionivaihtimia käyttäen. Kattilaveteen lisätään kemikaaleja kemialliseen hapenpoistoon, kovuuden poistoon ja korroosion estoon. Sekavaihtimella puhdistetaan höyryn käyttökohteista palautuva lauhde. (2.)

Jätevedenpuhdistamolla puhdistetaan tehtaan jätevedet. Kuvassa 2 on esitetty jätevedenpuhdistuksen päävaiheet. (2.)



KUVA 2. Jätevedenpuhdistuksen päävaiheet (2)

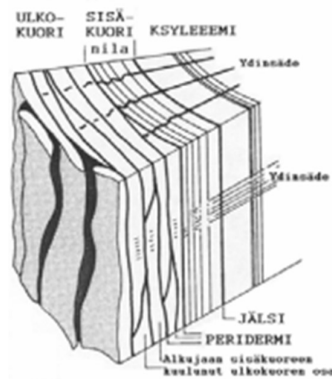
Esiselkeytyksessä kuitupitoinen kiintoaines poistetaan primäärilietteenä, joka laskeutuu selkeytysaltaan pohjalle. Varoallas on ennen biologista puhdistusta. Siihen voidaan kerätä mahdollisessa häiriötilassa syntyviä poikkeuksellisen runsaasti kuormittavia jätevesiä. Sieltä jätevedet johdetaan hallitusti puhdistamolle vaarantamatta biologista puhdistusta tai purkuveden laatua. (2.)

Ilmastusaltaassa jätevesi ja aktiiviliete ovat hapellisissa olosuhteissa sekoituksen avulla, mikä tapahtuu ilman kuplituksen voimalla. Biologinen puhdistus alentaa jätevesien biologista hapenkulutusta (BOD) ja kemiallista hapenkulutusta (COD), sillä bakteerielistö käyttää ravintona jäteveden sisältämää orgaanista ainesta. Riittävän happipitoisuuden ylläpitämiseksi jätevettä ilmastetaan pohjailmastimilla. Jäteveteen voidaan lisätä typpeä ja fosforia ennen ilmastusta biologisen toiminnan parantamiseksi, sillä bakteerikasvusto käyttää niitä lisäravintonaan. (2.)

Jälkiselkeytyksessä altaiden pohjalle laskeutunut bioliete poistetaan. Vesistöön palautetaan puhdistettu ja selkeytetty vesi. Mikrobikannan ylläpitämiseksi bioliete palautetaan takaisin ilmastukseen ja ylimääräinen bioliete poistetaan kierrosta. (2.)

### 3 PUUN KUORI

Puun kuori on rungon, oksien ja juurien uloin kerros. Sen kokonaispaino puussa on noin 10–15 %. Puun ja kuoren erottaa toisistaan jälsi. Puun kuoren osia ovat sisäkuori eli nila, jonka tehtävänä on kuljettaa puulle yhteyttämistuotteita lehdistä runkoon ja juuriin, ulko-kuori eli kaarna ja peridermi, joka erottaa ulko- ja sisäkuoret toisistaan. Kuoren tehtävänä on suojata puuta ulkoisilta vaurioilta, kuivumiselta, lämpötilanvaihteluilta sekä kuljettaa ravintoaineita juurista latvoihin. (4; 6.)



KUVA 3. Puun kuoren rakenne (4)

#### 3.1 Kuoren kemialliset ominaisuudet

Puun kuoren kemialliset ominaisuudet poikkeavat rungon koostumuksesta. Kuori muodostuu kuitenkin samoista aineista kuin puuaines, mutta pitoisuudet ovat erilaisia. Puun kuori sisältää paljon uuteaineita jopa 30–40 % kuiva-aineesta sekä epäorgaanisia yhdisteitä 2–10 %, mutta myös selluloosaa, hemiselluloosaa ja ligniiniä. Kuoressa on myös suberiinia, jota esiintyy runsaasti esimerkiksi koivun tuohessa ja sen valkoinen väri tulee betulinolista. Havupuiden kuoren pihkatiehyissä on hartsihappoja, steroleja sekä terpenoideja. (4; 6.)

### 3.2 Kuori polttoaineena

Puun kuoren lämpöarvo on korkea, sillä se sisältää paljon ligniiniä. Rungon eri korkeudet eivät vaikuta kuoren lämpöarvoon, mutta puun koko sekä eri puulajien kuorten lämpöarvot poikkeavat toisistaan. Koivun kuoren lämpöarvo on huomattavasti korkeampi kuin havupuilla.

Koivulla lämpöarvo vaihtelee ulko- ja sisäkuoren mukaan. Ulkokuoren lämpöarvo on 20–32 MJ/kg ja sisäkuoren 19–20 MJ/kg. Puun kasvupaikalla on myös vaikutusta kuoren lämpöarvoon. Taulukossa 1 on esitetty kuoren eri osien tehollisia lämpöarvoja männylle, kuuselle sekä koivuille. (6; 7.) Taulukkoon on otettu kyseiset puulajit, koska niitä on eniten Kainuun metsissä ja niitä käytetään Kaicell Fibers Oy:n prosessissa.

*TAULUKKO 1. Kuoren eri osien tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg (6)*

Puulaji	Kuori			
	Sisäkuori	Ulkokuori	< 5 mm	Koko kuori
Mänty	19,28	20,36	31,39	20,30
Kuusi	17,87	20,77	20,27	19,60
Hieskoivu	18,49	28,53	20,58	21,03
Rauduskoivu	19,07	29,87	20,13	21,78

Korkeat kuoren kosteus- ja tuhkapitoisuudet heikentävät kuoren polttoaineominaisuuksia. Sitä voidaan parantaa puristamalla, kuivaamalla tai sekoittamalla sitä muun polttoaineen joukkoon. Kuoren lämpötilasta ja partikkelikoosta riippuu sen saavutettava kuiva-ainepitoisuustaso. Kuoren koostumus ja rakenne vaihtelevat eri kohdissa, joka on ongelmallista kuoren käsittelyn kannalta. (6.)

## 4 POLTTOAINEEN LAATUOMINAISUUDET

Polttoaineista maksetaan energiasisällön perusteella. Polttoaineen energiasisältö saadaan selvitettyä, kun tiedetään polttoaineen massa, kosteus saapumistilassa sekä alempi tehollinen lämpöarvo. (6.)

### 4.1 Kosteus

Puupolttoaineissa vaaditaan tasalaatuisuutta. Erityisesti kosteusvaihteluihin on kiinnitettävä huomiota. Kausivaihtelut on otettava huomioon toimituserien kosteuksia sovittaessa. (6.)

Kosteuden määrittämisessä käytetään yleensä uunikuivausmenetelmää standardin SFS-EN ISO 18134-2:2015 mukaan. Kosteuden voi määrittää myös pikakosteusmittaria käyttäen, jos se vastaa standardimenetelmällä tehtyä kosteudenmäärittystä. (6.)

Standardin mukaan kosteusnäytteen täytyy olla vähintään 300 g, jossa punnitustarkkuus on 0,1 g. Näytteen kuivattaminen tapahtuu lämpökaapissa, jonka lämpötila on  $105 \pm 2$  °C. Kuivauksessa riittää 16 h kuivausaika, kun palakoko näytteessä on enintään 31,5 mm eikä näytettä ole liian paksu kerros. Näyte täytyy punnita heti lämpökaapista ottamisen jälkeen, millä vältetään laboratorioilman kosteuden imeytyminen näytteisiin. (6.)

Näytteen kosteus kuivauksen aikana tapahtuvasta massanmuutoksesta kaavalla 1 (7).

$$M_{ar} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

KAAVA 1

jossa

$M_{ar}$  = märkäpainoa kohti laskettu kosteus saapumistilassa, p-%

$m_1$  = märän näytteen massa, g

$m_2$  = kuivatun näytteen massa, g

## 4.2 Lämpöarvo

Lämpöarvo kertoo, kuinka paljon täydellisessä palamisessa kehittyä lämpöä polttoaineen massaa kohti. Lämpöarvo ilmoitetaan tavallisesti megajouleina polttoainekiloa kohti (MJ/kg, 1 MJ = 0,2778 kWh). Lämpöarvona tarkoitetaan yleensä ylempää, alempaa tai alinta lämpöarvoa. (6.)

### 4.2.1 Kalorimetrinen lämpöarvo

Kalorimetrinen lämpöarvo on ns. ylempi lämpöarvo, joka tarkoittaa lämpöenergian määrää poltettavan aineen massayksikköä kohti, jossa lämpöenergia vapautuu aineen palaessa täydellisesti ja palamistuotteet jäähtyvät +25 °C:n lämpötilaan. Lämpöarvo selvitetään pommikalorimetrissä ja arvo ilmoitetaan kuiva-ainetta kohti vakiotilavuudessa. Ilmakuivatusta näytteestä punnitaan 1 gramma ja se poltetaan nesteeseen upotetussa kalorimetripommissa happiatmosfäärissä, josta mitataan vapautuva lämpö. Samalla määritetään näytteen kosteus, jonka avulla ilmakeivan näytteen lämpöarvo saadaan muunnettua vastaamaan absoluuttisen kuivan näytteen lämpöarvoa. Kahden rinnakkaismäärittelyn keskiarvona saatu ylempi lämpöarvo ilmoitetaan tuloksena. Ero rinnakkaismäärittelyissä saa biopolttoaineille olla enintään 0,140 MJ/kg. Ilmoitustarkkuus lämpöarvomäärittelyille on 0,01 MJ/kg. (6.)

Kalorimetrinen lämpöarvo lasketaan kaavalla 2 (7).

$$Q_{gr,d} = Q_{gr,ad} \times \frac{100}{100 - a_d}$$

KAAVA 2

jossa

$Q_{gr,d}$  = kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg

$Q_{gr,ad}$  = ilmakeivan näytteen kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg

$M_{ad}$  = ilmakeivan näytteen analyysikosteus, %

### 4.2.2 Tehollinen lämpöarvo

Tehollinen lämpöarvo eli alempi lämpöarvo on lämpömäärä, jota käytetään yleisesti Suomessa ilmoittamaan lämpöarvoa. Se saadaan muunnoskaavalla kalorimetrisestä lämpöarvosta. Se on lämpömäärä, jossa otetaan huomioon palamisen yhteydessä höyrystyvän veden höyrystymisenergia. (6.)

Kun on määritelty kalorimetrinen lämpöarvo tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, saadaan kaavalla 3 (6).

$$Q_{p,net,d} = q_{v,gr,d} - 212,2 * w(H)_d - 0,8 * [w(O)_d + w(N)_d] \quad \text{KAAVA 3}$$

jossa

$Q_{p,net,d}$  = kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo vakioaineessa, kJ/kg

$q_{v,gr,d}$  = kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvo vakiotilavuudessa, kJ/kg

$w(H)_d$  = vetytitoisuus kuivassa polttoaineessa, p-%

$w(O)_d$  = happititoisuus kuivassa polttoaineessa, p-%

$w(N)_d$  = typpititoisuus kuivassa polttoaineessa, p-%

#### 4.2.3 Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa

Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa on alin lämpöarvo. Lämpöarvoa kutsutaan alimmaksi lämpöarvoksi, koska sitä laskettaessa siitä vähennetään lämpöarvo, joka käytetään polttoaineessa ja palamisessa veden haihuttamiseen. (6.)

Lämpöarvo lasketaan kuiva-aineen tehollisen lämpöarvon avulla kaavalla 4 (6).

$$q_{p,net,ar} = q_{p,net,d} * \frac{100 - M_{ar}}{100} - 0,02443 * M_{ar} \quad \text{KAAVA 4}$$

jossa

$q_{p,net,ar}$  = tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg

$q_{p,net,d}$  = tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg

$M_{ar}$  = kosteus saapumistilassa, p-%

0,02443 = höyrystymisen entalpiain korjauskerroin vedelle 25 °C lämpötilassa, MJ/per 1 p-% kosteutta.

#### 4.2.4 Energiatiheys saapumistilassa

Toimituserän energiatiheys saapumistilassa kiinteillä biopolttoaineilla lasketaan kaavalla 5 saapumistilaisen tehollisen lämpöarvon ja irtotiheyden avulla. (6).

$$E_{ar} = \frac{1}{3600} * q_{p,net,ar} * BD_{ar}$$

KAAVA 5

jossa

$E_{ar}$  = biopolttoaineen energiatiheys saapumistilassa, MWh/irto-m<sup>3</sup>

$q_{p,net,ar}$  = tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg

$BD_{ar}$  = irtotiheys, puupolttoaineen tilavuuspaino saapumistilassa, kg/irto-m<sup>3</sup>

$\frac{1}{3600}$  = muuntokerroin energiayksiköille MJ:sta MWh:iin

#### 4.2.5 Toimitettu energiamäärä

Toimitettu energiamäärä W (MWh) lasketaan kaavalla 6 (6).

$$w = \frac{Q}{3,6} * m$$

KAAVA 6

jossa

$\frac{Q}{3,6}$  = tehollisen saapumistilassa olevan lämpöarvon muunto MWh/t

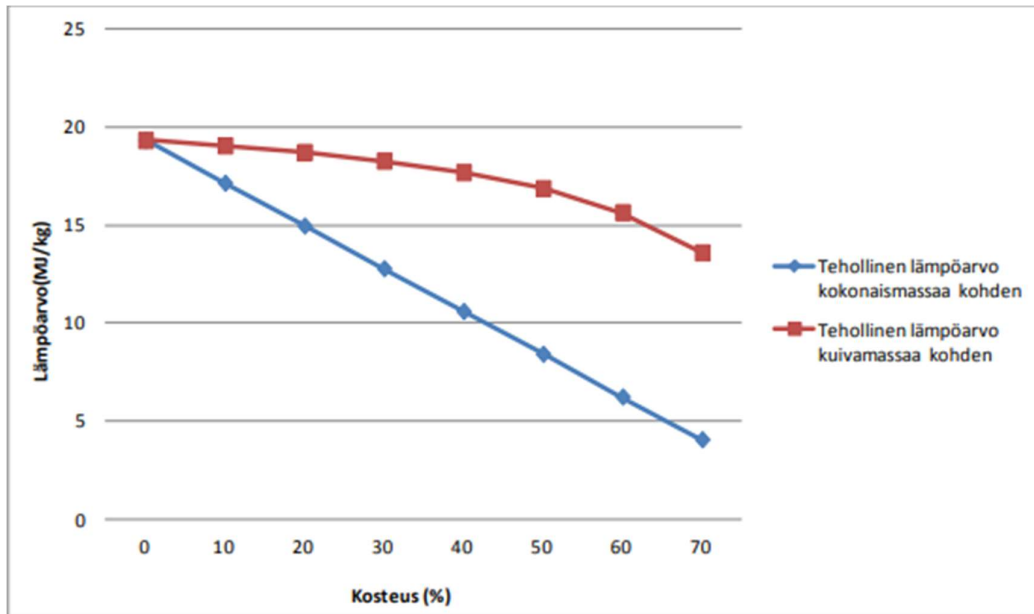
$m$  = toimitetun polttoaineen massa tonneina

## 5 KUOREN KUIVAUS

Kuivauksessa kostean kuoren sisältämä vesi haihtuu kuivausilmaan höyryksi. Kuivausprosessissa suoritusarvoja ovat lämmön tarve, ominaisenergiankulutus sekä puhallinteho. Nämä määritetään kostean ilman termodynaamisista tilasuureista ennen kuivuria ja kuivurin jälkeen. (8.)

Kuoren sisältämällä kosteudella on monia negatiivisia vaikutuksia polttolaitoksen energiatehokkuuteen. Palaminen on epätäydellistä ja polton ilmakerrointa joudutaan nostamaan, jos polttoaine on kostea, sillä osa sen lämpösisällöstä kuluu kosteuden höyrystämiseen, mikä laskee sen lämpöarvoa ja adiabaattista palamislämpötilaa. Siirtyessään vesihöyryksi kosteus kasvattaa myös polttolaitoksen savukaasuvirtaa, jolloin puhaltimien kapasiteettia pitää nostaa ja näin ollen laitoksen omakäyttösähkön kulutus lisääntyy. (8.)

Kuivauksen myötä polttoaineen laatu paranee, koska sen lämpöarvo nousee. Lisäksi voimalaitoksen käyttötalous parantuu, sillä polttoainejärjestelmän varasto- ja siirtokapasiteettia sekä kattilan ja apulaitteiden mitoitusta voidaan pienentää. Kuivaus on tärkeää myös kattilan syöpymisen kannalta, koska liian kostea polttoaine voi aiheuttaa kattilan syöpymistä. Polttoaineen kuivauksen ansiosta myös kattilan hyötysuhde nousee, palamisilman tarve sekä savukaasujen massavirta pienenee. Polttoaineen, tässä tapauksessa kuoren käytettävyys paranee, sillä se ei jäädy eikä homehdu niin helposti. Biomassaa polttavissa laitoksissa voidaan käyttää vähemmän polttoainetta saman lämpötehon tuottamiseen kuivemmalla polttoaineella, jolloin saavutetaan polttoainesäästöjä. Kuvassa 4 on esitetty puupohjaisen polttoaineen vaikutus sen teholliseen lämpöarvoon. (8.)

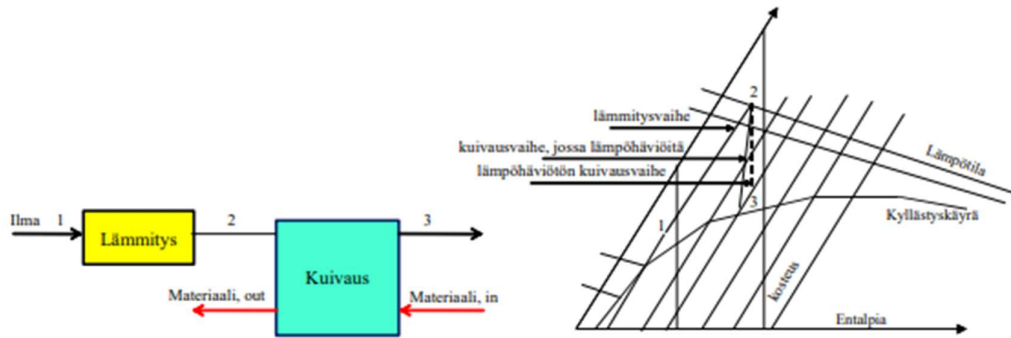


KUVA 4. Biopolttoaineen kosteuspitoisuuden vaikutus polttoaineen teholliseen lämpöarvoon. Kuiva-aineen lämpöarvo on 19 MJ/kg. (8)

Kosteuden kasvaessa tehollinen lämpöarvo puun massaa kohden laskee veden höyrystymiseen kuluvan lämpömäärän mukaisesti. Polttoaineen säästö on suoraan verrannollinen tehollisen lämpöarvon muutokseen kuivamassaa kohden, sillä kuivauksessa massavirta pysyy vakiona. Yllä olevasta kuvasta 4 huomataan, että kuivauksella voidaan saavuttaa huomattavia polttoainesäästöjä. Esimerkiksi kuivattaessa polttoainetta 50 %:n kosteudesta 20 %:n kosteuteen sen energiasisältö kasvaa 11 %. (8.)

## 5.1 Yksivaiheinen kuivaus

Yksivaiheisessa kuivauksessa ilma lämmitetään epäsuorasti jollakin lämmönlähteellä ja johdetaan sen jälkeen kuivauskammioon, jossa ilma sitoo kosteutta ja jäähtyy. Yksivaiheisen kuivauksen toimintaperiaate sekä kuivausilman tilanmuutos Mollier-diagrammissa on esitetty kuvassa 5. (9.)



KUVA 5. Yksivaiheinen kuivausprosessi sekä kuivausilman tilanmuutos Mollier-diagrammissa lämpöhäviöttömässä ja lämpöhäviötä sisältävässä kuivausprosessissa (9)

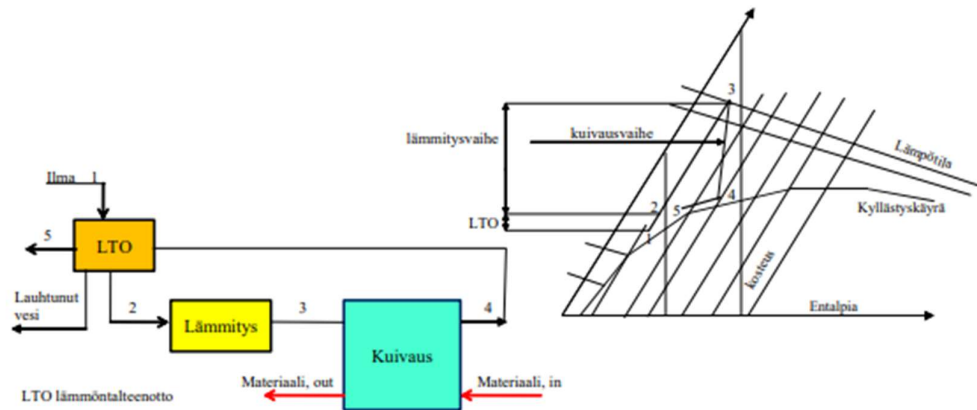
Kuvan 5 Mollier-diagrammissa on esitetty, kuinka lämpöhäviötön ja lämpöhäviötä sisältävä kuivausprosessi eroavat toisistaan. Mitä suurempi kulma Mollier-diagrammissa katkoviivan (lämpöhäviötön prosessi) ja yhtenäisen viivan (lämpöhäviötä sisältävä prosessi) välissä on, sitä enemmän kuivurissa lämpöenergiaa kuluu muuhun kuin haihdutukseen eli tapahtuu lämpöhäviötä. (9.)

Alhaisen lämmönkulutuksen saavuttaminen yksivaiheisessa kuivauksessa edellyttää kuivurin mitoittamista siten, että poistoilman kosteus on mahdollisimman lähellä vakioentalpiasuoran ja kyllästyskäyrän leikkauspistettä vastaavaa kosteutta. (9.)

## 5.2 Poistoilman lämmöntalteenotto

Kuivauksesta poistuvan kostean ilman talteenotolla saadaan parannettua energiatehokkuutta. Varsinkin kosteuden sisältämällä latentti lämmöllä eli vesihöyryyn sitoutuneella lämpöenergialla on merkittävä talteenottopotentiali. (9.)

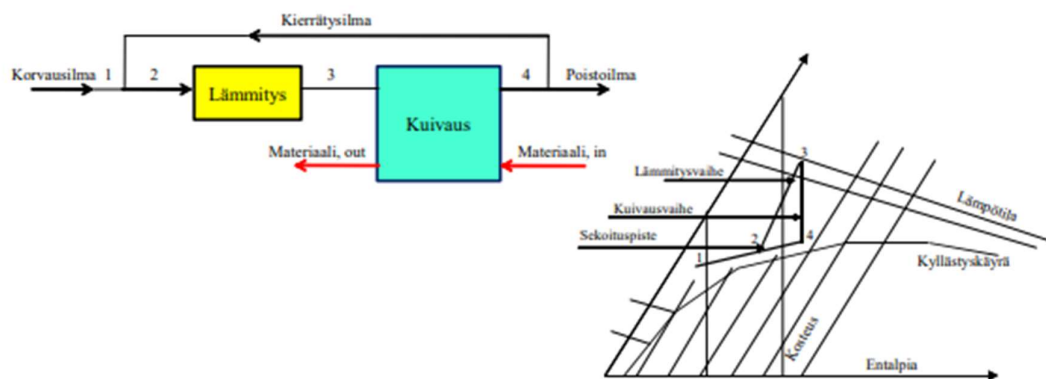
Sisääntuloilmaa voidaan esilämmittää poistoilmalla, sillä poistoilman lämpötila on yleensä korkeampi kuin sisääntuloilman. Tämän avulla voidaan pienentää kuivauksen lämmönkulutusta. Mollier-diagrammissa talteenotto näkyy sisääntuloilman tilan muutoksena lämmöntalteenotossa vakioentalpiasuoraa pitkin sisääntuloilmaa vastaavalta isotermiltä lämmöntalteenoton jälkeiselle isotermille. Kuvassa 6 on esitetty poistoilman lämmöntalteenoton toimintaperiaate sekä Mollier-diagrammi. (9.)



KUVA 6. Poistoilman lämmöntalteenotolla varustettu kuivausprosessi sekä Mollier-diagrammi (9)

### 5.3 Poistoilman takaisinkierrätys

Kostean poistoilman takaisinkierrätyksellä voidaan vähentää kuivauksen lämmönkulutusta, sillä kuivausilman lämpötila nousee ennen lämmönvaihdinta. Ilman takaisinkierrätyksessä osa kuivurin poistoilmasta sekoitetaan uuden kuivausilman sekaan ennen lämmönvaihdinta. Kuvassa 7 on esitetty ilman takaisinkierrätyksen toimintaperiaate sekä Mollier-diagrammi. (8; 9.)



KUVA 7. Poistoilman takaisinkierrätys prosessikaaviona sekä Mollier-diagrammissa (9)

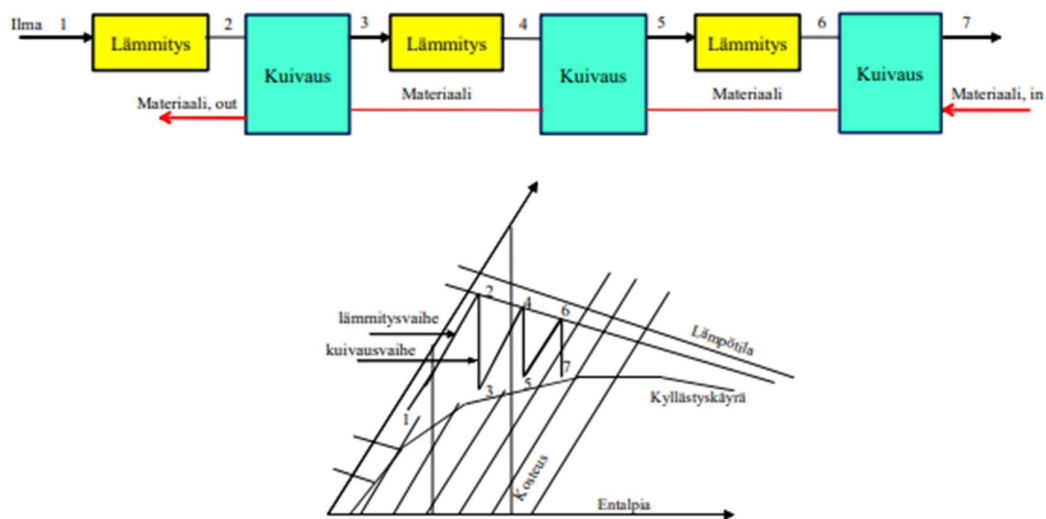
Poistoilman takaisinkierrätyksessä kuivausilman kosteus ennen kuivauskammiota nousee, jonka takia kuivausilman massavirta on suurempi kuin yksivaiheisessa kuivauksessa. Kuivausilman massavirran kasvu vaikuttaa puhaltimien sähkönkulutuksen lisääntymiseen. Jos korvausilman lämpötila on alhainen, pienellä ilman kierrätysosuudella eli kierrätettävän ilman massavirran

suhteella kuivurin läpi kulkevaan massavirtaan (kierrätysilman ja poistoilman massavirtojen summa) voi tapahtua kosteuden lauhtumista. Tämä johtaa korroosioriskiin. (9.)

#### 5.4 Monivaihekuivaus

Energiätehokkuutta kuivauksessa voidaan parantaa monivaihekuivauksella. Siinä edellisestä kuivausvaiheesta tuleva ilma syötetään seuraavaan vaiheeseen. Monivaiheinen kuivaus nostaa lämmitettävän ilman alkulämpötilaa vaiheiden välillä ja tällöin myös vaaditaan vähemmän lämpöenergiaa. (9.)

Vaiheistuksen ansiosta lämmönkulutus pienenee, sillä poistoilman ulostulolämpötila nousee samaan aikaan, kun Mollier-diagrammilla siirrytään oikealle eli ulostuloilman kosteus kasvaa. Vaiheistuksen ansiosta myös kuivausilman massavirta pienenee, koska samaan ilmavirtaan sitoutuu enemmän kosteutta välilämmityksen ansiosta. Kuvassa 8 on esitetty monivaihekuivauksen toimintaperiaate sekä Mollier-diagrammi. (9.)



KUVA 8. Monivaihekuivauksen prosessikaavio sekä ilman muutos Mollier-diagrammissa (9)

Ilman massavirran pieneneminen monivaihekuivauksessa ei tarkoita sitä, että kuivurin koko pienenisi, koska sama massavirta kulkee useamman vaiheen läpi. Puhaltimien sähkönkulutus saattaa myös nousta yksivaiheiseen kuivaukseen verrattuna, sillä kuivurin painehäviö kasvaa. Monivaiheisuus kuitenkin mahdollistaa sen, että voidaan käyttää matalampia lämpötiloja kuin

yksivaiheisella kuivauksella. Tämän ansiosta ilman massavirta pienenee, vaikka kuivauslämpötilaa ei nosteta. Monivaihekuivaukseen voidaan yhdistää myös esimerkiksi poistoilman lämmöntalteenotto, joka pienentää lämmönkulutusta. (9.)

## 6 KUIVAUSMENETELMIÄ

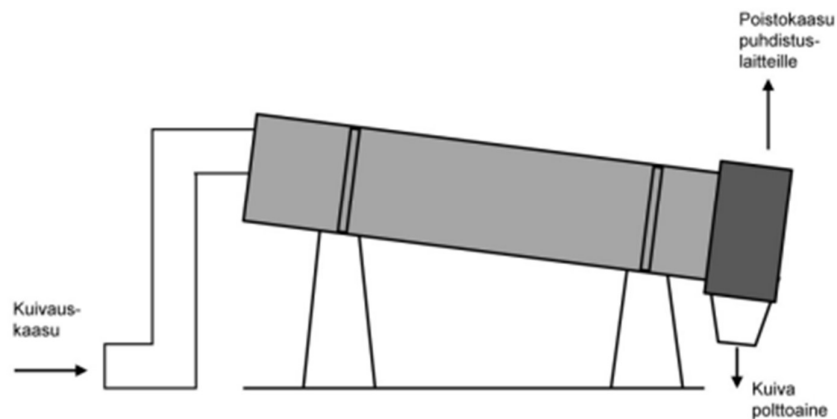
Kuivausmenetelmän valinta riippuu käytettävästä lämmönlähteestä, haihdutuskapasiteetista, halutusta loppukosteudesta ja kuivurille käytettävissä olevasta pinta-alasta. Kuivaus suoritetaan termisin menetelmin sekundäärilämpöä sekä höyryä hyödyntäen. Puun kuoren kuivaamiseen käytettäviä kuivureita ovat yleensä rumpukuivurit, viirakuivurit ja erilaiset kerroskuivurit. Niistä kerrotaan lisää seuraavissa luvuissa. (8.)

### 6.1 Rumpukuivaus

Rumpukuivurissa on hitaasti pyörivä rumpu, johon syötetään kuivattava polttoaine sekä kuivauskaasu. Rummun seinämällä on evämäiset levyt, jotka pudottavat kuivattavan polttoaineen kuivauskaasun läpi rummun alaosaan ja se on koko ajan liikkeessä. Rumpukuivurissa kuivaaminen on tehokasta, sillä lämmönsiirto on tehokasta kuivauskaasun ja polttoaineen välillä. (8.)

Kuivauskaasuna käytetään yleensä savukaasua. Se syötetään rummun sisään polttoaineen syöttöön nähden joko myötä- tai vastavirtaan. Rumpukuivurissa voidaan käyttää myös kuumaa ilmaa ja sitä varten kuivurin yhteydessä on oma polttolähde. Kuivauskaasun sisäänmeno lämpötila vaihtelee 200–600 °C:n välillä. (8.)

Rumpukuivauksen hyötyinä on suuri kuivauskapasiteetti ja joustavuus kuivattavan materiaalin alkukosteudessa sekä palakoossa. Viirakuivuriin verrattuna sen etuna on pienempi omakäytösähkön ja ominaisenergian kulutus sekä pienemmät huolto- ja kunnossapitokustannukset. Kuivurit ovat myös rakenteeltaan kompakteja ja yksinkertaisia. Haittana on kuivurin vaatima korkea lämpötila ja siitä aiheutuvat VOC- ja hajupäästöt sekä pölyäminen. Kuvassa 9 on esitetty rumpukuivurin periaate. (8.) Tämän korkean lämpötilan takia rumpukuivuri ei ole paras mahdollinen vaihtoehto Kaicell Fibers Oy:n tarpeeseen nähden.



KUVA 9. Rumpukuivurin periaatekaavio (8)

## 6.2 Viirakuivaus

Viirakuivuri on yleisin matalassa lämpötilassa toimiva kuivuryyppi. Sitä käytetään yleisesti biomassapolttoaineille, joita ovat sahanpuru, hake, kuori, bagassi sekä liete. (8.)

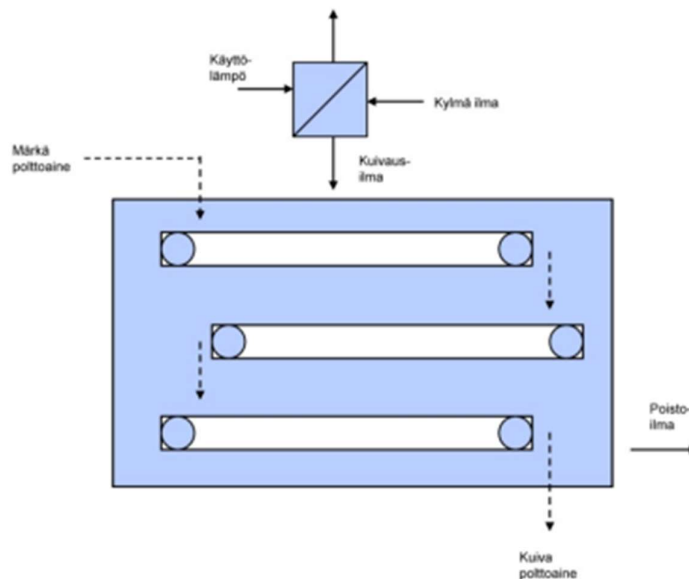
Viirakuivurissa hitaasti liikkuvalla viiralla levitetään syöttölaitteen avulla märkä polttoaine tasaisesti koko kuivaimen leveydelle. Polttoainepatjan paksuus on yleensä 0,1–0,2 m polttoaineen laadun mukaan. Patjan paksuus sekä polttoaineen jakautuminen vaikuttavat painehäviöön patjan yli. Tasaiseen loppukosteuteen vaikuttaa tasainen palakoko sekä patjan paksuus. Kuivuri voi olla yksi- kaksi tai monikerroksinen. (8.)

Lämmönsiirtimessä lämmitetään ulkoilmaa, joka johdetaan polttoainepatjan läpi joko ala- tai yläpuolelta. Yläpuolelta tulevassa ilmassa pölypäästöt on pienemmät verrattuna alhaalta tulevaan, mutta paine-ero on suurempi. Puhaltimien sijoittelulla voidaan vaikuttaa pölyämisen määrään, sillä imupuolelle sijoittaminen vähentää pölyvuotoja verrattuna painepuolelle sijoittamiseen. (8.)

Tyypillisesti ilma lämmitetään noin 80–120 °C:n, mutta voidaan käyttää myös alhaisempia tai korkeampia lämpötiloja. Maksimilämpötila määräytyy materiaalispesifisesti orgaanisten yhdisteiden päästöjen kasvun rajoittamana. Kuumia kaasuja, matalapainehöyryä tai kuumaa vettä voidaan käyttää ilman lämmitykseen. (8.)

Viiran materiaalina on yleensä kudottu polymeeriviira. Korkeissa lämpötiloissa voidaan käyttää muitakin materiaaleja kuten metallikudosviiroja. Viira pidetään puhtaana joko automaattisella harjalla tai ilmapuhdistuksella, jos käytössä on likaavampia polttoaineita, viira voidaan varustaa automaattisella vesipesurilla. (8.)

Etuna viirakuivurissa on sen soveltuvuus eri polttoaineille, korkea käytettävyys, sekundäärilämpöjen hyödyntäminen, kestävä ja yksinkertainen rakenne, helppo säädettävyys sekä esimerkiksi rumpukuivuria pienempi palovaarariski ja päästöt. Viirakuivurin heikkouksia ovat investointi- sekä huoltokustannukset, omakäytösähkön kulutus sekä tilantarve. Viirakuivuri on esitetty kuvassa 10. (8.)



KUVA 10. Monikerrosviirakuivurin periaatekaavio (8)

### 6.3 Kerroskuivaus

Kerroskuivauksessa kuivuminen tapahtuu ilmavirran vaikutuksesta, joka puhalletaan polttoainevirran läpi. Kiinteäkerroskuivauksesta puhutaan, kun ilmavirran nopeus pysyy alle kuivattavalle materiaalille ominaisen leijutusnopeuden eli peti pysyy liikkumattomana vertikaalisessa suunnassa. Kerros voi olla paikallaan, jolloin kuivaus tapahtuu panospetiperiaatteella tai asetettuna liukuvalla tasolla, jolloin prosessi on jatkuvatoiminen.

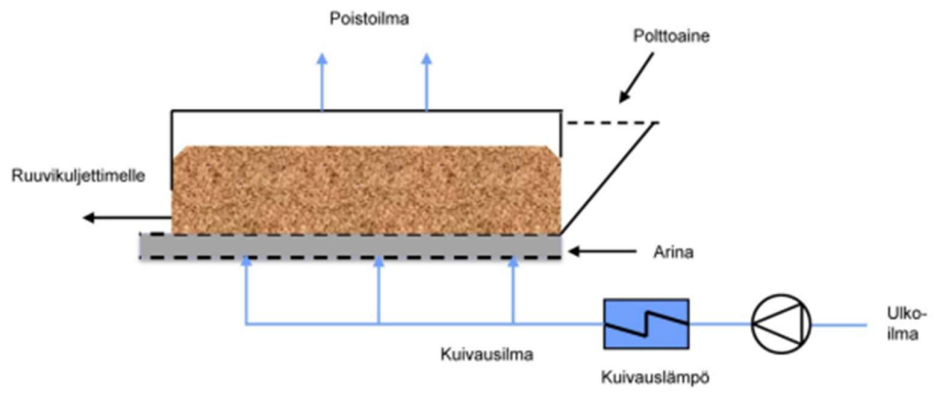
Painehäviön minimoimiseksi kerroksen ihanteellinen korkeus on 0,5–2 m. Paksumpi petikerros nostaa painehäviötä, joka lisää puhallintehon tarvetta. (8.)

Paikallaan oleva kuivaus tapahtuu esimerkiksi polttoaineen varastoinnin yhteydessä ulkona polttoainekentällä, polttoainesiilossa, kontissa tai jossain muussa varastotilassa. Ulkoilmassa tapahtuvan kuivauksen käyttö on rajoitettu pääasiassa keväälle, kesälle ja syksylle. (8.)

Liikkuvalle pedille toteutettu kuivaus vaatii vaakasuunnassa liikkuvan arinatasen, joka siirtää polttoaineen hitaasti esimerkiksi syöttösiilolle. Polttoaine siirretään arinatasolle joko kuljettimella tai kauhakuljettimella syöttötaskun kautta. Petikerroskuivurissa kuivausilma lämmitetään lämmönsiirtimellä saatavilla olevalla lämmönlähteellä ja syötetään arinatasen kautta polttoainepetiin. (8.)

Kerroskuivauksessa olennaista on polttoainepedissä ilman virtauksen optimaalinen jakautuminen ilmanjakojärjestelmän huolellisella suunnittelulla. Jotta saavutetaan tasainen loppukosteus, virtauksen tulee jakautua mahdollisimman tasaisesti polttoainepedissä. Ongelma polttoainekerroksen epätasaisuuden vuoksi on ilmavirran kanavoituminen, jonka takia polttoaine kuivuu epätasaisesti eli liian kuivaksi kanavoitumiskohdassa kuivumatta tarpeeksi muualla pedissä. (8.)

Yksinkertainen toimintaperiaate ja kohtuullisen pieni kokoluokka on kerroskuivausmenetelmille tyypillistä verrattuna muihin menetelmiin. Petikerroskuivurit soveltuvat myös matalalämpöiselle ylijäämälämmölle. Kerroskuivausmenetelmien investointikustannukset ovat matalammat kuin esimerkiksi viirakuivureilla, mutta kuivaustehokkuus ei ole niin hyvä. Kuvassa 11 on esitetty petikerroskuivuri. (8.)



KUVA 11. Petikerroskuivurin periaatekaavio (8)

## 7 KUIVAUSPROSESSIN LASKENTA

Kuivausprosessi lasketaan havun kuorelle koko vuoden ajalta. Kuivattava määrä havun kuorelle on 653 000 i-m<sup>3</sup>. Kuoren irtotiheys kosteana on 272 kg/i-m<sup>3</sup>:a ja se kuivataan 55 %:n kosteudesta 35 %:n kosteuteen ja kuivurin hyötysuhde olisi 70 %. Kuivaukseen käytettävän ylijäämäenergian lämpötila on 40 °C ja alla olevat laskut on laskettu tällä lämpötilalla. Kuivaamiseen käytetään kuitenkin myös höyryä.

Lasketaan kostean polttoaineen massa kuoren irtotiheyden sekä kuivattavan kuoren määrän avulla.

$$m_{\text{kok}} = 653\,000 \text{ i-m}^3 \times 272 \text{ kg/i-m}^3 = 177\,761\,111 \text{ kg}$$

Lasketaan kuivauksessa poistuvan veden määrä kaavalla 7 (10).

$$m_{\text{vesi}} = m_{\text{kok}} \times \left(1 - \frac{100 - w_1}{100 - w_2}\right) \quad \text{KAAVA 7}$$

jossa

$m_{\text{vesi}}$  = haihdutettava vesimäärä, kg

$m_{\text{kok}}$  = kokonaismassa alussa, kg

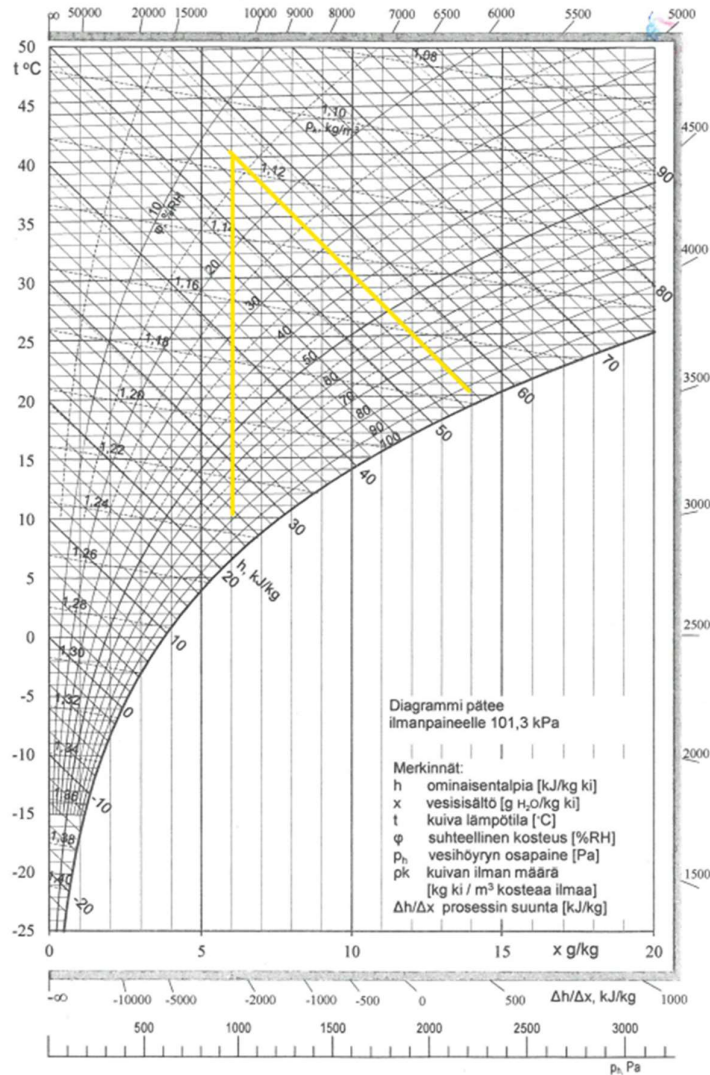
$w_1$  = alkukosteus, %

$w_2$  = loppukosteus %

$$m_{\text{vesi}} = 177\,761\,111 \times \left(1 - \frac{100 - 55}{100 - 35}\right) = 54\,695\,726 \text{ kg}$$

Tehdään Mollier-piirros kyseiselle prosessille, kun ilman lämpötila alussa on 10 °C ja suhteellinen kosteus 80 % ja lämpötila johon ilma lämmitetään, on 40 °C. Kuvassa 11 on esitetty Mollier-piirros.

LIITE 5. Kostean ilman Mollier-piirros 101,3 kPa



KUVA 12. Mollier-piirros kuivausprosessille

Taulukossa 2 on esitetty lähtöarvoja, joista osa saadaan Mollier-piirrokselta.

TAULUKKO 2. Lähtöarvot

ilman lämpötila alussa	$t_1$	10 °C
suhteellinen kosteus	$\phi_1$	80 %
vesihöyrypitoisuus	$x_1$	6 g/kg
entalpia pisteessä 1	$h_1$	25 kJ/kg
ilman lämpötila keskellä	$t_2$	40 °C
suhteellinen kosteus	$\phi_2$	90 %
tiheys	$\rho_2$	1,18 kg/m <sup>3</sup>
vesihöyrypitoisuus	$x_2$	6 g/kg
entalpia pisteessä 2 ja 3	$h_2, h_3$	56 kJ/kg
ilman lämpötila lopussa	$t_3$	21 °C
vesihöyrypitoisuus	$x_3$	14 g/kg
haidutuksen massavirta	$m_{\text{haidutus}}$	0,50 kg/s
yksi kuutio sitoo vettä	$\rho_3$	0,01 kg/m <sup>3</sup>

Lasketaan ominaishöyrystyslämpö eli, kuinka paljon tarvitaan energiaa kilogrammaa kohden kaavalla 8.

$$r = h_2 - h_1$$

KAAVA 8

$$r = 56 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 25 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 31 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Lasketaan, kuinka paljon energiaa kuluu yhtä kuutiota kohti kaavalla 9.

$$e = r \times \rho_2$$

KAAVA 9

$$e = 31 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \times 1,18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \approx 37 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$$

Lasketaan ilman tarve 40 °C:lle ilmalle, kun yksi kuutio sitoo vettä 0,01 kilogrammaa kuutiota kohden kaavalla 10.

$$V = \rho_3 \times m_{\text{vesi}}$$

KAAVA 10

$$V = 0,01 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 71\,104\,444 \text{ kg} \approx 5\,800\,000 \frac{\text{Mm}^3}{\text{a}}$$

Lasketaan energiankulutus kaavalla 11.

$$E = V \times e$$

KAAVA 11

$$E = 5\,800\,000 \frac{\text{Mm}^3}{\text{a}} \times 37 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \approx 214\,600\,000 \frac{\text{MJ}}{\text{a}}$$

Muunnetaan megajoulet kilowattitunneiksi jakamalla 3,6:lla.

$$E = \frac{214\,600\,000 \frac{\text{MJ}}{\text{a}}}{3,6} \approx 60\,000\,000 \frac{\text{kWh}}{\text{a}} = 60\,000 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}$$

Lasketaan syöttöenergian tarve kaavalla 12.

$$Q = \frac{E}{\eta}$$

KAAVA 12

$$Q = \frac{60\,000 \frac{MWh}{a}}{0,70} \approx 86\,000 \frac{MWh}{a}$$

Lasketaan kuivausilman tarve kaavalla 13 (9).

$$m_{ki} = \frac{m_{haindutus}}{x_3 - x_2}$$

KAAVA 13

$$m_{ki} = \frac{0,5 \frac{kg}{s}}{0,014 - 0,006} = 62,50 \frac{kg_{ki}}{s}$$

Lasketaan ominaislämmönkulutus kaavalla 14 (9).

$$q = \frac{(h_2 - h_1)}{(x_3 - x_2)}$$

KAAVA 14

$$q = \frac{56 \frac{kJ}{kg} - 25 \frac{kJ}{kg}}{0,014 - 0,006} = 3\,875 \frac{kJ}{kg_{H_2O}}$$

Energiantarve termiseen kuivaukseen on 1 kWh/1 kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub>, jolloin lämpöenergiatarve on noin 55 000 MWh.

Sähköenergian tarve syntyy pääasiassa puhaltimista, joiden kulutus on suuruusluokkaa 10 kWh/i-m<sup>3</sup>. Jolloin sähköenergian kulutus on 6530 MWh.

## 8 KUOREN KUIVAAMISEN KUSTANNUKSET

Kun havupuun kuori kuivataan, kuoresta poistuu vettä. Kosteaa kuori painaa enemmän, kuin kuivattu, joten kuljetuskustannukset pienenevät kuoren kuivaamisen ansiosta. Tässä kappaleessa on laskettu kuoren arvo, kuljettamisen kustannukset sekä arvio investointikustannuksista.

### 8.1 Kuoren arvo sekä kuljettamisen kustannukset

Laskelmissa on käytetty kuoren hintana polttolaitokselle toimitettuna 25 €/MWh, joka vastaa nykyistä markkinahintaa kuoresta. Ajoneuvokuorman tilavuutena on käytetty 120 i-m<sup>3</sup>. Kuoren määrä vuodessa on 80 000 t/a kuiva-aineena ja kuormien määrä vuodessa on 5442 kuormaa. Kuljetuksen hintana on käytetty 0,15 €/tonni/km ja kilometrimäärä, johon kuori kuljetetaan, on 40 km, joka vastaa Paltamon ja Kajaanin etäisyyttä toisistaan.

Kuoren lämpöarvo nousee kuivattaessa. 55 %:n kosteudessa olevan kuoren tehollinen lämpöarvo on 16,7 MJ/kg ja 35 %:n kosteudessa olevan kuoren tehollinen lämpöarvo on 18,5 MJ/kg. Näiden avulla saadaan laskettua, kuinka paljon energiaa eri kosteudessa oleva kuori, sekä niiden erotus eli arvon nousu.

Lasketaan, kuinka paljon energiaa saadaan 55 %:n kosteudessa olevasta kuoresta kaavalla 15.

$$E_1 = \frac{q_1 \times m}{3,6}$$

KAAVA 15

$$E_1 = \frac{16,7 \frac{MJ}{kg} \times 80\,000 \frac{t}{a} k. a}{3,6} \approx 371\,000 MWh$$

Lasketaan, kuinka paljon energiaa saadaan 35 %:n kosteudessa olevasta kuoresta kaavalla 16.

$$E_2 = \frac{q_2 \times m}{3,6}$$

KAAVA 16

$$E_2 = \frac{18,5 \frac{MJ}{kg} \times 80\,000 \frac{t}{a} k.a}{3,6} \approx 411\,000 \text{ MWh}$$

Näin ollen energiaa saadaan enemmän 40 000 MWh/a, kun kuori kuivataan 55 %:n kosteudesta 35 %:n kosteuteen.

Lasketaan kuoren lisäarvo euroissa.

$$411\,000 \text{ MWh} \times 25 \frac{\text{MWh}}{\text{€}} - 371\,000 \text{ MWh} \times 25 \frac{\text{MWh}}{\text{€}} = 1\,000\,000 \text{ €}$$

Kuoren kuivaamisella saadaan siis kuoresta miljoona euroa enemmän, mikä tekee kuoren kuivaamisesta kannattavaa arvon näkökulmasta.

Kuoren irtopaino 55 %:n kosteudessa on 272 kg/i-m<sup>3</sup> ja 35 %:n kosteudessa 188 kg/i-m<sup>3</sup>. Lasketaan 55 %:n kosteudessa sekä 35 %:n kosteudessa olevan kuoren yhden kuorman paino.

$$m_{kuorma55} = 272 \frac{kg}{i - m^3} \times 120 i - m^3 \approx 33 t$$

$$m_{kuorma35} = 188 \frac{kg}{i - m^3} \times 120 i - m^3 \approx 23 t$$

Kun kuoren määrä 55 %:n kosteudessa on noin 178 000 t/a kuiva-aineena ja 35 %:n kosteudessa noin 123 000 t/a kuiva-aineena, saadaan laskettua kuivaamisesta saatava kuljetuskustannuksellinen hyöty.

$$0,15 \text{ €} \times 40 \text{ km} \times 178\,000 \frac{t}{a} k.a - 0,15 \text{ €} \times 40 \text{ km} \times 123\,000 \frac{t}{a} k.a = 330\,000 \text{ €}$$

Näin ollen kuoren kuivaamisella saadaan säästettyä kuljetuskustannuksissa noin 300 000 euroa.

## 8.2 Investointi

Investoinnin kannattavuutta voidaan pohtia monelta kantilta. Kuivurin investointi vaikuttaa tehtaalla siten, että biomassakattilaa ei tarvittaisi lainkaan, sillä kuoren kuivaamisella kuori saadaan myytyä ulos. Sille on arveltu olevan arvokkaampaa käyttöä esimerkiksi kaukolämmön

tuotannossa. Tällöin säästetään biomassakattilan arvon verran. Kuoren kuivurin investointi on myös välttämätön meesauunin polttoaineen kuivaamisen takia. Työssä kuitenkin keskityttiin myyntiin menevän polttoaineen kuivaamiseen.

Kuivaus tapahtuu osittain ylijäämälämmöllä, jolloin kuivaukseen käyttämälle lämmölle ei tarvitse laskea kuin höyryn hinta. Se olisi noin puolet koko lämpöenergiatarpeesta eli 27 500 MWh. Höyryn hintana käytetään 10 €/MWh, joten tarvittavan energian hinnaksi saadaan 275 000 € vuodessa. Sähkön hintana käytetään 50 €/MWh, jolloin kuivauksessa käytetyn sähkön hinnaksi saadaan 326 500 € vuodessa. Kun kuoren lisäarvosta sekä kuljetuskustannuksien säästöstä vähennetään energian sekä sähkön hinnat, saadaan kuoren kuivaamisesta saatavat säästöt vuodessa. Näin laskettaessa säästöt ovat 728 500 € vuodessa.

Kuivausmenetelmäksi on valittu viirakuivuri, sillä sen kuivausilmana voidaan hyödyntää ylijäämäenergiaa ja se soveltuu hyvin myös esimerkiksi lietteen kuivattamiseen. Kaicell Fibers Oy:n prosessista syntyy myös lietettä ja sen kuivaaminen ja hyödyntäminen voisi olla tällöin mahdollista. Viirakuivuri on saatu laitevalmistajalta ja on malliltaan Stela BT 1/6200–25,5. Se on yksikerroksinen kuivuri ja sen viiran leveys on 6,2 m ja viiran pituus 25,5 m. Sen hinnaksi laitevalmistaja on antanut 1,65 M€. Toimitus ja asennus kyseiselle kuivurille maksaisi 350 000 €, joten kokonaishinnaksi kuivurille tulisi 2 M€. Kuivurin investointiin täytyy ottaa myös huomioon rakennuksen ja perustuksien tekeminen, tulo- ja poistokanavisto, lämmönsiirtimet, kuljettimet ja kuivatun kuoren silo sekä varastointi. Näiden yhteenlasketuksi hinnaksi arvioidaan 1,8 M€.

Investointi tehdään lainarahalla, jossa investoinnin korkotasona pidetään sijoittajien omalle pääomalle vaatimaa korkoa eli 5 %. Laina-aikana käytetään 20 vuotta.

Lainakustannukset on laskettu annuiteettilainamenetelmällä. Lasketaan maksuerä A kaavalla 17.

$$A = \frac{(1 + \frac{p}{100})^n \times \frac{p}{100}}{(1 + \frac{p}{100})^n - 1} \times N$$

KAAVA 17

jossa

p = korkokanta prosentteina

n = maksuerien määrä

N = lainasumma

Taulukossa 3 on laskettu investointikustannukset annuiteettilainamenetelmällä.

TAULUKKO 3. Lainakustannukset

ANNUITEETILAINA	
Investointikustannukset	3 800 000
Kiinteä korko	5 %
Laina-aika (kk)	240
Maksuerä (kk)	16 806
Maksuerä (vuosi)	201 675
Takaisinmaksettava summa	4 033 508
Kokonaiskorko	233 508

Takaisinmaksettavaksi summaksi tulee noin 4 034 000 € korkojen jälkeen ja maksuerä vuodessa on noin 202 000 €.

Takaisinmaksu aika lasketaan kaavalla 18.

$$TMA = \frac{I}{S}$$

KAAVA 18

jossa

I = investointi

S = vuotuinen säästö

Takaisinmaksuajaksi näin laskettuna 5,2 vuotta. Tällä takaisinmaksuajalla kuivurin investointi on järkevää tämän kokoluokan tehtaassa.

## 9 PÄÄSTÖT

Kuoren kuivauksessa huomattavimpia päästöjä ovat pölypäästöt, hajupäästöt, kiinteät hiukkaspäästöt (PM) sekä VOC-päästöt. Biopolttoaineet sisältävät luonnostaan VOC-yhdisteitä eli haihtuvia orgaanisia yhdisteitä. Näitä ovat esimerkiksi heksanoli, pentanoli ja monoterpeeni. Kyseiset yhdisteet ovat luonnollisesti vapautuvia metsistä sekä puun sisä- ja ulkovarastoinnista. (8.)

Ilmalla suoralla konvektiolla tapahtuvalle kuivaukselle ei tällä hetkellä ole sitovia päästörajoja. Vapautuvien päästöjen määrä kuitenkin kasvaa lämpötilan noustessa. Matalalämpötilaisessa kuivauksessa, joka on alle 100 °C:n tai varastoinnin yhteydessä päästöt ovat vähäisiä ja verrattavissa luonnollisiin päästöihin, sillä terminen hajoaminen on vähäistä. VOC-päästöjen on huomattu kasvavan noustessa korkeisiin lämpötiloihin, kuten yli 175 °C:n. Kuivausaika, kuivausilman määrä ja kuivauksen loppukosteus vaikuttavat myös VOC-päästöihin. Kuivattaessa kuorta alle 10 % kosteuteen päästöt kasvavat. (8.)

## 10 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää sellutehtaalla syntyvän kuoren kuivaamista ja kuivauksesta saatavia hyötyjä. Työssä keskityttiin kuoren arvon nousuun, kuoren kuivaamisesta aiheutuviin kustannuksiin, investointikustannuksiin sekä kuoren kuivaamisesta aiheutuviin päästöihin.

Työssä selvitettiin kuoren lämpöarvon nousua sekä näin taloudellisen arvon nousua kuivaamisella. Kuoren kuivaaminen lisää sen lämpöarvoa, jolloin sen taloudellinen arvo nousee. Kuoren kuivaaminen vähentää myös kuoressa olevaa veden määrää, jolloin sen kuljettaminen on halvempaa. Kuoren ajatellaan menevän myytäväksi polttoaineeksi kaukolämmön tuotantoon, joten kuoren kuljettaminen tulee halvemmaksi sen kuivaamisen ansiosta.

Kuori kuivataan käyttämällä ylijäämälämpöä, joka on taloudellisesta näkökulmasta ilmaista. Sen avulla kuorta saadaan kuivatettua ilmaisella energialla ja näin ollen saadaan kuori myyntiin ja tuottoa laitokselle. Investointikustannukset kuoren kuivurilla ei ole mahdolloman suuret verrattuna koko laitoksen hintaan ja sen hyötyihin nähden kuoren kuivaaminen on järkevää.

## LÄHTEET

1. Kaicell fibers Oy. 2023. Pitkäkuituista sellua pohjoisen metsistä. Hakupäivä 21.2.2023.  
<https://www.kaicellfibers.fi/home-fi>.
2. Pöyry Finland Oy. 2018. Ympäristövaikutusten selostus. Kaicell Fibers Oy Paltamon biojalostamo.  
[https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/KaiCell\\_Paltamon\\_biojalostamon\\_YVA\\_selostus.pdf](https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/KaiCell_Paltamon_biojalostamon_YVA_selostus.pdf).
3. Pöyry Finland Oy. 2017. Ympäristövaikutusten arviointiohjelma. Kaicell Fibers Oy Paltamon biojalostamo.  
[https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/KaiCell\\_Paltamon\\_biojalostamon\\_YVA\\_ohjelma.pdf](https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/KaiCell_Paltamon_biojalostamon_YVA_ohjelma.pdf).
4. Kuoren rakenne ja kemia. Puun rakenne ja kemia. Luento. Hakupäivä 7.3.2023.  
<http://puukemia.tkk.fi/opinnot/kurssit/19-1000/luennot/L12.pdf>.
5. Stora Enso. Ligniini. Ligniini – luonnollinen oma sideaine, jolla voidaan korvata fossiilisia materiaaleja. Hakupäivä 21.2.2023. <https://www.storaenso.com/fi-fi/products/lignin>.
6. Alakangas, Eija, Hurskainen, Markus, Laatikainen-Luntama, Jaana & Korhonen, Jaana. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT technology 258. Hakupäivä 7.3.2023. <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2016/T258.pdf>.
7. Helenius, Waltter. 2015. Kuoren energiasisällön säilyttäminen sellutehtaalla. Saimaan ammattikorkeakoulu. Prosessiteknikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Hakupäivä 7.3.2023.  
[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/95386/Helenius\\_Waltter.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/95386/Helenius_Waltter.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
8. Hankalin, Ville, Nummelin, Jaakko & Raiko, Markku. 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen. Polttoaineen kuivaustekniikat. Motiva. Hakupäivä 14.3.2023.  
[https://www.motiva.fi/files/13514/Ylijaamalammon\\_taloudellinen\\_hyodyntaminen\\_Polttoaineen\\_kuivaustekniikat.pdf](https://www.motiva.fi/files/13514/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Polttoaineen_kuivaustekniikat.pdf).
9. Holmberg, Henrik & Ramm-Schmidt, Leif. 2020. Kuivatus- ja haihdutusprosessit teollisuudessa. Hakupäivä 15.3.2023.  
[https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1193428/mod\\_resource/content/1/EEN-E3003%2C%20moniste%202020.pdf](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1193428/mod_resource/content/1/EEN-E3003%2C%20moniste%202020.pdf).
10. Hiitelä, Juha, Kauppinen, Veli-Pekka, Koisti, Olli-Pekka, Kouki, Jyrki, Lappi, Markku, Maunula, Lasse, Raitila, Jyrki, Viirimäki, Juha, Vilkkilä, Hannu, Vuorio, Kari & Wikberg,

Anders. 2014. Puupolttoaineen kuivuriopas. Suomen metsäkeskus. Hakupäivä 23.3.2023.  
[https://biobisnesta.fi/wp-content/uploads/2018/01/Puupolttoaineen\\_kuivuriopas.pdf](https://biobisnesta.fi/wp-content/uploads/2018/01/Puupolttoaineen_kuivuriopas.pdf).