LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
Kemiantekniikan koulutusohjelma
Erotustekniikan laboratorio

Timo Vornamo

Esikäsittelyn vaikutus sahajauhon jauhautumiseen sekä energiankulutukseen vasaramyllyllä

Kandidaatintyö

Tarkastaja: Ritva Tuunila

Pvm: 4.12.2014

Tiivistelmä

Tekijä: Timo Vornamo

Nimi: Esikäsittelyn vaikutus sahajauhon jauhautumiseen ja energiankulutukseen vasaramyllyllä

Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Kemiantekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2014
30 sivua, 6 taulukkoa, 25 kuvaa,
Työn ohjaaja: Ritva Tuunila

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena oli perehtyä bioetanolin eri valmistusvaiheisiin ja sen valmistuksessa käytettäviin raaka-aineisiin sekä myöskin tutkia eri esikäsittelymenetelmien vaikutusta sahajauhojen jauhautumiseen sekä energiankulutukseen, kun niitä jauhetaan vasaramyllyllä.

Kirjallisuusosassa keskityttiin paljon aineksen hienonnukseen, sillä varsinkin biomassat tulee hienontaa, jotta halutut kemialliset reaktiot saataisiin tapahtumaan riittävän tehokkaasti. Kokeellisessa osassa tutkittiin eripituisien vesiliotuksien sekä emäs-käsittelyn vaikutusta sahajauhon jauhautumiseen sekä jauhautumisen energiankulutukseen, kun niitä jauhettiin vasaramyllyllä. Tutkimuskysymyksinä tässä työssä oli: Miten vesiliotus sekä liotus emäksisessä liuoksessa vaikuttaa eri sahajauhojen jauhautumiseen vasaramyllyllä?, Millaisia vaikutuksia esikäsittelyillä on myllyn energiankulutukseen?, Miten esikäsittelyt vaikuttavat jauhautumistuotteiden partikkelikokoihin?.

Tuloksista käy ilmi, että 1. ja 3. tunnin vesiliotukset eivät olleet riittäviä sillä mylly ei jaksanut jauhaa minkään puulaadun sahajauhoja näillä ajoilla. Yleisesti tuloksista huomattiin, että haapajauhon jauhamiseen kului kaikkein eniten energiaa, riippumatta esikäsittelytekniikasta, mutta haapa myös jauhautui parhaiten pH-esikäsittelyn tuloksena.

Abstract

Author: Timo Vornamo

Title: The impact of pretreatment on grinding and energy consumption of sawdust when grinding with hammermill

Lappeenranta University of technology

Faculty of technology

Department of chemical engineering

Bachelor's thesis 2014

30 pages, 6 tables, 25 figures

Supervisor: Ritva Tuunila

The purpose of this bachelor's thesis was to get acquainted with different steps of bioethanol producing and used raw materials and also get to know the impact of different pretreatment methods on grinding and energy consumption of sawdust when grinding with hammermill.

The literature part concentrated on the grinding of materials, because especially biomaterials has to be fined in order to get the chemical reactions to happen efficiently enough. In the experimental part, studies were made about the impacts of diffferent durations of water-soaking and base-soaking on grinding and energy consumption of sawdust when grinding with hammermill. The research questions in this work were: How does water-soaking and handling with a base liquid impact on the grinding of different sawdusts when grinding them with a hammermill? What kind of impacts does the different pretreatments have on the energy consumption of he hammermill? How does the pretreatments effect on the paticle sizes of the grinding products?.

The results show that one and three hour watersoakings were not enough, because the hammermill could not grind any sawdusts with these soaking durations. Generally the results show that the grinding of aspen sawdust consumed the most energy despite the used pretereatment method. But the aspen sawdust also grinded the best after handled with a base.

Sisällys

I Kirjallisuusosa 1
1 Johdanto 1
2 Bioetanoli 2
2.1 Bioetanolin raaka-aineet 2
2.2 Bioetanolin valmistus 3
3.1 Materiaalin murskaus 7
3.1.1 Leukamurskaimet 7
3.1.2 Kartiomurskaimet 7
3.1.3 Valssimurskain 8
3.1.4 Iskumurskain 9
3.1.5 Erikoismurskaimet 9
3.2 Materiaalin jauhatus 10
3.2.1 Tankomyllyt 11
3.2.2 Kuulamyllyt 11
3.2.3 Autogeenimyllyt 12
3.2.4 Vasaramyllyt 12
3.2.5 Valssimyllyt 13
3.2.6 Erikoismyllyt 14
3.2.7 Biomassojen jauhatus 15
4 Biomassojen esikäsittelymenetelmät 16
4.1 Kemialliset esikäsittelytekniikat 16
4.2 Yhdistetty kemiallinen ja mekaaninen esikäsittely 18
II Kokeellinen osa 19
5 Työn tarkoitus 19
6 Koelaitteisto ja mittausten suoritus 19
7 Mittausten tulokset 22
7.1 Sahajauhon jauhautuvuus 23
7.2 Jauhatuksen energiankulutus 24
8 Johtopäätökset 27
Lähteluettelo 29

I Kirjallisuusosa

1 Johdanto

Bioetanolin käytön yleistyessä maailmalla, sen valmistustekniikoihin sekä varsinkin mahdollisiin uusiin raaka-aineisiin on syytä paneutua. Bioetanolin käytön lisääntymistä selittää tiukentuneet liikenteen päästörajoitukset sekä myöskin halu vähentää öljyriippuvuutta [1]. Tutkimuksia uusista mahdollisista raaka-aineista on tehty paljon ja nykyään keskitytään suuresti lignoselluloosaa sisältäviin bioetanolin raaka-aineisiin. Syynä tähän on se, että ne eivät kilpaile ruoantuotannon kanssa, sekä myös niiden saatavuus on helppoa ja runsasta. Lignoselluloosa-pitoisia raaka-aineita on esimerkiksi puuteollisuudesta syntyvät sivuvirrat eli hakkeet sekä sahajauhot. Ennen, esimerkiksi sahajauhon, hyödyntämistä bioetanolin valmistuksessa, on se hienonnettava, jotta tarvittavat kemialliset reaktiot saataisiin tapahtumaan riittävän tehokkaasti.

Tämän kandidaatin työn tarkoituksena on tutkia eri esikäsittelytekniikoiden vaikutusta kolmen eri sahajauhon jauhautumiseen sekä jauhatuksen käyttämään energiankulutukseen, kun jauhoja jauhetaan vasaramyllyllä. Työ koostuu kirjallisuusosasta sekä kokeellisesta osasta.

Kirjallisuusosa koostuu kolmesta pääluvusta joista ensimmäisessä tutustutaan bioetanolin käyttöön, sen valmistuksessa käytettäviin raaka-aineisiin sekä eri valmistustekniikoihin. Toisessa luvussa esitellään materiaalien hienonnukseen käytettäviä murskaimia sekä erilaisia jauhatukseen käytettäviä myllyjä. Viimeinen luku keskittyy biomassojen eri esikäsittelytekniikoihin sekä niiden toimintaperiaatteisiin.

Kokeellisen osan tarkoituksena on tutkia eri käsittelytekniikoiden vaikutusta sahajauhojen jauhautumiseen sekä energian kulutukseen, kun jauhoja jauhetaan vasaramyllyllä. Esikäsittelytekniikoiksi tässä työssä valittiin vesiliotukset sekä liottaminen emäksisessä aineessa.

Tutkimuskysymykset, joihin tämä kandidaatintyö pyrkii vastaamaan on listattu alle:

1. Miten vesiliotus sekä liotus emäksisessä liuoksessa vaikuttaa eri sahajauhojen jauhautumiseen vasaramyllyllä?
2. Millaisia vaikutuksia esikäsittelyillä on myllyn energiankulutukseen?
3. Miten esikäsittelyt vaikuttavat jauhautumistuotteiden partikkelikokoihin?

2 Bioetanoli

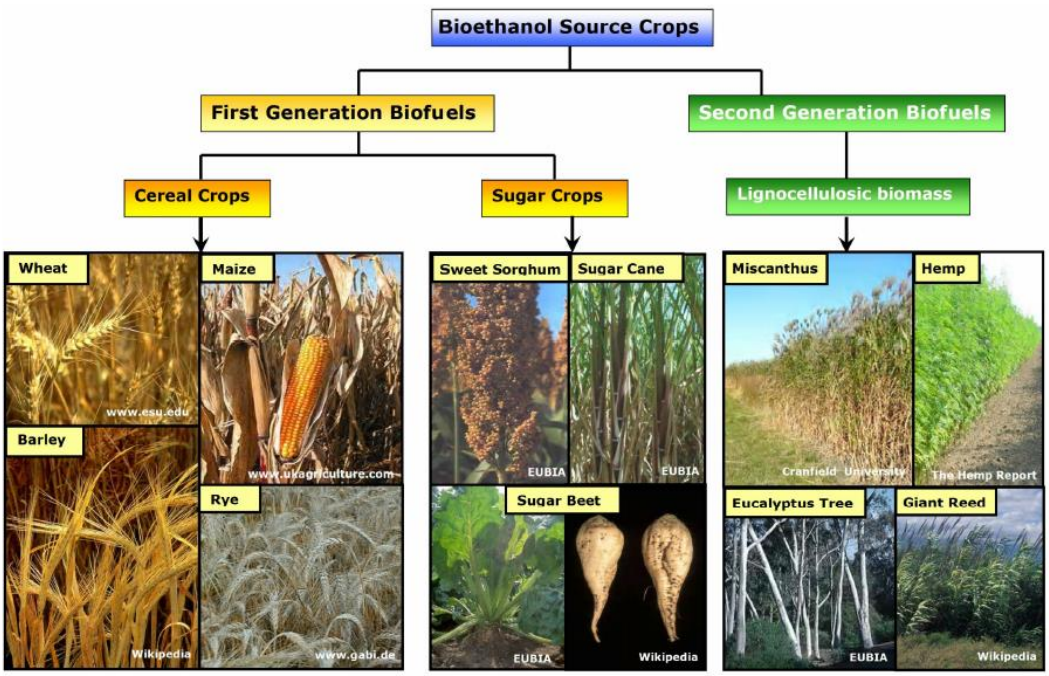
Bioetanoli eli etanoli C_2H_5OH, on maailman käytetyin ja samalla tutkituin biopolttoaine. Sitä pidetäänkin erittäin hyvänä korvaavana polttoaineena öljypohjaisille polttoaineille, kuten perinteiselle bensiinille [2]. Bioetanolin suurin etu on se, että se on kutakuinkin hiilidioksidi-neutraalia. Tämä johtuu siitä, että poltettaessa bioperäistä etanolia, siihen kasvuvaiheessa sitoutunut hiilidioksidi (CO_2) palautuu luontoon. Tämä tuo bioetanolille suuren edun verrattuna perinteisiin fossiilisiin polttoaineisiin, jotka palaessaan tuovat jatkuvasti lisää, eivät vain hiilidioksidia ilmakehään, mutta myös muita myrkyllisiä päästöjä.

Bioetanolia voidaan käyttää bensiinin biokomponenttina eri pitoisuuksina. Näitä sekoituksia on käytössä monia ja tällä hetkellä Suomessa käytettävän bensiinin bioetanoli-osuus on maksimissaan 10 %, ja tämä seos on nimeltään 95E-10. Pidemmälle kehittynyttä tekniikkaa edustaa seos nimeltä RE85-korkeaseosetanolipolttoaine. Suomessa RE85 polttoainetta valmistaa St1 ja se sisältää etanolia enintään 85 % [3]. Maailmalla tämä seos tunnetaan nimellä E85. RE85:n kehitys on ollut suuri edistysaskel ympäristöystävällisten polttoaineiden alalla, sillä kyseinen polttoaine tuottaa jopa 80 % vähemmän fossiilisia päästöjä kuin perinteinen bensiini. Seokseen on myös valittu bensiinin erikoiskomponentteja, joilla mahdollistetaan käyttö kylmissä ympäristöissä. Ainoa haittapuoli on se, että RE85-seosta voidaan käyttää polttoaineena vain erityisissä flexfuel-mallisissa autoissa. Nämä flexfuel-autot (engl. flexible fuel vehicles, FFV) toimivat samalla tavalla kuin normaalit bensiini- tai dieselautot, mutta niissä on muutamia teknillisiä eroja. Erityisesti polttoainetankeissa ja putkistoissa on käytetty materiaaleja, jotka kestävät paremmin korroosiota, sillä etanolin sisältämän hapen ja siihen helposti liukenevan veden on todettu altistavan metalliosat korroosiolle. Toisena haittapuolena on sen sisältämä noin 30 % pienempi energiamäärä [4]. Perinteinen bensiini sisältää 32 389 kJ/l energiaa, kun taas RE85 sisältää vain 22 950 kJ/l [2]. Tämän seurauksena FFV autojen kulutus on suurempaa ja niinpä niitä joutuu tankkaamaan useammin. Mutta tänä kompensoituu sillä, että RE85 on yleisesti halvempaa litrahinnaltaan kuin bensiini.[2,3,4]

2.1 Bioetanolin raaka-aineet

Raaka-aineeksi bioetanolin tuotantoon käy lähes kaikki kasvisperäiset aineet. 1. sukupolven biopolttoaineiksi kutsutaan tärkkelys- ja sokeripitoisista kasveista tuotettua bioetanolia. Näitä tärkkelyspitoisia kasveja ovat esimerkiksi maissi ja vehnä, ja sokeripitoisia ovat

esimerkiksi sokeriruoko ja sokerijuurikas, joita voidaan käyttää raaka-aineena. 2. sukupolven biopolttoaineiksi kutsutaan lignoselluloosaperäisiä raaka-aineita, joita on esimerkiksi oljet, ruohot sekä erilaiset puut kuten eukalyptuspuut. Lignoselluloosaperäiset raaka-aineet koostuvat pääosin selluloosasta, hemiselluloosasta ja ligniinistä. 2. sukupolven biopolttoaineilla on monia etuja verrattuna 1. sukupolven biopolttoaineisiin. Yhtenä esimerkkinä on se, että ne eivät sodi keskenään ruoan- sekä rehuntuotannon kanssa ja toiseksi niitä on paljon saatavilla. Myös teollisuudesta syntyviä jätteitä voidaan käyttää bioetanolin valmistukseen, yhtenä esimerkkinä puuteollisuudesta syntyvä sahanpuru ja hake. Kuvassa 1 on eritelty 1. ja 2. sukupolven biopolttoaineet ja niihin yleisesti käytettäviä raaka-aineita, kuten maissi, vehnä ja sokeriruoko 1. sukupolven biopolttoaineiden raaka-aineista, sekä oljet ja eukalyptuspuu 2. sukupolven biopolttoaineiden raaka-aineista. [1,2,3]



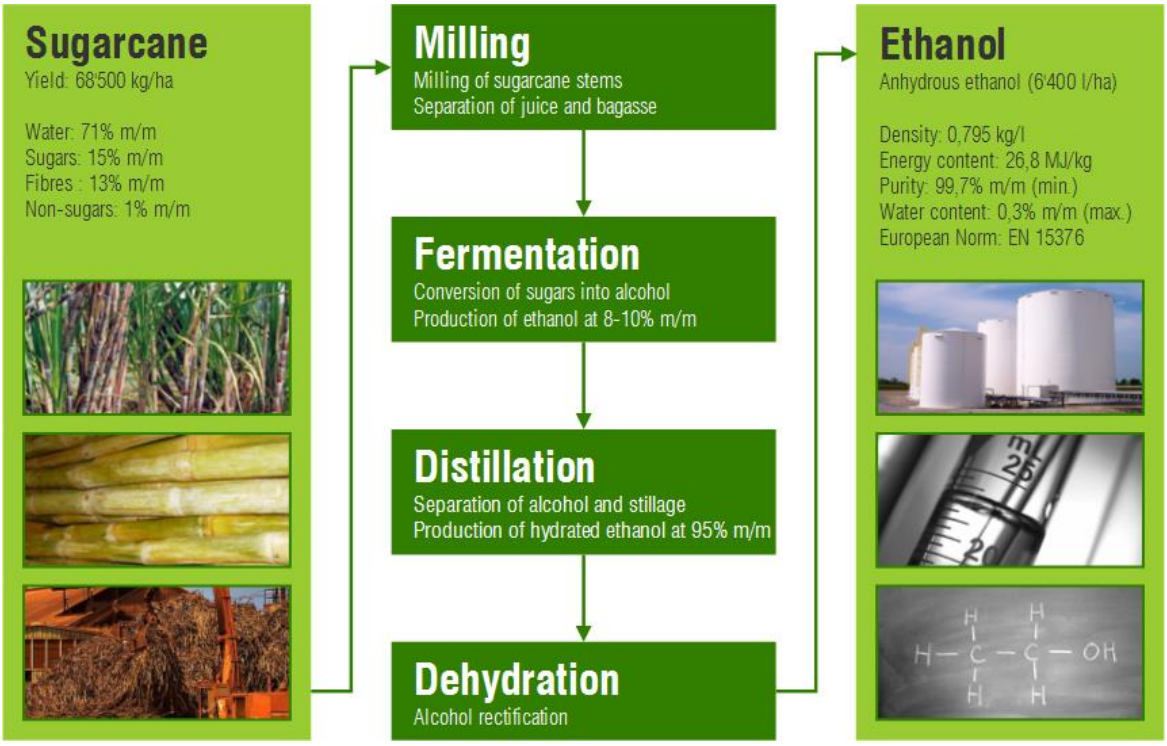
Kuva 1 1. ja 2. sukupolven bioetanolin raaka-aineita [2].

2.2 Bioetanolin valmistus

Bioetanolia valmistetaan pääasiassa fermentoimalla sokereita alkoholiksi. Raaka-aineeksi käy sokeri- ja tärkkelyspitoiset, sekä myös sokereiksi muunneltavissa olevat raaka-aineet. Toisin sanoen sitä voidaan valmistaa mistä tahansa käymiskelpoisista hiilihydraateista. Kaikkien biomassojen ensimmäinen vaihe on hienontaminen, jossa massa jauhetaan pienemmäksi, jotta tarvittavat kemialliset reaktiot saadaan tapahtumaan myöhemmissä

vaiheissa. Sokeripitoiset raaka-aineet voidaan käyttää suoraan alkoholiksi käyttäen apuna hiivaa, kun taas tärkkelyspitoisesta raaka-aineesta on tärkkelys hydrolysoitava sokeriksi ennen käymisprosessia. Käymisprosessin jälkeen tuote on vielä tislattava, jotta saadaan ylimääräinen vesi poistettua ja samalla nostettua tuotteen etanolipitoisuutta. Lopuksi tuotteesta täytyy vielä poistaa ylimääräinen vesi, jotta puhtaus saadaan lähelle 100 %. Tätä vaihetta kutsutaan dehydraatioksi eli veden poistoksi. [2,5,6]

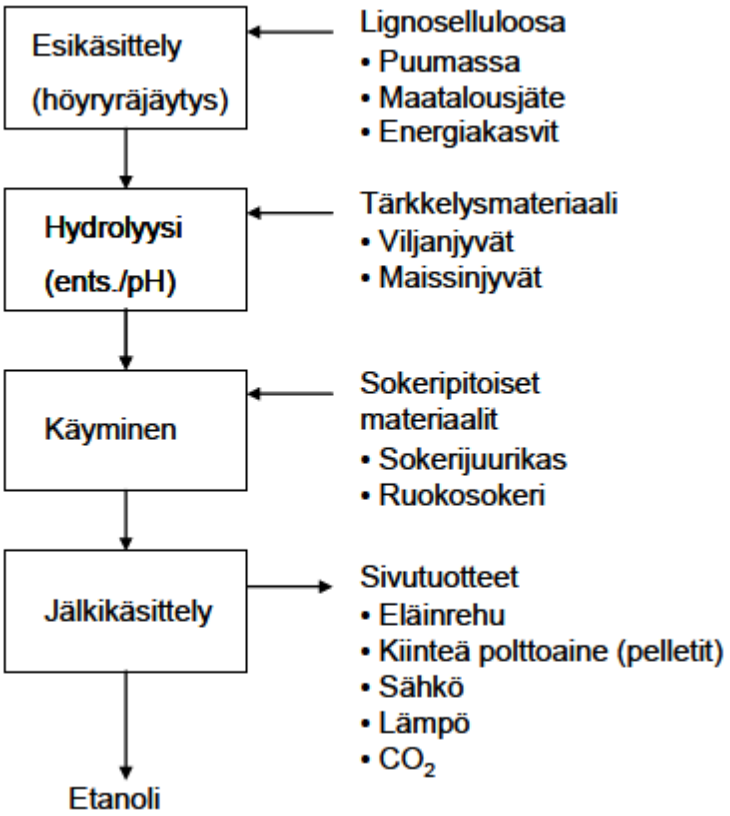
Kuvassa 2 on esitetty sokeriruo'on eri valmistusvaiheet eli hienonnus, fermentointi, jossa sokeri muutetaan alkoholiksi, tislaus, jossa alkoholi erotetaan tisleestä ja dehydraatio, jossa loppuvesi poistetaan alkoholista sekä muutamia teknisiä tietoja kuten sokeriruo'on saanti per hehtaari (68 500 kg/ha), sokeriruo'on koostumus, etanolin saanti per hehtaari (6400 l/ha) sekä tuotteena saadun etanolin eri tietoja, kuten tiheys, energiapitoisuus, puhtaus ja vesipitoisuus.



Kuva 2 Kaavio sokeriruon valmistusvaiheista bioetanoliprosessissa [7]

Lignoselluloosaa sisältävät raaka-aineet kuten sahanpuru voidaan myös käyttää sokereiksi, mutta prosessi on hieman monimutkaisempi kuin 1. sukupolven raaka-aineilla. Tämä johtuu siitä, että selluloosa on glukoosin polymeeri, joka koostuu pitkistä ketjuista, jotka on saatava rikottua, jotta fermentointi voi tapahtua. Lignoselluloosapitoiset raaka-aineet on myös usein

esikäsiteltävä, johon käytettäviä tekniikoita käydään läpi luvussa 4. Itse valmistuksessa selluloosa on hydrolysoitava sokereiksi.. Myös hemiselluloosa on sokerin polymeeri, joka on hydrolysoitava ensin sokeriksi. Hydrolysointi voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla, happo- tai entsyymikäsittelyllä. Happokäsittelyssä prosessiolosuhteet kuten lämpötila, ovat hyvin suuria ja hapon käyttö aiheuttaa myös muita erikoisjärjestelyjä, kuten hapon kierrätyksen, jotka nostavat kustannuksia. Korkean lämpötilan vuoksi myös sivutuotteita voi yleisesti syntyä. Toinen tekniikka on entsyymikäsittely, jossa hydrolysointi siis tapahtuu entsyymien avulla. Tämä prosessi voidaan toteuttaa paljon lievemmissä olosuhteissa ja eikä sivutuotteita synny, koska entsyymit ovat hyvin tarkkoja mitä reaktioita ne katalysoivat. Entsyymit ovat myös luonnollisesti esiintyviä yhdisteitä, joten ne eivät ole ympäristölle haitallisia.[6,8] Selluloosapohjaisista raaka-aineista voidaan valmistaa bioetanolia myös kaasutuksen avulla. Tässä prosessissa biomassa hajotetaan termisesti useiden kaasujen sekoitukseksi, joista yleisimmät ovat H2, CO ja CO2. Fermentaatio voidaan toteuttaa käyttämällä tiettyjä bakteereja, jotka hyödyntävät kaasuja tuottaakseen etanolia. [6]. Kuvassa 3 on prosessikaaviot bioetanolin valmistukselle eri raaka-aineista.



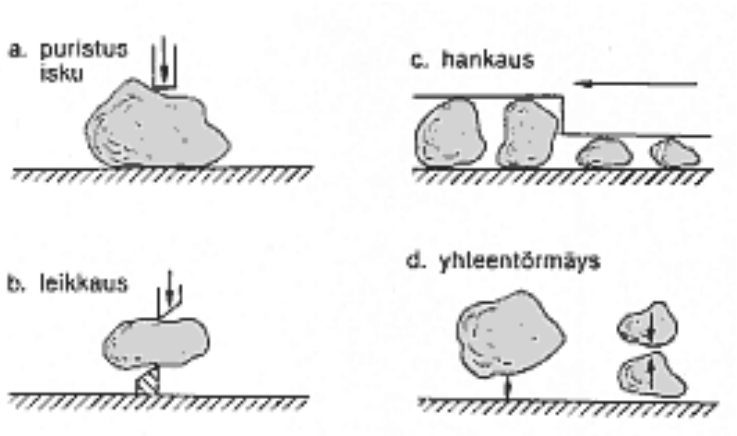
Kuva 3 Havainnollistava lohkokaavio bioetanolin eri valmistusvaiheista [9].

3 Raaka-aineiden hienonnus

Hienonnuksella tarkoitetaan kiinteän materiaalin saattamista pienempään muotoon, kuitenkin muuttamatta sen olomuotoa. Materiaali voi olla esimerkiksi kiviainesta tai biomassaa. Sen tarkoituksena on saada materiaalille haluttu hienous- tai karkeusaste. Hienonnuksen tavoitteena on esimerkiksi mineraalitekniikassa erottaa arvokas mineraali arvottomasta. Kemiantekniikassa taas tavoitteena on lisäys reaktiopinta-alaan. Eri hienonnusteniikat voidaan karkeasti jakaa kuuteen eri kategoriaan, niistä saatavien materiaalien partikkelikokojen perusteella. Nämä kuusi eri hienonnustekniikkaa ja niistä saatavien partikkelien koot on esitetty taulukossa I. Kuvassa 4 on esitetty ilmiöt, joihin perinteiset hienonnustapahtumat perustuvat [10,11].

Taulukko I Eri hienonnustekniikat ja niitä vastaavat partikkelikoot [10,11]

Hienonnustekniikka	**Partikkelikoko**
Karkeamurskaus	1 m…100 mm
Hienomurskaus	100 mm…10 mm
Karkeajauhatus	10 mm…1 mm
Hienojauhatus	1 mm...100 µm
Hyvin hieno jauhatus	100 µm…10 µm
Erittäin hieno jauhatus	10 µm...1 µm



Kuva 4 Ilmiöt joihin hienonnustapahtumat perustuvat [12]

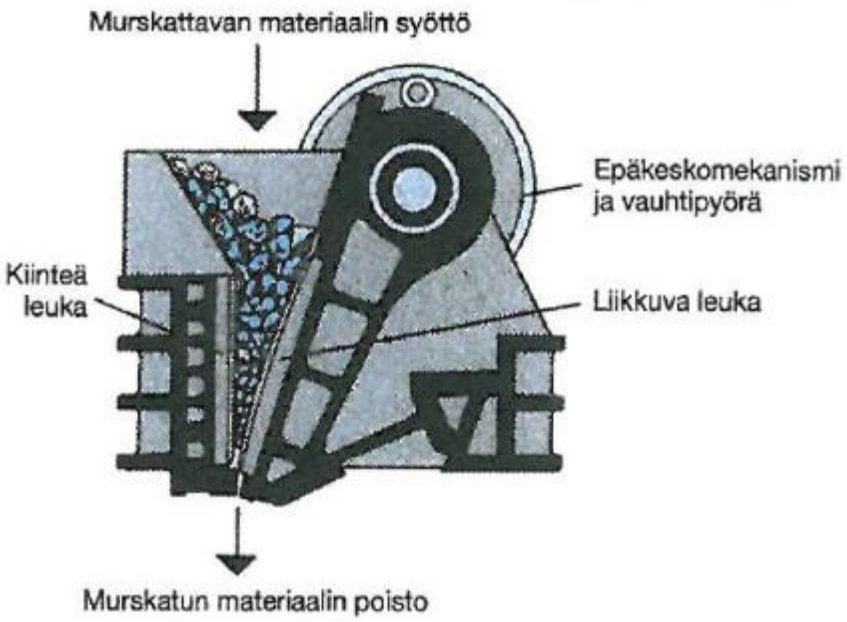
Kuvassa 4 esiintyvät menetelmät perustuvat pääasiassa mineraalien hienonnukseen, mutta kun kyseessä on biomateriaali niin leikkauksen lisäksi myös repiviä menetelmiä tarvitaan.

3.1 Materiaalin murskaus

Erilaisia murskaimia on kehitetty aikojen saatossa suuri määrä, mutta kaikki ne voidaan toimintatapojen ja rakenteen osalta jakaa viiteen pääryhmään: leuka-, kartio-, valssi-, isku-, sekä erikoismurskaimiin. [10,11]

3.1.1 Leukamurskaimet

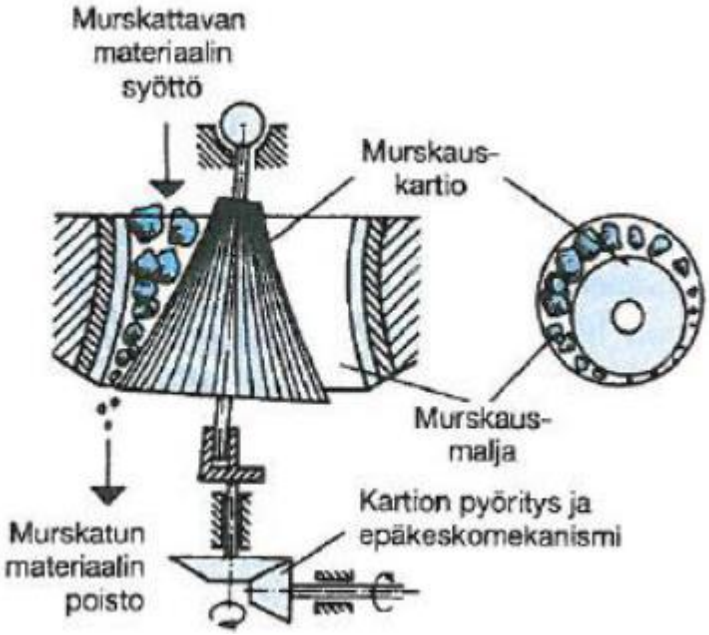
Leukamurskaimet voidaan jakaa kahteen pääryhmään: kierto-eli kitamurskaimiin ja Blake-murskaimiinn, joka on saanut nimensä sen kehittäjän Eli Whitney Blaken mukaan. Kummassakin murskaimessa aines hienonnetaan puristamalla se liikkuvan leuan avulla kiinteää leukaa vasten. Murskaus tapahtuu ainoastaan liikkuvan leuan edetessä kohti kiinteää leukaa eli toisin sanoen korkeintaan 50 % käyttöajasta. [10,11]. Kuvassa 5 on esitetty leukamurskaimen toiminta.



Kuva 5 Leukamurskain [12]

3.1.2 Kartiomurskaimet

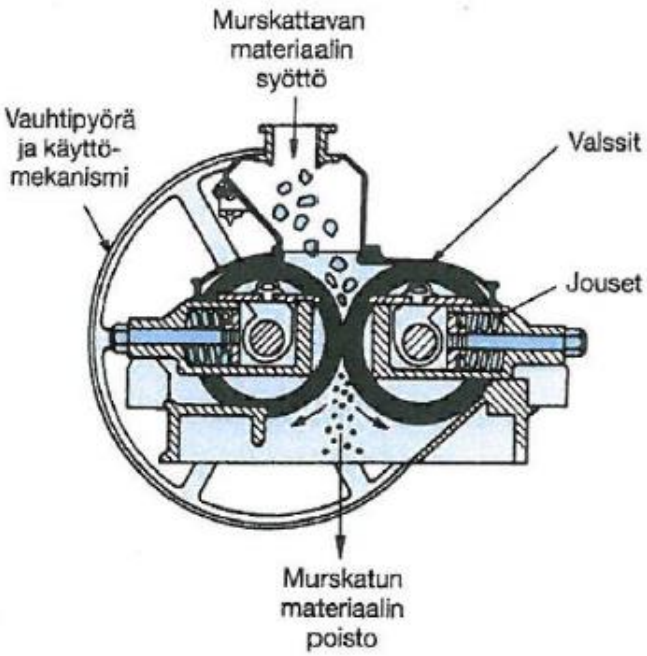
Kartiomurskaimissa materiaali hienonnetaan kahden sisäkkäin olevan kartiomaisen murskausvaipan välissä. Näistä toinen on runkoon kiinnitetty kiinteä ulkovaippa ja toinen on kiinnitetty liikkuvan murskauskartion pinnalle. [10,11]. Kuvassa 6 on esitetty kartiomurskaimen toimintaperiaate.



Kuva 6 Kartiomurskain [12]

3.1.3 Valssimurskain

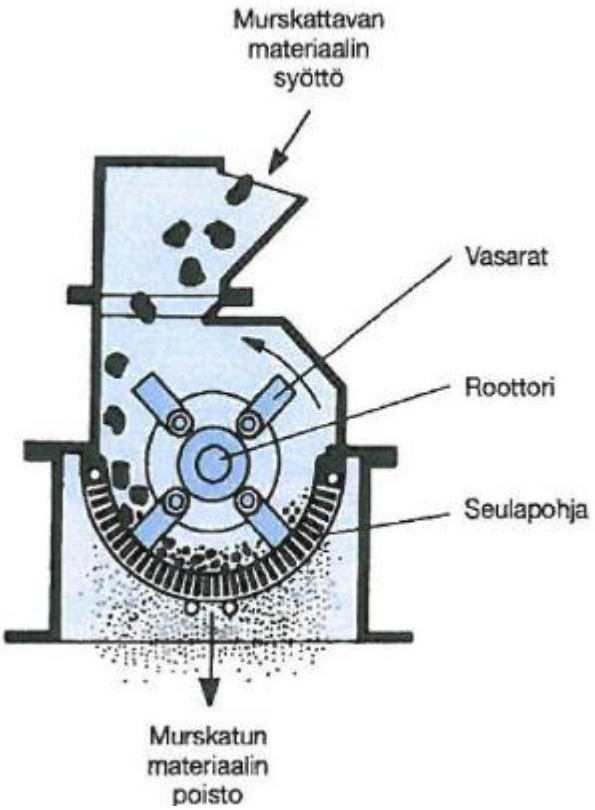
Valssimurskain koostuu kahdesta, joskus kolmesta vastakkaisiin suuntiin pyörivistä teräsvalssista. Toinen valsseista on tavallisesti kiinteästi asennettu, mutta toisessa on jouset estämässä vaurioitumista kovien kappaleiden varalta. [10,11] Kuvassa 7 on esitetty valssimurskaimen toimintaperiaate.



Kuva 7 Valssimurskain [12]

3.1.4 Iskumurskain

Iskumurskaimen hienonnustekniikka perustuu iskemiseen, ei puristamiseen. Iskut voidaan saada aikaan kahdella eri tavalla. Toinen tapa on nopeasti liikkuvan elimen isku hitaaseen tai paikallaan olevaan kappaleeseen. Toinen tapa on nopeasti liikkuvan kappaleen isku paikallaan olevaan esteeseen. [10,11] Kuvassa 8 on esitetty iskumurskaimen toimintaperiaate.



Kuva 8 Iskumurskain [12]

3.1.5 Erikoismurskaimet

Erikoismurskaimiin kuuluu erilaisia repiviä ja leikkaavia murskaimia. Nämä eivät yleisesti sovellu mineraalien murskaukseen, vaan ennemminkin erilaisten biomassojen hienontamiseen. Repiviä ja leikkaavia murskaimia voidaan käyttää hyväksi esimerkiksi puuteollisuudessa. Biomassojen murskaamiseen voidaan käyttää esimerkiksi hakkureita, joilla saa niin sanottuja teräväreunaisia hakepartikkeleita tai pyörivää tai paikallaan olevaa vasaramurskainta. [13]

3.2 Materiaalin jauhatus

Jauhatus on hienontamisen lopullinen vaihe. Tarvittava jauhatuskoko riippuu jauhettavan aineen rakenteesta, prosessimenetelmästä sekä myöskin tuotteen ominaispinta-ala ja raekoko vaatimuksesta. Jauhatus on prosessiteollisuudessa isossa roolissa ja se onkin yksi tärkeimpiä yksikköprosesseja [10]. Se on samalla myös suuri energian kuluttaja. Esimerkiksi vaahdotushienouteen jauhetun malmin käsittelyyn kuluu keskimäärin 12,5 kWh/t energiaa. Energian ohella myös kulutusmateriaalin kustannusosuus on huomattava. Suljetuissa myllyissä eli tanko-, kuula- ja autogeenimyllyissä käytetään jauhinkappaleita, joiden materiaalina käytetään muun muassa terästä tai valurautaa. Itse jauhatus voidaan toteuttaa joko täysin kuivana tai märkänä. Jauhatuksen syötteen koko on tyypillisesti 10-25 mm ja jauhatuksen jälkeen 0,2-0,3 mm, mutta tämä riippuu jauhatuksen tarkoituksesta. Suljettujen myllyjen kapasiteetti voidaan määritellä jollakin seuraavista menetelmistä:

1. Myllyn käsittelemän materiaalin määränä, t/h
2. Myllyn jauhaman halutun materiaalin tuotteen määränä , t/h
3. Myllyn jauhaman tiettyä kokoluokkaa pienemmän tuotteen määränä verrattuna perusmyllyyn. [10]

Kahden viimeisenä mainitun menetelmän raekokorajana on tavallisesti 200 meshiä eli 74 µm. Tärkeimmät myllyjen toimintaan sekä kapasiteettiin vaikuttavat tekijät on koon lisäksi myllyn nopeus, rakenne, itse jauhettava aine sekä myllyn täyttöeste. Suljetuissa myllyissä täyttöasteella tarkoitetaan jauhinkappaleiden prosentuaalista määrää myllyn vuoratusta sisätilavuudesta. Myös jauhinkappaleilla on suuri merkitys myllyn toimintaan

Tässä työssä myllyt on jaettu seuraaviin kuuteen ryhmään:

1. Tankomyllyt
2. Kuulamyllyt
3. Autogeenimyllyt
4. Vasaramyllyt
5. Valssimyllyt
6. Erikoismyllyt

Näistä kolmessa ensimmäisessä käytetään metallisia tai ei-metallisia jauhinkappaleita. Vasara- ja valssimyllyissä ei käytetä lainkaan jauhinkappaleita. Viimeinen ryhmä taas sisältää joukon hyvinkin erilaisia laitteita. [10,11]

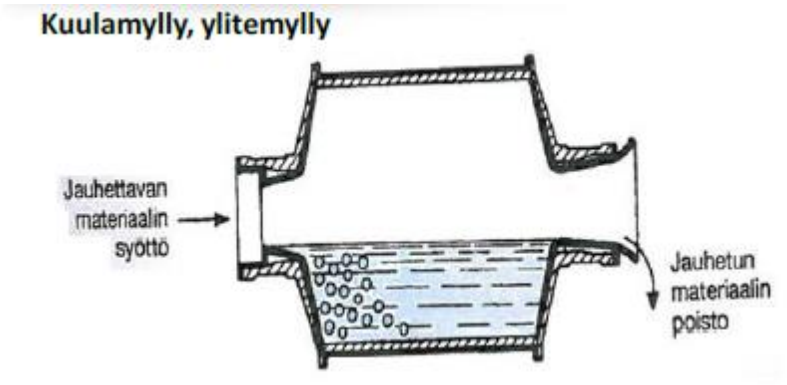
3.2.1 Tankomyllyt

Tankomylly on tyypillinen esijauhatuskone. Mylly käyttää jauhinkappaleina terästankoja ja sen pituus on yleisesti 1,4 – 1,6 kertaa sen läpimitta. Tankomyllyn kapasiteetti on sen kokoon nähden suuri. Sille on myös ominaista nopea jauhatustehon loppuminen sen maksimikapasiteetin ylitettyä. [10,11] Kuvassa 9 on esitetty perinteinen tankomylly.

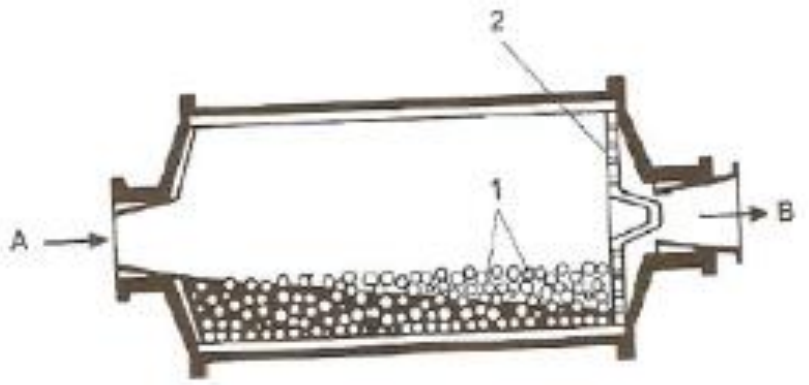
Kuva 9 Tankomylly [12]

3.2.2 Kuulamyllyt

Kuulamyllyksi kutsutaan myllyä, jossa jauhinkappaleina käytetään metallisia kuulia, ja jossa rumpu pyörii vaakasuoran akselin ympäri. Itse jauhatustapahtuma on sekä isku- että hiertojauhatusta. Kuulamyllyjä on kahdenlaisia, ylite- tai arinamylly, joista ylitemylly on yleisempi. Ylitemyllyksi kutsutaan myllyä, joka on jatkuvatoiminen ja jossa tuotteen poisto tapahtuu poistopään kaula-aukon kautta. Arinamyllyssä tuotteen poisto taas tapahtuu yhden tai useamman arinan kautta, jotka ovat joko myllyn kehällä tai päädyssä.[10,11] Kuvissa 10 ja 11 on esitetty ylitemylly sekä arinamylly.



Kuva 10 Ylitetyyppinen kuulamylly [12]



Kuva 11 Arinatyyppinen kuulamylly, jossa
A. Jauhettavan materiaalin syöttö
B. Jauhetun materiaalin poisto
1. Jauhinlappaleet ja
2. Arina, joiden kautta jauhettu materiaali poistuu myllystä [12]

3.2.3 Autogeenimyllyt

Autogeenisessä jauhatuksessa jauhinkappaleina käytetään itse jauhettavaa materiaalia. Puoliautogeenimyllyissä jauhatuksen tehostamiseksi voidaan lisätä kuulia, joiden tilavuus on yleensä 5-10 % myllyn tilavuudesta. Autogeenimyllyt voidaan kahteen eri päälajiin, kaskaadimyllyihin ja aerofall-myllyihin. Kaskaadimyllyjä käytetään märkäjauhatukseen ja aerofall-myllyjä käytetään kuivajauhatukseen. [10,11]

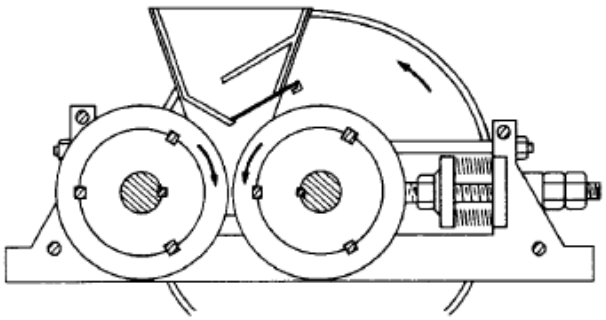
3.2.4 Vasaramyllyt

Vasaramyllyn hienonnusilmiö perustuu iskuun ja hankaukseen, jotka saadaan aikaan pyörivään levyyn kiinnitetyillä niin sanotuilla vasaralevyillä sekä hammastetulla ulkokaarella. Vasaralevyt voivat olla kiinnitetty lukitusti paikalleen tai saranoilla. Saranakiinnitys edesauttaa tilanteissa, joissa jauhettava materiaali on laitteistolle liian kovaa, jolloin vasaralevyt kykenevät taipumaan ja näin ollen laitteistolle ei tapahdu vahinkoa. Materiaali hienontuu joko iskuista vasaralevyihin tai hankautumalla vasten hammastettua ulkokaarta. Jauhautuminen jatkuu kunnes aines on tarpeeksi pientä putoamaan laitteen alaosassa olevan seulan läpi. Laitetta voidaan käyttää sekä hauraan että kuituisen materiaalin kuten puumassan jauhatukseen. Kuvassa 12 on esitetty tyypillinen vasaramylly. [8]

Kuva 12 Tyypillinen vasaramylly, jossa nivelöidyt vasarat. [8]

3.2.5 Valssimyllyt

Valssimylly koostuu kahdesta vastakkaisiin suuntiin pyörivästä telasta. Toinen teloista on kiinnitetty paikalleen ja toista voidaan liikutella, jolla voidaan vaikuttaa tuotteen partikkelikokoon. Toinen teloista on myös varustettu jousella, jotta kovien materiaalien kohdalla laitteistolle ei koidu vahinkoa. Kuvassa 13 on esitetty perinteinen jousella varustettu valssimylly [8].



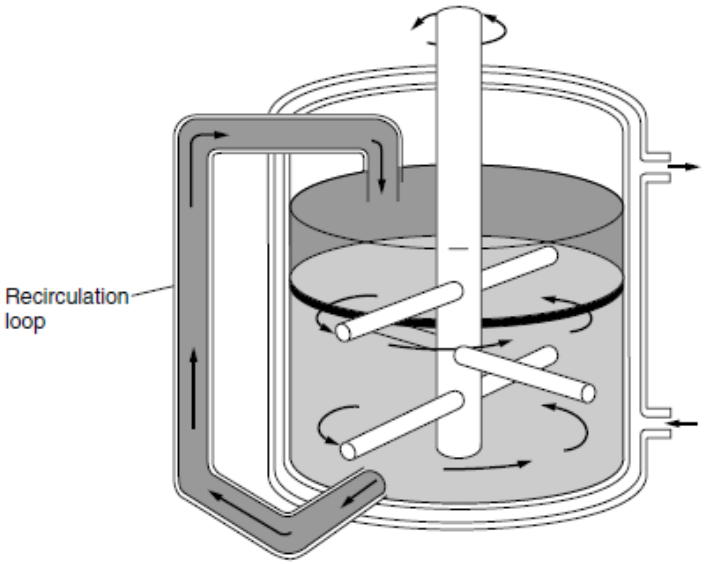
Kuva 13 Valssimylly [8]

3.2.6 Erikoismyllyt

Erikoismyllyihin kuuluu laaja kirjo erilaisia myllyjä, joita käytetään, kun materiaalit ovat vaikeasti jauhettavia tai haluttu tuotekoko on hyvin hienojakoista [10]. Seuraavassa esitellään lyhyesti tärymyllyjen, helmimyllyjen ja suihkumyllyjen toimintaperiaatteet.

Tärymyllyjen jauhatustekniikka perustuu nopeaan värähdysliikkeeseen. Niissä samassa tilassa olevat jauhinkappaleet ja jauhettava materiaali saatetaan värähdysliikkeeseen käyttäen epäkeskopainoja. Täyttöaste on oltava korkea sillä jauhinkappaleiden välit on oltava täynnä jauhettavaa materiaalia sekä kuluneita jauhinkappaleita. Jauhatus voidaan tehdä joko kuivana tai märkänä [10].

Helmimyllyn toimintaperiaate perustuu jauhinkappaleiden ja jauhettavan materiaalin jatkuvaan sekoitukseen, jossa jauhautuminen perustuu hankautumiseen. Jauhinkappaleina voidaan käyttää esimerkiksi 1 mm:n kokoisia aluniittirakeita. eli helmiä. Jauhettu materiaali poistetaan jatkuvan neste- tai kaasusyötön avulla, joka johdetaan laitteiston läpi [8,10]. Kuvassa 14 on esitetty helmimyllyn toimintaperiaate.



Kuva 14 Helmimyllyn toimintaperiaate [8]

Suihkumyllyjen toiminta perustuu nopeasti liikkuvaan kaasuun, johon jauhettava materiaali on sekoitettu. Kaasuna käytetään yleisesti ilmaa tai höyryä. Kun paineen alainen kaasu päästetään laajenemaan rajoitetussa tilassa, sen mukana oleva materiaali jauhautuu rakeiden hiertyessä toisiaan vasten. Suihkumyllyissä ei ole liikkuvia osia [10].

3.2.7 Biomassojen jauhatus

Biomassojen jauhatuksen periaatteena on kasvattaa aineksen reaktiopinta-alaa, jotta halutut kemialliset reaktiot saataisiin tapahtumaan helpommin sekä helpottaa aineksen käsittelyä. Biomassa voi koostua esimerkiksi viljasta tai erilaisista puumateriaaleista kuten hakkeesta tai sahajauhosta. Biomassa on myös kuitumaista ja pehmeämpää kuin mineraalit, joten edellä mainittuja erilaisia murskaimia ja myllyjä harvemmin käytetään biomassojen jauhamiseen. Poikkeuksena ovat iskumurskaimet ja vasaramyllyt, joiden on todettu toimivan myös biomassojen jauhamiseen.. Myös erilaisia veitsimyllyjä on käytössä biomassojen jauhatuksessa. Näissä laitteissa hyödynnetään leikkaavia sekä repiviä voimia, jotka toimivat hyvin biomassojen käsittelyssä. [13,14]

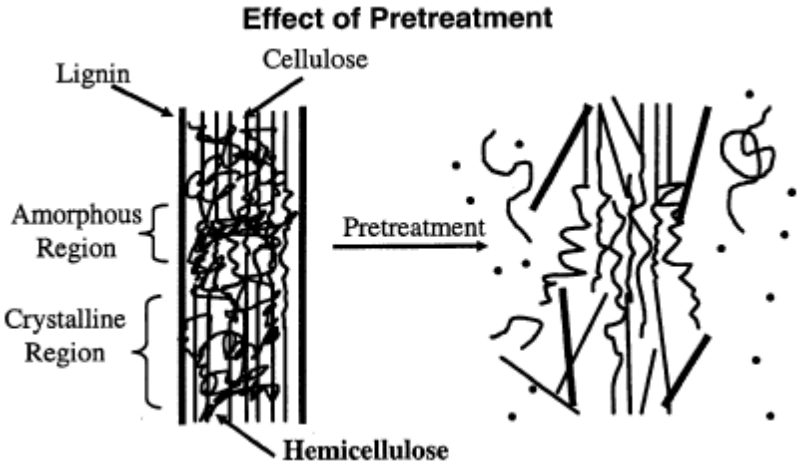
4 Biomassojen esikäsittelymenetelmät

Esikäsittelytekniikoihin kuuluu muun muassa erilaiset materiaalin koostumukseen vaikuttavat tekniikat kuten kuivaus tai erilaiset kemialliset tekniikat [6]. Tässä työssä keskitytään lignoselluloosaa sisältävien biomassojen erilaisiin esikäsittelytekniikoihin. Lignoselluloosaa sisältävät biomassat koostuvat pääosin selluloosasta, hemiselluloosasta ja ligniinistä. Taulukossa 2 on esitetty selluloosan, hemiselluloosan sekä ligniinin pitoisuuksia kovissa sekä pehmeissä puissa.

Taulukko 2 Selluloosan, hemiselluloosan ja ligniinin pitoisuuksia kovissa ja pehmeissä puulajikkeissa [6].

Lignocellulosic materials	Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	Lignin (%)
Hardwoods stems	40–55	24–40	18–25
Softwood stems	45–50	25–35	25–35

Esikäsittelyn tarkoitus käsiteltäessä lignoselluloosaa sisältäviä biomassoja on muuttaa ligniinin rakennetta tai poistaa ligniiniä, poistaa hemiselluloosaa tai vähentää selluloosan kiteisyyttä. Kuvassa 16 on esitetty esikäsittelyn vaikutuksia lignoselluloosaa sisältävään biomassaan [6].



Kuva 16 Esikäsittelyn vaikutus lignoselluloosaa sisältävään biomassaan[6]

4.1 Kemialliset esikäsittelytekniikat

Tässä luvussa keskitytään pelkästään tekniikoihin, jotka saadaan aikaan puhtaasti kemiallisilla reaktioilla. Näitä ovat kuumavesikäsittely, heikko- ja vahvahappo hydrolysointi, emäksinen hydrolysointi sekä orgaanisten liuottimien käyttö.

Kuumavesikäsittely on yksi tekniikka, jota voidaan hyödyntää esikäsittelyvaiheessa. Siinä biomassa tuodaan kosketuksiin kuuman veden kanssa korkeassa paineessa lämpötilan ollessa 200 – 230. 40 -60 % koko biomassasta liukenee jo 15 minuutin jälkeen, sekä suuria määriä selluloosaa ja ligniiniä ja kaikki hemiselluloosa saatiin poistettua. Yli 90 % hemiselluloosasta saatiin talteen monomeerisinä sokereina, kun happoa käytettiin loppunesteen hydrolysointiin. [6]

Heikkohappo hydrolysointi on yksi tehokkaimmista esikäsittelytekniikoista biomassoille. Siinä heikkoa, useimmiten, rikkihappoa johdetaan biomassan sekaan ja sekoitusta pidetään korkeassa lämpötilassa (160-220) muutamia minuutteja. Näissä olosuhteissa tapahtuu hemiselluloosan hydrolysointia vapauttaen monomeerisiä sokereita sekä samalla kasvaa materiaalin huokoisuus. Tämä tekniikka sopii hyvin biomassoille, joissa on vähäinen ligniini-pitoisuus, sillä ligniinin poistuminen biomassasta on hyvin vähäistä [6]. Vahvahappo hydrolysoinnissa käytetään vahvaa rikki- tai suolahappoa, koska ne ovat hyviä selluloosan hydrolysoinnissa. Erona heikon hapon käyttöön on pienempi lämpötila, laajempi valinnanvara raaka-aineiden käytössä sekä korkea monomeeristen sokereiden saanto. Molemmissa tekniikoissa on kuitenkin haittapuolia, esimerkiksi se, että hapot ovat syövyttäviä aineita. [6]

Emäksisen hydrolysoinnin suurin hyöty on ligniinin poistuminen biomassasta sekä jäljelle jääneiden polysakkaroidien reaktiivisuuden parantuminen. Käsittely yleensä toteutetaan käyttämällä kalsium- tai natriumhydroksidia. Prosessiolosuhteet ovat melko mietoja, mutta reaktioaika voi olla pitkä. Tällä tekniikalla saadaan hyvä liukoisuus ligniinille, ja se sopii hyvin havupuille, joilla on alhainen ligniinipitoisuus. Emäksinen hydrolysointi voidaan toteuttaa myös käyttämällä ammoniakkia, mutta silloin prosessiolosuhteet ovat erilaiset. Lämpötilan sekä paineen tulee olla korkeampia. Prosessin kokonaiskustannuksiin vaikuttaa myös ammoniakin hinta, sekä vaadittava ammoniakin takaisin saaminen. [6]

Orgaanisia liuottimia tai niiden sekoituksia voidaan myös käyttää esikäsittelyyn. Tyypillisiä liuottimia ovat etanoli, metanoli sekä asetoni. Tässä tekniikassa lämpötilat voivat olla jopa 200, mutta myös pienempiä lämpötiloja voidaan käyttää, riippuen biomassan koostumuksesta. Tämä tekniikka soveltuu hyvin ligniinin poistoon. [6]

4.2 Yhdistetty kemiallinen ja mekaaninen esikäsittely

Tässä luvussa esitellään eri räjäytystekniikoita, joihin kuulu höyryräjäytys, ammoniakkiräjäytys sekä hiilidioksidiräjäytys. [6]

Höyryräjäytys on yksi käytetyimmistä esikäsittelytekniikoista, johtuen sen vähäisestä kemikaalien käytöstä sekä rajoitetusta energian kulutuksesta. Tässä tekniikassa korkeapaineista kylläistä höyryä johdetaan reaktoriin, joka on täytetty biomassalla. Höyryn täyttäessä reaktoria, lämpötila nostetaan 160 – 260 asteeseen, jonka jälkeen paine lasketaan äkillisesti, jolloin biomassan rakenteessa tapahtuu räjähtävä hajoaminen. Hajoamisen suuruuteen riippuu reaktioaika, lämpötila, partikkelikoko sekä biomassan kosteuspitoisuus.[6]

Ammoniakkiräjäytys toimii periaatteessa samalla tavalla kuin höyryräjäytys, muutamia olosuhteita lukuun ottamatta. Tyypillisesti biomassa käsitellään nestemäisellä ammoniakilla 30 minuutin ajan 90 asteen lämmössä korkeassa paineessa, jonka jälkeen paine lasketaan äkillisesti. Ammoniakkia käytetään yleisesti 1-2 kg/kg kuivaa biomassaa. Tässä käsittelyn kustannukset ovat kuitenkin korkeat johtuen ammoniakin hinnasta, sekä sen takaisin keräämisestä. [6]

Hiilidioksidiräjäytys toimii samalla periaatteella kuin höyry- ja ammoniakkiräjäytys, mutta tässä tekniikassa käytetään korkeapaineista hiilidioksidia. Tämän tekniikan saannot ovat kuitenkin matalemmat kuin muilla räjäytystekniikoilla. [6]

II Kokeellinen osa

5 Työn tarkoitus

Kokeiden tarkoituksena oli tutkia eri esikäsittelytekniikoiden vaikutusta sahajauhon jauhautumiseen sekä energiankulutukseen vasaramyllyllä. Sahajauhojen jauhatuksen tarkoituksena oli saada ne bioetanolin valmistusta vaativaan hienousasteeseen. Sahajauhoina oli kolmea eri puutyyppiä, haapaa, kuusta ja mäntyä. Jauhatustuotteiden keskimääräiset partikkelikoot sekä jokaisen jauhatuksen energiankulutus mitattiin.

6 Koelaitteisto ja mittausten suoritus

Työssä jauhettiin kolmea eri sahajauhoa (haapa, kuusi ja mänty), joiden kaikkien lähtökoko oli välillä 1-3 mm, mutta seassa oli myös suurempia tikkuja. Jokaisen jauhatuksen kuiva-ainepitoisuudeksi valittiin 100 g kuivaa sahajauhoa. Niinpä jokaisesta sahajauhosta mitattiin kosteusprosentti, joka saatiin selville kuivattamalla jauhoja uunissa. Kosteuspitoisuudet olivat haavalle 4,8%, kuuselle 5,5% ja männylle 5,8%. Kuvissa 17 - 19 on esitetty työssä käytetyt sahajauhot järjestyksessä haapa, kuusi ja mänty.

Kuva 17 Työssä käytetty haapasahajauho

Kuva 18 Työssä käytetty kuusisahajauho

Kuva 19 Työssä käytetty mäntysahajauho

Esikäsittelytekniikoiksi valittiin jokaiselle sahajauholle liotus vedessä eri pituisia aikoja sekä liotus emäksisessä liuoksessa. Liotus emäksisessä aineessa valittiin, koska haluttiin tutkia miten ligniinin mahdollinen poistaminen emäksisellä liuoksella vaikuttaa sahajauhojen jauhautumiseen.

Mittaukset aloitettiin esikäsittelemällä sahajauhoja vesiliotuksilla. Jauhatuksissa kuitenkin havaittiin, että yhden ja kolmen tunnin liotusajat vedessä eivät olleet riittäviä sillä vasaramylly ei jaksanut jauhaa minkään puulaadun sahajauhoja näillä liotusajoilla. Tulosten perusteella päätettiin nostaa liotusaika 24 tunnin pituiseksi, jotta saataisiin sahajauhoille mahdollisimman korkea kosteuspitoisuus. Tällä käsittelyajalla jauhatukset tehtiin sekä

siivilöitynä, että suspensiona. Suspensioissa kuiva-ainepitoisuudet oli 5 %, tämä toteutettiin tekemällä 100 g kuiva-ainetta per 2000 g suspensiota.

Näiden tulosten perusteella sahajauhojen liotusajaksi emäksisissä liuoksissa valittiin 24 tuntia ja jauhatukset tehtiin suspensiona. Tämä perustui vesiliotuksista saatuihin tuloksiin, jotka siis osoittivat 24 tunnin liotusajan ja jauhatuksen suspensiona parhaimmaksi vaihtoehdoksi. Liuosten pH:n korottamisiin käytettiin 50 % NaOH-liuosta, jolla pH nostettiin liuoksissa 9,2:n sekä 11,4:n arvoihin. Sahajauhoiksi näihin pH-liotuksiin valittiin haapa ja kuusi, sillä haapa on rakenteeltaan kovapuu ja kuusi taas pehmeämpi puu. Männylle ei tehty käsittelyä emäksisessä liuoksessa, sillä mänty ja kuusi ovat rakenteeltaan hyvin samanlaisia, joten päätettiin tehdä mittaukset vain toiselle niistä.

Liotukset tehtiin ämpäreissä huoneenlämpöisessä vedessä, veden määrän ollessa noin 2 litraa. Myös emäs-käsittelyissä tehtyjen liuosten tilavuus oli noin 2 litraa. Ennen jauhatusten suorittamista, liotuksissa käytetyt vedet sekä emäsliuokset suodatettiin sahajauhoista pois. Poikkeuksena suspensio-käsittely, jossa siis myllyyn syötettiin vesi-sahajauho seosta. Kaikki syötöt vasaramyllyyn tapahtuivat käsin, myllyn yläosassa olevan syöttökaukalon kautta. Poistosiivilän kokona käytettiin kaikissa mittauksissa 1mm:n kokoa.

Jauhatukset tehtiin yksimoottorisella vasaramyllyllä, jossa oli kolme kiinteästi lukittua vasaralevyä. Kuvassa 20 on esitetty kokeissa käytetty vasaramylly.

Kuva 20 Työn mittauksissa käytetty vasaramylly

Tehonkulutukset mitattiin erillisellä mittarilla, joka oli kytketty kiinni vasaramyllyyn. Lasketut tulokset perustuvat keskimääräisiin tehonkulutuksiin, jotka laskettiin jauhatukseen kuluneen ajan sekä tehonkulutusmittarin ilmoittamilla hetkellisillä energiankulutuksilla. Jauhatuksiin kulunut aika mitattiin käyttäen sekuntikelloa. Tulokset on ilmoitettu kwh/t-yksiköissä. Eli kuinka monta kilowattituntia kuluu energiaa yhden sahajauhotonnin jauhamiseen.

Partikkelikokoanalyysit tehtiin Malvernin valmistamalla Mastersizer 3000-laitteella. Partikkelikokojen mittaus perustuu laserdifraktioon. Tämä tapahtuu mittaamalla valon hajaantumisen intensiteettiä, kun lasersäde kulkee hajaantuneen hiukkasnäytevirtauksen läpi. Mittaukset tehtiin vedessä. Ja jokaisesta näytteestä otettiin 5 rinnakkaistulosta. Kuvassa 21 on esitetty partikkelikokoanalyyseissä käytetty laitteisto.[15]

Kuva 21 Partikkelikokoanalyyseissä käytetty laitteisto [15]

7 Mittausten tulokset

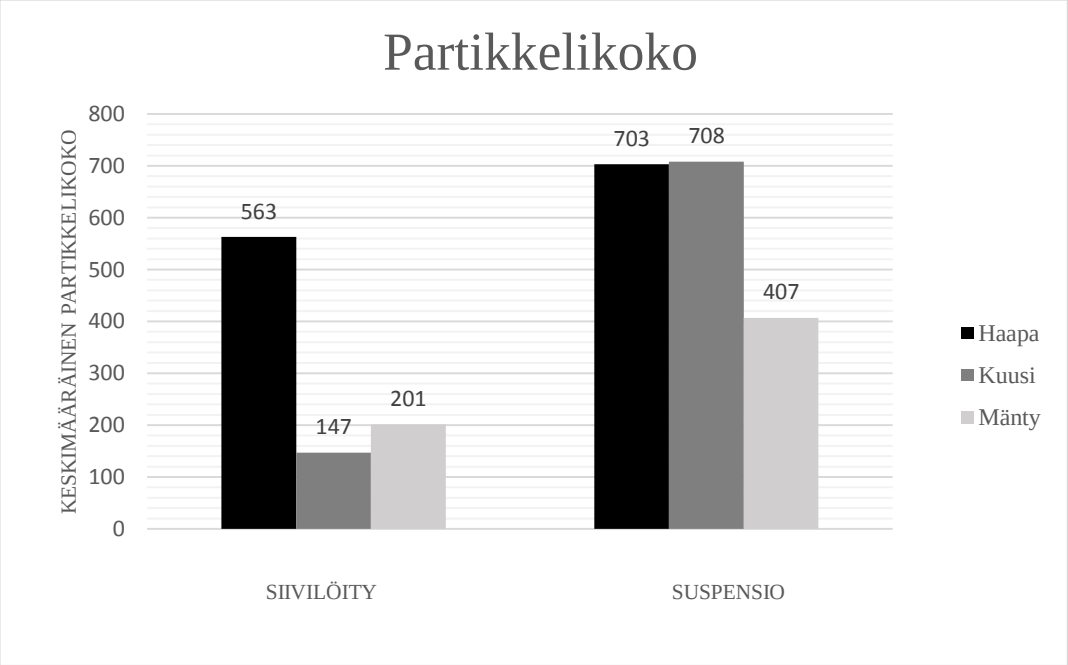
Tässä luvussa esitellään mittauksista saadut tulokset taulukoiden sekä pylväsdiagrammien muodossa. Luvussa 7.1 esitellään kaikista jauhatuksista saatujen jauhatustuotteiden keskimääräiset partikkelikoot sekä luvussa 7.2 esitellään jauhatuksista aiheutuneet tehonkulutukset.

7.1 Sahajauhon jauhautuvuus

Jokaisen jauhatuksen jälkeen jauhetusta biomassasta otettiin näyte, josta mitattiin partikkelien keskimääräiset koot käyttäen Malvernin laserdifraktio-laitetta. Taulukossa III on esitetty keskimääräiset partikkelikoot siivilöidyille sekä suspensiona syötetyille sahajauhoille, kun ne on jauhettu 24 tunnin vesiliotuksen jälkeen. Kuvassa 22 on esitetty samat tulokset pylväsdiagrammien muodossa.

Taulukko III Keskimääräiset partikkelikoot eri sahajauhoille jauhatusten jälkeen.

Käsittely	Kesk.määr partikkelikoko [µm]		
	Haapa	Kuusi	Mänty
Siivilöity	563	147	201
Suspensio	703	708	407

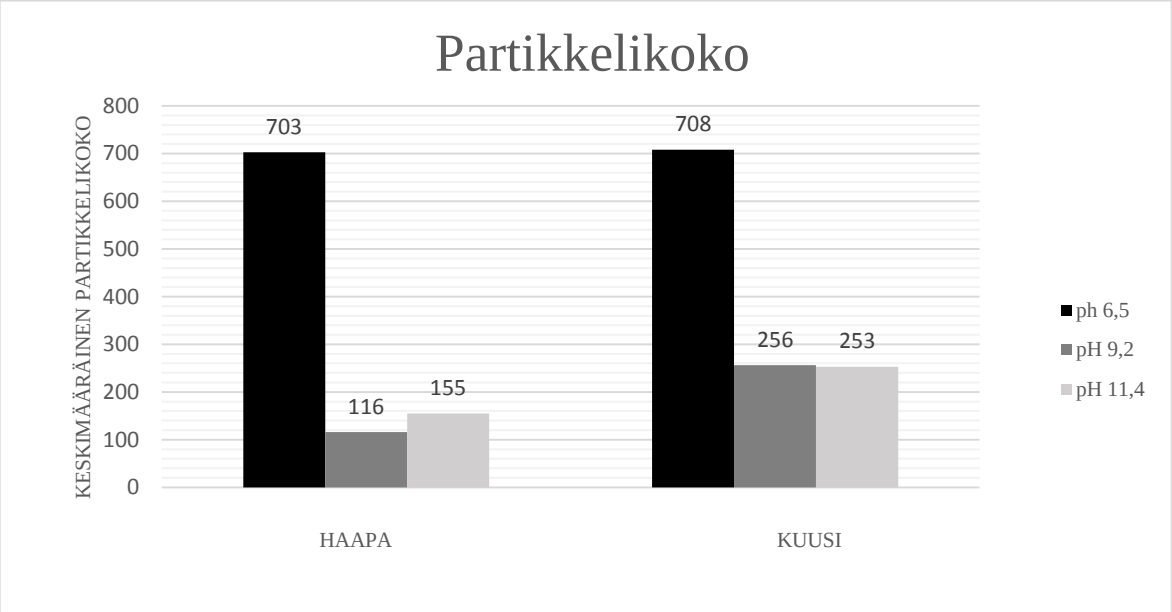


Kuva 22 Keskimääräiset partikkelikoot eri sahajauhoille 24 tunnin liotuksen sekä suspensio esikäsittelyjen jälkeisten jauhatusten jälkeen.

Taulukossa IV on esitetty keskimääräiset partikkelikoot jauhetuille pH-käsitellyille haapa- ja kuusisahajauhoille. Kuvassa 23 on esitetty samat tulokset pylväsdiagrammien muodossa.

Taulukko IV Keskimääräiset partikkelikoot jauhetuille pH-käsitellyille haapa- ja kuusisahajauhoille.

pH	Kesk.määr.partikkelikoko [µm]	
	Haapa	Kuusi
6,5	703	708
9,2	116	256
11,4	155	253



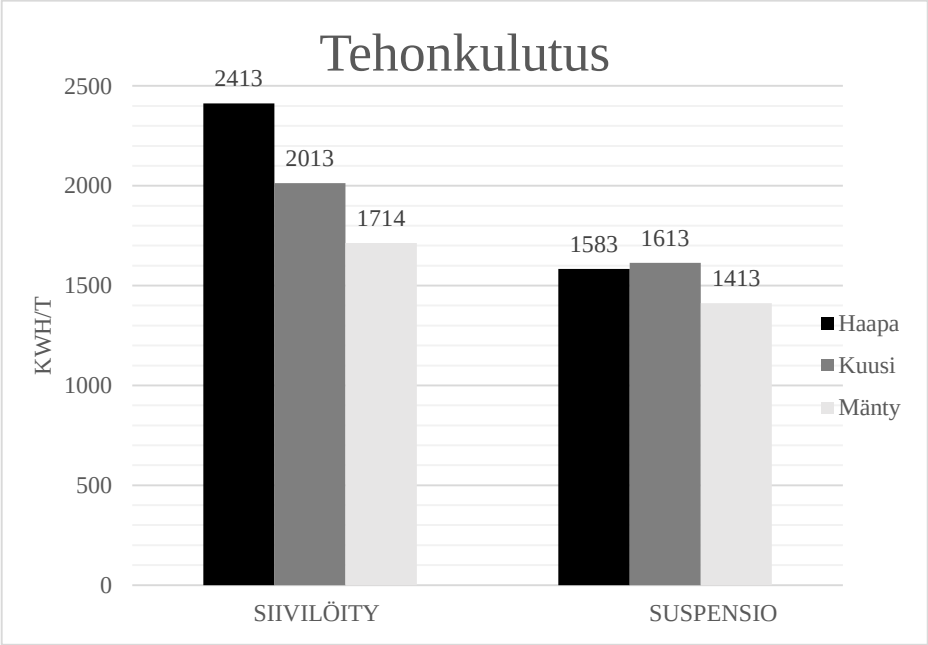
Kuva 23 Keskimääräiset partikkelikoot jauhetuille, pH-käsitellyille haapa- ja kuusisahajauhoille.

7.2 Jauhatuksen energiankulutus

Taulukossa V on esitetty keskimääräiset tehonkulutukset kahdella eri käsittelytekniikalla (24 tunnin vesiliotus ja siivilöity sekä suspensiona syötetty) kaikille eri sahajauhoille, kun ne on jauhettu vasaramyllyllä. Kuvassa 24 on esitetty samat tehonkulutukset pylväs-diagrammien muodossa.

Taulukko V Tehonkulutukset kaikille sahajauhoille kahdella eri käsittelytekniikalla.

Käsittely	Tehonkulutus [kwh/t]		
	Haapa	Kuusi	Mänty
Siivilöity	2413	2013	1714
Suspensio	1583	1613	1413



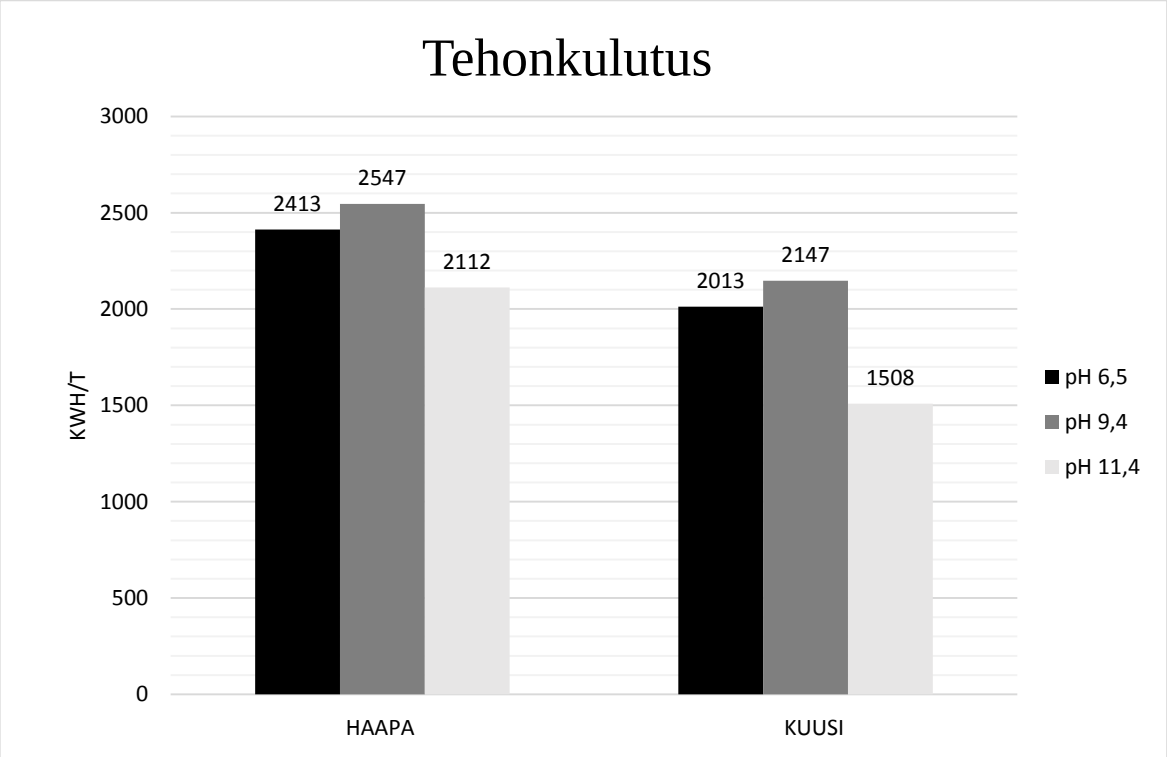
Kuva 24 Tehonkulutukset kaikille eri sahajauhoille 24 tunnin liotuksen ja siivilöityjen sekä suspeniona syötettyjen jauhojen jauhatusten jälkeen.

Koska suspensiona syötettyjen sahajauhojen energiankulutus oli pienempää kuin siivilöityjen, päätettiin pH-liotukset tehdä vain suspensiolle, sekä vain haapa ja kuusi sahajauhoille. Tämä siitä syystä, että haapa on rakenteeltaan kovapuu ja kuusi taas pehmeämpi puu. Männylle ei tehty käsittelyä emäksisessä liuoksessa, sillä mänty ja kuusi ovat rakenteeltaan hyvin samanlaisia, joten päätettiin tehdä mittaukset vain toiselle niistä.

Taulukossa VI on esitetty tehonkulutukset, kun haapa- ja kuusijauhoja oli liotettu eri pH-arvoisissa liuoksissa 24 tunnin ajan. Vertailukohtina ovat pH-käsittelemättömien jauhojen energiankulutukset. Tässä tapauksessa ne ovat 24 tunnin vesiliotuksen jälkeisen jauhatuksen energiankulutukset. PH- arvot näissä käsittelemättömissä sahajauhoissa olivat 6,4 – 6,6, joista käytetään keskiarvoa 6,5. Kuvassa 25 on esitetty samat tehonkulutukset pylväsdiagrammien muodossa.

Taulukko VI Tehonkulutukset jauhetuille pH-käsitellyille haapa- ja kuusisahajauhoille sekä käsittelemättömille sahajauhoille.

pH	Tehonkulutus [kwh/t]	
	Haapa	Kuusi
6,5	2413	2013
9,2	2547	2147
11,4	2112	1508



Kuva 25 Tehonkulutukset jauhetuille pH-käsitellyille haapa- ja kuusisahajauhoille sekä käsittelemättömille sahajauhoille.

8 Johtopäätökset

Työssä jauhettiin kolmea eri sahajauhoa (haapa, kuusi ja mänty) vasaramyllyllä. Sahajauhoja esikäsiteltiin 1, 3 sekä 24 tunnin vesiliotuksilla. Haapa ja kuusijauhoja myös käsiteltiin 24 tunnin pituisella emäskäsittelyllä. 24 tunnin vesiliotusten jälkeen jauhatukset tehtiin sekä siivilöitynä että 5 % suspensiona. Emäskäsittelyjen jälkeiset jauhatukset tehtiin myös suspensiona.

Mittausten tuloksista voidaan päätellä, että syy 1. ja 3. tunnin vesiliotuksien jälkeisiin jauhautumisien epäonnistumisiin oli se, että sahajauhojen kosteusprosentti ei ollut riittävän suuri. Näin ollen mylly ei jaksanut jauhaa sahajauhoja ja jauhot kerääntyivät myllyn ulkokaarelle ja lopulta jauhojen määrä oli niin suuri, että myllyn vasaralevyt juuttuivat kiinni jauhomassaan. 24 tunnin vesiliotusten jälkeen jauhojen kosteusprosentti oli kuitenkin riittävän suuri, että mylly jaksoi jauhaa ne pienemmäksi ja näin ollen saatiin vertailukelpoisia tuloksia.

Jauhatustuotteiden keskimääräisiin partikkelikokoihin vaikutti suuresti siivilöitiinkö sahajauhot vai ei. Siivilöityjen sahajauhojen partikkelikoot olivat paljon pienempiä kuin suspensiona syötettyjen. Tämä käy ilmi taulukosta III ja kuvasta 22 Esimerkiksi jauhetun haapajauhosuspension keskimääräiseksi partikkelikooksi mitattiin 703µm ja siivilöidyn 563 µm. Näistä tuloksista voidaan päätellä, että jauhojen yhteydessä myllyyn syötetty vesi huonontaa jauhautumista. Tämä voi johtua siitä, että vesi niin sanotusti painaa partikkelit siivilän läpi ennen kuin ne ovat kunnolla jauhautuneet. Keskimääräiset partikkelikoot olivat haavalla jauhatusten jälkeen suunnilleen samat riippumatta liotuksessa käytetyn pH-liuoksen vahvuudesta (9,2 pH, 116µm sekä pH 11,4, 155µm), mutta kuitenkin huomattavasti pienemmät kuin esimerkiksi suspensiona syötetyn haavan keskipartikkelikoko. Myös kuuselle saatiin saman tyyppiset tulokset. Näistä voidaan päätellä, että ainakin osa sahajauhojen sisältämästä ligniinistä poistui, sillä molemmat jauhot jauhautuivat pieniin partikkelikokoihin.

Haapajauhojen jauhamiseen 24 tunnin liotuksen ja siivilöinnin jälkeen, kului eniten energiaa, 2413 kWh/t, kuusijauhon jauhamiseen kului 2013 kWh/t ja mäntyjauhojen 1714 kWh/t. Nämä tulokset ovat loogisia sillä haapapuu on niin sanottu kova puu rakenteeltaan ja kuusi ja mänty pehmeämpiä puita. Suspensiona syötettyjen sahajauhojen energiankulutukset olivat selkeästi pienempiä kuin 24 tunnin vesiliotuksen jälkeen siivilöityjen sahajauhojen. Esimerkiksi haapasuspensio kulutti 1583 kWh/t energiaa eli melkein 1000 kWh/t vähemmän

kuin 24 tunnin vesiliotuksen jälkeen. Emäskäsittelyjen jälkeisten jauhatusten tuloksista voidaan todeta, että energiankulutukset pysyivät suurin piirtein samalla tasolla molemmilla sahajauhoilla, kun jauhoja käsiteltiin miedommassa pH-liuoksessa (pH 9,2). Mutta liotus korkeammassa pH-liuoksessa (pH 11,4) näytti vaikuttavan suuresti jauhatuksissa kuluneisiin energiamääriin. Nämä tulokset käyvät ilmi taulukosta VI ja kuvasta 25.

Työstä saatujen tulosten perusteella voi sanoa, että eri esikäsittelytekniikat vaikuttavat suuresti sahajauhojen jauhautumiseen. Jauhautumiseen vaikutti eniten siivilöitiinkö 24 tunnin vesiliotuksissa olleet sahajauhot vai ei. Siivilöidyt jauhot jauhautuivat paljon paremmin kuin suspensiona syötetyt. Myös pH käsittelyt vaikuttivat partikkelikokoihin, mutta eivät niin suuresti kuin syöttötapa. Tehonkulutuksiin vaikutti eniten myös se, että siivilöitiinkö sahajauhot 24 tunnin vesikäsittelyn jälkeen. Suspensiona syötetyt sahajauhot kuluttivat kaikista vähiten energiaa.

Mahdollisissa lisätutkimuksissa voisi tutkia laajemmin eri pH-arvoisten liotusten vaikutusta eri sahajauhoihin. Varsinkin voisi tutkia, että tarkalleen missä pH-arvossa saadaan ligniini liukenemaan pois sahajauhoista. Myös happoliotuksen mahdollisia vaikutuksia emäksen sijaan voisi tutkia.

Lähteluettelo

1. Eskola, Tiina, 2012, biodieselin ja bioetanolin valmistusmenetelmät ja ympäristövaikutukset, opinnäytetyö, kemiantekniikka, Tampereen ammattikorkeakoulu.

2. Europen biomass industry association, 2007, Bioethanol production and use, [verkossa]. [Viitattu 4.12.2014]. Saatavilla: http://www.erec.org/fileadmin/erec_docs/Projcet_Documents/RESTMAC/Brochure5_Bioethanol_low_res.pdf

3. St1-kotisivut, 2014, [verkossa]. [Viitattu 4.12.2014]. Saatavilla: http://www.st1.fi/puhtaampaa-siksi-halvempaa

4. Motiva, 2014, [verkossa]. [Viitattu 4.12.2014]. Saatavilla: http://www.motiva.fi/liikenne/henkiloautoilu/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/flexfuel_eli_etanoli-bensiiniauto

5. Piccolo, C & Bezzo, F, 2007, Ethanol from lignocellulosic biomass: a comparison between conversion technologies, University of Padova, Italy

6. Harmsen, P.F.H, Huijgen, W.J.J, Bermudez Lopez, L.M & Bakker, R.R.C, 2010, Literature review of physical and chemical pretreatment processes for lignocellulosic biomass, energy research centre of the Netherlands

7. Environmental sciense, 2011, [verkossa]. [Viitattu 4.12.2014]. Saatavilla:

http://enb150-2011f-hs.blogspot.fi/2011_12_01_archive.html

8. Coulson, J. M., Richardson, J. F, 1988. Chemical engineering, vol. 2, 4th Ed., Butterworth Heinemann, Oxford.

9. Suokko, Ari, 2010, lignoselluloosaetanolin ja synteesikaasusta fermentoitujen polttonesteiden teknologiatarkastelu, VTT-tiedotteita 2533

10. Lukkarinen, T, 1985 Mineraalitekniikka, osa 1: Mineraalien hienonnus, 2. p,Insinööritieto, Helsinki.

11. Hukki, R.T, 1964. Mineraalien hienonnus ja rikastus, Teknillisten tieteidenakatemia, Helsinki.

12. Kurttio, kari, 2012, rikastustekniikan opettamisen kehittäminen, opinnäytetyö, teknologiaosaamisen johtaminen, Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu

13. Suopajärvi, Hannu, 2013, Biomaterian prosessointitavat: esikäsittelyt, termokemiallinen konversio ja käyttö masuunissa, prosessi- ympäristötekniikan osasto, Oulun yliopisto

14. Biomassprocessing kotisivut [verkossa]. [Viitattu 4.12.2014]. Saatavilla:

http://www.biomassprocessing.org/

15. Malvern-kotisivut, [verkossa]. [Viitattu 4.12.2014]. Saatavilla:

http://www.malvern.com/en/products/product-range/mastersizer-range/mastersizer-3000/default.aspx?gclid=COns-v7mpcICFYHVcgodsB8A2w