

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
School of Energy Systems  
Energiatekniikka  
BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

# **BIOMASSAN ESIKÄSITTELYPROSESSIT ENNEN POLT- TOA VOIMALAITOKSELLA**

Biomass pre-treatment before combustion in power plant

Lappeenrannassa 27.8.2021  
Tiia Hallikainen

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto  
School of Energy Systems  
Energiatekniikka

Tiia Hallikainen

### **Biomassan esikäsittelyprosessit ennen polttoa voimalaitoksella**

Kandidaatintyö 2021

Tarkastaja: Jouni Ritvanen

Ohjaaja: Jouni Ritvanen

32 sivua, 1 taulukko ja 14 kuvaa

Hakusanat: biomassa, esikäsittelyprosessit

Bioenergian osuus uusiutuvan energian tuotannossa on merkittävä. Voimalaitoksilla bioenergiaa tuotetaan biomassaa polttamalla. Biomassan lähteitä on monia. Voimalaitoksilla käytettäviä biomassoja ovat puu-, pelto- ja jätebiomassat. Biomassojen luontaiset ominaisuudet aiheuttavat haasteita biomassan polttamisessa, minkä vuoksi biomassaa esikäsitellään ennen voimalaitosprosessia.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on esitellä biomassan esikäsittelyprosesseja ja tarkastella niiden vaikutuksia biomassan ominaisuuksiin. Työssä käydään läpi myös biomassan lähteet, biomassan ominaisuudet sekä biomassan poltto.

Biomassan esikäsittelyprosesseihin kuuluu kuivaaminen, hienonnutprosessit, pelletointi, huuhtelu ja torrefiointi. Usein biomassa käy läpi useamman esikäsittelyprosessin ennen voimalaitospoltttoa. Esikäsittelyprosessien tavoite on parantaa biomassan ominaisuuksia siten, että haasteet voimalaitospoltossa vähenevät.

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## SISÄLLYSLUETTELO

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO .....	5
2	BIOMASSA .....	6
2.1	Luonnonvaraiset biomassat .....	6
2.2	Jätebiomassat .....	7
2.3	Biomassan ominaisuudet .....	7
3	BIOMASSAN POLTTO .....	8
3.1	Yhteispoltto hiilen kanssa.....	9
3.2	Haasteet biomassan poltossa .....	10
4	ESIKÄSITTELYPROSESSIT .....	12
4.1	Hienonnus .....	12
4.2	Kuivaaminen.....	17
4.3	Pelletointi.....	24
4.4	Huuhtelu .....	27
4.5	Torrefiointi .....	28
5	YHTEENVETO .....	31
	LÄHDELUETTELO .....	33

## **SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO**

### **Roomalaiset**

$d_{50}$  kokojakauman mediaaniarvo

$d_{10}$  prosenttiosuus

$d_{90}$  prosenttiosuus

### **Lyhenteet**

BFBC Kupliva leijupoltto

CFBC Kiertoleijupoltto

CHP Yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto

EU Euroopan Unioni

HHV Ylempi lämpöarvo

PSD Partikkelikokojakauma

SPAN Partikkelikokojakauman leveys

## 1 JOHDANTO

Uusiutuvan energian merkitys energiantuotannossa kasvaa koko ajan. Euroopan unioni on asettanut tavoitteen, että vuoteen 2030 mennessä 32 % energian loppukulutuksesta katetaan uusiutuvilla energianlähteillä. Bioenergian osuus on merkittävä näiden tavoitteiden täyttymisessä. Vuonna 2016 bioenergian osuus energian loppukulutuksesta EU:ssa oli 10 % ja osuus muista uusiutuvista energianlähteistä lähes 60 %. (Scarlat et al. 2019.)

Bioenergiaa voidaan tuottaa polttamalla biomassaa voimalaitoksella. Biomassan raaka-ainevirtoja tulee monista lähteistä. Raaka-ainevirtoja ovat puu-, pelto- ja jätebiomassat. Puubiomassoilla on EU:ssa suurin merkitys bioenergian tuotannossa. (Scarlat et al. 2019.)

Biomassoilla on luontaisia ominaisuuksia, jotka tuovat haasteita niiden polttamiseen voimalaitoksella. Näihin ominaisuuksiin pyritään vaikuttamaan esikäsittelemällä biomassaa ennen polttamista. Biomassan esikäsitteilyyn on kehitetty monia tekniikoita, joilla pyritään muokkaamaan biomassan luontaisia ominaisuuksia, jotta haasteet voimalaitospoltossa vähenisivät.

Tässä työssä keskitytään esittelemään biomassojen esikäsitteilyprosesseja ja niiden vaikutuksia biomassan ominaisuuksiin, jotka ovat merkityksellisiä biomassan voimalaitospolton kannalta. Työssä ei vertailla tai tarkastella esikäsitteilyprosessien laatua, paremmuutta tai taloudellista kannattavuutta. Ensiksi työssä esitellään voimalaitospoltossa käytettäviä biomassoja ja tarkastellaan biomassojen ominaisuuksia. Seuraavaksi käsitellään tyypilliset biomassaa hyödyntävät polttotekniikat sekä käsitellään haasteita biomassan poltossa. Näiden jälkeen siirrytään käsittelemään esikäsitteilyprosesseja ja niiden vaikutuksia biomassan ominaisuuksiin.

## 2 BIOMASSA

Biomassa on luonnossa jatkuvasti syntyvää materiaalia. Biomassan luonnolliseen tuotantoon liittyvä tärkein biologinen prosessi on fotosynteesi. Biomassat voidaan luokitella ryhmiin monilla tavoilla. Tässä työssä biomassat luokitellaan luonnonvaraisiin biomassoihin ja jätebiomassoihin. Biomassoilla on monia ominaisuuksia, jotka tuovat haasteita niiden polttamiseen voimalaitoksella. Käsitellään seuraavaksi lyhyesti luonnonvaraiset biomassat ja jätebiomassat, jonka jälkeen käsitellään biomassan ominaisuuksia. Seuraavassa kappaleessa tutustutaan biomassaa hyödyntäviin polttoprosesseihin ja biomassan ominaisuuksien tuomiin haasteisiin polttoprosessissa. (Madanayake et al. 2017, Nzihou 2020, pp. 1–29.)

### 2.1 Luonnonvaraiset biomassat

Luonnonvaraisiin biomassoihin kuuluu puu-, pelto- ja vesibiomassat. Ne ovat lignoselluloosabiomassoja. Lignoselluloosabiomassat koostuvat pääasiassa hemiselluloosasta, selluloosasta ja ligniinistä. Luonnonvaraisiin biomassoihin voidaan käsittää kuuluvaksi myös elintarviketeollisuudessa jalostettavien hedelmien ja vihannesten tähteet, kuten oliivin kivet. (Nzihou 2020, Van Loo, Koppejan 2008, p. 54.)

Puu- ja peltobiomassat kattavat EU:ssa suurimman osan energiantuotantoon käytetystä biomassan raaka-aineesta (Scarlat et al. 2019). Puubiomassoista voidaan käyttää myös termiä energiapuu. Puubiomassat ovat yleensä puuta, joka ei kelpaa metsäteollisuudelle. Niitä ovat muun muassa oksat, kannot, karsimattomat kokopuut tai raivauspuut. Metsähake on yleis-termi energiakäyttöön tulevalle hakkeelle, riippumatta sen haketuspaikasta. Puubiomassavirtoja tulee myös puunjalostusteollisuudesta, esimerkkinä sahajauho sahateollisuudesta. Käytetty puu, kuten purkujätteet rakennustyömailta ovat myös puubiomassavirtojen lähteitä. Peltobiomassat ovat pelloilla kasvatettuja energiakasveja, kuten ruokohelpi tai viljantuotannon sivutuotteita, kuten olki. (Nzihou 2020, pp. 1–29, Motiva 2020a, Motiva 2020b.)

## 2.2 Jätebiomassat

Biomassaksi luokiteltavat jätteet ovat orgaanisia ja biologisesti hajoavia. Jätebiomassojen osuus biomassan raaka-ainevirtana bioenergian tuotannossa on ollut EU:ssa selkeästi pienempi verrattuna puu- ja peltobiomassoihin (Scarlat et al. 2019). Jätebiomassoihin kuuluu yhdyskuntajätteen orgaaniset osat, maatalouden jätteet ja teollisuuden jätteet. Maatalouden jätteisiin kuuluvat tässä tapauksessa muun muassa eläinten lanta ja teurasjätteet. Teollisuuden jätteisiin luokitellaan biologista alkuperää olevat jätteet, kuten öljyt ja rasvat. (Nzihou 2020, pp. 1–29, Motiva 2020b.)

## 2.3 Biomassan ominaisuudet

Biomassan lähteestä riippuen biomassan ominaisuudet voivat vaihdella laajallakin kirjolla. Yleisesti voidaan kuitenkin todeta, että biomassalla on korkea kosteusprosentti ja haihtuvien osuus, matala energia- ja massatiheys, matala lämpöarvo, hydrofiilinen luonne, kuituinen rakenne sekä vaihteleva koko ja muoto. Biomassa sisältää myös merkittävän määrän klooria, alkalimetalleja kaliumia ja natriumia, maa-alkalimetallia kalsiumia. (Niu et al. 2019, Ok et al. 2018, p. 4, Namkung et al. 2019.)

Biomassan kosteusprosentti voi olla 50–150 % (Pang, Mujumdar 2010). Korkea kosteuspiitoisuus johtaa matalampaan lämpöarvoon (Raitila, Tsupari 2020). Lämpöarvo kuvaa energiamäärää, joka vapautuu poltossa polttoaineen massayksikköä kohden (SFS-EN 15400: 2014, p. 10). Hydrofiilisuus tarkoittaa käytännössä sitä, että biomassa sitoo itseensä kosteutta varastoinnin aikana (Bach, Skreiberg 2016).

### 3 BIOMASSAN POLTTO

Bioenergian tuotanto perustuu suurelta osin biomassan polttamiseen. Biomassaa voidaan polttaa yksin biomassalle suunnitelluissa voimalaitoksissa tai yhdessä hiilen kanssa hiilivoimalaitoksissa. Biomassaa poltetaan voimalaitoksilla lämmön, sähkön ja CHP:n tuotantoon. Biomassan polttamiseen käytetyt polttamistekniikat voimalaitoksilla ovat arinapoltto, leijupoltto ja pölypoltto. Polttamistekniikat tarkoittavat sitä, minkälaisessa kattilassa biomassaa poltetaan. Arinapoltoissa käytössä on arinakattila, leijupoltossa leijupetikattila ja pölypoltossa pölykattila. Samat kattilatyypit ovat käytössä myös hiilen ja biomassan yhteispoltossa. (Scarlat, Fahl 2020, European Commission 2017.)

#### Arinapoltto

Arinalla polttaminen on yksinkertainen tekniikka biomassan polttamiseen, joka on käytössä 1–10 MWe tehoa tuottavissa voimalaitoksissa. Arinapoltoissa polttoaine poltetaan arinalla, jonka läpi virtaa ilmaa. Arina voi olla kiinteä tai liikkuva. Biomassapolttoaineille käytetään tyypillisesti viistoarinaa. Arinapolttoon soveltuu karkeampi polttoaine. (European Commission 2017, Scarlat, Fahl 2020.)

#### Leijupoltto

Biomassan leijupolttotekniikoihin kuuluu kupliva leijupoltto BFBC (Bubbling Fluidised Bed Combustion) ja kiertoleijupoltto CFBC (Circulating Fluidised Bed Combustion). Leijupoltto mahdollistaa polttoaineen laadun joustavuuden prosessissa eli biomassan kosteus ja tyyppi voivat vaihdella. BFBC on käytössä erityisesti vaihtelevan laatuisten biomassapolttoaineille pienemmissä kattiloissa. CFBC on yleisempi suuremmissa voimalaitoksissa. (European Commission 2017, Scarlat, Fahl 2020.)

Leijupoltossa polttoaine syötetään inertin leijutusmateriaalin joukkoon. Palamisilma syötetään leijupetikattilaan pohjalta ja ilman syöttönopeus pidetään sellaisena, että leijutusmateriaali pysyy leijuvana. Leijupetikattilassa polttaminen mahdollistaa korkeamman kosteuspiitoisuuden omaavan polttoaineen polttamisen leijutusmateriaalin stabiloivan vaikutuksen ansiosta. (European Commission 2017.)



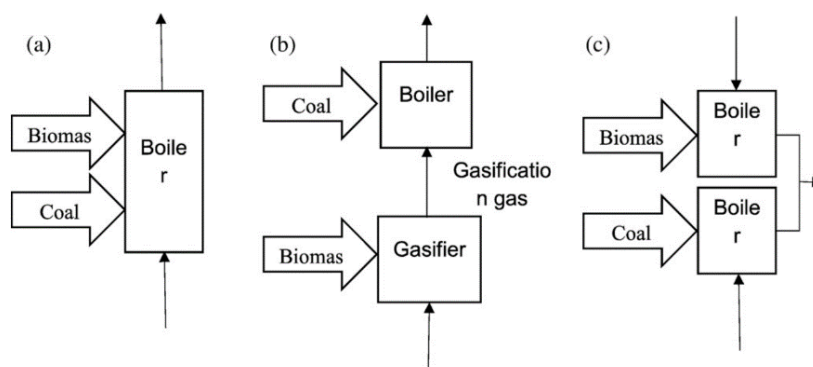
## Pölypoltto

Biomassan pölypoltto on alkanut yleistyä siinä vaiheessa, kun hiilivoimalaitoksia on ryhdytty muuntamaan biomassaa polttaviksi laitoksiksi 1990-luvun puolivälissä. Pölypoltto vaatii biomassan kuivaamisen ja hienontamisen hyvin pieniksi partikkeleiksi. Pölykattilassa pöly syötetään tulipesään pneumaattisesti kaasun kanssa seoksena suutinten läpi ja poltetaan palamisilmassa. Puuta käytetään pölypoltton polttoaineena. (European Commission 2017.)

### 3.1 Yhteispoltto hiilen kanssa

Biomassan yhteispolttoa hiilen kanssa pidetään houkuttelevana vaihtoehtona hiilen käytön vähentämiseksi ja biomassan polttamiselle jo olemassa olevissa hiilivoimalaitoksissa (Madanayake et al. 2017). Biomassan yhteispoltto on käytössä maailmalla monilla teknologioilla sekä biomassan raaka-aineilla kuten puu- ja peltobiomassoilla ja maatalouden satojen tähteillä. Yhteispolttolaitosten teho vaihtelee 50–700 MWe välillä. Yhteispoltossa hiilen kanssa on käytössä kolme erillistä konseptia: suora yhteispoltto, epäsuora yhteispoltto ja rinnakkainen yhteispoltto. (Scarlat, Fahl 2020.)

Suorassa yhteispoltossa biomassaa ja hiiliä syötetään yhteisistä tai erillisistä polttimista tulipesään. Epäsuorassa poltossa biomassaa kaasutetaan erillisessä kaasuttimessa, jonka jälkeen syntynyt tuotekaasu poltetaan hiilen kanssa samassa kattilassa. Rinnakkaisessa poltossa biomassaa ja hiiliä poltetaan erillisissä kattiloissa. (Madanayake et al. 2017.) Kuvassa 1 on esitetty yhteispoltton konseptit.



Kuva 1. Yhteispoltton konseptit. a) Suora yhteispoltto b) Epäsuora yhteispoltto c) Rinnakkainen yhteispoltto. (Madanayake et al. 2017.)

Suora yhteispoltto on vallitseva asetelma energiateollisuudessa tällä hetkellä (Madanayake et al. 2017). Sillä voidaan saavuttaa biomassalle noin 15 % osuus polttoaineesta pölypoltossa hiilen kanssa. Leijupoltossa biomassalle saadaan suurempi osuus. Biomassan esikäsittely torrefioimalla mahdollistaa jopa 50–80 % osuuden biomassalle suorassa yhteispoltossa. (Scarlat, Fahl 2020.) Torrefiointi on biomassan esikäsittelymenetelmä, jossa biomassaa kuumennetaan jäännöshiileksi. Torrefiointiin palataan tarkemmin kappaleessa 4.5.

### **3.2 Haasteet biomassan poltossa**

Biomassan ominaisuudet vaikuttavat polttoprosessiin (Van Loo, Koppejan 2008, p. 8). Merkittäviä ongelmia biomassan poltossa ovat likaantuminen, kuonaantuminen ja korroosio voimalaitoskattilassa. Biomassan sisältämät suuret määrät alkali- ja maa-alkalimetalleja johtavat matalampiin tuhkan sulamislämpötiloihin (Lee et al. 2021). Alkalimetallit ja maa-alkalimetallit reagoivat poltossa muiden epäorgaanisten epämetallien kanssa muodostaen kattilaan kerrostumia. Kerrostumien muodostuminen vaikuttaa negatiivisesti lämmönsiirtoon kattilassa, polttoaineen syöttöön ja tuhkan poistamiseen kattilasta. Kloori ja rikki muodostavat happamia yhdisteitä, jotka altistavat metallipinnat korroosiolle. (Madanayake et al. 2017.)

Kuonaantuminen (slagging) tapahtuu tulipesän lämmönsiirtopinnoilla ja tulistinpinnoilla, kun tuhka sulaa ja tarttuu pinnoille muodostaen sakkaa. Likaantumista (fouling) tapahtuu tulipesän jälkeisillä lämmönsiirtopinnoilla tai konvektiivisen lämmönsiirron alueella, kun alkaliyhdisteet kondensoituvat metallipinnoille ja lentotuhka jäähtyy alle sulamislämpötilansa ja sakkautuu. Erityisesti biomassan leijupoltolle ominainen ongelma on leijutusmateriaalin paakkuuntuminen biomassan tuhkan sulamisen takia. Leijupoltossa myös kuonaantuminen, likaantuminen ja korroosio ovat ominaisia ongelmia. (Madanayake et al. 2017.)

Biomassan korkea kosteuspitoisuus laskee palamislämpötilaa ja pienentää kattilan hyötysuhdetta. Matalamman palamislämpötilan seurauksena polttoaineen viipymäaika kattilassa kasvaa. (Van Loo, Koppejan 2008, p. 11, Verma et al. 2017.) Erityisesti pölypoltossa biomassan korkea kosteuspitoisuus aiheuttaa ongelmia polttoaineen pneumaattisessa syötössä (Madanayake et al. 2017). Biomassan vaihteleva rakenne vaikeuttaa biomassan

käytettävyyttä prosessissa. Hydrofiilinen luonne vaikeuttaa biomassan pitkäaikaista varastointia ja kuituinen rakenne lisää energiankulutusta hienonnuksessa. (Niu et al. 2019.)

Yhteispoltossa hiilen kanssa ongelmia aiheuttaa biomassan erilaiset ominaisuudet hiileen verrattuna. Biomassa sisältää suuremmat määrät happea ja haihtuvia aineita sekä sen tuhkassa on enemmän alkali- ja maa-alkalimetalleja kuin hiilellä. Biomassan sisältämä alkuaine hiilen määrä on myös pienempi. Biomassan vaihteleva koko ja muoto tuo haasteita hiilen ja biomassan sekoittuvuuteen yhteispoltossa. (Bach, Skreiberg 2016, Madanayake et al. 2017.)

## 4 ESIKÄSITTELYPROSESSIT

Aiemmin käsiteltiin biomassan ominaisuuksia ja todettiin haasteita, joita biomassan ominaisuudet aiheuttavat biomassan polttamisessa voimalaitoksella. Biomassan esikäsittelyllä ennen voimalaitospolttoa pyritään vaikuttamaan biomassan ominaisuuksiin siten, että haasteet poltossa vähenisivät ja biomassan hyödyntäminen helpottuisi biomassaa polttavissa voimalaitoksissa. Esikäsittelyllä pyritään myös tasalaatuistamaan biomassaa. Tasalaatuinen polttoaine on edellytys polttoprosessille. Se mahdollistaa syöttöjärjestelmän ja palamisprosessin automatisoinnin, mikä on tavallista nykyisissä polttojärjestelmissä. (Jewiarz et al. 2020.)

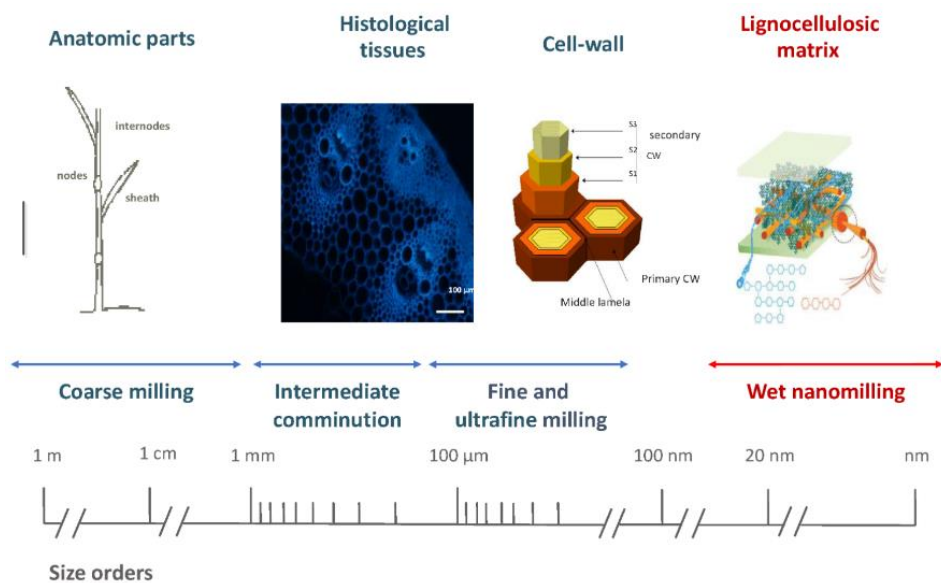
Yhteispolttoa ajatellen biomassan ominaisuudet pyritään esikäsittelyllä saamaan lähelle hiilen ominaisuuksia, jotta biomassaa on yhdistettävissä olemassa olevaan voimalaitosprosessiin vaivattomasti ilman merkittävämpiä muutoksia prosessissa (Madanayake et al. 2017). Tässä kappaleessa esitellään biomassan esikäsittelyprosesseja ennen biomassan polttamista voimalaitoksella. Tarkastellaan myös esikäsittelyprosessien vaikutusta biomassan ominaisuuksiin, jotka vaikuttavat voimalaitosprosessiin ja polttamiseen. Biomassan esikäsittelyprosessit voidaan jakaa mekaanisiin ja termisiin esikäsittelymenetelmiin sekä biomassan puhdistukseen. Osa esikäsittelyprosesseista yhdistelee näitä tapoja. Mekaanisista menetelmistä tässä työssä käsitellään hienonnusprosessit ja mekaaninen kuivaaminen. Termisistä menetelmistä käsitellään kuivaaminen ja torrefiointi. Käsitellään myös mekaanisia ja termisiä menetelmiä yhdistävä pelletointi. Huuhtelu on biomassan puhdistusmenetelmä. Käsitellään ensin hienonnusprosessit, jonka jälkeen kuivaaminen, pelletointi, huuhtelu ja viimeisenä torrefiointi.

### 4.1 Hienonnus

Hienonnusprosessit ovat mekaanisia esikäsittelyprosesseja. Biomassan hienonnuksella pyritään vaikuttamaan biomassan partikkelikokoon. Tavoiteltava biomassan partikkelikoko riippuu polttoprosessista, jossa biomassaa aiotaan polttaa. Erityisesti biomassan yhteispoltossa hiilen kanssa biomassan partikkelikoon tuominen lähemmäs hiilen partikkelikokoa parantaa biomassan sekoituvuutta hiilen kanssa sekä mahdollistaa hiilen ja biomassan seoksen tasaisemman palamisen (Madanayake et al. 2017).

Peltobiomassat usein käsitellään mekaanisesti ennen polttoa. Olkipaalit silputaan, leikataan tai hienonnetaan ennen polttokattilaan syöttämistä. Oljet, joita käytetään polttoaineena pölypolttoon, hienonnetaan vasaramyllyissä pölyksi. (European Commission 2017.)

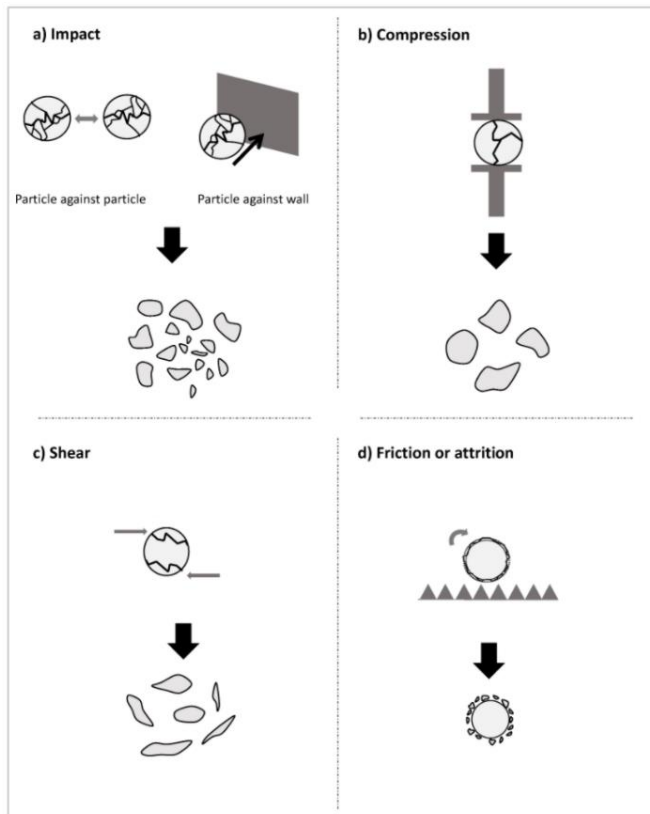
Hienonnuksprosessit voidaan luokitella eri vaiheisiin prosessissa tavoiteltavan partikkelikoon mukaan. Karkea hienonnuks (coarse milling) käsittää biomassan pienentämisen metriluokasta senttimetriluokkaan. Keskitason jauhatuks (intermediate milling) käsittää hienonnuksen senttimetreistä millimetreihin. Hienojauhatuksella (fine milling) päästään mikrometrien kokoluokkaan. (Mayer-Laigle et al. 2018) Kuvassa 2 on esitetty lignoselluloosabiomassan hienonnuksvaiheiden luokittelu metrisellä asteikolla sekä suhteutettuna mihin kasvin rakenteen osaan hienonnuksvaihe vaikuttaa. Kuvassa on esitetty vielä hieno- ja ultrahienojauhatuksen (ultrafine milling) jälkeen oleva märkä nanojauhatuks (wet nanomilling), jota ei käsitellä tässä työssä.



Kuva 2. Lignoselluloosabiomassan hienonnuksvaiheet. (Mayer-Laigle et al. 2018.)

Usein biomassa täytyy hienontaa useampaan kertaan ennen polttoa. Biomassa täytyy hienontaa biomassan tyypistä riippuen alle 1 mm tai alle 8 mm partikkelikokoon yhteispölypolttoa varten ja alle 10 mm partikkelikokoon yhteisleijupolttoa varten. Biomassan partikkelikoko on yhteispoltossa suurempi kuin hiilen, sillä biomassa on reaktiivisempaa kuin hiili. (Madanayake et al. 2017.)

Hienonnustekniikoita voidaan verrata niiden tuottaman mekaanisen rasituksen avulla. Eri-  
laisia mekaanisia rasitustapoja ovat: puristus, isku, leikkaantuminen, hankautuminen tai ku-  
luminen. Kuvassa 3 havainnollistetaan nämä erilaiset mekaaniset rasitukset hienonnuksmyl-  
lyissä. (Mayer-Laigle et al. 2018.)



Kuva 3. Mekaaniset rasitukset hienonnuksmyllyissä. (Mayer-Laigle et al. 2018.)

Lignoselluloosabiomassalle karkeaan hienonnuksvaiheeseen voidaan käyttää hienonnukspro-  
sesseja, jotka perustuvat leikkaamiseen tai murskaamiseen. Keskitason jauhatusta voidaan to-  
teuttaa leikkaamiseen tai iskuun perustuvilla prosesseilla ja hienojauhatusta voidaan toteut-  
taa iskuun, leikkaantumiseen tai hiertymiseen perustuvilla prosesseilla. (Mayer-Laigle et al.  
2018.)

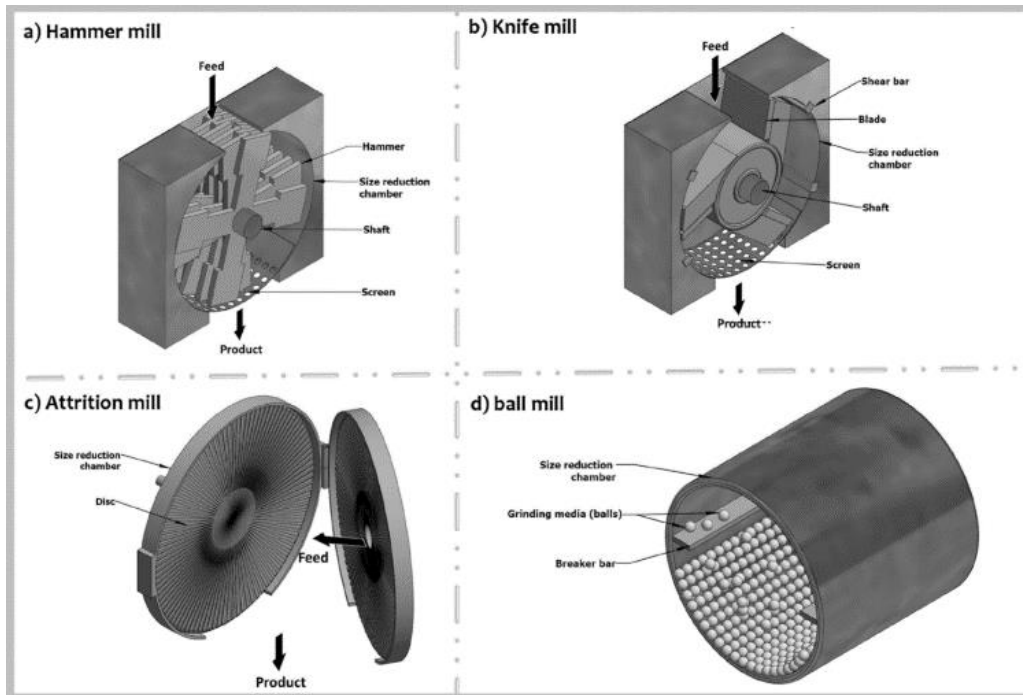
Hienojauhatuksella tuotetaan biomassasta pölyä pölypolttoa varten. Nykyään puupölyä käy-  
tetään pääasiassa yhteispoltossa hiilen kanssa. Lignoselluloosabiomassojen, kuten puubio-  
massojen hienojauhatusta voi käsittää kattamaan partikkelikoot 100  $\mu\text{m}$ –1 mm. Määritellyt  
hienonnuksprosessien partikkelikorajat vaihtelevat hieman riippuen tietolähteestä.

Kuitenkin 500  $\mu\text{m}$  on ehdotettu olevan raja hienojauhatuksessa biomassalle pölyn ja rakeisen materiaalin välillä. (Karinkanta et al. 2018.)

Hienojauhatusprosessit jaetaan kuivaan ja märkään jauhatukseen. Märkäjauhatuksella tarkoitetaan nesteen kaltaisesti käyttäytyvän aineen jauhatusta. Kuivajauhettava aine käyttäytyy enemmän kiinteän aineen tavoin. Kuivajauhatuksella saavutettavan partikkelikoon raja on 500  $\mu\text{m}$ . (Karinkanta et al. 2018.)

Hienojauhatus voidaan toteuttaa torrefioidulle biomassalle. Torrefioinnissa biomassaa käsitellään termisesti. Torrefiointi parantaa biomassan jauhatusominaisuuksia tehden siitä hauraampaa. Torrefioidun biomassan jauhatukseen vaadittava energia pienenee 80–90 %. Torrefioidun biomassan jauhatuksella saadaan pienemmän partikkelikoon tuotetta verrattuna torrefioimattoman biomassan jauhatukseen samoissa olosuhteissa. Torrefioidun biomassan ominaisuudet ovat hiilen kaltaisia ja hienojauhattuna saadaan hienoa pölyä. (Karinkanta et al. 2018.)

Vasaramyllyt ovat yleisimpiä bioenergiateollisuudessa käytettäviä hienonnusmyllyjä niiden monipuolisuuden ja suhteellisen matalan pääomakustannuksen vuoksi. Vasaramyllyt perustuvat pääasiassa iskun tuottamaan mekaaniseen rasitukseen. Veitsimyllyt perustuvat leikkaavaan vaikutukseen. Ne ovat kuitenkin harvemmin teollisuudessa käytettyjä, koska ne ovat herkempiä biomassan mukana tulevien epäpuhtauksien aiheuttamille vahingoille ja niillä on heikompi hienonnuskapasiteetti. (Oyedeji et al. 2020.) Kuvassa 4 on esitetty vasaramylly, veitsimylly, hankausmylly eli kiekkomylly ja kuulamylly.



Kuva 4. Erilaisia hienonnuksmyllyjä. (Oyedeji et al. 2020.)

Voimalaitoksella, jossa yhteispoltetaan hiiltä ja biomassaa pölykattilassa, hiili ja biomassaa voidaan hienontaa polttoa varten samassa tai erillisessä hienonnuksmyllyssä. Yleisin tapa on ollut hienontaa biomassaa ja hiili yhdessä, mutta nykyään on laajalti käytössä hiilen ja biomassan hienontaminen erillisissä hienonnuksprosesseissa. Erillisesti hienontaminen mahdollistaa hienonnuksmyllyn valinnan käytettävälle biomassalle. Tällöin hiilelle tarkoitettujen hienonnuksmyllyn ominaisuudet eivät rajoita voimalaitoksella poltettavan biomassan valintaa. (European Commission 2017.)

Tärkein ominaisuus, johon hienonnuksprosessit vaikuttavat on biomassan partikkelikokojakauma eli PSD (particle size distribution). Useilla tekijöillä voidaan kuvata partikkelikokojakaumaa. Yleisimmät ovat partikkelikokojakauman mediaaniarvo  $d_{50}$  ja prosenttiosuudet  $d_{10}$  ja  $d_{90}$ , mitkä kertovat minkä koon alapuolella on 10 %, 50 % tai 90 % kaikista partikkelikokojakauman partikkeleista sekä väli SPAN, jolla kuvataan partikkelikokojakauman leveyttä. (Mayer-Laigle et al. 2018.)

Partikkelikokojakaumaan vaikuttaa hienonnuksmyllyn tyyppi, biomassan rakenne ja hienonnuksprosessin parametrit, kuten viipymäaika. Partikkelikokojakauman avulla voidaan ennustaa hienonnetun biomassan virtavuutta. Laaja partikkelikokojakauma voi heikentää



virtaavuutta, mutta siitä on toisaalta hyötyä biomassan tiivistämisessä, kuten pelletoinnissa, johon palataan kappaleessa 4.3. (Oyedegi et al. 2020, Mayer-Laigle et al. 2018.)

Hienonnuksen prosessin aikana partikkelin muoto voi muuttua. Partikkelin muoto yhdessä partikkelin koon kanssa vaikuttaa suoraan biomassajauheen bulkin tiheyteen eli paljonko kiinteää ainetta on tietyssä tilavuudessa, ja reologisiin ominaisuuksiin eli virtausominaisuuksiin. (Mayer-Laigle et al. 2018.)

## 4.2 Kuivaaminen

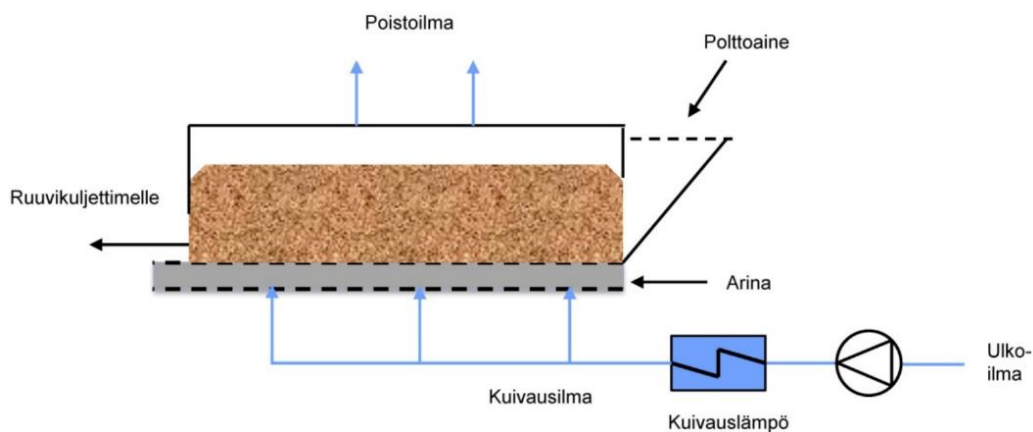
Biomassoilla on tyypillisesti matala energiatiheys verrattuna muihin perinteisiin fossiilisiin polttoaineisiin, mikä johtuu pääasiassa korkeasta kosteuspitoisuudesta (Verma et al. 2017). Biomassan kuivaamisella tähdätään voimalaitoksen hyötysuhteen parantamiseen (European Commission 2017). Kuivaustekniikat voidaan jakaa termiseen kuivaamiseen ja mekaaniseen kuivaamiseen. Termisissä menetelmissä käytetään lämpöenergiaa biomassan kuivaamiseen. Mekaanisissa menetelmissä käytetään mekaanista energiaa. Termiset menetelmät voidaan jakaa vielä suoriin ja epäsuoriin menetelmiin. Suorassa menetelmässä biomassa on suorassa kontaktissa kuivaavaan väliaineeseen kanssa, jolloin on kyse konvektiivisesta lämmönsiirrosta. Epäsuorassa kuivauksessa lämpö tuodaan kuivaustilan ulkopuolelle, josta se siirtyy johtamalla kuivattavaan biomassaan. Osa kuivauslaitteistoista hyödyntää sekä termistä että mekaanista energiaa. (Motiva 2014.)

Biomassan kuivaamiseen on olemassa useita eri teknologioita. Yleisimpiä biomassan termiseen kuivaamiseen käytettäviä laitteistoja ovat petikerroskuivain, rumpukuivain, pneumaattinen kuivain tai flash-kuivain, kiekkokuivain, viirakuivain ja leijupetikuivain. Kaikki mainitut kuivaimet vaativat kuivaavan väliaineen, joka voi olla kuumaa ilmaa, savukaasua tai tulistettua höyryä. (Verma et al. 2017.) Leijupeti-, pneumaattinen- ja flash-kuivain ovat suoraan termiseen menetelmään perustuvia kuivainlaitteistoja. Petikerros-, viira- ja rumpukuivain perustuvat myös suoraan termiseen menetelmään, mutta niissä hyödynnetään myös mekaanista energiaa. Kiekkokuivain hyödyntää epäsuoraa termistä menetelmää ja mekaanista energiaa biomassan kuivaamiseen.

Biomassan kuivaaminen vaatii energiaa. Aurinkoenergian hyödyntämistä kuivaamiseen vaadittavan energian tuottamiseen on tutkittu. Tällöin energiaa kuivaavan väliaineen lämmittämiseen tuotettaisiin aurinkoenergialla fossiilisten polttoaineiden sijasta tai yhdessä niiden kanssa. Khouya (2021) on tutkinut aurinkoilmakeräimen ja lämpöpumpun käyttämistä biomassan kuivausprosessissa ja vertaillut sitä aurinkoilmakeräintä ja kaasukondenssikattilaa käyttävään prosessiin. Tutkimuksessa todettiin lämpöpumppua ja aurinkoilmakeräintä hyödyntävän laitteiston olevan tehokas ratkaisu vähentämään kuivausprosessin energiankulutusta ja parantamaan biomassan kuivausprosessin termistä suorituskäkyä. Ylipäättään aurinkoilmakeräimen yhdistäminen kuivauslaitteistoihin tarjoaa tehokkaan ratkaisun tuottaa kuumaa ilmaa toivotuissa lämpötiloissa ja edullisemmin kustannuksin. (Khouya 2021.)

### **Petikerroskuivain**

Petikerroskuivaimessa on liikkuva arina, jolle märkä biomassa syötetään. Kuiva biomassa kerätään arinan toisesta päästä. Kuivausilma syötetään arinatason läpi biomassaan. Kuivausilman lämpötila on matala. Polttoaineen viipymäaika on kuivaimessa useita tunteja riippuen, kuinka kuivaa tuotteesta halutaan. (Verma et al. 2017, Motiva 2014.) Kuvassa 5 on esitetty petikerroskuivaimen toimintaperiaate. Kuvan petikerroskuivaimessa kuivausilma lämmitetään lämmönvaihtimessa ja polttoaineen syöttö tapahtuu syöttötaskun kautta arinalle.

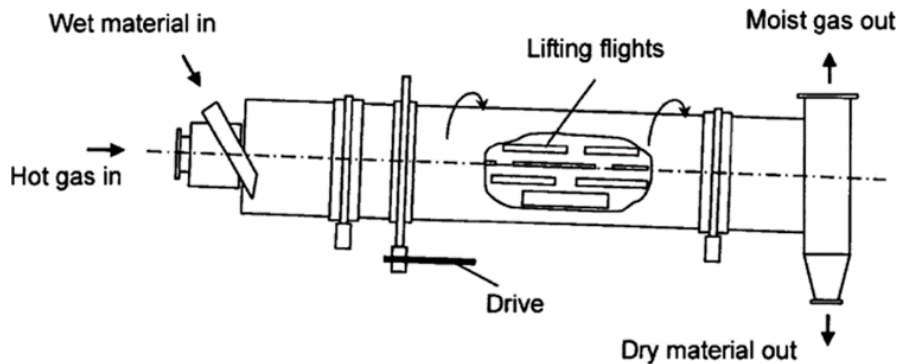


Kuva 5. Petikerroskuivaimen toimintaperiaate. (Motiva 2014.)

### **Rumpukuivain**

Rumpukuivaimessa biomassa pyörii hitaasti pyörivässä rummussa. Rummun sisällä olevat levyt nostavat biomassaa pyörinnän mukana, jolloin biomassa putoaa rummun yläosasta

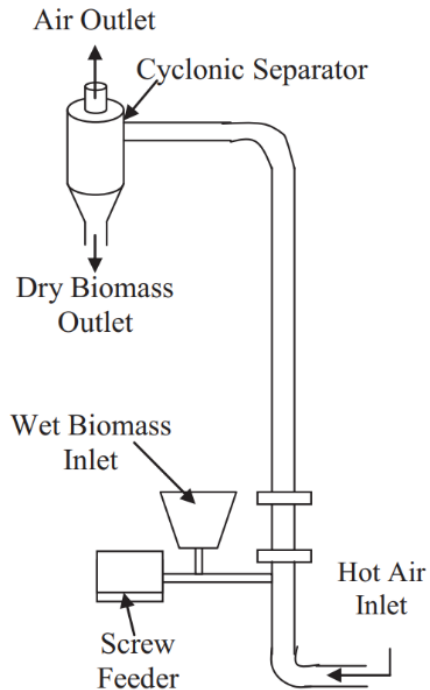
kuivauskaasun läpi alas. Kuivaava väliaine virtaa rummussa myötä- tai vastavirtaan biomassan kanssa. Biomassalle käytetään tyypillisesti myötävirtausta. Rumpukuivain voi olla jatkuvatoiminen, jolloin biomassan kosteuspitoisuutta ja lämpötilaa säädelään pyörimisnopeudella, sisääntulolämpötilalla ja kuivaavan ilman virtauksella. (Verma et al. 2017, Motiva 2014.) Kuvassa 6 on myötävirtaan toimiva rumpukuivain.



Kuva 6. Rumpukuivain. (Pang, Mujumdar 2010.)

### **Pneumaattinen- ja flash-kuivain**

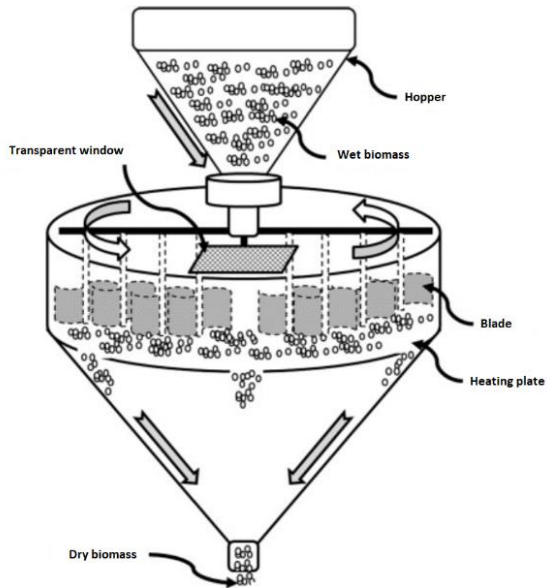
Pneumaattisten- ja flash-kuivainten toiminta perustuu biomassan syöttämiseen suurella nopeudella virtaavaan kuumaan kuivauskaasuun. Yleisesti kuivauskaasuna käytetään tulistettua höyryä. Biomassan ja kuivauskaasun suuren kontaktin vuoksi pneumaattisilla- ja flash-kuivaimilla saavutetaan lyhyet kuivausajat. Näissä kuivaimissa voidaan kuivata ainoastaan biomassaa, jolla on pieni partikkelikoko. Kuivaimen jälkeen on sykloni, jossa erotetaan kiinteät partikkelit ja kuivauskaasu toisistaan. (Verma et al. 2017.) Pneumaattisen kuivaimen periaatekaavio on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Pneumaattisen kuivaimen periaatekaavio. (Verma et al. 2017.)

### **Kiekkokuivain**

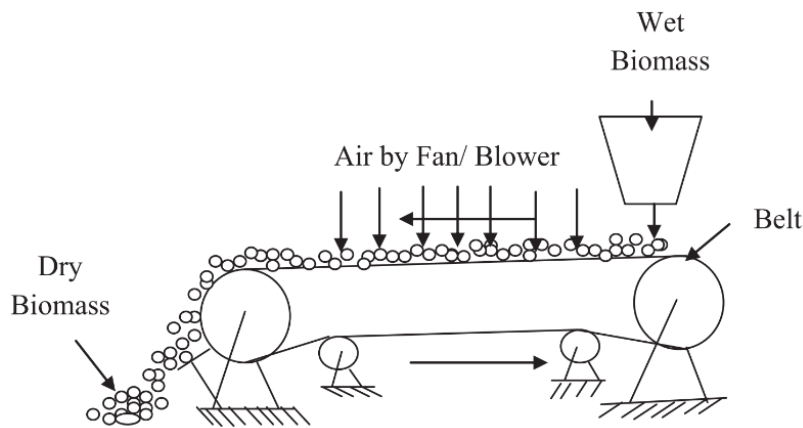
Biomassa syötetään kiekkokuivaimen keskelle ylhäältä päin. Kuivaimessa on vaakasuora lämmitetty levy, jonka päälle biomassa putoaa. Pyörivään roottoriin kiinnitetyissä tangoissa olevat lavat pyörivät ja levittävät biomassaa tasaisesti kuumalle levylle. Levyn kehällä olevat lavat pudottavat kuivan biomassan pois levyn kehältä suppiloon ja siitä ulos kuivaimesta. Levykuivain sopii pienelle materiaalivirrälle ja siinä voidaan käyttää levyn lämmittämiseen esimerkiksi öljyä, höyryä tai kuumaa vettä epäsuoran kuivausmenetelmän johdosta. (Moon et al. 2014, Verma et al. 2017.) Kuvassa 8 on periaatekuva kiekkokuivaimesta.



Kuva 8. Kiekkokuivaimen periaatekuva. (Verma et al. 2017.)

### Viirakuivain

Viirakuivaimessa biomassa syötetään jatkuvalla syötöllä liikkuvalle viiralle. Puhaltimilla puhalletaan kuivausilmaa viiralla liikkuvan biomassan läpi. Viirakuivain soveltuu matalan lämmön kuivaukselle, jolloin siinä voidaan hyödyntää esimerkiksi prosessin hukkalämpöä. Kuvassa 9 on periaatekaavio viirakuivaimesta. (Verma et al. 2017.)



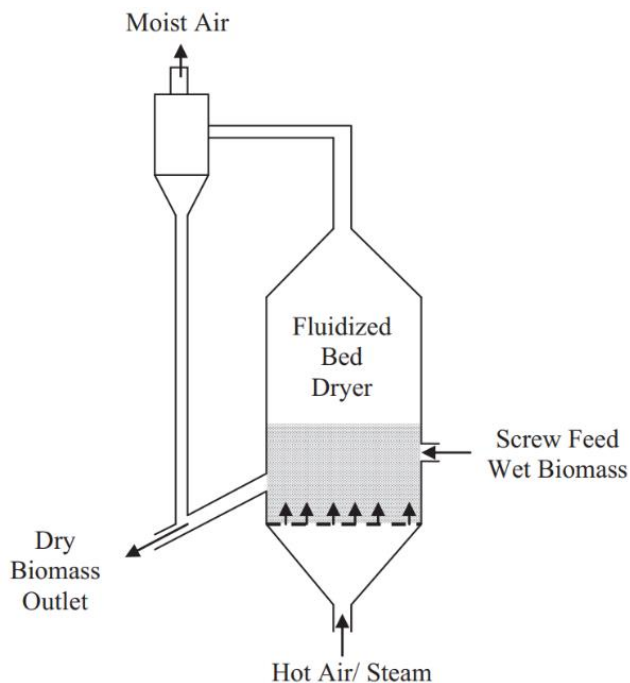
Kuva 9. Viirakuivaimen periaatekaavio. (Verma et al. 2017.)

### Leijupetikuivain

Leijupetikuivaimessa biomassaa leijutetaan kuivaimen syötetyn kuumen kuivauskaasun avulla. Kaasu syötetään alhaalta päin biomassaan ja sen syöttönopeus pidetään sellaisena, että biomassapartikkelit pysyvät leijuvana ja käyttäytyvät fluidin kaltaisesti.

Leijupetikuivaimessa voidaan kuivata mitä vain rakeista biomassaa. Leijupetikuivaimessa on lyhyt kuivausaika muun muassa korkean lämmönsiirron sekä kuivauskaasun ja kuivattavien partikkeleiden tiiviin kontaktin takia. (Verma et al. 2017.)

Biomassa voi fluidisoitua leijupetikuivaimessa huonosti, kanavoitua kuivauskammiossa tai ohittaa leijutusvaiheen. Leijupetikuivaimessa voidaan käyttää inerttiä leijutusmateriaalia, kuten hiekkaa estämään edellä mainittuja asioita. Leijutusta voidaan parantaa myös lisäämällä kuivaimeen tärkastystä tai syöttämällä kuivauskaasu pulsseissa (Jia et al. 2016). Kuvasssa 10 on esitetty leijupetikuivaimen periaatekaavio.



Kuva 10. Leijupetikuivaimen periaatekaavio. (Verma et al. 2017.)

### **Mikroaaltolämmitys**

Mikroaaltolämmitys on saanut huomiota viime vuosina biomassan kuivausmetodina. Mikroaaltolämmitystä ei varsinaisesti voi luokitella suoraan, epäsuoraan tai mekaaniseen kuivaukseen, sillä sen toimintaperiaate on erilainen. Mikroaaltolämmitys ei toimi perinteisen lämmityksen tavoin, jossa lämpö siirtyy johtumalla tai konvektiolla kappaleen pinnasta kohti kappaleen keskustaa, vaan mikroaaltolämmitys vaikuttaa kappaleen sisältä kohti ulkopintaa. (Kostas et al. 2017.)

Mikroaaltolämmityksessä hyödynnetään mikroaalloja, jotka ovat yksi sähkömagneettisen energian muoto. Mikroaallot ovat sähkömagneettisessa spektrissä 300–300 000 MHz välillä, aallonpituudella 1 cm–1 m. Mikroaaltolämmitys perustuu dielektriseen kuumennukseen. Mikroaaltolämmitys on nopeaa ja tehokasta, ja sillä saadaan aikaan tasainen lämpötilajakauma lämmitettävässä kappaleessa. Mikroaaltolämmitys soveltuu märille biomassoille. Mikroaaltolämmitystä voidaan hyödyntää myös torrefioinnissa. Mikroaaltolämmityksen hyödyntäminen ei ole kuitenkaan vielä päässyt kaupalliseen käyttöön asti, vaan lisää tutkimusta tarvitaan. (Kostas et al. 2017.)

### **Mekaaniset kuivausmenetelmät**

Mekaanisia kuivausmenetelmiä suositellaan käytettäväksi biomassoille, joiden kosteusprosentti on suurempi kuin 50 %. Mekaanisia kuivausmenetelmiä käytetään usein ennen termisiä menetelmiä. Mekaanisia kuivauslaitteistoja ovat suodattimet, prässit ja sentrifugit. Mekaanisia kuivausmenetelmiä on käytetty onnistuneesti yhdyskuntajätteelle, puulle ja puunkuorelle. (Rocha et al. 2021, European Commission 2017, Verma et al. 2017.)

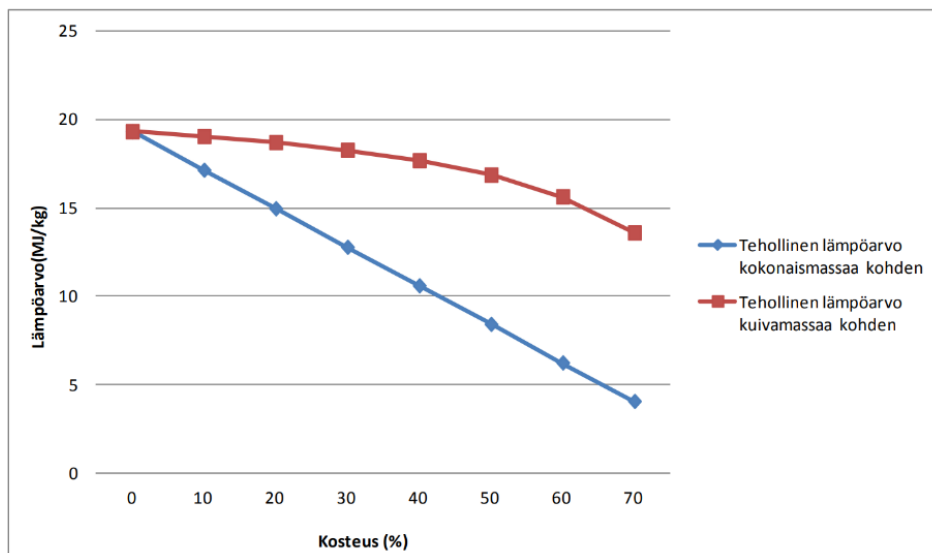
Prässeillä kuivatessa biomassan loppukosteuteen vaikuttaa tapa, jolla puristus toteutetaan. Puristus voidaan toteuttaa kertapuristuksena tietyllä paineella tai puristusta voidaan ylläpitää tietyn ajan. Puun loppukosteuspitoisuuteen todettiin Laurila et al. (2014) tutkimuksessa vaikuttavan pääasiassa vain maksimipuristusvoima. He totesivat puristuskuivaamisen olevan laboratorio-olosuhteissa nopea ja tehokas tapa kuivata puuta, mutta teollisessa mittakaavassa soveltamiseen tarvitaan vielä jatkotutkimuksia. (Laurila et al. 2014.)

### **Kuivaamisen vaikutukset**

Kuivaamisen seurauksena biomassan kosteuspitoisuus pienenee ja lämpöarvo kasvaa. Kun käytettävä polttoaine on kuivempaa, kuluu polttoaineen lämmöstä vähemmän palamisessa syntyvän veden höyrystämiseen (Motiva 2014). Tällöin biomassan voimalaitospoltossa palamisessa syntyvä lämpö saadaan hyödynnettyä palamisilman ja palamistuotteen lämmittämiseen, josta seuraa korkeampi liekin lämpötila. Korkeampi liekin lämpötila mahdollistaa suuremman säteilylämmönsiirron, jolloin höyryntuotanto voimalaitosprosessissa kasvaa. Korkeampi liekin lämpötila myös mahdollistaa täydellisemmän palamisen, joka vähentää päästöjä. Kuiva polttoaine mahdollistaa pienemmän ilmakertoimen eli tarvitaan vähemmän

ilmaa palamiseen. Tällöin lämpöhäviöt savukaasujen mukana pienenevät ja kattilahiöty-suhde kasvaa. (Verma et al. 2017.)

Lämpöarvon kasvu on keskeisin ominaisuuden muutos kuivausprosessin läpikäyneelle biomassalle. Kuivauksen seurauksena biomassan energiasisältö kasvaa, jolloin samalla biomassapolttoainemäärällä saadaan enemmän lämpötehoa tai voidaan korvata fossiilisia polttoaineita tai turvetta. (Motiva 2014.) Kuvassa 11 on esitetty puupohjaisen biopolttoaineen kosteuspitoisuuden vaikutus polttoaineen teholliseen lämpöarvoon. Kuvasta nähdään, että tehollinen lämpöarvo polttoaineen massaa kohden nousee lineaarisesti kosteuspitoisuuden pienentyessä.



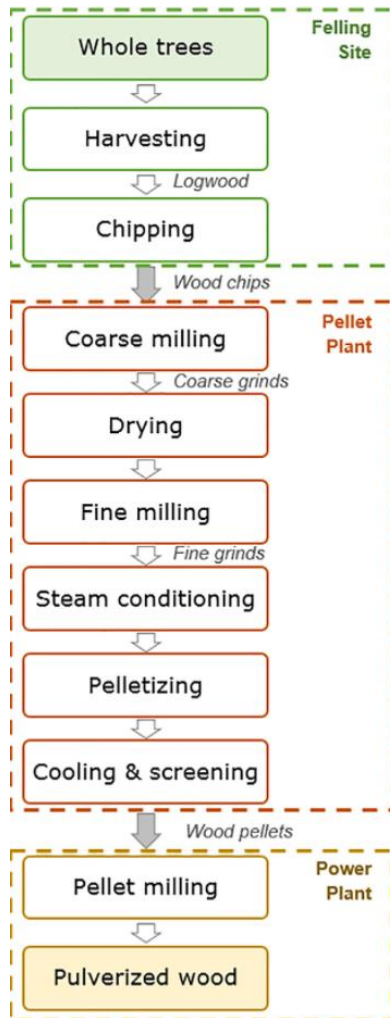
Kuva 11. Biopolttoaineen kosteuspitoisuuden vaikutus polttoaineen teholliseen lämpöarvoon. (Motiva 2014.)

### 4.3 Pelletointi

Pelletoinnin tavoitteena on tuottaa tasakokoista tiivistettyä biopolttoainetta (Scarlat, Fahl 2020). Monia eri biomassoja voidaan pelletoida, mutta yleisesti hyödynnettävä biomassaraaka-aine on puubiomassa metsätalouden jäännöksistä ja harvennuksista (European Commission 2017). Pelletointiprosessi yhdistää mekaanisia ja termisiä esikäsittelyprosesseja. Biomassan pelletointiprosessi alkaa biomassan partikkelikoon pienentämisellä. Puubiomassan tapauksessa puu ensin haketetaan, jonka jälkeen alkaa pelletointiprosessi. Pelletointiprosessiin kuuluu useampi biomassan hienonnisvaihe, kuivaus, pelletointi, jäähdytys ja



lajittelu. Kuvassa 12 on nähtävissä puubiomassan matka pelletiksi ja lopulta puupölyksi pölypolttoa varten. (Masche et al. 2019.)

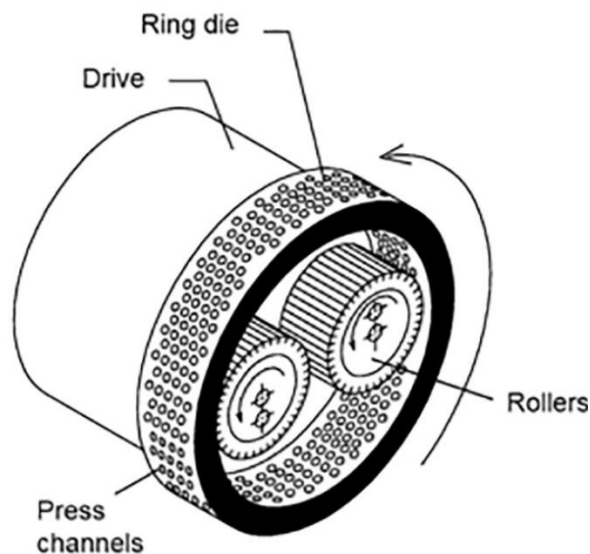


Kuva 12. Pelletointiprosessin päävaiheet (Masche et al. 2019.)

Biomassan hienonnus on tärkeää pelletointiprosessissa, koska se muuttaa biomassan partikkelikokoa, partikkelien muotoa, virtaavuutta ja bulkin tiheyttä. Partikkelikoon pieneneminen kasvattaa myös biomassan kokonaispinta-alaa, jolloin myös kontaktipinta-ala kasvaa. Pienemmät partikkelit parantavat pellettien vahvuutta ja kestävyyttä, ja mahdollistavat tiiviimpien pellettien tuotannon. Pelletointiprosessissa biomassaa ei kuitenkaan määräänsä enempää hienonneta hienonnusprosessin korkean energiankulutuksen vuoksi. (Masche et al. 2019.)

Vasaramyllyjä käytetään tyypillisesti pelletointiprosessissa biomassan hienontamiseen useassa eri vaiheessa. Puuhake hienonnetaan karkeasti vasaramyllyssä. Karkean hienonnusvaiheen tarkoituksena on saavuttaa homogeeninen materiaali, joka kuivaa tasaisesti kuivausvaiheessa. Kuivattu puuruuhe hienonnetaan edelleen vasaramyllyssä, josta se lajitellaan 4 mm seulan läpi, mitä tyypillisesti käytetään 6 mm kokoisten puupellettien valmistukseen. Hienonnuksen tavoitteena on saavuttaa haluttu partikkelikokojakauma eli PSD pelletointiin. (Masche et al. 2019.)

Hienonnusten jälkeen jauhatustuote käsitellään höyryllä, jolloin puun sisältämä ligniini pehmenee ja toimii luontaisena sidosaineen pelletissä. Jauhatustuote pelletoidaan pellettimyllyssä, jossa pyörivät rullat työntävät pelletit ”pursottimen” läpi. Lopulta pelletit jäädytetään ilmalla ja seulotaan pelleteitumattoman materiaalin varalta. Biomassapelletit, joita käytetään pölypolttoon hienojauhetaan pölyksi vasaramyllyssä ennen polttoa. (Masche et al. 2019) Kuvassa 13 on periaatekuva pellettimyllystä.



Kuva 13. Pellettimylly. (Masche et al. 2019.)

Pelletoidun biomassan energiatiheys on kasvanut, mikä johtaa biomassan helpompaan käsiteltävyyteen. Biomassapellettien kosteuspitoisuus pelletoinnin jälkeen on yleensä alle 10–15 %, jolloin erillistä kuivaamista pelletoinnin jälkeen ei yleensä tarvita. Biomassapellettien käyttö on kasvanut yhteispoltossa ja hiilivoimaloiden muuntamisessa biomassaa käyttäviksi voimalaitoksiksi. (European Commission et al. 2017.)

## 4.4 Huuhtelu

Huuhtelu on biomassan puhdistusmenetelmä, jolla pyritään vaikuttamaan biomassan koostumukseen siten, että biomassan tuhkan aiheuttamat haasteet kuonaantuminen, likaantuminen ja korroosio vähenevät voimalaitoskattilassa. Huuhtelun on osoitettu olevan tehokas esikäsittelymenetelmä poistamaan tuhkan aiheuttamia ongelmia tuottavia aineita. Biomassan huuhtelu voidaan toteuttaa luonnollisesti tai keinotekoisesti. (Madanayake et al. 2017, Namkung et al. 2019.)

Nykyään biomassan huuhtelumenetelminä suositaan luonnollisia huuhtelumenetelmiä (Wu et al. 2019). Luonnollinen huuhtelu toteutetaan jättämällä biomassa ulos sateen huuhdottavaksi. Esimerkiksi olkisadot säilytetään pelloilla jonkin aikaa sadonkorjuun jälkeen. Sade toimii luontaisena huuhtelutekniikkana vähentäen vesiliukoisten alkalien määrää oljen tuhassa. (European Commission 2017.)

Keinotekoisessa huuhtelussa voidaan käyttää vettä, heikkoa happoa tai vahvaa happoa. Heikko happo voi olla esimerkiksi etikkahappoa ja vahva happo suolahappoa, rikkihappoa tai typpihappoa. Huuhtelu voidaan toteuttaa suihkuttamalla huuhteluun käytettävää ainetta biomassan päälle, kaatamalla ainetta biomassan päälle tai upottamalla biomassa huuhtelussa käytettävään aineeseen tietyksi ajaksi. (Namkung et al. 2019, Madanayake et al. 2017.)

Peltobiomassoilla on suuret pitoisuudet kaliumia, klooria ja fosforia verrattuna puubiomasoihin, minkä vuoksi huuhtelun vaikutusta peltobiomassojen ominaisuuksiin on tutkittu runsaasti (Namkung et al. 2019). Huuhtelun seurauksena on tutkimuksissa todettu peltobiomassojen kokonaistuhkapitoisuuden pienenevän. Maa-alkalimetallin kalsiumin, alkalimetallin kaliumin, sekä kloorin ja rikin määrät vähenevät merkittävästi. Kaliumin määrä väheni eniten verrattuna muihin komponentteihin. Tuhkapitoisuuden pienentyessä ja tuhkan ongelmallisten aineiden osuuksien vähentyessä likaantumis- ja kuonaantumisalttius voimalaitoskattilassa pienenee. Peltobiomassoilla myös alkuaine hiilen ja haihtuvien aineiden osuus kasvaa huuhtelun seurauksena merkittävästi, jolloin myös peltobiomassapolttoaineen ylempi lämpöarvo eli HHV paranee hieman. (Wu et al. 2019, Singhal et al. 2021.)

## 4.5 Torrefiointi

Torrefiointi kuuluu termisiin esikäsittelymenetelmiin. Torrefioinnista on tullut viime vuosina kiinnostuksen kohde biomassan esikäsittelymenetelmänä. Torrefioinnin tarkoitus on tuottaa kiinteä biomassatuote, jolla on parantuneet ominaisuudet verrattuna alkuperäiseen biomassaan. Monien biomassojen torrefiointia on tutkittu. Puu- ja peltobiomassat ovat yleisimmin torrefioituja materiaaleja. Maatalouden jätteiden ja yhdyskuntajätteiden torrefiointia on myös tutkittu. Toistaiseksi torrefioinnin hyödyntäminen biomassan esikäsittelyprosessina on kaupallisesti vähäistä. (Niu et al. 2019, Chen et al. 2021.)

Torrefiointi on termokemiallinen prosessi, jossa biomassaa lämmitetään torrefiointireaktiorissa kuivassa tai märässä ympäristössä. Torrefiointiprosessit voidaan jakaa kuiva- ja märkätorrefiointiin. Kuiva torrefioinnissa biomassaa torrefioidaan inertissä tai vähäisen hapen vallitsemassa ympäristössä normaalipaineessa 200–300 °C määrätyn ajan. Inerttinä lämmityskaasuna käytetään tyypillisesti typpeä. Torrefiointiaika vaihtelee 10–240 minuuttiin. Kuiva torrefiointi vaatii biomassan esikuivaamisen ennen torrefiointia. (Chen et al. 2021.) Kuiva torrefioinnille on myös esitetty konsepti, jossa torrefiointi toteutettaisiin normaalipaineen sijasta korkeassa paineessa, mutta ei käsitellä sitä tässä työssä (Matyjewicz et al. 2020).

Märkä torrefioinnissa biomassaa torrefioidaan paineistetussa vedessä tai heikossa hapossa 180–260 °C. Märkä torrefioinnin torrefiointiaika on 5–240 min. Märkä torrefioinnissa biomassaa ei tarvitse esikuivata, mutta biomassaa on kuitenkin kuivattava torrefioinnin jälkeen. (Chen et al. 2021.) Taulukossa 1 on tiivistetty kuiva ja märkä torrefiointiprosessien erot.

Taulukko 1. Kuiva ja märkä torrefioinnin erot

	Kuiva torrefiointi	Märkä torrefiointi
Väliaine	Typrikaasu	Vesi tai heikko happo
Lämpötila	200–300 °C	180–260 °C
Aika	10–240 min	5–240 min
Paine	1 atm	1–200 atm
Kuivaus	Esikuivaus	Jälkikuivaus

Torrefioinnin yhteyteen linkittyy myös muita biomassan esikäsittelyprosesseja, biomassaa nimittäin tyypillisesti esikäsitellään jo ennen torrefiointia. Riippuen valitusta torrefiointiprosessista biomassaa hienonnetaan, kuivataan, pelletoidaan tai huuhdellaan ennen torrefiointia. Torrefioinnin jälkeen biomassaa kuivataan, pelletoidaan tai hienonnetaan ennen sen päätymistä voimalaitospolttoon. (Chen et al. 2021.)

Torrefiointiprosessissa lämmitysnopeus pidetään alle 50 °C/min (Basu 2018, p. 94). Torrefiointiprosessissa hyödynnetään suoraa tai epäsuoraa kuivausmenetelmää. Kuivaavana väliaineena voi toimia kaasu, neste tai kiinteä aine esimerkiksi torrefiointireaktorin seinä (Chen et al. 2021). Mikroaaltoja hyödyntävä torrefiointiprosessi on ollut tutkimuksen kohteena enenevässä määrin viime vuosina. Tällöin biomassaa kuumennetaan torrefiointireaktorissa mikroalloilla, jolloin biomassaa ei tarvitse kuivata ennen torrefiointia. Mikroalloilla kuumennettaessa voidaan saavuttaa vastaavat massa- ja energiasaannot pienemmällä teholla ja lyhyemmällä reaktioajalla verrattuna perinteisiin kuivausmenetelmiin. Mikroaaltolämmitystä voidaan soveltaa sekä kuiva- että märkä torrefioinnille. (Kostas et al. 2017.)

Torrefioinnin seurauksena biomassasta jää jäljelle kiinteä jäännöshiili. Jäännöshiilellä on alkuperäiseen biomassaan verrattuna parempi energia- ja massatiheys. Torrefioinnissa biomassaa kuivuu, jolloin sen kosteuspitoisuus pienenee. Veden haihtumisesta seuraa vedyn ja hapen osuuksien väheneminen biomassassa. Tällöin hiilen osuus suhteessa näihin kasvaa. Hiilen osuuden kasvun seurauksena lämpöarvo kasvaa. Jäännöshiilen alkuaine hiilen pitoisuus on kasvanut ja happipitoisuus pienentynyt. Torrefioidun biomassan ominaisuudet ovat

lähellä hiilen ominaisuuksia, mikä on hyödyllistä yhteispoltossa hiilen kanssa. (Niu et al. 2019, Lee et al. 2021, Madanayake et al. 2017.)

Torrefioidun biomassan hydrofiilisyys pienenee. Se on seurausta hydroksyyliyhymien vähenemisestä biomassassa torrefioinnin seurauksena. Hydrofiilisyys tarkoitti sitä, että biomassassa varastoinnin aikana absorboi itseensä vettä, jolloin sen kosteuspitoisuus kasvaa. Kun torrefioinnin seurauksena hydrofiilisyys vähenee, biomassapolttoainetta on mahdollista varastoida voimalaitoksella pidempiä aikoja. (Madanayake et al. 2017.)

Biomassan jauhattavuus ja virtaavuus paranevat torrefioinnin seurauksena, koska torrefiointi vaikuttaa biomassan rakenteeseen. Torrefioinnin aikana lignoselluloosabiomassan rakenneosasia hemiselluloosaa, selluloosaa ja ligniiniä hajoaa. Biomassan solurakenne muuttuu ja biomassasta tulee hauraampaa, ja partikkeleista tulee mikroskooppisella tasolla pienempiä ja pallomaisempia. Biomassan rakenteen muuttuessa myös biomassan väri muuttuu. Väri tummenee, mitä korkeampi on torrefioinnin lämpötila. Kuvassa 14 on esitetty puuhakkeen värinmuutos eri torrefiointilämpötiloissa yhtä pitkän torrefiointiajan jälkeen. (Madanayake et al. 2017, Niu et al. 2019.)



Kuva 14. Torrefioitua puuhaketta. (Phanphanich, Mani 2011.)

Haihtuvien aineiden vapautuessa torrefiointiprosessissa biomassasta tulee huokoisempaa. Huokoisuus yhdessä pienentyneen partikkelikoon ja pallomaisuuden kanssa johtaa suurempaan partikkelien kokonaispinta-alaan. Tällöin biomassan palamisominaisuudet paranevat, joka johtaa parempaan palamishyötysuhteeseen. (Niu et al. 2019, Madanayake et al. 2017.)

## 5 YHTEENVETO

Biomassan ominaisuudet tuovat haasteita biomassan polttamiseen. Biomassalla on tyypillisesti korkea kosteuspitoisuus, matala lämpöarvo, suuret määrät alkali- ja maa-alkalimetalleja, sekä klooria ja epäsäännöllinen koko ja muoto. Nämä johtavat voimalaitospoltossa matalampaan voimalaitoksen hyötysuhteeseen, kerrostumien muodostumiseen sekä vaikeuttavat biomassapolttoaineen käsiteltävyyttä voimalaitosprosessissa. Esikäsittelemällä biomassaa ennen polttamista pyritään parantamaan biomassan ominaisuuksia, jotta haasteet poltossa vähenevät. Yhteispolttoa ajatellen esikäsitteilyllä pyritään tuomaan biomassan ominaisuudet lähelle hiilen ominaisuuksia.

Biomassan esikäsitteilyä varten on kehitetty useita teknologioita, jotka jaetaan mekaanisiin, termisiin ja puhdistusmenetelmiin. Mekaanisiin menetelmiin kuuluvat hienonnusprosessit ja mekaaninen kuivaaminen. Termisiin menetelmiin kuuluvat terminen kuivaaminen ja torrefiointi. Huuhtelu on biomassan puhdistamista. Pelletoinnissa yhdistyy biomassan terminen ja mekaaninen esikäsitteily. Optimaalisen biomassapolttoaineen tuottamiseksi biomassaa voidaan esikäsitellä useita esikäsitteilymenetelmiä käyttäen. Erityisesti torrefiointiin yhteyteen voidaan yhdistää kaikki esikäsitteilymenetelmät: hienonnus, kuivaaminen, pelletointi ja huuhtelu.

Hienonnusprosesseilla vaikutetaan biomassan kokoon. Hienonnusprosessit jaetaan vaiheisiin hienonnuksessa saavutettavan partikkelikoon mukaan. Eri vaiheita ovat karkea hienonnus, keskitason jauhatus ja hienojauhatus. Hienonnusprosessien seurauksena saadaan tasalaatuista biomassapolttoainetta, jonka käsiteltävyys voimalaitosprosessissa on helpompaa.

Kuivaamisessa biomassan kosteuspitoisuus pienenee, jolloin biomassan lämpöarvo kasvaa ja kattilahyötysuhde paranee. Biomassan termiset kuivausprosessit voidaan jakaa edelleen suoraan ja epäsuoraan kuivaamiseen. Kuivaaminen sisältää useita teknologioita, joista yleisimmät ovat petikerroskuivain, rumpukuivain, pneumaattinen- tai flash-kuivain, kiekko-kuivain, viirakuivain ja leijupetikuvain. Biomassan mekaanisen kuivaamisen laitteistoja, kuten prässejä käytetään usein ennen termistä kuivaamista. Mikroaaltolämmitys on erilainen kuivaamistekniikka verrattuna perinteisiin termisiin ja mekaanisiin kuivausmenetelmiin. Se hyödyntää mikroaaltoja ja mahdollistaa biomassan nopean ja tehokkaan kuivaamisen.

Pelletoinnissa tuotetaan tasakokoista tiivistettyä biomassapolttoainetta. Pelletointiprosessin vaiheisiin kuuluvat kuivaaminen, hienontaminen ja biomassan tiivistäminen pellettimyllyssä. Pelletoitu biomassa on energiatiheämpää alkuperäiseen biomassaan verrattuna. Pelletointi helpottaa biomassan käsiteltävyyttä voimalaitoksella.

Huuhtelussa biomassaa käsitellään vedellä, heikolla- tai vahvalla hapolla. Huuhtelun seurauksena biomassan alkali- ja maa-alkalimetallien sekä kloorin määrät vähenevät. Tämän seurauksena biomassan aiheuttama kuonaantuminen, likaantuminen ja korrosio vähenevät voimalaitoskattilassa.

Torrefiointi on terminen esikäsittelymenetelmä. Torrefiointiprosessit jaetaan kuiva- ja märkä torrefiointiin. Torrefiointiprosessissa biomassaa kuumennetaan jäännöshiileksi. Torrefioidulla biomassalla on pienentynyt kosteusprosentti, parantunut lämpöarvo ja muuttunut rakenne. Torrefioidun biomassan ominaisuudet ovat myös lähellä hiilen ominaisuuksia, jolloin torrefioitu biomassa soveltuu hyvin yhteispolttoon hiilen kanssa.

Uusiutuvan energian tarve kasvaa koko ajan, jolloin myös biomassan hyödyntäminen voimalaitoksilla kasvattaa merkitystään. Esikäsittelyprosessit lisäävät biomassan käyttämisen potentiaalia uusiutuvan energian tuotantoon voimalaitoksilla. Biomassan esikäsittelymenetelmät ovat herättäneet paljon kiinnostusta, ja kirjallisuudesta löytyy tutkimuksia aiheesta laajalti. Lisää tutkimusta kuitenkin tarvitaan, jotta mahdollistetaan biomassan esikäsittelyprosessien laaja hyödyntäminen teollisessa bioenergian tuotannossa.



## LÄHDELUETTELO

BACH, Q. and SKREIBERG, Ø, 2016. Upgrading biomass fuels via wet torrefaction: A review and comparison with dry torrefaction. *Renewable & sustainable energy reviews*, **54**, pp. 665-677.

BASU, P., 2018. *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory*. London, England: Academic Press.

CHEN, W., LIN, B., LIN, Y., CHU, Y., UBANDO, A.T., SHOW, P.L., ONG, H.C., CHANG, J., HO, S., CULABA, A.B., PÉTRISSANS, A. and PÉTRISSANS, M., 2021. Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges. *Progress in energy and combustion science*, **82**.

EUROPEAN COMMISSION. 2017. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants. [verkkoaineisto]. Saatavissa: [https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/JRC\\_107769\\_LCPBref\\_2017.pdf](https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/JRC_107769_LCPBref_2017.pdf)

JEWIARZ, M., WRÓBEL, M., MUDRYK, K. and SZUFA, S., 2020. Impact of the Drying Temperature and Grinding Technique on Biomass Grindability. *Energies (Basel)*, **13**(13), pp. 3392.

JIA, D., BI, X., LIM, C.J., SOKHANSANJ, S. and TSUTSUMI, A., 2016. Biomass drying in a pulsed fluidized bed without inert bed particles. *Fuel (Guildford)*, **186**, pp. 270-284.

KARINKANTA, P., ÄMMÄLÄ, A., ILLIKAINEN, M. and NIINIMÄKI, J., 2018. Fine grinding of wood – Overview from wood breakage to applications. *Biomass & bioenergy*, **113**, pp. 31-44.

KHOUYA, A., 2021. Modelling and analysis of a hybrid solar dryer for woody biomass. *Energy (Oxford)*, **216**, pp. 119287.

KOSTAS, E.T., BENEROSO, D. and ROBINSON, J.P., 2017. The application of microwave heating in bioenergy: A review on the microwave pre-treatment and upgrading technologies for biomass. *Renewable & sustainable energy reviews*, **77**, pp. 12-27.

LAURILA, J., HAVIMO, M. and LAUHANEN, R., 2014. Compression drying of energy wood. *Fuel Processing Technology*, **124**, pp. 286-289.

LEE, B., SH, L., LEE, D. and JEON, C., 2021. Effect of torrefaction and ashless process on combustion and NOx emission behaviors of woody and herbaceous biomass. *Biomass & bioenergy*, **151**, pp. 106133.

MADANAYAKE, B.N., GAN, S., EASTWICK, C. and NG, H.K., 2017. Biomass as an energy source in coal co-firing and its feasibility enhancement via pre-treatment techniques. *Fuel Processing Technology*, **159**, pp. 287-305.

MASCHE, M., PUIG-ARNAVAT, M., JENSEN, P.A., HOLM, J.K., CLAUSEN, S., AHRENFELDT, J. and HENRIKSEN, U.B., 2019. From wood chips to pellets to milled pellets: The mechanical processing pathway of Austrian pine and European beech. *Powder Technology*, **350**, pp. 134-145.

MATYJEWICZ, B., ŚWIECHOWSKI, K., KOZIEL, J.A. and BIAŁOWIEC, A., 2020. Proof-of-Concept of High-Pressure Torrefaction for Improvement of Pelletized Biomass Fuel Properties and Process Cost Reduction. *Energies (Basel)*, **13**(18), pp. 4790.

MAYER-LAIGLE, C., BLANC, N., RAJAONARIVONY, R.K. and ROUAU, X., 2018. Comminution of Dry Lignocellulosic Biomass, a Review: Part I. From Fundamental Mechanisms to Milling Behaviour. *Bioengineering (Basel)*; *Bioengineering (Basel)*, **5**(2), pp. 41.

MOON, S., RYU, I., LEE, S. and OHM, T., 2014. Optimization of drying of low-grade coal with high moisture content using a disc dryer. *Fuel Processing Technology*, **124**, pp. 267-274.

MOTIVA. 2020a. Energiaa metsästä. [verkkoaineisto]. [viitattu 18.8.2021]. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/bioenergia/energiaa\\_metsasta](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/bioenergia/energiaa_metsasta)

MOTIVA. 2020b. Energiaa pelloilta. [verkkoaineisto]. [viitattu 18.8.2021]. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/bioenergia/energiaa\\_pelloilta](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/bioenergia/energiaa_pelloilta)

MOTIVA. 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen – Polttoaineen kuivaustekniikat. [verkkoaineisto]. [viitattu 4.6.2021]. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/10215/Yljaamalammon\\_taloudellinen\\_hyodyntaminen\\_Polttoaineen\\_kuivatustekniikat.pdf](https://www.motiva.fi/files/10215/Yljaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Polttoaineen_kuivatustekniikat.pdf)

NAMKUNG, H., LEE, Y., PARK, J., SONG, G., CHOI, J.W., KIM, J., PARK, S., PARK, J.C., KIM, H. and CHOI, Y., 2019. Influence of herbaceous biomass ash pre-treated by alkali metal leaching on the agglomeration/sintering and corrosion behaviors. *Energy (Oxford)*, **187**, pp. 115950.

NIU, Y., LV, Y., LEI, Y., LIU, S., LIANG, Y., WANG, D. and HUI, S., 2019. Biomass torrefaction: properties, applications, challenges, and economy. *Renewable & sustainable energy reviews*, **115**, pp. 109395.

NZIHOU, A., 2020. *Handbook on Characterization of Biomass, Biowaste and Related By-products*. 1 edn. Cham: Springer International Publishing.

OK, Y.S., TSANG, D.C.W., BOLAN, N. and NOVAK, J.M., 2018. *Biochar from Biomass and Waste: Fundamentals and Applications*. San Diego: Elsevier.

OYEDEJI, O., GITMAN, P., QU, J. and WEBB, E., 2020. Understanding the Impact of Lignocellulosic Biomass Variability on the Size Reduction Process: A Review. *ACS sustainable chemistry & engineering; ACS Sustainable Chem.Eng*, **8**(6), pp. 2327-2343.

PANG, S. and MUJUMDAR, A.S., 2010. Drying of Woody Biomass for Bioenergy: Drying Technologies and Optimization for an Integrated Bioenergy Plant. *Drying Technology*, **28**(5), pp. 690-701.

PHANPHANICH, M. and MANI, S., 2011. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresource technology; Bioresour Technol*, **102**(2), pp. 1246-1253.

RAITILA, J. and TSUPARI, E., 2020. Feasibility of Solar-Enhanced Drying of Woody Biomass. *Bioenergy research*, **13**(1), pp. 210-221.

ROCHA, T. de A. F., FERREIRA, M. do C. and FREIRE, J.T., 2021. Processing spent coffee ground powders for renewable energy generation: Mechanical dewatering and thermal drying. *Process Safety and Environmental Protection*, **146**, pp. 300-311.

SCARLAT, N., DALLEMAND, J., TAYLOR, N. and BANJA, M., 2019. Brief on biomass for energy in the European Union. Publications Office of the European Union. Luxembourg. [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC109354>

SCARLAT, N. and FAHL, F., 2020. Heat and Power from Biomass - Technology Development Report 2020. Publications Office of the European Union. Luxembourg. [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC123162>

SFS-EN 15400: 2014. Kiinteät kierrätyspoltoaineet. Lämpöarvon määrittäminen. Suomen standardoimisliitto SFS. [verkkoaineisto]. [viitattu 31.5.2021].

SINGHAL, A., KONTTINEN, J. and JORONEN, T., 2021. Effect of different washing parameters on the fuel properties and elemental composition of wheat straw in water-washing pre-treatment. Part 1: Effect of washing duration and biomass size. *Fuel (Guildford)*, **292**, pp. 120206.

VAN LOO, S. and KOPPEJAN, J., 2008. *The handbook of biomass combustion and co-firing*. London: Earthscan.

VERMA, M., LOHA, C., SINHA, A.N. and CHATTERJEE, P.K., 2017. Drying of biomass for utilising in co-firing with coal and its impact on environment – A review. *Renewable & sustainable energy reviews*, **71**, pp. 732-741.

WU, S., CHEN, J., PENG, D., WU, Z., LI, Q. and HUANG, T., 2019. Effects of Water Leaching on the Ash Sintering Problems of Wheat Straw. *Energies (Basel)*, **12**(3), pp. 387.