

Ensio Väinölä

# PUUN HYÖDYNTÄMISPOTENTIALI ENERGIANTUOTANNOSSA

Kandidaatintyö  
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta  
Tarkastaja: Kari Lappalainen  
Elokuu 2024

# TIIVISTELMÄ

Ensio Väinölä: Puun hyödyntämispotentiaali energiantuotannossa  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta  
Elokuu 2024

---

Suomessa on paljon metsää ja sitä käytetään metsäteollisuudessa sekä energiantuotannossa. Puun hyödyntäminen pelkkään energiantuotantoon ei ole taloudellisesti kannattavinta, vaan puuta kannattaisi jalostaa mahdollisimman paljon. Puun kokonaisvaltaisella hyödyntämisellä on vaikutusta taloudelliseen kestävyYTEEN sekä metsän riittävyYTEEN. Työn tavoitteena on selvittää, löytyykö puulle uusia käyttötarkoituksia energiantuotannossa ja voidaanko puuta jalostaa energiantuotannon ohessa tulevaisuuden sovelluksissa.

Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena, jonka tarkoituksena oli kartoittaa puun hyödyntämistä energiantuotannossa ja samalla tutkia mahdollisuuksia parempaan puun jalostamiseen energiantuotannon ohella. Työssä esitellään puun ominaisuuksia energiantuotantoon sekä yleisimpiä energijakeita ja niiden kustannustehokkuutta. Lisäksi luodaan katsaus erilaisiin tulisijoihin ja niiden ominaisuuksia energian talteen saamisessa. Työssä tarkastellaan puun jalostustuotteita, joiden tuotantoa on testattu tai jotka ovat kehitysvaiheessa sekä jalostustuotteita, joilla on potentiaalia tulevaisuuden puun hyödyntämiseen.

Työn tuloksena selviää, että puun hyödyntämistä energiantuotannossa on vaikea parantaa korkeiden hyötysuhteiden takia. Havaittiin, että Suomessa metsää hyödynnetään lähes kaikki hakkuupotentiaali, jonka vuotuinen kasvu mahdollistaa. Hakkuut eivät jakaudu tasaisesti, vaan joissakin maakunnissa metsää hakataan kestäättömästi. Selvisi myös, että puun nestemäisten jalostustuotteiden tuotantotavat eivät ole saavuttaneet taloudellista kannattavuutta.

Saatujen tulosten pohjalta voidaan loppupäätelmänä todeta, että kasvavaan puun tarpeeseen energiantuotannossa voidaan hyödyntää energiapajua ja puun jalostamisen osalta puuhiili on varteenotettava vaihtoehto. Pajun viljely mahdollistaa energijakeen kasvattamisen lähempänä kulutusta, eikä kuljetuksesta koituisi liialti kustannuksia. Paju sitoo raskasmetalleja, jolloin käyttäminen on rajallista. Sitä voitaisiin käyttää seospoltossa. Puuhiilen tuotannossa puun jalostusaste nousee puuhiilen monien käyttötarkoitusten ansiosta ja tuotannossa syntyy ylijäämäenergiaa. Puun kokonaisvaltaisella hyödyntämisellä varmistetaan, että tulevaisuudessa uusiutuvan energiantarpeen kasvaessa, sen käyttö on taloudellisesti ja energiatehokkaasti on kestäväällä pohjalla.

Avainsanat: Puun hyödyntäminen, Energiantuotanto, Puuenergia

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. PUU ENERGIALÄHTEENÄ.....	2
2.1 Puun koostumus.....	2
2.2 Puun nykyiset käyttömuodot .....	3
2.3 Puun jalostustuotteet .....	4
3. SITOUTUNEEN ENERGIAN HYÖDYNTÄMINEN .....	6
3.1 Tulisijat .....	6
3.2 Lämmityskattilat.....	6
3.3 Yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto .....	8
4. NYKYTILANNE .....	9
4.1 Metsän kasvu ja käyttö .....	9
4.2 Energiantuotannon jakautuminen .....	12
5. PUUN HYÖDYNTÄMINEN TULEVAISUUDESSA .....	13
5.1 Puunhankinnan kestävyys .....	13
5.2 Uusiutuvan energian direktiivi (RED II) .....	14
5.3 Energiantuotanto .....	15
5.4 Puun uudet hyödyntämistarkoitukset .....	15
5.5 Puun jatkojalostaminen.....	16
6. YHTEENVETO.....	18
LÄHTEET .....	20

# 1. JOHDANTO

Suomessa puusto kasvaa enemmän kuin sitä hakataan vuosittain [1]. Puuta hyödynnetään teollisuudessa, joka tuottaa sivutuotteena energiaa niin lämmön kuin sähkön muodossa. Koska metsä kasvaa enemmän kuin sitä hakataan, voitaisiin sen käyttöä lisätä energiantuotannossa. Pelkkään energiantuotantoon puuta käytetään vain viidennes hakatusta raakapuusta. Tästä noin puolet käytetään voimalaitoksissa energiantuotantoon ja loput pientaloissa sekä maataloilla. [2]

Fossiilisista energiantuotantomuodoista pyritään pääsemään eroon, joten on tarpeellista keksiä uusia energiantuotantomuotoja, jotta pystytään korvaamaan niistä aiheutunut energiavaje. Puuta voidaan käyttää monipuolisesti energiantuotantoon, kun keksitään polttamisen lisäksi muitakin tapoja käyttää sitä. Uusia tapoja kehitetään, jotta puuta voidaan käyttää monipuolisemmin. Hyvä esimerkki on pyrolyysi, josta saadaan energiaa, hiiltä ja öljyä.

Energiantarpeen jakautuminen on puusta saatavan energian osalta haastava asia, sillä siellä missä tarvitaan paljon energiaa, siellä ei kasva metsää, josta raaka-ainetta energiantuotantoon saataisiin. Tällöin tulee tarve logistiikalle ja erilaisille varastointimenetelmille, jotta puun käyttö olisi taloudellista. Tämä avaa mahdollisuuden kasvattaa puuta pelkästään energiantuotannon tarpeisiin. Pajun viljely on esimerkki tällaisesta tuotantomuodosta.

Työssä tarkastellaan puun ominaisuuksia, joiden ansiosta se soveltuu hyvin energiantuotantoon. Työssä tarkastellaan yleisimpiä tapoja käyttää puuta energiantuotannossa sekä luodaan katsaus yleisimpiin energiantuotantolaitteisiin sekä vertaillaan eri energijakeiden kustannustehokkuutta.

Työssä luodaan katsaus metsien nykytilaan ja tarkastellaan metsän kasvun luomaa potentiaalia energiantuotantoon hyödynnettäväksi. Lisäksi esitetään tilastoa puun hyödyntämisestä energiantuotannossa.

Lopuksi tarkastellaan puun hyödyntämisen tulevaisuudennäkymää ja tarkastellaan, mitä rajoitteita direktiivit luovat puun hyödyntämiseen sekä mitä eri mahdollisuuksia olisi puun parempaan hyödyntämiseen. Lisäksi selvitetään, onko uusia mahdollisia energiantuotantomuotoja.

## 2. PUU ENERGIALÄHTEENÄ

Tässä luvussa perehdytään puun koostumukseen ja sen vaikutuksiin puun energiasisälön kannalta. Luvussa tuodaan esille puun eri käyttömuotoja sekä vertaillaan niiden kustannustehokkuutta.

### 2.1 Puun koostumus

Puun kuiva-ainemäärästä on noin 50 % hiiltä, 41 % happea ja 6 % vetyä. Loput 3 % ovat muita aineita, pääosin typpeä, rikkiä sekä tuhkaa. Puusta saatavaan energiaan vaikuttavat ainoastaan hiili ja vety, joiden osuudet palavasta aineksesta ovat 88 % ja 12 %. Lämmöntuotto jakautuu hiilen ja vedyn osalta siten, että hiili tuottaa kaksi kolmasosaa luovutetun lämmön määrästä. Vety tuottaa palaessaan huomattavasti enemmän energiaa kuin hiili, sillä sitä on vain reilu kymmenen prosenttia palavasta aineksesta, mutta sen palaminen tuottaa kolmanneksen energiasta. [3]

Energiantuotannossa puun kosteudella on suuri merkitys saatavaan energiaan. Energiasisältö ilmoitetaan yleensä kilowattitunteina jokaista painokiloa kohden (kWh/kg). Tuoreessa puussa voi olla jopa 50 % vettä, joka lisää puun, muttei palavan materiaalin massaa. Energiantuotannossa käytetyn puumateriaalin kosteus vaihtelee 15 ja 30 %:n välillä. [4] Ulkoilmassa kuivatun puun kosteus voi olla 15–25 %. Tähän vaikuttaa ilman suhteellinen kosteus. [5] Täysin kuivaan puuhun ei päästä kuin koneellisella kuivaamisella. Tämä vaatii ulkoista energiaa, jolloin kustannustehokkuus heikkenee.

Eri puulajeilla on hieman toisistaan poikkeavia alkuainepitoisuuksia, jolloin niiden lämpöarvot eroavat toisistaan. Männyn lämpöarvo on 4,15 kWh/kg kun taas haavan vastaava arvo on 4,00 kWh/kg. Yleisesti käytetyn koivun lämpöarvo on sama kuin männyllä. Puulajien tiheydet eroavat toisistaan, mikä muodostaa eroavaisuutta energiatiheyksissä. Energiatiheys kuvaa lämpöarvoa tilavuuteen verrattuna. Koivulla on suomalaisista puulajeista suurin energiatiheys. Se on noin 26 % korkeampi kuin havupuilla ja noin 32 % kuin muilla suomalaisilla lehtipuilla. [6, taulukko 4.42]

## 2.2 Puun nykyiset käyttömuodot

Puuta voidaan hyödyntää hyvin monella tapaa energiantuotannossa, sen monien eri muotojen ansiosta. Tässä luvussa käsitellään energiajakeina klapia, haketta, pellettiä ja brikettiä. Yhteisenä energiayksikkönä käytetään megawattituntia (MWh:a), jotta eri polttoaineiden vertaileminen on mahdollisimman helppoa. Eri polttoaineiden hinnat ilmoitetaan eri tavoilla. Pelletin ja briketin hinnat ilmoitetaan euroina kiloa kohden, kun taas hakkeen ilmoitetaan suoraan MWh:a kohden. [7] Energiantuotantomäärissä klapihin hinta ilmoitetaan irtokuutiota kohden. Hinta MWh:a kohden lasketaan kaavalla

$$\frac{1000 \text{ kWh}}{\text{lämpöarvo}} \text{ kilohinta.} \quad (1)$$

Klapi on yleisesti käytetty kotitalouksien lämmittämiseen tulisijoissa, kuten takoissa ja kiukaissa. Sitä käytetään myös lämmityskattiloissa. Klapiin pituus on 25–50 cm ja halkaisija noin 10 cm. Koko vaihtelee käyttötarkoituksen mukaan. Klapiin kosteusprosentti on useimmiten 15–20, sillä se kuivataan ja varastoidaan ulkotiloissa. Sen lämpöarvo on noin 4,1 kWh/kg, kun sen kosteusprosentti on 20. [6, s.87–90]. Klapihin hinta vaihtelee sen mukaan, onko kyseessä sekaklapi vai pelkkä koivuklapi. Hinta ilmoitetaan tuoreelle klapille, jolloin kosteusprosentti on 50 %. Pelkkää tuoretta koivuklapiä tarvitaan yhden MWh:n energian saamiseksi hieman reilun yhden irtokuution verran. Koivuklapihin hinta on 90 € irtokuutiolta. Hinnaksi saadaan noin 97 €/MWh. Sekaklapi on määritetty siten, että se sisältää puolet sekahavupuuta, puolet koivua ja kosteusprosentti on 50. MWh:iin vaadittava sekaklapien määrä on noin 1,2 irtokuutiota ja hinta sekaklapihin irtokuutiolta on 80 €. Täten hinta energiayksikköä kohden on noin 97 €. [6, taulukko 4.42] [8]

Hake on usein hakkuujätteestä tai toisarvoisesta puusta hakkurilla tuotettua puusilppua, jonka laadukkuus riippuu hakkuumateriaalista. Kooltaan se on 5–50 mm. Hakkeesta saadaan melko tasakokoista, mikä riippuu haketusmateriaalista. Sitä käytetään voimalaitoksissa ja hieman suuremmilla yksittäisillä kuluttajilla kuten maataloilla. Hakkeen lämpöarvo ei ole yhtä korkea kuin klapihin, sillä sen kosteusprosentti on usein korkeampi verrattuna klapihin kosteusprosenttiin. Hakkeen varastoinnilla on suuri merkitys siitä saatavaan energiaan. [9] Hakkeen hinta MWh:a kohden on noin 30 € [10].

Pelletti on tasalaatuisia ja samankokoisia yleensä teollisuudessa syntyvästä hiontapölystä sekä kutterin- ja sahanpurusta puristettuja pieniä sylinterin muotoisia rakeita. Niiden lämpöarvo on noin 4,75 kWh/kg. Kosteusprosentti pelletillä on alle 10 prosenttia, mikä mahdollistaa sen paremman säilymisen ilman homeutumista. Pellettiä käytetään

keskuslämmityksessä. Sitä voidaan käyttää myös hakkeeseen sekoitettuna, jolloin se parantaa energian saantia. [11] Pelletin hinta lasketaan kaavalla 1. Pelletin kilohinta on 0,47 €. Näin hinnaksi energiayksikköä kohden saadaan noin 100 €/MWh. [7]

Briketti on pelletin tapaan valmistettu puusepänteollisuuden sivutuotteista kuten höylän lastuista sekä sahanpurusta. Briketin ulkomuoto muistuttaa pellettiä, mutta kooltaan se on huomattavasti suurempi. Sen halkaisija on noin 5 cm ja pituus on 5–15 cm. Lämpöarvoltaan sekä kosteusprosentiltaan briketti ei juurikaan eroa pelletistä. Sen lämpöarvo on 4,80 kWh/kg. Brikettiä voidaan käyttää energiantuotannossa klapien korvaavana tuotteena. [12] Briketin hinta lasketaan samalla tavalla kuin pelletillä. Hinnaksi saadaan noin 100 €/MWh. [7].

Edullisin hinta energiayksikköä kohden on hakkeella, jonka hinta on 30 €/MWh. Klapien hinta on noin 97 €/MWh, joka on suunnilleen sama kuin pelletillä ja briketillä. Suurin eron eri polttoaineiden välillä on niiden varastointilavuudella. Klapeilla ja hakkeella tarvittava tilavuus on samansuuruinen, kun taas pelletti ja briketti vaativat vähemmän tilaa paremman energiatiheytensä ansiosta. [6, taulukko 13.2]

Puun koko elinkaaren aikana saadaan energiaksi hyödynnettävää materiaalia. Kannoista ja oksista voidaan tehdä haketta. Tukkupuiden sahauksesta saadaan purua, josta voidaan tehdä pellettejä tai brikettejä. Tuotetun sahatavaran työstämisessä voi syntyä erilaisia työstöjätteitä, joista voidaan tehdä brikettejä. Puun elinkaaren lopussa se voidaan vielä työstää energian eri tuotantomuotoihin sopivaksi.

### 2.3 Puun jalostustuotteet

Jalostustuotteilla tarkoitetaan tässä tapauksessa puusta pyrolyysin avulla tuotettuja energiantuotantoon soveltuvia tuotteita. Pyrolyysissa puuaines kuumennetaan hapettomassa olossa korkeaan lämpötilaan, jolloin puusta muodostuu pyrolyysikaasuja. Lopputuotteena jäljelle jää suurimmaksi osaksi pelkkää hiiltä. [13, s. 90]. Luvussa käsitellään biokaasua, -öljyä ja -hiiltä.

Biohiiltä valmistetaan biopohjaisista materiaaleista, jotka sitovat itseensä ilmakehästä hiilidioksidia. Työssä tarkastellaan puupohjaista biohiiltä. Biohiilellä on monia käyttötarkoituksia. Sitä käytetään niin maanparannukseen kuin energiantuotantoonkin. Työssä keskitytään biohiileen energiantuotannon näkökulmasta.

Puun pyrolyysin kiinteänä lopputuotteena syntyy biohiiltä. Pyrolyysiolosuhteilla voidaan vaikuttaa siihen, minkälaista lopputuotteena syntyvä biohiili on. Korkeammassa lämpötilassa tapahtuva sekä pidempikestoinen pyrolyysi poistaa puuaineksesta enemmän haihtuvia aineita, jolloin jäljelle jää enemmän hiiltä. [6, s. 98] Biohiilen energiasisältö on

huomattavasti suurempi verrattuna edellä luvussa 2.2 mainittuihin käyttömuotoihin. Biohiilen energiasisältö on noin 8 kWh/kg, mikä on samaa suuruusluokkaa kivihiilen kanssa. [6, taulukot: 13,2, 4.48,4.49].

Pyrolyysissä syntyy kaasuja, joita voidaan käyttää energiantuotantoon. Syntyvä kaasu koostuu pääosin vedystä, hiilidioksidista, hiilimonoksidista ja metaanista. Pyrolyysissä kaasusaanto on noin 35 %. Puun kaasuttamisella saantoprosentti on noin 80 %, silloin tarkoituksena on tuottaa mahdollisimman paljon kaasua. Jäljelle jäävää ainesta hyödynnetään kaasutuksen ylläpitoon. Lämpöarvo syntyneelle kaasulle on 0,8–4,2 kWh/m<sup>3</sup>. Vertailukohtana vastaava arvo maakaasulla on 10,3 kWh/m<sup>3</sup>. [14]

Bioöljyä valmistetaan nopealla pyrolyysillä. Prosessissa puuainees kuumennetaan nopeasti korkeaan lämpötilaan, jolloin aines kaasuuntuu. Kaasut lauhdutetaan nesteeksi, jolloin syntyy pyrolyysiöljyä. Öljyä saadaan jopa noin 75 % kuivan puuaineesen massasta. [6, s.182] Pyrolyysillä saadun öljyn lämpöarvo on 3,6–5,0 kWh/kg [6, taulukko 13.2].

Laitoksissa tuotettua biohiiltä käytetään Suomessa pääosin maatalouskäytössä maanparannukseen. Laitoksien ylijäämälämpöä hyödynnetään kaukolämpönä. [14] Biokaasulaitoksia Suomessa on monia, mutta niissä ei käytetä puuta raaka-aineena [15]. Fortum on ainoa suomalainen yritys, joka käyttää metsäteollisuuden sivuvirroista tuotettua bioöljyä suuremmassa mittakaavassa kaukolämmöntuotannossa. [16] Lieksalainen Green Fuel Nordic tuottaa pyrolyysiöljyä kotimaisesta sahanpurusta, mutta on sittemmin hakeutunut konkurssiin kannattamattomuuden vuoksi [17].

## 3. SITOUTUNEEN ENERGIAN HYÖDYNTÄMINEN

Puun hyödyntämispotentiaaliin vaikuttavat suuresti erilaiset lämmityskattilat, joilla puuhun sitoutunut energia saadaan hyödynnettyä. Kattilatyypeillä on eri hyötysuhteet ja menetelmät energian talteenotossa. Tässä luvussa käydään läpi erilaisia kattilatyyppejä ja niiden tehokkuutta hyödyntää puun energiasisältöä.

### 3.1 Tulisijat

Perinteinen tapa hyödyntää puuhun sitoutunutta energiaa on polttaa sitä erilaisissa tulisijoissa. Nämä ovat yleensä panospolttoisia, jolloin polttoainetta poltetaan kerralla, ja hetkellisesti tuotetaan suuri määrä energiaa. Tulisijat ovat yläpaloisia, jolloin palamisilma tulee pesän pohjan arinan kautta ja savukaasut lähtevät ylöspäin, mistä ne lähtevät kiertämään tulisijan rakenteisiin, jos käytössä on varaava tulisija kuten varaava takka tai leivinuuni. Tulisijojen ilmansaanti toteutetaan yleensä luonnonvedolla, jolloin ne eivät tarvitse koneellista ilmansaantia, eivätkä ulkoista energiaa toimiakseen. Energianlähteenä näissä käytetään yleensä klapeja. Muita tulisijoja ovat: avotakka, liesi, kiuas sekä pellettitakka, joka toimii eri tavalla edellä mainittuihin tulisijoihin verrattuna. [18] Pellettitakassa nimensä mukaan käytetään poltettavana materiaalina pellettejä, eikä siinä saa käyttää mitään muuta polttoainetta. Takassa tapahtuva palaminen toteutetaan saman tyyllisesti kuin pellettikattilalla, jonka toimintaa selostetaan tarkemmin luvussa 3.2.[19, s.6–8]

Tulisijoilla on eri hyötysuhteet riippuen siitä, mihin käyttöön ne ovat tehty. Jos tarkoituksena on käyttää tulisijaa vain sisustuselementtinä ja tunnelman luojana, eikä lämmön varastointia ole tarkoitus suunnitella, on kyseessä avotakka. Avotakan hyötysuhde jää alle 30 %:iin. Kun huomioidaan lämmön varastoitavuus, mikä toteutetaan varaamalla lämpöä tulisijan rakenteisiin, saadaan hyötysuhde nostettua noin 80 %:iin. Leivinuunilla on tyypillisesti sama hyötysuhde kuin varaavalla takalla. Tulisijoista liedellä ja kiukaalla on hyötöprosentti alhaisempi kuin lämmön varaamiseen tarkoitetuilla tulisijoilla, sillä lämpöä hyödynnetään vain hetkellisesti. [18]

### 3.2 Lämmityskattilat

Perinteisten tulisijojen sijaan lämmitys voidaan toteuttaa lämmityskattilalla, jonka kanssa yleensä käytetään vesivaraajaa, jotta palamisesta saatu energia saadaan varastoitua ja hyödynnettyä pidemmällä aikavälillä. Pilkkeen poltossa käytetään ala-, ylä- tai

käänteispalokattilaa. Haketta voidaan polttaa ala- tai yläpaloisessa kattilassa tai stokeripolttimella. [20] Pelletille on omanlaisensa kattila.

Yksinkertaisin lämmityskattila on yläpalokattila, jossa palaminen toteutetaan puumateriaalin kertaluontoisella polttamisella. Puuaines lisätään yhtenä panoksena ja sytytetään. Savukaasut ohjataan kattilan yläosan kautta hormiin. Palamiseen tarvittava ilma tulee kattilan rakoarinan sekä luukkujen läpi. Varaajalla kattilaa voidaan käyttää nimellisteholla, jolloin palaminen on tehokasta ja savukaasut ovat puhtaampia. [13, s. 93] Palaminen toteutetaan yleensä luonnonvedolla.

Alapalokattilat ovat vastaavanlaisia palamiseltaan kuin yläpaloiset kattilat. Eroavaisuuksia on palamiskaasujen ohjauksessa. Palokaasut ja liekit ohjataan kattilan alaosasta jälkipalo-osaan, jossa ne palavat loppuun. Alapaloisella kattilalla saavutetaan jatkuvaluontoisempi polttotapahtuma verrattuna yläpaloiseen kattilaan. Tämä mahdollistaa helpommin polttoaineen syöttämisen palotilaan ilman, että siellä tapahtuu suuria olosuhteiden muutoksia. Palaminen voidaan toteuttaa joko luonnonvedolla tai puhaltimella, jolloin palaminen tehostuu. [13, s. 93]

Käänteispalokattilan toiminta perustuu pohja-arinan läpi virtaavien palokaasujen jälkipalamiseen. Panoksittain lisätty puuaines palaa alaosassa ja ylempi aines kaasuuntuu. Kaasujen palaminen tapahtuu korkeassa lämpötilassa ja rasittaa kattilan rakenteita edellä mainittuja kattilatyyppejä enemmän. Käänteispalokattilalla saavutetaan parempi hyötysuhde kuin ylä- tai alapalokattilalla. Palamista tehostetaan koneellisesti, jolloin saavutetaan parempi palaminen. Kattila vaatii varaajan, sillä se tuottaa hetkellisesti suuren tehon. [13, s. 94]

Hakkeen polttoon tarkoitettu stokeripoltin eroaa muista kattiloista siten, että se on jatkuvapolttoinen. Palamista säädellään syötetyn polttoaineen ja puhaltimilla ohjatun ilman avulla. Näin palaminen saadaan aina mahdollisimman täydelliseksi. Polttolaitteisto koostuu sylinterimäisestä palopäästä, johon hake syötetään kairan avulla. Laitteisto voidaan sijoittaa olemassa olevaan kattilaan, joka on yläpaloinen, tai omanlaiseensa kattilaan, jossa on otettu huomioon laitteiston huoltotarve. Pellettipoltin on samanlainen toimintaperiaatteeltaan kuin stokeripoltin. Stokeripoltin ei vaadi erillistä varaajaa, koska palamista voidaan säädellä tarvittavan energian mukaan. [13, s.94–95]

Kattilavalinnalla on merkitystä siihen, kuinka hyvin puuhun sitoutunut energia saadaan hyödynnettyä pelkässä lämmöntuotannossa. Eri polttomateriaaleille on omanlaisensa kattilat. Kattilatyypin määrittää tarvittava lämmitysteho sekä saatavilla oleva polttoaine. Taulukkoon 1 on otettu poltinpuukattilatyypit ja niiden hyötysuhteet varaajalla ja ilman varaajaa.

**Taulukko 1.** Poltinpuukattiloiden hyötysuhde mukaillen lähteestä. [21]

Kattilatyyppe	Hyötysuhde (%)	
	Suora lämmitys	Varaava lämmitys
Kaksoispesäkattila	45	70
Yläpalokattila	50	70
Alapalokattila	60	80
Käänteispalokattila	65	85

Taulukosta huomataan, että varaajalla on parantava vaikutus hyötysuhteeseen, koska sillä saadaan energiaa talteen. Paras ratkaisu pilkkeen polttoon on käänteispalokattila varaajalla, jolloin päästään jopa 85 %:n nimellishyötysuhteeseen. Hake ja pellettikattilalla hyötysuhde vaihtelee 70 ja 90 %:n välillä [21].

### 3.3 Yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto

Puuta voidaan hyödyntää pelkästään sähköntuotannossa, jolloin puhutaan lauhdevoimasta, mutta parempi kokonaishyötysuhde saavutetaan, kun tuotetaan samanaikaisesti sekä sähköä että lämpöä [22 s.37]. Yhteisvoimalaitokset voidaan mitoittaa joko tarvittavan sähkötehon tai lämpötehon mukaan. Voimaloissa lämpöenergiaa tuotetaan enemmän kuin sähköä. Tuotetun sähkötehon suhde lämmöntuottoon on 0,30–0,35 [13, s.99].

Voimalaitokset, joissa tuotetaan lämpöä ja sähköä ovat vastapainevoimalaitoksia, joissa lämmönvaihtimilla saadaan lämpöä kaukoverkkoon tai tehtaan omaan käyttöön, jos voimalaitos toimii tehtaan yhteydessä. Parhaimmillaan vastapainevoimalaitoksilla päästään 93 %:n hyötysuhteeseen. [22, s.37]

Voimalaitosta suunniteltaessa pitää kartoittaa, kuinka paljon sillä pyritään tuottamaan lämpöä ja sähköä. Tämä vaikuttaa voimalan rakenteeseen, kuten siihen käytetäänkö useampia lämmönvaihtimia, jolloin lämpöä saadaan enemmän, mutta sähkötehoa vähemmän. [22, s.38]

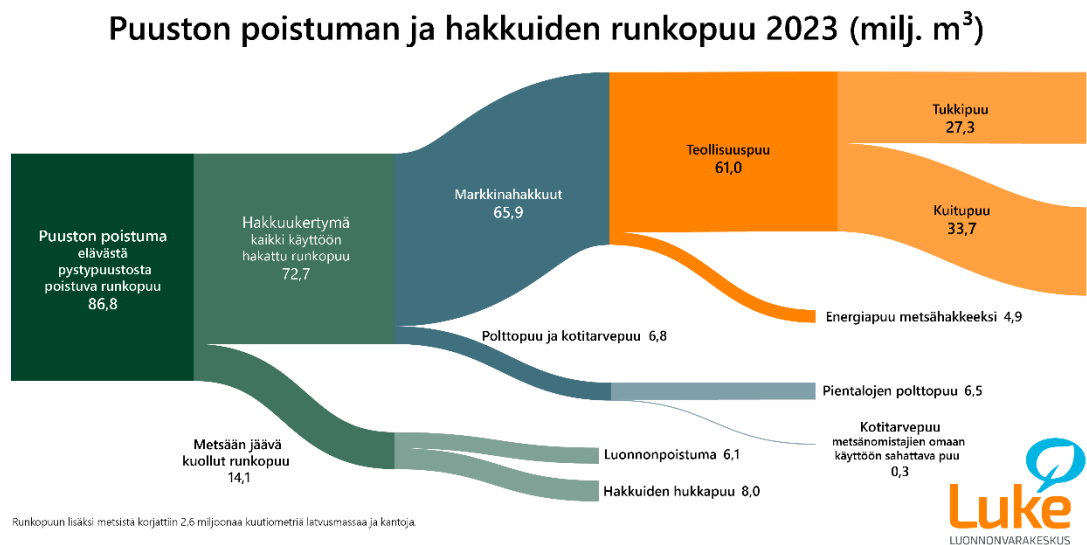
## 4. NYKYTILANNE

Koko maassa kasvaa metsää ja sitä hakataan laajalti, metsän kasvu ja sen hakkuu vaihtelee maakunnittain. Energiantuotantoon menevää puujaetta syntyy metsäteollisuuden sivuvirroista ja hakkuun tähteistä sekä energiapuusta. Tässä luvussa käydään läpi metsän hakkuiden nykytilannetta sekä niistä saatavia virtoja ja esitetään puujakeiden jakautumista energiantuotannossa.

### 4.1 Metsän kasvu ja käyttö

Metsät kasvavat Suomessa 104 miljoonaa kuutiometriä vuodessa. Puulajeittain kasvu jakautuu männyn, kuusen, koivun ja muiden lehtipuiden osalta. Näistä mäntyä kasvaa eniten eli noin 45 milj. m<sup>3</sup>. Seuraavaksi eniten kasvaa kuusta, noin 36 milj. m<sup>3</sup>. Lehtipuiden osuus kasvusta on noin 23 milj. m<sup>3</sup>, josta koivua on suurin osa. [23]

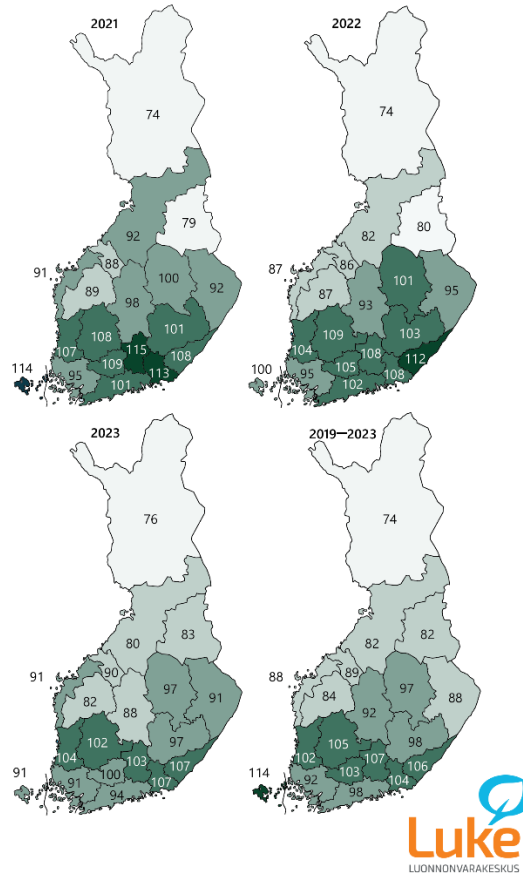
Kuvassa 1 on kuvattu puuston poistumaa, josta huomataan, että suurin puunkulutus on teollisuudessa ja sen sovelluksissa.



**Kuva 1. Puuston poistuman jakautuminen 2023. [24]**

Kun verrataan puun poistumaa siihen kuinka paljon metsä kasvaa, huomataan, että metsää kasvaa hieman enemmän kuin sitä poistuu. Ongelman aiheuttaa alueellinen poistuma, jota esitetään kuvassa 2.

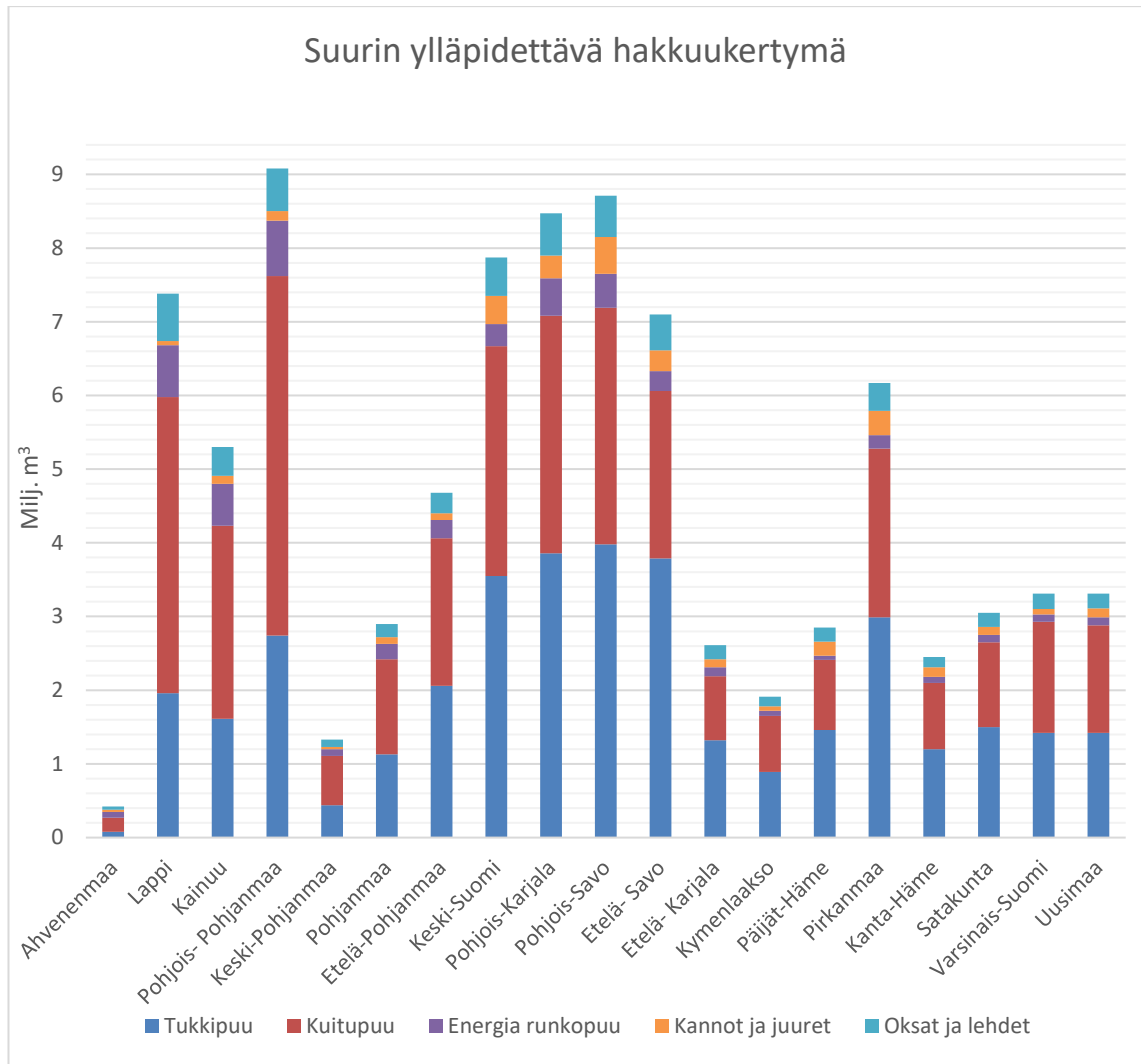
Toteutuneen hakkuukertymän osuus suurimmasta  
ylläpidettävissä olevasta hakkuukertymäarviosta  
2019–2028, %



**Kuva 2. Toteutuneet hakkuukertymät. [24]**

Vaikka puuston kasvu on koko maan tasolla suurempi kuin poistuma, on paljon alueellista eroa. Kuvasta nähdään, että Etelä-Suomessa hakataan metsää paljon. Tämä tuo haasteen puun käytön lisäämiselle energiantuotannossa. Hakkuu on keskittynyt Keski-Suomeen, jossa puusto kasvaa hyvin ja puutavaran kuljettaminen on kannattavaa. Luokun ottamatta Varsinais-Suomea, jossa metsää hakataan enemmän kuin kasvukertymä sallisi. Pohjanmaalla, Lapissa ja Itä-Suomessa olisi varaa kasvattaa hakkuita.

Kuvasta voidaan päätellä, että hakkuita on suosittu lähellä kulutusta. Vaikka puunkäytön lisäämiselle olisi potentiaalia hakkuiden myötä, voivat logistiset haasteet aiheuttaa kannattamattomuutta eteenkin pohjoisessa Suomessa, jossa välimatkat ovat pitkiä. Alla on esitetty suurin mahdollinen ylläpidettävä hakkuukertymä maakunnittain.



**Kuva 3. Suurin ylläpidettävä hakkuukertymä, mukaillen lähteestä. [23]**

Kun verrataan kuvia kaksi ja kolme huomataan, että Lapissa olisi vielä potentiaalia kasvattaa kestävää hakkuuta. Kainuussa voitaisiin kasvattaa hakkuita, mutta verrattuna Lappiin siellä metsä kasvaa vähemmän. Kaiken kaikkiaan hakkuiden määrää voitaisiin nostaa niin, että kokonaishakkuukertymä olisi 89 m<sup>3</sup>. Kun tutkitaan kuvaa kaksi, on kokonaisuudessaan hakkuukertymä melkein edellä ilmoitettu, joten hakkuita voidaan lisätä vain hieman. Suurin potentiaali on hakkuiden hyödyntämisessä.

## 4.2 Energiantuotannon jakautuminen

Suomessa tuotettua raakapuuta käytetään vuodessa noin 70 milj. m<sup>3</sup>, josta noin 80 % käytetään metsäteollisuudessa ja loput noin 20 % hyödynnetään suoraan energiantuotannossa. Energiaa tuotettiin teollisesti kiinteällä puupolttoaineella noin 44 teravattituntia (TWh:a), mikä vastaa kaikesta suomessa tuotettavasta teollisesta energiasta noin 30 %. Puuainesta energiantuotantoon päätyi noin 22 milj. m<sup>3</sup>, josta noin puolet on peräisin teollisuuden sivuvirroista. [2]

Voimalaitoksissa käytetään noin 11 milj. m<sup>3</sup> metsähaketta, joka valmistetaan pienpuusta, hakkuutähteistä sekä runkopuusta, joka on kelpaamatonta teollisuuden käyttöön. Loput energiajakeista koostui metsäteollisuuden sivuvirroista, joihin kuuluu puun kuori, jota on reilu puolet, purua käytettiin neljänneksen ja jäljelle jäänyt neljännes koostuu erilaisista tähdetuotteista, kuten briketeistä ja kierrätyspuusta. [25]

## 5. PUUN HYÖDYNTÄMINEN TULEVAISUUDESSA

Euroopan unioni (EU) vaatii korkeampaa uusiutuvan energian osuutta kokonaisenergiantuotannossa. Tämä tarkoittaa panostamista uusiutuvien energianlähteiden kehittämiseen. Esimerkiksi puupohjaista energiantuotantoa voidaan lisätä tulevaisuudessa. Jotta puunhankintaa voidaan lisätä, on sen kestävyttä tutkittava, jotta puun tuotanto olisi kestäväällä pohjalla. Puunkäyttö osana energiantuotantoa tukee Suomen huoltovarmuutta energiantuotannossa. Samaan aikaan päästökriteerit tiukentuvat, mikä vaatii uudistuksia puhtaamman energiantuotannon saamiseksi. [26]

### 5.1 Puunhankinnan kestävyys

Kestävästi hankittu puuainees energiantuotantoon ei ole itsestäänselvyys. Se mitä puuvirtoja käytetään energiantuotannossa, vastaa osittain puun käytön kestävydestä. Energiaksi menevää puuta ei siinä tarkoituksessa kaadeta metsästä, vaan hyödynnetään hakkuujätteitä ja metsänharvennuksessa syntyvää puuainesta hakkeen muodossa. Haketta tehdään myös toisarvoisesta puumateriaalista, joka on kelpaamatonta jatkojalostukseen. Sellunvalmistuksessa syntyy mustalipeää, jota käytetään energiantuotannossa ja se on merkittävä yksittäinen energiantuotannossa käytettävä puupohjainen energianlähte. [27] Energiantuotannossa hyödynnetään puunjalostuksen sivuvirroista tuotettuja pellettejä ja brikettejä.

Kestävyyden kannalta oleellista on myös metsien hoito ja tasainen hyödyntäminen. Metsänhoidollinen puunkasvatus tuottaa energiantuotantoon sopivaa puuainesta sekä puunjalostusteollisuudelle sopivaa materiaalia. Tasaisella hyödyntämisellä tarkoitetaan puunhankinnan jakautumista tasaisesti ympäri maata. Tämä mahdollistaisi, ettei energiapuun ja teollisuuden raaka-aineiksi tarkoitettun puun hankinta kuormita liialti paikallisesti ympäristöä. Kestävyyden tarkastelulla pyritään mahdollistamaan metsien monimuotoisuus. [26]

Kestävyyteen kannalta suurena vaikuttajana toimii EU, joka määrittää vaatimuksia energiantuotannossa käytettävästä puumassasta. Vaikuttajana voidaan käyttää tukia, joilla ohjataan tuotantoa kestävämpään suuntaan, niin ettei tukea myönnetä puulle, jota voitaisiin käyttää teollisuudessa, mutta käytetään energiantuotannossa. Tarkoituksena on ohjata puunkäyttö ensisijaisesti tuotteisiin ja materiaaleihin eikä energiantuotantoon. Tämä vähentää energiapuun määrää, jolloin energiantuotantoon tarvitaan muita virtoja. [28]

## 5.2 Uusiutuvan energian direktiivi (RED II)

Uusiutuvan energian direktiivi (RED II) julkaistiin vuoden 2018 lopulla. Direktiivi tuli ottaa käyttöön jäsenmaiden lainsäädännössä kesäkuun 2021 loppuun mennessä. Vuoden 2021 heinäkuussa Euroopan komissio ehdotti uudempaa direktiiviä, RED III-direktiiviä, joka on osa 55-valmiuspakettia, jonka tavoite on vähentää EU-maiden päästöjä vähintään 55 %. Lopullisena tavoitteena on EU:n ilmastoneutraalisuus vuoteen 2050 mennessä. [29] [30]

Direktiivit pitävät sisällään kasvihuonepäästöjen sekä biomassan kasvatukseen liittyvät vaatimukset, joilla pyritään varmistamaan luonnon monimuotoisuuden säilyminen. Direktiivi sisältää muun muassa metsien hakkuiden kriteerit. Kriteereihin kuuluu hakkuiden laillisuuden määrittäminen sekä hakattujen alueiden metsän uudistaminen. Lisäksi niihin kuuluu luonnonsuojelualueiden turvaaminen, maaperän ja biologisen monimuotoisuuden säilyttäminen sekä metsän tuotantokapasiteetin ylläpitäminen sekä parantaminen pitkällä aikavälillä. Kestävään biomassojen tuotantoon vaaditaan Pariisin ilmastositomukseen sekä hiilinielujen seurantaan liittyvien vaatimusten täyttäminen. [29]

Biomassaa koskevat kasvihuonekaasujen päästökriteerit, joita on esitetty direktiivissä. Tavoitteena on, että bioenergian elinkaaren aikana syntyy fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna kasvihuonekaasupäästöjen vähennystä. Energiantuotannossa käytettävien kiinteiden sekä kaasumaisten biomassojen osalta säästövähennys on oltava 70 % fossiilisten polttoaineiden vertailuarvoon nähden. Tämä vaatimus on voimassa laitoksissa, joiden toiminta on alkanut 2021 ja 2026 välillä. Vuoden 2026 jälkeen rakennettavien laitosten kasvihuonekaasusäästön on oltava 80 %. [29]

RED II-direktiivi koskee ainoastaan laitoksia, joissa tuotantokapasiteetti on 20 MW tai suurempi. Tämä poissulkee kriteerin alaisuudesta kotitaloudet ja maatilat, joissa energiantuotanto pohjautuu polttopuuhun, pellettiin tai metsähakkeeseen. Kestävyyssuhteita ei sovelleta prosessiperäisiin biopohjaisiin energiajakeisiin kuten sahanpuruun ja puun kuoriin, vaan niihin sovelletaan vain kasvihuonekaasupäästöjen vähennyskriteeriä. [29]

RED III. -direktiiviin ehdotetaan laajennuksia niin uusiutuvan energiantuotannon kuin kestävyyskriteerin sekä päästövähennysvaatimusten osalta. Tämä tarkoittaisi sitä, että uusiutuvan energiantuotannon osuus nousisi tavoitevuoden 2030 32 %:sta 40 %:iin. Samalla kavennettaisiin biomassan määritystä sulkemalla pois kestävän biomassan piiristä iki- ja aarniometsistä tuotettu biomassa. Direktiiviin ehdotetaan kiellettäväksi käyttää energiantuotannossa kantoja, juurakoita tai ainespuuta. Direktiivi kieltäisi biopohjaisen pelkän sähköntuotannon. Ehdotetaan että kestävyyskriteerit laajennetaan koskemaan jo 7,5 MW laitoksia ja päästövähennysvaatimukset kaikkia bioenergiailaitoksia. [29]

### 5.3 Energiantuotanto

Energiantuotannon ja etenkin sähkön tuotannon painopisteen muuttuessa uusiutuviin energiantuotantomuotoihin, kuten aurinko- ja tuulivoimaan, vähenee verkon inertia ja sen takia vaaditaan kulutukselta joustavuutta. Vaikka tällä hetkellä asennetaan aurinkopaneeleja niin teollisessa kuin omakotitalojen mittakaavassa, voitaisiin puuta käyttää yhdistetyn tuotannon muodossa vastaamaan muuttuvan energiasetorin tarpeita. Säätelmällä lämmön ja sähkön tuotantosuhdetta, voitaisiin melko nopeastikin reagoida energiantarpeen muutokseen omakotitaloasteella.

On olemassa pieniä omakotitaloon ja maataloille tarkoitettuja yhdistetyn energiantuotannon voimaloita, jotka hyödyntävät puuhaketta energiantuotannossa. Tuotannossa syntyy sähköä ja lämpöä ja sivutuotteena biohiiltä. [31] Pienet yhdistetyn energiantuotannon yksiköt voisivat nostaa energiantuotannon omavaraisuusastetta ja näin lisätä joustavuutta.

Pyrolyysiöljy voisi olla mahdollinen energiantuotantomuoto nestemäisenä energianlähteenä, mutta Suomessa ei tällä hetkellä ole tahoa, joka sitä tuottaisi. Metsäteollisuudessa tuotetaan paperiteollisuuden sivuvirtana mäntyöljyä, josta valmistetaan biopolttoainetta ja käytetään fossiilisiin polttoaineisiin sekoitettuna vähentämässä fossiilisia päästöjä. [32]

### 5.4 Puun uudet hyödyntämistarkoitukset

Metsistä ei juuri saada enempää metsähaketta käyttöön, sillä puun kerääminen ja hyödyntäminen on jo tehokkaasti toteutettu. Yksi tapa lisätä hakkeen määrää energiantuotannossa on viljellä pajua energiantuotannon tarpeisiin. Sitä voidaan käyttää myös biohiilentuotantoon. Energiantuotannossa pajun hinta on noin 16 €/MWh, mikä kilpailee hyvin hakkeen hinnan kanssa. [33]

Energiapajun kasvatus voidaan toteuttaa tavallisella viljojen viljelyyn tarkoitettulla pellolla, mutta sitä voidaan kasvattaa myös vanhoilla turvesoilla, kunhan varmistetaan pajun ravinteiden ja veden saanti. Energiapajua voidaan kasvattaa myös maisemointitarkoituksessa, jolloin sitä voidaan istuttaa vanhoille kaatopaikoille. Pajua voidaan käyttää meluvallina ja tuulensuojana. Näin ollen sen kasvattaminen soveltuu monenlaiseen ympäristöön. Kriteeri viljelylle on koneellisen toiminnan mahdollisuus ja siihen suositellaan vähintään 300 hehtaarin viljelyalaa, jotta kannattavuus paranee. [33]

Energiapaju soveltuu hakkeena poltettavaksi voimalaitoksiin. Sen ominaisuudet ovat lähes yhtä hyvät verrattuna metsähakkeeseen. Tehollinen lämpöarvo on suunnilleen sama pajuhakkeella kuin metsähakkeella. Pajun tuhkapitoisuus on jonkin verran korkeampi.

Suurin ero on raskasmetallipitoisuuksissa, jotka pajulla on huomattavasti korkeammat. Tämä voi aiheuttaa polttokattiloissa korroosiota, mutta jos pajua käytetään seospolttoon, jolloin hakkeen sekaan lisätään esimerkiksi turvetta, ei pajun käyttö energiantuotannossa vaaranna polttokattilaa. Pajuhakkeen poltossa syntyvää tuhkaa ei voida raskasmetallipitoisuuksien takia levittää pelloille. [34]

Puuaineksesta voidaan valmistaa bioetanolia. Tämä luo mahdollisuuden hyödyntää puuainesta energiantuotannossa eri tavalla. Bioetanolin energiatiheys on matalampi kuin normaalilla bensinillä, mikä voi haitata sen käyttämistä yksin polttoaineena. Toinen merkittävä ongelma on, että bioetanolilla ei syty kylmissä olosuhteissa, koska sen höyrystymislämpötila on korkeampi ja höyrynpaine on huomattavasti matalampi verrattuna bensiiniin. [35][36]

Bioetanolin valmistamista on testattu Suomessa, mutta tuotanto on ollut tappiollista. Esimerkiksi energiayhtiö St1 on testannut puupohjaisen bioetanolin valmistamista, mutta toiminta lakkautettiin kannattamattomuuden takia. Sittemmin kyseinen laitos on muokattu biohiilen tuotantoon, mutta kyseinen laitos ei tuota hiiltä energiantuotantoon. [37]

## 5.5 Puun jatkojalostaminen

Puun hyödyntäminen vain energiantuotantoon ei ole kannattavaa, koska se tuottaa vähiten taloudellista hyötyä. Mitä paremmin ja monipuolisemmin puuta voidaan hyödyntää, sitä parempi taloudellinen hyöty siitä saadaan. Raaka-aineen jatkojalostaminen lisää tuotteen arvoa. Vaikka puuta ei suoraan käytetä energiantuotantoon, on erilaisia tuotantotappoja, jotka tuottavat energiaa jatkojalostamisen ohella. Hyvänä esimerkkinä pape-riteollisuus, jossa sivuvirtana syntyy ligniiniä, jota hyödynnetään energiantuotantoon. Pape-riteollisuus ei itsessään ole tehokasta, sillä se vaatii paljon ulkoista energiaa. [38] Ene-nevissä määrin on alettu puhumaan biohiilen tuotannosta.

Biohiilen tuotanto ei itsessään ole tarkoitettu energiantuotantoon, vaan se keskittyy biohiilen valmistamiseen. Biohiilen tuotannon sivuvirtana syntyy ylimääräistä energiaa, jota voidaan hyödyntää kaukolämpöverkossa. Biohiilen tuotanto tuottaa itse tarvitsemansa energian pyrolyysissä, näin ollen se on energiavapaata tuotantoa. Tuotannossa syntyy biohiiltä, jota voidaan hyödyntää hyvin monissa erilaisissa käyttötarkoituksissa, jolloin se nostaa puun arvoa. [39]

Biohiilen tuotanto sopii hyvin ilmastotavoitteisiin, sillä se sitoo paljon puun ilmakehästä ottamaa hiilidioksidia pysyvään muotoon. Näin ollen biohiilen tuotanto on hiilinegatiivista. Biohiilen ominaisuuksiin kuuluu veden ja ravinteiden hyvä sitominen ja siten se sopii

hyvin maanparannusaineeksi. Samalla se sitoo itseensä raskasmetalleja ja muita haitallisia aineita. [40]

Energiantuotannon kannalta biohiilen tuotanto ei ole kannattavin tapa hyödyntää puuta. Biohiilen tuotantotapa vaikuttaa saadaanko esimerkiksi pyrolyysiöljyä. Aikaisemmin mainittiin, ettei pelkkä öljyn tuotanto ole ollut kannattavaa. Biohiili on vaihtoehtona hyvä puun hyödyntämiselle, sillä taloudellisesti se tuottaa arvoa ja samalla energiaa. Raaka-aineena biohiileen tuotantoon sopivat hakkuutähteet, joita nykyään hyödynnetään vain energiantuotantoon. [39]

## 6. YHTEENVETO

Puulla on hyvä energiatiheys ja sitä on Suomessa laajalti käytetty energiantuotantoon. Puuta käytetään erilaisina jakeina energiantuotannossa. Suurin energia tuotetaan metsäteollisuuden sivuvirroista, mutta metsäteollisuus sitoo itsessään paljon energiaa. Yleisin kotitaloudessa käytettävä puujae on klapi. Sitä hyödynnetään lämmittämässä, mutta ongelman klapi tuottaa siinä, että hyötysuhteet voivat jäädä matalaksi, sillä tulisijojen hyötysuhteet voivat olla alhaisia. Hinnaltaan kannattavin energijae on hake. Sitä hyödynnetään enemmän maatilakokoluokan lämpökeskuksissa ja sitä suuremmissa laitoksissa. Puuta voidaan käyttää yhteistuotannossa, jolloin tuotetaan sähkö sekä lämpöä, jolloin kokonaishyötysuhde saadaan korkeammaksi. Kyseisiä poltinkattiloita ei juuri ole vielä saatavilla pienempään tuotantoon.

Pyrolyysia on yritetty kehittää, jotta saataisiin enemmän biopohjaisia jakeita energiantuotantoon etenkin nestemäisiin polttoaineisiin keskittyen, mutta kokeilut eivät ole olleet taloudellisesti kannattavia. Toinen mahdollisuus on biohiili, jota tuotetaan erilaisiin käyttötarkoituksiin ilman, että keskitytään energiantuotantoon. Prosessissa kuitenkin syntyy ylijäämäenergiaa, jota voidaan hyödyntää kaukolämpöverkossa. Näin saadaan nostettua puun jalostusastetta ja saadaan parempi taloudellinen hyöty.

Suomen metsiä hyödynnetään lähes koko kapasiteetiltaan, joten hakkuiden määrää ei voida energiantuotantotarkoituksessa lisätä juurikaan. Hakkuut ovat keskittyneet sinne, missä on paljon tarvetta, mutta samalla toisaalla metsien tuottaman biomassan hyödyntäminen jää vajavaiseksi. Ongelman tuottaa puuaineksen kuljetus, sillä se laskee siitä saatavaa hyötyä.

Tulevaisuudessa puun kestävään hankintaan on keskityttävä, jotta metsästä saadaan mahdollisimman hyvä hyöty ilman, että metsä siitä kärsii. Euroopan unioni on säätänyt kriteerejä, joilla pyritään ohjaamaan metsien käyttöä kestävämpään suuntaan. Samalla se pakottaa miettimään parempia tapoja tuottaa energiaa.

Yksi mahdollisuus energiantuotannolle on pajun kasvattaminen energiaksi. Tuotantoalojen täytyy olla laajoja, jotta se olisi tehokasta. Paju sitoo raskasmetalleja kasvunsa aikana, joka hankaloittaa sen hyödyntämistä energiantuotannossa korroosion muodossa sekä lannoitetuhkan hyödyntämisenä. Yhtenä mahdollisuutena on hyödyntää pajun kasvatuksessa biohiiltä, joka sitoo raskasmetalleja ja näin vähentää mahdollisesti pajuun päätyvien haitallisten aineiden määrää.

Tulevaisuudessa on tärkeä pohtia taloudellista hyötyä. Puuta ei ole järkevää vain polttaa, vaan kannattavampaa on jalostaa sitä, jolloin se tuottaa enemmän arvoa. Puusta voidaan jalostaa biopohjaisia polttoaineita, mutta niiden kannattavuus ei vielä ole saavuttanut kaupallisia tavoitteita. Biohiiltä tuotetaan maanparannustarkoituksessa ja sivuvirtana syntyy lämpöenergiaa, jota voidaan hyödyntää kaukolämpöverkossa. Järkevin tapa puun hyödyntämiseen energiantuotannossa on löytää biohiilentuotannon tapaisia jalostusmenetelmiä, jotka tuottavat puulle lisäarvoa sekä energiaa yhteiskunnan hyödynnettäväksi.

# LÄHTEET

- [1] Metsävarat, Metsäteollisuus, 9.2.2023. Saatavissa (viitattu 18.2.2023.): <https://www.metsateollisuus.fi/uutishuone/metsavarat>
- [2] Puun käyttö 2023 (ennakko), Luonnonvarakeskus. 24.4.2024. Saatavissa (viitattu 15.5.2024): <https://www.luke.fi/fi/tilastot/puun-kaytto/puun-kaytto-2023-ennakko>
- [3] Puun koostumus, Bioenergianeuvoja. Saatavissa (viitattu 27.2.2023): <https://www.bioenergianeuvoja.fi/faktaa/puun-lampoarvo/>
- [4] Puun kosteus, Bioenergianeuvoja, Saatavilla (viitattu 27.2.2023): <https://www.bioenergianeuvoja.fi/faktaa/puun-kosteus/>
- [5] Puun kosteuskäyttäytyminen, Puuinfo. 1.7.2020. Saatavissa (viitattu 27.2.2023): <https://puuinfo.fi/suunnittelu/ohjeet/tekniset-tiedotteet/puun-kosteuskayttaytyminen/>
- [6] Alakangas, Eija, Markus Hurskainen, Jaana Laatikainen-Luntama, ja Jaana Korhonen. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia, VTT Technology 258, 2016, 263 s. Saatavissa: <https://publications.vtt.fi/pdf/technology/2016/T258.pdf>
- [7] Hinnasto, Biolandia. 1/2023, Saatavissa (viitattu 3.3.2023): <https://www.biolandia.net/hinnasto/>
- [8] Tuore sekaklapi - n. 33 cm – heittokuutio, Klapi.fi. Saatavissa (viitattu 1.4.2023): <https://klapi.fi/kauppa/sekaklapi/>
- [9] Hake, Bioenergianeuvoja. Saatavissa (viitattu 2.3.2023): <https://www.bioenergianeuvoja.fi/biopolttoaineet/hake/>
- [10] Hakkeen myynti, Metsäenergiaa mutkattomasti Ruutana Heating Oy. Saatavissa (viitattu 3.3.2023): [https://www.ruutanaheating.fi/palvelut/hakkeen-%\\$myynti](https://www.ruutanaheating.fi/palvelut/hakkeen-%$myynti).
- [11] Pelletti, Bioenergianeuvoja. Saatavissa (viitattu 2.3.2023): <https://www.bioenergianeuvoja.fi/biopolttoaineet/pelletti/>
- [12] Briketti, Bioenergianeuvoja. Saatavissa (viitattu 2.3.2023): <https://www.bioenergianeuvoja.fi/biopolttoaineet/briketti/>
- [13] K. Knuutila, Puuenergia, Gummerus Kirjapaino OY, Jyväskylä, 2003, 115 s.
- [14] Lauri Leppäkoski, Pyrolyysituotteiden monet käyttökohteet, LAB Open, 18.8.2021. Saatavissa (viitattu 12.5.2023): <https://www.labopen.fi/lab-pro/pyrolyysituotteiden-monet-kayttokohteet/>
- [15] Biokaasulaitokset kartalla 2021, Google My Maps. Saatavissa (viitattu 12.5.2023): <https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1ZHpWSB6Av2QQIZSGySCriDCW7piuXnBM>

- [16] Fortum käyttää kotimaista bioöljyä yhtenä ainoista kaukolämpötoimijoista Suomessa, Fortum, 30.8.2022. Saatavissa (viitattu 12.5.2023): <https://www.fortum.fi/media/2022/08/fortum-kayttaa-kotimaista-bioolja-yhtena-ainoista-kaukolampotoimijoista-suomessa>
- [17] 25 miljoonaa maksanut bioöljyalostamo myydään Karjalassa- Green Fuel Nordic on nyt konkurssissa, Yle uutinen, 21.3.2024. Saatavissa (viitattu 2.7.2024): <https://yle.fi/a/74-20080357>
- [18] Kodin tulisijat, Motiva. Saatavissa (viitattu 7.3.2023): [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/bioenergia/puulammitys\\_kiinteistoissa/kodin\\_tulisijat](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/bioenergia/puulammitys_kiinteistoissa/kodin_tulisijat)
- [19] Netrauta, kayttoohje.pdf. Saatavissa (viitattu 3.4.2023): <https://www.netrauta.fi/attachments/products/ravelli/RAV-047-00-001A/kayttoohje.pdf>
- [20] Hake-, pilke- ja halkokattilat, Motiva. Saatavissa (viitattu 11.3.2023): [https://www.motiva.fi/koti\\_ja\\_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman\\_valinta/lammitysmuodot/hake-pilke-ja\\_halkokattilat](https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/lammitysmuodot/hake-pilke-ja_halkokattilat)
- [21] Keskuslämmityskattilat, Motiva. Saatavissa (viitattu 10.3.2023): [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/bioenergia/puulammitys\\_kiinteistoissa/keskuslammityskattilat](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/bioenergia/puulammitys_kiinteistoissa/keskuslammityskattilat)
- [22] Kauppinen, Jukka. Turbiinitekniikka: käyttö, huolto ja kunnossapito. 1. Tampere, Tammertekniikka, 2018, 321s, ISBN: 978-952-5491-92-0
- [23] Metsävarat maakunnittain, Luonnonvarakeskus, 11/2023. Saatavissa (viitattu 14.5.2024): <https://www.luke.fi/fi/tilastot/metsavarat/metsavarat-maakunnittain-6>
- [24] Hakatun puun kokonaismäärä pieneni vuonna 2023- energiapuuta korjattiin ennätysellisen paljon, Luonnonvarakeskus, 4/2024. Saatavissa (viitattu 14.5.2024): <https://www.luke.fi/fi/uutiset/hakatun-puun-kokonaismaara-pieneni-vuonna-2023-energiapuuta-korjattiin-ennatysellisen-paljon>
- [25] Puupolttoaineet energian tuotannossa, Maa- ja metsätalousministeriö. Saatavissa (viitattu 15.5.2024): <https://mmm.fi/metsat/puun-kaytto/puun-energiakaytto>
- [26] Valtioneuvosto. Metsähakkeen kysyntä lisääntyy turpeen ja kivihiilen korvautuessa, 12.5.2021. Saatavissa (viitattu 16.3.2023): <https://valtioneuvosto.fi/-/1410877/metsahakkeen-kysynta-lisaantyy-turpeen-ja-kivihiilen-korvautuessa>
- [27] Puupolttoaineet energian tuotannossa, Maa- ja metsätalousministeriö. Saatavissa (viitattu 16.3.2023): <https://mmm.fi/metsat/puun-kaytto/puun-energiakaytto>
- [28] Uusiutuvan energian direktiivistä saavutettu kunnianhimoinen sopu EU:n trilogineuvotteluissa, Valtioneuvosto, 30.3.2023, Saatavissa (viitattu 13.4.2023): <https://valtioneuvosto.fi/-/1410877/uusiutuvan-energian-direktiivista-saavutettu-kunnianhimoinen-sopu-eu-n-trilogineuvotteluissa>
- [29] Biomassan kestävyyskriteerit, Maa- ja metsätalousministeriö. Saatavissa (viitattu 14.9.2023): <https://mmm.fi/metsat/puun-kaytto/biomassojen-kestavyys>
- [30] 55-valmiuspaketti, Eurooppa-neuvosto, 25.7.2023. Saatavissa (viitattu 14.9.2023): <https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>.

- [31] Micro CHP, ECO Concept. Saatavissa (viitattu 17.5.2024): <https://www.ecoconcept.fi/micro-chp/>
- [32] UPM Lappeenrannan biojalostamo, UPM Biopolttoaineet. Saatavissa (viitattu 17.5.2024): <https://www.upmbiofuels.com/fi/upm-biopolttoaineet/upm-lappeenrannan-biojalostamo/>
- [33] Tuotekortti-Pajun-Kasvatus-0720.pdf, Carbonsa. Saatavissa (viitattu 3.7.2024): <https://carbons.fi/wp-content/uploads/2020/11/Tuotekortti-Pajun-kasvatus-0720.pdf>
- [34] Janne Kärki & Markus Hurskainen, Pajun käyttö energiantuotannossa-Tuloksia polttokokeista loppuseminaari Jyväskylä, VTT, 28.1.2015. Saatavissa (viitattu 3.7.2024): [https://peda.net/poke/projektit/luva\\_hankkeet/energiapaju/semi-naari/sm/jk:file/download/f80a0b9584c1a2a8e54e0acb1da8f063d1d5bc53/Janne%20K%C3%A4rki\\_Poltto.pdf](https://peda.net/poke/projektit/luva_hankkeet/energiapaju/semi-naari/sm/jk:file/download/f80a0b9584c1a2a8e54e0acb1da8f063d1d5bc53/Janne%20K%C3%A4rki_Poltto.pdf)
- [35] Bioethanol, European Biomass Industry Association. Saatavissa (viitattu 5.7.2024): <https://www.eubia.org/cms/wiki-biomass/biofuels/bioethanol/>
- [36] Bioetanoli, Bioste. Saatavissa (viitattu 5.7.2024): <https://bioste.fi/bioenergia/bioetanoli/>
- [37] Energiajätin hylkäämä laitos saa Karanojalla uuden käyttäjän –Hämeenlinnassa aletaan sitoa hiilidioksidia, Hämeensanomat, 14.3.2023. Saatavissa (viitattu 5.7.2024): <https://www.hameensanomat.fi/paikalliset/5790159>
- [38] Metsäteollisuuden sivuvirrat, onko niitä? Bios, 26.3.2019. Saatavissa (viitattu 5.7.2024): <https://bios.fi/metsateollisuuden-sivuvirrat-onko-niita/>
- [39] Biohiili –Uudelleen löydetty aarre, Kestävä energiatalous, 19.9.2019. Saatavissa (viitattu 5.7.2024): <https://www.energiatalous.fi/?p=2483>
- [40] Biohiili, Carbons, Saatavissa (viitattu 5.7.2024): <https://carbons.fi/biohiili/>