

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0201 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

## Massataseiden laskentatyökalujen kehitys bench- kokoluokan reaktiivisuuskoelaitteelle

Työn tarkastaja: Jouni Ritvanen

Työn ohjaaja: Jouni Ritvanen

Lappeenranta 20.1.2015

Teemu Sihvonen

# TIIVISTELMÄ

Teemu Sihvonen

**Massataseiden laskentatyökalujen kehitys bench-kokoluokan reaktiivisuuskoelaitteelle**

**Development of mass balances calculation tools for the bench scale reactivity test device**

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2015

28 sivua, 8 kuvaa ja 3 taulukkoa

Hakusanat: laskentatyökalu, reaktiivisuus, leijupoltto, bench-kokoluokka, massatase

Tässä työssä tarkastellaan kehitettyjä laskentatyökaluja VTT:n Jyväskylän toimipisteen bench-kokoluokan reaktiivisuuskoelaitteiston tulosten käsittelyn nopeuttamiseksi. Työkalut kehitettiin Matlab-ohjelmistossa. Toinen työkalu toimii Savcor Wedge prosessinhallintaohjelmassa reaaliaikaisena laskentatyökaluna. Tulosten varmentamiseen ja tarkistamiseen kehitetty työkalu toimii Matlabissa mittauksista tuodulla mittausdatalla.

Työn aluksi tarkastellaan yleisesti palamista ja sen eri vaiheita. Tämän jälkeen esitellään koelaitteisto, jolle analyysityökalut kehitettiin. Koelaitteiston kanssa esitellään esimerkki polttoainepanoskokeista, joiden tutkimisen nopeuttamiseen laskentatyökalut soveltuu. Laskentatyökalujen toiminta esitetään pääpiirteittäin ja niiden välinen tarkkuusero selvennetään.

# SISÄLLYSLUETTELO

<b>Symboli- ja lyhenneluettelo</b>	<b>4</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>5</b>
<b>2 Palaminen</b>	<b>7</b>
2.1 Lämpeneminen ja kuivuminen .....	7
2.2 Pyrolyysi.....	8
2.3 Haihtuvien palaminen.....	9
2.4 Jäännöshiilen palaminen.....	10
<b>3 Koelaitteisto VTT:llä ja tehdyt polttoainepanoskokeet</b>	<b>13</b>
3.1 Koelaitteisto.....	13
3.2 Polttoainepanoskokeet.....	15
<b>4 Laskentatyökalut</b>	<b>17</b>
4.1 Reaaliaikainen työkalu .....	18
4.2 Jälkikäsitteilytyökalu .....	21
4.3 Polttoainepanoskokeen A3 tulokset .....	22
4.4 Laskentatyökalujen väliset tarkkuuserot .....	25
<b>5 Johtopäätökset</b>	<b>27</b>
<b>6 Yhteenveto</b>	<b>28</b>
<b>Lähdeluettelo</b>	<b>29</b>
<b>Liite 1. Polttoaineanalyysit</b>	<b>30</b>

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Roomalaiset

<i>M</i>	Moolimassa	g/mol
<i>R</i>	Kaasuvakio	8,314 J/molK
<i>T</i>	NTP lämpötila	273 K
<i>ero</i>	Ero laskentamenetelmien välillä	%
<i>m</i>	Massa	g
<i>ṁ</i>	Massavirta	g/s
<i>p</i>	NTP paine	100 kPa
<i>q</i>	Tilavuusvirta	m <sup>3</sup> /s
<i>u</i>	Polttoaineen kosteus	
<i>w</i>	Massaosuus	
<i>x</i>	Tilavuusosuus	

### Alaindeksit

C	Hiili
CO	Hiilimonoksidi
CO <sub>2</sub>	Hiilidioksidi
cs	Kumulatiivisella summauksella laskettu
i	Savukaasukomponentti
in	Sisään
pa	Polttoaine
sk	Savukaasu
trapz	Puolisuunnikassäännöllä laskettu

### Lyhenteet

FTIR	Fourier transform infrared spectroscopy
ppm	Parts per million

## 1 JOHDANTO

Bench-kokoluokan koelaitteisto on muun muassa palamisen tutkimiseen tarkoitettu reaktori. Tällaisen koelaitteiston etuna on, että reaktio-olosuhteet tunnetaan tarkasti, jolloin saadaan juuri tiettyä polttotapaa koskevaa tulostietoa. Bench-kokoluokan koelaitteilla pyritään usein selvittämään polttoaineen reaktionopeutta, päästöjen muodostumista ja syntyviä lämpötiloja. (Raiko et al., 1995, 549)

Bench-kokoluokan koelaitteistolla ei voida ratkaista kaikkia täysmittaisen polton ongelmia. Tarkemman tiedon saamiseksi tarvitaan pilot- ja demonstraatiokokoluokan koelaitteistoja, joilla saadaan tietoa itse polttokattilasta, jota jäljitellään. Pilot- ja demonstraatiolaitosten suurien investointikustannusten vuoksi niitä ei ole käytössä kuin harvoilla yrityksillä. Tästä johtuen investointeja näihin laitteisiin pyritään lykkäämään mahdollisimman tarkkoilla esivalmisteluilla. Esivalmistelujen tekemiseen käytetään bench-kokoluokan koelaitteilta saatua tietoa. Ongelmien ja riskien ennalta tunteminen lisää varmuutta kalliimpiin testilaitteisiin siirryttäessä. (Raiko et al., 1995, 535) Ihannetapauksessa tarkat matemaattiset mallit mahdollistavat tietokonesimulaatiot. Tällöin polttotekniikoiden tutkimus voidaan suorittaa simuloimalla ja vähentää siten käytännön kokeiden tarvetta. (Raiko et al., 1995, 24)

Polttoainepanoskokeita tehtäessä bench-kokoluokan reaktiivisuuskoelaitteella syntyy paljon mittausdataa, jonka käsitteleminen on hidasta. Yksi mittausdatasta määritettävä tulos on polttoainepanoksesta palamisessa syntyneiden yhdisteiden määrät. Palaminen muodostaa savukaasuanalysoijan tilavuusosuuksien mittausdataan nopean vasteen jokaiselle savukaasukomponentille. Näiden vasteiden löytäminen ja niiden muuntaminen massoiksi on käsintehtynä hidasta.

Tämän työn tavoitteena on kehittää Matlab-pohjaiset laskentatyökalut VTT:n Jyväskylän- yksikön leijupolton bench-kokoluokan koelaitteen analyysitulosten käsittelyn nopeuttamiseksi. Työkaluja tehtiin kaksi: reaaliaikainen analyysitulosten välittömään laskemiseen ja jälkikäsitteilytyökalu tulosten tarkistamiseen. Reaaliaikainen työkalu toimii Savcor Wedge- ohjelmistossa, johon analysoijan mittaamat arvot

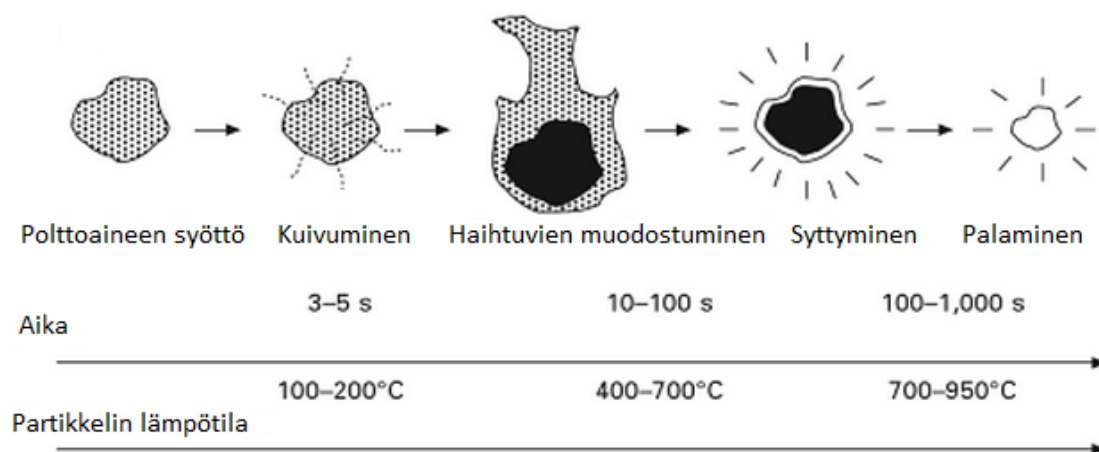
päivittyvät reaaliaikaisesti. Jälkikäsitteilytyökalua ajetaan Matlab- ohjelmistossa, johon analysaattorien mittausdata tuodaan Savcor Wedgestä ASCII- tiedostona.

Reaaliaikaisen työkalun tarkoituksena on toimia nopeana tulosten analysaattorina, jota polttoainepanoskokeiden tekijä voi käyttää testien aikana. Testien yhteydessä tehtävä analysointi mahdollistaa vikojen havaitsemisen jo testien aikana. Lisäksi tulosten saaminen heti testien valmistuttua mahdollistaa jatkotutkimuksen aloittamisen välittömästi. Jälkikäsitteilytyökalu otettiin käyttöön reaaliaikaisen työkalun tulosten tarkistamiseksi. Jälkikäsitteilytyökalu on myös pohjana mahdolliselle laskentatyökalun jatkokehittämiselle.

Aluksi tarkastellaan palamisprosessia ja sen vaiheita polttoainepanoskokeiden mittaustulosten ymmärtämiseksi, palamisen ollessa se tutkimuskohde jota reaktiivisuuskokeilla tutkitaan. Kappaleessa 3 selvennetään käytettyä koelaitteistoa ja tehtyjä polttoainepanoskokeita, joita varten laskentatyökalut kehitettiin. Lopuksi esitellään tarkemmin laskentatyökaluja ja niiden toimintaa sekä niiden välisiä eroja.

## 2 PALAMINEN

Polttoainepartikkeli kokee palaessaan neljä päävaihetta, lämpenemisen ja kuivumisen, pyrolyysin, haihtuvien ja jäännöshiilen palamisen. Näiden vaiheiden analysointi on vaikeaa niiden nopeuden ja osin yhdenaikaisuuden vuoksi. Leijupoltossa lämpeneminen on todella nopeaa, tehokas haihtuvien irtoaminen ja kuivuminen alkavat kun polttoainepanos saavuttaa 100 °C. (Oka, 2004, 214). Polttoainepartikkelin kiintoaineen palamisen vaiheet esitetään kuvassa 2.1. Kuvassa 2.1 on myös kiintoainepartikkelin lämpötilat eri palamisen vaiheissa ja ajat, jotka kuluvat palamisen eri vaiheiden saavuttamiseen leijupoltossa.



Kuva 2.1: Polttoainepartikkelin kiintoaineen palamisen vaiheet ja niihin kuluvat ajat sekä partikkelin lämpötilat. (Scala, 2013, 326)

### 2.1 Lämpeneminen ja kuivuminen

Leijupolttokattilassa polttoaineen osuus vaihtelee 0,5 – 5 painoprosenttiin kiintoaineesta tulipesässä. Loput kiintoaineesta on petimateriaalia. Tästä johtuen polttoaine lämpenee todella nopeasti saapuessaan kuuman petimateriaalin sekaan tulipesään. Polttoainepartikkelin lämpenemisnopeus voi vaihdella 100 °C/sek jopa yli 1000 °C/sek riippuen useista tekijöistä kuten polttoainepartikkelin koosta. (Basu, 2006, 103)

Vesi höyrystyy lähellä kiehumislämpötilaa tulipesässä olevien palamiskaasujen ja kiintoaineen korkeasta lämpötilasta johtuen. Kuivumista rajoittavana tekijänä tällöin on

lämmönsiirto. Aineensiirto polttoainepartikkelissa on nopeaa, koska pinnalla muodostuvan vesihöyryn tilavuus laajenee runsaasti muodostaen paine-eron partikkeliin. (Raiko et al., 1995, 142)

## 2.2 Pyrolyysi

Pyrolyysissä korkeasta lämpötilasta johtuen polttoainepartikkelissa muodostuu useita kaasumaisia aineita, jotka vapautuvat partikkelista. Yleisesti haihtuvat kaasut sisältävät CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub> ja H<sub>2</sub>S kaasuja. Lisäksi haihtuvat kaasut sisältävät useita hiilivety-yhdisteitä, jotka vapautuvat asteittain. Ensimmäiset haihtuvat hiilivedyt vapautuvat 500 – 600 °C lämpötilassa, seuraavat 800 – 1000 °C. Pyrolyysissä haihtuvien aineiden koostumukseen vaikuttavat useat tekijät kuten polttoainepartikkelin lämpenemisnopeus ja koko sekä palamistilan paine. (Basu, 2006, 104)

Pienillä partikkeleilla pyrolyysinopeutta rajoittavana tekijänä toimii kemiallinen kinetiikka. Suurilla partikkeleilla rajoitusta aiheuttaa joko lämmönsiirto ympäristöstä partikkeliin tai haihtuvien aineensiirto partikkelista. Pyrolyysin jälkeen jäljelle jäävää pääasiassa hiilestä koostuvaa kiintoainesta kutsutaan jäännöshiileksi. (Raiko et al., 1995, 145)

Lämpenemisnopeuden kasvattaminen kasvattaa myös pyrolysoituvaa osuutta. Lämpenemisnopeuden kasvattaminen ja partikkelikoon pienentäminen kasvattavat pyrolysoituvien määrää, koska tällöin haihtuvilla aineilla on vähemmän aikaa sekundaarisille reaktioille jäännöshiilen kanssa. Paineen nosto kasvattaa tuotteiden viipymää polttoainepartikkelissa, mikä vähentää haihtuvien kaasujen määrää hieman. Kuitenkin happea sisältävässä ympäristössä paineen kasvattaminen saattaa lähentää palamisliekkiä hiukkasen ympärillä, jolloin partikkelin lämpötilan nousun vuoksi kaasujen määrä kasvaa. (Raiko et al., 1995, 146)

Polttoainepartikkelin palamisaika lyhenee mitä suurempi pyrolyysiosuus on. Tämä johtuu siitä, että pyrolyysi on jäännöshiilen palamista nopeampi tapahtuma. Suuri pyrolyysisaanto lisää jäännöshiilen huokoisuutta, mikä vaikuttaa jäännöshiilen



reaktiivisuuteen positiivisesti. Suuren reaktiivisuuden partikkelit palavat nopeammin. (Raiko et al., 1995, 146)

### 2.3 Haihtuvien palaminen

Pyrolyysissa haihtuvat aineet muodostavat ylöspäin nousevan pilven polttoainepartikkelin ympärille. Haihtuvien aineiden on mahdollista palaa jo partikkelin ympärillä, mikäli hapeta on riittävästi. Usein kuitenkin haihtuvien pilvi nousee pois partikkelien läheisyydestä, jolloin haihtuvien palaminen tapahtuu kattilan leijutustilassa. Tästä johtuen on tarpeellista luoda riittävä turbulenttinen sekoittuminen hapen ja haihtuvien kaasujen välille leijutustilaan. (Oka, 2004, 215)

Kivihiihtä poltettaessa palavat haihtuvat kaasut ovat pääasiassa  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$  ja  $\text{H}_2$  (Oka, 2004, 243). Näiden kaasujen palaminen tapahtuu homogeenisen kemiallisen reaktion seurauksena. Toisin sanoen haihtuvat kaasut reagoivat hapen kanssa kaasufaasissa muodostaen vesihöyryä ja hiilidioksidia. Tämä vaatii tapahtuakseen korkean noin 600–700 °C lämpötilan. (Oka, 2004, 270–271) Jäännöshiili voi syttyä jo alle 300 °C lämpötilassa, mistä johtuen voimalaitoksen käynnistysvaiheessa saattaa syntyä yllättäviä lämpötilan nousuja, kun petimateriaali on aluksi alle 600 °C ja haihtuvat eivät vielä syty. Petimateriaalin ylitettyä 600 °C lämpötilan syttyvät haihtuvat kaasutkin aiheuttaen huomattavan lämpötilan nousun kattilassa. (Oka, 2004, 275–276)

Normaalitilassa kattilan lämpötila on niin suuri, että haihtuvat aineet syttyvät välittömästi päästyään kosketuksiin hapen kanssa. Tällöin pyrolyysi ja haihtuvien palaminen ovat vaikeasti eroteltavissa toisistaan, niiden samanaikaisuuden vuoksi. Käytännössä tutkimus kohdistuu pyrolyysin ja haihtuvien palamisen kokonaisajan määrittämiseen, eikä niinkään näiden kahden erottamiseen toisistaan. Pienen 3 mm halkaisijaltaan olevan kivihiihpartikkelin pyrolyysi kestää noin 14 sekuntia, kun haihtuvat palavat vain muutamassa sekunnissa. Tästä johtuen yleensä haihtuvien palamista rajoittaa pyrolyysinopeus. (Basu, 2006, 106)

Haihtuvien kaasujen täydellisen palamisen varmistamiseksi on taattava riittävä sekoittuminen hapen ja haihtuvien kaasujen välille. Yleensä diffuusiolla tapahtuva

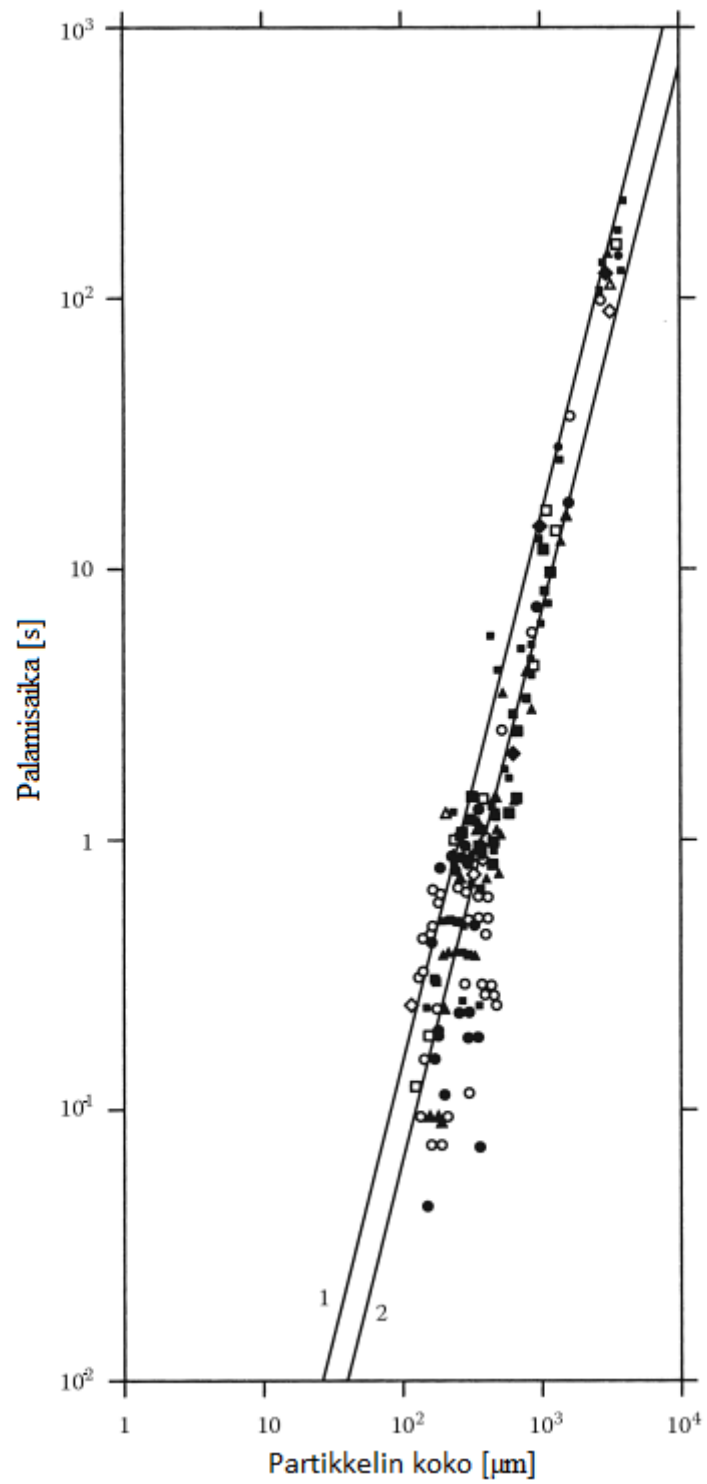
sekoittuminen ei ole riittävä täydellisen ja nopean palamisen takaamiseksi. Turbulenttisella virtauksella palamistilassa voidaan mahdollistaa tehokkaampi sekoittuminen kaasukomponenttien välillä. (Raiko et al., 1995, 323)

## 2.4 Jäännöshiilen palaminen

Polttoainepartikkelin sisäinen rakenne on erilainen haihtuvien aineiden vapautumisen jälkeen kuin alkuperäinen partikkeli. Jäännöshiilen palaminen voi tapahtua joko partikkelin pinnalla tai huokosissa. Hapen ja hiilen reagoimisen tapahtumiselle on useita hidastavia tekijöitä. Leijupedissä hapen täytyy voittaa aineensiirron vastus palamiskaasun kuplan ja hiukkasseoksen välillä, diffuusio hiukkasseoksen ja jäännöshiilipartikkelin välillä ja vastus partikkelin huokosissa. Lisäksi heterogeenisestä palamisreaktiosta syntyvien kaasujen on päästävä pois partikkelin huokosista. Syntyneiden kaasujen ja hiilipartikkelin ympärillä olevan kaasukuplan kaasujen välillä tapahtuu välittömiä homogeenisia reaktioita. Leijutuspedissä tapahtuvan jäännöshiilen palamisen reaktionopeus riippuu näiden prosessien nopeudesta. (Oka, 2004, 287) Jäännöshiili voi palaa kahdella eri tavalla, suoralla hiilirektiolla jolloin tuhka irtoaa partikkelin pinnalta ja hiukkanen pienenee vähitellen tai palaminen tapahtuu jäännöshiilen sisällä jättäen tuhkan hiukkasen muotoon partikkelin kokoa muuttamatta. (Oka, 2004, 215)

Jäännöshiilen palaminen on kaksivaiheinen prosessi. Ensimmäinen se vaatii hapen siirtymisen hiilen pinnalle ja toiseksi reaktion hapen ja hiilen välillä jäännöshiilipartikkelin pinnalla. Jäännöshiilen palaminen voidaan jakaa kolmeen vyöhykkeeseen. Vyöhykkeiden rajat määräytyvät kumpi prosessi toimii palamista rajoittavana tekijänä, hapen kulkeutuminen hiilen pinnalle vai reaktiokinetiikka. Ensimmäisessä vyöhykkeessä kemiallinen reaktiokinetiikka rajoittaa palamisnopeutta. Tällöin hapen on mahdollista kulkeutua hiilipartikkelin huokosiin, minkä seurauksena hiilipartikkeli palaa sisältäpäin partikkelin koon pienentymättä. Reaktiokinetiikka on hidastava tekijä matalissa partikkelin lämpötiloissa ja pienissä partikkeleissa, joissa diffuusiovastus on pieni. Toisessa vyöhykkeessä hapen kulkeutuminen ja reaktiokinetiikka ovat tasavertaisesti hidastavia tekijöitä. Keskikokoiset jäännöshiilipartikkelit kuplapetikattiloissa ja joissain osissa kiertopetikattilaa kuuluvat

toiseen vyöhykkeeseen. Kolmannessa vyöhykkeessä palaminen tapahtuu välittömästi suurien partikkelien pinnalla korkeassa lämpötilassa. Kolmatta vyöhykettä kutsutaan myös diffuusion rajoittamaksi palamiseksi. (Basu, 2006, 108–109)  
Jäännöshiilipartikkelin koon vaikutus palamisaikaan nähdään kuvasta 2.2.



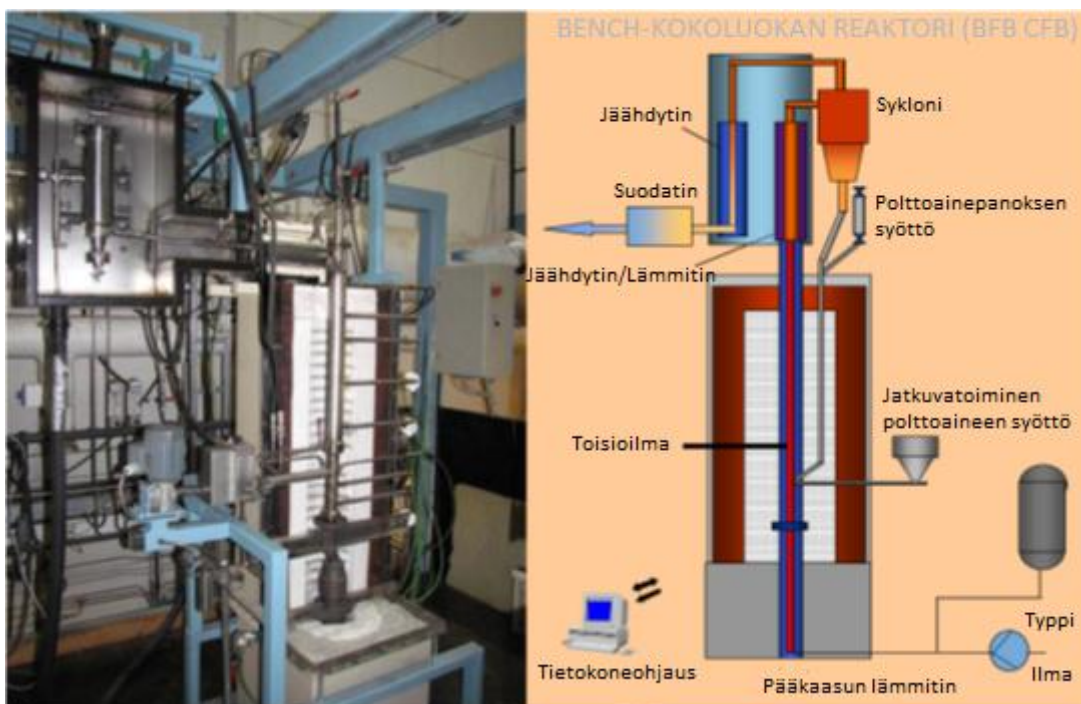
Kuva 2.2: Partikkelikoon vaikutus jäännöshiilen palamisaikaan. (Ragland, 2011, 374)

### 3 KOELAITTEISTO VTT:LLÄ JA TEHDYT POLTTOAINEPANOSKOKEET

Massataseiden laskentatyökalut suunniteltiin toimimaan VTT:n Jyväskylän- yksikön bench-kokoluokan leijupolttokoelaitteiston mittausdatalla. Työkalujen toimivuutta testattiin kolmen eri polttoaineen panoskokeiden tuloksilla. Polttoainepanoskokeissa tutkittiin palamiskaasun hapenmäärän vaikutusta palamiseen. Tämän työn tarkoituksena ei ole tulkita näiden testien tuloksia vaan selventää tehtyjen laskentatyökalujen toimintaa. Tähän tarkoitukseen tehtyt polttoainepanoskokeet sopivat hyvin, sillä ne tarjoavat paljon mittausdataa useiden toistojen muodossa.

#### 3.1 Koelaitteisto

Polttoainepanoskokeet tehtiin bench-kokoluokan leijupetikattilan koelaitteella. Koelaitteen nousuputki on 1850 mm korkea ja 36 mm halkaisijaltaan. Kuvassa 3.1 on valokuva ja kaaviokuva koelaitteistosta.



Kuva 3.1. Vasemmalla kuva ja oikealla kaaviokuva bench-kokoluokan koelaitteesta.

(Saastamoinen et al., 2012)

Nousuputki lämmitetään haluttuun lämpötilaan sitä ympäröivillä lämpövastuksilla. Kuvassa 3.1 näkyvät vaakaputket ovat lämpötilan- ja paineenmittaushaaroja. Laitteisto on lämpöeristetty, jotta lämpötila saadaan pidettyä mahdollisimman tasaisena testien ajan.

Savukaasujen pääasiallinen koostumus mitataan jäähtyneistä savukaasuista suodattimen jälkeen. Mittalaitteina käytetään sekä FTIR että jatkuvatoimista analysaattoria. Jatkuvatoiminen mittaa O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub> ja NO:n tilavuusosuudet savukaasuista, FTIR:llä saadaan pitoisuuksia muillekin savukaasukomponenteille, mutta nyt testeissä oli tarkoitus selvittää myös jatkuvatoimisen ja FTIR:n tarkkuuseroja, joten FTIR tuloksista käytettiin vain samoja jotka saadaan myös jatkuvatoimisella.

Jatkuvatoiminen analysaattori koostuu kahdesta erimerkkisestä mittalaitteesta. SO<sub>2</sub> ja NO:n mittaamiseen käytetään Siemensin Ultramat 23 mallista mittalaitetta. O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> ja CO mitataan Servomexin 4900 mittalaitteella. Siemens sekä Servomex käyttävät infrapunaspektri mittausmenetelmää infrapuna-aktiivisille kaasuille CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub> ja NO. O<sub>2</sub> mitataan Servomexissa paramagneettisella mittausmenetelmällä. Vaikka kummatkin mittalaitteet voivat mitata kaikkia savukaasukomponentteja, ei yhtäaikaista mittauksia voida suorittaa kuin kolmelle kaasuille (Siemens). FTIR on Gasmatin DX4000 mallinen analysaattori. Nimensä mukaisesti FTIR käyttää infrapunaspektrimittausmenetelmää yhdistettynä matemaattiseen Fourier muunnokseen, jolla raaka mittausdata muunnetaan varsinaiseksi spektriksi. Etuna FTIR:ssä on se, että sillä voidaan samanaikaisesti mitata laajempi infrapuna säteilyspektri kuin pelkällä jatkuvatoimisen analysaattorin menetelmällä.

Jatkuvatoiminen analysaattori mittaa nimensä mukaisesti savukaasujen koostumusta joka hetkellä. FTIR on toiminnaltaan hitaampi ja vaatii noin kolme sekuntia mittauksen suorittamiseen ja tiedon tallentamiseen. Tästä johtuen reaaliaikaisessa laskennassa käytetään jatkuvatoimisen antamia arvoja. Vertailu analysaattorien välillä voidaan suorittaa jälkikäsitteilylaskennan avulla.

### 3.2 Polttoainepanoskokeet

Polttoainepanostetit tehtiin kolmella eri polttoaineella, petrokoksilla, kivihiilellä ja kuusen kuorella. Testien tarkoituksena oli tutkia palamiskaasun hapen määrän vaikutusta palamiseen. Jokaisella polttoaineella tehtiin panoskokeet kuudella eri palamiskaasun tyyppi ja happi seoksella. Testien numerot ja palamiskaasun hapenmäärät esitetään taulukossa 3.1. Polttoaineen tasalaatuisuuden varmistamiseksi jokainen testi toistettiin kolmesti. Polttoaineiden analyysitulokset esitetään liitteessä 1.

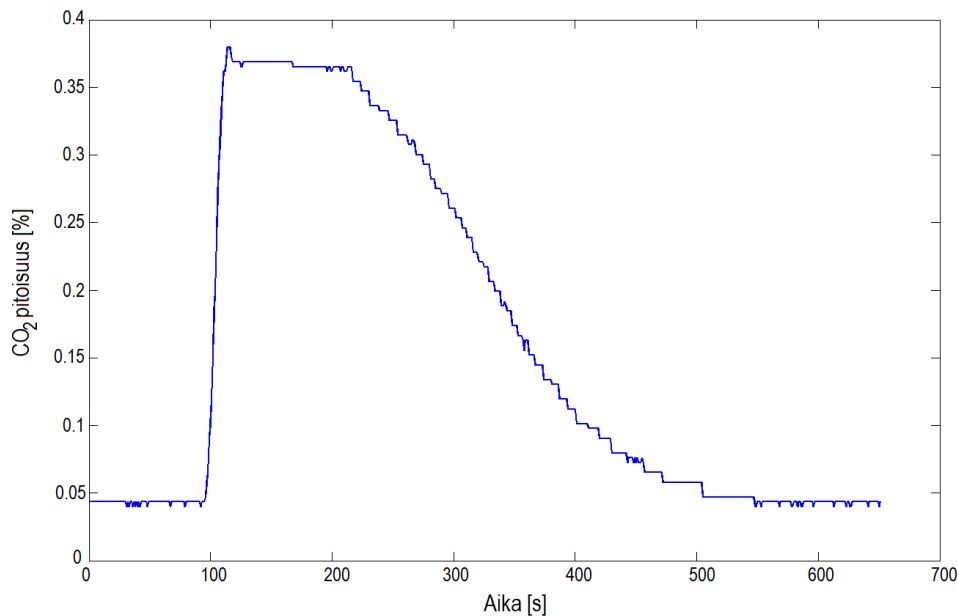
Taulukko 3.1. Polttoaineiden testinumerot ja testien palamiskaasun hapen määrät.

Testin numero	Polttoaine
A1 – A6	petrokoksi
A7 – A12	kivihiili
A13 – A18	kuori
	Palamiskaasun hapenmäärä [%]
A1, A7 ja A13	2
A2, A8 ja A14	3
A3, A9 ja A15	4
A4, A10 ja A16	5
A5, A11 ja A17	10
A6, A12 ja A18	15

Aikaisempien testien perusteella polttoainepanoksille oli haettu sopivat massat. Petrokoksilla ja kivihiilellä testeihin sopiva panoskoko oli 0,1 g ja kuorella käytetty panoskoko oli 0,045g. Panoksien massat pysyivät tavoitteessaan 0,0008 g tarkkuudella.

Jokainen polttoainepanos punnittiin ja massan arvo kirjattiin muistiin, jotta laskentavaiheessa tiedetään tarkasti sisään menneiden aineosasten määrät.

Testit suoritettiin vakiolämpötilassa 850 °C. Polttoainepanoksen palaminen aiheuttaa lämpötiloihin pienen kohoamisen. Tätä lämpötilan nousua sekä savukaasuanalysointoreilla näkyviä savukaasukomponenttien tilavuusosuusvasteita tarkkailemalla tiedettiin milloin edellinen polttoainepanos on palanut loppuun koelaitteistossa, jotta uusi panos voitiin syöttää. Savukaasuanalysointorin antama vaste hiilidioksidin tilavuusosuuteen on kuvassa 3.2.



Kuva 3.2. Jatkuvat toimisen analysointorin CO<sub>2</sub> tilavuusosuusvaste petrokoksipanoksella 15 % palamiskaasun hapella, testi A6.

Tilavuusosuuden palattua lähtötasolle kaikilla mitatuilla savukaasukomponenteilla, syötettiin koelaitteeseen uusi polttoainepanos. Samassa palamiskaasun happipitoisuudessa tehtävät testit suoritettiin peräkkäin saman päivän aikana. Suurempi hapen määrä palamiskaasussa nopeutti polttoainepanoksen palamista, joten viimeiset 10 ja 15 % hapessa tehtävät testit suoritettiin samana päivänä. Täten kaikki 18 testiä saatiin suoritettua viiden päivän aikana.



## 4 LASKENTATYÖKALUT

Laskentatyökalujen tehtävä on laskea polttoainepanoskokeen aikana savukaasuissa reaktorista pois virranneiden savukaasukomponenttien massat. Polttoainepanos aiheuttaa savukaasukomponenttien tilavuusosuuksiin heilahduksen kuten kuvassa 3.2 esitettiin. Tämän vasteen muodostamalta väliltä lasketaan ulosvirranneet massat.

Aluksi tilavuusosuudet muunnetaan massavirroiksi olettaen, että sisään virranneen palamiskaasun ja ulosvirranneen savukaasun tilavuusvirrat ovat yhtä suuret. Olettamuksesta aiheutuu tietysti hieman virhettä, sillä haihtuvien kaasujen ja kosteuden vaikutukset ulosvirtaavaan tilavuusvirtaan jätetään huomioimatta. Tällöin savukaasukomponentin ulosvirtaava massavirta voidaan määrittää yhtälöllä

$$\dot{m}_i = \frac{px_i q_{in} M_i}{RT} \quad (1)$$

jossa	$M_i$	savukaasukomponentin moolimassa
	$T$	NTP lämpötila
	$p$	NTP paine
	$q_{in}$	tilavuusvirta sisään
	$x_i$	savukaasukomponentin tilavuusosuus

Ajansuhteen kertyneestä datasta lasketaan savukaasukomponenttien massavirrat yhtälöllä (1). Massavirran lähtötaso asetetaan nollassa, jotta saadaan vain polttoainepanoksen aiheuttaman muutoksen vaikutus. Nollaukseen käytetään lähtötason keskiarvoa, joka vähennetään kaikista laskentavälin massavirran arvoista. Nollaus suoritetaan erikseen jokaiselle savukaasukomponentille. Nollaukseen käytetään ennen vastetta olevan tasaisen alueen kymmenen mittaustuloksen keskiarvoa, jotta analysaattorista johtuva värähtely ei aiheuttaisi yli- tai alinollausta.

Integroimalla massavirtavaste ajansuhteen saadaan selville kuinka monta grammaa savukaasukomponenttia on virrannut ulos vasteen aikana. Yhtälömuodossa esitettynä

$$m_i = \int \dot{m}_i dt \quad (2)$$

Reaaliaikaisen ja jälkikäsitellyn laskentatyökalujen erot löytyvät tavasta laskea tämä integraali. Tarkemmat kuvaukset näistä laskentatavoista löytyvät työkalukohtaisesti niitä koskevista kappaleista.

Laskentatyökalut määrittävät myös polttoaineessa reaktoriin tulleiden aineiden massat. Esimerkiksi polttoaineessa reaktoriin tulleen hiilen massa saadaan yhtälöllä

$$m_{C,pa} = m_{pa}(1 - u_{pa})w_{C,pa} \quad (3)$$

,jossa	$m_{pa}$	polttoainepanoksen massa
	$u_{pa}$	polttoainepanoksen kosteus
	$w_{C,pa}$	polttoainepanoksen hiilipitoisuus

Laskemalla savukaasuissa reaktorista ulosvirranneet massat, esim. hiilelle yhtälö (4), voidaan verrata tuleeko kaikki reaktoriin mennyt hiili myös ulos, vai muodostuuko tai häviääkö sitä.

$$m_{C,sk} = \frac{m_{CO_2,sk}}{M_{CO_2}} M_C + \frac{m_{CO,sk}}{M_{CO}} M_C \quad (4)$$

,jossa	$m_{CO_2,sk}$	ulosvirranneen hiilidioksidin massa
	$M_{CO_2}$	hiilidioksidin moolimassa
	$M_C$	hiilen moolimassa
	$m_{CO,sk}$	ulosvirranneen hiilimonoksidin massa
	$M_{CO}$	hiilimonoksidin moolimassa

Muodostuminen tarkoittaisi, että reaktorissa olisi joitain epäpuhtauksia, analysaattori antaa liian suuria arvoja tai polttoaineanalyysi olisi virheellinen. Aineen häviäminen viittaisi vuotoihin reaktorissa, osan hiilestä palamattomuuteen tai polttoaineanalyysin virheellisyyteen. Polttoaineanalyysiin virheellisyys tarkoittaa, että polttoaineen mahdollisesta epähomogeenisyydestä johtuen polttoainepanos ei vastaa analysoitua polttoainenäytettä.

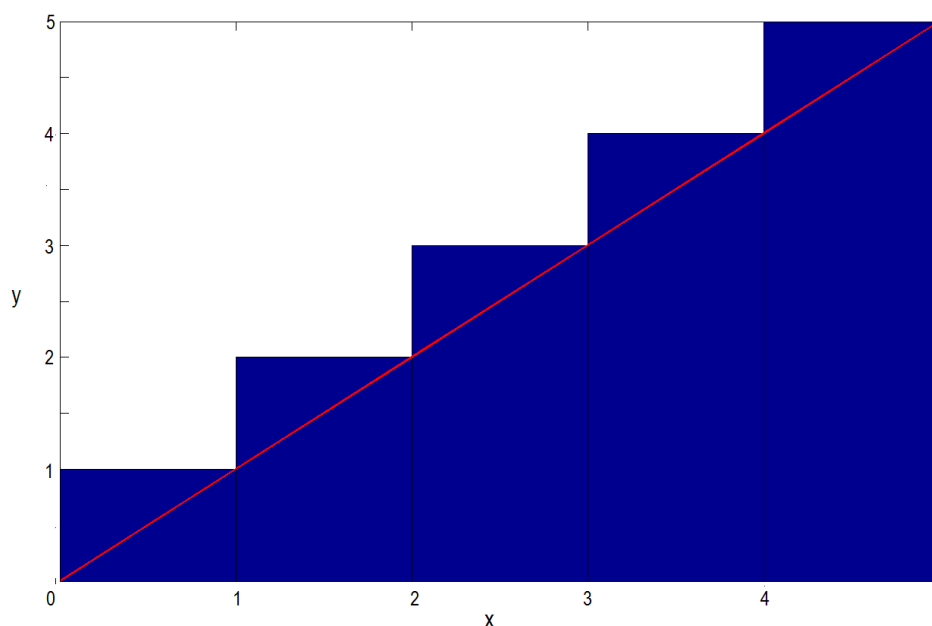
#### 4.1 Reaaliaikainen työkalu

Reaaliaikainen työkalu toimii Savcor Wedge prosessinhallintaohjelmassa. Leijupolton bench-kokoluokan koelaitteella olevilta mittareilta ja analysaattoreilta tuleva

mittausdata päivittyy Wedgeen reaaliajassa. Reaaliaikainen työkalu analysoi mittausarvot heti ja tallentaa Wedgeen lasketut arvot. Reaaliaikainen työkalu koostuu kahdesta Matlab-pohjaisesta funktiosta, jotka on lisätty Savcor Wedgen laskentafunktioihin omina käyttäjäfunktioina. Ensimmäinen laskee savukaasukomponenttien massat ja toinen polttoainepanoksen mukana tulleet eri aineiden massat.

Savukaasukomponenttien massavirtojen laskemiseen käytetään edellä esitettyä yhtälöä (1). Massavirtaan muodostuneelle vasteelle rajat määräytyvät panoskoikeiden tekijän asettaman valitsimen arvojen mukaan. Kun polttoainepanos syötetään reaktoriin asettaa testientekijä valitsimen asentoon 1, jolloin reaaliaikainen työkalu integroi savukaasukomponenttien massoja. Valitsimen ollessa asennossa 0 eivät laskentatyökalut laske arvoja vaan palauttavat tuloksena arvoa nolla. Laskentavälin alun asettaminen nollassa mahdollistaa sen, että lasketaan vain polttoainepanoksesta aiheutuvat massat. Lisäksi testientekijän ei tarvitse osata pitää laskentakytkintä asennossa 1 vain vasteen ajan. Laskennan alku ja loppu voivat vähän venyä, sillä lähellä nollassa oleva massavirta ei kerrytä juurikaan ulosvIRRannutta massaa.

Reaaliaikaisen laskentatyökalun massavirtapiikin pinta-alan laskentaan käytetään kumulatiivista summausta, eli summataan sekunnin levyisiä suorakulmioita yhteen. Suorakulmion korkeus on massavirran arvo. Kuvassa 4.1 esitetään yksinkertainen tilanne kumulatiivisella summauksella syntyvästä pinta-alasta suoran  $y = x$  alle.



Kuva 4.1: Pinta-alan laskeminen kumulatiivisella summauksella online työkalussa. Punaisella suora  $y = x$  sinisellä pinta-alaksi lasketut suorakulmiot.

Kuten kuvasta 4.1 nähdään, laskee kumulatiivinen summaus pinta-alan liian suureksi nousevalle käyrälle. Laskevalle käyrälle pinta-ala tulee liian pienenä, joten nousevalle ja laskevalle massavirtavasteelle katsotaan näiden pinta-alavirheiden kompensoivan toisiaan.

Wedgessä laskenta suoritetaan kaikista mittausarvoista aina uudestaan. Eli laskentatyökaluun syötettävät arvot tutkitaan ja lasketaan joka sekunti kokonaan uudestaan, edellisen sekunnin arvo lasketaan tällä sekunnilla uudestaan. Tästä johtuen reaaliaikaisessa käytössä täytyy käyttää kumulatiivista summausta sillä muut pinta-alan laskenta menetelmät eivät toimi riittävän nopeasti, jotta tulokset saataisiin samassa tahdissa mittausarvojen päivittymisen kanssa. Massavirrasta integroituja massan arvoja tulee olla yhtä monta kuin laskentatyökaluun tulevia mittausarvoja. Mikäli laskenta ajatellaan vektorilaskentana, tulee laskentatyökaluun menevän vektorin olla yhtä pitkä kuin tuloksena saatavan vektorin. Tällöin Matlabin sisältämät numeeriset pinta-alan laskentamenetelmät eivät toimi, sillä ne laskevat koko datasta vain yhden arvon, jota ei

voida esittää Wedgessä. Tämä olisi mahdollista kiertää for-loop rakenteella, jolloin lasketaan pinta-ala sekunnin välein, mutta tämä hidastaa laskentaa liiaksi. Parempi tuntemus Savcor Wedgen toiminnasta voisi mahdollistaa reaaliaikaisen työkalun laskenta tarkkuuden parantamisen.

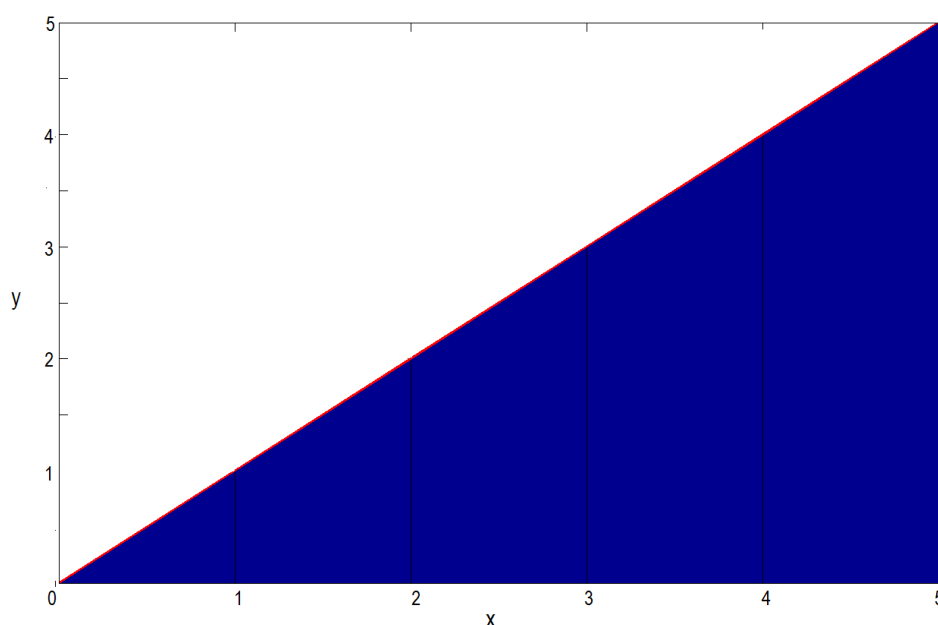
## 4.2 Jälkikäsitteilytyökalu

Matlabissa toimivaan jälkikäsitteilytyökaluun mittausarvot tuodaan Wedgestä ASCII tiedostossa, johon on tallennettu tarvittavat arvot oikeaan järjestykseen laskentaa varten. Jälkikäsitteilytyökalussa massavirran vasteet etsitään erikseen välittämättä testien tekijän laskentavalitsimen arvoista. Testien tekijän laskentavalitsimen rajaukseen perustuvat vasteet lasketaan myös jälkikäsitteilytyökalulla, jotta voidaan vertailla laskentatyökalujen eroja. Lisäksi voidaan verrata etsityn vasteen rajauksen ja valitsimella valittujen vasteiden eroja.

Vasteiden etsintään käytetään hyväksi Matlabin vakiofunktiota *findpeaks*, joka etsii määrätyn määrän tietyllä etäisyydellä toisistaan olevia vasteita. Tätä varten laskentatyökalunkäyttäjän tulee laskennan alussa aukeavissa valintaikkunoissa määrätä kuinka monta vastetta kyseisellä välillä on ja mikä niiden välinen etäisyys on. Tällöin *findpeaks* funktio löytää vasteiden huiput. Vasteiden reunat löydetään etsimällä minimi kahden vasteen väliltä. Ensimmäisen vasteen alku on minimi arvo ennen vastetta ja viimeisen vasteen loppu on minimi arvo vasteen jälkeen. Esimerkki vasteiden rajautumisesta on kuvassa 4.4, jossa massavirtavasteiden pinta-alat esitetään sinisellä ja massavirran arvo punaisena käyränä.

Löytyneet massavirtavasteet nollataan samoin kuin reaaliaikaisessa työkalussa, mutta vasteen integraali lasketaan puolisuunnikassäännöllä toisin kuin reaaliaikaisella työkalulla. Matlabista löytyvä puolisuunnikassääntöön perustuva numeerinen integrointi mahdollistaa mittavälien epätasaisuuden toisin kuin kumulatiivinen summaus, joka vaatii että mittapisteiden väli on vakio. Koska jälkikäsitteilytyökalu ei välitä mittapisteiden epätasaisesta jaosta, voidaan sillä laskea myös FTIR analysaattorilta erikseen saatu mittausdata. FTIR arvojen väli vaihtelee kahden ja kolmen sekunnin välillä.

Puolisuunnikassäännöllä laskettaessa sama tilanne kuin kumulatiivisella summauksella näyttää kuvan 4.2 kaltaiselta. Puolisuunnikassääntö laskee pinta-alan täydellisesti, sillä mittauspisteestä toiseen siirrytään suoraa viivaa pitkin. Tällöin arvojen väliin ei muodostu mutkaa jota puolisuunnikassääntö ei huomioisi. Voidaan todeta siis, että puolisuunnikassäännöllä saadaan massa laskettua niin tarkasti kuin analysaattorit mahdollistavat.



Kuva 4.2: Puolisuunnikassäännöllä laskettu pinta-ala käyrän  $y = x$  alla.

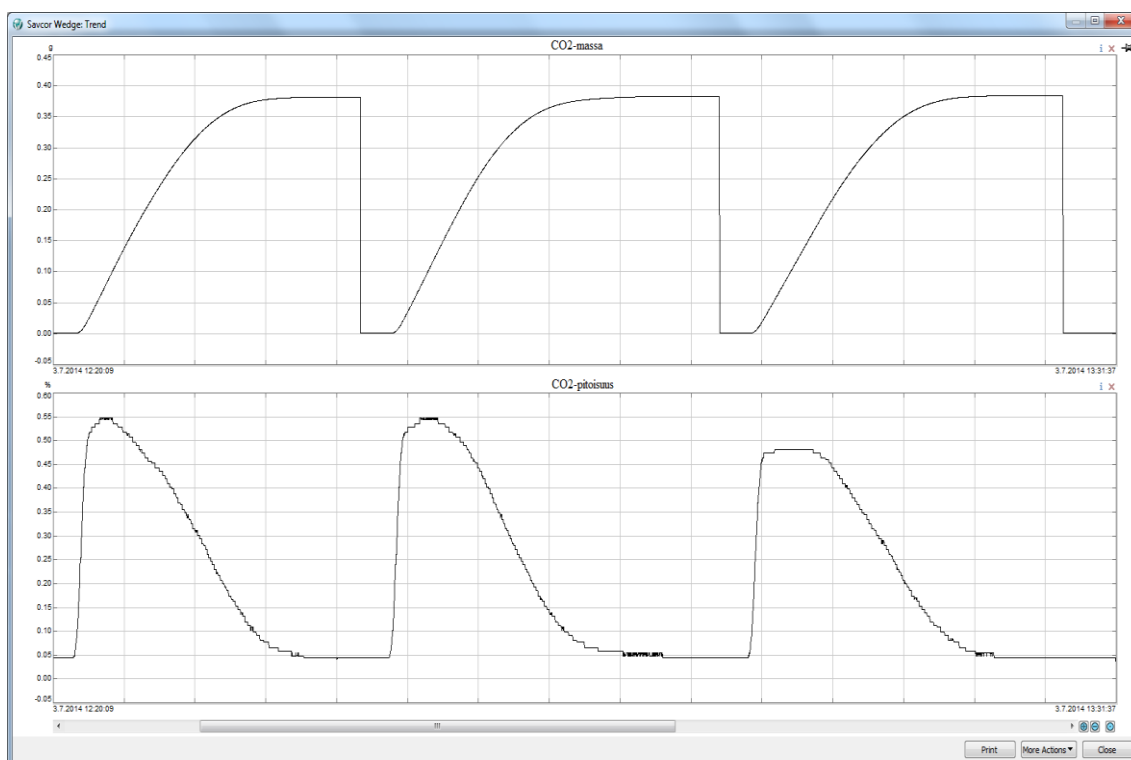
Kappaleessa 3.2 mainittujen polttoainepanoskokeiden perusteella ei jälkikäsitteilyökalun itse etsittyjen vasteiden ja laskentavalitsimen perusteella valittujen vasteiden välillä ole eroa. Vain tilanteet, joissa testientekijä on unohtanut asettaa valitsimen asentoon 1 panosta syötettäessä, aiheuttavat eroja tulosten välillä.

### 4.3 Polttoainepanoskokeen A3 tulokset

Tässä kappaleessa esitetään tuloksia polttoainepanoskokeelle A3, eli petrokoksin poltolle 4 % hapessa (96 % typpeä). Reaktiivisuuskoelaitteistoon oli laitettu 30 g

hiekkaa edustamaan petiä, minkä jälkeen koelaitteisto lämmitettiin testilämpötilaan 850 °C. Hapen ja typen yhteisvirtaama pedin alle oli 5 NI/min.

Reaaliaikaisen työkalun laskemat CO<sub>2</sub> massat ja savukaasun CO<sub>2</sub>:n pitoisuudet ovat kuvassa 4.3. Kuva 4.3 on kuvakaappaus Savcor Wedgen näkymästä.

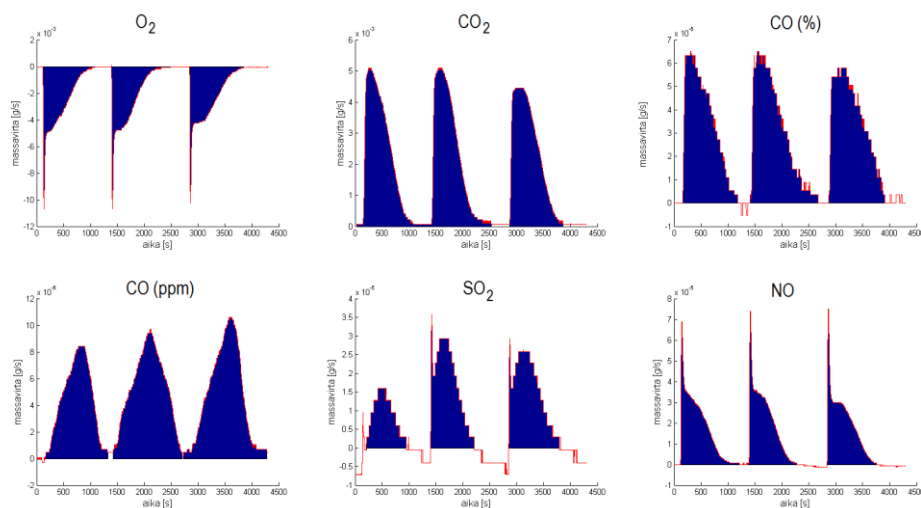


Kuva 4.3: Testin A3 kolmen polttoainepanoksen ulosvirranneet hiilidioksidin massat (yllä) ja savukaasun hiilidioksidin pitoisuudet tilavuusprosentteina (alla).

Kuvassa 4.3 hiilidioksidin ulosvirrannutta massaa kuvaa käyrän korkeus, leveys on aika väli jolta kertynyttä massaa on laskettu. Piikit putoavat nopeasti nolnaan, koska testientekijä on asettanut laskentavalitsimen asentoon 0, jolloin laskentatyökalu antaa tulokseksi arvon nolla. Hiilidioksidin pitoisuus vasteista nähdään kuinka testientekijä on odottanut vasteen tasaantumista ennen uuden panoksen syöttöä.

Jälkikäsitteilytyökalulla laskettaessa samaa testiä A3, voidaan tarkastella, minkälaiset massavirtavasteet savukaasukomponenteille muodostuu. Kuvassa 4.4 on jokaisen jatkuvatoimisella analysaattorilla mitatun savukaasukomponentin massavirrat samalta

aikaväliltä kuin kuvan 4.3 vasteet. Lisäksi kuvassa 4.4 on väritetty se pinta-ala jonka jälkikäsitteilyökalu on määrittänyt vasteen integroitavaksi alaksi.



Kuva 4.4: Testin A3 massavirrat (punaisella) ajansuhteen sekä piikkikohtaiset pinta-alat (sinisellä).

Kuvasta 4.4 nähdään hyvin, varsinkin hapen ja typpimonoksidin osalta, kuinka haihtuvat palavat nopeasti muodostaen jyrkän ja nopean vasteen, minkä jälkeen jäännöshiilen palaminen laskeutuu hitaammin. Hapen vasteet ovat tietysti negatiivisia, koska happea kuluu polttoainepanosien palamisessa. Rikkidioksidin vasteilla nähdään, mikä vaikutus nollauksella massavirtavasteille on. Huonosti onnistuneen nollauksen takia osa rikkidioksidin ulosvirranneesta massasta jää pois laskuista. Rikkidioksidi oli muissakin polttoainepanoskokeissa ongelmallinen nollauksen suhteen. Rikkidioksidilla voi olla poikkeuksellisen suurta vaihtelua tasolla, joka asetetaan nollaustasoksi ja tämä aiheuttaa ongelman.

Kuvaan 4.4 rajattujen pinta-alojen muodostamat massat on taulukoitu taulukkoon 4.1 yhdessä kuvasta 4.3 katsottujen hiilidioksidin massojen kanssa.



Taulukko 4.1: Testin A3 panoskokeissa ulosvirranneet savukaasukomponenttien massat jälkikäsitteilytyökalulla laskettuna. Hiilidioksidin osalta myös reaaliaikaisella työkalulla saadut.

panos nro.	massat [g]					
	O <sub>2</sub>	CO <sub>2,trapz</sub> / CO <sub>2,cs</sub>	CO (%)	CO (ppm)	SO <sub>2</sub>	NO
1	-0.287	0.394/0.381	0.004	0.001	0.0016	0.0021
2	-0.283	0.398/0.383	0.004	0.001	0.0041	0.0021
3	-0.287	0.395/0.383	0.004	0.001	0.0043	0.0020

Taulukossa 4.1 ja kuvassa 4.4 on hiilimonoksidin tulokset kaksi kertaa, koska hiilimonoksidia mitattiin kahdella erilaisella analysaattorilla. Toinen ilmoittaa hiilimonoksidin osuuden savukaasuissa prosentteina ja toinen ppm. pitoisuutena. Taulukosta 4.1 nähdään kuinka reaaliaikaisen ja jälkikäsitteilytyökalun antamat tulokset poikkeavat toisistaan hiilidioksidin osalta. Tarkemmin näitä työkalujen tarkkuuseroja on käsitelty seuraavassa kappaleessa.

#### 4.4 Laskentatyökalujen väliset tarkkuuserot

Reaaliaikaisen ja jälkikäsitteilytyökalun antamien laskentatulosten väliset erot saadaan selville vertailemalla testientekijän laskentavalitsimen antamista vasteista laskettuja tuloksia. Näin laskenta väli on identtinen kummallakin työkalulla ja erot muodostuvat vain numeerisista integrointimenetelmistä. Prosentuaalisen eron laskentaan käytetään yhtälöä

$$ero = \frac{(m_{\text{trapz}} - m_{\text{cs}})}{m_{\text{trapz}}} * 100 \quad (5)$$

Petrokoksin testeistä lasketut prosentuaaliset erot eri savukaasukomponenttien massoille esitetään taulukossa 4.2.

Taulukko 4.2: Petrokoxsin testien (A1-A6) suurimmat ja pienimmät prosentuaaliset erot reaaliaikaisen ja jälkikäsitteilytyökalun antamien tulosten välillä savukaasukomponenttikohtaisesti.

	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO (%)	CO (ppm)	SO <sub>2</sub>	NO
suurin ero [%]	-6.50	2.33	3.16	5.81	-7.07	7.11
pienin ero [%]	-0.45	0.23	0.31	0.36	0.34	0.24

Yhtälön (4) mukaisesti negatiivinen etumerkki taulukossa 4.2 tarkoittaa, että kumulatiivinen summaus on yliennustanut pinta-alan verrattuna puolisuunnikassääntöön. Suurimmat erot syntyivät testissä, joissa käytettiin suurinta palamiskaasun hapen määrää. Suurella palamiskaasun hapen määrällä palaminen on nopeaa ja massavirta vasteet kapeita. Tällaiselle vasteelle kumulatiivinen summaus aiheuttaa suuren virheen, koska kahden mittausarvon välinen ero on suuri. Hitailta piikeillä menetelmät ovat lähes yhtä tarkkoja, pienimmät erot taulukossa 4.2. Ilmeisesti nousu ja lasku kompensoivat toisensa kumulatiivisessa summauksessa.

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Reaktiivisuuskokeiden analysoinnin nopeuttamiseksi tehdyt laskentatyökalut toteuttavat niille asetetut tavoitteet hyvin. Erityisesti reaaliaikainen työkalu, joka laskee mittausdatasta halutut arvot samalla kun mittauksia tehdään. Reaaliaikaisen työkalun heikommasta tarkkuudesta, verrattuna jälkikäsitteilytyökaluun, johtuen reaaliaikainen työkalu soveltuu parhaiten reaktiivisuuslaitteen testaamiseen ennen varsinaisia polttoainepanoskokeita. Kun testeistä saadaan edes suuntaa-antava tulos heti, voidaan laitteiston mahdolliset vuodot ja epäpuhtaudet huomata nopeammin. Näin vältetään tekemästä testejä, joiden tulokset eivät ole kelvollisia laitteistoviasta johtuen.

Aikaisemmin polttoainepanoskokeiden savukaasukomponenttien massat on laskettu massavirtavasteista käsin kuvaajista katsottujen rajojen perusteella. Yksittäisten vasteiden rajojen etsiminen mittausdatasta on hidastanut analysointia. Kappaleen 3.2 esimerkkitesteissäkin tulisi etsiä yhteensä 54 vastetta. Jälkikäsitteilytyökalulla analysoitaessa näiden testien tulokset saadaan huomattavasti nopeammin, sillä vasteiden etsiminen on automatisoitu. Lisäksi testientekijän asettamat vasteiden rajat antavat suoraan massavirtavasteiden alku- ja loppupisteet, mikä myös nopeuttaa analysointia.

## 6 YHTEENVETO

Tässä työssä tarkasteltiin reaktiivisuuskoelaitteen mittaustulosten analysointiin tarkoitettujen laskentatyökalujen kehitystä. Työkalujen tarkoituksena on nopeuttaa reaktiivisuuskokeiden massataseiden laskentaa. Kaksi erilaista työkalua luotiin, toinen reaaliaikaiseen tulosten määrittämiseen, toinen tulosten tarkentamiseksi jälkikäteen.

Reaaliaikaisen työkalun laskentamenetelmästä peräisin olevasta epätarkkuudesta johtuen, tämän työkalun tuloksia ei voida kaikissa tilanteissa pitää todellisina. Nopeissa polttoainepanoskokeissa reaaliaikaisen työkalun tulokset poikkeavat suunnilleen 6 % tarkemman jälkikäsitellytyökalun antamiin tuloksiin verrattuna. Tästä johtuen reaaliaikaista työkalua suunnitellaan käytettävän reaktiivisuuslaitteen toimivuuden tarkistamiseen ennen varsinaisia polttoainepanoskokeita.

Jälkikäsitellytyökalu mahdollistaa nopean tulosten analysoinnin, sillä Matlab-pohjaisella laskentatyökalulla massavirtavasteiden etsintä on automatisoitu. Jälkikäsitellytyökalulla on myös mahdollista laskea FTIR analysaattorin mittausdata. FTIR:n mittausdata vaatii vain esikäsitelyä ennen kuin se analysoidaan jälkikäsitellytyökalulla, tiedoston yhteensopivuuden varmistamiseksi.

Laskentatyökalujen toimivuuden varmentamiseksi tulisi tehdä lisää polttoainepanoskokeita, joita voisi tarkastella laskentatyökaluilla. Työssä esiteltyjen testien mittausdatat eivät aiheuttaneet laskentatyökalussa ongelmia. Kuitenkin erikoisemmissä testeissä voi syntyä tilanteita, joita ei ole osattu ottaa vielä huomioon. Tällaisissa tilanteissa laskentatyökaluja tulee päivittää, jolloin myös laskentatyökalujen pätevyysaluetta saadaan laajennettua. Lisäksi laskentatyökaluja voidaan päivittää laskemaan myös muitakin mittausdatasta saatavia suureita, kuten reaktiivisuuksia.

## LÄHDELUETTELO

Basu, P., 2006. Combustion and Gasification in Fluidized Beds. 3. painos. Boca Raton: Taylor & Francis Group. ISBN: 978-0-8493-3396-5.

Oka, S. N., 2004. Fluidized Bed Combustion. 1. painos. USA: Marcel Dekker, Inc. ISBN: 0-8247-4699-6.

Ragland, K., W., Bryden, K., M., 2011. Combustion Engineering. 2. painos. Boca Raton: Taylor & Francis Group. ISBN: 978-1-4200-9250-9.

Raiko, R., Kurki-Suonio, I., Saastamoinen, J. ja Hupa, M., 1995. Poltto ja palaminen. Jyväskylä: International Flame Research Foundation (IFRF) Suomen kansallinen osasto. ISBN: 951-666-448-2.

Saastamoinen, H., Leino, T. ja Tourunen A. 2012. Comparison of emission formation during pyrolysis and char combustion in air and oxyfuel conditions in fluidized bed. Proceedings of 21st International Conference on Fluidized Bed Combustion, Napoli, Italia, 3. – 6. kesäkuuta 2012.

Scala, F., 2013. Fluidized Bed Technologies for Near-Zero Emission Combustion and Gasification. Woodhead Publishing Limited. Viitattu 14.8.2014. Saatavissa: <http://books.google.fi/books?id=SRFaAgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fi#v=onepage&q&f=false>.

Servomex, 4900, Continuous Emission Analyzer, Tuoteseloste, Viitattu 22.8.2014, Saatavissa: <http://www.bjispni.com/uploadfile/ziliao/4900uk.pdf>.

Siemens, Ultramat 23 Continuous Gas Analyzer, General information manual, Viitattu 22.8.2014, Saatavissa: [http://w3app.siemens.com/mcms/infocenter/dokumentcenter/sc/pa/InfocenterLanguagePacks/Catalog%20sheet%20ULTRAMAT%2023/ultram23\\_en.pdf](http://w3app.siemens.com/mcms/infocenter/dokumentcenter/sc/pa/InfocenterLanguagePacks/Catalog%20sheet%20ULTRAMAT%2023/ultram23_en.pdf).

## LIITE 1. POLTTOAINEANALYYSIT

### Petrokoksien analyysitulokset

	Tulos	Yksikkö
Kokonaiskosteus	1,2	m-%
Tuhkapitoisuus (815 °C)	0,8	m-% k-a
Rikkipitoisuus	5,60	m-% k-a
C	85,8	m-% k-a
H	3,8	m-% k-a
N	1,86	m-% k-a
Haihtuvat aineet	11,9	m-% k-a

### Kivihiilen analyysitulokset

	Tulos	Yksikkö
Kokonaiskosteus	13,2	m-%
Tuhkapitoisuus (815 °C)	10,2	m-% k-a
Rikkipitoisuus	1,45	m-% k-a
C	66,6	m-% k-a
H	4,2	m-% k-a
N	1,26	m-% k-a
Haihtuvat aineet	36,1	m-% k-a

Kuoren analyysitulokset

---

	Tulos	Yksikkö
Kokonaiskosteus	33,6	m-%
Tuhkapitoisuus (815 °C)	2,0	m-% k-a
Rikkipitoisuus	0,02	m-% k-a
C	51,6	m-% k-a
H	5,9	m-% k-a
N	<0,3	m-% k-a
Haihtuvat aineet	75,3	m-% k-a

---