

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Otto Nisula
Olli Tukiainen

PYROLYYSILAITTEISTON SUUNNITTELU JA TOTEUTUS

Opinnäytetyö
Helmikuu 2017



OPINNÄYTETYÖ
Helmikuu 2017
Kone- ja tuotantotekniikan
koulutusohjelma

Karjalankatu 3
80230 JOENSUU
013 260 600

Tekijät
Otto Nisula, Olli Tukiainen

Nimeke
Pyrolyysilaitteiston suunnittelu ja toteutus

Toimeksiantaja
Karelia-amk

Tiivistelmä

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella ja toteuttaa laitteisto, jolla voidaan havainnollistaa pyrolyysiprosessia opetuskäytössä. Tavoitteena oli tehdä laitteisto, joka on helppokäyttöinen, havainnollinen ja turvallinen. Pyrolyysi tarkoittaa biomassan lämpökemiallista hajoamista vähähappisessa ympäristössä. Työ toteutettiin Karelia-ammattikorkeakoulun toimeksiannosta.

Työssä tutustuttiin olemassa oleviin pyrolyysitekniikoihin, joiden pohjalta suunniteltiin laboratoriomittakaavaan soveltuva ratkaisu. Suunnitelmien perusteella hankittiin laitteiston toteutukseen vaadittavat osat ja laitteisto kokoonpantiin. Kokoonpanon jälkeen suoritettiin koekäyttöjä, joiden tulosten perusteella kokonaisuuteen tehtiin tarpeelliseksi katsottuja muutoksia.

Työn käytännön osan tuloksena saatiin toimiva, tavoitteita osittain vastaava laitteisto. Tavoitteista jäätin erityisesti käytettävyyden osalta polttimeen liittyvissä ratkaisuisissa. Opinnäytetyön lopussa on esitetty pohdintaa ja parannusehdotuksia laitteiston toimintaan ja käytettävyyteen. Työn tulosten avulla on mahdollista perehtyä pyrolyysiprosessiin käytännönläheisesti.

Kieli

suomi

Sivuja 47

Liitteet 4

Asiasanat

pyrolyysi, energiatekniikka, biomassa, puukaasutin



THESIS
February 2017
**Degree Programme in Mechanical and
Production Engineering**
Karjalankatu 3
FI 80230 JOENSUU
FINLAND
013 260 600

Authors
Otto Nisula, Olli Tukiainen

Title
Design and Manufacturing of Pyrolysis Equipment

Commissioned by
KUAS

Abstract

The aim of this thesis was to design and manufacture a device for demonstrating a pyrolysis process. The goal was to create a device that is easy to use, illustrative and safe. Pyrolysis refers to thermal decomposition of organic material in an oxygen poor environment. The assignment was given by Karelia University of Applied Sciences.

A laboratory scale device was designed from the basis of existing pyrolysis techniques. On the basis of the design, necessary parts were purchased and the device was assembled. After the assembly a series of trial runs were conducted and necessary alterations of the device were made.

As a result of the practical part of the thesis, a functional device was produced. However, some of the original goals were not achieved. Especially usability of the gas burner was insufficient. Notes and suggestions for improvements are presented at the end of this thesis. Using the results of this thesis it is possible to study pyrolysis in a practical way.

Language

Pages 47

Finnish

Appendices 4

Keywords

pyrolysis, energy technology, biomass, wood gasifier

Sisältö

1	Johdanto	5
2	Pyrolyysitekniikka.....	5
2.1	Pyrolyysiprosessin historia	5
2.2	Historia	7
2.3	Reaktiotuotteet.....	7
2.3.1	Kiinteät reaktiotuotteet	8
2.3.2	Nestemäiset reaktiotuotteet	8
2.3.3	Kaasumaiset reaktiotuotteet	10
2.4	Pyrolyysireaktorit tyyppittäin	10
2.4.1	Kiinto/liikkuva-petireaktori	11
2.4.2	Leijupetireaktori	11
2.4.3	Kiertopetireaktori.....	12
2.4.4	Ablatiivinen reaktori	14
2.4.5	Ultranopea reaktori	14
2.4.6	Pyörivä kartio reaktori	15
2.4.7	Alipainereaktori	16
3	Suunnittelu.....	17
3.1	Reaktorityyppi	19
3.2	Reaktorin mitoitus	21
3.3	Käyttövoima	23
3.4	Lauhdutin	27
3.5	Laitteiston rakenne	31
3.5.1	Reaktori	31
3.5.2	Lauhdutin	35
3.6	Turvallisuus.....	36
4	Laitteiston toteutus.....	37
5	Koekäyttö.....	39
6	Pohdinta.....	43
	Lähteet.....	47

Liitteet

Liite 1	Riskienarviointilomake Fysikaaliset vaaratekijät
Liite 2	Riskienarviointilomake Tapaturmien vaarat
Liite 3	Piirustukset
Liite 4	Käyttöohje

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella ja valmistaa Karelia-ammattikorkeakoulun kemian laboratoriotöissä käytettäväksi pyrolyysilaitteisto. Laitteiston tarkoituksena oli demonstroida energia- ja ympäristötekniikan opiskelijoille pyrolyysiprosessia. Työn tilasi Karelia-ammattikorkeakoulun lehtori Esko Tiainen. Pyrolyysiprosessia oli aikaisemmin demonstroitu käyttämällä hyväksy lasista koeputkea. Ongelma koeputken kanssa toimiessa oli prosessin vaatima korkea lämpötila, joka aiheutti lähes poikkeuksetta koeputken rikkoutumisen. Tavoitteena oli tehdä laitteisto, joka on koeputken tavoin helppokäyttöinen ja havainnollinen, sekä kestää toistuvaa käyttöä.

Pyrolyysiprosessi on yhteiskunnallisessa mielessä mielenkiintoinen. Sen tuotteena saatavaa pyrolyysiöljyä voidaan käyttää korvaamaan raskasta polttoöljyä lämmöntuotannossa. Pyrolyysiöljyä on myös käytetty koeluontoisesti kaasuturbiinin ja dieselmoottorin polttoaineena (Fortum Talousvaliokunta 2013, 1). Pyrolyysissä puupolttoaineen energiatiheys kasvaa, mikä vähentää kuljetuskustannuksia. Pyrolyysiprosessin tuotteena myös saatava koksi muistuttaa ominaisuuksiltaan kivihiiltä, mikä helpottaa sen käyttöä kivihiilivoimalassa kivihiilen tilalla. (Havimo 2012.) Pyrolyysillä voidaan toisin sanoen korvata uusiutumattomia fossiilisia polttoaineita. On siis selvää, miksi pyrolyysi prosessina on tulevaisuutta ajatellen huomion arvoinen ja opiskelijoille tutustumisen arvoinen.

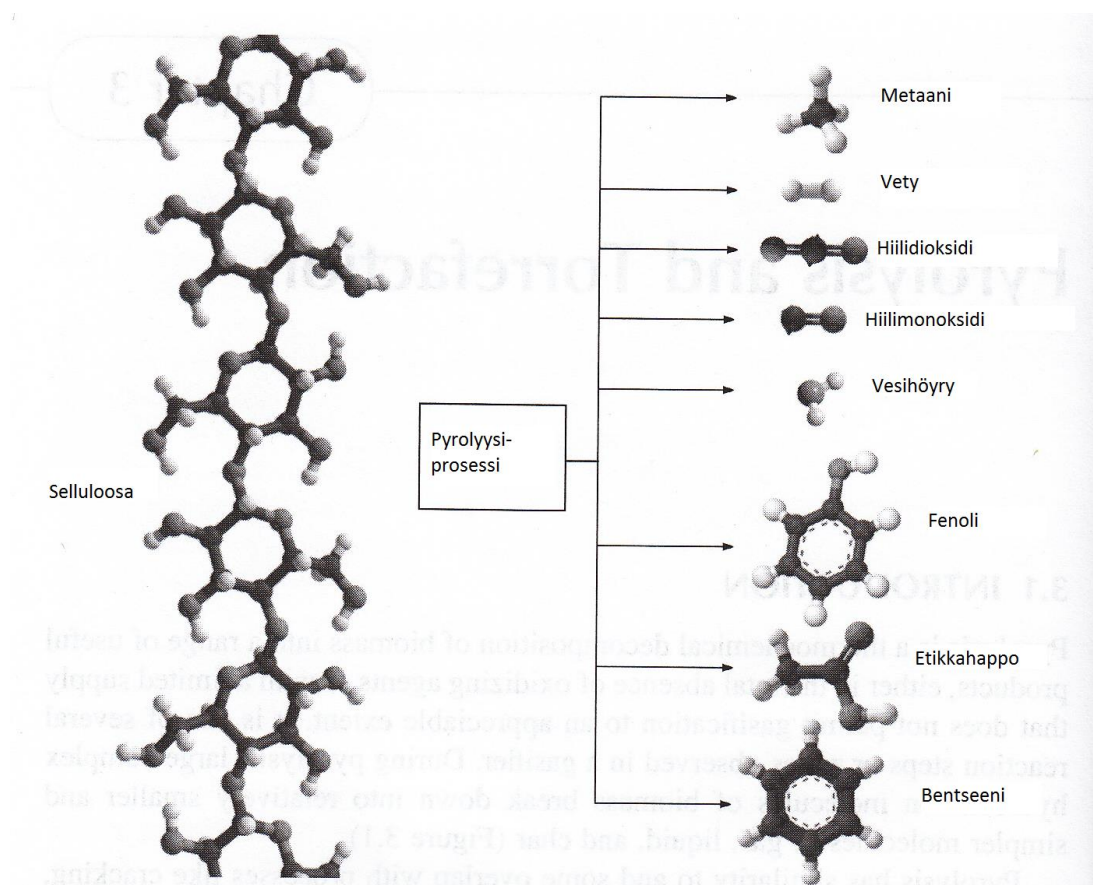
2 Pyrolyysitekniikka

2.1 Pyrolyysi

Pyrolyysi määritellään biomassan lämpökemialliseksi hajoamiseksi ympäristössä, jossa happea ei ole, tai sitä on niin vähän, ettei perinteistä palotapahtumaa merkittävässä määrin pääse syntymään. Määrittely rajoittaa pyrolyysin biomassan käsittelyyn, vaikka pyrolyysiprosessilla voidaan käsitellä myös jätemuovia (VTT 2011) ja kumijätettä (Aaltonen 2012). Tässä työssä pyrolyysin raaka-aineella viitataan biomassaan. Pyrolyysiprosessissa biomassan lämpötilaa nostetaan tietyllä nopeudella ns. pyrolyysilämpötilaan, jossa massaa pidetään määrätty aika. Pyrolyysilämpötila, eli prosessin korkein lämpötila on verrattain alhai-

nen, yleensä 300–650 °C. Lämmön vaikutuksesta biomassan sisältämät monimutkaiset hiilivetyketjut hajoavat suhteessa pienemmiksi molekyyleiksi. Kuvassa 1 on kuvattu selluloosamolekyylin hajoamista pienemmiksi hiilivedyiksi pyrolyysiprosessissa. Lämmityksen yhteydessä biomassasta haihtuu lisäksi siihen sitoutunutta vettä, joka sekoittuu muuhun prosessivirtaan. Pyrolyysi muistuttaa prosessina krakkausta, hiiletystä, kuivatislausta, destruktiivista tislausta ja termolyysiä. (Basu 2010, 65.)

Pyrolyysiprosessit voidaan jakaa hitaaseen ja nopeaan pyrolyysiin raaka-aineen lämmitysajan perusteella. Jos raaka-aineen lämpenemisaika pyrolyysilämpötilaan on pidempi kuin aika, jona sitä pidetään pyrolyysilämpötilassa, pyrolyysiprosessi on hidas. Pyrolyysin nopeus vaikuttaa prosessista saataviin reaktiotuotteisiin ja toisaalta vaadittavaan raaka-ainelaatuun. (Basu 2010, 71.)



Kuva 1. Selluloosamolekyylin hajoaminen pienemmiksi hiilivedyiksi pyrolyysiprosessissa. (Kuva mukaellen: Basu 2010, 66)

2.2 Pyrolyysiprosessin historia

Pyrolyysiprosessin hyödyntämisen ensi askeleina voidaan pitää puuhiilen tuotantoa. Puuhiiltä on käytetty luolamaalauksissa jo 30 000 eaa. Varsinaisesti puuhiilen tuotannon voidaan katsoa alkaneen 5000 eaa., jolloin sen avulla sulatettiin kuparia. Tuolloin hiiltä tuotettiin polttamalla puuta maakuopassa. Pinnassa ollut puu paloi normaalisti, kuopan alaosissa puu sen sijaan hiiltyi vähähappisissa olosuhteissa. Puuhiiltä käytettiin Euroopassa laajalti 1400-luvulta 1700-luvun vaihteeseen saakka masuunien energianlähteenä. Myöhemmin kivihiili korvasi puuhiilen lähes täysin. (Starck 2010, 11–12.)

Suomessa historiallisesti merkittävin pyrolyysituote on terva. Terva oli Suomessa tärkeä kauppatavara 1500-luvulta 1900-luvun taitteeseen. Tervaa valmistettiin useimmiten ns. tervahaudoissa. Tervahaudoissa puuta poltettiin happiköyhissä olosuhteissa. Haudan pohjalle hitaasti tihkuva neste, terva, kerättiin talteen. (ProAgria Kainuu 2016.)

Pyrolyysia on hyödynnetty historiassa nestemäisen tervan ja kiinteän puuhiilen valmistamisen lisäksi myös puun kaasutukseen. Puukaasua hyödynnettiin ensimmäistä kertaa 1870-luvulla maakaasun edeltäjänä katuvalaistukseen ja kaasuhellojen energianlähteenä. 1920-luvulla saksalainen insinööri Georges Imbert kehitti mobiilikäyttöön tarkoitetun puukaasuttimen. Imbertin puukaasutin oli massatuotannossa vuodesta 1931 alkaen. 1930-luvun lopussa puukaasukäyttöisiä autoja oli käytössä pelkästään Euroopassa noin 9000 kappaletta. (De Decker 2010.)

2.3 Reaktiotuotteet

Pyrolyysiprosessin reaktiotuotteet voidaan jakaa kolmeen pääryhmään:

- kiinteät: hiili, tuhka
- nestemäiset: tervat, raskaat hiilivedyt, vesi
- kaasumaiset: Hiilidioksidi, vesihöyry, häkä, asetyleeni, etyleeni, etaani, bentseeni yms.

Raaka-aineista, prosessin tyypistä ja prosessiolosuhteista riippuen reaktiotuotteiden keskinäinen osuus voi vaihdella. Esimerkiksi nestemäisten reaktiotuottei-

den osuus voi vaihdella muutamasta prosentista jopa 90 prosenttiin suhteessa raaka-aineen massaan (Basu 2010, 69, 74). Lopputuotteiden jakauma painoprosentteina on hitaassa pyrolyysissä keskimäärin 30 % nestettä, 35 % hiiltä ja 35 % kaasua ja nopeassa pyrolyysissä 75 % nestettä, hiiltä 12 % ja kaasua 13 %. (Ringer, Putsche & Scahill 2006, 5.)

2.3.1 Kiinteät reaktiotuotteet

Pyrolyysillä saadaan aikaan biohiiltä eli koksia, kun biomassasta lämmittämällä poistetaan haihtuvat ainesosat hapettomissa olosuhteissa muutamien satojen asteiden lämpötilassa, yleensä alle 700 °C:ssa (International Biochar Initiative 2016). Koksi on pääasiassa hiiltä (n. 85 %), lisäksi siinä on hieman happea ja vetyä. Koksi sisältää myös tuhkaa. Biomassasta valmistettu koksi sisältää vähemmän tuhkaa kuin esimerkiksi kivihiilestä valmistettu koksi. Biohiili on korkealaatuista päästöneutraalia biopolttoainetta, joka ominaisuuksiltaan vastaa kivihiiltä. Biohiili soveltuu kivihiilivoimalan polttoaineeksi, sillä sitä voidaan polttaa sellaisenaan korkean energia-arvonsa takia (Starck 2010, 9).

Jos pyrolyysistä halutaan mahdollisimman paljon kiinteitä reaktiotuotteita, tulee käyttää hidasta pyrolyysiä. Lämpötilan tulee olla alhainen, n. 400 °C ja pyrolyysiin käytetty aika on kokonaisuudessaan joitakin minutteja, ääritapauksissa jopa tunteja. (Ringer ym. 2006, 5, 16–17.)

2.3.2 Nestemäiset reaktiotuotteet

Pyrolyysireaktiosta muodostuvaa tiivistyvää kaasumaista reaktiotuotetta, toisin sanoen nestemäistä reaktiotuotetta, kutsutaan pyrolyysiöljyksi. Pyrolyysiöljyn koostumus riippuu vahvasti valmistusprosessista ja raaka-aineista. Taulukosta 1 nähdään, että tyypillinen nopealla pyrolyysillä tuotettu öljy koostuu suurimmalta osin hiilestä, hapesta ja vedystä. Molekyyalitasolla pyrolyysiöljyn voidaan katsoa koostuvan viidestä pääryhmästä: hydroksyylialdehydeistä, hydroksyyliketoneista, sokereista, karboksyylihapoista ja fenoleista. Öljyssä on lisäksi suhteellisen paljon (20–30 p-%) kemiallisesti liuennutta vettä. Liuennut vesi osaltaan alentaa pyrolyysiöljyn lämpöarvoa, sen ollessa tyypillisesti 13–18 MJ/kg. Vertailun vuoksi kevyen polttoöljyn lämpöarvo on 42,6 MJ/kg (Alakan-gas, Hurskainen, Laatikainen-Luntama & Korhonen 2016, 184). Pyrolyysiöljyn

viskositeetti on kevyen ja raskaan polttoöljyn välistä, tiheys sen sijaan on polttoöljyä korkeampi. Huomionarvoista pyrolyysiöljyn ominaisuuksissa on sen happamuus, pH:n ollessa tyypillisesti 2-3. (Ringer ym. 2006, 5, 16–17.)

Taulukko 1. Tyypillisen, nopealla pyrolyysillä valmistetun pyrolyysiöljyn ominaisuuksia. (Alakangas ym. 2016, 184)

Ominaisuus	Tyypillinen pyrolyysiöljy
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	13-18
pH	2-3
Vesipitoisuus, p-%	20–30
Tiheys (15 °C), kg/dm ³	1,10–1,30
Viskositeetti (40 °C), mm ² /s	15–35
Tuhka, p-%	0,01-0,1
O, p-% k.a.	35–40
C, p-% k.a.	50–60
H, p-% k.a.	7-8
N, p-% k.a.	<0,4
S, p-% k.a.	<0,05

Jos pyrolyysissä halutaan tuottaa mahdollisimman suuri nestemäinen jae, prosessin tulee tapahtua nopean pyrolyysin alueella. Pyrolyysilämpötilan tulee olla n. 500 °C ja biomassa tulee lämmittää mahdollisimman nopeasti tähän lämpötilaan. Suuresta lämmitysnopeudesta johtuen lämmönjohtumisen tulee olla no-

peaa. Tämän takaamiseksi biomassapartikkeleiden tulee olla mahdollisimman pieniä. Nopean lämmityksen jälkeen kaasumaiset reaktiotuotteet tulee jäähdyttää mahdollisimman nopeasti. Jos kaasua pidetään korkeassa lämpötilassa tarpeettoman kauan, molekyylit jatkavat edelleen hajoamista. Hajoamisesta seuraa keskimääräisen molekyylikoon pientyminen, mikä näkyy tiivistymättömien kaasujen osuuden nousuna ja vastaavasti tiivistyvien kaasujen eli nestemäisten reaktiotuotteiden osuuden pientymisenä. (Basu 2010, 75, 77, 90–91.)

2.3.3 Kaasumaiset reaktiotuotteet

Pyrolyysireaktiosta saatava kaasumainen tuote sisältyy tiivistyvistä kaasuista ja tiivistymättömistä kaasuista. Tiivistymätön kaasuseos sisältää pienen molekyyliainon omaavia kaasuja kuten hiilidioksidia, häkää, metaania, etaania ja eteeniä. Jos kaasumaisten reaktiotuotteiden määrää halutaan nostaa, pyrolyysin tulee tapahtua korkeassa lämpötilassa (yli 600 °C). Lämmitysnopeuden tulee olla alhainen ja kaasujen tulee viipyä korkeassa lämpötilassa kauan. Korkeassa lämpötilassa kaasut krakkaantuvat eli jatkavat hajoamistaan. Hajoamisen seurauksena osa tiivistyvistä kaasuista muuttuu tiivistymättömiksi lisäten näin lopullista kaasumaista jätettä. (Basu 2010, 70–71, 85.)

2.4 Pyrolyysireaktorit tyypettäin

Pyrolyysiprosessin hyödyntämiseen on kehitetty erilaisia järjestelmiä. Varsinainen pyrolyysi tapahtuu ns. reaktorissa. Reaktorin toimintaperiaatteen ja rakenteen mukaan järjestelmät voidaan karkeasti jakaa seuraaviin luokkiin:

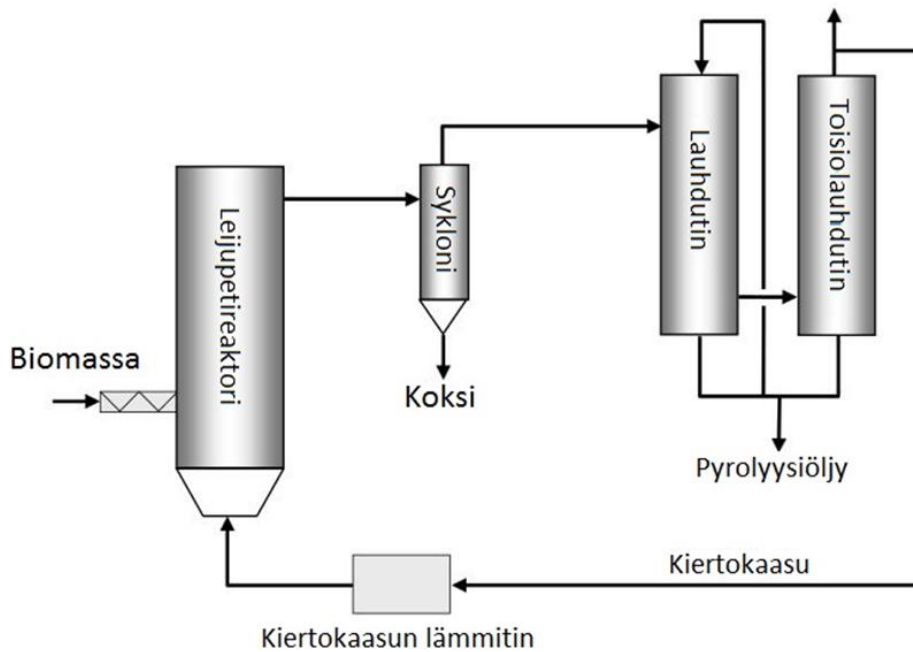
- liikkuva-/kiintopetireaktori
- leijupetireaktori
- kiertopetireaktori
- ablatiivinen reaktori
- ultranopea reaktori
- pyörivä kartio reaktori
- alipainereaktori

2.4.1 Liikkuva-/kiintopetireaktori

Kiinteällä tai liikkuvalla pedillä varustettu reaktori on rakenteeltaan yksinkertainen. Ensimmäiset pyrolyysireaktorit olivat kiinteällä pedillä varustettuja. Reaktori voi koostua yksinkertaisimmillaan pystyasennossa olevasta sylinterimäisestä biomassalla täytetystä säiliöstä, jossa on yläpäässä kavennus, jonka kautta reaktiotuotteet kulkeutuvat pois. Sylinterin alapäästä prosessiin tuodaan vaadittu lämpöenergia. Lämmitys voidaan hoitaa ulkoisella lämmönlähteellä tai vaihtoehtoisesti biomassan annetaan hallitusti palaa. Reaktiotuotteet virtaavat reaktorista luontaisen kaasujen laajenemisen seurauksena. Joissakin tapauksissa virtausta on tehostettu johtamalla inerttiä kaasua biomassan joukkoon. Johdettu kaasu puskee pyrolyysireaktiossa syntyneen kaasun ulos reaktorista. Reaktori on panostoiminen ja siltä osin soveltuu heikosti teolliseen tuotantoon. Pienen mittaluokan koelaitteisiin tai demonstraatiotarkoituksiin järjestelmä on toimiva. (Basu 2010, 85–87.)

2.4.2 Leijupetireaktori

Leijupetireaktori muistuttaa rakenteeltaan leijupetikattilaa, jossa raaka-ainetta poltetaan ilmavirran voimasta leijuvan hiekkapedin päällä. Pyrolyysikäytössä petihiekkaa ei kuitenkaan voi leijuttaa ilmalla, vaan on käytettävä inerttiä kaasua. Useimmissa tapauksissa käytetään erillisestä lähteestä saatavia savukaasuja. Lämpö prosessiin voidaan tuottaa joko polttamalla osa pyrolyysikaasuista pedissä tai vaihtoehtoisesti polttamalla polttoainetta erillisessä kattilassa, josta lämpö johdetaan pyrolyysireaktoriin petihiekkaan sitoutettuna. Petilämpötila on raaka-aineesta riippuen useimmissa tapauksissa 400–600 °C. Prosessinhallinnan kannalta on tärkeää, että reaktoriin syötettävä raaka-aine on tasalaatuista ja hienoksi murskattua (2–6 mm:n partikkelikoko). (Basu 2010, 87.)



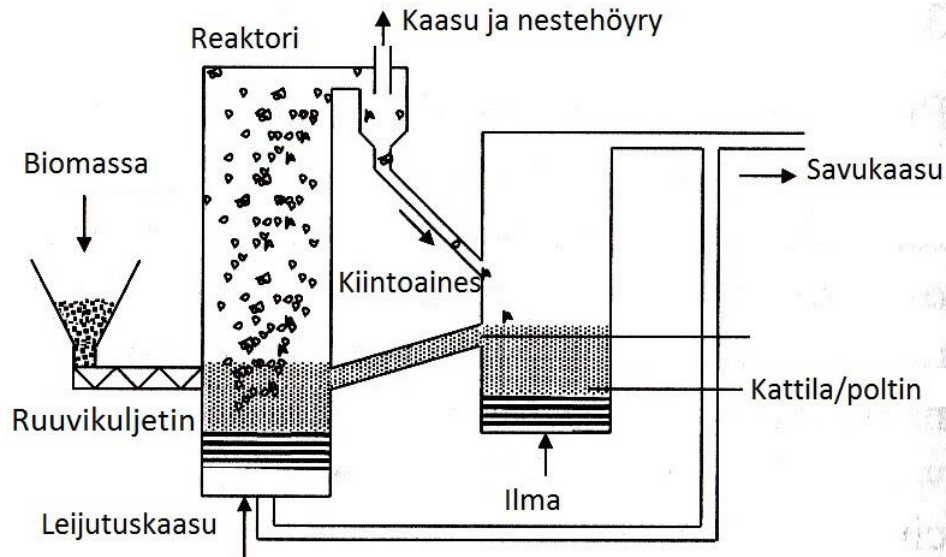
Kuva 2. Leijupetireaktorin periaatteellinen prosessikuvaus. (Kuva mukael-
len: Ringer ym. 2006, 9)

Kuvan 2 mukaisesti leijupetireaktori on rakenteeltaan kokonaisuudessaan monimutkaisempi kuin kiinto/liikkuva-petireaktori. Reaktiokaasun mukana kulkeutuva kiintoainekokovaatimus edellyttää tavallista monimutkaisemman murskausjärjestelmän. Rakenteestaan huolimatta reaktorityyppi on paljon käytetty, koska se sisältää kattilayhteyksistä ennalta tunnettua tekniikkaa. Tunnetusta tekniikasta johtuen leijupetireaktoreita pidetään yleisesti varmatoimisina. Leijupetireaktori on myös skaalattavissa suuremmaksi tuotantoyksiköksi ilman huomattavia ongelmia (Basu 2006, 87). Nämä ominaisuudet tekevät siitä hyvin teolliseen tuotantoon soveltuvan. (Ringer ym. 2006, 8–9.)

2.4.3 Kiertopetireaktori

Kiertopetireaktori on perustointaperiaatteeltaan leijupetireaktoria vastaava. Kiertopetireaktorissa hiekka ei kuitenkaan pysy leijupetireaktorin tapaisesti aaltoilevan pedin muodossa reaktorin alaosassa, vaan hiekka nousee savukaasujen ja biomassan tavoin reaktorin yläosaan saakka kuvan 3 mukaisesti. Ylä-

osassa materiaalivirta ohjataan sykloniin, jossa kiintoaines erottuu kaasumaisien prosessituotteiden jatkaessa edelleen käsiteltäviksi. Kiintoaines (petihiekka ja koksi) ohjataan syklonista erilliseen kattilaan, jossa prosessin vaatima lämpöenergia tuotetaan. Petihiekka siis kiertää järjestelmässä samalla siirtäen lämpöenergiaa pyrolysoitavaan biomassaan. (Basu 2006, 88.)



Kuva 3. Kiertopetireaktorin periaatteellinen prosessikuvaus. (Kuva mukaelen: Basu 2006, 86.)

Petihiekan kiertojärjestelmästä johtuen lämpötilan hallinta on leijupetireaktoria tarkempaa. Lämpötilan suuruutta pystytään hallitsemaan tarkasti. Lisäksi petihiekan liikkeestä johtuen lämpötilaerot tasaantuvat tehokkaasti, jolloin pyrolyysiprosessi pysyy eri osissa reaktoria suhteellisen yhdenmukaisena. Petihiekan suuresta nopeudesta johtuen myös biomassan virtausnopeus on suuri. Tästä johtuen reaktorissa voidaan saavuttaa leijupetireaktoriin verrattuna suurempi tuotos suhteessa reaktorin kokoon. Petihiekan kierrättäminen vaatii kuitenkin huomattavasti enemmän energiaa verrattuna leijupetireaktorin hiekan leijuttamiseen. (Basu 2006, 88.)

Kiertopetireaktorissa biomassan keskimääräinen aika varsinaisessa pyrolyysilämpötilassa on noin 0,5–1,0 sekuntia. Tästä johtuen biomassan optimaali-

nen partikkelikoko on 1–2 mm. Lämmön siirtyminen keskelle partikkelia vaatii aikaa, joten suuremmalla partikkelikoolla kunnollista pyrolyysia ei saavuteta. Vaadittu partikkelikoko johtaa erityisesti puupohjaisen raaka-aineen tapauksessa monimutkaiseen murskausjärjestelmään. Toinen ilmeinen heikkous kiertopetireaktorissa on hiekan aiheuttama rakenteiden abrasiivinen kuluminen. (Ringer ym. 2006, 10.)

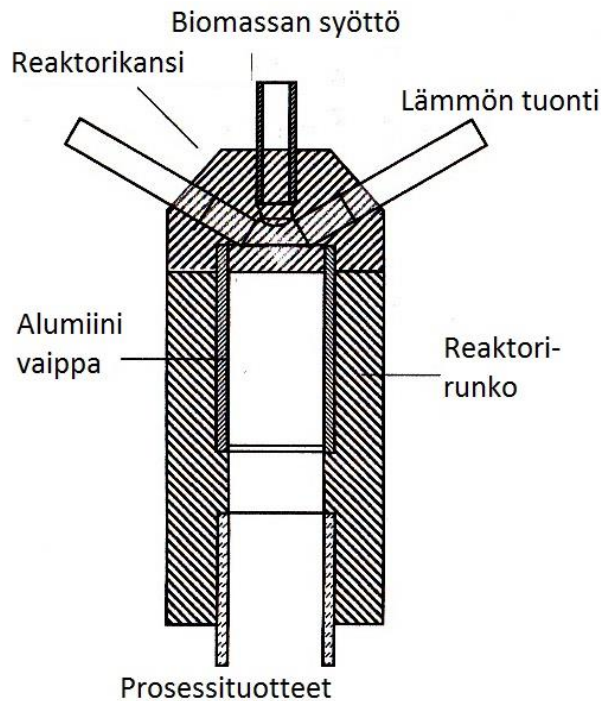
2.4.4 Ablatiivinen reaktori

Ablatiivinen pyrolyysi perustuu paineen ja lämmön yhteisvaikutukseen. Ablatiivinen pyrolyysi voidaan saavuttaa useilla erilaisilla tavoilla. Yleisesti ottaen biomassapartikkeleihin aikaansaadaan painevaikutus reaktoriseinämää vasten. Seinämän lämpötila pidetään n. 600 °C:ssa. Paineen ja lämmön yhteisvaikutuksesta partikkelin seinämän vastainen sivu alkaa pyrolysoitua. Painevaikutus voidaan aikaansaada esim. keskipakovoiman avulla liu'uttamalla partikkelia pitkien sylinterinmuotoista reaktoriseinämää suurella nopeudella. Partikkelien liike aikaansaadaan tässä tapauksessa inertillä kaasulla, jonka avulla partikkelit puhalletaan reaktoriin sen seinämän tangentin suunnassa. Pyrolyysin reaktiotuotteet puhalletaan kaasun avulla pois reaktorista. Reaktorissa voidaan käyttää biomassaa, jonka partikkelikoko on suurimmillaan jopa 20 mm. Suurista nopeuksista johtuen pyrolysoitavien partikkelien aiheuttama reaktorin kuluminen on huomattavaa. Lisäksi painevaikutuksen ylläpitämiseen vaadittavista nopeuksista johtuen reaktori ei ole välttämättä skaalattavissa teolliseen mittakaavaan. (Ringer ym. 2006, 11.)

2.4.5 Ultranopea reaktori

Ultranopean reaktorin toiminta perustuu biomassan pyrolysointiin hyvin korkealla lämmitysnopeudella. Tähän päästään esimerkiksi kaasuvirtauksen avulla. Reaktoriin syötetään biomassaa ja raaka-ainevirtaan ohjataan suurinopeuksinen kaasuvirtaus. Kuvan 4 mukaisessa kokoonpanossa kaasuvirta tuodaan reaktorin yläpäähän, jossa virtaus kohtaa syötettävän biomassan lähes koh-tisuorassa kulmassa. Lämpötilan ja virtauksen yhteisvaikutus saa aikaan pyrolyysin. Reaktorin lämpötila on tyypillisesti n. 650 °C syötettävän kaasun lämpötilan ollessa noin 750 °C. Joissakin tapauksissa myös hiekkaa on lisätty virtaukseen tehostamaan prosessia. Reaktori kykenee lämmittämään pyrolysoitavan

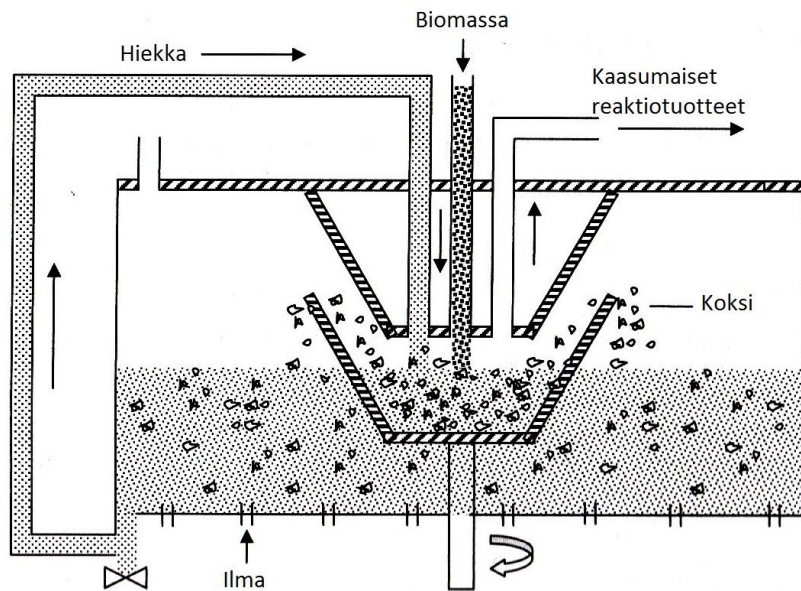
biomassan pyrolyysilämpötilaan erittäin nopeasti (n. 200 ms). Erittäin nopea lämmitys yhdistettynä nopeaan lauhdutukseen (n. 20 ms) mahdollistaa suhteessa suuren nestemäisen jakeen. Ultranopealla reaktorilla on saavutettu jopa 90 p-% nestemäisen jakeen osuus. (Basu 2006, 88.)



Kuva 4. Ultranopea reaktori. (Kuva mukaellen: Basu 2006, 86.)

2.4.6 Pyörivä kartio reaktori

Pyörivä kartio reaktorissa biomassa syötetään kuvan 5 mukaisesti pystyakselilla pyörivän kartion pohjalle. Kartioon syötetään samanaikaisesti hiekkaa, josta saadaan pyrolyysiprosessin vaatima lämpöenergia. Kartion pyörimisliike aiheuttaa syötettyyn materiaaliin keskipakovoiman, jonka voimasta kiintoainekse nousee kartion seinämää pitkin. Kiinteä aine tippuu kartion laidan yli kattilatilaan, jossa hiekka uudelleen lämmitetään ja pyrolyysissa syntynyt hiili poltetaan. Kaasumaiset prosessituotteet johdetaan kartion yläpäästä lauhdutettaviksi.



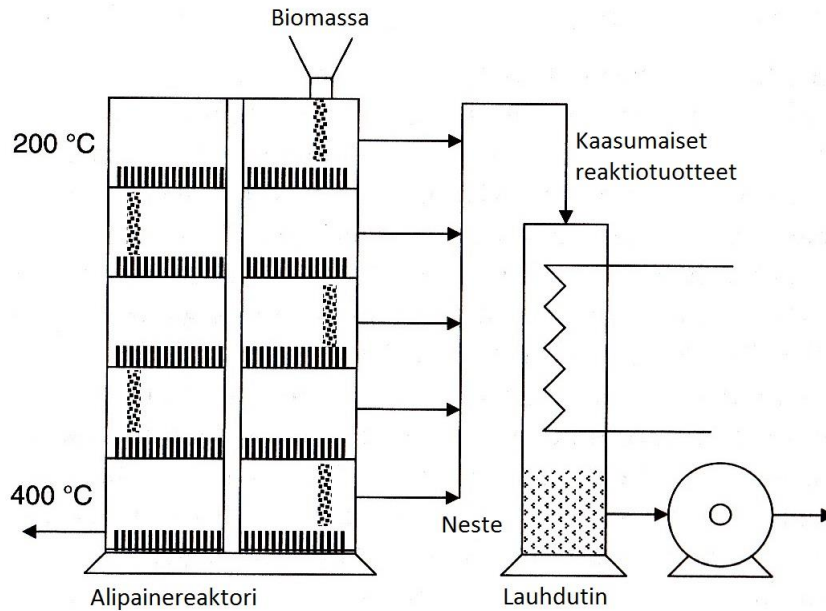
Kuva 5. Pyörivä kartio reaktorin periaatekuva. (kuva mukaellen: Basu 2006, 86.)

Vaikka pyörivä kartio reaktorissa kierrätetään hiekkaa, kuluminen on huomattavasti vähäisempää kuin kiertopetireaktorissa. Reaktorissa ei käytetä erillistä kaasua pyrolyysiprosessin lämmöntarpeeseen/prosessituotteiden kuljettamiseen. Tämä helpottaa pyrolyysin kaasu- ja nestejakeen jatkokäsittelyä. Reaktorityypin heikkoutena voidaan pitää rakenteen monimutkaisuutta ja erityisesti raskastekoisen kartion pyörittämiseen liittyviä rakenneratkaisuja. Kartion pyörimisnopeus on 300–1000 kierrosta minuutissa (Basu 2006, 89). Vaikka Hollannissa Twenten yliopiston kooreaktorissa on päästy 200 kg/h nestetuottoon, ei täyttä varmuutta reaktorityypin skaalattavuudesta teolliseen mittakaavaan ole. (Ringer ym. 2006, 13.)

2.4.7 Alipainereaktori

Alipainereaktori koostuu kuvan 6 mukaisesti päällekkäin asennetuista lämmitetyistä levyistä. Biomassa syötetään ylimmälle levyille, josta se mekaanisesti siirretään levy kerrallaan alemmalle tasolle. Levyjen lämpötila nousee ylhäältä alaspäin mentäessä: yläosassa lämpötila pidetään n. 200 °C:ssa ja alhaalla n. 400 °C:ssa. Koko reaktori pidetään alipaineisena pumpulla, joka imee prosessissa syntyvän kaasumaisen jakeen lauhduttimeen. Reaktorin käyntiolosuhteista johtuen prosessi toimii hitaan pyrolyysin alueella. Tästä johtuen lopputuotteista

30–50 % on kiinteää ainesta. Koska reaktorissa ei tarvita ollenkaan erillistä inerttiä prosessikaasua, reaktorissa tuotettu nestemäinen ja kaasumainen jae ovat erityisen puhtaita. (Basu 2006, 89.)



Kuva 6. Alipainereaktorin periaatekuva. (Kuva mukaellen: Basu 2006, 86.)

Alipainereaktoriin voidaan käyttää raaka-aineeksi suurempia partikkeleita kuin useimmissa muissa reaktorityypeissä, jopa 2–5 cm:n partikkelikoko on mahdollinen. Reaktorityypin suurimpana ongelmana ovat reaktorin sisällä tapahtuvan biomassan liikutteluun vaadittavien mekaanisten laitteiden haasteelliset käyttöolosuhteet. Alipaine reaktorissa aiheuttaa lisäksi kiinteän materiaalin syötölle ja poistolle hankalasti toteutettavia tiiviyksvaatimuksia. Nämä tekijät yhdistettynä alipainepumpun mahdolliseen vikaherkkyyteen tekevät reaktorityypistä haasteellisen teollista käyttöä silmällä pitäen. (Ringer ym. 2006, 12.)

3 Suunnittelu

Laitteiston suunnittelun lähtökohdina toimivat työn tilaajan esittämät toiveet ja ideat. Toisen lähtökohdan tarjosivat fysikaaliset rajoitteet niin toimintaympäristön kuin prosessin suhteen. Lisäksi työssä, joka on tarkoitus suunnittelun lisäksi valmistaa, myös kustannuksiin tuli kiinnittää erityistä huomiota. Myös turvalli-

suusnäkökulmat tuli pitää mielessä, sillä riippumatta laitteiston yksityiskohdista, prosessin yhteydessä ollaan tekemisissä potentiaalisesti syttymisherkkien kaasujen ja nesteiden kanssa.

Tilaaja Esko Tiaisen toiveissa oli, että pyrolyysilaitteiston rakenteen tuli olla niin yksinkertainen ja käytön niin nopeaa, että pyrolyysiprosessin demonstroiointi onnistuu oppitunnin aikana. Muutoin annettiin jokseenkin vapaat kädet toteutuksen suhteen. Tiainen toi lisäksi esille, että pyrolyysilaitteistoa oli tarkoitus käyttää vetokaapissa. Vetokaapin käyttö loi rajoitteita laitteiston ulkomitoille. Reaktorin ulkomitat rajasivat pois osan reaktorityypeistä, joita teoriaosiossa esiteltiin. Vetokaapin yhteydessä oli sähköpistokkeita sekä vesihana, mutta ei esimerkiksi mahdollisuutta paineilman käytölle.

Reaktoriin tarvittava lämpöenergia täytyi saada laboratoriossa käytössä olevista lähteistä, joita olivat sähkö ja nestekaasu. Vaihtoehtoinen tapa oli ottaa lämpöenergia reaktioon polttamalla käsiteltävää raaka-ainetta. Tämä on kuitenkin ensisijaiseksi lämmönlähteeksi ongelmallinen, sillä se lisää raaka-aineelta vaadittavia ominaisuuksia. Lisäksi prosessin hallinta vaikeutuu erityisesti alasajon osalta. Ongelmallista olisi myös pyrolyysin ja lämmittämiseen käytettävän palamisen välinen suhde, sillä liian suurella ilmamäärällä palaminen estäisi pyrolyysin reaktiotuotteiden keräämisen. Pyrolyysikaasun tiivistämisen lauhde-energia täytyy pystyä siirtämään lämmönvaihtimella joko ympäröivään ilmaan tai vesiyhteestä saatavaan veteen.

Laitteiston suunnittelussa tuli ottaa huomioon turvallisuusnäkökulmia. Jo ennen tarkempaa rakennesuunnittelua voitiin nähdä, että laitteistoon liittyy useita erilaisia huomionarvoisia tekijöitä. Koska pyrolyysiprosessi vaatii toimiakseen korkeita lämpötiloja, palovammariski on olemassa. Prosessin vähähappiset olosuhteet mahdollistavat häkäkaasun syntymisen, joten vaikka laitteistoa käytetään vetokaapissa, tulee asia huomioida. Lisäksi muitakin räjähdys-/paloherkkiä kaasuja voi prosessissa syntyä. Lämmönlähteen ominaisuuksiin ja käyttöolosuhteisiin pitää myös kiinnittää huomiota. Reaktorin käyttö täytyy myös pystyä keskeyttämään turvallisesti, vaikka reaktorissa olisi vielä hajoamatonta biomassaa.

3.1 Reaktorityyppi

Pyrolyysireaktorin suunnittelu aloitettiin reaktorityypin valinnalla. Valintakriteereinä reaktorityypin valinnassa käytettiin seuraavia ominaisuuksia:

- soveltuvuus pyrolyysin reaktiotuotteiden pientuotantoon
- rakenteellinen yksinkertaisuus
- valmistettavuus
- prosessin säädettävyys
- havainnollisuus
- kestävyys
- helppokäyttöisyys
- luotettavuus
- turvallisuus

Edellä listatuista ominaisuuksista valinnassa painotettiin lähtökohtaisesti soveltuvuutta pientuotantoon ja rakenteellista yksinkertaisuutta. Nämä ominaisuudet rajasivat käytännössä kaikki reaktorit, joissa käytetään erillistä hiekkaa lämmönsiirtoon, pois. Hiekan käyttäminen reaktorissa vaatii joko voimakkaan (inertin) kaasuvirtauksen tai monimutkaisia mekaanisia hiekan siirtoratkaisuja. Lisäksi hiekan käyttäminen reaktorissa tuo mukanaan rakenteiden abrasiivisen kulumisen. Seuraavissa pyrolyysireaktoreissa ei käytetä hiekkaa:

- alipainereaktori
- ultranopea reaktori
- ablatiivinen reaktori
- kiinto/liikkuva-petireaktori

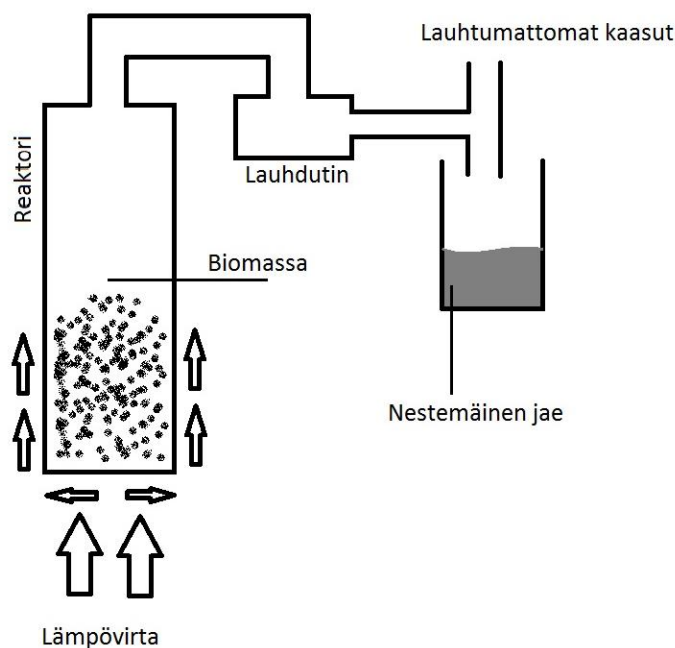
Näistä alipainereaktori on mekaanisesti monimutkainen ja siinä on useita vikaantumisherkkiä komponentteja. Jos otetaan vielä huomioon laitteiston tiiveyteen liittyvät haasteet, joista seuraa myös ilmeisiä turvallisuuteen liittyviä ongelmakohtia, on selvää, että reaktorityyppi ei sovellu projektiin.

Ablatiivinen reaktori, samoin kuin ultranopea reaktori vaativat toimiakseen suurinopeuksisia inertin kaasun virtauksia. Kaasuvirtausten tulee lisäksi olla lähellä pyrolyysilämpötilaa. Nämä tekijät vaikuttavat reaktorin teknisiin vaatimuksiin, erityisesti rakenteiden kulumisen muodostuu suureksi ongelmakohtaksi. Ult-

ranopea-reaktori soveltuu heikosti oppilaitoskäyttöön, jossa käyttö on satunnais- ta ja käytävissä on hyvin rajallisesti aikaa, sillä reaktori vaatii toimiakseen hy- vin hienoksi jauhattua ja kuivaa raaka-ainetta. Tiukat raaka-ainevaatimukset käytännössä tarkoittavat paljon aikaa vievää raaka-aineen esikäsittelyä, mikä vaikeuttaisi reaktorityypin käyttöä oppituntien puitteissa.

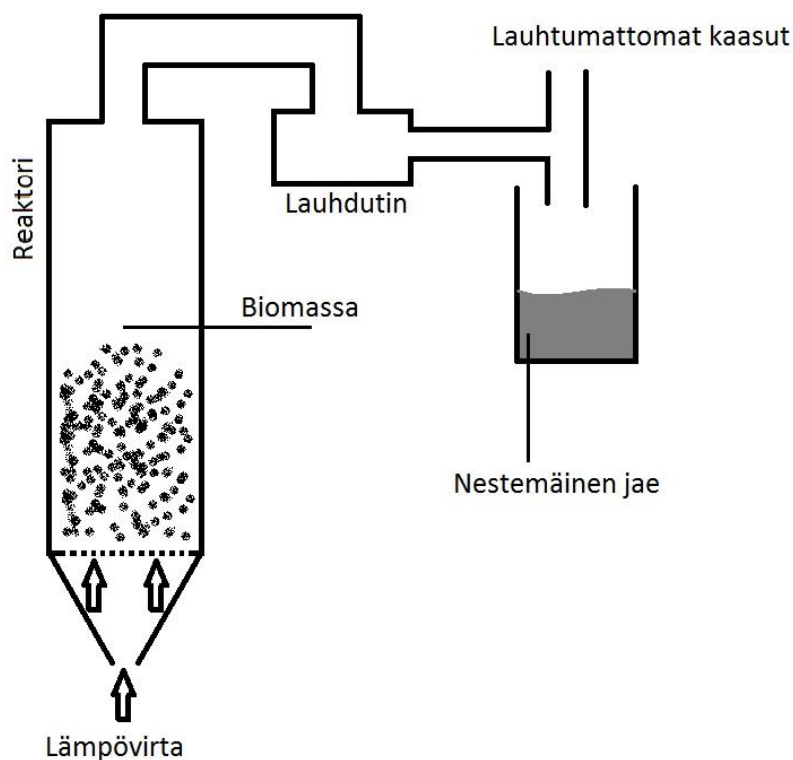
Jäljelle jäi kiinto/liikkuva-petireaktori, jonka kahta erilaista variaatiota lähdettiin suunnittelemaan. Molemmat vaihtoehdoista olivat panostoimisia kiintopetireak- toreja. Panostoimisuuteen päädyttiin, koska tarvetta jatkuvatoimiselle prosessil- le ei yksinkertaisesti nähty.

Ensimmäinen suunnitelluista vaihtoehdoista oli reaktori, jossa lämpöenergia siir- tyy energialähteestä raaka-aineeseen reaktorin pohjan ja seinämien kautta ku- van 7 mukaisesti. Tämän kaltaisessa reaktorissa pyrolyysi tapahtuu hapetto- missa olosuhteissa ja pyrolyysikaasut poistuvat reaktorista prosessissa syntyvi- en kaasujen luonnollisen laajenemisen ansiosta. Lämmönsiirto reaktorin pohjaa tai seinämää pitkin aiheuttaa huomattavia lämpörasituksia ja siten nostaa reak- torin materiaalin vaatimuksia.



Kuva 7. Panostoiminen kiintopetireaktori, jossa lämmönsiirto tapahtuu joh- tumalla reaktoriseinämän läpi.

Toinen vaihtoehto oli käyttää nestekaasupoltinta energialähteenä ja johtaa kuumat savukaasut reaktorissa raaka-ainemassan läpi kuvan 8 mukaisesti. Lämmönsiirto suoraan savukaasuista raaka-ainemassaan on tehokkaampaa ja tapahtuu paremmalla hyötysuhteella. Tämä edellyttää, että nestekaasu poltetaan lähes stoikiometrisellä seossuhteella, jolloin jäännöshappea ei jää savukaasuihin. Pyrolyysikaasut poistuvat reaktorista kaasujen luonnollisen laajenemisen ja savukaasujen aiheuttaman virtauksen ansiosta. Tämän kaltaista reaktoria on mahdollista käyttää perinteisen puukaasuttimen tavoin, jossa biomassaa poltetaan hallitusti.



Kuva 8. Panostoimisen kiintopetireaktorin periaatekuva, jossa lämmönsiirto tapahtuu palokaasujen avulla.

3.2 Reaktorin mitoitus

Reaktorin mitoitusperusteena käytettiin tilannetta, jossa raaka-aineena käytetään tuoretta kokopuuhaketta ja että lopputuotteena saatavaa nestemäistä jätettä saataisiin yhdellä panostuksella noin 1 dl. Tästä voitiin arvioida tarvittava panoksen määrä ja reaktorin tilavuus. Pyrolyysiöljyn tiheydeksi ρ_0 arvioitiin taulu-

kosta 1 1,2 kg/dm³. Pyrolyysiöljyn tilavuutta V vastaava massa m_n saadaan kaavalla 1.

$$m_n = V \cdot \rho_{\ddot{o}} \quad (1)$$

jossa m_n = pyrolyysiöljyn massa
 $\rho_{\ddot{o}}$ = pyrolyysiöljyn tiheys

$$m_n = 1,2 \text{ kg/dm}^3 \cdot 0,1 \text{ dm}^3 = 0,12 \text{ kg}$$

Lopputuotteiden jakauma painoprosenteina hitaassa pyrolyysissä on keskimäärin 30 % nestettä, 35 % hiiltä ja 35 % kaasua (Ringer ym. 2006, 5). Tarvittavan panoksen massa m_p saadaan kaavalla 2.

$$m_p = m_n / 0,3 \quad (2)$$

jossa m_n = pyrolyysiöljyn massa

$$m_p = 0,12 \text{ kg} / 0,3 = 0,4 \text{ kg}$$

Tuoreen puuhakkeen tiheys ρ_p on 50 %:n kosteudessa n. 300 kg/m³ (Bioenergiapörssi 2016). Panoksen tilavuus V_p saadaan kaavalla 3.

$$V_p = \frac{m_p}{\rho_p} \quad (3)$$

jossa m_p = tarvittavan panoksen massa
 ρ_p = puuhakkeen tiheys

$$V_p = \frac{0,4 \text{ kg}}{0,3 \text{ kg/l}} = 1,33 \text{ l}$$

Reaktoriin haluttiin jättää kohtuullisesti vapaata tilaa biomassan ja reaktorin yläosan välille, joten tilavuudeksi valittiin 2 l. Tyypillinen sylinterimäisen yläveto-

kaasuttimen mitoituksen nyrkkisääntönä on, että reaktorin korkeus on kolme kertaa halkaisijan suuruinen (Basu 2010, 207). Ylävetokaasutin on toiminnaltaan samankaltainen suunnitellun kiintopetireaktorin kanssa, joten vastaavaa mitoitusta käytetään myös suunniteltavaan laitteeseen. Reaktorin sisämittojen laskennassa käytettiin apuna Derive-laskentaohjelmaa. Mittasuhteella $h = 3 \cdot d$ reaktorin sisämittoiksi saatiin kuvan 9 mukaisesti $d = 94,7$ mm ja $h = 284,1$ mm.

```
#1: CaseMode := Sensitive
#2: InputMode := Word
#3: 
$$U = \frac{h \cdot (3.14 \cdot d)^2}{4}$$

#4: h := 3 · d
#5: U := 2 · 106
#6: SOLVE  $\left[ U = \frac{h \cdot (3.14 \cdot d)^2}{4}, d \right]$ 
#7: d = -47.34960558 - 82.01192258 · i √ d = -47.34960558 + 82.01192258 · i √ d = 94.69921116
```

Kuva 9. Reaktorin sisämittojen määrittäminen Derive-ohjelmalla.

3.3 Käyttövoima

Pyrolyysiprosessin energiantarvetta arvioitiin jakamalla prosessi neljään eri osaan:

- 1) Kostean hakkeen lämmittäminen huoneenlämmöstä (20 °C) 100 °C:een
- 2) Veden höyrystäminen
- 3) Kuivan hakkeen lämmittäminen pyrolyysilämpötilaan (600 °C)
- 4) Kuivan hakkeen pyrolyysi (kemiallisten sidosten rikkoutuminen)

Vesihöyryn lämmittämiseen vaadittavaa energiaa ei huomioida laskelmissa. Vesihöyryn oletetaan poistuvan reaktorista luontaisen kaasun laajenemisen ansiosta sitomatta suurissa määrin energiaa.

Kostean hakkeen lämmittämiseen huoneenlämmöstä 100 °C:seen vaadittu energiamäärä riippuu lämmitettävän materiaalin ominaislämpökapasiteetista. Tilannetta käsiteltiin tarkastelemalla erikseen vettä ja kuivaa haketta. Laskennas-

sa käytettiin hakkeen kosteutena 50 % olettaen, että se on suurin mahdollinen kosteusprosentti käytettävällä hakkeella. Näin kosteaa haketta ei kuitenkaan suunnitella käytettäväksi, vaan hake pyritään esikuivaamaan ennen käyttöä prosessin nopeuttamiseksi.

Basun (2010, 335) mukaan kuivan puun ominaislämpökapasiteetti $c_{hake} = 1,37 \frac{kJ}{kg \cdot K}$ ja veden $c_{vesi} = 4,18 \frac{kJ}{kg \cdot K}$. Hakkeen massaksi m_p arvioitiin 0,4 kg. Kosteusprosentin ollessa 50, kuivan hakkeen osuus $m_{pk} = 0,2$ kg ja veden $m_{pv} = 0,2$ kg. Haketta lämmitetään 20 °C:sta 100 °C:seen, joten lämpötilan muutos $\Delta t_1 = 80$ K. Lämmitykseen vaadittava energiamäärän E_1 saadaan kaavalla 4.

$$E_1 = m_{pk} * c_{hake} * \Delta t_1 + m_{pv} * c_{vesi} * \Delta t_1 \quad (4)$$

jossa m_{pk} = kuivan hakkeen massa
 c_{hake} = kuivan puun ominaislämpökapasiteetti
 Δt_1 = lämpötilan muutos
 m_{pv} = veden massa
 c_{vesi} = veden ominaislämpökapasiteetti

$$E_1 = 0,2 \text{ kg} * 1,37 \frac{kJ}{kg \cdot K} * 80 \text{ K} + 0,2 \text{ kg} * 4,18 \frac{kJ}{kg \cdot K} * 80 \text{ K} = 88,8 \text{ kJ.}$$

Veden höyrystymislämpö r saa normaalipaineessa arvon $r = 2257$ kJ/kg. Veden höyrystämiseen vaadittava energiamäärä E_2 saadaan kaavalla 5.

$$E_2 = r * m_{pv} \quad (5)$$

jossa r = veden höyrystymislämpö
 m_{pv} = veden massa

$$E_2 = 2257 \frac{kJ}{kg} * 0,2 \text{ kg} = 451,4 \text{ kJ}$$

Kuivan hakkeen pyrolyysilämpötilaan (lämpötila 100 °C → 600 °C, $\Delta t_2 = 500$ K) lämmittämiseen vaadittava energiamäärä E_3 saadaan kaavalla 6.

$$E_3 = m_{pk} * c_{hake} * \Delta t_2 \quad (6)$$

jossa m_{pk} = kuivan hakkeen massa
 c_{hake} = kuivan puun ominaislämpökapasiteetti
 Δt_2 = lämpötilan muutos

$$E_3 = 0,2 \text{ kg} * 1,37 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} * 500 \text{ K} = 137 \text{ kJ}$$

Pyrolyysin vaatima energiantarve massayksikköä kohti (ρ_{hake}) on Ringerin ym. (2006, 5) mukaan mittaustuloksista riippuen 230–1000 KJ/kg. Pyrolyysiin kuluva energia saadaan suurinta arvoa käyttäen kaavalla 7.

$$E_4 = \rho_{hake} * m_{pk} \quad (7)$$

jossa ρ_{hake} = pyrolyysin energiantarve massayksikköä kohti
 m_{pk} = kuivan hakkeen massa

$$E_4 = 1000 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * 0,2 \text{ kg} = 200 \text{ kJ}$$

Pyrolyysiprosessin kokonaisenergian E tarve saadaan summaamalla edellä lasketut energiat yhteen kaavalla 8.

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 \quad (8)$$

jossa E_1 = kostean hakkeen 100 °C:seen lämmittämisen energiantarve
 E_2 = veden höyrystämisen energiantarve
 E_3 = kuivan hakkeen 600 °C:seen lämmityksen energiantarve
 E_4 = kuivan hakkeen pyrolyysin energiantarve

$$E = 88,8 \text{ kJ} + 451,4 \text{ kJ} + 137 \text{ kJ} + 200 \text{ kJ} = 877,2 \text{ kJ}$$

Kun tarkastellaan tilannetta, jossa lämpö siirretään biomassaan reaktorin seinämän läpi, lämmönsiirron hyötysuhde η_{siirto} on riippuen konvektiolämmönsiirron yksityiskohdista n. 30–40 % (Zube 2010, 52, 58). On huomionarvoista, että näin laskettu energiantarve on karkea arvio, jo siinäkin mielessä, että toisessa mahdollisessa vaihtoehdossa lämpöä ei tuoda biomassaan reaktoriseinämän läpi. Tarkastelulla saadaan kuitenkin selville suuruusluokka. Prosessiin syötetävän energian $E_{syöttö}$ määräksi saadaan hyötysuhde huomioon otettaessa kaavalla 9.

$$E_{syöttö} = E/\eta_{siirto} \quad (9)$$

jossa E = pyrolyysiprosessin kokonaisenergiantarve
 η_{siirto} = lämmönsiirron hyötysuhde

$$E_{syöttö} = 877,2 \text{ kJ} / 0,3 = 2924 \text{ kJ}$$

Keskimääräinen lämmitysteho P , 20 minuutin (1200 s) lämmitysajalla t , saadaan kaavalla 10.

$$P = E_{syöttö}/t \quad (10)$$

jossa P = keskimääräinen lämmitysteho
 t = lämmitysaika

$$P = 2924 \text{ kJ} / 1200 \text{ s} = 2,44 \text{ kW}$$

Lämmitykseen käytettävän lämmönlähteen valinnassa oli kaksi vaihtoehtoa, sähkövastus ja kaasupoltin. Sähkövastuksen etuna oli säädettävyys ja helppokäyttöisyys. Reaktorissa, jossa lämmönsiirto tapahtuu reaktoriseinämän läpi, sähkövastus toimii käytännössä yhtä hyvin kuin kaasupoltinkin. Jos taas halutaan ratkaisu, jossa lämmin kaasuvirtaus siirtää lämmön biomassaan, sähkö-

vastus ei ole varteenotettava vaihtoehto. Ongelmaksi sähkövastuksilla tulee useimmissa tapauksissa liian alhainen suurin lämpötila, minkä lisäksi tehonkestäminen on monesti riittämätön. Toisaalta tuhkan tai muun kiintoaineksen suora kontakti vastukseen koettiin myös ongelmalliseksi. Lisäksi sähköturvallisuus yleisesti tuli esille, sillä kokemusta sähköasennusten tekemisestä tai niiden suunnittelemisesta ei ollut. Kaasupoltin nähtiin kaasuvirtauksella biomassaa lämmittävässä ratkaisussa parempana ratkaisuna. Kaasupolttimen käyttöön liittyy mahdollinen jäännöshappi. Jos jäännöshappea jää liikaa, pyrolyysi muuttuu palamiseksi eikä haluttua lopputulosta välttämättä saavuteta. Lämmönlähteeksi päädyttiin valitsemaan tästä huolimatta kaasupoltin. Kaasupolttimen valintaa puolsi erityisesti saatavilla olevien polttimoiden laaja tehoalue. Edellä laskettuihin tehoihin päästään kohtuullisen pienikokoisella polttimella.

3.4 Lauhduttimen mitoitus

Lauhde-energia koostuu hakkeesta haihdutetun vesihöyryn sekä pyrolyysikaasujen jäähdyttämisestä ja nestemäisen jakeen lauhduttamisesta. Mahdollisia lauhdutintyyppisiä olivat kaasusta ilmaan tai kaasusta veteen jäähdyttävät, joista toteutettavaksi valittiin kaasusta veteen lämpöä siirtävä myötävirtalauhdutin. Keskimääräinen lauhdutustehon tarve laskettiin lauhdutettavasta energiamäärästä ja lauhduttamiseen käytettävästä ajasta, joka oli tässä tapauksessa pyrolyysiprosessin oletettu kesto-aika. Todellisuudessa lauhdutustehon maksimi voi olla hieman laskennallista keskimääräistä tehoa suurempi, koska pyrolyysikaasujen muodostuminen ei ole täysin tasaista. Pyrolyysikaasut käsiteltiin laskuissa vesihöyrynä. Veden suuresta ominaislämpökapasiteetista johtuen se johtaa lauhduttimen lievään ylimitoitukseen.

Biomassasta höyrystyy vettä sekä kuivamassasta kaasumainen ja nestemäinen jae. Nestemäisen jakeen osuus on 30 % ja kaasumainen 35 % kuiva-aineen massasta (Ringer ym. 2006, 5). Höyrystyvien aineiden kokonaismassa m_h saadaan kaavalla 11.

$$m_h = m_{pv} + 0,3 * m_{pk} + 0,35 * m_{pk} \quad (11)$$

jossa m_{pv} = veden massa
 m_{pk} = kuivan hakkeen massa

$$m_h = 0,2 \text{ kg} + 0,3 * 0,2 \text{ kg} + 0,35 * 0,2 \text{ kg} = 0,33 \text{ kg}$$

Arvioitiin, että lauhduttimelle saapuvan höyryn lämpötila $T_{h,i}$ on 200 °C ja että se jäähdytetään keskimäärin 40 ($=T_{h,o}$) asteiseksi. Höyry käsitellään laskennassa vesihöyrynä. Nestemäisen jakeen ja vesihöyryn oletetaan tiivistyvän 100 °C:n lämpötilassa. 200 °C:n lämpötilassa vesihöyryn ominaislämpökapasiteetti c_p on n. 1,9 kJ/(kg*K), veden ominaislämpökapasiteetti $c_{vesi} = 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ ja veden höyrystymislämpö $r = 2257 \text{ kJ/kg}$. Lauhduttamiseen vaadittava energiamäärä E_{lauhde} saadaan kaavalla 12.

$$E_{lauhde} = m_h * 100 \text{ K} * c_p + 0,35 * m_{pk} * 60 \text{ K} * c_p + (m_{pv} + 0,3 * m_{pk}) * r + (m_{pv} + 0,3 * m_{pk}) * 60 \text{ K} * c_{vesi} \quad (12)$$

jossa m_h = höyrystyvien aineiden kokonaismassa
 c_p = vesihöyryn ominaislämpökapasiteetti
 m_{pk} = kuivan hakkeen massa
 m_{pv} = veden massa
 r = veden höyrystymislämpö
 c_{vesi} = veden ominaislämpökapasiteetti

$$E_{lauhde} = 0,33 \text{ kg} * 100 \text{ K} * 1,9 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}) + 0,35 * 0,2 \text{ kg} * 60 \text{ K} * 1,9 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}) + (0,2 \text{ kg} + 0,2 \text{ kg} * 0,3) * 2257 \text{ kJ/kg} + (0,2 \text{ kg} + 0,3 * 0,2 \text{ kg}) * 60 \text{ K} * 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} = 722,7 \text{ kJ}$$

Lauhduttimen lämpötehoa arvioitiin olettamalla, että lauhdutettava energiamäärä jakautuu tasaisesti 20 minuutin ajanjaksolle. Lauhduttimen keskimääräinen lämpöteho q saadaan kaavalla 13.

$$q = \frac{E_{lauhde}}{20 \text{ min} * 60 \text{ s/min}} \quad (13)$$

jossa q = lauhduttimen lämpöteho
 E_{lauhde} = lauhdutuksen energiantarve

$$q = \frac{722,7 \text{ kJ}}{20 \text{ min} * 60 \text{ s/min}} = 0,602 \text{ kW}$$

Laboratorion vetokaapista saatavan veden lämpötilaksi $T_{c,i}$ mitattiin 10,7 °C ja veden massavirran q_m suuruudeksi 0,07 kg/s. Lämpöteho on siirrettävä jäähdytysveteen, joten seuraavasta kaavasta 14 saadaan ratkaistua veden lämpötilan muutos Δt_c , jonka siirtynyt lämpöenergia aiheuttaa

$$\Delta t_c = \frac{q}{q_m * c_{vsi}} \quad (14)$$

jossa q = lauhduttimen keskimääräinen lämpöteho
 q_m = veden massavirta
 c_{vesi} = veden ominaislämpökapasiteetti

$$\Delta t_c = \frac{602 \text{ W}}{0,07 \text{ kg/s} * 4,18 \text{ kJ/(kg*K)}} = 2,1 \text{ °C}$$

Lauhduttimesta ulostulevan veden lämpötila $T_{c,o}$ saadaan kaavalla 15.

$$T_{c,o} = \Delta t_c + T_{c,i} \quad (15)$$

jossa Δt_c = veden lämpötilan muutos
 $T_{c,i}$ = tulevan veden lämpötila

$$T_{c,o} = 2,1 \text{ °C} + 10,7 \text{ °C} = 12,8 \text{ °C}.$$

Lauhduttimen lämmönsiirtopinta-ala laskettiin hyödyntämällä logaritmisien keskilämpötilan menetelmää. Aluksi laskettiin logaritminen lämpötilaero ΔT_{lm} lauhduttimessa kaavalla 16, kun lauhdutin toimii myötävirtalämmönsiirtimenä.

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{h,i} - T_{c,i}) - (T_{h,o} - T_{c,o})}{\ln((T_{h,i} - T_{c,i}) / (T_{h,o} - T_{c,o}))} \quad (16)$$

jossa $T_{h,i}$ = sisääntulevan höyryn lämpötila
 $T_{h,o}$ = ulostulevan lauhteen lämpötila
 $T_{c,i}$ = sisääntulevan veden lämpötila
 $T_{c,o}$ = ulostulevan veden lämpötila

$$\Delta T_{lm} = \frac{(200 \text{ °C} - 10,7 \text{ °C}) - (40 \text{ °C} - 12,8 \text{ °C})}{\ln((200 \text{ °C} - 10,7 \text{ °C}) / (40 \text{ °C} - 12,8 \text{ °C}))} = 83,6 \text{ K}$$

Lämpötehon lausekkeesta $q = U * A * \Delta T_{lm}$ (Vepsäläinen, Pitkänen & Hyppänen 2012, 187) saadaan ratkaistua lämmönsiirtoon vaadittava pinta-ala A . Lausekkeessa oleva termi U on lämmönläpäisyluku, joka saa arvon 1000 W/(m² * K) höyryn lauhduttimissa, joissa käytetään vettä jäähdytykseen (Vepsäläinen ym. 2012, 139). Pinta-ala A saadaan kaavalla 17.

$$A = \frac{q}{U * \Delta T_{lm}} \quad (17)$$

jossa q = lauhduttimen keskimääräinen lämpöteho
 U = lämmönläpäisyluku
 ΔT_{lm} = logaritminen keskilämpötilaero

$$A = \frac{602 \text{ W}}{1000 \text{ W/(m}^2 * \text{K)} * 83,6 \text{ K}} = 0,0072 \text{ m}^2$$

Kun lauhduttimen sisäputken halkaisijaksi d valitaan 20 mm, saadaan putken pituus L kaavalla 18.

$$L = A / (\pi * d) \quad (18)$$

jossa A = lauhduttimen sisäputken pinta-ala
 d = lauhduttimen sisäputken halkaisija

$$L = 0,0072 \text{ m}^2 / (\pi * 0,02 \text{ m}) = 0,115 \text{ m}$$

Tämä pituus on lauhduttimen vähimmäispituus, jolla se saavuttaa laskennallisesti riittävän suuren lämpötehon.

3.5 Laitteiston rakenne

3.5.1 Reaktori

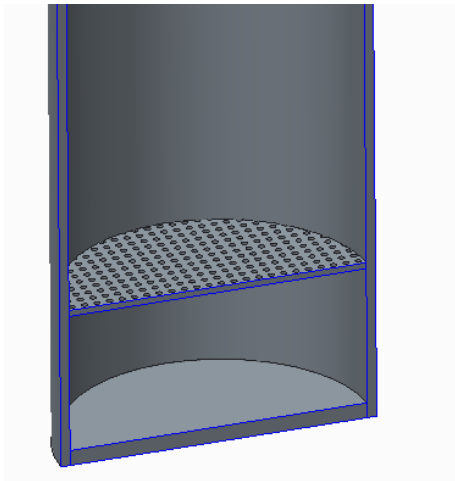
Reaktorityyppi-osiossa päädyttiin suunnittelemaan kahta lämmönsiirtotavaltaan erilaista panostoimista kiintopetireaktoria. Käyttövoima-osiossa kuvatussa lämmönlähteen valinnassa päädyttiin kaasupolttimeen. Tämä huomioiden tehtiin lopullinen valinta kahden reaktorityypin väliltä. Valinta kohdistui reaktoriin, jossa lämmönsiirto tapahtuu nestekaasupolttimeen savukaasujen avulla suoraan biomassaan. Pääasiallinen syy kyseisen reaktorityypin valinnalle oli lämmönsiirron tehokkuus, jonka ajateltiin lyhentävän prosessiin kuluva kokonaisaikaa. Lisäksi mahdollisuutta reaktorin käyttämisestä puukaasuttimen tavoin pidettiin arvokkaana ominaisuutena.

Reaktorin materiaalivaatimukset olivat korkea lämpötilan kesto, toistuvan lämpörasituksen kesto, muokattavuus ja hitsattavuus. Mahdollisia materiaaleja olivat tulenkestävät, ruostumattomat ja haponkestävät teräkset sekä rakenneteräs. Reaktorin materiaaliksi valittu rakenneteräs täyttää materiaalivaatimukset kohtuullisen hyvin. Riittävän kestojän takaamiseksi reaktorin rakenteissa päätettiin käyttää verrattain paksuja ainevahvuuksia.

Reaktorin rakennesuunnittelu aloitettiin reaktorin kammion koon määrittelyllä, joka on kuvattu reaktorin mitoitusosiossa. Muodoksi valittiin lieriö, joka on luonnollinen valinta tämän tyyppisiin käyttökohteisiin. Laskennassa reaktorin mitoiksi saatiin sisähalkaisijaksi 94,7 mm ja korkeudeksi 284,1 mm. Reaktorin sylinterimäinen kammio päätettiin toteuttaa standardikoon teräsputkella, jonka ulkomitta on 101,6 mm ja seinämän vahvuus 3,6 mm. Reaktorin sisähalkaisijaksi muodostui siis 94,4 mm, joka on riittävän lähellä suunniteltua arvoa. Reaktori suunniteltiin asennettavaksi pystyasentoon. Reaktori suunniteltiin muiden laitteiston osien tapaan kiinnitettäväksi 45x180 standardialumiiniprofiiliin. Alumiiniprofiilin tuli olla melko järeää, sillä sen haluttiin olevan niin vakaa, ettei kiinteää asen-

nusta vetokaapin alustaan vaadita. Alumiiniprofiili toimii lisäksi hyvin rakenteista johtuvan lämmön tasaajana/jäähdyttäjänä. Reaktori suunniteltiin kiinnitettäväksi alumiiniprofiilille telineen avulla, josta reaktorin pystyi irrottamaan ilman työkaluja.

Koska reaktorin lämmönsiirto tapahtuu savukaasujen avulla, tulee savukaasuille tehdä mahdollisimman esteetön kulkureitti lämmitettävään biomassaan. Pyrittiin kuitenkin myös suunnittelemaan rakenne, jossa savukaasut saataisiin jakautumaan tasaisesti koko poikkipinnan suhteen. Ratkaisuksi saatiin rakenne, jossa kuvan 10 mukaisesti on erillinen savukaasu- ja reaktoritila, joita erottaa reikälevy. Reikälevy tulee olla irrotettavissa, sillä sen läpi varisee tuhkaa ja pölyä, jotka tulee olla puhdistettavissa. Reikälevy suunniteltiin asetettavaksi neljän reaktori-seinämään kiinnitetyn poikkituen päälle.



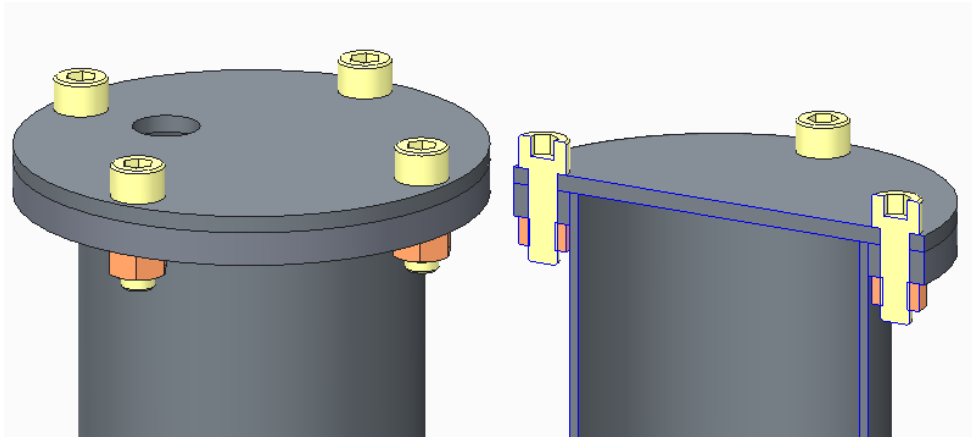
Kuva 10. Reaktorin savukaasutilan ja reaktoritilan erottava reikälevy.

Reaktoriin suunniteltu nestekaasupoltin on alkuperäisesti tarkoitettu käsikäyttöiseksi, joten sen kiinnitykseen ja käytettävyyteen tuli miettiä turvallinen ratkaisu. Polttimeen suunniteltiin seossuhteen säätöä varten venttiili, jolla paloilman virtausmäärää voidaan säätää. Kaasupolttimen sytyttäminen ja seossuhteen säätäminen ajateltiin tapahtuvaksi, kun poltin on irrallaan reaktorista. Jos poltin sytytetään sen jo ollessa kiinni reaktorissa, voi sytytysongelmien sattuessa reaktoriin päästä virtaamaan syttymisherkkää kaasuseosta jopa minuuttien ajan. Tämä aiheuttaisi selkeän räjähdys- tai leimahdusvaaran. Kaasupolttimelle suunnit-

telttiin kiinnike, johon sen saa nopeasti laitettua sytyttämisen jälkeen. Varsinaista tiivistettä rakenteessa ei ole, vaan lieriömäinen polttimen suulake asetetaan lie-riöreikään. Reiän ja polttimen sovitus suunniteltiin liukusovitteeksi. Tarpeen vaa-tiessa kiinnitys varmistetaan pidätinruuvilla.

Polttimen tehoa pystytään säätämään muuttamalla nestekaasun tilavuusvirtaa. Palokaasujen lämpötilaan ei suurissa määrin pysty vaikuttamaan. Nestekaasu-happiseossuhdetta muuttamalla lämpötilaan voidaan kuitenkin saada muutoksia aikaan. On kuitenkin pyrolyysiprosessia ajatellen tärkeää, ettei tarpeettoman runsashappista seosta käytetä. Toisaalta pyrolyysin energiantarvetta voidaan tyydyttää myös hallitusti biomassaa polttamalla. On todennäköistä, että normaali-käytössä palamista tapahtuu pienissä määrin. Jos biomassaa poltetaan, pyro-lyysin nopeutta pystytään kasvattamaan yli sen, mihin pelkällä kaasupolttimella päästäisiin. Lämpötiloja on pystyttävä tarkkailemaan, joten reaktoriin suunnitel-tiin laitettavaksi kaksi lämpötilamittaria. Ensimmäinen mittari laitetaan reaktorin alaosaan, polttimen lähelle, reikälevyn alapuolelle. Mittarista saadaan tietoa ni-menomaan palolämpötilasta ja sen pitäisi siis myös ilmaista biomassan huomata-vasta palamisesta. Toinen mittari tulee reaktorin yläosaan: se kiinnitetään päädyn kansiosaan. Loppuvaiheessa pyrolyysiä yhä pienempi osa energiasta kuluu pyrolyysiin, joten lämpötila reaktorin yläosassa alkaa nousta. Mittarin tulisi antaa tietoa pyrolyysiprosessin etenemisestä ja sen perusteella voisi arvioida, milloin pyrolyysi on suurimmalta osin ohi.

Reaktorin yläpäähän suunniteltiin biomassan täyttämiseen ja tuhkan sekä hiilen poistamiseen avattava kansi. Kansi suunniteltiin kiinnitettäväksi pulttiliitoksella. Pikakiinnitystä suunniteltiin, sillä se olisi edistänyt käytettävyyttä. Sitä ei kuiten-kaan toteutettu, koska se olisi aiheuttanut kestäättömän turvallisuusriskin. Avattava pääty suunniteltiin kuvan 11 mukaisesti joko tehtäväksi polttoleikatuis-ta osista tai vaihtoehtoisesti käyttämällä standardoituja putkilaippoja. Putkilaip-pojen käyttäminen olisi kustannusten kannalta parempi vaihtoehto, vaikka ra-kenteesta tuleekin tällöin tarpeettoman raskas ja kookas.



Kuva 11. Reaktorin avattava päätyosa.

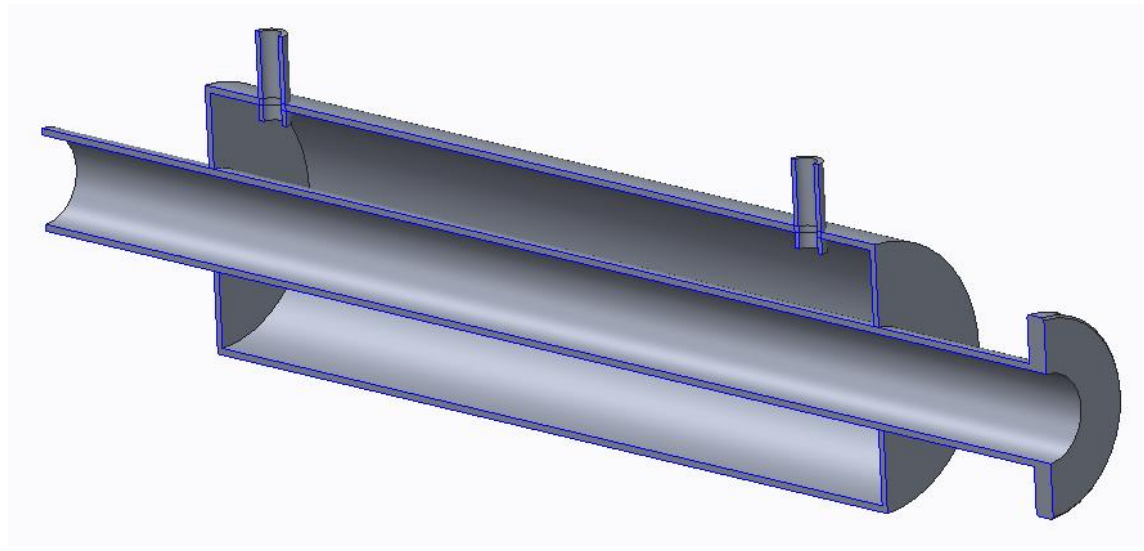
Reaktorin avattavaan pätyyn suunniteltiin putkiliitäntä, josta prosessissa muodostuvat kaasut ja höyryt pääsevät purkautumaan. Putkessa reaktiotuotteet ohjataan lauhduttimeen. Putkilinja suunniteltiin valmistettavaksi ruostumattomasta tai haponkestävästä teräksestä, sillä putkessa oletettiin tapahtuvan jonkin verran tiivistymistä/lauhtumista. Tarkempi materiaalivalinta riippuu osaltaan kustannustasosta sekä saatavuudesta. Putkiliitoksen osalta päädyttiin laippaliitokseen molemmissa päissä. Laippaliitosten tiivistämiseksi pintojen väliin laitetaan tiiviste. Mahdollisia tiivistemateriaaleja olivat kupari, grafiitti- tai muu kuitupohjainen tiivistemateriaali. Näistä päädyttiin käyttämään muuta kuitupohjaista tiivistettä, tässä tapauksessa Beldam Crossley Ltd:n valmistamaa aramidi- ja mineraalikulupohjaista materiaalia, jonka sideaineena on nitrilikumi. Valitun tiivistemateriaalin lämmönkesto on 400 °C, ja se kestää mm. öljyä ja laimeita happoja.

Keskusteltuamme Esko Tiaisen kanssa, päätettiin suunnitelmia reaktorin rakenteen osalta osittain muuttaa. Tiainen huomautti, että suunnittelemissamme reaktorissa tulee todennäköisesti tapahtumaan nestemäisten reaktiotuotteiden lauhdumista reaktorin sisällä. Lauhduttuaan neste virtaa pitkin reaktorin seinämäpintoja. Lisäksi on mahdollista, että tervamaiset yhdisteet ns. tihkuvat biomassasta nestemäisinä, erityisesti lämmitysvaiheessa. Tätä mahdollisuutta silmällä pitäen reaktorin päätettiin kalliistaa 30 asteen kulmaan ja lisätä sen pohjaan putkiyhde. Putkiyhteeseen suunniteltiin liitettäväksi putki, joka liitetään ti-

viisti suljettuun keruuastiaan. Vaikka muutokset osoittautuisivat turhiksi, ne eivät haittaa reaktorin toimintaa.

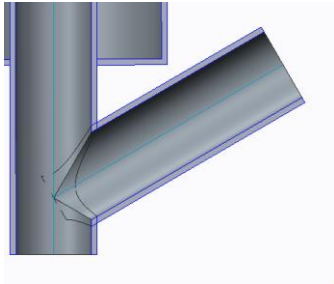
3.5.2 Lauhdutin

Lauhdutin suunniteltiin yksinkertaiseksi myötävirtatoimiseksi putkilämmönvaihtimeksi. Lauhdutin koostuu vaipasta, jossa jäähdytysvesi kiertää, sekä putkesta, jossa jäähdytettävät reaktiokaasut/höyryt virtaavat. Kuvan 12 mukaisesti lauhduttimen vaippaan kuuluvat veden syöttöön ja poistoon tarkoitetut putkiyhteet. Lauhdutin suunniteltiin tehtäväksi kokonaisuudessaan ruostumattomasta teräksestä, sillä lauhteiden kanssa kosketuksissa olevien osien täytyy kestää laimeita happoja. Muita mahdollisia materiaaleja olisivat olleet haponkestävä teräs, sekä lasi. Kuvasta poiketen lauhdutin suunniteltiin asennettavaksi pystyasentoon niin, että kuvan vasemmassa reunassa oleva laippa osoittaa ylös.



Kuva 12. Lauhduttimen poikkileikkaus.

Kuvan 13 mukaisesti lauhduttimen läpi menevään putkeen lisättiin erillinen putkiyhte. Yhteen kautta poistetaan tiivistymättömät kaasut lauhduttimen jälkeen. Tiivistymättömät kaasut haluttiin selkeästi erilleen nestemäisistä reaktiotuotteista, koska kaasut, erityisesti häkä, oli tarkoitus polttaa turvallisuussyistä.



Kuva 13. Lauhduttimen kaasuyhde.

3.6 Turvallisuus

Laitteiston käyttöön liittyviä riskejä arvioitiin riskienarviointilomakkeiden (liite 1 ja 2) avulla. Vakavimmaksi riskiksi koettiin häkämyrkytyksen vaara. Myös palovammoja ja tulipaloa pidettiin merkittävänä riskinä korkeiden lämpötilojen vuoksi, joskin ne eivät aiheuta merkittävää terveystriskiä.

Lauhtumattomat kaasut sisältävät hiilidioksidia, hiilimonoksidia eli häkää ja lauhumatonta vesihöyryä. Häkäkaasun vaarallisuuden takia tutkimme mahdollisuutta lauhtumattomien kaasujen polttamiseen lauhduttimen jälkeen. Tämä edellyttää, että kaasu on riittävän hyvin palavaa. Koekäytöissä kävi kuitenkin ilmi, että kaasut eivät pala. Tämän arveltiin johtuvan kaasujen suuresta vesihöyry- ja hiilidioksidipitoisuudesta sekä kaasujen jäähtymisestä lauhduttimessa. Lauhtumattomille kaasuille täytyi siis järjestää riittävän tehokas tuuletus. Häkäkaasun uhkasta johtuen vetokaapin seinään asennettiin häkävaroitin.

Kuumiin pyrolyysikaasuihin liittyy räjähdysvaara, joskin energiatiheys ja palonopeus häkäpitoisissa ja paljon vesihöyryä sisältävissä kaasuissa on pieni. Lisäksi suunniteltavan laitteiston kokonaistilavuus on verrattain pieni, joka osaltaan pienentää potentiaalista räjähdysenergian määrää. Mahdollinen tilanne, jossa räjähdysen edellytykset voi täytyä, on reaktorin kannen avaus kesken pyrolyysin. Kannen avaus päästää hapekasta ulkoilmaa reaktoriin ja mahdollistaa siten syttymiskelpoisen seoksen syntymisen. Räjähdysvaara otettiin huomioon reaktorin rakenteessa käyttämällä suurta ainevahvuutta reaktorin seinämiin. Kansi suunniteltiin siten, että sen avaamiseen tarvitaan työkaluja. Tämän tulisi estää reaktorin kannen tahaton avaaminen. Reaktori asennettiin siten, että sen ollessa käyttöasennossa täyttöaukko osoittaa pois päin käyttäjästä.

Reaktorin kuumenevat osat pyrittiin peittämään lämpösuojilla palovammariskin minimoimiseksi. Laitteisto pyrittiin myös suunnittelemaan siten, että työskentely kuumien osien läheisyydessä ei ole tarpeellista. Koska kaikkia kuumia pintoja ei voida suojata, täytyy laitteistoa käytettäessä pitää suojakäsineitä. Tulipalovauraan minimoimiseksi lämmön johtuminen vetokaapin rakenteisiin tuli estää. Koska kaasupoltin on irrotettava osa kokoonpanoa, täytyi myös varmistua polttimen tukevasta kiinnityksestä.

Laitteiston käytöstä kirjoitettiin käyttöohje (liite 4), jossa opastetaan turvalliseen ja tehokkaaseen käyttöön. Käyttöohjeessa on listattuna pyrolyysiprosessiin tarvittavat välineet ja suojarusteet.

4 Laitteiston toteutus

Laitteiston toteuttaminen aloitettiin, kun rakennesuunnittelu oli saatu alustavasti valmiiksi. Toteutusvaihe haluttiin aloittaa nopealla tahdilla, sillä oletettiin, että joitakin rakennemuutoksia joudutaan tekemään koekäytössä tehtyjen havaintojen perusteella. Tarvikkeiden ja raaka-aineiden hankinnan hoiti käytännössä Karelia-ammattikorkeakoulun laboratorioinsinööri Hannu Tolvanen.

Laitteiston toteuttaminen tapahtui pääasiassa Karelia-ammattikorkeakoulun Wärtsilä-kampuksen tiloissa. Rakentaminen piti sisällään lähinnä osien hitsaamista ja yleistä kokoonpanoa. Monet metalliosista hankittiin valmiina paikallisista yrityksistä. Laipat ja muu levytavara valmistutettiin laserleikaamalla. Putkiosat sekä muu metritavarana saatava metalliprofiili hankittiin työstövaroilla, eli ne eivät olleet mitään tehtyjä.

Laitteiston toteuttaminen alkoi reaktorin kokoonpanolla. Reaktorin alapäässä oleva reikälevy tehtiin teräslevystä poraamalla siihen reikiä kuvan 14 mukaisesti, koska valmista, riittävän paksua reikälevyä ei ollut helposti saatavissa. Yksittäisen kappaleen valmistuksessa tämä tapa oli vielä hyväksyttävissä, mutta

muutoin osa olisi täytynyt valmistaa jotenkin muuten. Reikälevyyn taivutettiin kierretangosta koukku, josta reikälevy voidaan nostaa pois reaktorin sisältä.



Kuva 14. Reikälevy.

Laserleikattuun reaktorin kanteen tehtiin reiät lauhduttimelle johtavan väliputken kiinnitystä varten, jonka lisäksi siihen hitsattiin kiinnitys yläpään lämpömittarille. Tämän jälkeen kannen kiinnityslaippa hitsattiin reaktorin yläpään. Kansi ja kannen kiinnityslaippa olivat hitsauksen ajan pultattuna toisiinsa lämmön aiheuttamien taipumien minimoimiseksi. Reaktoriin hitsattiin polttimen ja alapään lämpömittarin kiinnitykset. Reaktoriin hitsattiin alkuperäisistä suunnitelmista poiketen kiinnitysjalka, joka mahdollistaa reaktorin nopean irrotuksen.

Lauhduttimen ja väliputken kokoonpano toteutettiin TIG-hitsaamalla. Hitsausmenetelmä valikoitui hitsattavan materiaalin ja ohuiden ainevahvuuksien perusteella. Lisäaineena käytettiin ruostumatonta, EN 1.4404 -mukaista lisäainetta. Suojakaasuna käytettiin argonia, ilman juurikaasua. Kuvassa 15 lauhdutin on kokoonpantuna. Kuten kuvasta 15 heikosti erottuu, ensimmäisessä koekäytössä laipan hitsiliitos vuoti. Vuoto oli kuitenkin niin heikko, ettei toimenpiteisiin sen suhteen ryhdytty. Myöhemmillä koekäyttökerroilla vuotoa ei enää havaittu.



Kuva 15. Lauhdutin kasattuna.

Ensimmäisten koekäyttöjen jälkeen reaktorin ulkopintaan ja myöhemmin myös väliputkeen lisättiin lämmöneristys. Lämmöneristysenä toimi koeajojen aikana mineraalivilla, mutta se korvattiin lopullisessa kokoonpanossa korkeisiin lämpötiloihin tarkoitettulla eristysnauhalla. Lisäksi reaktorin ympärille lisättiin alumiininen lämpösuoja, joka vähentää lämmön karkaamista reaktorista lämpösäteilynä ja pienentää palovamman riskiä laitteistoa käytettäessä.

5 Koekäyttö

Laitteiston koekäyttö aloitettiin polttamalla muokattua kaasupoltinta reaktoriin kiinnitettynä reaktorin ollessa tyhjillään. Tämän kokeen tarkoituksena oli testata savukaasujen virtausta laitteiston läpi ja sen aiheuttaman vastapaineen vaikutusta polttimen toimintaan. Polttin toimi odotetusti pienillä tehoilla, mutta suurimmalla teholla liekki muuttui epävakaaksi ja sammui helposti. Tämä johtui todennäköisesti laitteiston aiheuttamasta vastapaineesta, joka esti poltinta saamasta palamisilmaa. Polttimen tehon arviointi osoittautui tässä vaiheessa haasteelliseksi, koska saatavilla ei ollut kaasun virtausmittaria. Koska polttimen tehon riittävyttä ei voitu arvioida ennen laitteiston käyttämistä biomassan kanssa, polttimen toiminnan parantamiseksi ei tehty tässä vaiheessa toimenpiteitä.

Laitteistoa koekäytettiin seuraavaksi pienellä määrällä haketta. Hakkeen koostumuksesta ei ollut saatavissa tarkkaa tietoa, mutta hakkeesta oli selvästi erotettavissa ainakin koivua ja kuusta. Oletettavasti käytettävissä ollut hake sisälsi myös merkittävän osan mäntyä. Kosteuden arvioitiin olevan noin 25–30 % aistinvaraisiin havaintoihin perustuen. Poltinta pidettiin päällä, pienellä teholla, noin 12 min, jonka jälkeen silmin havaittavissa oleva kaasujen muodostus alkoi hiipua. Todellisuudessa pyrolyysikaasujen muodostus ei ollut vielä loppunut, vaan reaktorissa oli vielä hiiltymätöntä haketta, mistä voidaan päätellä, että pyrolyysiprosessi ei ollut vielä lopussa. Silmin havaittavissa olevan kaasun muodostumisen väheneminen saattoi johtua hakkeen kuivumisesta, jonka jälkeen lauhtimesta tulevat kaasut olivat näkymättömämpiä. Näistä havainnoista voitiin päätellä, että pyrolyysiprosessin seuraaminen ja oikean lopetushetken päättäminen täytyy tehdä seuraamalla reaktorin yläpään lämpötilaa ja lauhteiden muodostumista, lauhtumattomien kaasujen määrän silmämääräisen seuraamisen sijasta.

Seuraavassa koeajossa reaktoriin laitettiin noin 1,3 litraa haketta eli reaktorin kertapanostukseksi suunniteltu määrä. Poltin pidettiin aluksi pienellä teholla, jonka jälkeen tehoa yritettiin nostaa vaiheittain varmistaen, että poltin toimii vakaasti. Selvisi, että poltin toimii vakaasti vain melko pienillä tehoilla, joten koetta jatkettiin pienellä lämmitysteholla. Savumaisen lauhtumattoman kaasun muodostus alkoi lisääntyä hiljalleen ja oli huipussaan noin 5 minuutin kohdalla prosessin aloittamisesta. Noin 30 minuutin kuluttua prosessin aloittamisesta reaktorin yläpään lämpömittari saavutti 100 °C ja samaan aikaan silmin nähtävän kaasun muodostus lisääntyi uudelleen. 60 minuuttia prosessin aloittamisesta reaktorin yläpään lämpötila on noussut 165 °C alapään lämpötilan ollessa 530 °C. Käytettävissä olevan ajan loputtua poltin sammutettiin 67 minuuttia aloittamisesta, jonka jälkeen laitteiston annettiin jäähtyä kaksi tuntia. Kun reaktori avattiin, kävi ilmi, että nestekaasupolttimen savukaasujen virtaus oli siirtänyt haketta. Hakekerrokseen oli muodostunut kanava, josta savukaasut pääsivät ohittamaan suurimman osan hakkeista.



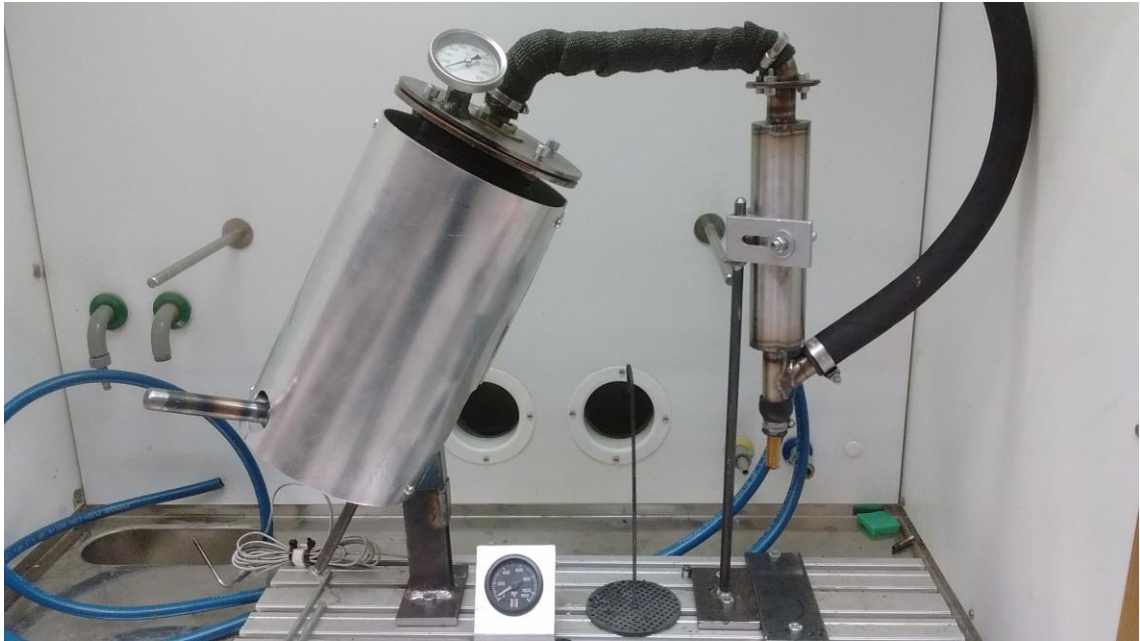
Kuva 16. Osittain hiiltynyttä haketta.

Hake oli pääosin hiiltynyttä, mutta se sisälsi myös hiiltymätöntä haketta kuvan 16 mukaisesti. Reaktion aikana lauhduttimeen oli muodostunut noin 2 dl vaalean ruskeaa vettä muistuttavaa nestettä. Mielenkiintoista oli havaita, että edellisellä kerralla lauhduttimeen muodostuneet nesteet oli muuttuneet ajan mittaan sävyltään tummemmaksi. Saman ilmiön saattoi huomata päivän kuluessa myös tämän koeajon lauhdenesteistä. Laitteistoa purettaessa huomattiin polttimen jumittuneen reaktorissa olevaan kiinnitykseen. Poltinta ei saatu enää purettua ehjänä reaktorista. Polttimen ja reaktorin välinen sovite oli liian tiukka. Huoneenlämpötilassa sovite toimi hyvin, mutta korotetussa lämpötilassa sovite kiristyi. Ilmeisesti korkeasta lämpötilasta johtuen osien väliin muodostui silminnähden korrosiovaurioita, jotka aiheuttivat polttimen jumiutumisen. Vaurioista johtuen poltinta ei saatu irrotettua ehjänä, vaikka molemmat osat olivat jäähtyneet huoneenlämpöisiksi. Johtuen ostopolttimeen jo aiemmin tehdyistä muutostöistä, ei nähty tarpeelliseksi hankkia toista vastaavaa poltinta, vaan nykyisen polttimen rikkoontunut osa päätettiin korjata.

Uudella polttimella tehtiin koeajo, jossa käytettiin huomattavasti kuivempaa haketta aiempiin verrattuna. Hake oli ollut sisätiloissa säilytyksessä yli vuoden. Ero aiempiin kokeisiin oli huomattava, lauhtumattomien kaasujen muodostus oli huomattavasti vähäisempää. Lisäksi nesteen muodostuminen alkoi lähes välittömästi. Näistä havainnoista tuli varmistetuksi se, että prosessia on tarkoituksenmukaisempaa demonstroida käyttäen kuivattua haketta. Prosessin läpivieminen vie myös vähemmän aikaa esikuivattua raaka-ainetta käytettäessä. Polttimen jumiutuminen tuli korjatulla polttimellakin uhkaksi, vaikka sovite tehtiin

huomattavasti väljemmäksi kuin aiemmin. Polttimella oli jäähtyessään tapana tarrata kiinni sovitteeseen, vaikka se käyttölämpötilassa oli irrallaan. Ratkaisuksi ongelmaan tehtiin erillinen tulppa, jonka pystyi käytön jälkeen laittamaan polttimen tilalle.

Koeajoissa kävi ilmi, että tervamainen nestekerros muodostui reaktorin ja väliputken sisäpinnoille, eikä se tullut nestemäisen jakeen sekaan keruustiaan. Tervamainen neste ei kuitenkaan valunut reaktorin seinämää pitkin alas. Tästä pääteltiin, että reaktorin alaosa on riittävän korkeassa lämpötilassa nesteen höyrystämiseen pinnoista, kun taas yläosissa lämpötila oli liian alhainen. Rakennetta pyrittiin parantamaan lisäämällä lämpöeristettä reaktorin ulkopintaan. Tällä pyrittiin estämään nesteen lauhtuminen reaktorin pintoihin. Parannusta kokeiltiin koeajamalla laitteistoa väliaikaisella lämpöeristyksellä. Muutos paransi nesteen etenemistä selvästi. Tervamaista nestettä alkoi valua lauhduttimesta prosessin loppuvaiheessa, kun reaktorin yläpään lämpötila nousi huomattavasti aiemmilla koekäytöillä havaittua korkeammaksi, noin 250 °C:seen. Ilman lämpöeristystä yläpään lämpötilaa ei saatu nousemaan näin ylös. Nesteen etenemistä helpotettiin myös sulkemalla vesikierto lauhduttimesta aivan prosessin loppuvaiheessa. Tämä nosti lauhduttimen sisäosan pintalämpötilaa ja helpotti siten tervamaisen nesteen valumista keräysastiaan. Kokeen tulosten ja lämpökamerakuvien perusteella eristys päätettiin lisätä myös väliputkeen kuvan 17 mukaisesti.



Kuva 17. Laitteisto kokoonpantuna eristeiden kanssa.

Eistäminen toi esille uuden asian. Reaktorikammion metallirakenteet varaavat lämpöä eristyksen ansiosta paljon pidemmäksi aikaa kuin aikaisemmin. 30 minuutin kuluttua polttimen sammuttamisesta, reaktorin lämpötila oli yhä n. 100 °C. Tämä tarkoittaa käytännössä, että laitteisto tulee jättää jäähtymään veto-kaappiin n. kahdeksi tunniksi ennen kuin se voidaan turvallisesti avata ja puhdistaa. Jos tätä aikaa suhteutetaan käytettävissä olevan oppitunnin pituuteen, johon demonstraatio tulee sisällyttää muun opetustoiminnan lisäksi, on todennäköistä, että laitteisto jätetään jäähtymään veto-kaappiin ja se avataan aikaisintaan seuraavana päivänä.

6 Pohdinta

Työn tavoitteena oli suunnitella ja valmistaa laboratoriotiloihin soveltuva laitteisto pyrolyysiprosessin havainnointiin. Suunnittelutyössä laitteistolta tavoiteltiin erityisesti rakenteellista yksinkertaisuutta, prosessin säädettävyyttä ja toistettavuutta, kestävyyttä, helppokäyttöisyyttä sekä turvallisuutta. Aikataulun suhteen tavoitteena oli luovuttaa toimiva laitteisto vuoden 2016 loppuun mennessä ja viimeistellä työn kirjallinen osuus keväällä 2017.

Työ aloitettiin syksyllä 2016 opiskelemalla prosessiin liittyvää teoriaa ja tutustumalla jo olemassa oleviin laitteistoihin. Samalla kirjoitettiin työn teoriaosuutta ja tehtiin alustavia suunnitelmia laitteiston tulevasta rakenteesta. Suunnitelma valmistui ja laitteiston osat tilattiin lokakuun puolivälissä. Laitteiston kokoaminen aloitettiin ensimmäisten osien saavuttua marraskuun alussa. Ensimmäiset koe-käytöt tehtiin marraskuun puolivälissä ja laitteisto todettiin tämän opinnäytetyön osalta valmiiksi joulukuussa. Työ jatkui vielä raportin laadinnalla ja viimeistelyllä.

Työn tavoitteet saavutettiin hyvin laitteiston yksinkertaisuuden, kestävyuden ja turvallisuuden osalta. Myös aikataulussa pysyttiin hyvin. Tavoitteista kuitenkin jäätettiin selvästi prosessin säädettävyydessä ja toistettavuudessa sekä laitteiston helppokäyttöisyydessä. Nämä puutteet johtuivat pääasiassa nestekaasupolttimen huonosta suunnittelusta. Polttimesta jäi puuttumaan kokonaan mahdollisuus mitata polttimen teho ja seossuhde. Prosessin toistettavuuden kannalta olisi riittänyt mahdollisuus mitata kaasu- ja ilmasuuttimien yli vaikuttava paine-ero, jota voidaan käyttää vertailuarvona prosessia säädettäessä. Todellinen polttiteho ja seossuhde näistä arvoista olisi kuitenkin ollut mahdotonta määrittää tietämättä suuttimien ominaisuuksia. Polttimen rakennetta parantamalla ja tehoa nostamalla olisi pystynyt myös nopeuttamaan prosessia. Polttimen paranus olisi laitteiston käytettävyyden kannalta olennaista.

Laitteiston käytettävyyttä olisi voinut parantaa myös lisäämällä reaktorin sisälle korin johon biomassa laitetaan. Tämä olisi helpottanut reaktorin tyhjentämistä käytön jälkeen. Nykyisellä rakenteella reaktori täytyy irrottaa telineestään ja kaataa tyhjäksi. Tämän lisäksi reaktorin kansi olisi voitu kiinnittää pikakiinnikkeillä avaamisen helpottamiseksi. Suunnitteluvaiheessa haluttiin varmistua kannen tiiveydestä ja siitä ettei kansi tahattomasti avaudu, toteuttamalla kiinnitys pulteilla. Eräs varteenotettava vaihtoehto kannen kiinnitykselle olisi kuitenkin ollut käyttää putkiliitoksissa yleistä v-pantakiristintä. V-pantakiristimellä olisi saatu aikaan tiivis ja nopeasti avattava liitos.

Lauhduttimen lämpötilan säätö olisi myös ollut hyödyksi joissakin tilanteissa. Sillä voisi esimerkiksi vähentää prosessissa syntyvän vesihöyryn lauhtumista nestemäisen jakeen sekaan ja parantaa siten lopputuotteen laatua. Lauhduttimen

lämpötilan säädöllä voisi myös parantaa nestemäisen jakeen juoksevuutta lauhduttimessa. Toinen vaihtoehto olisi lisätä järjestelmään toinen lauhdutin sarjaan. Ensimmäinen lauhdutin olisi korotetussa, n. 150 °C:een lämpötilassa ja toinen n. 20 °C:ssa. Lauhdutinten välissä tulisi olla väliotto, josta ensimmäisessä lauhduttimessa tiivistyneet nesteet saa kerättyä. Näin toteutettuna vesihöyry tiivistyy vasta toisessa lauhduttimessa, kun taas raskaammat tervamaiset nesteet tiivistyvät ensimmäisessä. Ensimmäisen lauhduttimen korkeammasta lämpötilasta johtuen tervamaisten nesteiden tulisi virrata ongelmitta väliotolle.

Yksi tavoitteista laitteistoa suunniteltaessa oli mahdollisuus havainnoida prosessia näkemällä biomassan kaasuuntuminen reaktorissa. Tämän olisi voinut toteuttaa näkölasin avulla. Näkölasia ei kuitenkaan toteutettu, sillä sen likaantumiseen ja lämmönkestoon liittyi liian suuria kysymysmerkkejä, lisäksi tiukan aikataulun johdosta saatavuus nousi suureksi tekijäksi. Toisaalta prosessi on laitteiston avulla helposti ymmärrettävissä sen yksinkertaisen rakenteen ansiosta, vaikka prosessin havainnointi rajoittuikin lämpötilojen ja lauhduttimesta tulevien nesteiden sekä kaasujen seuraamiseen.

Laitteistoa suunniteltaessa oli tiedossa, että hitaan pyrolyysin alueella tapahtuvasta pyrolyysiprosessista saatavan nestejakeen määrä on verrattain pieni. Nestemäisen jakeen saantoa saattoi kuitenkin entisestään pienentää kohotetusta lämpötilasta aiheutuva krakkautuminen. Lisäksi on todennäköistä, että varsinkin prosessin alkuvaiheessa, kun kaasujen kanssa kosketuksissa olevat pinnat ovat kylmiä, nestemäisen jakeen lauhtuminen ja uudelleen haihtuminen tapahtuu useaan kertaan ennen lopullista lauhtumista lauhduttimessa. Tästä syystä kannattaisi tutkia keinoja lämmön vaikutuksen vähentämiseksi esimerkiksi prosessia nopeuttamalla, huippulämpötilaa laskemalla tai nesteiden lauhdutusta muuttamalla.

Pyrolyysiprosessilla voidaan nähdä olevan tulevaisuudessa merkittävä rooli biotaloudessa, energian tuotannossa ja jätteiden käsittelyssä. Laitteiston avulla on helppo kerätä talteen reaktiotuotteita tutkimista ja analysointia varten. Tästä on hyötyä tutkittaessa/demonstroitaessa minkälaista lisäarvoa pyrolyysiprosessilla voidaan saada aikaan eri biomassoilta. Toteutetun laitteiston avulla olisi mah-

dollista tutkia perinteisten biomassojen lisäksi pyrolyysin mahdollisuuksia esimerkiksi jätteenkäsittelyssä.

Työn aloitusvaiheessa molemmilla työn tekijöillä oli verrattain vähän tietoa pyrolyysista, vaikka aihe olikin pinnallisesti puolin tuttu. Laitteiston suunnitteluvaiheessa opittiin paljon aiheesta, niin prosessin yksityiskohdista, kuin sen merkittävästä laajemmasta viitekehysessä. Vaikka molemmilla tekijöillä oli kokemusta tuotesuunnittelusta, opetti tämä työ erityisesti sen, että kaikki vähäpätöisenkin oloiset asiat voivat olla käytännössä hyvin merkityksellisiä tuotetta toteutettaessa tai sitä käytettäessä. Tuli myös hyvin selväksi se, että tuotteen käyttäminen on ensiarvoisen tärkeää mahdollisten ongelmakohtien löytämisessä.

Lähteet

- Aaltonen, K. 2012. Kumin kierrätys Teknikum Oy:ssä. Tampereen ammattikorkeakoulu, Paperi-, tekstiili- ja kemiantekniikka. Opinnäytetyö.
<https://www.theseus.fi/handle/10024/55120>. 10.9.2016.
- Alakangas, E., Hurskainen M., Laatikainen-Luntama J. & Korhonen J. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Tietopalvelu
- Basu, P. 2010. Biomass gasification and pyrolysis. Practical design and theory. Cambridge, USA: Academic Press.
- Bioenergiaporssi. 2016. Puu polttoaineena. Turveruukki Oy.
<http://www.bioenergiaporssi.fi/k%C3%A4sitteet-ja-laskurit/puu-polttoaineena>. 27.9.2016.
- De Decker, K. 2010. Wood gas vehicles: firewood in the fuel tank. Low-tech Magazine. <http://www.lowtechmagazine.com/2010/01/wood-gas-cars.html>. 15.9.2016.
- Fortum talousvaliokunta. 2013. Pyrolyysiöljyssä on potentiaalia. Fortum Oyj.
http://www.fortum.com/SiteCollectionDocuments/Corporation/Fortum_talousvaliokunta.pdf. 29.9.2016.
- Havimo, M. 2012. Biohiili - Raaka-aineet ja ominaisuudet. Helsingin yliopisto.
http://www.balbic.eu/fi/ajankohtaista/2012/fi_FI/aloitusseminaarin_esitykset/_files/87145295638910885/default/Biohiilen_raaka-aineet_Helsingin_yliopisto.pdf. 27.9.2016.
- International Biochar Initiative. 2016. Frequently Asked Questions about Biochar. <http://www.biochar-international.org/biochar/faqs>. 10.9.2016.
- Mankonen, A. 2014. Bioöljy ja pyrolyysi. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Kandidaatintyö.
<https://www.doria.fi/handle/10024/96513>. 10.10.2016.
- ProAgria Kainuu. 2005. Terva - Suomen ensimmäinen vientituote. ProAgria Kainuu.
http://www.kainuunterva.com/index.php?option=com_content&task=view&id=14&Itemid=40. 10.9.2016.
- Punkkinen, H., Teerioja, N., Merta, E., Moliis, K., Mroueh U-M. & Ollikainen M. 2011. Pyrolyysin potentiaali jätemuovin käsittelymenetelmänä. VTT.
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2011/W176.pdf>. 30.9.2016.
- Ringer, M., Putsche, V. & Scahill, J. 2006. Large-Scale Pyrolysis Oil Production: A Technology Assessment and Economy Analysis. National Renewable Energy Laboratory. <http://www.nrel.gov/docs/fy07osti/37779.pdf>. 15.9.2016.
- Starck, J. 2010. Biohiili. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Kandidaatintyö. <http://www.doria.fi/handle/10024/61636>. 10.10.2016.
- Vepsäläinen, A., Pitkänen, J. & Hyppänen, T. 2012. Fundamentals of heat transfer. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Opetusmoniste.
- Zube, D. 2010. Heat transfer efficiency of biomass cookstoves. Colorado State University.
http://digitool.library.colostate.edu/webclient/DeliveryManager/digitool_items/csu01_storage/2011/02/21/file_1/88698. 27.9.2016.

FYSIKAALISET VAARATEKIJÄT (F)

VAAROJEN TUNNISTAMINEN

Yritys: Karelia AMK	Arvioinnin kohde: Pyrolyysilaitteisto
Päiväys: 9.10.2016	Tekijät: Otto Nisula, Olli Tukiainen

	Aiheuttaa vaaraa tai haittaa	Ei vaaraa tai haittaa	Ei tietoa	Kommentteja ja tarkennuksia
Melu				
F 1. Jatkuva melu	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
F 2. Iskumelu	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
F 3. Työpaikan lämpötila	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
F 4. Yleisilmanvaihto ja kohdepoistot	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
F 5. Vetoisuus	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
F 6. Kylmät tai kuumat esineet ja pinnat	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Korkeita lämpötiloja
F 7. Työskentely ulkotiloissa	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Valaistus				
F 8. Yleisvalaistus	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
F 9. Kohdevalaistus työpisteissä	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
F 10. Ulkovalaistus	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Tärinä				
F 11. Käsiin kohdistuva tärinä	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
F 12. Koko kehoon kohdistuva tärinä	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Säteilyt				
F 13. Ionisoiva säteily	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
F 14. Ultravioletti säteily (UV)	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
F 15. Lasersäteily	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
F 16. Infrapunasäteily	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
F 17. Mikroaallot	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
F 18. Sähkömagneettiset kentät	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Muita mahdollisia vaaratekijöitä?				
Häkämyrkytys	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Prosessissa syntyy häkää
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Arvioi riski Seuraa tilannetta Selvitä

Lisätietoja:

FYSIKAALISET VAARATEKIJÄT (F)

TOIMENPIDELOMAKE

6.1.1 Vaaratilanteen kuvaus	Riski	Toimenpiteet	Vastuuhenkilö	Aikataulu	OK
Korkeista lämpötiloista johtuva palovamman ja tulipalon vaara.	3	Kuumat pinnat peitetään lämpösuojilla mahdollisuuksien mukaan. Riittävän tukeva alusta joka rajoittaa lämmön johtumista vetokaapin rakenteisiin.	Otto	14.10	
Häkämyrkytys	3	Laitteiston käyttö vain hyvin tuuletetuissa tiloissa. Mahdollisesti lauhtumattomien kaasujen polttaminen.	Otto	14.10	

Todennäköisyys

Seuraukset

	Vähäiset	Haitalliset	Vakavat
Epätodennäköinen	1 Merkityksetön riski	2 Vähäinen riski	3 Kohtalainen riski
Mahdollinen	2 Vähäinen riski	3 Kohtalainen riski	4 Merkittävä riski
Todennäköinen	3 Kohtalainen riski	4 Merkittävä riski	5 Sietämätön riski

TAPATURMAN VAARAT (T)

VAAROJEN TUNNISTAMINEN

Yritys:Karelia AMK	Arvioinnin kohde: Pyrolyysilaitteisto
Päiväys:13.4.2016	Tekijät: Ryhmä 4

	Aiheuttaa vaaraa tai haittaa	Ei vaaraa tai haittaa	Ei tietoa	Kommenteja ja tarkennuksia
Työympäristö				
T 1. Liukastuminen	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
T 2. Kompastuminen	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
T 3. Henkilön putoaminen	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
T 4. Lukittuun tilaan loukkuun jääminen	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
T 5. Sähköisku tai staattisen sähkön purkaus	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
T 6. Hapen puute	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Häkämyrkytys
T 7. Veden varaan joutuminen	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
T 8. Tavarankuljetukset ja muu liikenne	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
T 9. Järjestys ja siisteys	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Esineet ja aineet				
T 10. Esineiden putoaminen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Laitteen putoaminen
T 11. Esineiden kaatuminen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Laitteen kaatuminen
T 12. Sortuminen	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
T 13. Esineiden tai aineiden sinkoutuminen	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
T 14. Liikkuvan esineen aiheuttama isku	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
T 15. Puristuminen esineiden väliin	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
T 16. Takertuminen liikkuvaan esineeseen	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
T 17. Viihto-, leikkautumisvaara tai pistovaara	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
T 18. Eläimen tai ihmisen toiminta	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Virheellinen käyttö
	Arvioi riski	Seuraa tilan- netta	Selvitä	

Lisätietoja:

TAPATURMAN VAARAT (T)

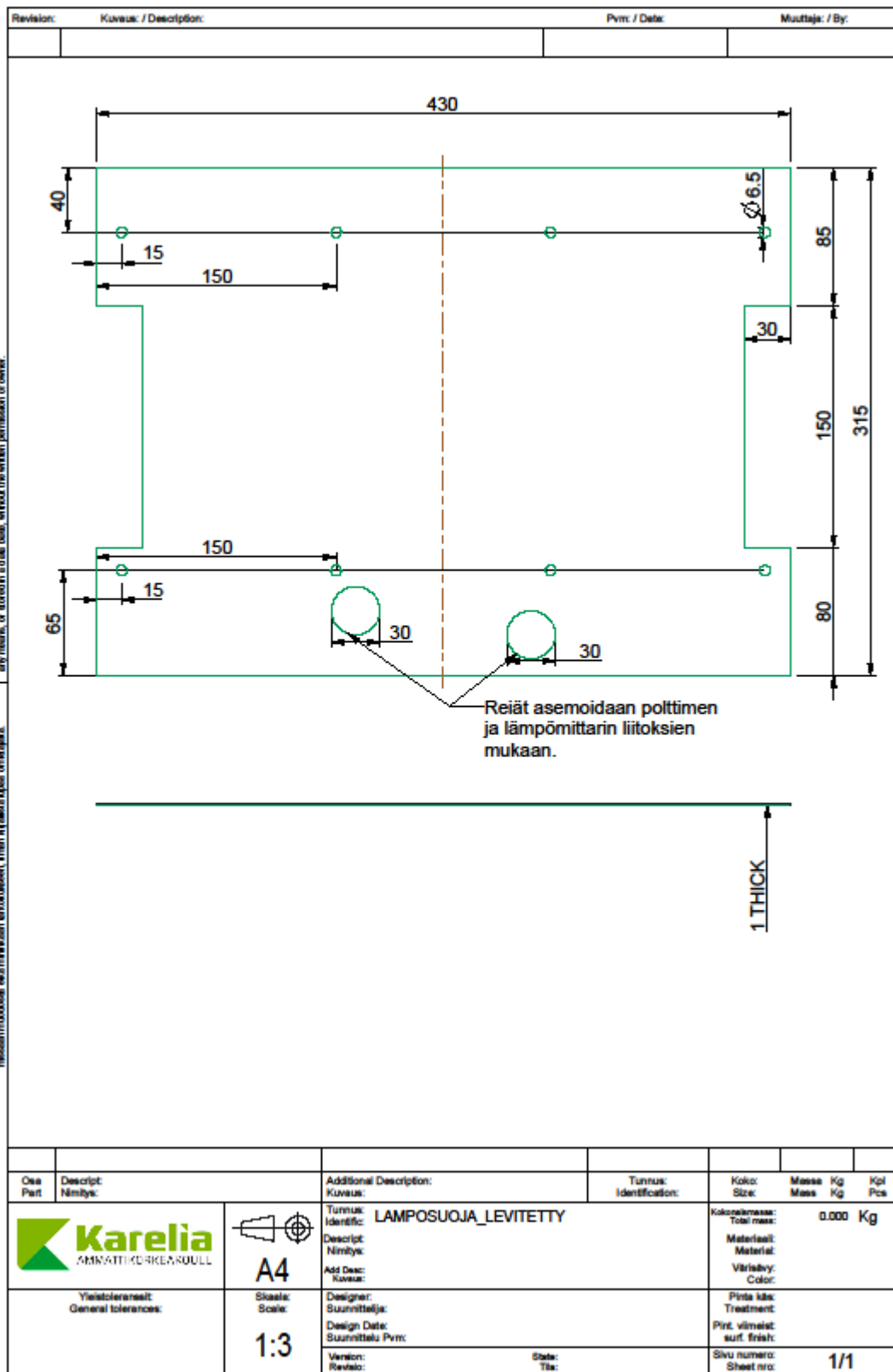
TOIMENPIDELOMAKE

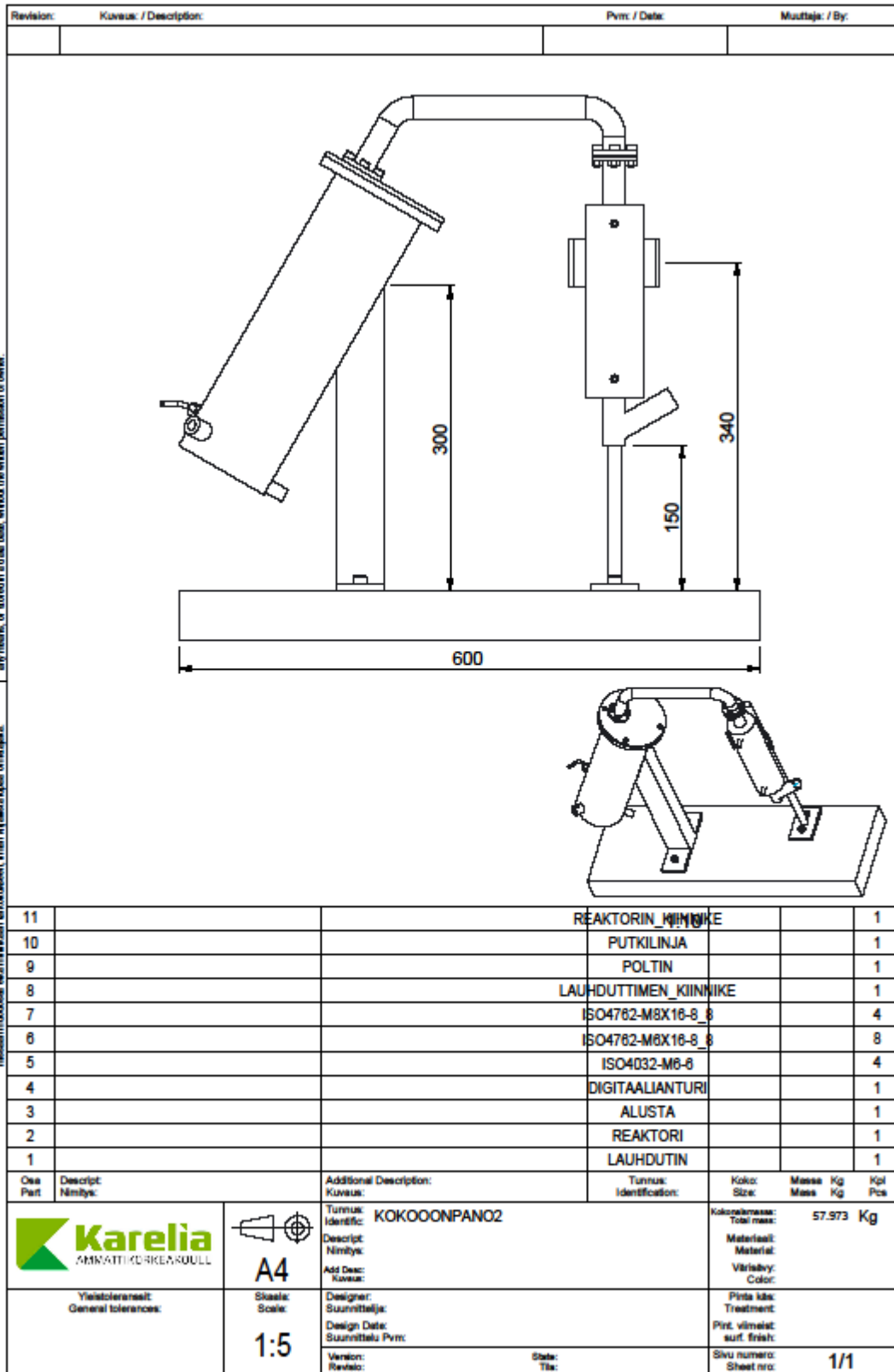
6.1.2 Vaaratilanteen kuvaus	Riski	Toimenpiteet	Vastuuhenkilö	Aikataulu	OK
Häkämyrkytys	3	Käyttö tuuletetuissa tiloissa. Tutkitaan mahdollisuus lauhtumattomien kaasujen polttoon.	Otto	14.10	OK
Laitteen putoaminen	1	Riittävän tukeva runko. Käyttö vain tukevalla alustalla.	Otto	14.10	OK
Laitteen kaatuminen	1	Riittävän tukeva runko. Käyttö vain tukevalla alustalla.	Otto	14.10	OK
Vaaratilanteen aiheutumisen laitteiston virheellisestä käytöstä.	3	Käyttöohjeen laadinta.	Otto	14.10	OK

Todennäköisyys

Seuraukset

	Vähäiset	Haitalliset	Vakavat
Epätodennäköinen	1 Merkityksetön riski	2 Vähäinen riski	3 Kohtalainen riski
Mahdollinen	2 Vähäinen riski	3 Kohtalainen riski	4 Merkittävä riski
Todennäköinen	3 Kohtalainen riski	4 Merkittävä riski	5 Sietämätön riski



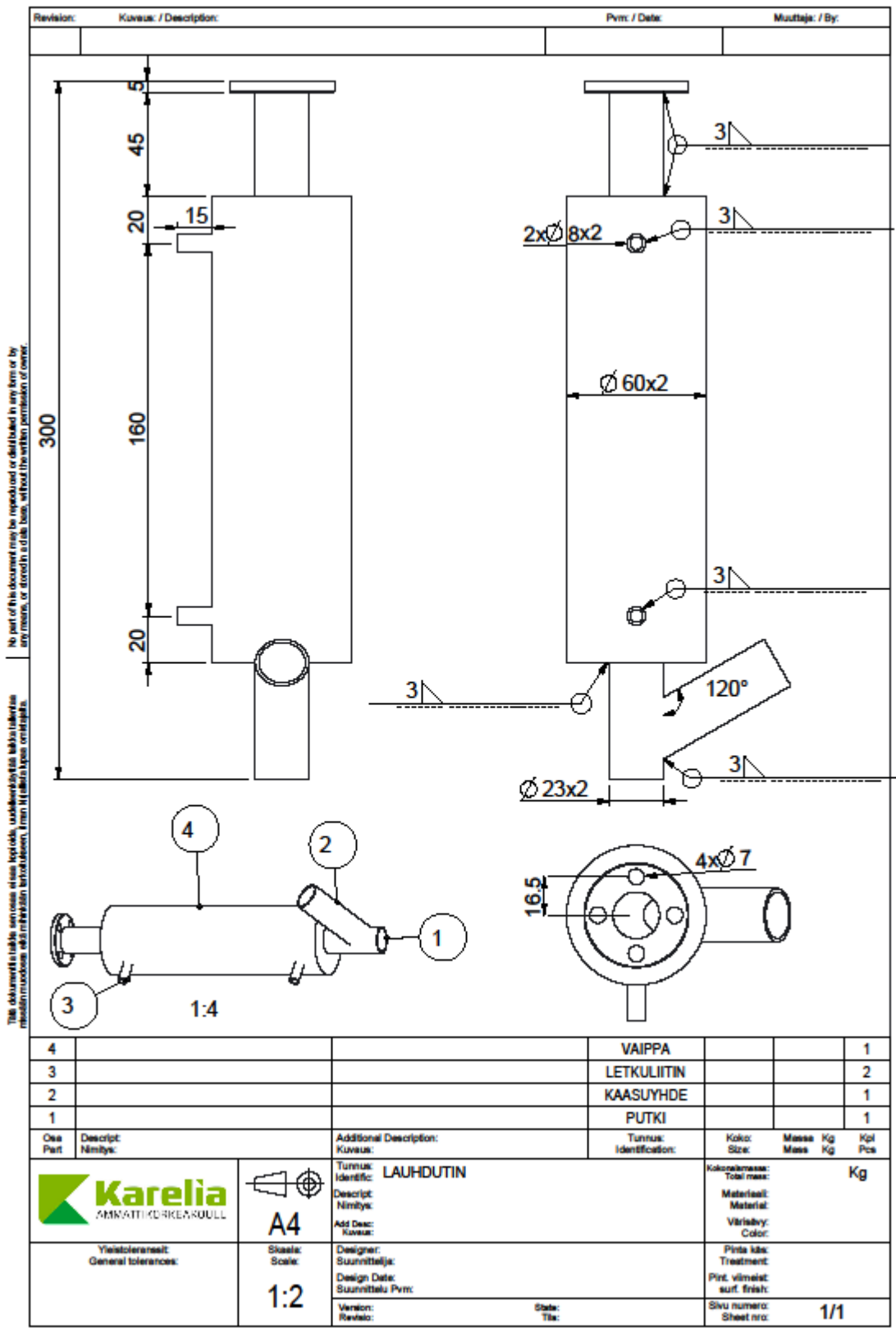


Drawing filename: KOKOONPANO

Drawing file date: 13.01.2017

This document is a technical drawing and is not to be reproduced or distributed in any form or by any means, or stored in a data base, without the written permission of owner.

Tämä dokumentti on tekninen piirros ja ei saa kopioida, uudelleenkäyttää tai julkistaa ilman kirjallista luvutusta omistajaltaan.



This document is a technical drawing of a gas burner assembly. It is a technical drawing of a gas burner assembly. It is a technical drawing of a gas burner assembly. It is a technical drawing of a gas burner assembly. It is a technical drawing of a gas burner assembly.

Karelia
AMMATTIKORKEAKOULU

A4

Yleistoleranssit:
General tolerances:

LAUHDUTIN

Scale:
1:2

Designer:
Suunnittelija:

Design Date:
Suunnittelu Pvm:

Version:
Revisio:

State:
Tila:

Kokoaikainen:
Total mass:
Kg

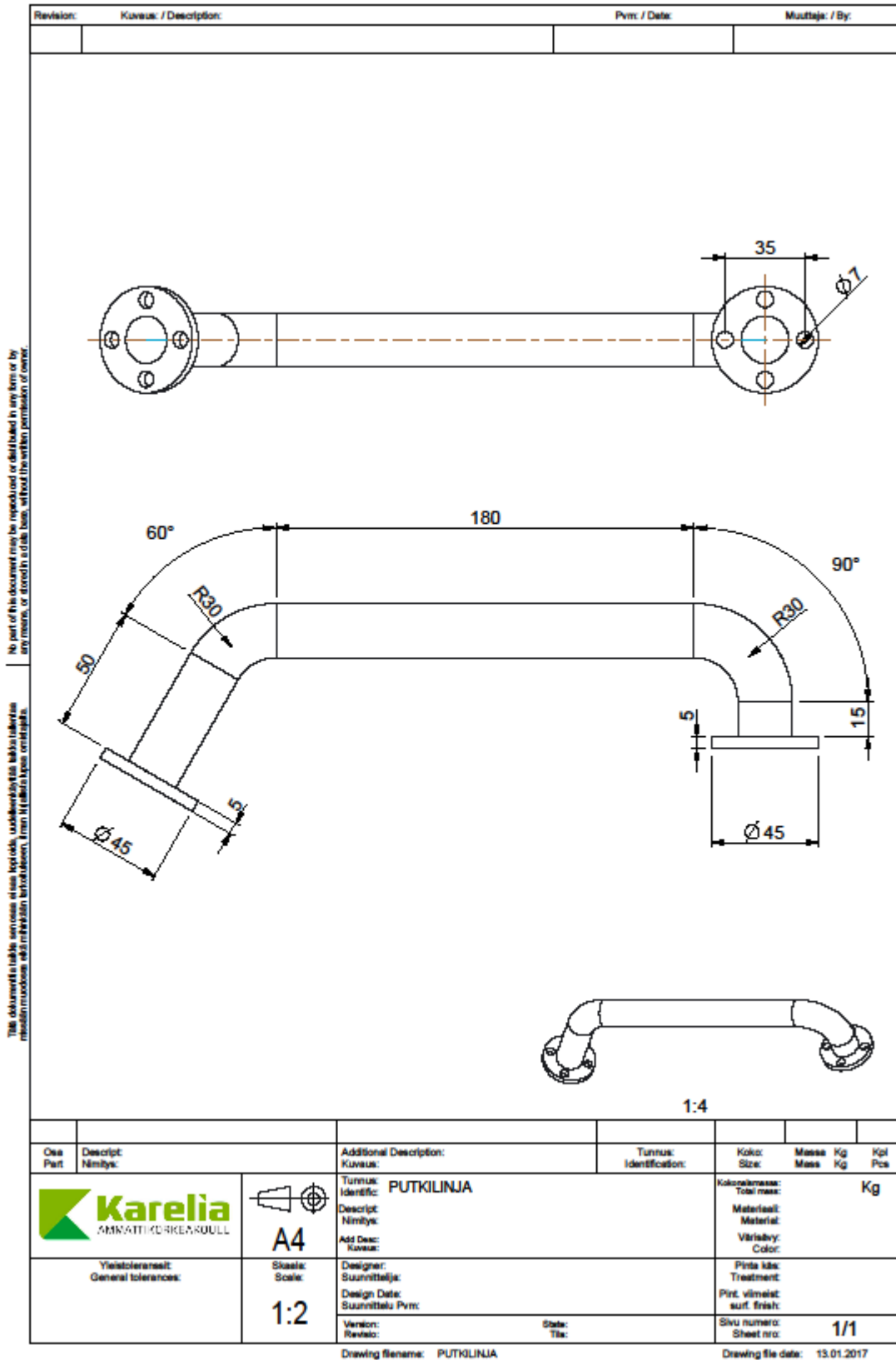
Materiaali:
Material:

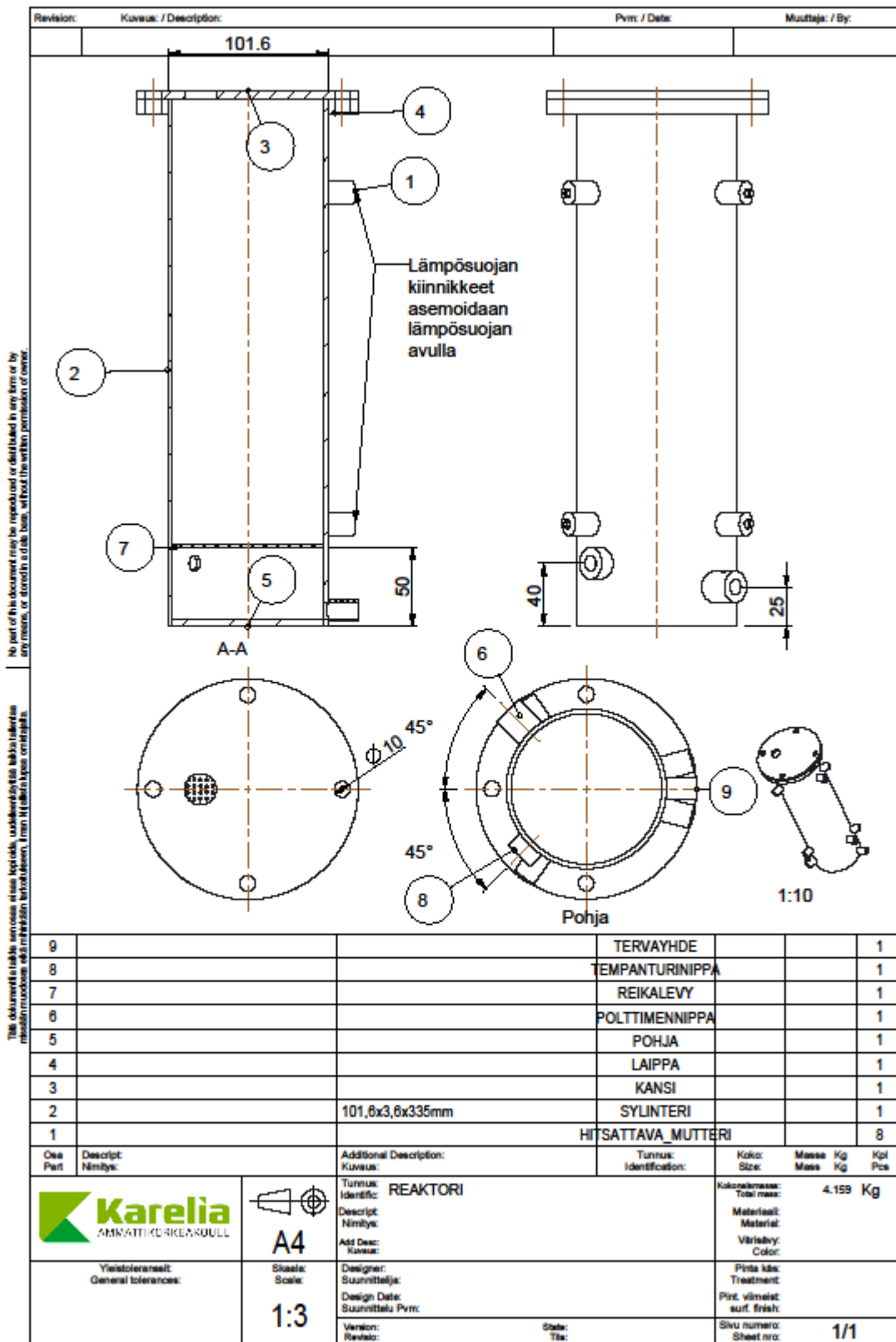
Väriävy:
Color:

Pinta-ala:
Treatment:

Pint. viimeist.
surf. finish:

Sivu numero:
Sheet no: **1/1**





This document is a technical drawing and is not to be reproduced or distributed in any form or by any means, or stored in a retrieval system, without the written permission of owner.

Tarvittavat suojavälineet:

- Suojalasit
- Palamaton haalari
- Suojakäsineet

Käyttö:

1. Aseta laitteisto vetokaappiin ja kytke imuri päälle. Huolehdi, että kaikilla laitteistoa käyttävillä on tarvittavat suojavälineet. Ilmoita vahtimestarille pyrolyysilaitteiston käytöstä aiheutuvasta mahdollisesta savun hajusta.
2. Avaa reaktorin kansi kuusiokoloavaimella ja puhdista reaktori mahdollisista jäämistä.
3. Aseta reaktori telineeseen ja lisää biomassa tasaisesti reikälevyn päälle. Lisää biomassaa enintään ½ reaktorin korkeudesta.
4. Kiinnitä reaktorin kansi. Huolehdi, että tiiviste-pinnan väliin ei jää roskia tai muuta tiiviyttä haittaavaa, ja että tiiviste on ehjä.
5. Kytke vesikierto lauhduttimeen. Kytke lämpötilamittauksen virtalähde pistorasiaan. Aseta lauhdeiden keräysastia lauhduttimen alapuolelle.
6. Sytytä kaasupoltin ilmareiät täysin avattuna. Säädä polttimen teho niin suureksi kuin mahdollista polttimen liekin pysyessä vakaana.
7. Kurista polttimen ilman saantia siten, että liekin väri kirkastuu hieman. Ja aseta poltin reaktoriin. Pyrolyysikaasujen muodostus alkaa lähes välittömästi.
8. Reaktorin alapään lämpötila alkaa nousta välittömästi. Pyri pitämään lämpötila noin 600 celsiusasteessa polttimen tehoa säätämällä.
9. Kun reaktorin yläpään lämpötila on noussut noin 250 celsiusasteeseen, pyrolyysiprosessi on suurimmalta osin loppunut. Lauhduttimeen tiivistyneen tervan juoksevuuutta voi parantaa, prosessin loppuvaiheessa, sulkemalla lauhduttimen vesikierto ja laskemalla lauhduttimen vaippa tyhjäksi vedestä. Tämä nostaa lauhduttimen sisäpintojen lämpötilaa.
10. Sulje kaasupoltin ja irrota se reaktorista. Aseta reaktoriin polttimen tilalle tulppa, joka estää palamisilmaa menemästä reaktoriin.
11. Reaktorin jäähtyttyä tyhjennä reaktori. On suositeltavaa kastella reaktorista tuleva koksi vedellä ennen roskakoriin laittamista.
12. Tarkista laitteiston kunto

Huom. reaktori sisältää pyrolyysin jälkeen palavaa koksia, joka on syttymislämpötilassa pitkään pyrolyysiprosessin loputtua. Tästä syystä reaktorin ilmansaanti täytyy estää. Reaktorin kannen saa avata vasta reaktorin jäähtyttyä.

