

Iiro Parhankangas

**PIENYDINREAKTORIN
HYÖDYNTÄMINEN OSANA
BIOJALOSTAMON ENERGIAVIRTOJA**
Energiavirtojen tarkastelu ja biopolttoaineiden
tuotantopotentiaali mustalipeästä

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Apulaisprofessori Henrik Tolvanen
Maaliskuu 2026

TIIVISTELMÄ

Iiro Parhankangas: Pienydinreaktorin hyödyntäminen osana biojalostamon energiavirtoja
Utilization of a Small Nuclear Reactor as Part of the Energy Flows of a Biorefinery

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka

Maaliskuu 2026

Sulfaattikeitto vastaa 80 % maailman sellun tuotannosta. Sulfaattisellutehtailla noin puolet puubiomassasta poltetaan sellunkeiton sivuvirtana tehtaan oman energiantarpeen tyydyttämiseksi. Biojalostamo-ajatusmallissa sellutehtaan sivuvirroista jalostetaan korkeamman jalostusarvon tuotteita käytettäväksi tehtaan ulkopuolella, esimerkiksi liikennepolttoaineina.

Työssä tutkittiin mahdollisuutta yhdistää pienydinreaktori sellutehdasympäristöön. Tavoitteena oli osoittaa, että sellutehtaan pääenergianlähde eli soodakattila voidaan korvata pienydinreaktorilla. Samalla tutkittiin, mitä muutoksia soodakattilasta luopuminen aiheuttaisi sellutehtaan kemikaalikiertoon. Työ tehtiin toimeksiantona pienydinreaktorien käyttökohteita tutkivalle ajatuspajalle Think Atom Oy:lle.

Työssä selvitettiin tavanomaisen sulfaattisellutehtaan energiantuotantotavat ja energian käyttökohteet. Työssä esiteltiin yksi esimerkki biojalostamosta, joka valmistaa mustalipeästä biopolttoaineita. Tarkastelun perusteella arvioitiin, mitä vaatimuksia esitelty biojalostamo asettaisi pienydinreaktorille lämmönlähteenä. Työssä tarkasteltu prosessi pohjautui Chemrec AB kehittämään mustalipeän kaasutukseen ja DME-synteesiin, jota koekäytettiin vuosina 2005–2016 Ruotsin Piteässä.

Työssä tutustuttiin selluteollisuuden lämmönlähteeksi soveltuviin pienydinreaktoreihin. Pienydinreaktorit soveltuvat erityisesti pienemmän lämpötehon (<1000 MWt) ja ydinlatauksensa vuoksi paremmin teollisuuslämmön tuotantoon kuin tavanomaiset suuret (3000 MWt) sähkön tuotantoon suunnitellut ydinvoimalat. Työssä esiteltiin muutama sellutehdaskäyttöön potentiaalinen reaktorimalli: NuScale Power Module, ACP-100 ja KLT-40S. Mallit valikoitiin NEA SMR Dashboard -julkaisun avulla.

Biojalostamolle teoreettisesti soveltuva pienydinreaktorimalli ja reaktorimoduulien määrä mitoitettiin karkeasti kirjallisuudesta saadun biojalostamon energiatarpeen ja reaktoritehon perusteella. Reaktorivalinnassa merkittäviä olivat myös tekninen ja kaupallinen valmius, tuotetun höyryn soveltuva lämpötila sekä soveltuvuus sähkön ja lämmön yhteistuotantoon. Mitoituksen perusteella kaksi NuScale Power Module -reaktoria olisi sopiva määrä biojalostamon tehontarpeeseen.

Laskentaosiossa tarkasteltiin myös yksinkertaisen energiataselaskennan kautta, paljonko säästyvästä mustalipeästä voitaisiin tuottaa biopolttoaineita. Muuttamalla kirjallisuudesta saaduilla konversioprosenteilla Suomessa vuonna 2024 tuotettu mustalipeä kokonaan biopolttoaineeksi olisi voitu korvata 73–96 % vuotuisesta dieselin kulutuksesta liikennekäytössä. Samalla Suomeen tarvittaisiin 22 NuScale reaktoria, tai lämpöteholtaan vastaava määrä muita soveltuvia reaktoreita. Soveltuvan reaktorin tai reaktorien mitoittaminen täytyy joka tapauksessa tehdä tapauskohtaisesti jokaiselle sellutehtaalle tai biojalostamolle erikseen.

Työn pohjalta voidaan sanoa sellutehtaan olevan mielenkiintoinen käyttökohde ydinreaktorin tarjoamalle kasvihuonekaasupäästöttömälle lämmölle. Keittoprosessi itsessään ei vaadi esimerkiksi äärimmäisen korkeaa lämpötilaa tai aseta energianlähteelleen muita vaatimuksia, joita tavanomainen SMR ei pystyisi täyttämään. Sulfaattitehtaan kemikaalikierto on kuitenkin monimutkainen prosessi ja soodakattilan korvaaminen ydinreaktorilla vaatisi valtavia muutoksia nykyisiin tehtaisiin.

Avainsanat: biojalostamo, sulfaattisellutehdas, pienydinreaktori, mustalipeän kaasutus, DME

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

Opinnäytetyössäni käytetyt tekoälytyökalut ja niiden käyttötarkoitukset on kuvailtu alla:

ChatGPT 4:

Kappaleiden ja lauserakenteiden muotoilu, kieliasun tarkastelu, tekstin suomentaminen.

Luvut 1–6.

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien tekoälyllä tuotetut osat, ja hyväksyn vastuun mahdollisista julkaisueettisten normien rikkomuksista.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. SELLUTEHDASBIOJALOSTAMON ENERGIAVIRRRAT	3
2.1 Sulfaattisellutehtaan prosessit ja materiaalivirrat	3
2.2 Sellutehtaan energiavirrat	4
2.3 Mustalipeän kaasutus ja jalostus polttoaineiksi	6
3. PIENYDINREAKTORI BIOJALOSTAMON LÄMMÖNLÄHTEENÄ.....	8
3.1 Pienydinreaktorien uudet mahdollisuudet prosessilämmön tuotannossa	8
3.2 Biojalostamokäytön asettamat vaatimukset reaktorille	9
3.3 Potentiaalisten reaktorimallien ominaisuudet	9
3.3.1 NuScale Power Module - 250 MWt	10
3.3.2 CNNC ACP100 – 385 MWt.....	11
3.3.3 KLT-40S – 300 MWt	12
3.3.4 Yhteenveto vertailtavista reaktoreista.....	12
4. AINEISTO JA MENETELMÄT	14
4.1 BLGMF-biojalostamon energiatase.....	14
4.2 Biojalostamolle sopivan pienydinreaktorin valintakriteerit.....	16
4.3 Biopolttoaineiden tuotantopotentiaalin laskenta	17
5. TULOKSET	18
5.1 Biojalostamolle soveltuva SMR.....	18
5.2 DME:n tuotantopotentiaali mustalipeästä kaasuttamalla	19
6. JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	21
LÄHTEET.....	23

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ADt	Air Dry tonne, tonni ilma-kuivaa (90 %) sellua
BLG	Black Liquor Gasification, mustalipeän kaasutus
BLGMF	Black Liquor Gasification with Motor Fuels production, mustalipeän kaasutus- ja biopolttoaineiden valmistusprosessi
DME	Dimetyylieetteri
IAEA	Kansainvälinen atomienergiajärjestö
IEA	Kansainvälinen energiajärjestö
MWe	Sähköteho megawatteina
MWt	Lämpöteho megawatteina
NRC	Nuclear Regulatory Commission, Yhdysvaltojen ydinsäätelykomissio
OECD	Taloudellisen yhteistyön ja kehityksen järjestö
SMR	Small Modular Reactor, pienydinreaktori
TWh	Terawattitunti

1. JOHDANTO

Ilmastonmuutoksen ratkaiseminen vaatii merkittäviä muutoksia koko energiajärjestelmäämme. Energiasektori on vastuussa lähes kolmesta neljänneksestä globaaleista kasvihuonekaasupäästöistä. Uusiutuvan sähköntuotannon ja kulutuksen sähköistämisen lisäksi tarvitaan puhtaita lämmöntuotantotapoja. Moni tehdas nojaa sähkön ja lämmön yhteistuotannossa fossiilisiin polttoaineisiin, minkä vuoksi teollisuussektori on vastuussa noin neljänneksestä energiaperäisistä hiilipäästöistä. Tehtaiden suuri tarve lämpöenergialle tekee sektorista yhden vaikeimmista kohteista päästövähennyksille. (OECD & NEA, 2022, s. 13)

Ydinvoima voi tarjota ratkaisun puhtaan sähköntuotannon lisäksi myös teollisuuden päästöjen vähentämiseen. SMR:t soveltuvat pienemmän lämpötehonsa ja passiivisten hätäjäähdytysratkaisujensa myötä käytettäväksi lämmön tuotannossa paremmin kuin sähkön tuotantoon optimoidut, suuret perinteiset ydinreaktorit. SMR:t voivat tarjota kestäväen ratkaisun teollisuuden prosessilämmön tuotantoon ilman polttamista ja kasvihuonekaasupäästöjä.

Suomalainen selluteollisuus käyttää 47 TWh edestä puubiomassaa energiaksi vuosittain. Selluteollisuuden sivuvirrat, kuten sulfaattikeiton tapauksessa mustalipeä, mahdollistavat uusiutuvan energian tuotannon ilman erillisiä hakkuita. Mustalipeä oli merkittävin uusiutuva polttoaine Suomessa vuonna 2020 (*Liikenteen biopolttoaineet ja bioöljyt*, ei pvm.). Bioperäisten sivuvirtojen potentiaali on kuitenkin rajallinen, ja niiden käyttö tulisi kestävässä energiajärjestelmässä optimoida niihin sovelluksiin, joissa niillä on korkein käyttöarvo. Matala-arvoisen polttamisen vähentäminen tehtaalla vapauttaisi biomassoja jalostettavaksi korkeampi-arvoisiin tuotteisiin, kuten biopohjaisiin polttoaineisiin, kemikaaleihin ja materiaaleihin.

Tämän työn tavoitteena on selvittää:

1. Voidaanko pienydinreaktoreita hyödyntää sulfaattisellutehtaalle integroidun biojalostamon energianlähteenä
2. minkälainen pienydinreaktori sopisi biojalostamolle integroitavaksi ja
3. paljonko liikennepolttoaineita polttamiselta säästyvästä mustalipeästä voitaisiin tuottaa.

Aihe on valittu yhteistyössä Think Atom Oy:n kanssa. Think Atom -ajatuspaja tutkii pienydinreaktorien käyttökohteita sekä pyrkii lisäämään pienreaktorien yhteiskunnallista ja lainsäädännöllistä hyväksyttävyyttä. Ajatuspaja on aiemmin julkaissut muun muassa tutkimuksen kaukolämmön tuottamisesta SMR:ien avulla.

Tutkimusta pienydinreaktoreista ja niiden käyttökohteista on saatavilla tänä päivänä laajasti. IAEA on jo vuonna 2017 käsitellyt pienydinreaktoreita prosessilämpökäytössä raportissaan ydinreaktorien yhteistuotannon mahdollisuuksista. (IAEA, 2017).

Ydinreaktorin yhdistämistä sellu- tai paperitehtaalle on tutkittu pääasiassa viimeisen viiden vuoden aikana. Aiheesta ovat julkaisseet esimerkiksi Worsham & Terry (2022) sekä Novotny ym. (2024).

Sellutehtaan ja biojalostamon prosesseihin tutustutaan kirjallisuuskatsauksen avulla. Paperin valmistusprosessit ja niiden integrointi sellutehtaalle on rajattu tämän työn ulkopuolelle. Biojalostamon prosessiketjua tarkastellaan energiataselaskennan avulla.

Sellutehdasbiojalostamoja on tutkittu ja mallinnettu vuosikymmenten ajan. Landälv ym. Luulajan teknillisessä yliopistossa. BioDME-projektin raportissa tutkimusryhmä arvioi DME:n tuotannon mustalipeästä olevan kokonaishyötysuhteeltaan yksi tehokkaimmista tavoista tuottaa uusiutuvia polttoaineita (Landälv ym., 2014).

Luvussa 2 tarkastellaan sulfaattisellutehtaan prosesseja ja energiavirtoja sekä esitellään biopolttoaineiden valmistamista mustalipeästä. Luvussa 3 taustoitetaan SMR-teknologiaa, kuvaillaan biojalostamon asettamat vaatimukset SMR:lle ja esitellään muutama potentiaalinen reaktorikonsepti. Luvussa 4 kuvataan pienydinreaktoria lämmönlähteenään käyttävän biojalostamoprosessin energiatase, biojalostamolle soveltuvan SMR:n valintakriteerit sekä biopolttoainetuotannon potentiaalinen laskennan menetelmä. Luvussa 5 esitellään tutkimuksen tulokset ja luvussa 6 tutkimuksesta tehtäviä johtopäätöksiä sekä jatkotutkimuskohteita.

2. SELLUTEHDASBIOJALOSTAMON ENERGIIVIRRRAT

Sulfaattikeitto eli Kraft-prosessi on tänä päivänä ylivoimaisesti yleisin sellun keittoprosessi 80 % osuudellaan globaalista sellun tuotannosta. Sulfaattikeitto sopii hyvin kaikille puulajeille ja sen tuottama sellu on laadultaan vahvaa verrattuna sulfiittikeittoon, jolla tuotetaan nykyään enää 10 % kaikesta sellusta. (Suhr ym., 2015, s. 195).

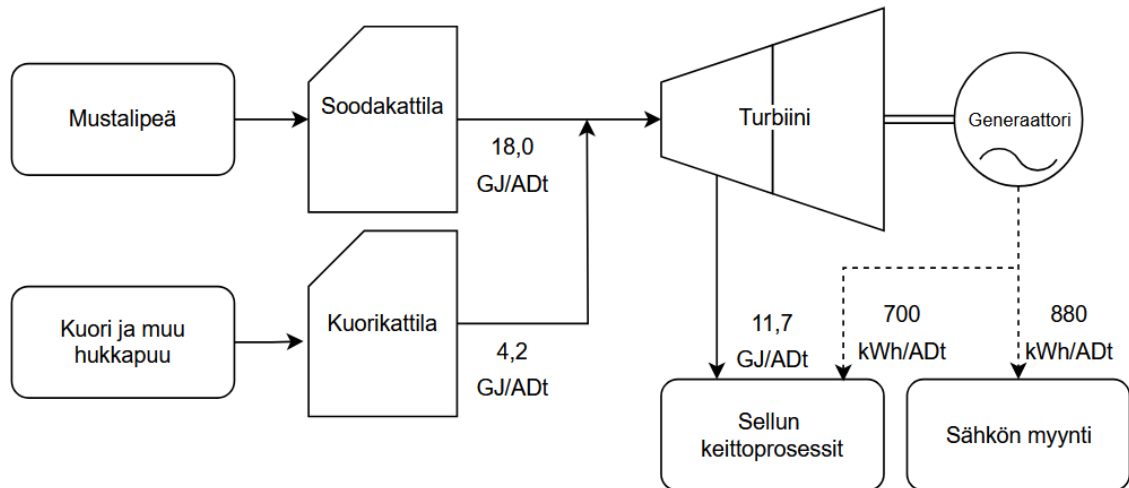
Energiatehokkailla sellutehtailla on ylimäärin polttoaineeksi tai biopolttoaineiden raaka-aineeksi kelpaavaa biomassaa. Sellutehtaiden tuotantotalouden parantamiseksi erityisesti pohjoisella pallonpuoliskolla on otettu käyttöön biojalostamon käsite. Sellutehdaspohjainen biojalostamo voi teoriassa koostua monenlaisista eri prosesseista ja tuottaa valtavan määrän erilaisia uusiutuvia lopputuotteita. (Suhr ym., 2015, s. 356–357).

Tässä luvussa kuvaillaan sulfaattisellutehtaan prosessit, höyrypiirit ja energiavirrat, sekä prosessien tyypilliset paine- ja lämpötila-alueet. Lopuksi kuvaillaan sellutehtaalle integroidun biopolttoainetuotannon taustat ja tärkeimmät prosessit.

2.1 Sulfaattisellutehtaan prosessit ja materiaalivirrat

Puu saapuu tehtaalle tukkeina, jotka kuoritaan ja haketetaan. Hake keitetään 150–170 °C lämpötilassa valkolipeässä, joka sisältää natriumhydroksidia (NaOH) ja natriumsulfidia (Na₂S). Lipeäkeitossa haketettu puu hajoaa selluloosaksi ja muiksi aineiksi, kuten ligniiniksi ja hemiselluloosaksi, jotka liuetessaan lipeään värjäävät sen mustaksi. Mustalipeä erotetaan selluloosasta massan pesussa. Lopuksi massa kuivataan, jotta se kelpaa paperitehtaalle siirrettäväksi. (Suhr ym., 2015, s. 197–204). Kuvassa 1 on laatikkokaavio tavanomaisesta sulfaattisellutehtaasta. Höyryn käyttökohteet on merkitty kuvaan korkeapaine- (KP), välipaine- (VP) ja matalapainetasoissa (MP).

Kuvassa 2 esitetään sellutehtaan merkittävimmät energiavirrat prosessikaaviona. Keskimääräinen sellutehdas käyttää 11,7 GJ keski- ja matalapainehöyryä jokaista tuotettua kuivaa sellutonna (ADt = Air Dry tonne) kohden. Keiton sivutuotteena syntyvä mustalipeä taas tuottaa häviöiden jälkeen 18,0 GJ korkeapainehöyryä soodakattilasta turbiinille. Kun poltetaan erillisessä kattilassa myös kuori ja muu rejekti, yhteensä turbiinille syötetään 22,2 GJ höyryä. Tuotetusta sähköstä 700 kWh (2,52 GJ) käytetään tehtaalla ja 880 kWh (3,17 GJ) myydään verkkoon. (Tikka, 2008, s. 305)



Kuva 2. Sulfaattisellutehtaan keskimääräiset energiavirrat tuotettua sellutonna kohden. Höyrynä siirtyvä lämpö on merkitty gigajouleina ja sähkö kilowattitunteina. (Tikka, 2008, s. 305)

Soodakattila huolehtii keittokemikaalien regeneroinnista ja on päävastuussa tehtaan energiantuotannosta (Tikka, 2008, s. 86). Energiaviraston voimalaitosrekisterin (2023) mukaan Suomessa oli vuonna 2023 17 soodakattilaa, jotka tuottivat Tilastokeskuksen (2024) mukaan yhteensä 5 382 GWh sähköä ja 24 182 GWh teollisuuslämpöä. Kun tuotettu energiamäärä jaetaan 350 tuotantopäivälle, saadaan suomalaisen soodakattilan keskimääräiseksi sähkötehoksi noin 39 MWe ja lämpötehoksi noin 176 MWt.

Kuurikattilassa poltetaan tukeista saatava kuori ja muita keiton sivuvirtoja, kuten haitallisia kemikaaleja. Kattilaan voidaan syöttää myös muuta bioperäistä polttoainetta, kuten hakkutähteitä. Kuorikattila on yleensä leijupetikattila ja se tuottaa lisähöyryä tehtaan prosesseihin ja turbiinille. (Tikka, 2008, s. 203) Kuoresta saadaan polttamalla n. 3 GJ sellutonna kohden (Ekbom ym., 2003, s. 287).

Meesauunissa poltetaan soodakattilan pohjalle valuva aines, jotta se saadaan uudelleen käyttöön lipeäkeittoon. Meesauunin lämpötila kohoaa yli 1000 °C ja polttoaineena käytetään yleensä polttoöljyä tai maakaasua. Myös kuorta voidaan käyttää polttoaineena, mutta se pitää ensin kuivata ja jauhaa tai kaasuttaa synteesikaasuksi. (Tikka, 2008, s. 163)

Nykyaikainen sellutehdas tuottaa sähköä yli oman tarpeensa. Energiatehokkaat prosessit kuluttavat vähemmän sähköä ja lämpöä, kuin mitä mustalipeää polttamalla saadaan tuotettua. Tehtaan sähköntarpeesta huolehtiminen on edullista itse tuotetulla sähköllä ja ylimääräinen sähkö voidaan saattaa sähköverkon kautta helposti markkinoille.

2.3 Mustalipeän kaasutus ja jalostus polttoaineiksi

Mustalipeästä voidaan kaasuttamisen myötä valmistaa useita eri biopolttoaineita, kuten metanolia, Fischer-Tropsch-dieseliä, dimetyylieetteriä (DME) ja synteettistä maakaasua. Sellutehtaan energiatarpeen täyttämiseksi tehtaalle vaaditaan kuorikattilan korvaava isompi kattila, jossa poltetaan esimerkiksi kuorta, palavia jätteitä, lisäbiomassaa ja/tai synteesikaasua. (Naqvi, Yan, & Dahlquist, 2010, s. 8009)

Ekbohm ym. tutkivat BLGMF-prosessin (mustalipeän kaasutus ja biopolttoaineiden tuotanto) integraatiota moderniin sellutehtaaseen, teknistä kypsyyttä ja taloudellista kannattavuutta. Laskelmat perustuivat energiategokkaaseen 2000 ADt/d tuottavaan referenssimalliin sellutehtaasta. Biopolttoaineina tehtaalta poistuva energia kompensoitiin lisäbiomassan hankinnalla. (Naqvi, Yan, & Dahlquist, 2010, s. 8009)

BLG on korkean lämpötilan termokemiallinen prosessi, jossa mustalipeän orgaaninen aines muunnetaan synteesikaasuksi ($\text{CO} + \text{H}_2$) samalla kun keittokemikaalit regeneroidaan (Bajpai, 2013, 32). Chemrec BLG -prosessissa mustalipeä syötetään kaasuttimeen, johon syötetään happea alle puolet täydelliseen palamiseen vaaditusta määrästä. Mustalipeän orgaaninen aines reagoi hapen kanssa muodostaen hiilimonoksidia ja hiilidioksidia. Lisäksi orgaaninen aines reagoi höyryn kanssa muodostaen vetyä ja hiilimonoksidia. Syntynyt synteesikaasu koostuu pääosin hiilimonoksidista, hiilidioksidista, vedystä ja pienissä määrin metaanista ja rikkivedystä. Prosessi toimii noin 25–35 baarin paineessa ja 900–1000 °C:n lämpötilassa. Korkean lämpötilan seurauksena epäorgaaninen aines sulaa ja poistuu kaasuttimen pohjalta. (Wilke ym., 2021).

Synteesikaasusta voidaan valmistaa edelleen dimetyylieetteriä. DME:n valmistus on joko kaksivaiheinen (metanolisynteesi ja dehydraatio) tai integroitu prosessi (Bajpai, 2013, 29–30). Metanolisynteesi on täysin kaupallista tekniikkaa, sillä suurin osa metanolista valmistetaan nykyään synteesikaasusta katalyyysillä. Metanolisynteesi tapahtuu 220–300 °C lämpötilassa ja 50–100 bar paineessa. DME:n katalyyysi metanolista tapahtuu 310 °C lämpötilassa ja 26 bar paineessa. (Herlevi, 2018, s. 20)

DME on nykyisiin polttomoottoreihin hyvin soveltuva, myrkytön ja puhtaasti palava polttoaine. Tietyin muutoksin polttoainejärjestelmään DME voi korvata dieselin esimerkiksi raskaan liikenteen käytössä. Sen huonoja puolia verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin on pienempi energiatiheys ja alhainen kiehumispiste, jonka vuoksi DME:n polttoaineinfra vaatii paineistamista. (Semelsberger ym., 2006)

Mustalipeän kaasutus ja DME:n tuotanto oli ruotsalaisen vertailututkimuksen perusteella taloudellisesti kannattavin biojalostamovaihtoehto kaikille tutkimuksessa tarkastelluille energiamarkkinaskenaarioille. Herkkyystarkastelun perusteella johtopäätös pysyi, vaikka tukikomponentit olisivat arvioitua pienemmät tai jalostamon investointikustannukset suuremmat kuin aiemmissä tutkimuksissa oli raportoitu. (Pettersson, 2011, s. 91)

Euroopan komission kokoaman vaihtoehtoisten kestävien polttoaineiden asiantuntijaryhmän raportissa vuonna 2020 kuvailtiin Chemrec AB ja Haldor Topsoe A/S -yritysten yhteistyössä kehittämää "BioDME" BLGMF-prosessia yhtenä 20 menestystarinasta. Prosessi on ollut pilottikäytössä vuosina 2005–2016 sulfaattisellutehtaalla Ruotsin Piteåssa. BioDME kategorisoitiin teknologiselle valmiustasolle 8/9: "valmis ja hyväksytty systeemi". (Landälv & Rudberg, 2020).

3. PIENYDINREAKTORI BIOJALOSTAMON LÄMMÖNLÄHTEENÄ

Sähkön tuotanto on ydinvoimalaitosten pääkäyttökohde 2600 TWh vuosituotannollaan (2024). Kaupallisia ydinreaktoreita on käytetty jo vuosikymmeniä muuhunkin kuin sähkön tuotantoon ja useat maat tutkivat ydinenergian käyttökohteita ilmastopäästöjensä vähentämiseksi. Kaukolämpöä tuotettiin vuonna 2024 ydinenergialla n. 2500 GWh, pääasiassa Itä-Euroopan maissa, Sveitsissä ja Kiinassa. Prosessilämpöä tuotettiin paljon vähemmän, yhteensä n. 107 MWh. (International Atomic Energy Agency, 2025).

Sveitsissä sijaitseva Kernkraftwerk Gösgen aloitti toimittamaan prosessilämpöä läheiselle kartonkitehtaalle joulukuussa 1979. Ensimmäisen vuoden aikana 1,8 km pitkää putkea pitkin toimitettu höyry säästi tehtaalta 11 500 tonnia raskasta polttoöljyä. Maksimissaan 70 tonnia tunnissa siirrettävän höyryn lämpöteho vastaa noin 45 MWt. Höyryn paine on noin 12 bar ja lämpötila yli 200°C. Vuonna 1996 järjestelmää laajennettiin pienellä kaukolämpöverkolla Niedergösgenin ja Schönenwerdin kunnissa. Vuonna 2009 rakennettiin erillinen pienempi (10 t/h, 15 bar) höyrypiiri Cartaseta Friedrich & Co. paperitehtaalle Dänikenissä. (KKG, 2011)

Tässä luvussa esitellään lyhyesti pienydinreaktorien (SMR) peruseriaatteet ja miksi juuri SMR on kiinnostava vaihtoehto prosessilämmön lähteeksi. Lisäksi esitellään muutama potentiaalisesti biojalostamokäyttöön soveltuva pienydinreaktori.

3.1 Pienydinreaktorien uudet mahdollisuudet prosessilämmön tuotannossa

Tavanomaisen ydinvoimalan sähköteho on tyypillisesti noin 1000 MWe ja sähköntuotannon hyötysuhde 30–40 %, eli ydinreaktorilta vaadittava lämpöteho on n. 2500–3300 MWt. Suuren lämpötehonsa ja ydinpolttoainelatauksensa vuoksi perinteisiltä ydinreaktoreilta vaaditaan suuri suojavyöhyke. Lämmön siirtäminen pitkän etäisyyden päähän aiheuttaa lämpöhäviöitä ja nostaa kustannuksia. (Partanen, 2019)

Pienydinreaktori (SMR) voi tuottaa sähköä, lämpöä tai molempia riippuen sen suunnitteluperiaatteista. Vuonna 2024 Nuclear Energy Agency (NEA) tunnisti 63 SMR-konseptia aktiivisessa kehitysvaiheessa. Pienydinreaktorin sähköteho on 50–300 MW tai jopa pienempi. SMR voidaan suunnitella modulaarisesti tehtaissa valmistettavaksi, kuljetettavaksi ja skaalautuvasti käyttöön otettavaksi. (NEA, 2024, s. 11)

Pienreaktorien turvallisuusperiaatteet perustuvat tavanomaista pienempään ydinlataukseen ja yksinkertaisiin ilmiöihin, kuten veden luonnolliseen kiertoon reaktorisydämen jäähdyttämiseksi myös vaaratilanteiden tai onnettomuuksien aikana. Passiiviset turvallisuusratkaisut eivät vaadi käyttäjien toimia reaktorin saattamiseksi turvalliseen tilaan. Passiiviset järjestelmät mahdollistavat myös laitoksen yksinkertaistamisen, vähentäen vikaantuvien laitteiden määrää. Nämä tekijät voivat johtaa esimerkiksi pienempiin suojavyöhykevaatimuksiin, mikä auttaisi reaktorien sijoittamisessa lähemmäksi lämmön käyttökohteita. (NEA, 2024, s. 21)

3.2 Biojalostamokäytön asettamat vaatimukset reaktorille

Worsham & Terry mallinsivat NuScale SMR:n yhdistämistä paperitehtaalle staattisen ja dynaamisen energiataseen avulla. Tutkimuksessa todettiin, että SMR integrointi sellutehtaan höyryjärjestelmiin on teknisesti mahdollista (Worsham & Terry, 2022). Novotny ym. tutkivat SMR:n hyödyntämistä öljynjalostamolla, metanolitehtaalla ja sulfaattisellutehtaalla. Tutkimuksessa todettiin, että mustalipeän korvaaminen sellutehtaan pääpolttoaineena on vaikeaa, koska keittokemikaalien regenerointi on siihen kiinteästi yhteydessä. SMR:llä voidaan kuitenkin korvata esimerkiksi maakaasukattila tehtaan höyryn ja sähkön tuotannossa. (Novotny ym., 2024)

Sellun keittoprosessi ei vaadi äärimmäisen korkeaa lämpötilaa tai aseta energianlähteelleen muita vaatimuksia, joita tavanomainen kevytvesireaktori ei pystyisi täyttämään. Biojalostamon prosessien vaatima minimilämpötila (n. 180 °C) ylittyy lähes jokaisella NEA:n listamalla SMR-konseptilla (NEA, 2025, s. 44). Vaadittu höyryn lämpötila on niin alhainen, että se voidaan hyvin tuottaa perinteisillä vesijäähdytteisillä ydinreaktoreilla, eikä korkean lämpötilan reaktoreille kuten HTGR ole välttämättä tarvetta (OECD & NEA, 2022, s. 29).

Suurin osa kevytvesi-SMR:ien suunnittelijoista aikoo hyödyntää tavanomaista, matalarikasteista uraania polttoaineenaan. Näille reaktoreille ei odoteta olevan esteitä kaupalliselle toimitukselle. Monet muut konseptit pyrkivät käyttämään ydinpolttoaineita, joille ei ole vielä olemassa joko hyväksyntää tai toimitusketjua. (NEA, 2025, s. 35)

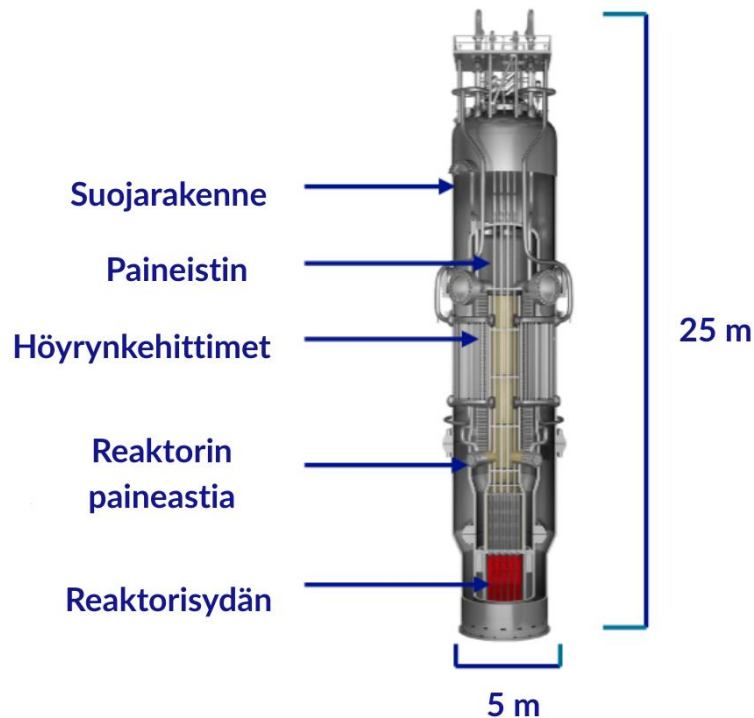
3.3 Potentiaalisten reaktorimallien ominaisuudet

Tutkimuksen kannalta relevantteja reaktorimalleja ovat biojalostamon teho- ja lämpötilatarpeisiin soveltuvat, teknologisesti mahdollisimman valmiit ja nyt tai lähitulevaisuudessa kaupallisesti saatavilla olevat reaktorit. Vertailuun on valittu kevytvesireaktoreita niiden tunnetun tekniikan ja käyttökohteen kanssa yhteensopivan

höyryn lämpötilan vuoksi. Tässä aluvuossa esitellään muutama reaktorikonsepti, jotka soveltuvat em. kriteereihin ja sen vuoksi voisivat olla potentiaalisia biojalostamon lämmönlähteitä.

3.3.1 NuScale Power Module - 250 MWt

NuScale Power Module (NPM) on yhdysvaltalainen pienydinreaktorikonsepti, joka koostuu 77 MWe:n generaattorista, jota pyörittää 250 MWt höyryä tuottava ydinreaktori. Teknologisesti NPM on hyvin lähellä kaupallista valmiutta. Polttoaine on kehitetty käytössä olevan polttoaineen pohjalta, ja valmistajan mukaan polttoaineen toimitusketju on olemassa. (NEA, 2024, s. 129). Reaktorimoduuli on esitelty kuvassa 3.

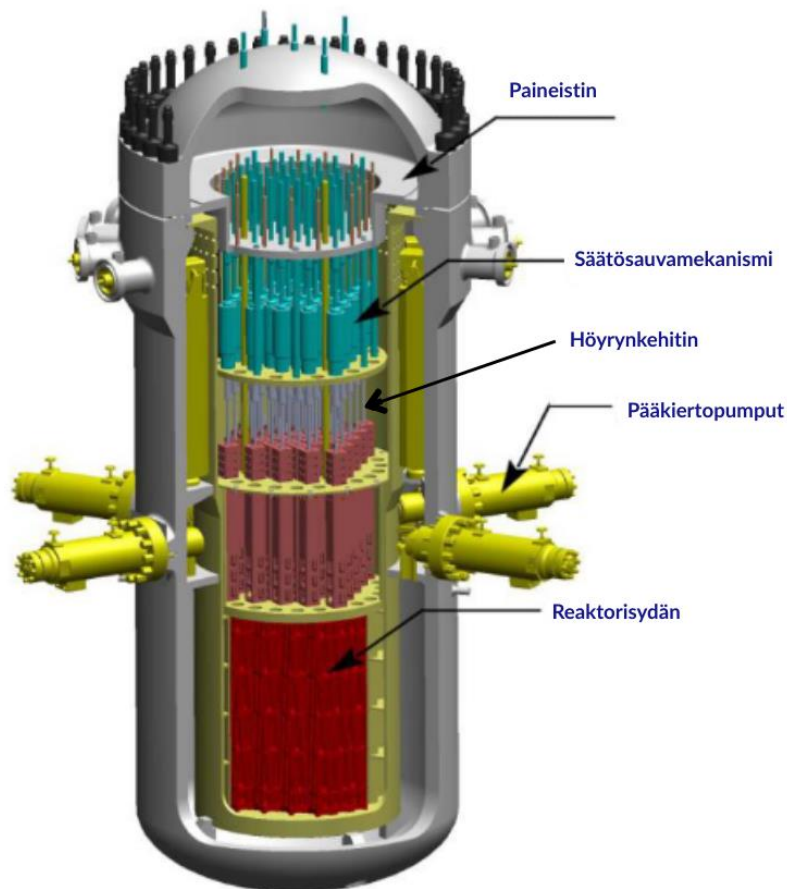


Kuva 3. NuScale Power Module (Muokattu lähteestä DePavia, 2025)

Reaktori on pienehkön ydinlatauksensa vuoksi voitu suunnitella jäähtymään vikatilanteessa osittain passiivisesti. Neljästä, kahdeksasta tai kahdestatoista reaktorimoduulista koottava standardivoimalaitos voi olla bruttosähköteholtaan 308, 462 tai 924 MWe. Lämpöteho on vastaavasti 1000, 1500 tai 3000 MWt. Voimalaitos on suunniteltu käytettäväksi sähkön ja lämmön yhteistuotantoon. Polttoaineen vaihtosykli on nimellisesti 18 kuukautta, mutta useasta moduulista koostuvan laitoksen muut moduulit voivat tuottaa höyryä samanaikaisesti, kun yhtä tai useampaa moduulia huolletaan. Reaktorimoduuli tuottaa höyryä teollisuuden prosessien käyttöön 32,8 bar paineessa ja 283 °C lämpötilassa. (DePavia, 2025).

3.3.2 CNNC ACP100 – 385 MWt

ACP100 on kiinalainen 125 MWe / 385 MWt painevesireaktori. Ensimmäisen reaktorin rakennus aloitettiin vuonna 2021 ja kaupallinen käyttöönotto on suunniteltu vuodelle 2026. Reaktori perustuu olemassa olevaan kevytvesiteknologiaan ja sen käyttämälle polttoaineelle on vakiintuneita toimitusketjuja. (NEA, 2025, s. 122)



Kuva 4. CNNC ACP100 (Muokattu lähteestä Xu, 2016)

ACP100 voi tuottaa samanaikaisesti 62,5 MWe sähköä ja 192,5 MWt höyryä 290 °C lämpötilassa. Ydinpolttoaine vaihdetaan kahden vuoden välein ja reaktorin suunniteltu elinikä on 60 vuotta. Polttoaineen rikastusaste on 4,25 %. Reaktoriin on suunniteltu useita passiivisia turvallisuusjärjestelmiä. (Xu, 2016)

3.3.3 KLT-40S – 300 MWt

Kaksi KLT-40S reaktoria sisältävä kelluva ydinvoimalaitos Akademik Lomonosov aloitti sähkön- ja lämmöntuotannon toukokuussa 2020. Jäänmurtaajilla käytettyihin KLT-40M reaktoreihin pohjautuvan KLT-40S reaktorin toimitusketjut ja polttoaineen saatavuus ovat vakaalla pohjalla. (NEA, 2024, s. 141)

KLT-40S:n kapasiteetti on 150 MWt tai 35 MWe (brutto) moduulia kohden. Sen ydinhöyryjärjestelmän käyttöpaine on 127 bar ja reaktorisydämen jäähdytysnesteen poistumislämpötila on 316 °C. Yksikkö käyttää polttoaineena uraanidioksidipellettejä (UO₂), joiden rikastusaste on 18,6 %. Reaktorin polttoaineenvaihtojakso on 30–36 kuukautta ja suunniteltu käyttöikä 40 vuotta. (IAEA, 2025)

KLT-40S reaktorin negatiivinen puoli on sen käyttämä korkearikasteinen polttoaine, joka korkeampien turvallisuusriskiensä vuoksi rajaa reaktorin käytännössä ulos realistisena vaihtoehtona eurooppalaisilta siviilimarkkinoilta. Turvallisuus- ja toimitusvarmuusmielessä on mainittava myös reaktorin valmistusmaan eli Venäjän aloittama hyökkäyssota Ukrainaan ja siitä johtuvat talouspakotteet.

3.3.4 Yhteenveto vertailtavista reaktoreista

Taulukkoon 1 on koottu esitellyt reaktorit. Taulukossa on yhteenveto reaktorien tärkeimmistä ominaisuuksista, kuten teho, teknologinen valmius ja jäähdytteen lähtölämpötila.

Taulukko 1. Taulukko esitellyistä pienydinreaktoreista (IAEA, 2025; NEA, 2025)

Nimi	Alkuperämaa	MWt / MWe	Jäähdytteen ulostulo-lämpötila	Teknologinen valmius	Polttoaine ja rikastusaste
NuScale Power Module™	Yhdysvallat	250 / 77 (brutto)	316 °C	NRC hyväksyntä 2025, ei vielä rakenteilla	UO ₂ < 4,95 %
ACP100	Kiina	385 / 100 (netto)	303 °C (suunnittelulämpötila lämpökäytössä)	Rakenteilla, tavoitteena käyttöönotto 2026	UO ₂ ≤ 4,95 %
KLT-40S	Venäjä	150 / 32 (netto)	316 °C	Kaksi reaktoria käytössä vuodesta 2020	UO ₂ 18,6 %

Taulukon reaktorit kehittyvät jatkuvasti ja osa taulukon tiedoista saattaa olla jo julkaisuhetkellä vanhentunutta. Vaikka ACP100 ja KLT-40S reaktoreita on jo käytössä tai lähellä käyttöönottoa, niiden saatavuudesta tai yhteensopivuudesta suomalaisen ydinlainsäädännön kanssa ei ole mitään takuita.

4. AINEISTO JA MENETELMÄT

Tässä luvussa esitellään valintakriteerit BLGMF-biojalostamolle soveltuvalla reaktorilla. Kirjallisuuden avulla arvioidaan, paljonko sähkö- ja lämpötehoa teoreettinen biojalostamo vaatii ulkoiselta energialähteeltään. Biojalostamon asettamat reunaehdot esitellään ensimmäisessä alaluvussa.

Reaktorimallin valintaperusteet esitellään toisessa alaluvussa. Reaktoritehon mitoittaminen ja mahdollinen reaktorimoduulien määrän tarkastelu suoritetaan staattisena energiatasetarkasteluna.

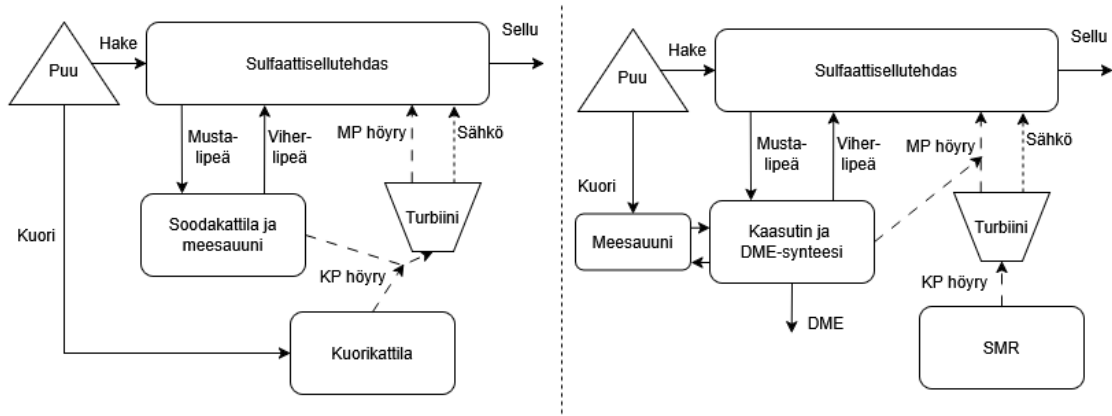
Lopuksi esitellään aineisto ja oletukset, joilla arvioidaan, kuinka paljon biopolttoainetta mustalipeän säästyneestä energiasisällöstä on mahdollista tuottaa Suomessa. Teoreettista maksimituotantoa verrataan vuotuisen tieliikenteen dieselöljyn kulutukseen.

4.1 BLGMF-biojalostamon energiatase

Tyypillinen sellutehdas tuottaa 1000 tonnia sellua päivässä (Bajpai, 2013, s. 54). Modernit tehtaat ovat ainakin pohjoismaissa tätä merkittävästi suurempia. Esimerkiksi Kemin biotuotetehtaan vuosituotanto on n. 1,5 miljoonaa tonnia sellua, eli 4100 tonnia päivässä (Metsä Group, 2023). Tässä työssä käytetään viitearvona keskikokoista sellutehdasta, jonka tuotantokapasiteetti on 2000 ADt/d.

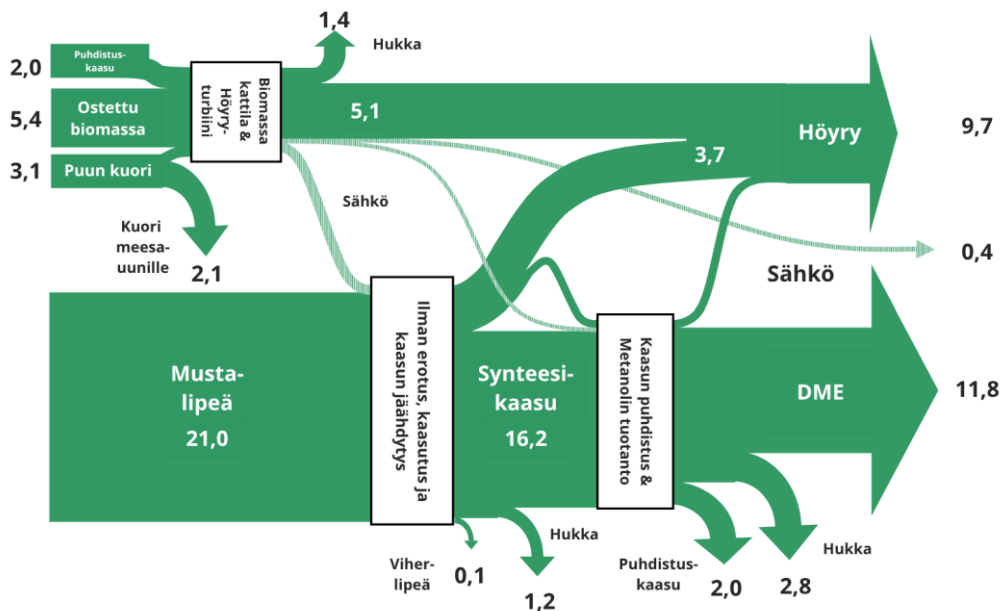
Työssä hyödynnetään Ekbon ym. tekemää pohjatyötä energiataseiden laskennan osalta. Keittokemikaalit regeneroidaan Chemrec AB:n laatimalla BLGMF-prosessilla ja mustalipeän koko energiasisältö muunnetaan biopolttoaineiksi. Työssä oletetaan, että Chemrec AB:n kehittämä kaasutusteknologia on skaalattavissa keskisuuren, nykyaikaisen sellutehtaan tarpeisiin.

Kuvassa 5. on esitelty biojalostamo, joka koostuu sulfaattisellutehtaasta mustalipeän kaasutuksella, DME-synteesilaitoksesta ja prosessilämpöä tuottavasta pienydinvoimalasta verrattuna tavanomaiseen sulfaattisellulolaitokseen. Kuvasta havaitaan prosessien eroavaisuudet tärkeimpien materiaali- ja energiavirtojen näkökulmasta. Mustalipeän sisältämän energian poistuessa tehtaalta DME:nä, täytyy ulkoisen energialähteen, tässä työssä SMR:n, huolehtia korkeapainehöyryn tuottamisesta vastapaineturbiinille sähkön ja prosessihöyryn tarpeen täyttämiseksi.



Kuva 5. Biojalostamon tärkeimmät materiaali- ja energiavirrat verrattuna sulfaattisellutehtaaseen (Muokattu lähteestä Naqvi, Yan, & Fröling, 2010, s. 939)

Ekbom ym. laskivat raportissaan staattisen energiataseen DME:n tuotannolle sellutonnin kohden (GJ/ADt) Chemrec BLGMF-tekniikalla. Kuvassa 6 on energiavirtakaavio skenaariorista, jossa mustalipeän energiasisältö jalostetaan täysin polttoaineiksi. Kuoren energiasisällöstä suurin osa käytetään kuivattua ja kaasutettua kuorta polttavassa meesauunissa. Skenaariorissa erillinen biomassakattila huolehtii pääosin sellutehtaan höyryntarpeesta samalla tuottaen n. kuudesosan tehtaalla käytetystä sähköstä. Loput sellutehtaan sähköntarpeesta katetaan ostosähköllä. (Ekbom ym., 2003, s. 285, 287)



Kuva 6. Energiavirtakaavio metanolin (DME) tuotannolle sellutonnin kohden (GJ/ADt) (Muokattu lähteestä Ekbom ym., 2003, s. 287)

Laskelman perusteella biojalostamolle täytyy hankkia 5,4 GJ/ADt lisäenergiaa esimerkiksi hakkuutähteitä polttamalla. Ulkoinen sähkö- ja lämpötehon tarve 2000 ADt/d

tehtaalle on 100,0 MWe ja 149,7 MWt, kun mustalipeän energiasisältö jalostetaan kokonaisuudessaan biopolttoaineiksi.

Prosessien energiatarpeen lyhytkestoista vaihtelua ei tarkastella tässä työssä. Vaihtelun huomioimiseksi reaktorin kokoa tai reaktorien määrää arvioidessa pyöristetään ylöspäin ja oletetaan, että ylimääräinen höyry voidaan tarvittaessa purkaa ympäristöön, kuten esimerkiksi Worsham & Terry'n staattisissa laskennoissa on tehty (2022, s. 8).

4.2 Biojalostamolle sopivan pienydinreaktorin valintakriteerit

Tutkimukseen valittiin OECD:n ydinenergiavirasto Nuclear Energy Agency:n (NEA) tunnistamista pienydinreaktoreista kolme mallia esikarsinnan avulla. Karsinnassa merkityksellistä oli biojalostamolle sopiva teholuokka, kevytvesiteknologia ja kaupallinen saatavuus nyt tai lähitulevaisuudessa. Reaktorimallien tarkemmassa tarkastelussa tärkeimmät arviointikriteerit ovat:

1. riittääkö reaktorin lämpöteho biojalostamon tarpeisiin yhteistuotannossa,
2. riittääkö reaktorin tuottaman höyryn lämpötila biojalostamon prosessivaatimuksiin,
3. onko reaktori nyt tai lähitulevaisuudessa kaupallisesti saatavilla ja
4. onko reaktori suunniteltu lämmön ja sähkön yhteistuotantoon.

Edellisessä kappaleessa kuvailtu teoreettinen biojalostamo tarvitsee energiataseeseensa vähintään 100 MWe ja 150 MWt lisäenergiaa. Tarkastelussa oletetaan, että tehtaan lämpö- ja sähkötehon tarve voi kausittaisen lämpötilavaihtelun vuoksi olla 10 % keskimääräisestä korkeampi. Ydinvoimalaitoksen mitoitustehoksi valittiin tässä työssä 100–110 MWe ja 150–165 MWt. Huomattavaa on, että yhteistuotannossa rakennusaste eli sähkön ja lämmön tuotannon suhde ei riipu pelkästään reaktorista tai kattilasta. Yksinkertaistamisen vuoksi vaadittu sähköteho muutetaan konservatiivisella 30 % hyötysuhteella lämpötehoksi, eli:

$$\frac{100-110 \text{ MWe}}{30 \%} = 333 - 367 \text{ MWt}, \quad [1]$$

jolloin vaadittu kokonaislämpöteho on yhteensä 483–532 MWt.

Sellutehtaan prosessit käyttävät höyryä maksimissaan 180 °C lämpötilassa. Tästä muodostuu minimilämpötila höyrylle, jota ydinreaktorin täytyy tuottaa. Mitoituslämpötilana käytetään tässä työssä 200 °C reaktorin jäähdytteen poistolämpötilaa, jotta häviöt lämmönvaihtimissa ja putkissa voidaan karkeasti huomioida.

Reaktorien kehitystasetta ja kaupallista saatavuutta arvioidaan NEA SMR Dashboard -raportin avulla. Raportissa kuvaillaan SMR-projektien kypsyyttä kuudella kriteerillä: luvittamisprosessin eteneminen, sijoituskohteen tai kohteiden varmistaminen, hankittu rahoitus, toimitusketjujen kypsyys, julkinen kiinnostus tai yhteistyösopimukset sekä polttoaineen kehitystaso ja toimitusvarmuus (NEA, 2024). Lupaprosessi on ratkaisevan tärkeä, jotta mikä tahansa SMR pääsee markkinoille. Joidenkin hyvin innovatiivisten SMR:ien lisensointia varten ei ole edes vielä olemassa tarvittavia säätelyprosesseja. (NEA, 2024, s. 29).

Reaktorin integroitavuus teollisuusympäristöön, kuten soveltuvuus vaihtelevalla teholla ajamiseen, erityiset sijoitettavuus- ja turvallisuusvaatimukset, huoltoseisakkien pituudet sekä polttoaineen ja muiden komponenttien saatavuus pyritään ottamaan huomioon. Ekbon ym. olettaa laskelmissaan, että biojalostamoita käytetään 350 päivää vuodessa. Tällöin myös reaktori tulisi olla suunniteltu huollettavaksi 15 päivän seisakin aikana.

Kriteeristön perusteella muodostetaan kvalitatiivinen valintamatriisi, jossa reaktoreita vertaillaan keskenään biojalostamon tarpeisiin peilaten.

4.3 Biopolttoaineiden tuotantopotentiaalin laskenta

Biopolttoaineiden tuotantopotentiaalia arvioitiin tutustumalla kirjallisuuslähteisiin, joissa on käsitelty mustalipeän kaasutuksen ja biopolttoaineiden valmistuksen sisältäviä biojalostamoita. Biojalostusprosessien tuottavuuden ja kannattavuuden tarkempi laskenta rajattiin muutoin työn ulkopuolelle.

Consonni ym. tutkivat BLGMF biojalostamoita simuloimalla eri skenaarioita mahdollisista tuotantoprosesseista 1725 ADt/d tuottavalle paperitehtaalle. Skenaariossa, jossa tuotetaan DME:tä vain kaasutetusta mustalipeästä ilman lisäbiomassan syöttämistä Consonni ym. laskivat, että 350,7 MW mustalipeää käyttävä biojalostamo tuottaisi DME:tä 168,0 MW teholla. Energiahyötysuhde mustalipeästä DME:ksi oli laskennan perusteella siis 47,9 %. (Consonni ym., 2009, s. 1308).

Ekbon ym. laskennoissa 2000 ADt/d tuottava sellutehdas tuotti DME:tä 1183 tonnia päivässä. Energiahyötysuhde mustalipeästä polttoaineeksi oli Ekbon ym. laskennoissa 63 %. (Ekbon ym., 2003, s. 285).

Oletetaan, että DME voi korvata dieselpolttoaineen liikennekäytössä täysin energiasisältöperustaisesti ja lasketaan kuinka suuren osuuden Suomen vuosittaisesta dieselin kulutuksesta biojalostamo voisi säästää. Suomessa kulutettiin 141,3 PJ mustalipeää ja 92,6 PJ dieselpolttoainetta vuonna 2024 (Tilastokeskus, 2025).

5. TULOKSET

Työssä selvitettiin millä edellytyksillä pienydinreaktoreja voitaisiin hyödyntää sellutehtaalla, minkälainen reaktorimalli olisi potentiaalinen valinta sellutehtaan lämmöntuotantoon integroitavaksi ja paljonko liikennepolttoaineita polttamiselta säästyvästä mustalipeästä voitaisiin tuottaa kaasutuksella ja DME:n tuotannolla.

Mikäli soodakattila halutaan korvata kokonaan, täytyy keittokemikaalit regeneroida jollain luotettavalla tavalla. Kirjallisuuskatsauksen perusteella mustalipeän kaasuttaminen on toimiva ja testattu tapa korvata soodakattila ja tuottaa mustalipeästä biopolttoaineita. Kun mustalipeän sisältämä energia viedään tehtaalta biopolttoaineiksi jalostettuna, tarvitaan biojalostamolle luotettava lisäenergian lähde.

Kirjallisuuskatsauksen mukaan kevytvesi-SMR soveltuu hyvin sellutehtaan energiatarpeisiin. Ydinreaktorilla tuotettua höyryä on käytetty Sveitsissä jo vuodesta 1979 paperitehtaan prosessien tarpeisiin ja NuScale Power Module -reaktorin yhdistämistä paperitehtaan höyryverkkoon on käsitelty mallinnustutkimuksissa.

5.1 Biojalostamolle soveltuva SMR

Biojalostamolle soveltuvan pienydinreaktorin valintaa varten muodostettiin vertailutaulukko (Taulukko 2), jossa on kvalitatiivisesti vertailtu kolmea potentiaalista kevytvesireaktoria.

Taulukko 2. *Vertailumatriisi biojalostamon reaktorivalintaa varten*

	NPM	ACP100	KLT-40S
Biojalostamon lämpötilatarve	200 °C	200 °C	200 °C
Reaktorin höyryn lämpötila	316 °C	303 °C	316 °C
Vaadittu lämpöteho (vaihteluväli)	482–532 MW	482–532 MW	482–532 MW
Reaktorin lämpöteho	250 MW	385 MW	150 MW

Reaktorien lukumäärä jalostamolle	2 (1,93–2,13)	2 (1,25–1,38)	4 (3,21–3,55)
Valmius kaupalliseen käyttöön	Ei vielä rakenteilla	Käyttö alkamassa vuonna 2026	Käytössä vuodesta 2020
Soveltuvuus yhteistuotantoon	Suunniteltu sähkön ja lämmön yhteistuotantoon	Suunniteltu sähkön ja prosessilämmön yhteistuotantoon	Käytössä sähkön ja kaukolämmön yhteistuotannossa
Muuta huomioitavaa			Korkearikasteinen polttoaine

Työssä tarkasteltujen kriteerien pohjalta venäläinen KLT-40S rajautuu pois pääasiassa sen käyttämän korkearikasteisen polttoaineen vuoksi. Vaikka reaktoria voitaisiin käyttää tavanomaisella matalarikasteisella polttoaineella, vaihtaen polttoainesauvoja useammin kuin nykyisellään on suunniteltu, jää epävarmuustekijänä jäljelle valmistusmaata vastaan asetetut talouspakotteet.

Ensimmäinen kiinalainen ACP100 on pian käytössä. ACP100 voi tuottaa 385 MWt höyryä 290 °C lämpötilassa, eli yksi reaktori on työssä käsitellyn biojalostamon energiatarpeisiin nähden hieman alimitoitettu ja kahden reaktorin rakentaminen on liian ylimitoitettua. ACP-100 reaktoria voidaan todennäköisesti käyttää myös maksimitehoa alhaisemmalla tasolla, mutta asian tarkempi tarkastelu jää tämän työn laajuuden ulkopuolelle. Soveltuvan tukikattilan (kuorikattila, jossa poltetaan lisäksi hakkuutähteitä) kanssa ACP100 voisi soveltua työssä tarkastellulle tehtaalle.

Potentiaalisin reaktorivaihtoehto tämän työn puitteissa on NuScale NPM. Reaktorin yhdistämistä sellutehtaalle on tutkittu jo aikaisemmin, eikä tutkimuksessa havaittu mitään estävää tekijää NPM:n yhdistämiseen sellutehtaan höyryverkkoon. Mitoitusmielessä kaksi reaktoria voisi sopia kuvaillun biojalostamon tarpeisiin juuri sopivasti. Tehontarpeen hetkittäistä tai kausittaista vaihtelua voidaan tarvittaessa hallita lämpöakulla, ostosähköllä tai em. tukikattilan avulla.

5.2 DME:n tuotantopotentiali mustalipeästä kaasuttamalla

Kirjallisuuskatsauksen perusteella mustalipeää tuotetaan n. 21 GJ sellutonna kohden. Mustalipeän energiasisällöstä saadaan tutkimusten mukaan 48–63 % biojalostamolta

ulos DME-biopolttoaineena. Näin ollen biopolttoaineiden tuotantopotentiaali on keskimäärin 10,08–13,23 GJ/ADt, kun mustalipeä muutetaan kokonaan biopolttoaineiksi.

Luvussa 4.1 kuvailtu Chemrec-teknologiaa käyttävä 2000 ADt/d biojalostamo tuottaa 8,25 PJ DME:tä vuodessa. Polttoaineen tuottamiseksi biojalostamolle hankittiin lisäenergiaa n. 100 MWe ja 150 MWt teholla. Vuoden aikana tarvitaan n. 840 GWh sähköä ja 1,26 TWh lämpöä.

Jos kaikki mustalipeä muutettaisiin DME:ksi edellä mainitulla hyötysuhdevälillä, biopolttoaineita tuotettaisiin 67,82–88,96 PJ. Näin ollen Suomen sellutehtaiden yhteenlaskettu mustalipeän tuotanto pystyisi biopolttoaineiksi muutettuna syrjäyttämään 73–96 % eli lähes kaiken vuosittaisesta (2024: 92,6 PJ) dieselin kulutuksesta Suomessa.

Jos DME:n tuotantopotentiaalin vaihteluvälin korkeampi lukema (88,96 PJ) jaetaan yhden jalostamon tuotannolla (8,25 PJ) ja edeltävän kappaleen SMR-tarvelaskennan perusteella kerrotaan saatu tulos kahdella reaktorilla jalostamoa kohden, voidaan karkeasti arvioida, että kokonaisuudessaan Suomalainen selluteollisuus voisi tarvita 22 NuScale Power Module -pienydinreaktoria.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Työn tavoitteena oli tutkia, millä edellytyksin pienydinreaktoreja voidaan hyödyntää sellutehtaalla. Soodakattilan kaksoisroolin vuoksi tehtaan energiatarpeista huolehtimisen lisäksi esiteltiin myös vaihtoehtoinen tapa keittokemikaalien regeneroimiseen. Sellutehtaan muuttuessa liikennepolttoaineita tuottavaksi biojalostamoksi laskettiin myös teoreettinen potentiaali biopolttoainetuotannolle.

Keittokemikaalien regenerointi voidaan soodakattilan sijaan ratkaista kaasuttamalla mustalipeä. Kaasutus mahdollistaa myös erilaisten biopolttoaineiden tuotannon synteesikaasusta. Prosessia on tutkittu paljon ja testattu pohjoismaisella sulfaattisellutehtaalla useiden vuosien ajan. Mustalipeän kaasutus ja dimetyylieetterin tuotanto on tekniseltä valmiusasteeltaan kaupallisesti valmista käytettäväksi.

Työssä esiteltiin kolme varteenotettavaa reaktorivaihtoehtoa biojalostamolle. Yhdysvaltalainen NuScale Power Module (NPM), kiinalainen ACP100 ja venäläinen KLT-40S ovat nyt tai pian kaupallisesti saatavilla olevia kevytvesireaktoreita. Niiden tuottaman höyryn lämpötila riittää hyvin biojalostamon käyttötarpeisiin. Kaksi NPM-reaktoria sopivat työssä kuvailun, 2000 tonnia sellua päivässä tuottavan biojalostamon energiataseeseen erinomaisesti.

Keskimääräinen BLGMF-biojalostamo voisi tuottaa n. 700 000 tonnia sellua ja 8,25 PJ DME:tä vuodessa. Tämä määrä voisi korvata n. 9 % tieliikenteen vuotuisesta dieselöljyn kulutuksesta Suomessa. Suomen vuotuinen mustalipeän tuotanto pystyisi biopolttoaineeksi muutettuna korvaamaan dieselöljyn kulutuksen lähes kokonaan.

Työn tilaajan tavoitteena oli tutkia pienydinvoimaloille potentiaalisia käyttökohteita. Think Atom halusi tutkia erityisesti Suomessa merkittävästi energiaa käyttävää selluteollisuutta ja tarkastella Suomen energijärjestelmää kokonaisuutena, tavoitteena vähentää polttamista ja kasvihuonepäästöjä. Työssä tuotiin esille, että biojalostamon ja pienydinreaktorien yhdistäminen on mahdollista ja biopolttoaineiden tuotantopotentiaali selluteollisuuden sivuvirroista on merkittävä mahdollisuus Suomessa.

Tutkimuksen rajoitteet ovat se, että pienydinreaktoreita ei ole tällä hetkellä käytössä pelkästään teollisuushöyryn tuotannossa. Siksi lisensointi, turvallisuusratkaisut, käyttökokemukset ja käytön myötä kerätty data puuttuvat ja joudutaan tarkastelemaan prosesseja teoreettisesti. Työn laajuuden puitteissa jouduttiin hyödyntämään laajasti Ekbon ym. raporttia (Ekbon ym., 2003) biojalostamon energiataselaskennassa, mikä voi vaikuttaa työn luotettavuuteen.

Työssä esiteltyt peruseriaatteet pienydinreaktorin yhdistämisestä sellutehtaalle pitävät kuitenkin paikkansa. Mikäli työn tuloksia haluttaisiin soveltaa käytäntöön, tulisi joka tapauksessa tehdä merkittävä määrä työtä prosessien sovittamiseksi ja sen myötä reaktorin mitoittamiseksi.

Seuraavaksi pitäisi tutkia, miten keittokemikaalien regenerointi toimii täysikokoisella laitoksella ilman soodakattilaa. Olisi eduksi mustalipeän kaasutusteknologian kehitykselle rakentaa lisää pilottilaitoksia, jossa keittokemikaalit regeneroidaan edes osittain kaasutuksen avulla. Vaihtoehtoisesti voitaisiin tutkia, pystytäänkö keittokemikaaleja vaihtamalla pääsemään eroon lipeäkierron vaatimasta polttamisesta.

Työssä ei tarkasteltu kuvaillun laitoksen taloudellista kannattavuutta. Taloudellisesti mielenkiintoista olisi tarkastella karkea kustannusarvio ehdotettujen prosessimuutosten vaatimille laitteille ja verrata sitä soodakattilan investointi- ja käyttökustannuksiin. Regulaation puolesta pitäisi tutkia, salliiko ydinreaktoreita säätelevä lainsäädäntö reaktorin rakentamisen tehdasympäristöön, tai kohtuullisen etäisyyden päähän tehtaasta. Pienydinvoimalan rakentaminen on valtava prosessi, mutta ensimmäisen reaktorin jälkeen rakentamisessa voidaan saavuttaa säästöjä oppimisen ja toistettavuuden myötä.

LÄHTEET

- Bajpai, P. (Toim.). (2013). *Biorefinery in the Pulp and Paper Industry* (s. i–iii). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409508-3.00006-7>
- Consonni, S., Katofsky, R. E., & Larson, E. D. (2009). A gasification-based biorefinery for the pulp and paper industry. *Chemical Engineering Research and Design*, 87(9), 1293–1317. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2009.07.017>
- DePavia, L. (2025, helmikuuta 25). *NuScale Small Modular Reactor Integration for Hydrogen and Ammonia Production*. Office of Technology, NuScale Power.
- Ekbom, T., Lindblom, M., Berglin, N., & Ahlvik, P. (2003). *Technical and Commercial Feasibility Study of Black Liquor Gasification with Methanol/DME Production as Motor Fuels for Automotive Uses—BLGMF*. 293.
- Energiavirasto. (2023). *Energiaviraston voimalaitosrekisteri* [Dataset]. <https://energiavirasto.fi/toimitusvarmuus>
- Herlevi, L.-M. (2018). *SELLUTEOLLISUUDEN BIOTUOTTEET JA VENTTIILIEN SOVELTUVUUS TIETYILLE BIOJALOSTUSPROSESSEILLE*. 108.
- IAEA. (2017). *Opportunities for cogeneration with nuclear energy*. International Atomic Energy Agency.
- IAEA. (2025, kesäkuuta). *Small Modular Reactors Catalogue 2024*. IAEA. https://aris.iaea.org/publications/SMR_Catalogue_2024.pdf
- International Atomic Energy Agency. (2025). *Nuclear Technology Review 2025* ((GC(69)/INF/9)). International Atomic Energy Agency. <https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc69-inf9.pdf>
- KKG. (2011). *Technology and Operation: Gösgen nuclear power plant*. Kernkraftwerk Gösgen-Däniken AG.
- Landälv, I., Gebart, R., Marke, B., Granberg, F., Furusjö, E., Löwnertz, P., Öhrman, O. G. W., Sørensen, E. L., & Salomonsson, P. (2014). Two years experience of the

- BioDME project—A complete wood to wheel concept. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33(3), 744–750. <https://doi.org/10.1002/ep.11993>
- Landälv, I., & Rudberg, J. (2020). *Chemrec / Halder-Topsoe / Volvo Bio-DME initiatives (Sweden)* (Success Stories of Advanced Biofuels for Transport).
- Liikenteen biopolttoaineet ja bioöljyt.* (ei pvm.). Maa- ja metsätalousministeriö. Noudettu 5. helmikuuta 2022, osoitteesta <https://mmm.fi/metsat/puun-kaytto/puun-energiakaytto/liikenteen-biopolttoaineet>
- Metsä Group. (2023, syyskuuta 20). *Metsä Group started up its Kemi bioproduct mill and paperboard mill* [Press Release]. Metsä Group. <https://www.metsa-group.com/news-and-publications/news/2023/metsa-group-started-up-its-kemi-bioproduct-mill-and-paperboard-mill/>
- Naqvi, M., Yan, J., & Dahlquist, E. (2010). Black liquor gasification integrated in pulp and paper mills: A critical review. *Bioresource Technology*, 101(21), 8001–8015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.05.013>
- Naqvi, M., Yan, J., & Fröling, M. (2010). Bio-refinery system of DME or CH₄ production from black liquor gasification in pulp mills. *Bioresource Technology*, 101(3), 937–944. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.086>
- NEA. (2024). *The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Second Edition*. OECD.
- NEA. (2025). *The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Third Edition*. Organisation de Coopération et de Développement Economiques. <https://doi.org/10.82155/NQZ2-HP44>
- Novotny, V., Sweeney, K., Worsham, E., Reyes Molina, E., Root, S., Joseck, F., Choi, B.-H., Popli, N., Kim, J., Knighton, T., & Saeed, R. (2024). *Thermal Integration of Advanced Nuclear Reactors with a Reference Refinery, Methanol Synthesis, and a Wood Pulp Plant (Rev.1)* (INL/RPT--24-76435-Rev001, 2480855; s. INL/RPT--24-76435-Rev001, 2480855). <https://doi.org/10.2172/2480855>
- OECD & NEA. (2022). *High-temperature Gas-cooled Reactors and Industrial Heat Applications*. OECD. <https://doi.org/10.1787/7406b814-en>

- Partanen, R. (2019). *Nuclear District Heating in Finland – The Demand, Supply and Emissions Reduction Potential of Heating Finland with Small Nuclear Reactors*.
https://thinkatomnet.files.wordpress.com/2019/04/nuclear-district-heating-in-finland_1-2_web.pdf
- Pettersson, K. (2011). *Black liquor gasification-based biorefineries: Determining factors for economic performance and CO₂ emission balances*. Chalmers University of Technology.
- Semelsberger, T. A., Borup, R. L., & Greene, H. L. (2006). Dimethyl ether (DME) as an alternative fuel. *Journal of Power Sources*, 156(2), 497–511.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.05.082>
- Suhr, M., Klein, G., Kourti, I., Rodrigo Gonzalo, M., Giner Santonja, G., Roudier, S., & Delgado Sancho, L. (2015). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control)* (Technical guidance LF-NA-27235-EN-N). Publications Office of the European Union.
<https://doi.org/10.2791/370629>
- Tikka, P. (Toim.). (2008). *Papermaking science and technology. Book 6, Chemical pulping. Part 2, Recovery of chemicals and energy* (2nd ed. totally updated version). Finnish Paper Engineers' Association : Paperi ja puu. <https://www.finna.fi/Record/uef.9913771533705966>
- Tilastokeskus. (2024). *Suomen virallinen tilasto (SVT): Sähkön ja lämmön tuotanto* (ISSN=1798-5072) [Dataset]. <https://stat.fi/tilasto/salatuo>
- Tilastokeskus. (2025). *Suomen virallinen tilasto (SVT): Energian hankinta ja kulutus* (ISSN=1799-795X) [Dataset]. <https://stat.fi/tilasto/ehk>
- Wilke, C., Lestelius, M., & Germgård, U. (2021). *Integrated Forest Biorefinery: A Proposed Pulp Mill of 2040* (2021:4; Karlstad University Studies). Karlstad University, Department of Engineering and Chemical Sciences (from 2013).

- Worsham, E. K., & Terry, S. D. (2022). Static and dynamic modeling of steam integration for a NuScale small modular reactor and pulp and paper mill coupling for carbon-neutral manufacturing. *Applied Energy*, 325, 119613. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119613>
- Xu, B. (2016, lokakuuta 18). *CNNC's ACP100 SMR: Technique Features and Progress in China*. 13th INPRO Dialogue Forum on Legal and Institutional Issues in the Global Deployment of Small Modular Reactors.