



Joel Honkanen

Höyryräjäytetyn biohiilipelletin koe- poltto kivihiilikattilassa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

30.1.2025

Tiivistelmä

Tekijä: Joel Honkanen
Otsikko: Höyryräjäytetyn biohiilipelletin koepoltto kivihiilikattilassa
Sivumäärä: 50 sivua + 2 liitettä
Aika: 30.1.2025

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine: Energiantuotantomenetelmät
Ohjaajat: Lehtori Tomi Hämäläinen

Opinnäytetyö käsittelee Vantaan Energia Oy:lla suoritettua biohiilen koepolttojaksoa, joka toteutettiin Martinlaakson voimalaitoksen MAR2-kivihiilikattilassa. Etelä-Suomen Aluehallintovirasto myönsi Vantaan Energialle ympäristöluvan biohiilen koeluontoista polttoa varten ja työssä käsiteltävä koepolttojakso suoritettiin maaliskuussa 2024. Koepolttojakson tavoitteena oli tutkia, voidaanko hiilipölypolttokattilan fossiilinen polttoaine korvata 100-prosenttisesti uusiutuvalla biohiilipelletillä niin, että hiilivoimalan laitosyksikkö ei vaatisi kalliita investointeja uuden polttoaineen käyttöön ottamiseksi.

Moni biohiilipellettivalmistaja toteaa pellettien soveltuvan suoraan pölypolttokattilaan hiilen ohella poltettavaksi tai korvaamaan kivihiilen polttoaineena täysin. Opinnäytetyössä tuodaan esille, kuinka höyryräjäytetty biohiilipelletti toimi kivihiilen sijasta sähkön ja lämmön tuotannon polttoaineena hiilen polttamiseen suunnitellussa kattilassa. Työssä käsitellään biohiilipelletin käyttöönoton myötä esiintyneitä haasteita ja esittää johtopäätöksiä niiden soveltamiseksi.

Työ sisältää yleisluontoisen kirjallisuuskatsauksen biohiilituotteista. Katsauksessa perehdytään eri biohiilituotteisiin, niiden ominaisuuksiin, käyttökohteisiin ja valmistustekniikoihin. Työssä vertaillaan kivihiihtä ja biohiilipellettiä energiantuotannon polttoaineina ja katselmoidaan niiden taloudellista kannattavuutta sähkön- ja lämmöntuotannossa.

Työn tavoitteena oli tehdä koostelma suoritetusta koepolttojaksosta ja analysoida koetoimintajaksolta kerättyä dataa, jota olisi mahdollisesti voitu hyödyntää seuraavassa lämmityskauden 2024–2025 koepolttojaksossa. Vantaan Energia Oy ilmoitti kuitenkin päättävänsä biohiilipelletin koepolton keväällä 2024 suoritettuun jaksoon johtuen pelletin toimivuuden epävarmuudesta sekä merkittävistä investointitarpeista uuden polttoaineen käyttöön ottamiseksi. Koepolttojaksolta kerätyn datan perusteella tehtiin johtopäätöksiä koetoimintajakson onnistumisesta sekä käytetyn höyryräjäytetyn biohiilipelletin soveltuvuudesta MAR2-hiilikattilan polttoaineeksi sekä yleisesti pölypolttokattiloihin.

Avainsanat: biohiili, pelletti, kivihiili, koepoltto, ympäristöluva

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Joel Honkanen
Title: Trial combustion of steam-exploded biocoal pellets in a coal-fired boiler
Number of Pages: 50 pages + 2 appendices
Date: 30 January 2025

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Energy and environmental engineering
Professional Major: Energy Production Technologies
Supervisors: Tomi Hämäläinen, Senior Lecturer

The thesis examines a trial combustion period conducted at Vantaan Energia Oy, where biocoal pellets were tested in MAR2 coal-fired boiler at the Martinlaakso power plant. The Regional State Administrative Agency for Southern Finland granted Vantaan Energia an environmental permit to perform experimental combustion of biocoal, and the trial period was carried out in March 2024. The objective of the trial was to evaluate whether the fossil fuel used in a pulverized coal boiler could be entirely replaced with 100 % renewable biocoal pellets without necessitating significant investments to adapt the plant unit for the new fuel.

Many biochar pellet manufacturers claim that their pellets are compatible with pulverized coal boilers, either as a co-firing fuel alongside coal or as a full replacement for coal. This thesis explores how steam-exploded biocoal pellets performed as a fuel substitute for coal in producing electricity and heat within a boiler originally designed for coal combustion. The work addresses challenges encountered during the introduction of biocoal pellets and provides conclusions regarding their applicability.

The thesis includes a general literature review of bio-based coal products. The review focuses on different types of products, their properties, applications, and production technologies. The study compares coal and biocoal pellets as fuels for energy production and assesses their economic feasibility for electricity and heat generation.

The objective of this thesis was to compile a summary of the completed trial combustion period and analyze the data collected during the trial combustion, which could potentially have been utilized in the subsequent trial combustion phase planned for the 2024–2025 heating season. However, Vantaan Energia Oy later announced its decision to conclude experiments with the trial period conducted in spring 2024. This decision was attributed to uncertainties regarding the pellet's performance and the significant investments required to implement the new fuel. Based on the data collected, conclusions were drawn regarding the success of the trial and the suitability of steam-exploded biocoal pellets as fuel for the MAR2 coal boiler, as well as its general applicability for pulverized coal boilers.

Keywords: Biocoal, Pellet, Coal, Trial combustion, Environmental permit

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Vantaan Energia Oy	2
2.1	Konserni	2
2.2	Martinlaakson voimalaitos	4
2.3	MAR2 kivihiilikattila ja rikinpoistolaitos	6
3	Biohiili	9
3.1	Biohiilituotteiden ominaisuudet ja käyttökohteet	10
3.1.1	Biohiili	10
3.1.2	Biohiilipelletti	11
3.2	Biohiilen valmistus	12
3.2.1	Pyrolyysi	13
3.2.2	Torrefiointi	14
3.2.3	Höyryräjäytys	17
3.3	Biohiilipelletit kivihiilen korvaajana	18
3.3.1	Hiilen ja biohiilipelletin kustannukset	19
3.3.2	Biohiilipelletin kehittyvät markkinat	21
3.4	Koetoimintajaksolla käytetty biohiili	23
4	Koetoimintajakso	23
4.1	Koetoiminnan tarkoitus ja tavoite	23
4.2	Esivalmistelut koetoimintaa varten	24
4.2.1	Biohiilen koejauhatus	24
4.2.2	Hiilimyllyn kantoilma	25
4.2.3	Tuotantoyksikön muutostyöt	27
4.3	Koetoimintajakson toteutus	28
5	Koepolttojakson datan analysointi	29
5.1	Biohiilen varastointi ja kuljetus	29
5.2	Biohiilen jauhautuminen kivihiilimyllyissä	30
5.3	Biohiilen palaminen kattilassa	31
5.4	Koetoiminnan aikaiset polttoainesuhteet	32

5.5	Vaikutukset savukaasupitoisuuksiin	33
5.6	Vaikutukset rikinpoistolaitoksen toimintaan	36
5.7	Näytteidenotto	36
5.7.1	Biohiilipölynäytteet	36
5.7.2	Palamattoman polttoaineen näytteet	37
5.7.3	Muut näytteet	38
6	BL2-tuotantoyksikön tulipalo	39
7	Johtopäätökset	41
	Lähteet	44
	Liitteet	
	Liite 1: Hiilimyllyn kantoilma	
	Liite 2: Biohiilipölyn karkeusanalyysit	

Lyhenteet

BFB:	Bubbling fluidized bed boiler. Leijupetikattila. Kattilatyyppeä.
BL1:	Martinlaakson voimalaitoksen 1. laitosyksikkö. Biokattilalaitos.
BL2:	Martinlaakson voimalaitoksen 2. laitosyksikkö. Hiilikattilalaitos.
BL4:	Martinlaakson voimalaitoksen 4. laitosyksikkö. Kaasuturbiini ja lämmöntalteenottokattila.
CHP:	Combined Heat and Power. Lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitos.
Eko:	Ekonomaiseri. Kattilaveden esilämmitin.
GWh:	Gigawattitunti. Energian yksikkö.
HM:	Hiilimylly. Polttoaineen jauhatin.
LUVO:	Luftvorwärmer. Palamisilman esilämmitin.
MJ:	Megajoule. Energian yksikkö.
MPa:	Megapascal. Paineen yksikkö.
MW:	Megawatti. Energian yksikkö.
MWh:	Megawattitunti. Energian yksikkö.
Nm ³ :	Normikuutiometri. Tilavuuden yksikkö NTP-olosuhteissa.
mbar:	Millibaari. Paineen yksikkö.

1 Johdanto

Nopeasti kehittyvässä maailmassa hiilen käyttö on suurin ihmisen aiheuttama hiilidioksidipäästöjen lähde ilmakehään. Sen ympäristövaikutukset ulottuvat laajalle alueelle, kuten ilmakehän saastumiseen, veden ja jätteiden käsittelyyn sekä lisääntyneeseen maankäyttöön. [1.] Hiilen louhinta ja sen käyttäminen polttoaineena aiheuttaa merkittäviä ympäristö- ja terveyshaittoja. Yksi hiilen käytön vakavimmista pitkän aikavälin vaikutuksista on ilmaston lämpenemistä ja ilmastonmuutosta kiihdyttävä vaikutus. Hiilen polttamisesta syntyvä hiilidioksidi (CO_2) on kasvihuonekaasu, joka absorboi maan heijastamaa lämpösäteilyä ilmakehään. [2.] Ilmakehän lämpeneminen aiheuttaa mm. vakavan kuivuuden ja metsäpalojen riskiä, merenpinnan nousua ja tulvien pahentumista, äärimmäisten sääilmiöiden voimistumista sekä johtaa kasvi- ja eläinlajien katoon nopeasti muuttuvien ilmastollisten olosuhteiden vuoksi. [3.]

Hiilen polttamisesta vapautuu hiilidioksidin lisäksi myös muita haitallisia ilmaansaasteita ja epäpuhtauksia, kuten rikkioksideja (SO_x), typen oksideja (NO_x), hiukkas-, elohopea- ja lyijypäästöjä. Rikin- ja typen oksidit muodostavat ilmakehässä happamia yhdisteitä, jotka laskeutuvat maahan happosateina. Happosateet vahingoittavat metsiä, vesistöjä ja maaperää, mikä heikentää biodiversiteettiä ja vahingoittaa ekosysteemejä. Pienhiukkaspäästöt ($\text{PM}_{2.5}$) aiheuttavat vakavia terveysongelmia, kuten sydän- ja keuhkosairauksia sekä syöpää. Hiukkas-päästöt lisäävät ennenaikaisten kuolemien riskiä erityisesti kaupunki- ja teollisuusalueilla, missä ilmanlaatu on yleisesti heikompi. [2.] Hiilen avolouhintaa toteutetaan vuoristojen huippuja räjäyttämällä. Vuorten räjäyttäminen on hyvin ympäristöä kuluttavaa ja maisemointia tuhoavaa. Räjäytetyllä maa-aineella täytetään läheisiä laaksoja, ja ne peittävät sekä saastuttavat vuoristossa virtaavia jokia ja puroja. [4.] Kaivoslouhinnan terveyshaitat koskettavat erityisesti kaivos-työläisiä. Hiilikaivosten vaaralliset olosuhteet aiheuttavat työläisille vakavia hengitystiesairauksia, kuulovaurioita sekä kuolemaan johtavien onnettomuuksien riskiä. [2.]

Hiili on pitkään toiminut keskeisenä energianlähteenä monille teollisuuden aloille sen kustannustehokkuuden, korkean energiasisällön ja paikoin myös realistisen saatavuuden vuoksi, erityisesti kehittyvissä maissa. [5.] Hiilen käyttöön ja kaivostoimintaan liittyvät ympäristövaikutukset ovat kuitenkin ajan myötä nousseet kansainväliseksi huolenaiheeksi. Haittavaikutuksia on ryhdytty lieventämään tiukemmalla ympäristölainsäädännöllä sekä hiilelle vaihtoehtoisten sekä ympäristöystävällisempien polttoaineiden kehityksellä ja käyttöönotolla.

Vantaan Energia Oy on ilmoittanut tuottavansa fossiilitonta energiaa vuoteen 2026 mennessä. Ilmastolupauksen saavuttamiseksi Martinlaakson voimalaitoksella tutkittiin mahdollisuutta korvata hiilikattilan fossiilinen polttoaine uusiutuvalla biohiilellä. Etelä-Suomen Aluehallintovirasto myönsi Vantaan Energialle ympäristöluvan biohiilen koeluontoista polttoa varten lämmityskausille 2023–2024 ja 2024–2025. Työn tavoitteena oli tehdä koostelma maaliskuussa 2024 toteutetusta biohiilen koepolttojaksosta ja analysoida jakson aikana kerättyä dataa. Datan pohjalta tehtiin johtopäätöksiä koetoimintajaksolla käytetyn höyryräjätetyn biohiilipelletin soveltuvuudesta MAR2-hiilikattilan polttoaineeksi.

Työ sisältää myös yleisluontoisen kirjallisuuskatsauksen eri biohiilituotteista, niiden ominaisuuksista, käyttökohteista, valmistustekniikoista sekä markkinoista. Työn toimeksiantajana toimi Vantaan Energia Oy, ja työ toteutettiin Metropolia Ammattikorkeakoululle.

2 Vantaan Energia Oy

2.1 Konserni

Vantaan Energia Oy on yksi Suomen suurimpia kaupunkienergiayhtiöitä, joka tarjoaa sähkön ja lämmöntuotannon lisäksi energia- ja kiertotalouspalveluita asiakkailleen. Vantaan Energia -konserni muodostuu sen emoyhtiöstä Vantaan Energia Oy sekä tytäryhtiöstä Vantaan Energia Sähköverkot Oy. Tytäryhtiö vastaa sähköverkkotoiminnasta ja ylläpidosta Vantaalla. Vantaan Energia Oy on Vantaan kaupungin (60 %) ja Helsingin kaupungin (40 %) yhteisomistuksessa.

Vuosi 2023 oli Vantaan Energian 113. toimintavuosi. Vuonna 2023 konsernin liikevaihto oli 303,1 miljoonaa euroa ja liikevoittoa kertyi 26,1 % (65,7 milj. €). Vantaan Energia Oy:n palveluksessa työskenteli vuonna 2023 noin 350 energia-alan ammattilaista. [6, s. 23–27.]

Vantaan Energialla on kolme energiantuotannon päätoimipistettä: Jätevoimala Uusiolan alueella, Martinlaakson voimalaitos sekä Tuusulanjärven lämpö Järvenpäässä. Voimalaitoksen lisäksi yhtiöllä on 5 lämpökeskusta, jotka turvaavat lämmönjakelun lämpöverkon välityksellä. [7.] Vuonna 2023 Vantaan Energia tuotti sähköä 1247 GWh sekä kaukolämpöä 1985 GWh. Kaikki Vantaan alueella sijaitsevat kiinteistöt ovat liittyneet Vantaan Energian sähköverkkoon, ja n. 90 % Vantaalla sijaitsevista kiinteistöistä on yhtiön lämmittämiä. [6, s. 4.]

Vantaan Energian visio on olla hiilinegatiivinen energiantuotantoyhtiö vuoteen 2030 mennessä. Yhtiön strategia keskittyy kestävään kehitykseen ja energiatehokkuuteen, pyrkien mm. luopumaan fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Fossilivapaa 2026 -projekti on edennyt mm. Jätevoimalan laajennuksen, maailman suurimman lämmön kausivaraston (Varanto) ja hukkalämmön talteenoton edistämisen myötä. Vuonna 2022 suoritettu Jätevoimalan laajennus on mahdollistanut energiantuotannon kierrätykseen kelpaamattomilla kaupan ja teollisuuden energiajätteillä. Jätteiden energiahyötykäytön myötä kasvanut tuotantokapasiteetti mahdollistaa Martinlaakson hiilikattilan käytöstä luopumisen. [8.] Varanto on rakenteilla oleva maanalainen lämpöenergian kausivarasto, jonka tilavuus on n. 1 100 000 m³ ja lämpökapasiteetti on 90 GWh. Kyseinen lämpökapasiteetti riittäisi lämmittämään keskikokoista suomalaista kaupunkia tai kuntaa vuoden ajan. Varanto mahdollistaa energian varastoinnin kesäaikaan uusiutuvista energianlähteistä lämmitystarpeen ollessa alhaisempi. Esimerkiksi aurinko- ja tuuli-voimasta sekä hukkalämmöstä talteen otettu energia voidaan hyödyntää talvikaudella lämmöntarpeen ollessa suurempi. [9.] Lisäksi Vantaan Energia edistää hanketta, jossa Vantaan Viinikkalassa sijaitsevalta KWH Freeze -pakkasvarastolta syntyvä hukkalämpö hyödynnettäisiin Vantaan kaukolämpöverkossa. Hukkalämpö on peräisin varaston jäädytyksen lauhdejärjestelmästä. Talteen

otetun hukkalämmön arvioidaan vuosittaisella tasolla olevan jopa 42 GWh, joka vastaa 2 300 keskimääräisen omakotitalon vuosittaista kulutusta. [10.]

2.2 Martinlaakson voimalaitos

Vantaan Energian Martinlaakson voimalaitos (kuva 1) on vuonna 1975 valmistunut CHP-laitos (Combined Heat and Power). Kyseessä on yhdistetty kaukolämmön ja sähkön tuotantolaitos. Voimalaitoksen yhteenlaskettu lämpöteho on noin 335 MW ja sähköteho 208 MW. [7.] Martinlaakson voimalaitoksella sähköä ja lämpöä tuotetaan kolmessa eri tuotantoyksikössä, jotka on nimetty blokeiksi.



Kuva 1. Ilmakuva Vantaan Energian Martinlaakson CHP-voimalaitoksesta. [11.]

Blokki 1 (BL1) on vuonna 2019 käyttöön otettu biokattilalaitos, jossa polttoaineena käytetään pääasiassa kotimaista puuhaketta, kierrätyspuuta ja sahanpurua. Biokattila on BFB (bubbling fluidized bed) leijupetitattila, jossa puuaines poltetaan n. 750–850-celsiusasteisen kuplivan hiekkapedin seassa. Kattilan pohjassa olevan arinatason päällä on noin 0,5 m korkea hiekkapeti, jonka kupliminen aiheutetaan esilämmitettyä palamisilmaa syöttämällä kattilan

pohjatasosta hiekkapedin lävitse. [12.] Hiekkapedin suuri lämpökapasiteetti kompensoi tulipesän lämmönheilahteluja ja polttomenetelmä soveltuu epätasa-laatuisen ja kostean polttoaineen polttoon sen viipymääjan vuoksi tulipesässä [13, s. 12–13]. Biokattilan polttoaineteho on 140 MW, mistä kaukolämpötehoksi tuotetaan noin 100 MW ja sähkötehoksi 35 MW [7]. Kyseisellä kattilalla on aikaisemmin käytetty polttoaineena maakaasua ja polttoöljyä, mutta fossiilisten polttoaineiden käytön vähentämiseksi kattila muunnettiin biopolttoaineille soveltuvaaksi vuonna 2018. [14.]

Blokki 2 (BL2) on vuonna 1983 käyttöön otettu hiilikattilalaitos, jossa polttoaineena käytetään kivihiiltä. Hiilikattilan polttoaineteho on noin 230 MW, josta kaukolämpötehoksi tuotetaan 135 MW ja sähkötehoksi 80 MW. Vantaan Energiassa kivihiilen käytöstä oltiin luopumassa jo vuonna 2020 ja hiilikattilan tuotannon lopettamisesta päätettiin vuonna 2022. Venäjän ja Ukrainan välisen konfliktin myötä aiheutuneen energiakriisin vuoksi BL2 jäi toistaiseksi huoltovarmuuskäyttöön. [7.] Suomi on sitoutunut kansallisen energia- ja ilmastostrategian toimeenpanona täyttämään EU:n ilmastotavoitteet vuoteen 2030 mennessä. Osana toimeenpanoa päätettiin kivihiilen käytön kieltämisestä sähkön ja lämmön tuotannon polttoaineena. Kivihiilen polton kieltävä laki astuu voimaan 1. toukokuuta 2029. [15.] Merkittävä osa kotimaisista energiantuotantoyhtiöistä on kuitenkin jo luopunut tai ottanut tavoitteeksi luopua kivihiilen käytöstä polttoaineena lähitulevaisuudessa. Opinnäytetyössä käsiteltävä biohiilen koepoltto suoritettiin kyseisellä hiilikattilalaitoksella.

Blokki 4 (BL4) on vuonna 1994 käyttöönotettu kaasuturbiinilaitos, ja se sisältää kaasuturbiinin lisäksi savukaasujen lämmöntalteenottokattilan. Tuotantoyksikön pääpolttoaineena toimii maakaasu. Kaasuturbiinin sähköteho on 58 MW ja lämmöntalteenottokattilalla lämpötehoa on 100 MW sekä sähkötehoa n. 35 MW. [7.] BL4:ää käytetään pääosin tasaamaan talven kulutushuippuja, ja sen käyttöaste on edeltävillä lämmityskausilla ollut huomattavasti laitoksen muita tuotantoyksiköitä alhaisempi johtuen vihreästä siirtymästä sekä maakaasun korkeasta markkinahinnasta.

Voimalaitoksen kiinteistöllä on tilavuudeltaan 20 000 m³:n kokoinen kaukolämpöakku. Akun lämpökapasiteetti on 750 MWh, mikä vastaa noin 40 keskimääräisen omakotitalon lämmityksen vuosikulutusta. Kaukolämpöakun purku- ja latausteho on 60 MW. [7.] Kaukolämpöakku toimii lämminvesivaraajana, jossa kaukolämpövedtä säilytetään puskurivarastossa. Kaukolämpöveden varastointi lisää tuotannon joustavuutta ja tasaa kaukolämpöveden kulutushuippuja.

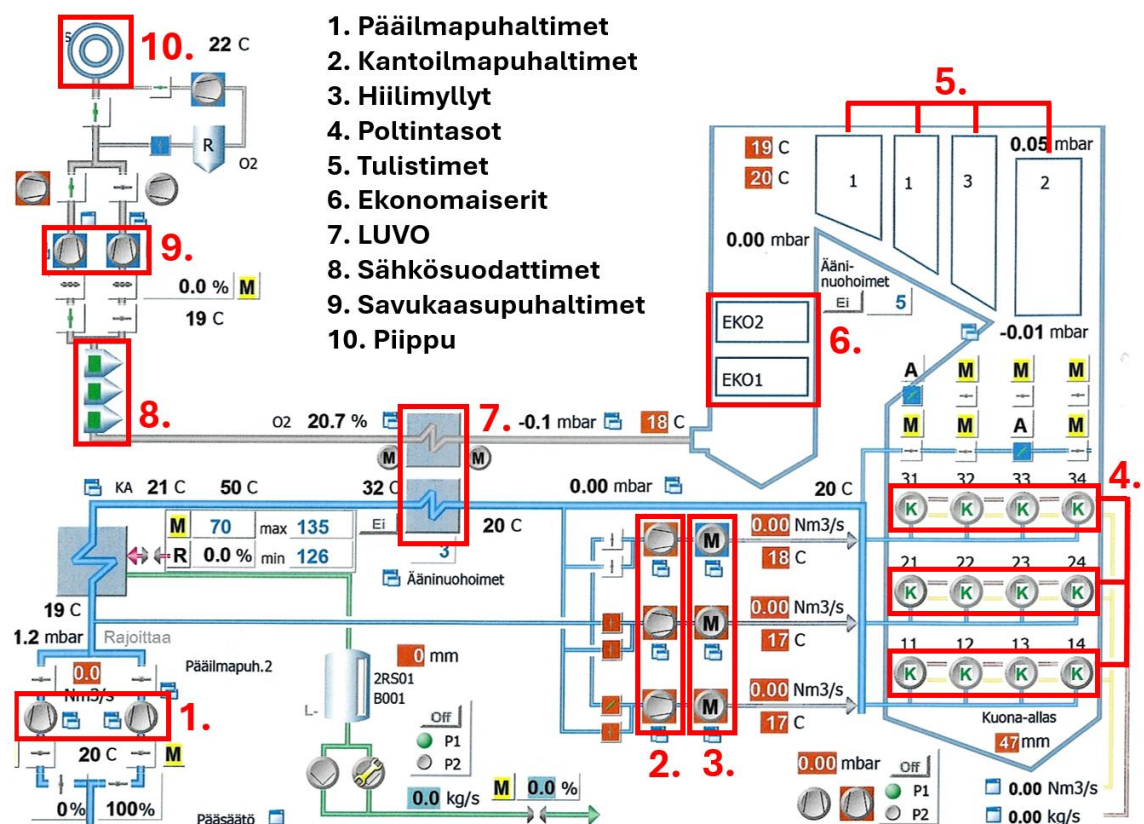
2.3 MAR2 kivihiilikattila ja rikinpoistolaitos

BL2-tuotantoyksikön kattila (MAR2) on nurkkapolttainen hiilipölykattila, jossa polttoaineena voidaan kivihiilen lisäksi käyttää myös maakaasua. Maakaasua käytetään kuitenkin lähtökohtaisesti kattilan esilämmitykseen käynnistysvaiheessa sekä toimimaan tukitulena alhaisilla polttoainetehoilla. Kattilassa on kolme erillistä poltintasoja, ja kullakin poltintasolla on neljä poltinnurkkaa. Jokaisessa poltinnurkassa on myös oma maakaasupoltin.

Kattilalaitoksella on kolme erillistä hiilimyllyä, ja jokaisella myllyllä on oma kantoilmapuhallin. Myllyissä karkea kivihiili jauhetaan hiilipölyksi ja se ohjataan hiilipölyputkia pitkin kantoilman avulla omalle poltintasolle. Toisin sanoen kustakin hiilimyllystä jauhettu hiilipöly jakautuu yhden poltintason neljään poltinnurkkaan. Poltinnurkasta kattilaan puhallettu hiilipöly syttyy palamaan tulipesän korkean lämpötilan vaikutuksesta. Kivihiilen palamisesta vapautuva lämpöenergia höyrystää kattilaputkissa olevan veden, joka nousee kattilan yläosassa sijaitsevaan lieriöön. Lieriössä nestefaasi ja höyry erottuvat toisistaan. Kylläinen vesi joutuu uudelleen kattilan höyrystinputkiin ja höyry ohjataan tulistimille. Tulistimilla höyry tulistetaan nostamalla voimakkaasti sen lämpötilaa savukaasujen avulla.

Palamisesta syntyneet savukaasut ohjataan tulistintasojen kautta kattilan takavedossa sijaitsevalle kattilaveden esilämmittimille (Eko). Ekolta savukaasut ohjataan kattilasta ulos erilliseen savukaasukanavaan. Savukaasu- ja pääilmakanavan väliin on rakennettu regeneratiivinen lämmöntalteenottolaite (LUVO). Savukaasujen lämpöenergia hyödynnetään siis turbiinille menevän höyryn

tulistamiseksi sekä kattilaveden ja palamisilman esilämmittämiseksi. Savukaasujen mukana kulkeutuva lentotuhka erotetaan sähkösuodattimilla, ennen kuin savukaasut ohjataan erilliselle rikinpoistolaitokselle. Sähkösuodattimissa on korkean jännitteen elektrodit, jotka luovat voimakkaan sähkökentän suodattimen sisälle ja ionisoivat kaasuvirran mukana kulkeutuneet hiukkaset. Ionisaatio tuottaa hiukkasille sähkövarauksen, ja sähkökentän vaikutuksesta ne tarttuvat vastakkaisesti varautuneisiin keräyslevyihin. [16.] Keräyslevyiltä savukaasujen mukana kulkeutunut tuhka ravistellaan suodattimen alaosassa sijaitseviin lentotuhkasiiloihin. BL2-tuotantoyksikön prosessikaavio ja laitteisto esitely kuvassa 2.



Kuva 2. BL2:n prosessikaavio. Rikinpoistolaitos sijaitsee savukaasupuhaltimien ja piipun välissä.

Savukaasut käyvät vielä erillisen puhdistusprosessin rikinpoistolaitoksella, ennen kuin ne johdetaan piipusta ilmakehään. Rikinpoistoprosessi on puolikuiva rikinpoistomenetelmä. Rikinpoistolaitoksella savukaasut ohjataan ensiksi reaktoriin, jonka yläosassa on keskipakovoimaan perustuva sumutinlaite.

Sumuttimen pyörivistä suuttimista savukaasuihin sumutetaan pieninä pisaroina nestemäistä kalkkiliettä, joka on vesi-kalsiumhydroksidiseosta. Seoksen kalsiumhydroksidi valmistetaan poltetusta kalkista (CaO) sammuttamalla se makealla vedellä kalsiumhydroksidiksi, jota kutsutaan myös puhtaaksi kalkiksi. Puhdas kalkki laimennetaan kalkkilietteellä ennen savukaasuihin sumuttamista. Reaktorissa savukaasun kaikki happamat kaasukomponentit reagoivan kalkin $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kanssa. Pääasiassa reagoivia kaasukomponentteja ovat rikkidioksidi (SO_2), rikkiatrioksidi (SO_3), kloorivety (HCl) ja fluorivety (HF). [17.] Esimerkiksi rikkidioksidin ja kalkin välinen reaktio tapahtuu yhtälön 1 mukaisesti:



Osa reaktorissa muodostuneista lopputuotteista putoaa reaktorin pohjalle, mutta suurin osa kulkeutuu pölymäisenä savukaasuvirran mukana jälkierottimena toimiville letkusuodattimille. Reaktorista poistuvat savukaasut sisältävät noin 20–30 g/Nm³ pölyä. Letkusuodattimilla savukaasuvirta ohjataan suodatinsukkien läpi, jotka keräävät valtaosan savukaasujen mukana kulkeutuneesta pölystä. Savukaasujen pölypitoisuus letkusuodattimien jälkeen on enää n. 5–20 mg/Nm³. [17.] Suodatinsukkien pinnalle kerääntynyt pöly irrotetaan jatkuvatoimisen paineilmasyklin avulla. Irrotettu pöly putoaa pudotussuppiloihin, joiden pölylähettimet jakavat pölyn kiertöpölysiiloihin tai lopputuotesiiloon [18]. Kiertöpölysiilojen tuote palautetaan takaisin prosessiin kalkkilietteen valmistamiseksi. Kiertöpölyn uudelleen hyödyntämisellä parannetaan rikinpoistoprosessin hyötysuhdetta ja kustannustehokkuutta. Lopputuotesiiloon kuljetetaan se osa lopputuotetta, joka ei mahdu kiertöpölysiiloihin. [17.] Rikinpoiston lopputuote toimitetaan asianmukaiseen käsittelyyn tai hyötykäyttöön jätehuoltosopimuskumppanille [19, s. 7].

Letkusuodattimien jälkeen savukaasut ohjataan piipun kautta ilmakehään. Savukaasujen lämpötila on korkeampi kuin moderneissa voimalaitoksissa, mikä yleisesti viittaa matalampaan kokonaishyötysuhteeseen. Savukaasujen lämpötila on kuitenkin pidettävä riittävän korkeana kastepisteen yläpuolella, etteivät

kaasujen happamat aineet ja kaasufaasissa oleva vesi tiivisty piipun seinämille aiheuttaen kastepistekorroosiota ja taloudellisia tappioita [20].

3 Biohiili

Biohiiliksi kutsutaan biomassoista tuotettuja hiilipitoisia kiinteitä aineita, jotka tarjoavat kehityspotentiaalia ympäristön parantamiseksi erilaisten tuotteiden ja sovellusten kautta. Biomassan prosessointi biohiileksi tuottaa ominaisuuksiltaan fossiilisen kivihiilen kaltaisen tuotteen, jolla on lukuisia käyttötarkoituksia eri teollisuuden aloilla. Biohiilituotteiden valmistusprosesseissa syntyy sivutuotteina ylijäämäenergiaa, pyrolyysiöljyä ja synteetikaasua, joilla on biohiilen lisäksi valtavasti käyttökohteita ja markkinapotentiaalia. Sivutuotteina syntyneiden tuotteiden markkinat saattavat tulevaisuudessa yltää jopa samalle tasolle kuin itse biohiilen. [21.]

Biohiilet ovat ryhmä erilaisia tuotteita, eikä yksi biohiilituote sovellu kaikkiin eri käyttötarkoituksiin niiden erilaisten ominaisuuksien vuoksi. Biohiilen ominaisuuksiin vaikuttavat erityisesti valmistustekniikka, käytetyt raaka-aineet, prosessointilämpötilat sekä tuotteen jälkikäsittely. [22.] Eri biohiilituotteista käytetään termejä, joilla viitataan tuotteen alkuperään ja käyttötarkoitukseen. Termillä biohiili (eng. biochar) viitataan biohiilituotteeseen, jota käytetään usein mm. maanparannusaineena, kasvualustana ja hulevesisuodatuksessa [21]. Termeillä biohiilipelletti (eng. biocoal) ja biohiilibriketti (biocarbon) viitataan puolestaan tuotteisiin, mitä voidaan käyttää esimerkiksi kivihiilen ohella tai puolesta hiili-intensivisillä teollisuuden aloilla. [23.] Kuvassa 3 on esitelty havainnollistavat tuotekuvat biohiilipelletistä ja biohiilestä.

BIOCOAL



BIOCHAR



Kuva 3. Tuotekuvia energiantuotantoon käytettävästä biohiilipelletistä sekä maataloudessa hyödynnettävästä biohiilestä. [23.]

Muita biohiilituotteita ovat esimerkiksi biohiilestä jatkokäsitelty aktiivihiihi ja HTC-biohiili. Biohiilet ovat verrattain uusi ja kehittyvä tuotannon ala. Uusia käyttökohteita löydetään jatkuvasti, minkä myötä syntyy uusia biohiilituotteita. Biohiiltä koskeva lainsäädäntö, standardointi ja sertifiointi on vielä jokseenkin kehitysvaiheessa, eikä sen vuoksi biohiilelle ole vielä olemassa selkeää määritelmää. Biohiilen määritelmän odotetaan selkeytyvän lähitulevaisuudessa. [21.]

3.1 Biohiilituotteiden ominaisuudet ja käyttökohteet

Biohiilituotteiden käyttökohteiden ja sovellusten kirjo on erittäin laaja. Yleisesti maanparannusaineena tunnetulle biohiilelle on löydetty jopa 60 erilaista käyttötarkoitusta. [22.] Valtaosa biohiilituotannosta ja markkinoinnista keskittyy kuitenkin maatalous- ja energiantuotantosektorilla hyödynnettäviin tuotteisiin, joiden ominaisuuksia käsitellään tässä luvussa.

3.1.1 Biohiili

Biohiilet ovat koostumukseltaan erittäin huokoisia ja kykeneväisiä pidättämään itsessään ravinteita sekä vettä. Pidätyskykynsä vuoksi biohiili parantaa maaperän kosteuspitoisuutta, mikä edistää maaperän mikrobialista toimintaa myönteisesti. Kestävän rakenteensa ansiosta biohiili voi säilyä maaperässä satojen tai jopa tuhansien vuosien ajan, mikä mahdollistaa sen toimivuuden

pitkäaikaisena hiilivarastona. [21.] Biohiili on kykeneväinen sitomaan maansa nähden 3–5-kertaisen määrän hiilidioksidia. Esimerkiksi tonnilla biohiiltä voidaan kompensoida kahden keskimääräisen henkilöauton vuosittaiset hiilidioksidipäästöt (n. 4 200 kg CO₂/v). [24.] Biohiiltä käytetään laajasti myös suodatuskäytössä kaupunkien hulevesien ja maatalouden ravinnepitoisen veden suodattamiseen. Lisäksi biohiilellä on lukuisia muita käyttökohteita mm. kosmetiikka-alan tuotteissa, lääketeollisuudessa, tekstiileissä, maaleissa, biokaasun tuotannossa, akkujen raaka-aineena ja elintarvikeväriaineena, mikä tekee siitä monipuolisen ja arvokkaan materiaalin. [21.]

Biohiili on esimerkki negatiivisten päästöjen teknologiasta (NET, Negative Emission Technology), koska sen avulla voidaan varastoida n. 56–74 % biomateriaalin hiilestä maaperään tai muihin käyttökohteisiin. Kansainvälinen IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) arvioi hiilensidonnan potentiaaliksi 56 %, kun taas Euroopan biohiilijärjestö EBC arvioi sen olevan jopa 74 %. Biohiilen arvioitu vuosittainen hajoamisnopeus on n. 0,3 %, eli vain pieni osa biohiilestä hajoaa vuosittain ympäristöön. [21.]

3.1.2 Biohiilipelletti

Biohiilipelletillä on periteistä puupellettiä korkeampi energiatiheys ja hiilipitoisuus, hydrofobiset ominaisuudet sekä merkittävä vastustuskyky biologista hajoamista vastaan [1]. Pelletoituna biohiili on tiivistä ja se vie varastoidessaan lievästi kivihiiltä enemmän tilaa, mutta huomattavasti puupellettiä vähemmän. Biohiilipelletin varastointi, käsittely ja kuljetus on normaalipellettejä edullisempaa sekä helpompaa, mikä tekee siitä logistisesti tehokkaan vaihtoehdon erityisesti kaupunkiympäristössä, jossa varastointitilat ovat rajallisia. Esimerkiksi puupelletillä irtotiheys vaihtelee 600–650 kg/m³ ja puupelletin energiatiheys on 2,8 MWh/m³. Biohiilipelletin irtotiheys on 750–850 kg/m³ ja energiatiheys 4,8 MWh/m³. Vastaavasti kivihiilen irtotiheys on 800–900 kg/m³ ja energiatiheys 5,6 MWh/m³. [25.] Kivihiilen lämpöarvo kuiva-aineessa on keskimäärin n. 28 MJ/kg [26]. Korkealaatuisen biohiilipelletin nettolämpöarvo on tyypillisesti noin 19–24 MJ/kg. Lähtökohtaisesti biohiilipelletillä on kivihiiltä hieman alhaisempi

lämpöarvo, mutta biohiilipelletillä voidaan päästä samaan tai jopa korkeampaan lämpöarvoon kuin kivihiilellä. Korkeamman lämpöarvon saavuttaminen biohiilipolttoaineella on kuitenkin tuotannollisesti haastavaa, minkä vuoksi se nostaa myös merkittävästi tuotteen hankintakustannuksia. [27.]

Biohiilipelletin korkea energiatiheys ja hydrofobiset ominaisuuden mahdollistavat sen käytön pölypolttokattiloissa ilman merkittäviä muutoksia olemassa olevaan laitosinfrastruktuuriin. Biohiilipelletti soveltuu rinnakkaispolttoon kivihiilen ohelle tai korvaten kivihiilen polttoaineena täysin. Käytäntö auttaa vähentämään voimalaitosten hiilijalanjälkeä tarjoten myös siirtymän kohti uusiutuvan energian käyttöä. Teräs- ja sementtiteollisuuden alat vaativat korkeita prosessilämpötiloja, joiden tuottaminen on mahdollista biohiilipellettien tai -brikettien avulla niiden polttotehokkuuden ja korkean energiasisällön vuoksi. Teollisuuden lämmitysovellusten lisäksi biohiilipellettiä voidaan käyttää kotitalouksien lämmitykseen pellettiuuneissa ja -kattiloissa. Ne tarjoavat ympäristöystävällisemmän vaihtoehdon lämmitysöljylle ja maakaasulle vähentäen kotitalouksien hiilijalanjälkeä. [28.]

3.2 Biohiilen valmistus

Biohiiltä valmistetaan käsittelemällä biomassaa vähähappisessa tai inertissä (hapettomassa) ympäristössä sekä korkeissa lämpötiloissa. Valmistusprosessi mahdollistaa haihtuvien orgaanisten yhdisteiden ja selluloosakomponenttien hävittämisen raaka-aineesta ja muodostaen yhtenäisen kiinteän aineen, joka on ominaisuuksiltaan kivihiilen kaltainen. [1.] Biomassan muuntuminen biohiileksi vaihtelee lähtömateriaalin ominaisuuksien mukaan. Yleisesti ottaen biomassaa prosessoidaan 200–700 °C:n lämpötiloissa määrättyllä retentioajalla biohiilituotteen valmistamiseksi. [29.] Biohiilituotteiden valmistamiseksi on kehitetty lukuisia eri tekniikoita, ja osalla tekniikoista on keskenään yhtenäisiä prosessointivaiheita ja ominaisuuksia. Pyrolyysitekniikkaa käytetään biohiilen (biochar) valmistamiseen, kun taas torrefiointia ja höyryräjäytystekniikkaa käytetään biohiilipelletin (biocoal) valmistamiseen.

Euroopassa tuotetaan tällä hetkellä 115 000 t biohiiltä vuosittain [24]. Suomessa kolmessa laitoksessa valmistetaan biohiiltä kaupallisesti vuonna 2024. Biohiilituotteiden kysyntä on viime vuosina kasvanut valtavasti ja biohiilelle löydetään jatkuvasti uusia käyttökohteita, mikä kiihdyttää alan kehitystä entisestään. [30.]

3.2.1 Pyrolyysi

Pyrolyysi eli kuivatislaus on menetelmä, jossa biomassan kiinteitä aineita hajotetaan termisesti lähes hapettomissa olosuhteissa [31]. Prosessi voidaan toteuttaa suljetussa reaktorissa tai happi voidaan syrjäyttää inerttikaasun, esimerkiksi typen avulla [32]. Ilman happea palamisreaktiota ei synny, jolloin orgaaninen aine hiiltyy [33]. Pyrolyysin raaka-aineina voidaan hyödyntää monenlaisia biomassalähteitä, mukaan lukien kierrätettyjä materiaaleja, kuten orgaaniset jätteet. Esimerkkejä käytettävistä raaka-aineista ovat maa-, metsä- ja puuteollisuuden sivuvirrat, hamppu, olki, ruokohelmi, paju, aktiiviliete, mädäte ja hevosen lanta. [34, s. 9–10]

Pyrolyysiprosessin lämpötilat vaihtelevat tyypillisesti 300–700 °C. Lämpötilalla ja prosessointiajalla on keskeinen rooli syntyvien lopputuotteiden jakaumassa. Prosessi voidaan toteuttaa hitaalla, keskinopealla, nopealla tai ns. flash-pyrolyysillä. Pyrolyysiprosessilla tuotetaan kiinteän biohiilen lisäksi pyrolyysiöljyä (bioöljy) sekä pyrolyysikaasua (syngas). [35.] Prosessissa syntyy myös hukkalämpöä, joka voidaan hyödyntää esimerkiksi biomassan kuivausvaiheessa. [32.] Kuvassa 4 on esitelty eri pyrolyysitekniikoiden vaikutus syntyvien lopputuotteiden määrään.

Technique	Temperature(°C)	Residence time (s)	Heating rate(°C/s)	Biochar(%)	Bio-oil(%)	Syngas(%)
Slow pyrolysis	300–550	hours to days	1–10	35	30	35
Intermediate pyrolysis	450–550	10–20s	10–1000	25	50	25
Fast pyrolysis	450–600	< 2s	10–1000	12	75	13
Flash Pyrolysis	750–1000	0.5s	<1	–	–	–

Kuva 4. Pyrolyysiprosessissa syntyvien lopputuotteiden jakauma eri pyrolyysitekniikoilla [35].

Alhaisemmilla prosessilämpötiloilla ja pidemmällä retentioajoilla saavutetaan runsaampi biohiilen saanto, kun taas nopeammalla pyrolyysillä tähdätään bioöljytuotantoon. Pyrolyysikaasut koostuvat pääosin hiilidioksidista (CO₂), hiilimonoksidista (CO), vedyistä (H₂) ja metaanista (CH₄). Tuotettujen kaasujen lämpöarvo (3–15 MJ/m³) jää merkittävästi alhaisemmaksi verrattuna maakaasun lämpöarvoon (37 MJ/m³). Alhaisen lämpöarvon ja tuotantomäärän vuoksi pyrolyysikaasu hyödynnetään usein tuotantolaitoksen omien energiatarpeiden kattamiseen. Bioöljyä voidaan hyödyntää esimerkiksi polttoaineena sähkön- ja lämmöntuotannossa, liikennepolttoaineiden jalostuksessa ja kemikaalien raaka-aineena. [36.] Bioöljyllä on lukuisia muita käyttökohteita mm. elintarvike-, kosmetiikka-, rakennus- ja kemianteollisuuden aloilla [37].

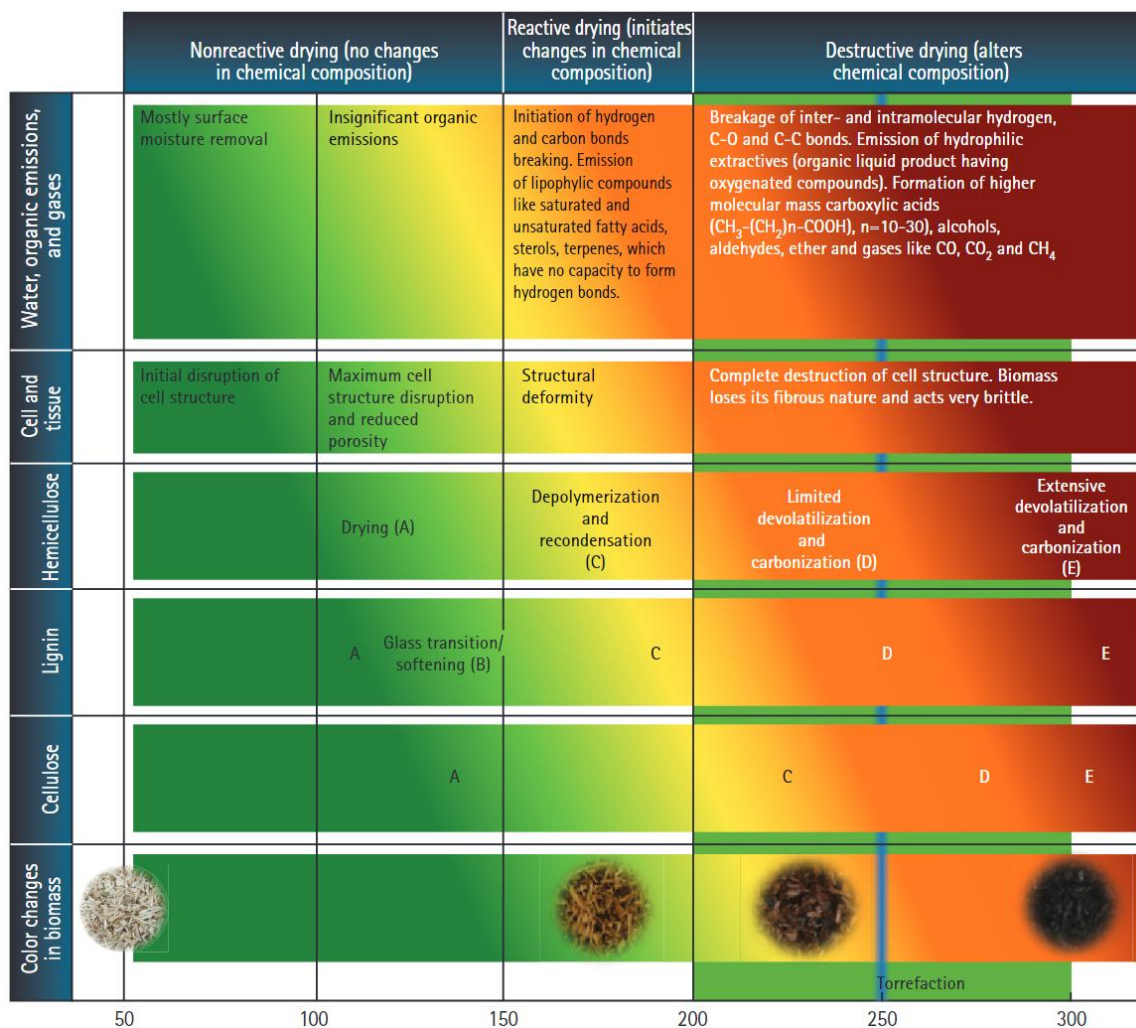
3.2.2 Torrefiointi

Torrefiointi on termokemiallinen paahtamisprosessi, jossa biomassa esikäsitellään inertissä ympäristössä ja tyypillisesti pyrolyysia matalammissa lämpötiloissa. Prosessin raaka-aineiksi soveltuu kaikki tiivistetty ja tiivistämätön puumainen ja lignoselluloosapohjainen materiaali. [38.] Lignoselluloosalla

tarkoitetaan kasvimateriaaleja, jotka koostuvat selluloosasta, ligniinistä ja helmi-selluloosasta [39].

Torrefiointiprosessi alkaa biomassan esikuivattamisesta, missä biomassa kuiva-taan 5–10 % kosteuteen [40]. Esimerkiksi tuoreella biomassalla kosteuspro-sentti voi vaihdella 50–150 painoprosentin välillä ja korkeampi kosteuspitoisuus johtaa matalampaan lämpöarvoon [41]. Kuivatuksen jälkeen biomassa syöte-tään reaktoriin, missä se paahdetaan 200–300 °C:n lämpötilassa [40]. Paahto-prosessin aikana kosteus haihtuu ja osa orgaanisten yhdisteiden vetyä ja hap-pea sisältävistä komponenteista hajoaa termisesti, mikä vapauttaa haihtuvia or-gaanisia yhdisteitä.

Paahtoprosessin tuotteena syntyy kiinteä yhtenäinen biohiili, jolla on raakabio-massaa korkeampi energiapitoisuus. Raakabiomassaan verrattuna torrefioidun biohiilen hiilipitoisuus ja lämpöarvo kasvavat noin 15–25 painoprosenttia. [42, s. 1] Lisäksi osa biomassan hydrofiilisistä sidoksista katoaa torrefiointin aikana, mikä tekee tuotteesta hydrofobisemman. Hydrofobisuus on vettä hylkivä ominai-suus, mikä mahdollistaa esimerkiksi polttoaineen ulko-varastoinnin. [43.] Torrefi-oidusta biomassasta puristetaan energiatiiviitä pellettejä, joita voidaan käyttää esimerkiksi sähkön- ja lämmöntuotantoon voimalaitoksissa tai sementti- ja te-rästehtailla [40]. Kuvassa 5 on esitetty kemialliset reaktiot ja värin muutokset, jotka tapahtuvat biomassassa torrefiointin eri lämpötilavyöhykkeillä.



Kuva 5. Biomassan rakenteelliset, kemialliset ja värilliset muutokset lämpökäsittelyprosessin aikana [42, s. 4].

Tutkimuksessa [42.] torrefiointiprosessi jaettiin kolmeen lämpötilavyöhykkeeseen, joissa biomassa kokee erilaisia kemiallisia ja fysikaalisia muutoksia:

1) Ei-reaktiivinen kuivumisvyöhyke (50–150 °C)

Ei-reaktiivisella kuivumisvyöhykkeellä biomassa menettää pääasiassa kosteutta ja kutistuu, mutta sen kemiallinen koostumus pysyy valtaosin muuttumattomana. Biomassan huokoisuus vähenee, mutta se saattaa esim. kastuessaan palautua alkuperäiseen rakenteeseensa. Lämpötilan lähestyessä vyöhykkeen ylärajaa (120–150 °C) biomassassa oleva ligniini pehmenee, mikä tekee

aineesta pelletöintiin soveltuvamman, sillä pehmennyt ligniini toimii sitovana aineena. [42, s. 4.]

2) Reaktiivinen kuivumisvyöhyke (150–200 °C)

Reaktiivisella vyöhykkeellä käynnistyvät vety- ja hiilidosten katkeaminen sekä helmiselluloosan depolymerisoituminen, mikä johtaa lyhyempiin ja tiiviimpiin polymeereihin. Biomassassa tapahtuu myös rakenteellisia muutoksia, jotka estävät sen palautumisen alkuperäiseen rakenteeseen. Näiden muutosten seurauksena biomassasta vapautuu lipofiilisiä uutteita ja muita yhdisteitä kiintoaineiden lämpöhajoamisen myötä. [42, s. 4.]

3) Destruktiivinen kuivumisvyöhyke (200–300 °C)

Destruktiivisella vyöhykkeellä biomassa hiiltyy ja sen solurakenne tuhoutuu täysin. Biomassa muuttuu hauraaksi, ja se menettää kuitumaisen rakenteensa. Tämä vyöhyke edustaa torrefioinnin prosessirajoja, jossa molekyylien väliset sidokset sekä sisäiset vetysidokset katkeavat. Lisäksi hiili-hiili- (C-C) ja hiili-happi-sidokset (C-O) katkeavat. Reaktiotuotteina syntyy orgaanisia yhdisteitä ja haihtuvia kaasuja, kuten hiilimonosidia, hiilidioksidia ja metaania. [42, s. 4.]

3.2.3 Höyryräjäytys

Amerikkalainen tutkimusinsinööri William H. Mason käytti ensimmäisen kerran höyryräjäytysprosessia puumateriaalin käsittelyyn vuonna 1926, jolloin prosessi myös patentoitiin. Höyryräjäytystä on käytetty laajalti biomassan käsittelyyn paperi- ja selluteollisuudessa [44]. Nykyisin biomassan höyryräjäytystä sovelletaan biohiilipelletin esikäsittelymenetelmänä ennen sen pelletointia. Lisäksi prosessia sovelletaan mm. mikrobiperäisen bioetanolin ja biokaasun esikäsittelyssä. [45, s. 3.]

Höyryräjäytykseksi kutsutaan lignoselluloosapohjaisten biomassojen esikäsittelyprosessia, jossa hyödynnetään paineistettua vesihöyryä. Kylläisen höyryn

lämpötila on n. 180–240 °C ja prosessi suoritetaan tyypillisesti 1–3,5 MPa:n käyttöpainalueella. Korkean prosessipaineen vuoksi vesihöyry kondensoituu käsiteltävään raaka-aineeseen. Näitä olosuhteita ylläpidetään reaktorissa muutamista sekunneista jopa 30 minuuttiin, minkä jälkeen suoritetaan äkillinen paineen purku, mikä aiheuttaa raaka-aineeseen kondensoituneen veden räjähdysmäisen laajenemisen. [46.]

Riippuen käsittelyajasta ja prosessointilämpötilasta, prosessi voi aiheuttaa materiaalissa vain pientä rakenteellista halkeamista tai kuiturakenteen täydellisen hajoamisen [45, s. 3]. Paineen äkillinen purku aiheuttaa lignoselluloosan rakenteen pehmenemisen tai hajoamisen, helmiselluloosan ja ligniinin hydrolyysin, selluloosan rakenteen muutoksen ja siten biomassan kemiallisen ja biologisen reaktiivisuuden tuhoutumisen [47, s. 42–43]. Höyryräjäytetty biomassa pelletoidaan välittömästi esikäsittelyn jälkeen. Pelletointiprosessissa depolymerisoitunut ligniini ja vapautuneet sokerit muodostavat pseudoligniiniä, joka muodostaa jäljelle jääneen selluloosan kanssa pelletin pinnalle kulutuksenkestävän ja vettä hylkivän kerroksen. [48, s. 49–50.]

Höyryräjäytysprosessia voidaan toteuttaa joko jatkuvana tai eräluonteisena tuotantoprosessina. Jatkuva höyryräjäytysprosessi toteutetaan yleisesti laajamittaisissa teollisissa prosesseissa, kun taas eräluonteisen tuotantoprosessin kohdalla käytetään panosreaktoria kokeellisissa laboratorio-olosuhteissa. [45, s. 5–6].

3.3 Biohiilipelletit kivihiilen korvaajana

Biohiilipelletti on kasvava vaihtoehto kivihillelle erityisesti ympäristötavoitteiden saavuttamisen näkökulmasta. Sekä biohiili että kivihiili ovat hiilipitoisia aineita, mutta ne eroavat merkittävästi alkuperänsä ja ympäristövaikutustensa osalta. Kivihiilen syntyminen on vaatinut miljoonia vuosia maaperässä ja sen polttamisesta vapautuva hiilidioksidi ei päätyisi ilmakehään, jos kivihiltä ei louhittaisi ja poltettaisi. Biohiilen raaka-aineena käytetty orgaaninen materiaali on sitonut itseensä jo ilmakehässä olevaa hiilidioksidia, minkä vuoksi sen polttamisesta

syntyvä hiilidioksidi nähdään kiertävänä, eli osana hiilen luonnollista kiertokulkua. Hiilidioksidi olisi ilman polttamistakin vapautunut takaisin ilmakehään orgaanisen aineen tultua elinkaarensa päähän.

Hiiltä kulutettiin maailmanlaajuisesti ennätyselliset 8,70 miljardia tonnia vuonna 2023, mikä vastaa yli 275 tonnia sekunnissa [49]. Hiili toimii yhä suurimpana energianlähteenä sähkön, teräksen ja sementin tuotantoon [50]. Biohiilipellettien globaalista tuotantokapasiteetista on erittäin hajanaista tietoa, mutta suurien laitojen tuotantovolyymi on noin 50–70 000 t vuodessa. Esimerkiksi Joensuu Bio-coal Oy:n omistama EU:n suurin teollisen mittakaavan biohiililaitos on kykenevä tuottamaan 60 000 t biohiiltä vuodessa [51]. Vastaavan kokoisia tuotantolaitoksia tarvittaisi yli 135 000 kpl kattamaan vuotuinen hiilen kulutus. Oletettavasti hiiltä ei lähitulevaisuudessa korvata täysin pelleteillä, mutta biohiilipelleteissä nähdään potentiaalia erityisesti lämmön tuotannon huippukäytössä. Tämän ohella biohiilialan markkinoiden kasvu ja energiapolitiikka ohjaa siirtymää ainakin paikoittain.

3.3.1 Hiilen ja biohiilipelletin kustannukset

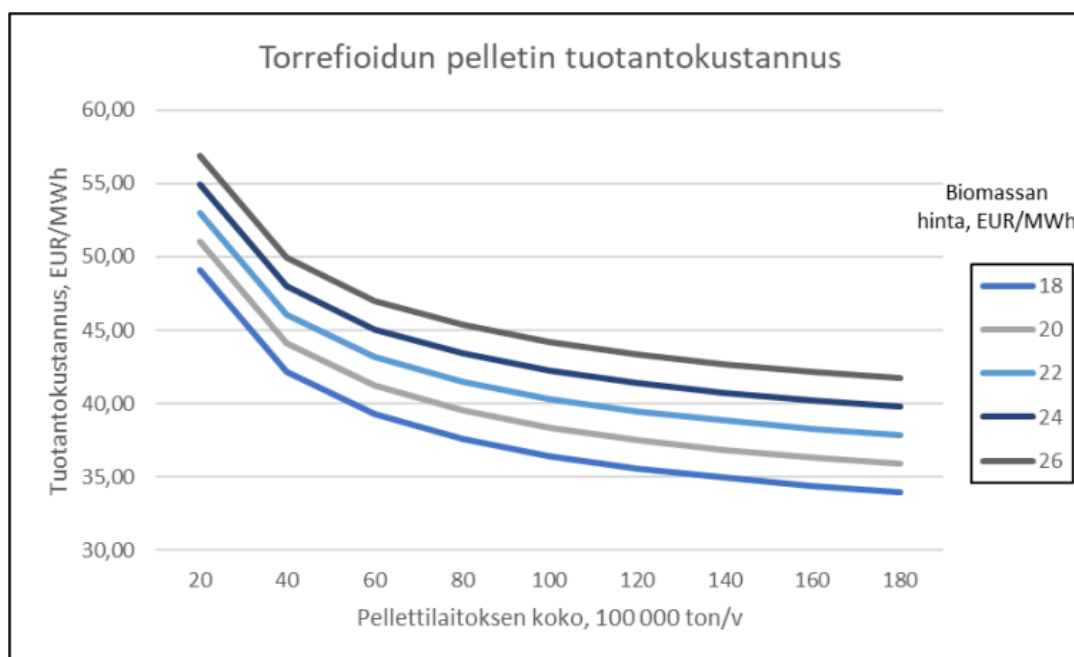
Siirtymään vaikuttaa merkittävästi myös polttoaineiden kannattavuus. Kannattavuutta esimerkiksi voimalaitoksilla mitataan maksukyvyllä, joka koostuu polttoaineen hinnasta, kansallisesta tukitasosta, valmisteverosta ja päästöoikeiden hinnasta [52, s. 44–48]. Kivihiilen markkinahinta joulukuussa 2024 on ollut keskimäärin 115 €/t, mikä vastaa n. 15 €/MWh, kun hiilen lämpöarvoksi katsotaan 28 MJ/kg [53]. Päästöoikeuden hinta on noussut merkittävästi edeltävinä vuosina, mikä on suosinut biohiilipellettien kannattavuutta hiillelle korvaavana polttoaineena. Päästöoikeuden hinta joulukuussa 2024 on kuvan 6 mukaisesti 68,63 €/tCO₂. Kivihiilen päästökerroin on 0,336 tCO₂/MWh [54].



Kuva 6. Viimeisen 10 vuoden hintakehitys CO₂-päästöoikeudella Euroopassa [55].

Energian tuottaminen hiilellä kustantaa tällä hetkellä polttoainekustannuksineen ja päästöoikeuksineen noin 38 €/MWh. Sähkön tuotantoon käytettävät polttoaineet ovat Suomessa valmisteverottomia, mutta lämmön tuotantoon hiilen käytöstä maksetaan energiasisältö- ja hiilidioksidiveroa. CHP-laitosten maksamat veromäärät lämmöntuotannossa ovat keskimääräistä alhaisempia myönnettyjen verohelpotusten vuoksi. [56, s. 25] Kivihiilen energiasisältövero, hiilidioksidivero ja huoltovarmuusmaksu kustantaa 1.1.2023 voimaan astuneen verotaulukon mukaan yhteensä 220,44 €/t, eli noin 28,30 €/MWh [57]. Kivihiilen käyttö esimerkiksi lämpölaitoksella ilman verohelpotuksia kustantaisi n. 66,30 €/MWh.

Biohiilipelletti luokitellaan uusiutuvaksi energianlähteiksi eikä siten kuulu päästökaupan piiriin. Pelletin polttamisesta ei siis makseta päästöveroa. Biohiilipelletin tuotantokustannus on kuitenkin merkittävästi korkeampi kuin kivihiilen markkinahinta. VTT:n vuonna 2021 tekemän tutkimuksen [56] pohjalta esimerkiksi torrefioidun pelletin tuotantokustannukset vaihtelevat 34–57 €/MWh riippuen käytetyn prosessiraaka-aineen hinnasta ja pellettilaitoksen koosta (kuva 7).



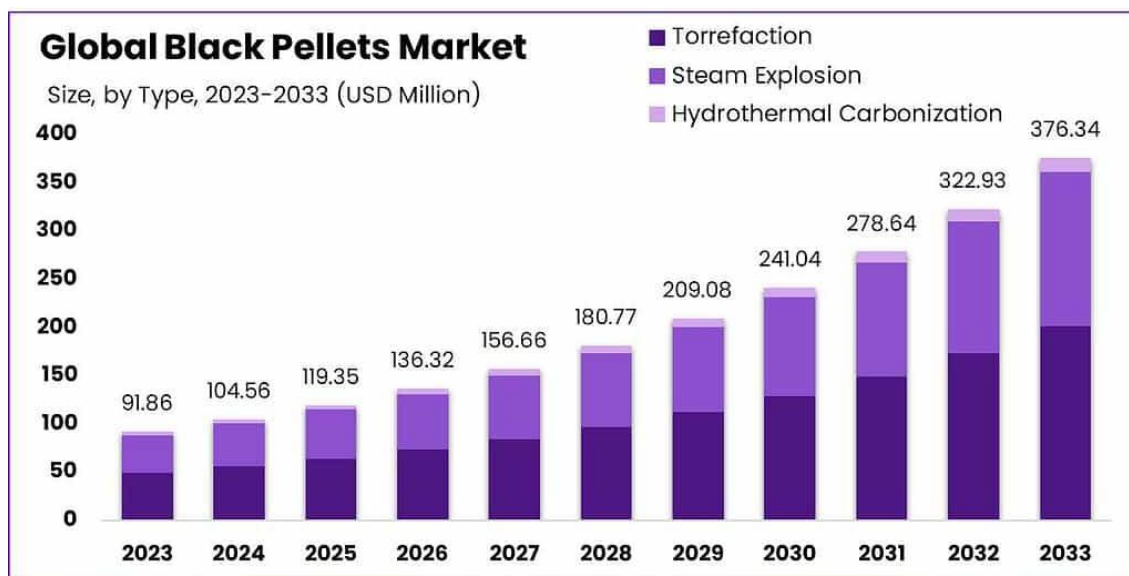
Kuva 7. Torrefioitujen biohiilipellettien tuotantokustannuksen raaka-aineen ja laitoksen kapasiteetin funktiona [56, s. 21].

Tuotantokustannus ei kuitenkaan vastaa pelletin lopullista hankintahintaa, joihin vaikuttaa myös logistiikkakustannukset sekä tuotteen tarjonta ja kysyntä. Biohiilipelletillä tuotettu lämpö on Suomessa hiilestä poiketen verovapaata, mikä kompensoi päästöverottomuuden lisäksi pelletin korkeita tuotantokustannuksia. Hiilen käyttö CHP-laitokselle maksaa arviolta n. 50 €/MWh tämänhetkisellä päästö- ja valmisteverolla huomioiden CHP-laitoksille myönnetyn lämmöntuotannon verohelpotuksen. Päästöoikeuden hinnalla on merkittävä painoarvo hiilen käytön hinnan muodostumisessa. Biohiilipelletin hankintahinnan ollessa hiilen käytön kustannuksia alhaisempi siirtymä muuttuu ympäristönäkökulman lisäksi myös taloudellisesti kannattavaksi.

3.3.2 Biohiilipelletin kehittyvät markkinat

Globaalin biohiilipellettimarkkinan odotetaan kasvavan 91,9 miljoonasta Yhdysvaltain dollarista vuonna 2023 noin 376 miljoonaan dollariin vuoteen 2033 mennessä, mikä heijastaa 15,3 %:n vuosittaista kasvua ennustejaksolla (kuva 8).

Markkinakasvua ohjaavat uusiutuvan energian kasvava kysyntä, biomassateknologian kehittyminen sekä tiukentuva ympäristölainsäädäntö. [58.]



Kuva 8. Ennuste biohiilipellettien markkinakasvusta vuoteen 2033 asti [58].

Pellettityypeistä torrefiointiteknikalla valmistetun pelletin osuus markkinoista oli 53,6 % vuonna 2023. Energiantuotantosektori on markkinaosuudellaan 56,1 % ja siten biohiilipellettien suurin sovellusalue. [58.]

Biohiilipellettien markkinoiden kasvua rajoittavat kuitenkin pellettien käyttöönottokustannukset, jotka saattavat nousta erittäin korkeiksi tarpeellisten laite- ja muutosten vuoksi. Pellettiä markkinoidaan usein soveltuvaksi suoraan olemassa olevaan voimalaitosinfrastruktuuriin, mutta käyttöönotto edellyttää usein alkuinvestointeja ja voimalaitoksen uudelleenoptimointia, mikä saattaa herättää energiantuottajissa epävarmuutta. Pellettien tuotanto edellyttää myös jatkuvaa ja luotettavaa biomassaraaka-aineiden, kuten maatalouden jätteiden ja metsätalouden sivutuotteiden saantia. Kausivaihteluista tai markkinadynamiikasta johtuvat heilahtelut raaka-aineiden saatavuudessa rajoittaa biohiilipellettien tuotantovolyymia. [58.]

3.4 Koetoimintajaksolla käytetty biohiili

Koetoimintajaksolla käytetty biohiilipelletti oli valmistettu höyryräjäytystekniikalla ja sen raaka-aineena oli käytetty sahajauhoa. Pelletin lämpöarvo oli n. 21 MJ/kg, pituus 20–40 mm ja halkaisija n. 8 mm. [59.] Biohiilipelletin laajempia tuotetietoja ei voitu salassapitovelvollisuuden vuoksi julkaista työhön.

Höyryräjäytetyn biohiilipelletin tuotenimi on Arbacore, ja sen toimitti norjalainen yhtiö Arbaflame AS. Arbaflame edistää biohiilipellettien markkinoita omilla Arbacore-pelleteillään, jotka on suunniteltu kivihiilien täysimääräiseen korvaamiseen sekä rinnakkaispolttoon kivihiilikattiloissa. Arbaflame tukee innovatiivisella lähestymistavallaan puhtaampaa energiantuotantoa ja helpottaa siirtymää kivihiilestä uusiutuviin energianlähteisiin. Arbaflame pyrkii laajentamaan vaikutustaan ja markkina-asemaansa globaalisti merkittävillä investoinneilla ja strategisilla kumppanuuksilla. [58.]

4 Koetoimintajakso

4.1 Koetoiminnan tarkoitus ja tavoite

Biohiilen koepolton tavoitteena oli selvittää, onko Martinlaakson voimalaitoksen MAR2-kattilan fossiilinen kivihiili mahdollista korvata uusiutuvalla biohiilipelletillä niin, että jo olemassa olevan laitosisrastruktuurin muuttaminen ei vaatisi kalliita investointeja.

Koepolton tavoitteena oli saada hiilikattilan ja sen oheislaitteiden toiminta vakaaksi ilman fossiilisia polttoaineita. Vakaan toiminnan edellytyksenä oli BL2-tuotantoyksikön käyttö 100-prosenttisesti biohiilipelletillä niin, että savukaasujen pitoisuudet olivat asetettujen päästöraja-arvojen mukaiset. Koepolton tarkoituksena oli selvittää, kuinka biohiili käyttäytyy energiantuotantoprosessissa ja tuotantoyksikön laitteistossa, kuten hiilikuljettimilla, -jakajilla, -myllyissä, kattilassa, sähkösuodattimilla ja rikinpoistolaitoksessa. Lisäksi haluttiin selvittää biohiilen varastointiominaisuuksia polttoainekentällä ja polttoainesiloissa. [59.]

4.2 Esivalmistelut koetoimintaa varten

4.2.1 Biohiilen koejauhatus

Biohiilen koepolttoa varten hankitulle höyryräjäytetylle biohiilipelletille suoritettiin koejauhatus Saksassa Cladius Petersin testilaitoksella 16.1.2024-17.1.2024. BL2-tuotantoyksikön hiilimylyt ovat myös Cladius Petersin valmistamat. Koejauhatussessa oli mukana Vantaan Energian Martinlaakson voimalaitoksen henkilökuntaa.

Koejauhatussessa asetettiin testilaitteistolle parametrit, joiden avulla saadut tulokset pystyttiin skaalaamaan Martinlaakson voimalaitoksen hiilimylyjen kokoluokkaan. Koejauhatussessa käytetty hiilimyly (kuva 9) oli rakenteeltaan lähes vastaavanlainen kuin BL2:n hiilimylyt, mutta kokoluokaltaan huomattavasti pienempi. [59.]



Kuva 9. Koejauhatussissa käytetty pienemmän kokoluokan hiilimyly sekä polttoaineen jauhatuskuulat.

Koejauhatuksissa tutkittiin mm. pelletin jauhatuspainetta, myllyn moottorin ja vaihteiston kuormitusta, jauhautuneen biohiilipölyn vaatimaa kantoilman virtausnopeutta sekä hiilipölyn itsesyttymislämpötilaa. Koejauhatuksessa esille nousi polttoaineen jauhautuvuus ja itsesyttymislämpötila. [59.] Biohiilipelletti ei ollut ta-salaatuista, vaan murskautuessaan sen sisältä löytyi valkoista puuainesta. Ai-nes oli puusäettä, joka ei ollut hiiltynyt biohiilen valmistusprosessissa. Valkoinen puuaines ei jauhautunut pölymäiseksi pelletin murskautuessa myllyn sisällä, vaan liiskaantui ja tarttui jauhatusmaljan pintaan.

Testilaitoksella biohiilipolttoainetta lämmitettiin uunissa, jonka lämpötila oli ase-tettu 100 °C:seen. Polttoaineen lämpötila ylitti uunissa sen ympäristön lämpöti-lan, mikä viittasi polttoaineessa tapahtuneeseen itsesyttymiseen. Itsesyttymis-lämpötila nähtiin ongelmalliseksi, sillä valmistaja oli ilmoittanut sen olevan 320 °C. [59.] Martinlaakson voimalaitoksella kivihiiltä ajettaessa kantoilman lämpöti-lana on käytetty tyypillisesti 220–280-celsiusasteista ilmaa. Biohiilen kantoilman lämpötilaa oli koetoimintaa varten laskettava merkittävästi, koska sen ei haluttu aiheuttavan polttoaineessa itsesyttymisriskiä.

4.2.2 Hiilimyllyn kantoilma

Biohiilipölyn kantoilman lämpötilan alentamiseksi oli selvitettävä, kuinka paljon ilman lämpötilaa oli mahdollista alentaa niin, että hiilimyllyn sisällä oleva kantoil-man virtausnopeus on riittävä jauhautuneen biohiilipölyn viemiseksi kattilaan. Li-säksi haluttiin tietää, että riittääkö kantoilmapuhaltimien kapasiteetti tuottamaan alhaisemmalla ilman lämpötilalla riittävän määrän ilmaa. Puhallinvalmistaja oli ilmoittanut kantoilmapuhaltimien maksimikapasiteetiksi 8 Nm³/s.

Voimalaitoksella käytössä oleva ajojärjestelmä ilmoittaa hiilimyllylle puhalletta-van kantoilman tilavuusvirran normikuutioina. Normikuutio kertoo ilman tilavuus-virran NTP-olosuhteissa, mutta kantoilman tilavuusvirta on todellisuudessa mer-kittävästi suurempi, sillä kantoilman lämpötila on NTP-olosuhteita korkeampi ja ilman tiheys siten alhaisempi. Selvitystyötä varten laadittiin Excel-pohjainen tie-dosto (liite 1).

Martinlaakson voimalaitoksen käyttöinsinööritä saatujen ennakkotietojen perusteella polttoaineen leijutuspinta-ala hiilimyllyssä oli 7,411 m² ja kantoilman virtausnopeuden oli tavoitellulla biohiilen partikkelikoolta oltava 1,0 m/s. Virtausnopeus todettiin koejauhatuksessa riittäväksi jauhautuneen biohiilipölyn leijuttamiseksi hiilimyllystä.

Selvitystyössä lähdettiin liikkeelle perehtymällä hiilimyllyn sisällä virtaavan kantoilman tilavuus- ja massavirtoihin sekä virtausnopeuteen teoreettisella, mutta tyypillisellä kivihiliajolla. Laskutehtävässä sovellettiin kaasujen yleistä tilanyhtälöä (kaava 2),

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (2)$$

jossa P_1 kuvastaa ilman painetta NTP-olosuhteissa, V_1 kantoilman maksimitilavuusvirtaa normikuutioina ja T_1 ilman lämpötilaa NTP-olosuhteissa. P_2 kuvastaa ilman painetta huomioiden hiilimyllyn paine-eron, V_2 kantoilman todellista tilavuusvirtaa ja T_2 kantoilman todellista lämpötilaa.

Kaavasta 1 selvitettiin kantoilman todellinen tilavuusvirta V_2 , joka oli noin 15 m³/s teoreettisessa kivihilen ajotilanteessa. Lasketun tilavuusvirran avulla selvitettiin kantoilman massavirta (kaava 3),

$$\dot{m} = \rho_2 V_2 \quad (3)$$

jossa \dot{m} kuvastaa kantoilman massavirtaa ja ρ_2 kantoilman tiheyttä. Kantoilman massavirraksi laskettiin n. 10,1 kg/s, minkä avulla selvitettiin vielä hiilimyllyssä virtaavan ilman virtausnopeus (kaava 4).

$$v = \frac{V_2}{A} \quad (4)$$

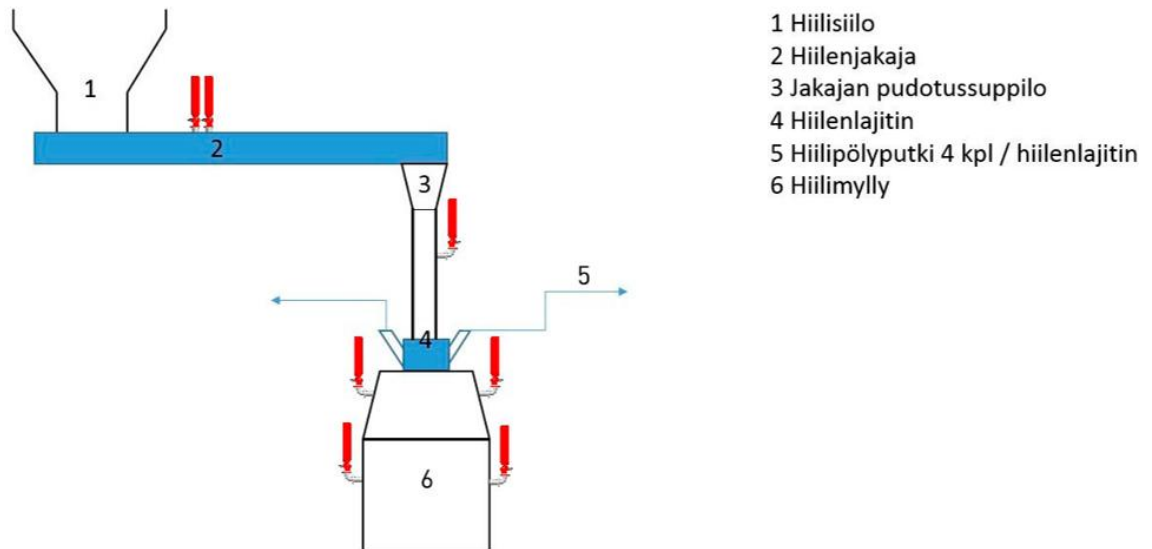
Kaavassa 4 v kuvastaa kantoilman virtausnopeutta hiilimyllyssä ja A kuvastaa polttoaineen leijutuspinta-alaa hiilimyllyssä. Kantoilman virtausnopeudeksi saatiin laskettua noin 2,0 m/s teoreettisella kivihiliajolla.

Tehdyn teoreettisen esimerkkilaskun pohjalta pääteltiin, että kantoilman lämpötilaa on mahdollista alentaa, sillä kantoilman virtausnopeus oli tyypillisessä ajotilanteessa noin kaksinkertainen vaadittuun 1 m/s virtausnopeuteen nähden. Seuraavaksi selvitettiin, kuinka matalaksi kantoilman lämpötila on mahdollista laskea niin, että sen virtausnopeus olisi myllyssä vähintään 1 m/s eikä kantoilman tilavuusvirta ylittäisi kantoilmapuhaltimen 8 Nm³/s maksimikapasiteettia.

Cladius Petersin testilaitoksella havaitun polttoaineen itsesyttymisen myötä kantoilman lämpötilaksi haluttiin asettaa maksimissaan 80 °C. Selvitystyössä laskettiin, että 80-asteisella ilmalla on mahdollista saavuttaa virtausnopeus 1,36 m/s niin, että se ei ylitä kantoilmapuhaltimen maksimikapasiteettia. Selvitystyön perusteella kantoilman lämpötilaa oli mahdollista alentaa polttoaineen itsesyttymisen riskin minimoimiseksi niin, että kantoilmamäärä oli vielä riittävä polttoaineen kuljettamiseksi hiilimyllystä kattilaan.

4.2.3 Tuotantoyksikön muutostyöt

BL2-tuotantoyksikön laitteistoon asennettiin pölyräjähdysuojajärjestelmä biohiilipelletin myötä lisääntyneen pölyräjähdysriskin vuoksi. Tukahdutusyksiköt asennettiin hiilenjakajille, -lajittimille sekä hiilimyllyihin periaatekuvan (kuva 10) mukaisesti. Järjestelmän toimintaperiaate perustuu jatkuvatoimiseen hiilimyllyjen sisäisen paineen mittaukseen räjähdyspainetunnistimilla. Pölyräjähdysten tapahtuessa järjestelmä laukaisee tukahdutusyksiköt, jotka purkavat sammutteen laitteiston sisäpuolelle tukahduttaen räjähdysten. Polttoaineen pudotusputkeen asennettu tukahdutuspullo laukeaa samanaikaisesti estäen räjähdysten etenemisen hiilenjakajalle. Vastaavasti hiilenjakajalle asennetut tukahdutusyksiköt estävät räjähdysten etenemisen polttoainesiloon. [59.]



Kuva 10. Periaatekuva tukahdutusyksiköiden sijoituksesta hiilenjakajille, polttoaineen pudotussuppiloihin sekä hiilimyllyihin. [59.]

Tukahdutusjärjestelmä asennettiin ainoastaan koetoimintajaksoa varten, eikä järjestelmää käytetä koetoiminnan ulkopuolella esimerkiksi kivihiiliajolla.

4.3 Koetoimintajakson toteutus

Vantaan Energia Oy:n Martinlaakson voimalaitokselle myönnettiin 17. tammi-kuuta 2024 ympäristölupa ESAVI/48896/2023 biohiilen koeluontoista polttoa varten MAR2-kivihiilikattilassa. Ympäristöluvan mukaan koetoiminta oli toteutettava lämmityskauden aikana muun tuotantoajan yhteydessä, koska MAR2-hiilikattila ei ole jatkuvasti käynnissä oleva peruskuormalaitos. Koeluontoisen toiminnan suunniteltu kesto oli yhteensä 9 kuukautta, ja se oli ajoitettu kahdelle koepolttojaksole 1.3.–31.5.2024 ja 1.11.2024–31.5.2025. Voimalaitosta käytettiin normaalisti ympärivuorokautisesti koepolton aikana. Lupa salli 20 000 t biohiiltä poltettavaksi MAR2-hiilikattilassa.

Ensimmäinen hankittu biohiilierä oli höyryräjäytettyä pellettiä, mutta ympäristölupa salli myös torrefioidun biohiilen koepolton [60]. Ensimmäisellä koepolttojaksolla tavoiteltiin kahden hiilimyllyn samanaikaista ajoa (HM1 ja HM2) sekä

biohiilipelletin polttoainesyöttöä 3 kg/s hiilikuljettimelle. Kyseisillä ajoparametreilla olisi saavutettu noin 120 MW:n polttoaineteho.

Ensimmäinen koepolttojakso toteutettiin aikavälillä 11.3.–15.3.2024. Koepolttojakso jäi merkittävästi suunniteltua lyhyemmäksi ja se keskeytettiin vain neljän vuorokauden jälkeen 15. maaliskuuta 2024. Keskeytyksen aiheutti HM1:ssä syttynyt tulipalo, joka levisi kyseisen myllyn hiilikuljettimelle. Seuraava koetoimintajakso oli tarkoitus aloittaa lämmityskaudella 2025, ja sen toteuttamista ryhdyttiin suunnittelemaan heti ensimmäisen koetoimintajakson päätyttyä. Vantaan Energia kuitenkin ilmoitti kesäkuussa 2024, että biohiilipelletin koepolttoja ei jatketa enää tulevaisuudessa. Uuden polttoaineen käyttöönottoon vaadittavat tuotantoyksikön muutostyöt olisivat kustannuksiltaan olleet liian korkeat ja biohiilipelletin toimivuus muutostöistä huolimatta epävarma.

5 Koepolttojakson datan analysointi

5.1 Biohiilen varastointi ja kuljetus

Ensimmäinen biohiilierä kuljetettiin voimalaitoksen polttoainekentälle viikolla 10, maaliskuussa 2024. Rahtierän suuruus oli 4 300 t. Biohiilipelletti varastoitiin polttoainekentällä lyhytaikaisesti ilman peittämistä, mutta polttoaineen peittäminen esimerkiksi pressuilla mahdollistaisi tarvittaessa pidemmän varastointiajan.

Polttoaine kuljetetaan polttoainekentältä tuotantoyksikön varastosiiiloihin avonaisella hihnakuljettimella, johon ei koepolttoa varten tehty muutoksia. Pelletin muodossa oleva biohiilen arvioitiin olevan riski sen alaspäin valumiselle kuljettimella. Hihnakuljettimen nousukulma on jyrkimmillään 21°, joka on maksiminousukulma kyseiselle tasahihnakuljetintyypille. [59.] Biohiilipelletin kuljettaminen ei aiheuttanut kuitenkaan polttoaineen valumista tai putoamista kuljettimen kyydistä koepolttojaksolla.

Pelletin kuljetus polttoainekentältä tuotantoyksikköön aloitettiin maanantaina 11. maaliskuuta 2024 täyttämällä polttoainesiilo 2. Lähes välittömästi siilon täytön

aloitettua havaittiin, että pelletin kuljetus aiheutti merkittävää pölyyntymistä. Lähes koko kuljetusreitti sekä polttoainevintti oli biohiilipölyn peitossa. Pölyn määrä oli niin huomattava, että sen epäiltiin aiheuttavan pölyräjähdysriskin. Polttoainesilo 2:n täyttö jouduttiin keskeyttämään 50 tonnin täytön jälkeen.

Biohiilipelletin toimittaja oli ilmoittanut tuotteen Kst-arvoksi 158 bar·m/s. Kivihiihellä Kst-arvo on 37–86 bar·m/s. Kst-arvo kertoo polttoaineen käsittelystä syntyvän pölypilven maksimipaineennousun nopeuden. Molemmat polttoaineet on luokiteltu pölyräjähdysluokkaan ”heikko/normaali”, mutta biohiilipelletin kuljetuksesta aiheutunut pölyntyminen oli todennäköisesti korkeammassa räjähdysluokassa. [59.]

Pölyntymisen hillitsemiseksi suoritettiin polttoainekentän hiilimurskaimen deaktivointi sekä vesisumutusjärjestelmien asennus paikkoihin, missä biohiilen kuljetuksessa esiintyi korkeuseroja. Kuljetusreitit murskain ja korkeuserot aiheuttivat pelletin rikkoontumisen, mikä aiheutti pahimman pölyntymisen. Vesisumutusjärjestelmät saatiin asennettua tiistaina 12. maaliskuuta ja ne toteutettiin yleisimmin puutarhassakäyttöön suunnitelluilla pesukarhu-, pistooli- ja kaalisumuttimilla. Lisäksi tuuletusta lisättiin avaamalla kuljetinreitillä ja hiilivintillä sijaitsevia ovia sekä ikkunoita. Kastelujärjestelmän tiedettiin olevan vain väliaikainen ratkaisu, sillä järjestelmässä kiertävä vesi jäätyisi ennen pitkään ulkolämpötilan ollessa pakkasella. Kastelujärjestelmällä oli kuitenkin merkittävä vaikutus pölyntymisen hillitsemiseksi ja se todettiin toimivaksi ratkaisuksi maaliskuun koetointajaksolla.

5.2 Biohiilen jauhautuminen kivihiihimylyissä

Maaliskuun koepolttoajaksolla käytettiin kahta hiilimylyä (HM1, HM2) biohiilipelletin jauhaukseen. Biohiiltä poltettiin 11.3.–15.3.2024 yhteensä 266 032 kg.

Polttoaineen jakautuminen myllykohtaisesti:

- HM1: 202 032 kg
- HM2: 63 972 kg.

Koepolttojakson aikana havaittiin, että hiilenjakajilta hiilimylyyn syötettävä biopolttoainemäärä voi maksimissaan olla noin 2 kg/s hiilimylyä kohden. Suuremmilla biohiilikuormilla hiilimylyn paine-ero pysyi tasaisessa kasvussa, mikä kertoi biopolttoaineen kertymisestä hiilimylyn sisään. Esimerkiksi kivihiiltä ajettaessa peruskuormalla myllyjen paine-ero pysyy tyypillisesti 25–35 mbar:n sisällä.

Tiistaina 12.3.2024 biohiilipellettiä ajettiin hiilenjakajalta HM2:een 1,8 kg/s minimisyötöllä ja paine-eron huomattiin nousseen tasaisesti 65 mbar:iin asti. HM2:n paine-eroa yritettiin alentaa säätämällä hiilimylyn sisällä olevan lajittimen kierrosnopeutta, mutta sillä ei huomattu olevan vaikutusta paine-eron alentamiseksi. Lajitin päädyttiin lopulta pysäyttää kokonaan, mutta paine-erossa ei siitä huolimatta tapahtunut muutosta. Myllyn paine-eron alentamiseksi oli tarkoitus yrittää vielä kantoilmamäärän lisäämistä, mutta HM2 meni pysäytyssekvenssille kattilasta sammuneen kaasupolttimen vuoksi.

Mylly päätettiin tyhjentää manuaalisesti myllyn rojuhiililuukusta. Polttoainetta poistui tyhjennyksen yhteydessä yhdeksän etukuormaajan kauhallista, mikä vastaa tilavuudeltaan noin 2 m³. Polttoainemäärä oli erittäin suuri verrattuna tyypilliseen hiilimylyn tyhjennykseen. Tyhjennyksen yhteydessä polttoaineen huomattiin olevan myös huomattavasti karkeampaa kuin koepolttojaksolla suoritetuissa biohiilipölynäytteissä (liite 2). Rojuhiililuukusta tyhjennetty polttoaine sisälsi valkoista tikkumaista puuainesta, joka ei ollut jauhautunut hiilimylyissä. Tikut olivat pituudeltaan n. 2–5 mm:n mittaisia ja olivat siten jauhautunutta biohiilipölyä huomattavasti raskaampia. Kantoilmapuhaltimen kapasiteetti ei riittänyt tuottamaan tarvittavaa ilmamäärää ja virtausnopeutta puutikkujen leijuttamiseksi hiilimylystä kattilaan.

5.3 Biohiilen palaminen kattilassa

Vantaan Energia Oy hankki ulkopuolisen prosessiasiantuntijan Sumitomo SHI FW:ltä koetoiminnan ajaksi. Asiantuntijan tehtävänä oli analysoida biohiilen palamista MAR2-kivihiilikattilassa sekä tehdä säätöjä biohiilen palamisprosessin parantamiseksi. Asiantuntijan laatiman raportin pohjalta varsinaisia

palamisilman säätöjä ei ennätetty tekemään koetoiminnan lyhyen keston vuoksi. Asiantuntijan mukaan kattilan lentotuhkastanäytteistä palamattomien osuus pysyi sangen alhaisena (<10 %), mikä viittasi hienoon biohiilipölyyn tai sen pitkään viipymäaikaan tulipesässä. [61.]

5.4 Koetoiminnan aikaiset polttoainesuhteet

Maakaasua käytettiin koetoiminnan aikana kattilan käynnistyspolttoaineena sekä jatkuvana tukitulena biohiilijolla. Maakaasun käyttäminen tukitulena oli välttämättömyyden alhaisen biohiilitehon vuoksi. Tukituli stabiloi tulipesän lämpötilaheilahteluja sekä pitää palamisen vakaampana. Biohiilen ja maakaasun energiaosuudet oli koepolttosuunnitelmassa suunniteltu koetoiminnan ajaksi seuraavasti:

- biohiili 80 % ja maakaasu 20 % (yksi hiilimylly)
- biohiili 95 % ja maakaasu 5 % (2–3 hiilimyllyä).

Suunnitelman mukaan noin puolet koetoimintajaksosta olisi suoritettu yhden hiilimyllyn ajolla sekä biohiilen ja maakaasun polttoainesuhteella 80/20. Noin puolet kahden tai kolmen myllyn ajolla ja polttoainesuhteella 95/5. Taulukossa 1 on esiteltynä koepolton aikana toteutuneet polttoainesuhteet:

Taulukko 1. Koepolttojaksolla toteutuneet polttoainesuhteet.

Tiistai 12.3.2024

Koepoltto klo 10.38–16.08

Hiiliteho [MW]	Kaasuteho [MW]	Kok. [MW]
217,99	508,89	726,88

Hiiliteho [%] 29,99 %
Kaasuteho [%] 70,01 %

Keskiviikko 13.3.2024

Koepoltto klo 10.18–18.04

Hiiliteho [MW]	Kaasuteho [MW]	Kok. [MW]
427,32	512,04	939,36

Hiiliteho [%] 45,49 %
Kaasuteho [%] 54,51 %

Torstai 14.3.2024

Koepoltto klo 15.05–00.00

Hiiliteho [MW]	Kaasuteho [MW]	Kok. [MW]
592,31	419,95	1012,26

Hiiliteho [%] 58,51 %
Kaasuteho [%] 41,49 %

Perjantai 15.3.2024

Koepoltto klo 00.00–09.40

Hiiliteho [MW]	Kaasuteho [MW]	Kok. [MW]
500,06	538,71	1038,77

Hiiliteho [%] 48,14 %
Kaasuteho [%] 51,86 %

Koepolttojakson aikana saavutettiin parhaillaan biohiilen ja maakaasun polttoaineseossuhde 58,5/41,5. Paras polttoaineseos-suhde saavutettiin torstaina 14. maaliskuuta, kun tuotantoyksikköä ajettiin pääosin kahden myllyn ajolla. Biohiilen syötön massavirtaa ei saatu myllykohtaisesti nostettua yli 1,8 kg/s kasvavan paine-eron vuoksi. Polttoainesuhteita ei kyetty optimoimaan alhaisen biohiilitehon ja koetoiminnan lyhyen keston vuoksi. Runsaammalla polttoainesyötöllä ja esimerkiksi kolmen hiilimyllyn samanaikaisella ajolla maakaasutehon alentaminen sekä suunniteltujen polttoaineseossuhteiden saavuttaminen olisi saattanut toteutua.

5.5 Vaikutukset savukaasupitoisuuksiin

Koetoiminnalle myönnetty ympäristölupa edellytti typen oksidien (NO_x), rikkidioksidin (SO₂), pölyn (PM_{2.5}), ammoniakkin (NH₃) ja hiilimonoksidin (CO) pitoisuuksien jatkuvatoimista mittaamista savukaasuista. Aluehallintoviraston määrittämät raja-arvot ovat esitettyinä taulukossa 2. Mittaukset suoritettiin savukaasupiipussa lukuun ottamatta ammoniakkia, jonka mittaus suoritettiin ennen rikinpoistolaitosta.

Taulukko 2. Aluehallintoviraston määrittämät savukaasujen päästöraja-arvot biohiilen koepolttojaksolle. [60.]

Epäpuhtaus	¹⁾ Päästöraja-arvo (mg/m³n)	Tavoitteellinen päästöraja-arvo, kun polttoaineiden suhde: biohiili/pelletti 80 % maakaasu 20 %	Tavoitteellinen päästöraja-arvo, kun polttoaineiden suhde: biohiili/pelletti 95 % maakaasu 5 %
Rikkidioksidi	200	166	191
Typen oksidit NO ₂ :na	250	217	242
Hiukkaset	20	17	19

Koepolttojaksolla ei tapahtunut päästöraja-arvojen ylityksiä. Koepolttojakson savukaasupitoisuuksia verrattiin myös kivihiiliajon savukaasupitoisuuksiin. Vertailuun valittiin koetoimintajakson ohelle kivihiilen ajojakso aikaväliltä 14.2.–

18.2.2024, jolloin kivihiilen polttoainetehto on ollut keskimäärin n. 145 MW. Vertailuajankohdaksi valittiin kyseinen hiiliajojakso, koska polttoainetehto on ollut jaksolla keskimääräistä alhaisempi ja se on toteutettu kahden hiilimyllyn ajolla. Myös ensimmäinen koetoimintajakso oli suunniteltu toteutettavaksi kahden myllyn ajolla ja tyypillistä alhaisemmilla polttoainetehoilla. Koetoimintajaksolla biohiilen toteutunut polttoainetehto on ollut keskimäärin n. 49,3 MW. Taulukoissa (taulukko 3, taulukko 4) on vertailtu kivihiilen ja biohiilipelletin ajojaksojen savukaasupitoisuuksia.

Taulukko 3. Kivihiiliajon savukaasupitoisuudet ajojaksolla 14.2.–18.2.2024.

MAR2:n ajojakso kivihiilellä 14.2.–18.2.2024					
Aika	NO ₂ mg/nm ³ , K.A.	SO ₂ mg/nm ³ , K.A.	Pöly mg/nm ³ , K.A.	NH ₃ mg/nm ³ , K.A.	CO mg/nm ³ , K.A.
14.02	153,2	186,9	0,0	0,0	2,4
15.02	131,8	187,3	0,0	0,0	0,6
16.02	144,8	184,4	0,1	0,0	1,3
17.02	136,1	179,7	1,9	0,0	2,0
18.02	127,1	188,5	2,3	0,0	2,4
Keskiarvo	138,6	185,3	0,9	0,0	1,8

Taulukko 4. Biohiilen savukaasupitoisuudet ajojaksolla 12.3.–15.3.2024.

MAR2:n ajojakso biohiilellä 12.3.–15.3.2024					
Aika	NO ₂ mg/nm ³ , K.A.	SO ₂ mg/nm ³ , K.A.	Pöly mg/nm ³ , K.A.	NH ₃ mg/nm ³ , K.A.	CO mg/nm ³ , K.A.
12.03	240,6	129,3	0,1	50,4	0,4
13.03	239,9	5,1	0,0	49,6	0,0
14.03	247,4	0,0	0,0	53,7	0,0
15.03	226,2	0,0	0,0	43,8	0,0
Keskiarvo	238,5	33,6	0,0	49,4	0,1

Koetoiminnan aikana typen oksidien (NO_x) pitoisuudet savukaasuissa olivat korkeammat kuin kivihiilen ajojaksolla. Molemmat polttoaineet sisältävät pieniä määriä typpeä, joka vapautuu polttoaineesta palamisprosessin yhteydessä. Tulipesään ruiskutettavan urean järjestelmässä oli häiriöitä koko koepolttojakson ajan, mikä pääosin johti korkeampiin NO_x -päästöihin. Ureajärjestelmä saatiin toimintaan vasta koepolttojakson lopussa 15. maaliskuuta, mikä laski savukaasujen NO_x -pitoisuudet n. 150 mg:aan [62]. Suoritettujen biohiilipölynäytteiden perusteella polttoaine oli ajoittain todella hienojakoista (liite 2). Biohiilipölyn pieni partikkelikoko saattoi aiheuttaa sen liian nopean palamisen tulipesässä. Liian nopea palaminen puolestaan nostaa palamislämpötilaa, mikä voi johtaa termisen NO_x :n muodostumiseen ja lisätä siten savukaasujen NO_x -pitoisuuksia [63].

Arbaflame oli ilmoittanut koetoimintajaksolla käytetyn biohiilipelletin keskimääräiseksi rikkipitoisuudeksi $< 0,011 \%$. Kivihiihellä rikkipitoisuus vaihtelee yleensä $0,5\text{--}5 \%$, joka on huomattavasti suurempi kuin biohiilellä [64]. Koetoimintajaksolla 12. maaliskuuta savukaasujen rikkipitoisuus on ollut merkittävästi korkeampi kuin jakson muilla päivämäärillä. Savukaasujen korkeampi rikkipitoisuus johtuu siitä, että koetoimintaa aloittaessa hiilenjakajilla oli kivihiiapatja, joka poltettiin kattilassa ennen biohiilipellettiä. Kivihiiat ajettiin arviolta noin 3 t kattilaan ennen kuin polttoaine vaihtui biohiilipellettiin. Rikinpoistolaitos oli optimoitu tässä vaiheessa myös koetoimintaa varten, minkä vuoksi savukaasuja ei puhdistettu tavanomaisesti.

Koepolttojaksolla savukaasujen ammoniakkipitoisuus oli keskiarvoisesti $49,4 \text{ mg/Nm}^3$, kun taas kivihiilen poltossa ammoniakkia ei esiinny savukaasuissa lainkaan. Normaalisti typenoksidien poisto tehdään syöttämällä urealiuosta tulipesään. Tulipesässä urea hajoaa ammoniakiksi ja pelkistää typpioksidit vaarattomaksi typpikaasuksi. [65.] Biohiiliajojakson korkeampi ammoniakkipitoisuus ei kuitenkaan selity liiallisella urean ruiskutuksella, sillä ureajärjestelmä oli lähes koko koepolttojakson pois käytöstä vikatilana vuoksi. Koepolttojakson korkeampi ammoniakkipitoisuus voi mahdollisesti selittyä polttotekniikan tai palamisolosuhteiden optimoinnin puutteesta.

5.6 Vaikutukset rikinpoistolaitoksen toimintaan

Koetoimintaa varten saatu ympäristölupa edellytti savukaasujen johtamista rikinpoistolaitoksen läpi, vaikka biohiilen vähäisen rikkipitoisuuden vuoksi se ei olisi ollut välttämätöntä. Koetoimintajaksolla reaktorin suuttimesta sumutettiin kalkkilietteen sijasta savukaasuihin hyvin maltillinen määrä vettä, millä savukaasujen lämpötilaa saatiin alennettua ennen letkusuodattimia. Savukaasujen kosteuspitoisuuden lisääminen vedellä ei ollut optimaalista, mutta se oli kuitenkin välttämätöntä letkusuodattimien tulipaloriskin ennaltaehkäisemiseksi. Kalkkilietteen syöttäminen savukaasuihin olisi saattanut reagoida savukaasuissa olevan hiilidioksidin kanssa muodostaen kalsiumkarbonaattia (CaCO_3), mikä olisi mahdollisesti tukkinut letkusuodattimia ja kerääntynyt savukaasukanavan pinnoille [18].

Rikinpoistolaitoksella ei esiintynyt koetoiminnan aikana suurempia toiminnallisia ongelmia, mutta pidempi ajojakso olisi saattanut tuoda ilmi odottamattomia vaurioita. Esimerkiksi koetoiminnan päätyttyä havaittiin, että reaktorin ja letkusuodattimien välissä olevan savukaasukanavan kalkkipinnoite oli poistunut koepolttojakson myötä. Kalkkipinnoitteella on savukaasukanavaa korroosiolta suojaava vaikutus. [18.]

5.7 Näytteidenotto

Koetoimintajaksolla suoritettiin säännöllisesti manuaalisia näytteiden ottoja, joiden avulla voitiin analysoida biohiilipelletin käyttäytymistä prosessissa ja optimoida prosessia saatujen tulosten osalta. Koetoimintajaksolla kerättiin näytteitä jauhetun biohiilipölyn karkeudesta, lentotuhkan palamattoman polttoaineen osuudesta, kattilan pohjatuhkasta ja kattilapintojen likaantumisesta.

5.7.1 Biohiilipölynäytteet

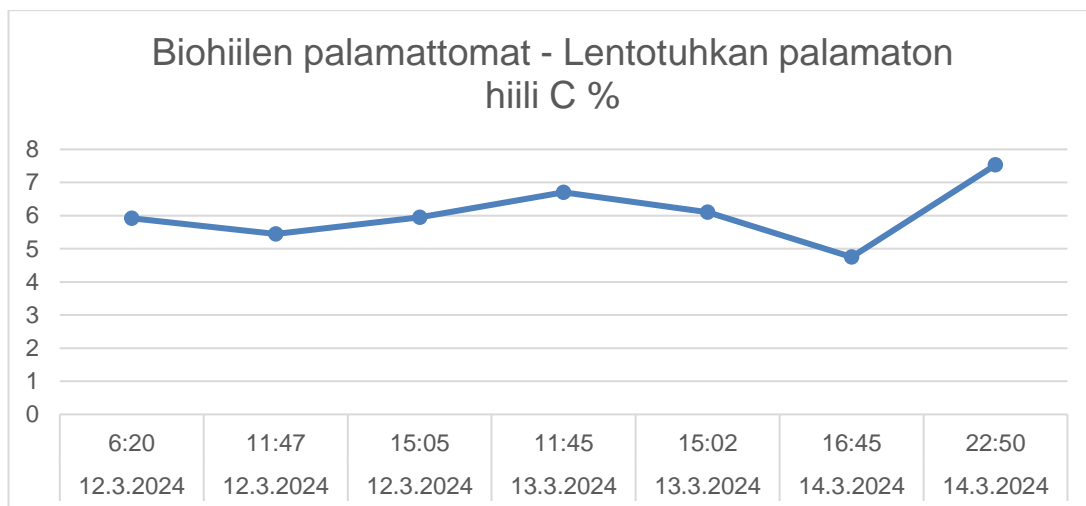
Biohiilipölynäytteiden ottoa varten hankittiin kaksi asiantuntijaa AFRY Finland Oy:ltä. Biohiilipölynäytteiden otto suoritettiin hiilipölyputkien

näytteenottoyhteestä. Pölynäytteet kerättiin samanaikaisesti lentotuhkanäytteiden kanssa ja niiden analyysit suoritettiin lähtökohtaisesti aina, kun ajoprosessiin tehtiin muutoksia. Näytteistä seurattiin pölymäärän jakautumista hiilimylystä kattilan poltinnurkkiin sekä analysoitiin biohiilipölyn karkeutta. Pölyn karkeus analysoitiin seulontatekniikalla Martinlaakson voimalaitoksen laboratoriossa. Seulonnan tulokset on esitelty liitteessä 2.

Koepolttojaksolla keskimäärin n. 86 % biohiilipölystä läpäisi 0,315 mm:n seulan ($\leq 315 \mu\text{m}$) ja n. 38 % pölystä oli partikkelikooltaan $\leq 0,1 \text{ mm}$ ($\leq 100 \mu\text{m}$). Kivihii- len kohdalla jauhetun polttoaineen keskimääräinen partikkelikoko on ollut $> 0,15 \text{ mm}$ ($150 \mu\text{m}$) vanhojen seulontatulosten pohjalta [66]. Ensimmäisten 12.3. suoritet- tujen pölyseulontojen pohjalta partikkelikoon huomattiin olevan todella pieni- kokoista. Hiilimylyn kantoilmamäärän lisäämisellä ja myllyn jakaja pysäyttämi- sellä myllystä saatiin karkeampaa biohiilipölyä. Myllyn jakajan toimintaperiaate perustuu myllyssä jauhetun polttoaineen erottelemiseen. Jakajan kierrosnopeu- den säätämällä vaikutetaan pölyn läpäisykykyyn. Liian karkea pöly putoaa ta- kaisin myllyyn jauhattavaksi, ja hieno polttoaine läpäisee jakajan edeten hiilipö- lyputkiin.

5.7.2 Palamattoman polttoaineen näytteet

Lentotuhka on palamistuotteena syntyvää erittäin hienojakoista tuhkaa, joka poistuu palamistilasta savukaasujen mukana. Lentotuhka erotetaan sähkösuodattimilla savukaasuista ennen kuin savukaasut ohjataan rikinpoistolaitok- seen. Sähkösuodattimilta lentotuhka kerätään varastosiiloihin, mistä lentotuhka- näytteet kerätään palamattoman polttoaineen analysoimiseksi. Lentotuhka- tuhka-analyysit suoritettiin Martinlaakson Voimalaitoksen laboratoriossa. Alla olevassa kuvassa 11 on esiteltynä biohiilen palamattomien osuus massapro- sentteina kattilan lentotuhkasta koetoiminnan aikana.



Kuva 11. Biohiilen palamattomien osuus massaprosentteina kattilan lentotuhkasta.

Palamattoman polttoaineen osuus lentotuhkasta pysyi koepolttoajaksolla lievästi tavanomaista alhaisempaan verrattuna tyypilliseen kivihiiliajoon. Näytteiden pohjalta myllyn jauhatuspainetta tai palamisilman määrää ei ollut tarvetta säätää.

5.7.3 Muut näytteet

Kattilan pohjatuhkasta kerättiin kokoomanäytettä, joka oli tarkoitus analysoida koepolttojakson päätteeksi. Kerättyjen kokoomanäytteiden määrä jäi liian vähäiseksi koepolton lyhyen keston vuoksi, eikä näytteestä saatu suoritettua analyysia. Kokoomanäytteestä oli tarkoitus analysoida pohjatuhkan ominaisuuksia mahdollista hyötykäyttöä tai kaatopaikkakelpoisuutta varten [60].

Kattilapintojen likaantumista seurattiin tulistinpintojen valokuvaamisella. Valokuvat otettiin vuorokausittain kattilan yläosassa sijaitsevista kurkistusluukuista. Koepolttoajaksolla tulistinpinnoille ei havaittu muodostuneen kerrostumia.

6 BL2-tuotantoyksikön tulipalo

Koepolttojakson tulipalo sai alkunsa HM1:ssä tiistaina 15. maaliskuuta 2024 noin klo 9.20. Voimalaitoksen valvomon hälytysjärjestelmä ilmoitti, että koepolttoa varten asennetut HM1:n tukahdutuspullot ovat räjähtäneet. Tukahdutusjärjestelmän olisi tullut räjähtää yhtäaikaisesti tulipalon leviämisen estämiseksi, mutta valvomoon kantautuneiden äänien perusteella pullot laukesivat yksitellen. Tukahdutusjärjestelmä ei siis toiminut tarkoituksen mukaisella tavalla.

Kattilahalliin mentiin tarkastamaan tulipalotilanne. Tulipalosta aiheutuvan savun huomattiin vapautuvan myllyn ja hiilenkuljettimen ilmaa läpäisevistä aukoista (kuva 12). Valvomosta ohjattava HM1:n sammutushöyryn magneettiventtiili avattiin, mutta venttiiliä ei saatu asetettua automaatiojärjestelmän kautta pysymään manuaalisesti auki, koska venttiilin rajoitus sulki sen 30 sekunnin välein. Tulipalotilanteen intensiivisyyden vuoksi magneettiventtiilin automaattista sulkeutumista ei huomattu välittömästi, eikä sitä ennätetty avaamaan aina välittömästi uudelleen sen sulkeuduttua.



Kuva 12. HM1:stä lähtenyt palo on edennyt hiilenjakajalle 1:lle. Keltaiset pullot ovat koetoimintaa varten asennettuja tukahdutusyksiköitä.

Tulipalon leviämistä hiilenjakajalle yritettiin estää avaamalla hiilenjakajan sammutushöyryn käsiventtiili, jotta palo ei olisi päässyt etenemään myllystä jakajalle ja sitä kautta polttoainesiihloon. Sammutushöyryn tuomista suoraan hiilenjakajan käsiventtiin taakse ei ollut kuitenkaan suunniteltu ennen koetoimintajaksoa, minkä vuoksi venttiin avaamisesta ei ollut hyötyä palon laajenemisen estämiseksi. Hiilenjakajan sammutushöyry oli kolmen käsiventtiin takana, joista kaikki sijaitsivat kattilalaitoksen eri kerroksissa. Kaksi kolmesta käsiventtiilistä ennätettiin avaamaan, mutta kolmas venttiili sijaitsi suoraan HM1:n yläosassa ja tila oli täysin palokaasujen peitossa. Tilaan menemisestä olisi voinut aiheutua häämyrkytys, minkä vuoksi venttiiliä ennätetty avaamaan.

Noin 10 minuuttia palon syttymisen jälkeen avattiin polttoaineventin sprinklerit, jotta vesi saatiin ohjattua suunnasta, mihin tulipalo oli etenemässä. Palokunta saapui voimalaitokselle klo 9.40 ja aloitti tulipalon sammutuksen välittömästi hiilenjakajalta (kuva 13). Palokunta hakkasi polttoainesiihlon alaosassa olevat neulapellit kiinni, koska tulipalon ei haluttu leviävän polttoainesiihloon. Palokunta sai estettyä palon laajemman leviämisen ja sammutettua sen lopulta hiilenjakajalle noin klo 11.30.



Kuva 13. Palokunta sammuttamassa mahdollista kytöpaloa polttoainesiihlon alaosasta hiilenjakajan päällä.

Laitostulipalo ei aiheuttanut henkilövahinkoja, eivätkä sen myötä syntyneet taloudelliset vahingot olleet merkittäviä. Tulipalon rajoitukseen ja sammutukseen osallistunut Vantaan Energian henkilökunta sai pelastuslaitokselta kiitoksen esimerkillisestä toiminnasta ja yhteistyöstä. Taloudellisesta vahingosta ja koepoltton keskeytymisestä huolimatta tulipalon myötä havaittiin palo- ja työturvallisuuden kannalta merkittäviä kehitys- ja parannuskohteita.

7 Johtopäätökset

Biohiilituotteet ovat erittäin lupaava askel vihreän siirtymän edistämiseksi. Biohiilien raaka-aineina voidaan hyödyntää monenlaisia biomassoja, jotka muuten saattaisivat jäädä hyödyntämättä tai päätyä kierrätettäväksi. Maanparannusaineena tunnetulla biohiilellä on biohiilipellettejä ja -brikettejä merkittävästi laajemmat markkinat sen laajempien käyttökohteiden vuoksi. Biohiilipellettejä on koepoltettu Suomessa Martinlaakson voimalaitoksen lisäksi mm. Kristiinan ja Hanaaaren voimalaitoksilla, joissa pelletin koepoltot toteutettiin rinnakkaispolttona kivihiilen seassa. Koepoltot on toteutettu 2010-luvulla, ja molemmat kivihiililaitokset ovat lopettaneet toimintansa tähän päivään mennessä. Biohiilipellettien potentiaali hiilen pölypolttokattiloissa on ollut tietoisuudessa jo varsin pitkään, mutta pelletin käytöstä energiantuotannon pääpolttoaineena on toistaiseksi vähän viitteitä. Kivihiilen polttoa rajoittavat lainsäädännöt, kansalliset ympäristötaavoitteet, päästöoikeuksien kasvanut hinta ja biohiilen tuotantovolyymin kasvu sekä markkinakilpailu tulevat todennäköisesti näkymään biohiilipellettien kysynnän kasvuna energiantuotantosektorilla. Biohiilipellettien käyttö energiantuotannossa vaikuttaa olevan vielä kehitys- ja testausvaiheessa, mutta lähitulevaisuudessa se saattaa toimia monen hiili-intensiivisen teollisuuden alan pääpolttoaineena.

Biohiilen koepolttojako oli pituudeltaan merkittävästi suunniteltua lyhyempi. Lyhyen keston vuoksi saadun datan määrä oli myös vähäinen, minkä pohjalta oli haastavaa tehdä konkreettisia johtopäätöksiä biohiilipelletin toimivuudesta MAR2-kivihiilikattilassa. Koepolttojako olisi todennäköisesti jatkunut pidempään, jos polttoaineen jauhautuvuudessa ei olisi esiintynyt työssä esiin

nostettuja ongelmia. Hiilimylyissä jauhetun polttoaineen suuri partikkelikoko ja sen kertyminen myllyjen sisään oli koetoiminnan onnistumisen kannalta suurin haaste. Hiilimylyjen kantoilmamäärän lisääminen olisi mahdollisesti toiminut ratkaisuna haasteeseen, mutta se olisi vaatinut muutoksia kantoilmakanaviin ja mahdollisesti uusia kantoilmapuhaltimia. Lisäksi biohiilipelletin pölyntyminen etenkin polttoaineen kuljetusvaiheessa olisi vaatinut pidempiaikaisella ajokausella pölynpoiston uudelleensuunnittelua ja sen myötä uusia laiteinvestointeja. Biohiilipellettien koepolton keskeyttämisen syynä oli tarvittavien muutostöiden laajuus ja laiteinvestointien vaatimat kustannukset.

Höyryräjäytetyn biohiilipelletin epätasalaatuisuus ja itsesyttymisriski huomattiin jo Cladius Petersin testilaitoksella suoritetuissa koejauhatuksissa ennen varsinaista koepolttojaksoa. Epätasalaatuisuudesta huolimatta samaa tuotetta käytettiin koepolttoyksiköllä. Biohiilipellettien tuotantolaitosten kilpailuttamisella, valmistustekniikoiden vertailulla sekä pelletin laatukriteerien asettamisella olisi voitu päästä mahdollisesti menestyksellisempään lopputulokseen. Torrefiointi on teollisessa mittakaavassa höyryräjäytystä yleisempi ja vakiintuneempi prosessi biohiilipellettien valmistamiseen. Cladius Petersin laitoksella suoritettua koejauhatuksessa olisi voitu esimerkiksi vertailla eri pellettivalmistajien tuotteita ja eri valmistustekniikalla valmistettuja pellettejä. Koepolttojakson lykkäämisellä ja pidempiaikaisilla polttoainevertailuilla olisi voitu mahdollisesti välttyä laitostulipalolta ja suoritettua siten laajempi koepolttojakso.

Laitostulipalon syttymiselle ei löydetty varmaa juurisyytä, mutta syytekijöitä karotettiin Vantaan Energialla. Mahdollisia tulipalon aiheuttajia oli yhtiön mukaan joko hiilimylyn sisällä syttynyt kytöpalo tai mekaanisen hankauksen myötä syntynyt kipinä:

- 1) Kytöpalon olisi mahdollisesti aiheuttanut myllyn sisään kasaksi kertynyt kekomainen biohiilipöly, jossa olisi tapahtunut itsesytyminen myllyn sisäosan lämpötilan vaikutuksesta. Kytöpalon voimistuminen olisi voinut aiheuttaa biohiilipölypilven syttymisen.

- 2) HM1:n kantoilman suutinkehältä havaittiin irronneen metallinen lattarauta tulipalon jälkeisen tyhjennyksen yhteydessä. Lattaraudan kulma oli hiutunut ja lastuttunut, mikä viittaa sen hankautumisesta myllyn pyörievien osien kanssa. Hankaus on mahdollisesti aiheuttanut kipinää ja sytyttänyt siten biohiilipölypilven myllyn sisällä.

Myllyn tulipalo olisi voinut mahdollisesti syttyä myös kattilan alhaisen polttoainetehon vuoksi. Alhaisilla polttoainetehoilla palamisprosessi on epävaka, mikä aiheuttaa ajoittain myös kattilan tulipesän käymisen ylipaineella. Normaalisti kattilassa vallitsee matala alipaine, jota ohjataan savukaasupuhaltimen siipikulmalla. Alipaineen johdosta palamisesta syntyvät savukaasut eivät pääse kattilahalliin, ja savukaasuvirta ohjautuu prosessissa oikeaan suuntaan. Voimalaitoksen ajojärjestelmässä on nähtävissä, että kattila on käynyt ylipaineella tulipalon syttymisen aikaan. Ylipaine olisi mahdollisesti voinut puhalttaa tulipesän lämpötilan prosessissa vastakkaiseen suuntaan, mikä olisi sytyttänyt hiilipölyputkien polttoainevirran. Hiilipölyputkista palo olisi voinut edetä hiilimyllyille. Teoriaa puoltaa myös kantoilmapuhaltimien samanaikainen tilavuusvirran lasku kattilan käydessä ylipaineella. Toisaalta tulipesän paineen nousua ja kantoilmapuhaltimien tilavuusvirran laskua voisi selittää myös räjähdysmäisesti syttynyt tulipalo hiilimyllyn sisällä. Äkillinen paineen nousu rajoittaisi myllyyn tulevaa kantoilmamäärää ja räjähdysten luoman paineaallon luonnollinen purkautumissuunta olisi hiilipölyputkista kattilaan, mikä voisi selittää tulipesän käymisen ylipaineella.

Koetoimintajakson laajemmalla paloturvallisuuden suunnitelulla ja testauksella olisi voitu mahdollisesti pysäyttää palon eteneminen hiilimyllystä jakajalle. Sammutushöyryn tuominen suoraan hiilenjakajan käsiventtiin taakse ja myllyn sammutushöyryn magneettiventtiin automaattirajoituksen poistaminen olisi saattanut pysäyttää palon hiilimyllyyn. Palon myötä aiheutunut taloudellinen vahinko olisi siten jäänyt myös alhaisemmaksi.

Lähteet

- 1 Biocoal – new tool for energy transition. Verkkoaineisto. <<https://www.biogreen-energy.com/biocoal>>. Luettu 4.10.2024.
- 2 Graham, Lumley. 2024. Pros and Cons of Coal. Verkkoaineisto. <<https://bkvenergy.com/learning-center/advantages-and-disadvantages-of-coal-energy-source/>>. Luettu 4.10.2024.
- 3 Ilmastonmuutos. Verkkoaineisto. Ilmatieteen laitos. <<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ilmastonmuutuskysymyksiä>>. Luettu 4.10.2024.
- 4 Hiilen avolouhinta hävittää kokonaisia vuoria Yhdysvalloissa. Verkkoaineisto. Yle. 22.9.2014. <<https://yle.fi/a/3-7484354>>. Luettu 6.10.2024.
- 5 Torrefioitu biomassa: Puhtaampi energianlähde. Verkkoaineisto. Joensuu Biocoal. <<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ilmastonmuutuskysymyksiä>>. Luettu 4.10.2024.
- 6 Vuosikertomus 2023. Vantaan Energia Oy. Verkkoaineisto. <https://vantaanenergia.s3.eu-west-1.amazonaws.com/uploads/20240403202730/Vantaan_Energia_Vuosikertomus_2023-final.pdf>. Luettu 8.10.2024.
- 7 Vantaan Energian yritysesitys. 2024. Vantaan Energia Oy. Yrityksen sisäinen materiaali.
- 8 Vantaan Energian Fossiiliton 2026 -hankkeet mahdollistavat hintavakaan lämmön Vantaalla. 2022. Verkkoaineisto. Vantaan Energia Oy. <<https://www.vantaanenergia.fi/vantaan-energian-fossiiliton-2026-hankkeet-mahdollistavat-hintavakaan-lammon-vantaalla/>>. Luettu 18.10.2024.
- 9 Varanto eli lämmön kausivarasto. Verkkoaineisto. Vantaan Energia Oy. <<https://www.vantaanenergia.fi/energiantuotanto/hiilinegatiivinen/lammon-kausivarasto/>>. Luettu 22.10.2024.
- 10 Työ- ja elinkeinoministeriöltä 1,6 miljoonan investointituki Vantaan Energian hankkeelle KWH Freezen pakastevaraston hukkalämpöjen hyödyntämiselle. 2024. Verkkoaineisto. Vantaan Energia Oy. <<https://www.vantaanenergia.fi/tyo-ja-elinkeinoministeriolta-16-miljoonan-investointituki-vantaan-energian-hankkeelle-kwh-freezen-pakastevaraston-hukkalampojen-hyodyntamiselle/>>. Luettu 22.10.2024.
- 11 Martinlaakson teollisten hukkalämpöjen talteenottohankkeelle 7,5 M€ TEM:in tukea. 2024. Verkkoaineisto. Vantaan Energia Oy.

- <<https://www.epressi.com/tiedotteet/energia/martinlaakson-teollisten-hukkalampojen-talteenottohankkeelle-75-m-e2-82-ac-temin-tukea.html>>. Luettu 22.10.2024.
- 12 Varis, Otto. Päivämestari, Martinlaakson voimalaitos. Puhelinkeskustelu. 31.10.2024.
 - 13 Juutilainen, Olli. 2015. Tutkimusleijupetikattilan suunnittelu, kilpailutus ja käyttöönotto. Opinnäytetyö. Savonia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/93584/Juutilainen_Olli.pdf?sequence=1>. Luettu 2.11.2024.
 - 14 Martinlaakson biokattila on käynnissä. 2019. Verkkoaineisto. Vantaan Energia Oy. <<https://www.vantaanenergia.fi/martinlaakson-biokattila-kaynnissa-biovoimalan-kayttoonoton-myota-olemme-muutamassa-vuodessa-puolittaneet-hiilidioksidipaastomme/>>. Luettu 8.10.2024.
 - 15 Kivihiilen energiakäytön vuonna 2029 kieltävä laki voimaan huhtikuun alussa. 2019. Verkkoaineisto. Työ- ja elinkeinoministeriö. <<https://tem.fi/-/kivihiilen-energiakayton-vuonna-2029-kieltava-laki-voimaan-huhtikuun-alussa>>. Luettu 6.11.2024.
 - 16 Sähkösuodatin. Verkkoaineisto. FinService A&C ay. <<https://www.fin-service.fi/>>. Luettu 8.10.2024.
 - 17 Rikinpoistolaitoksen käyttö- ja hoito-ohjeet. Yrityksen sisäinen materiaali.
 - 18 Koikkalainen, Eino. Prosessinohitaja, Martinlaakson voimalaitos. Puhelinkeskustelu. 8.11.2024.
 - 19 Ympäristölupa ESAVI/48896/2023. 2024. Aluehallintovirasto. Yrityksen sisäinen materiaali.
 - 20 Emissions flue gas dew point. 2020. Verkkoaineisto. Xi'an Dingyan Technology Co., Ltd. <<https://www.dycems.com/info/emissions-flue-gas-dew-point-47170119.html>>. Luettu 30.11.2024.
 - 21 Biohiili. Verkkoaineisto. Bioenergia Ry. <<https://www.bioenergia.fi/biohiili/>>. Luettu 16.9.2024.
 - 22 Biohiili. Verkkoaineisto. Carbons. <<https://carbons.fi/biohiili/>>. Luettu 16.9.2024.
 - 23 Green steel is now possible. Verkkoaineisto. Airex Energy. <<https://airex-energy.com/products/biocarbon/>>. Luettu 20.9.2024.

- 24 Mäki-Petäjä, Päivi. 2024. Suomalaisyritys valmistaa hittituote biohiiltä aivan uudella tavalla: "Markkina kasvaa hillitöntä vauhtia". Verkkoaineisto. MTV Uutiset. <<https://www.mtvuutiset.fi/artikkeli/suomalaisyritys-tahtaa-valmistustekniikallaan-maailmalle-biohiilen-markkina-kasvaa-hillitonta-vauhtia/9051218>>. Luettu 19.12.2024
- 25 Sonninen, Heikki. Biohiilipelletti. Verkkoaineisto. Torrec Oy. <https://www.punkalaidun.fi/punkalaidun_nettiliitetiedostot/editori_materiaali/17952.pdf>. Luettu 25.9.2024.
- 26 Biopolttoaineiden lämpöarvoja. 2021. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/bioenergia/tietolahteita/biopolttoaineiden_lampoarvoja>. Luettu 25.9.2024
- 27 Can Coal be Replaced with Biomass Briquettes? 2022. Verkkoaineisto. BiofuelCircle. <<https://www.biofuelcircle.com/blog/can-coal-be-replaced-with-biomass-briquettes/>>. Luettu 6.10.2024.
- 28 More, Aboli. 2024. Black Pellets Market Size to Reach USD 376.34 Mn by 2033 | CAGR 15.3%. Verkkoaineisto. Markeu.us. <<https://www.news.market.us/black-pellets-market-news/>>. Luettu 6.10.2024.
- 29 Carlson C, Ebben A. Biocoal from Biomass: An Emerging Opportunity for Renewable Energy. Verkkoaineisto. Feeco International. <<https://feeco.com/biocoal-biomass-emerging-opportunity-renewable-energy/>>. Luettu 7.10.2024.
- 30 Biohiiliala lyömässä läpi – ratkaisuja tarjotaan kestävyysmurrokseen. 2024. Verkkoaineisto. Bioenergia. <<https://www.bioenergia.fi/2024/09/25/biohiiliala-lyomassa-lapi-ratkaisuja-tarjotaan-kestavyysmurrokseen/>>. Luettu 10.10.2024
- 31 Biohiili on askel kohti viihtyisämpää ja kestävämpää kaupunkia. 2023. Verkkoaineisto. Aalto Yliopisto. <<https://www.aalto.fi/fi/uutiset/biohiili-on-askel-kohti-viihtyisampaa-ja-kestavampaa-kaupunkia>>. Luettu 14.10.2024.
- 32 Pyrolyysi mahdollistaa materiaalien kierrätyksen kasvualustoihin. 2024. Verkkoaineisto. Kaakkois-Suomen Ammattikorkeakoulu. <<https://read.xamk.fi/2024/metsa-ymparisto-ja-energia/pyrolyysi-mahdollistaa-materiaalien-kierratyksen-kasvualustoihin/>>. Luettu 14.10.2024.
- 33 Oja, Miia. Mitä biohiili on ja mihin sitä käytetään? 2023. Verkkoaineisto. Utajärven yrityspuisto. <<https://utajarvenyrityspuisto.fi/mita-biohiili-on-ja-mihin-sita-kaytetaan/>>. Luettu 14.10.2024.

- 34 Heikkinen, Elisa-Maria. Biohiilen jatkohyödyntäminen maanparannusaineena huleveden suodatuksen jälkeen. 2021. Opinnäytetyö. Itä-Suomen yliopisto. <https://erepo.uef.fi/bitstream/handle/123456789/25397/urn_nbn_fi_uef-20210818.pdf>. Luettu 14.10.2024.
- 35 Amalina F, Razak A, Krishan S, Sulaiman H, Zularisam A.W, Nasrullah M. 2022. Biochar production techniques utilizing biomass waste-derived materials and environmental applications. Verkkoaineisto. ScienceDirect. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772416622000900>>. Luettu 31.10.2024.
- 36 Leppäkoski, Lauri. 2021. Pyrolyysituotteiden monet käyttökohteet. Verkkoaineisto. LAB Open. <<https://www.labopen.fi/lab-pro/pyrolyysituotteiden-monet-kayttokohteet/>>. Luettu 17.10.2024.
- 37 Bruun, Anni. 2019. Bioöljyn käyttökohteet ja vaikutukset kannattavuuteen. Opinnäytetyö. Kaakkois-Suomen Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/166545/Anni_Bruun.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. Luettu 17.10.2024.
- 38 Torrefaction. Verkkoaineisto. Bioenergy Europe. <<https://bioenergyeurope.org/glossary/torrefaction/>>. Luettu 24.10.2024.
- 39 Kasveista kehitetään uusia materiaaleja. 2020. Verkkoaineisto. VTT. <<https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/kasveista-kehitetaan-uusia-materiaaleja>>. Luettu 24.10.2024.
- 40 Torrefioitu biomassa: Puhtaampi energianlähde. Verkkoaineisto. Joensuu Biocoal. <<https://www.joensuubiocoal.fi/torrefioitu-biomassa>>. Luettu 24.10.2024.
- 41 Hallikainen, Tiia. 2021. Biomassan esikäsittelyprosessit ennen polttoa voimalaitoksella. Kandidaatintyö. Lappeenrannan-Lahden Teknillinen Yliopisto. <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/163166/Kandidaatin-tyo_Hallikainen_Tiia.pdf?sequence=1>. Luettu 24.10.2024.
- 42 Tumuluru J, Sokhansanj S, Hess R, Wright C.T, Boardman R.D. 2011. A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. Verkkoaineisto. Mary Ann Liebert, Inc. <<https://www.liebertpub.com/doi/epdf/10.1089/ind.2011.7.384>>. Luettu 2.11.2024.
- 43 Tumuluru J, Ghiasi B, Soelberg N.R, Sokhansanj S. 2021. Biomass Torrefaction Process, Product Properties, Reactor Types, and Moving Bed Reactor Design Concepts. Verkkoaineisto. Frontiers.

- <<https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2021.728140/full>>. Luettu 2.11.2024.
- 44 Ghosh, S.B. 2015. The use of biobased nanofibres in composites. Verkkoaineisto. ScienceDirect. <<https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/steam-explosion>>. Luettu 4.11.2024.
- 45 Stem explosion for biomass pre-treatment. PDF-verkkoaineisto. Danish Technological Institute. <https://www.teknologisk.dk/_media/52681_RK%20report%20steam%20explosion.pdf>. Luettu 7.11.2024.
- 46 Abelha P, Leiser S, Pels J.R, Cieplik, M.K. 2022. Combustion properties of upgraded alternative biomasses by washing and steam explosion for complete coal replacement in coal-designed power plant applications. Verkkoaineisto. ScienceDirect. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544222004492>>. Luettu 7.11.2024.
- 47 Haapala, Tero. 2022. Biomassan rikkivapaat esikäsittely- ja kuidutusmenetelmät. Pro-gradu tutkielma. Jyväskylän yliopisto. <<https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/81940/1/URN%3ANBN%3Afi%3Aju-202206223546.pdf>>. Luettu 11.11.2024.
- 48 Pourmakhdomi, Amir Abbas. 2014. Comparison of energy balances of steam explosion and torrefaction technologies. Pro-gradu tutkielma. Lappeenrannan yliopisto. <<https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/102130/Comparison%20of%20energy%20balances%20of%20steam%20explosion%20and%20torrefaction%20technologies.pdf?sequence=4&isAllowed=y>>. Luettu 11.11.2024.
- 49 Global coal demand saw another all-time high in 2023. 2024. Verkkoaineisto. International energy agency: IEA. <<https://www.iea.org/reports/coal-mid-year-update-july-2024/demand>>. Luettu 12.12.2024.
- 50 How much coal does the world use? 2024. Youtube video. International energy agency: IEA. 2024. <<https://www.youtube.com/watch?v=g2QPfDNTaac>>. Katsottu 12.12.2024.
- 51 The Largest Industrial Scale Production Plant in Europe. Verkkoaineisto. Joensuu Biocoal. <<https://www.joensuubiocoal.fi/en>>. Luettu 13.12.2024.
- 52 Vuorinen, Laura. 2014. Biohiilen teknistaloudelliset käyttömahdollisuudet. Opinnäytetyö. Jyväskylän Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/78955/Vuorinen_Laura.pdf?sequence=1>. Luettu 9.12.2024.

- 53 Historical prices for coal. Verkkoaineisto. Markets Insider. <<https://markets.businessinsider.com/commodities/coal-price>>. Luettu 9.12.2024.
- 54 Luukko, Kaj. 2019. Päästöissä on eroja. Verkkoaineisto. Helen. <<https://www.helen.fi/blogi/2019/p%C3%A4st%C3%A4st%C3%B6iss%C3%A4-on-eroja>>. Luettu 9.12.2024.
- 55 EU Carbon Permits. Verkkoaineisto. Trading Economics. <<https://tradingeconomics.com/commodity/carbon>>. Luettu 9.12.2024.
- 56 Korpijärvi, K; Björnström, M; Karlsson, M; Raitila, J; Virkkunen, M; Hurskainen, M. 2021. Biohiilen valmistus ja käyttö turvetta korvaavana tukipolttoaineena bioenergian tuotannossa. Tutkimusraportti. VTT. <https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/52613617/VTT_Tutkimusraportti_BioTur21_VTT_R_717_21_Final.pdf>. Luettu 10.12.2024.
- 57 Sähkön, maakaasun, biokaasun, polttoturpeen, kivihiilen ja mäntyöljyn verotaulukot. Verkkoaineisto. Vero. <<https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteisot/verot-ja-maksut/valmisteverotus/sahkovero/verotaulukot/>>. Luettu 12.2.2024.
- 58 More, Aboli. 2024. Black Pellets Market Size to Reach USD 376.34 Mn by 2033 | CAGR 15.3%. Verkkoaineisto. Market.us News. <<https://www.news.market.us/black-pellets-market-news/>>. Luettu 21.11.2024.
- 59 Mäkelä, Tami. 2024. Koepolttosuunnitelma. Vantaan Energia Oy. Yrityksen sisäinen materiaali.
- 60 Ympäristölupa ESAVI/48896/2023. 2024. Aluehallintovirasto. Yrityksen sisäinen materiaali.
- 61 Masalin, S; Ojala, T. 2024. VE biohiilen koeajoraportti. Sumitomo SHI FW. Yrityksen sisäinen materiaali.
- 62 Koepolttopäiväkirja vko 11. Vantaan Energia Oy. Yrityksen sisäinen materiaali.
- 63 Bussman W.R; Baukal C.E. 2009. Ambient conditions impact CO and NOx emissions: part II. Verkkoaineisto. <<https://www.digitalrefining.com/article/1000637/ambient-conditions-impact-co-and-nox-emissions-part-ii>>. Luettu 18.10.2024.

- 64 Sulfur Oxides (SOx) Emissions From Coal. Verkkoaineisto. National Energy Technology Laboratory. <<https://netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/sox-emissions>>. Luettu 18.10.2024.
- 65 Entistä vähemmän päästöjä. 2016. Verkkoaineisto. Helen Oy. <<https://www.helen.fi/blogi/2015/entista-vahemman-paastoja>>. Luettu 17.12.2024.
- 66 Laimio, Johanna. Laborantti, Martinlaakson voimalaitos. Sähköpostikeskustelu. 25.11.2024.

Hiilimylyyn kantoilma

ENNAKKOTIETOJA

KANTOILMAN OMINAISUUDET		
Lämpötila	Tiheys	
10 C	1,246	kg/m ³
20 C	1,204	kg/m ³
30 C	1,164	kg/m ³
40 C	1,127	kg/m ³
50 C	1,092	kg/m ³
60 C	1,059	kg/m ³
70 C	1,028	kg/m ³
80 C	0,9994	kg/m ³
90 C	0,972	kg/m ³
100 C	0,9461	kg/m ³
140 C	0,8542	kg/m ³
200 C	0,7459	kg/m ³
250 C	0,6746	kg/m ³

NTP OLOSUhteet (Nm ³)	
P =	1,01325 bar
T =	293,15 K
ρ =	1,204 kg/m ³

MYLLYN ENNAKKOTIEDOT	
PA leijutus-pinta-ala	7,411 m ²
Virtausnopeus väh.	1 m/s

Voidaan tarvittaessa interpoloida 200-250C

ESIMERKKILASKU

Kantoilma NTP-olosuhteissa (DNAuse):

Ilman tilavuusvirta =	8 Nm ³ /s
Tiheys @20 C =	1,204 kg/m ³
Massavirta (teor.) =	9,632 kg/s

Kantoilma todellinen (~230 MW hiiliteholla):

Lämpötila =	250 C
Tiheys @ 250C =	0,6746 kg/m ³
Myllyn paine-ero =	50 mbar

Kantoilman todellinen tilavuus- ja massavirta sekä virtausnopeus:

Sovelletaan kaasujen tilanyhtälöä:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Todellinen tilavuusvirta:

$$V_2 = V_1 \frac{P_1 T_2}{P_2 T_1} = 8 \text{ Nm}^3/\text{s} * \frac{101325 \text{ Pa} * 523,15 \text{ K}}{96325 \text{ Pa} * 293,15 \text{ K}} = 15,018 \text{ m}^3/\text{s}$$

Todellinen massavirta:

$$\dot{m} = \rho Q = 0,6746 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 15,018 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 10,131 \text{ kg/s} \quad (Q = V_2)$$

Todellinen virtausnopeus annetulla pinta-alalla:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{15,018 \text{ m}^3/\text{s}}{7,411 \text{ m}^2} = 2,03 \text{ m/s} \quad (Q = V_2)$$

NTP		TODELLINEN	
P1	101325 Pa	P2	96325 Pa
T1 (20C)	293,15 K	T2 (250C)	523,15 K
ρ1	1,204 kg/m ³	ρ2	0,6746 kg/m ³
V1	8 Nm ³ /s	V2	? m ³ /s

KANTOILMAN TARVE NYKYISELLÄ VIRTAAUSNOPEUDELLA JA ALHAISEMMALLA LÄMPÖTILALLA

Määritetään kantoilmapuhaltimen tuottaman tilavuusvirran tarve normikuutioina:

Kantoilman lämpötila:	80 C	Nykyinen kantoilman virtausnopeus:	2,03 m/s
Ilman tiheys:	0,9994 kg/m ³	Ilmavirtauksen pinta-ala myllyssä:	7,411 m ²
Kantoilman massavirta (tod.):	15,009 kg/s		
Kantoilman tilavuusvirta (tod.):	15,018 m ³ /s		

Kantoilman tilavuusvirta normikuutioina valitulla ilman lämpötilalla:

$$V_1 = V_2 \frac{P_2 T_1}{P_1 T_2} = 11,85 \text{ Nm}^3/\text{s}$$

KANTOILMAN TARVE ALHAISEMMALLA VIRTAAUSNOPEUDELLA JA LÄMPÖTILALLA

Lasketaan vielä että millä ilman lämpötilalla päästään min. 1 m/s virtausnopeuteen (kun kantoilmapuhaltimen max. 8 Nm³/s)

Kantoilman lämpötila:	80 C	Tavoiteltu kantoilman virtausnopeus:	1,36 m/s	(syötä käsin ≥ 1,0)
Ilman tiheys:	0,9994 kg/m ³	Ilmavirtauksen pinta-ala myllyssä:	7,411 m ²	
Kantoilman massavirta (tod.):	10,073 kg/s			
Kantoilman tilavuusvirta (tod.):	10,079 m ³ /s			

Kantoilman tilavuusvirta normikuutioina valitulla ilman lämpötilalla:

$$V_1 = V_2 \frac{P_2 T_1}{P_1 T_2} = 7,95 \text{ Nm}^3/\text{s}$$

Biohiilen jauhatus

Näytepiste:	HM 2
pvm	12.3.
klo	15:28-15:53
näyte (g)	25,4

Seulonta aika	10 min
Amplitudi	1,5 mm

	Paino (g)			seulalle jäänyt %	Seulan läpäissyt %
	tyhjä seula	seula + näyte	näyte		
10 mm			0	0,0	100,0
6,3 mm			0	0,0	100,0
2 mm			0	0,0	100,0
1,6 mm			0	0,0	100,0
1 mm	315	315,1	0,1	0,4	99,6
0,5 mm	302,3	302,6	0,3	1,2	98,4
0,315 mm	270,2	271,2	1	3,9	94,5
0,1 mm	241,2	254	12,8	50,4	44,1
0,090 mm	276,6	281,3	4,7	18,5	25,6
0,075 mm	272,6	277,2	4,6	18,1	7,5
pohja	340	342,3	2,3	9,1	9,1
	Summa			25,8	101,6

Biohiilen jauhatus

Näytepiste:	HM1
pvm	13.3.
klo	12:04-12:30
näyte (g)	25,5

Seulonta aika	10 min
Amplitudi	1,5 mm

	Paino (g)			seulalle jäänyt %	Seulan läpäissyt %
	tyhjä seula	seula + näyte	näyte		
10 mm			0	0,0	100,0
6,3 mm			0	0,0	100,0
2 mm			0	0,0	100,0
1,6 mm			0	0,0	100,0
1 mm	314,7	314,9	0,2	0,8	99,2
0,5 mm	301,9	302,8	0,9	3,5	95,7
0,315 mm	270,4	272,9	2,5	9,8	85,9
0,1 mm	241,1	254,3	13,2	51,8	34,1
0,090 mm	277,3	282,5	5,2	20,4	13,7
0,075 mm	272,3	275,1	2,8	11,0	2,7
pohja	340	341	1	3,9	3,9
	Summa			25,8	101,2

Biohiilen jauhatus

Näytepiste:	HM1
pvm	13.3.
klo	14:41-15:18
näyte (g)	25,6

Seulonta aika	10 min
Amplitudi	1,5 mm

	Paino (g)			seulalle jäänyt %	Seulan läpäissyt %
	tyhjä seula	seula + näyte	näyte		
10 mm			0	0,0	100,0
6,3 mm			0	0,0	100,0
2 mm			0	0,0	100,0
1,6 mm			0	0,0	100,0
1 mm	321,8	322	0,2	0,8	99,2
0,5 mm	276,4	278	1,6	6,3	93,0
0,315 mm	285	288,8	3,8	14,8	78,1
0,1 mm	258,2	270,5	12,3	48,0	30,1
0,090 mm	276,7	280,8	4,1	16,0	14,1
0,075 mm	272,2	275,8	3,6	14,1	0,0
pohja	340	340,7	0,7	2,7	2,7
	Summa			26,3	102,7

Biohiilen jauhatus

Näytepiste:	HM1
pvm	14.3.
klo	16:54-17:37
näyte (g)	26,4

Seulonta aika	10 min
Amplitudi	1,5 mm

	Paino (g)			seulalle jäänyt %	Seulan läpäissyt %
	tyhjä seula	seula + näyte	näyte		
10 mm			0	0,0	100,0
6,3 mm			0	0,0	100,0
2 mm			0	0,0	100,0
1,6 mm			0	0,0	100,0
1 mm	321,3	321,7	0,4	1,5	98,5
0,5 mm	276,8	278,6	1,8	6,8	91,7
0,315 mm	284,8	289,5	4,7	17,8	73,9
0,1 mm	258,2	271,4	13,2	50,0	23,9
0,090 mm	277,4	280,5	3,1	11,7	12,1
0,075 mm	272,4	274,6	2,2	8,3	3,8
pohja	340,1	340,7	0,6	2,3	2,3
	Summa			26	98,5

Biohiilen jauhatus

Näytepiste:	HM2
pvm	14.3.
klo	20:16-20:57
näyte (g)	25,3

Seulonta aika	
Amplitudi	

	Paino (g)			seulalle jäänyt %	Seulan läpäissyt %
	tyhjä seula	seula + näyte	näyte		
10 mm			0	0,0	100,0
6,3 mm			0	0,0	100,0
2 mm			0	0,0	100,0
1,6 mm			0	0,0	100,0
1 mm	314,7	314,8	0,1	0,4	99,6
0,5 mm	302	302,9	0,9	3,6	96,0
0,315 mm	270,4	273,1	2,7	10,7	85,4
0,1 mm	241,3	254,7	13,4	53,0	32,4
0,090 mm	277,2	283,8	6,6	26,1	6,3
0,075 mm	272,4	274,8	2,4	9,5	-3,2
pohja	245,4	245,6	0,2	0,8	0,8
	Summa			26,3	104,0