

## **Kemiallisen metsäteollisuuden tulevaisuus**

**Tapani Vuorinen**  
Teknillinen korkeakoulu

### **Johdanto**

Lyhyessä alustuksessa käsitellään kemiallisen metsäteollisuuden tulevaisuutta lähtien liikkeelle metsien roolista ilmastonmuutoksessa ja puun rakenteesta ja ominaisuuksista. Näiden pohjalta pyrin löytämään suuntaviivoja puuta kemiallisesti jalostavan teollisuuden kilpailukyvyn kehittämiseksi Suomessa.

### **Metsien rooli maapallon hiilitasapainossa**

Orgaanista ainesta poltettaessa lopputuotteina syntyy epäorgaanista vettä ja hiilidioksidia. Nämä edustavat hiilen ja vedyn pysyvimpiä olomuotoja. Vihreät kasvit kykenevät kuitenkin auringon energiaa hyväksi käyttäen liittämään veden ja hiilidioksidin yhteen glukoosiksi vapauttaen samalla happea. Monimutkaisten biokemiallisten reittien kautta glukoosi muuttuu kasvisoluissa tarpeen mukaan selluloosaksi, hemiselluloosiksi, ligniiniksi, rasvoiksi, tärkkelykseksi, pihkayhdisteiksi tai miksi tahansa kasvin elintoimintojen kannalta merkittäväksi yhdisteeksi.

Riippumatta kasvien luonnollisesta tai luonnottomasta kohtalosta, ne yleensä lopulta hapettuvat vedeksi ja hiilidioksidiksi ilman hapen vaikutuksesta. Tässä suhteessa puun poltto takassa, metsäpalo, kompostointi, lahoaminen tai muulla tavoin ravinnoksi päätyminen ovat lopputuloksen kannalta samanarvoisia lämpöä vapauttavia tapahtumia. Pieni osa kasvimateriaalista fossiloituu kemiallisesti hitaiden reaktioiden kautta kivihieksi, maaöljyksi ja maakaasuksi.

Maapallon pääasiassa kasviperäisten orgaanisten yhdisteiden sisältämä hiilimäärä on kaksinkertainen ilmakehän sisältämän hiilidioksidin määrään nähden. Fossiilisten hiililähteiden käytöstä vuosittain vapautuvan hiilidioksidin määrä on n. 1 % ilmakehän hiilidioksidipitoisuudesta ja n. 0,5 % maapallon orgaanisen hiilen määrästä. Maapallon kokonaispinta-alaa kohden laskettu fossiilinen hiilidioksidipäästö on 0,5 t/ha. Metsien kasvusta voidaan johtaa niiden kyky sitoa hiilidioksidia. Tehoviljelyillä

eukalyptusplantaaseilla sitomiskyky voi olla parhaimmillaan jopa 50 t/ha ja Suomessakin jopa 5 t/ha.

Voidaan siis päätellä, että metsillä ja niiden käytöllä on erittäin merkittävä rooli maapallon hiilitasapainossa. Koska ilmastonmuutos on yleensä kytketty ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden nousuun, metsillä on merkittävä rooli ilmastokeskustelussa, puhuttiinpa sitten hiilidioksidin sitoutumisesta tai fossiilisten hiililähteiden korvaamisesta.

### **Puun elintoiminnot ja rakenne**

Puut ovat suuren kokonsa puolesta poikkeavia kasveja. Kannattaakseen ylhäällä sijaitsevia lehtiään tai neulasia, puut tarvitsevat lujan ja sitkeän juurista, rungosta ja oksista muodostuvan tukirakenteen. Pituuskasvun lisäksi puun pitääkin alati lihottaa runkoaan paksuuskasvulla. Veden ja kivennäisaineiden kuljetus maaperästä kymmenien tai jopa yli 100 metrin korkeudella sijaitsevaan latvustoon asettaa toisen vaativan haasteen. Kymmenien, satojen tai jopa tuhansien vuosien ikä edellyttää monipuolista suojautumista ulkoisilta uhilta, kuten kuivuudelta, metsäpaloilta, hyönteisiltä ja erityisesti lahottajasieniltä. Muutoin puun elämä on samankaltaista minkä tahansa kasvin kanssa: fotosynteesiä, solujen jakautumista ja erilaistumista, hiilen ja energian varastointia siementen tuottamista, sekä uuden kasvukauden aloittamista ja lopettamista.

Puuaines muodostuu valtavasta määrästä järjestäytyneitä soluja, joiden tehtävänä on kuljettaa nesteitä ja ravinteita, varastoida energiaa ja ravinteita, muodostaa puuta erityisesti lahoamiselta suojaavia pihka-aineita sekä antaa puun rungolle mekaanista tukea. Tilavuudeltaan litran kokoinen puukappale sisältää jopa miljardi solua. Kemiallisesti puuaines muodostuu lujutta antavasta selluloosasta, puusoluja yhteen sitovasta ligniinistä sekä vettä sitovista hemiselluloosista, jotka yhdessä vettä hylkivän ligniinin kanssa säätelevät puusolujen seinämien vesipitoisuutta. Lisäksi puusoluissa ja niiden ympäröimissä kanavissa esiintyy puuta lahoamiselta suojaavia pihka-aineita sekä solujen vararavintona toimivia rasvoja.

Puukuidut muodostavat suurimman osan puuaineksen soluista. Puukuitujen tärkeänä tehtävänä on antaa puulle sen mekaaninen lujuus ja sitkeys. Puukuidun pituus on yleensä 1-5 mm ja halkaisija 0,01–0,05 mm puulajista riippuen. Kuidun seinämän paksuus on enintään muutamia mikrometrejä. Kuituseinämä muodostuu useista ominaisuuksiltaan poikkeavista kerroksista. Erityisesti havupuukuiduissa on pikkuruisia huokosia ja niitä sulkevia läppämäisiä kalvoja veden kuljetusta säätelemässä. Kaikki soluseinän hienorakenteet on punottu 3-4 nanometrinen levyisestä selluloosasäikeestä. Yhdessä pienen pienessä kuidussa saattaa olla jopa useita kilometrejä nanoselluloosasäiettä ja suurissa puuyksilöissä jopa valovuosia.

Jotta ohuet selluloosasäikeet eivät takertuisi toisiinsa, solut rakentavat niitä erottamaan hemiselluloosien ja ligniinin muodostaman väliaineen. Hemiselluloosien erinomaisesta vedensidontakyvystä johtuen väliaine pysyy juoksevana  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötilaan asti. Tätä kovemmilla pakkasilla puuaines muuttuu hauraaksi ja puun oksat saattavat murtua lumikuorman alla. Puu menettää sitkeytensä myös, jos väliaineen (puun) vesipitoisuus laskee liian alhaiseksi.

Puuaineksessa solut ovat liimautuneet toisiinsa ligniinin avulla. Solujen välillä sijaitsevan ligniinin ominaisuudet poikkeavat soluseinän väliaineessa sijaitsevan ligniinin ominaisuuksista. Solujen välillä ligniini ei saa olla juoksevassa tilassa, muutenhan puu lyhyhistyisi. Tämä ligniini pehmeneekin vedellä kyllästetyssä (tuoreessa) puussa vasta  $170\text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa.

Oksaisuutta lukuun ottamatta puuaineksen ominaisuudet – hyvässä ja pahassa - määräytyvät solujen ja soluseinämän hienorakenteen tasolla. Niinpä esimerkiksi kuitujen pituudella ei ole suoranaista vaikutusta puun lujuuteen. Merkittävimpiä tekijöitä ovat esimerkiksi selluloosasäikeiden kiertymiskulmat soluseinän kerroksissa, näiden kerrosten paksuudet sekä selluloosan ja ligniinin suhteelliset osuudet soluseinämässä.

### **Puun aineosien ominaisuuksista**

Puun kaikki merkittävimmät aineosat ovat muodostuneet hiilestä, vedystä ja hapesta. Selluloosasta ja hemiselluloosista puolet on happea ja ligniinistäkin kolmasosa. Korkeasta happipitoisuudesta johtuen varsinkin selluloosan ja hemiselluloosien mutta myös ligniinin lämpöarvot ovat alhaiset esimerkiksi raakaöljyyn ja siitä valmistettuihin tuotteisiin verrattuna. Puun aineosista ainoastaan uuteaineilla, kuten rasvoilla ja pihkayhdisteillä, on likimain öljytuotteita vastaava lämpöarvo.

Kiteisen selluloosan vetojäykkyys (kimmokerroin) on satakertainen yleisimpiin synteettisiin polymeereihin (polyeteeni, polypropeeni) verrattuna. Soluseinän väliaineella ei ole lujuutta sen korkeasta vesipitoisuudesta johtuen. Kuituja yhteen sitovan ligniinin puristuslujuus on korkea. Selluloosasäikeiden vetojäykkyys on samaa luokkaa kuin teräksellä ja hiilikuiduilla ja huomattavasti suurempi kuin lasikuiduilla. Selluloosan vetojäykkyys massayksikköä kohden suhteutettuna on selvästi terästä korkeampi. Selluloosan vetojäykkyys ei ole kuitenkaan yhtä korkea kuin hiilinanoputkilla tai muilla puhtailla hiilimateriaaleilla kuten timantilla.

Vetojäykkyyksien vertailu osoittaa selvästi, että lujuusominaisuuksissa yhdisteen geometrinen (kolmiulotteinen) rakenne on kemiallista koostumusta merkittävämpi tekijä. Selluloosasäikeissä selluloosapolymeerit ovat suuntautuneet maksimaalisesti säikeen suuntaisesti, minkä vuoksi säiettä on vaikeaa venyttää enempää. Kiteytyessään selluloosa hakeutuu luonnollisesti lineaariseen muotoon toisin kuin monet synteettiset polymeerit, jotka suosivat laskostuneita tai kierteisiä olomuotoja.

Selluloosan hydrofiilisyyttä ja hydrofobisuutta voidaan säädellä kemiallisen muokkauksen avulla. Tunnetuista selluloosajohdannaisista esimerkiksi karboksimeetyyliselluloosa on veteen liukeneva. Tällaisen johdannaisen ominaisuudet ovat täysin hemiselluloosien ominaisuuksiin rinnastettavia. Selluloosajohdannaisia käytetäänkin monissa teknisissä sovelluksissa mm. elintarvike-, lääke-, paperi- ja öljyteollisuudessa. Hemiselluloosiin verrattuna selluloosajohdannaisten ominaisuuksia voidaan säädellä laajasti kemiallista rakennetta muuttamalla.

Happojen ja/tai entsyymien vaikutuksesta selluloosa voidaan hydrolysoida glukoosiksi ja hemiselluloosat glukoosiksi, mannoosiksi, ksyloosiksi ja muiksi sokereiksi. Selluloosan hydrolyysi on teknisesti hankalaa sen kiteisyyden vuoksi. Toisaalta glukoosia tuotetaan suurimittaisesti ja edullisesti tärkkelyksestä. Hemiselluloosaperäisillä sokereilla on muutamia pienen mittakaavan käyttökohteita, kuten makeuttajana käytetyn ksylitolin valmistus. Monet biokemiallisesti valmistetuista tuotteista, kuten etanoli, voidaan valmistaa mistä tahansa sokerista.

### **Kemiallisen metsäteollisuuden tuotteet**

Kemiallisella metsäteollisuudella tarkoitetaan yleensä sellu- ja paperiteollisuutta. Selluteollisuuden päätuotteet ovat sellu, sähköenergia ja lämpöenergia. Lisäksi selluteollisuus ottaa talteen uuteaineita täpättinä ja mäntyöljynä. Sellun ohella paperituotteissa käytettävä mekaaninen massa tuotetaan paperitehtaissa, jonka varsinaiset tuotteet ovat tietysti paino-, pakkaus-, pehmo- ja erikoispapereita ja pakkauskartonkeja ja näistä valmistettuja jalosteita. Paperiteollisuus on suuri energian kuluttaja erityisesti kuidutuksen ja kuivatuksen johdosta. Sellu- ja paperitehtaiden integraatit pystyvät yksittäisiä tehtaita paremmin korkeaan energiatehokkuuteen. Monet tehdaskompleksit hyödyntävät puun kuorta ja hakkuutähteitä energialähteinään.

Ilmastonmuutoksen uhka ja raakaöljyn hinnan nousu luovat mahdollisuuksia kemiallisen metsäteollisuuden tuotevalikoiman monipuolistamiselle. Julkisuudessa huomiota on kiinnitetty erityisesti uusiin energiatuotteisiin, kuten etanoliin, biodieseliin tai muihin liikennepolttoaineiksi soveltuviin tuotteisiin. Yleensä lähtökohtana on selluntuotannon säilyttäminen ja sivuvirtojen jalostaminen joko termisesti (esimerkiksi biodieselin valmistus synteetikaasun kautta) tai biokemiallisesti (esimerkiksi etanolikäyminen). Biokemiallinen reitti on vaativampi lähtöaineiden suhteen, koska ainoastaan sokerit ovat helposti käytettävissä. Nykyinen sulfaattiselluprosessi ei tuota sokereita sivuvirtoihinsa, vaan se olisi korvattava esihydrolyysivaiheen sisältävällä prosessilla.

Keskustelua on käyty myös puhtaasti energiatuotteita valmistavista biojalostamoista. Samaan kategoriaan voi laskea puuta käyttävät biovoimat sekä puupohjaisten energiatuotteiden valmistuksen ylipäättänsä.

Vaikka puhdas energiakäyttö voi olla perusteltua monin tavoin tuottajan, kuluttajan ja yhteiskunnan näkökulmista, selluloosan alhainen lämpöarvo ja sen korkea vetojäykkyys puoltavat sen käyttöä ensisijaisesti materiaalisovelluksissa.

Puukuitujen ”suurehko” paksuus rajoittaa monessa tapauksessa niiden käyttöä ohuimmissa pakkausmateriaaleissa. Hajottamalla puukuidut selluloosananosäikeiksi, mahdollisia sovellusalueita voidaan etsiä huomattavasti laajemmin. Kevyemmät tuotteet kompensoivat tuotantotekniikan nykyistä suurempaa energiankulutusta kuidutuksessa ja kuivatuksessa.

### **Keinoja kemiallisen metsäteollisuuden kilpailukyvyn parantamiseksi**

Suomalaisen metsäteollisuuden näkökulmasta kriittisimpiä kilpailutekijöitä ovat puuraaka-aineen saatavuus ja hinta sekä energian käyttö ja sen hinta. Toistaiseksi puun ja energian hinnat ovat kehittyneet toisistaan riippumatta. Paineet puun käytön lisäämiseen energiantuotannossa tuonevat tulevaisuudessa puun ja energian hinnoitteluperusteet lähemmäksi toisiaan. Asiaa voi pohtia esimerkiksi yksittäisen omakotilämmittäjän tai puunmyyjän näkökulmasta.

Metsäteollisuuden kilpailukyvyn kannalta oleellista on vähentää puun ominaiskulutusta ja lisätä energiatehokkuutta. Käytännössä tämä voisi tarkoittaa esimerkiksi kokonaan uudentyypisen mekaanisen massan valmistusprosessin ja siihen kytkettyjen kuitutuotteiden valmistusprosessien kehittämistä.

Kilpailukykyä voitaisiin saada myös uusien liiketoimintamallien kautta. Nykyään puu kilpailee keräyskuidun kanssa paperin raaka-aineena. Ainakin metsäteollisuuden näkökulmasta voisi olla edullista hinnoitella käyttämätön energiasisältö tuotteeseen, mikäli tätä tukeva liiketoimintamalli saadaan luoduksi eri toimijoiden kesken. Esimerkiksi omakotilämmittäjälle luetun sanomalehden laskennallinen lämpösisällön arvo on 0,4 euroa/kg (kilpaileva tuote kevyt polttoöljy).

### **Kansallisen osaamisen näkökulma**

Suomalaisen kemiallisen metsäteollisuuden ympärille rakentunut klusteri on saavuttanut kansainvälisesti johtavan aseman. Pienessä maassa toimijoiden välinen yhteistyö on ollut mutkatonta, mikä on luonut oivallisen maaperän teknologisen osaamisen kehittämiseksi. Vaikka Suomessa tuotetaan vain joitakin prosentteja koko maailman kemiallisen metsäteollisuuden tuotteista, suomalaiset suunnittelutoimistot, konepajat ja kemianteollisuus hallitsevat merkittävää osaa alan toimittajamarkkinoista ympäri maailmaa. Jopa koulutuksessa suomalaisten asema on johtava. Kemialliseen

metsäteollisuuden liittyvästä soveltavasta tutkimuksesta 10 % tehdään Suomessa.

Erityisesti toimittajien vahvasta asemasta johtuen Suomella on hyvät edellytykset säilyttää johtava asema teknologisessa osaamisessa. Koulutuksen puolella tilanne on ongelmallisempi, koska alan houkuttelevuus opiskelukohteena on julkisuudessa kytketty voimakkaasti kotimaisen metsäteollisuuden tilaan. Osaamiseen pohjautuvan kilpailukyvyn vahvistamiseksi Suomeen on muodostettu toimijoiden kesken alan tutkimusta koordinoiva strategisen huipputaamisen keskittymä – Metsäklusteri Oy. Laajan omistajapohjan käänköpuolena on riskien minimoimisen ja kompromissien aiheuttama uhka keskinkertaistumisesta.

Läökkeenä haasteisiin esitän kahta toimenpidettä. Koulutuksen painopiste on siirrettävä metsäteollisuudesta uusiutuvan biomassan kestävään käyttöön energiatuotteissa ja biomateriaaleissa sekä asiakkaisiin asti ulottuviin arvoketjuihin. Tutkimuksessa parhaille valioille on luotava mahdollisuudet edetä rohkeasti ilman huolta rahoituksen jatkuvuudesta.

### **Yhteenveto**

Puun hinta tulee tulevaisuudessa todennäköisesti määräytymään sen energiasisällön perusteella. Puun käyttöön pohjautuvia energiatuotteita tullaan kehittämään, mutta selluloosan materiaaliarvo säilyy energiasisällön arvoa suurempana. Mahdollisuudet kannattavalle metsäteollisuudelle ovat olemassa, mutta kannattavuuden saavuttaminen edellyttää myös uusien liiketoimintamallien luomista. Oleellista on puun korkean energiasisällön arvon liikkuminen puupohjaisten tuotteiden mukana. Puunjalostusprosessien energia- ja materiaalitehokkuuteen on kiinnitettävä erityistä huomiota. Varsinkin yliopistojen on koulutettava osaajia nopeasti muuttuvaan toimintaympäristöön uudella tavalla.