

Förbränningsförlopp i en bädd av biobränsle III

*Marie Rönnbäck, Bo Leckner, Claes Tullin,
Henrik Thunman, Jessica Samuelsson*

Projektrapport från programmet Småskalig förbränning av biobräns-
len

Böcker och rapporter utgivna av Statens energimyndighet
kan beställas från Energimyndighetens förlag.

Orderfax: 016-544 22 59

e-post: forlaget@stem.se

© Statens energimyndighet

Upplaga: antal ex

ER P808-7

ISSN

Förord

Detta arbete har utförts vid Energiteknik på SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut med handledning av Institutionen för Energiteknik, avdelning Energiomvandling, på Chalmers Tekniska Högskola. Projektledare har varit Marie Rönnbäck. Handledare har varit Professor Bo Leckner och Tekn. Dr. Henrik Thunman, Chalmers, och handledare på SP har varit Tekn. Dr. Claes Tullin.

Den huvudsakliga finansieringen kommer från Energimyndigheten (STEM), inom ramen för ”Småskalig Förbränning av Biobränslen”. SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut har varit delfinansiär. I den experimentella delen av projektet samarbete skett med projektet ”Omvandling av bränslekväve i en biobränslebädd – en experimentell studie” som drivs av Jessica Samuelsson och också delvis finansieras av STEM. Genom att utnyttja samma rigg och samma mätsituation till de två projekten, har resultaten optimerats, och det kunskapsutbyte som skett har varit värdefullt.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	7
Summary	9
Inledning	11
Förbränning av biobränsle	12
Fasta bäddar, medströms och motströms	12
Hur det brinner i fast bädd av biobränsle	13
Genomförda mätningar	16
Syfte.....	16
Metod.....	16
Experimentell utrustning	16
Tät riggkonstruktion	17
Byte av våg.....	17
Temperaturmätningar: nivå och endimensionalitet	17
Kontinuerlig bäddhöjdmätning	18
Högt tryckfall över rosten	18
Förbättrad tändmetod	18
Mätning av kvävgas och vätgas	19
Absorption av gaser.....	19
Mätuppställning och uppmätta parametrar	19
THC i torkade gaser	20
Temperaturmätningar	20
Resultat från genomförda experiment	21
Resultat från mätning av kvävgas och vätgas	23
Koksprover	24
Tjäranalys	24
Jämförelse med tidigare experiment	26
Genomförda massbalanser	27
Resultat av massbalansberäkningar.....	29
Modell för antändningsfrontens hastighet	32
Teori	32
Bäddstorheter	34
Antändningstemperatur och slutlig temperatur	34
Reaktionstid.....	35
Resultat.....	35
Referenser	38
Bilagor	39
Bilaga 1: Analyser av gaser från förbränningsprov.....	39

Bilaga 2: Korrigerade halter av kvävgas och vätgas	43
Bilaga 3: Uppmätta temperaturer	44
Bilaga 4: Kontinuerligt mätta gaskoncentrationer.....	46
Bilaga 5: Uppmätta kvävgas- och vätgashalter	48
Bilaga 6: Publicerat under projektet.....	50
Extractive gas analysis from a burning fixed biofuel bed	
- method and measurements	
Gas composition in a fixed bed of biofuel	
– measurements in and above a downward propagating front	
Ignition rate in fixed biofuel beds – model based on combustion front theory	

Sammanfattning

Detta projekt utgör den tredje delen av "Förbränningsförlopp i en bädd av biobränsle". Syftet med projekten har varit att utveckla förståelsen för hur olika parametrar som bränsletyp och bränslekvalitet och primärluftflödet påverkar förbränningsförloppet i en fast bädd av biobränsle. Projekten har i huvudsak varit experimentella. I den avslutande delen har även utvärdering skett med enklare matematiska modeller. De experimentella resultaten utgör underlag för förbättrade matematiska modeller för bäddförbränning framtagna på Institutionen för Energiteknik avd. Energiomvandling på Chalmers Tekniska Högskola. De kan också användas som underlag för konstruktion och strategier för drift av pannor med bäddförbränning.

I projektet har mätningar genomförts med utrustning framtagen under projektens gång. Experimentriggen och gassonden har kontinuerligt förbättrats och de utvecklade metoderna tillämpats för att möjliggöra mätningar med god noggrannhet, god tids- och rumsupplösning och under väl definierade förhållanden. Gasanalys har genomförts i och nedströms antändningsfronten vid motströms förbränning.

En mätserie har genomförts med olika primärluftflöden med träpellets av pressat sågspån som bränsle. Halter av syre O_2 , kolmonoxid CO , koldioxid CO_2 , metan CH_4 , kolväten THC och vattenånga H_2O mättes kontinuerligt. Halter av kvävgas N_2 och vätgas H_2 togs som påsprov under kortare perioder. I påsproven analyserades även lättare kolväten. Tyngre kolväten analyserades i tenaxrör. För att kunna beräkna en komplett massbalans togs analys av koks som ackumulerats nedströms antändningsfronten, och av tjära som kondenserat i gassonden. Vid experimenten mättes även tillförd primärluft och viktavgång från bränslebädden kontinuerligt. De genomförda förbättringarna av utrustning och mätmetod fungerade tillfredställande. Vid framtida mätningar bör fördelningen av tillförd primärluft över rosten ytterligare utjämnas.

Mätningarna syftade till att ge en beskrivning av förbränningsförloppet inuti bädden med torkning och pyrolys av färskt bränsle, antändning, gasförbränning, förbrukning av syre, uppbyggnad av koksbädd och förbränning och förgasning av koksen. Erhållna resultat i form av antändningsfrontens hastighet och temperatur jämfördes med resultat inom tidigare delprojekt och överensstämde väl.

Mätningarna ger underlag till att beräkna en massbalans under förbränningsförloppet för huvudbeståndsdelarna syre, väte, kol och kväve. Beräkning av massbalans tjäna två syften. Dels ger beräkningarna en kontroll av att mätresultaten är riktiga och trovärdiga. Dels kan beräkningarna ge kompletterande information om de ämnen som vanligen inte mäts, som väte och kväve, och man kan beräkna hur mycket tjära som avgår från bädden. Beräkningarna ger även det lokala stökiometriska förhållandet vid sondspetsen. Massbalansberäkningar genomfördes och validerades med mätresultat. Resultatet visar att det är fullt möjligt att under stationära förhållanden beräkna halter av kväve och väte, och hur mycket tjära som avgår från bädden. Även vid transienta förhållanden kan halter beräknas, men resultatet kommer då att påverkas av den beskrivning av torkning och pyrolys av bränslet som ges som indata.

Resultaten har även använts för validering av en enklare modell för antändningshastighet. Detaljerade matematiska modeller för antändning har presenterats i litteraturen. En enkel modell har fördelen att vara mer transparent, och sambanden mellan olika parametrar blir lättare

att genomskåda. Modellen bygger på konventionell teori för hastigheten hos en laminär flamma. Syftet med modellen är att ge en uppskattning av antändningshastigheten och hur den beror av några viktiga parametrar. Modellen visar samma tendens för temperatur och antändningshastighet vid lägre primärluftsflöden som mätresultat. Nära stökiometri, och vid överstökiometriska förhållanden visar modellen att förluster från fronten i form av att energi utvecklas i gasfasen längre nedströms, och att strålningsförluster sker när fronten inte är täckt av koks, är väsentliga. Inflytande av fukthalt överrensstämmer väl mellan modell och mätningar. Modellen klarar dock dåligt att beskriva inflytande av ökad storlek och densitet hos bränslet. Vid en förbättring av modellen bör det vara lämpligt att använda temperaturen för glödande koks som slutlig temperatur i antändningsfronten. Temperaturen kan då beräknas med en värmebalans för kokspartikeln. Modellen bör även modifieras till att ta hänsyn till partikelns storhet, så att det faktum att större partiklar inte pyrolyserar helt och hållet i antändningsfronten tas i beaktande.

Summary

This project is the third part of "Combustion processes in a biofuel bed". The aim with the projects has been to develop the understanding of how different parameters such as fuel type and fuel quality influence the combustion in a fixed bed of biofuel. The projects have been mainly experimental. In the last part evaluation has been performed also with simpler mathematical models. The experimental results are used as validation for mathematical modelling of fixed bed combustion at The Department for Energy and Environment at Chalmers University of Technology. They can also be used at construction and for control strategies.

In the project measurements were done with equipment developed during the projects. The experimental rig and the probe for gas analysis have continuously been improved together with methods to render measurements with high accuracy and high resolution during well defined conditions. The gas analysis was performed inside and downstream of the ignition front during counter-current combustion (ignition counter-current to supplied air).

Measurements were performed with different primary air supply using pellets made of compressed wood shavings as fuel. Concentrations of oxygen O_2 , carbon monoxide CO, carbon dioxide CO_2 , methane CH_4 , hydro carbons THC and water vapour H_2O were continuously measured. Concentrations of nitrogen N_2 and hydrogen H_2 were analysed during shorter sequences of the combustion, together with other light hydro carbons. Heavy hydro carbons were analysed with tenax tubes. To close mass balances of the main species, (C, H, O, N) also tar and char were analysed. During the experiments, primary air supply and mass lost from the bed were measured on-line. The improvements of the experimental equipment performed satisfying. In future measurements, the supply of primary air should be improved to be more even.

The measurements show the different episodes in the ignition front: initial heating with radiation, drying, release of volatiles, ignition and heat release, production of combustion products and depletion of oxygen. The resulting ignition rates and temperatures coincide well with earlier results.

Based on the measurements mass balances of the main species were performed. Closing of mass balances is a way to check the accuracy of the measurements. It also gives complementary information about species that are commonly not measured, as nitrogen and hydrogen, and about the amount of tar leaving the fuel bed. Also, the local stoichiometry at the probe orifice can be calculated. Mass balances were closed and validated by measurements. The results show that it is possible to calculate the concentrations of hydrogen, nitrogen and tar during steady phases of combustion. During transient conditions, the result is influenced by assumptions done for drying and pyrolysis of the fuel.

The results have also been used for validation of a simple model for ignition rate. Detailed mathematical models of the ignition front are extensive; such models have been presented in the literature, but simple models have the advantage of being more transparent. Here a simple tool for estimation of ignition rate, based on laminar flame theory, has been developed. The model is aimed at qualitative estimations with the purpose of studying the importance of various influencing parameters. The model shows the same response to increased air rate as the measurement at lower air flows. Closer to and above stoichiometry, the model shows that

losses by radiation are important, but also that the energy emitted by combustible gas is released further away from the fuel with increasing air rate. Influence of fuel moisture content coincide well between model and measurements. The model fails to describe influence of fuel particle size and density. The model needs to be modified concerning the temperature in the ignition front, that is sustained by burning char, and concerning conversion of larger particles.

Inledning

Detta projekt utgör en fortsättning på del I och II av tidigare projekt med samma namn, "Förbränningsförlopp i en bädd av biobränsle". Projektet i sin helhet behandlar hur olika parametrar som bränsletyp och bränslekvalitet och primärluftflödet påverkar förbränningsförloppet i en fast bädd av biobränsle. Projektet är avgränsat till den fasta bädden, som i sin tur utgör rand för gasförbränningen nedströms bädden. De tre projekten har i huvudsak varit experimentella. I del III har även utvärdering skett med enklare matematiska modeller. De experimentella resultaten utgör underlag för förbättrade matematiska modeller för bäddförbränning framtagna på Institutionen för Energiteknik avd. Energiomvandling på Chalmers Tekniska Högskola. De kan också användas som underlag för konstruktion av såväl pannor med bäddförbränning.

I "Förbränningsförlopp i en bädd av biobränsle I" studerades inverkan av luftflöde samt bränslepartiklarnas storlek och densitet i förbränningsanläggningar som brinner enligt motströmsprincipen. Resultatet redovisas i (Axell 2000), som även är en licentiatuppsats, och innefattar en grundlig genomgång av förbränningsförloppets faser vid eldning av biobränsle (torkning, avgasning och koksförbränning), av förbränningsprinciper vid rosteldning (medmot- och tvärströms), och av satsvis eldning på rost (över- under- och omvänd förbränning). Två experimenttriggare användes och utvärderades; den ena simulerar en modern vedpanna och den andra en förenkling av samma förhållanden. En sond för extraktion av heta och smutsiga gaser före sekundärluftstillsättning togs fram inom projektet. Mätningar genomfördes av temperaturer uppströms, i och nedströms bädd, koncentration av olika ämnen i gasfas nedströms bädd, bäddhöjd och viktavgång. Bränsle med samma fukthalt, två densiteter och tre storlekar användes. Resultaten jämförs med andra forskargrupper. En indelning i förbränningsregimer presenterades och diskuterades.

I "Förbränningsförlopp i en bädd av biobränsle II" (Rönnbäck 2003) byggdes en förbättrad experimenttrigg på grundval av de erfarenheter som drogs i projektets första del. Gassonden och metoden för gasanalys förbättrades för att möjliggöra extraktion av gas inuti bädden, istället för tidigare nedströms bädden, och för att analysera kvävehaltiga ämnen, vilket genomfördes i ett parallellt projekt (Samuelsson m fl. 2003). En mätmetod utarbetades för att få optimal tids- och rumsupplösning i den transient som antändningsfronten utgör (Rönnbäck m fl. 2002). Mätningar genomfördes av temperaturer uppströms, i och nedströms bädd, koncentration av olika ämnen i gasfas inuti bädden, bäddhöjd och viktavgång. Bränsle med tre fukthalter, två densiteter och två storlekar användes. Inverkan av primärluftflöde och bränslets fukthalt och partikelstorlek diskuterades generellt.

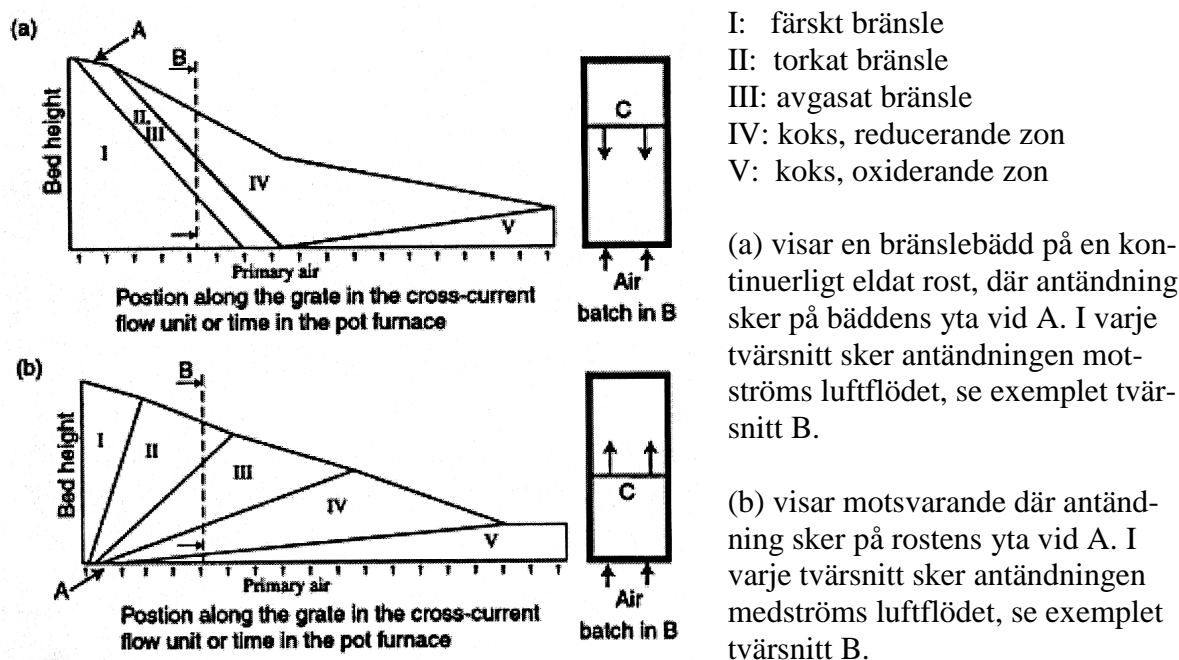
I "Förbränningsförlopp i en bädd av biobränsle III", som redovisas i denna rapport, har målsättningen fortsatt att vara att utveckla kunskapen och förståelsen för hur olika parametrar påverkar förbränningsförloppet. Även här har experiment genomförts, men resultaten har också utvärderats med enklare matematiska modeller för att beräkna koncentration av olika ämnen i gasfas och för antändningsfrontens utbredning. Experimenttriggen och gassonden har förbättrats och de utvecklade metoderna tillämpats. Samarbete har skett med ett parallellt projekt (Samuelsson 2006). Mätningar genomfördes av temperaturer uppströms, i och nedströms bädd, koncentration av olika ämnen i gasfas inuti bädden, bäddhöjd och viktavgång. Bränsle i form av träpellet användes.

Förbränning av bibränsle

Fasta bäddar, medströms och motströms

Fasta bäddar kan klassificeras på olika sätt. Här beskrivs de som motströms då antändning av färskt bränsle sker motströms primärluftsflödet, och medströms då antändningen sker medströms luftflödet, se Figur 1. Den luft som tillförs bädden genom rosten kallas primärluft och är oftast bara en del av den luft som krävs för fullständig förbränning. Sekundär- och ibland även tertiärluft blandas in i rökgasen nedströms bädden och gasförbränningen fullbordas där. Vid kontinuerlig förbränning på rost matas bränslet in på ena änden av rosten, luften tillförs underifrån och askan matas ut i den andra änden. Då transporthastigheten i sidled oftast är betydligt högre än tändfrontens hastighet, kan förbränningen bädden generaliseras till antingen mot- eller medströms.

Antändningshastighet är ett ofta använt mått och definieras som kg övertänt bränsle per yt- och tidsenhet, d.v.s. $\text{kg/m}^2\text{s}$. Antändningshastigheten begränsar den möjliga effektutvecklingen i en anläggning. Avbränningshastighet används för kg uppeldat bränsle per yt- och tidsenhet, d.v.s. $\text{kg/m}^2\text{s}$. Om viktändringen under förbränningen mäts, är det avbränningshastigheten som noteras. Om avbränningshastigheten är lägre än antändningshastigheten, kommer delvis omvandlat material att ackumuleras. Detta slutförbränns vid kontinuerlig matning i slutet av rosten, och vid satsvis eldning i en slutförbränningsfas.



Figur 1. Skiktning i bädden då förbränningen sker kontinuerlig på en rost. En bädd där bränslet matas in i ena änden vinkelrätt mot luftflödet kallas ofta tvärströms matad, men ett tvärsnitt kan oftast hänföras till medströms eller motströms matning. Från (Thunman 2001).

Vid motströms antändning av bränslet är antändningsfronten relativt tunn och väldefinierad, och rör sig mot luftflödet. Gradienter i temperatur och koncentration i antändningsfronten är skarpa. Den gas som lämnar bädden har hög temperatur och relativt låg halt av kolväten, som också är korta. Det värme som krävs för att värma, torka och avgasa färskt bränsle överförs

huvudsakligen via strålning från glödande kokspartklarna till färskt material. Även heta gasflammor har del i värmeöverföringen, men gas har lägre emissivitet än koks och flammorna utvecklas mer eller mindre på avstånd från antändningsfronten, beroende på luftflödet. Moderna förbränningsteknik arbetar ofta med låga primärluftsflöden, varvid ett skikt av ej omvandlat material utbildas. Detta skikt fungerar som en reducerande zon där förgasningsreaktioner hos koksen dominerar.

En modern vedpanna arbetar ofta enligt principen motströms förbränning, eftersom övertändningen av bränslesatsen då sker långsammare varvid effektutvecklingen tar längre tid vilket oftast är önskvärt i en liten satseldad anläggning. Detta kallas populärt för omvänd förbränning.

Vid medströms antändning kommer de varma gaserna att passera genom det färska bränslet, som då förvärmis och torkas. Det reaktiva skiktet blir mer utsträckt än i fallet motströms antändning. Temperaturen i den gas som lämnar bädden blir betydligt lägre, och innehåller högre halter av längre kolvätemolekyler. Om bränslet har en hög fukthalt (för flis $\geq 55\%$) krävs medströms antändning med förvärmning/torkning av bränslet av rökgaserna för att förbränningen över huvud taget ska kunna upprätthållas.

Förgasning i fast bädd skiljer sig i princip från en bädd för förbränning i att en förgasare tillförs lägre luftflöde så att ett tjockare skikt av ej omvandlat material utbildas. Även förgasningsanläggningar kan delas in i med- eller motströms anläggningar. Syftet med en motströms förgasare är oftast att omvandla fast bränsle till en brännbar gas med högt värmevärde och låga tjärhalter. Syftet med en medströms förgasare är oftast att producera någon typ av gas eller olja för annan användning än energiproduktion.

Hur det brinner i en fast bädd av biobränsle

Här beskrivs i korthet de olika stegen vid förbränning av biobränsle i en fast bädd, där antändningsfronten rör sig mot luftflödet.

Torkning och avgasning¹ av den enskilda bränslepartikeln är temperaturstyrda processer och värmets transporteras via ledning in i partikeln. Torkning av bränslepartikeln börjar få betydelse då dess yttemperatur når ca 100 °C. En temperaturvåg kommer att röra sig in i partikeln och vattenånga strömmar ut. Den termiska nedbrytningen av flyktigt material börjar vid ca 225 °C, och vid ca 500 °C återstår huvudsakligen koks. I förbränningssammanhang består pyrolysgaserna huvudsakligen av kolmonoxid CO, koldioxid CO₂, vattenånga H₂O, vätgas och kortare kolväten som metan CH₄ och eten C₂H₄. Sammansättningen hos gasen och även till viss del koksandelens storlek beror både av bränslets kvalité och av uppvärmningshastigheten. När pyrolysgaserna strömmar ut ur partikeln passerar den varmare skikt. Möjligheten finns att primärt bildade gaser reagerar katalytiskt med koksskiktet, att gaser kondenserar på koksskiktet (om detta har låg temperatur), att gaserna molekylärt omfördelas (exotermt), och att koksen reagerar med syrerika gaser. Om koksen har tänt kan temperaturen vara hög (ca 1000 – 1200 °C). Detta medför att längre kolväten krackas på sin väg ut ur partikeln. Sammansättningen i pyrolysgaserna påverkas alltså av en rad faktorer.

¹ Om den termiska nedbrytningen av flyktigt material sker utan närvaro av syre kallas den pyrolysis. Pyrolysis är (nästan undantagslöst) endoterm. När syre finns närvarande talar man om avgasning. En skillnad är att avgasning kan generera värme om blandningen tänder. Rent tekniskt kan de utströmmande gaserna kallas pyrolysgaser, eftersom syret inte tränger in i partikelns inre.

Då en partikel är termiskt liten, d.v.s. då Biot-talet $\ll 1$, blir den snabbt genomvarm. Biot-talet är $Bi = h/kr$, där h är värmeöverföringskoefficienten ($\text{W/m}^2\text{K}$), k partikelns värmeledningskoefficient (W/mK) och r är partikelns karaktäristiska storlek. Då $Bi \gg 1$ utbildas istället en temperaturgradient inuti partikeln, och temperaturen är hög på dess yta medan den fortfarande är ursprunglig längre in. Då Bi är lågt har antändningsfronten goda förutsättningar att röra sig ”tvärs igenom” partiklarna, d.v.s. hela partikeln omvandlas i fronten. Då Bi är högt kommer antändning istället att ske på ytan av partiklarna, varvid centrum av partiklarna kommer att värmas i efterhand, då fronten passerat. Vanligen är $Bi \ll 1$ för biobränslepartiklar ca 1 mm och mindre, och $Bi \gg 1$ för ved. Partiklar i storleksordning pellet och flis kommer att hamna i ett mellanområde med Bi ca 1 – 10.

Torkning och avgasning av partikeln kan ske mer eller mindre sekventiellt, vilket beskrivs av bränslet Drying number $D_r = R_v/R_m$, där R_v är avgasningshastigheten och R_m torkhastigheten. Då $D_r \ll 1$ kommer partikeln i princip att torka helt igenom innan den avgasar. Detta karaktäriserar små men även torra partiklar. Då $D_r \gg 1$ kommer torkning och avgasning att ske i princip samtidigt, Detta karaktäriserar stor och även fuktiga partiklar. Även här kommer partiklar i storleksordning pellet och flis att hamna i ett mellanområde med D_r ca 1 – 10.

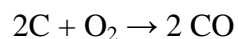
Torkning och avgasningen medför att 75 – 90 % av partikelns vikt försvinner. Materialet krymper och koksen spricker. Hur stor koksåterstoden är beror av flera saker, främst upphettningshastigheten, sluttemperaturen, askhalt och askinnehåll. Små partiklar kommer oftast att torka och avgasa innan koksen tänds, eftersom de utströmmande gaserna både kyler och hindrar syre från att nå koksytan. På större partiklar sker ofta torkning, avgasning och koks-förbränning samtidigt på olika ställen på partikeln.

Så snart pyrolysgaserna blandats med syre till en brännbar blandning sker förbränningsreaktioner, förutsatt att temperaturen är tillräckligt hög. Tändning av gasen i en bränslebädd sker med en pilotlåga, d.v.s. den initieras av redan existerande lågor och glödande ytor i fronten. Tändtemperaturen för ett brett spektrum av naturliga och syntetiska material anges i (Kanury 2002) till 300 - 410 °C då material tänds via strålning från en pilotflamma.

Vid låga gashastigheter sker förbränningen i en laminär flamma kring partikeln på samma sätt som ett stearinljus. Flamman syns med blåa och gula färger. Om hastigheten på tillförd gas är lägre än flammans hastighet, kommer flamman att hela tiden stå vid gränsen till brännbar blandning. Vid högre gashastigheter kan pyrolysgaserna svepas med innan de bildat en brännbar blandning. De lämnar då partikeln och förbränningen kan slutföras nedströms. Vid förbränning av pyrolysgaserna bildas kolmonoxid, koldioxid och vattenånga. Vid gasfasförbränning är jämviktsreaktionen $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ av betydelse. Reaktionen kallas på engelska för ”water-gas shift reaction”.

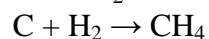
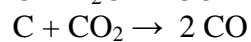
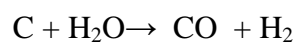
Tändtemperaturen för koksytan anges av (Horttanainen 2001) till 350 – 380 °C och av (Borman och Ragland 1998) till 340 °C. Ren grafit har högre tändtemperatur (820 °C) vilket indikerar att träkoks inte till 100 % består av kol, utan innehåller även väte. Eftersom koksytans tändtemperatur är högre än pyrolysgasernas, är det möjligt att gaserna tänds först och den utvecklade värmen tänds koksytan, förutsatt att det finns syre kvar. Gasförbränningen är betydligt snabbare än koks-förbränningen och om allt syre förbrukas måste koksen omvandlas genom förgasning, och/eller förbränns i ett senare skede. Om gashastigheten är så hög att pyrolysgaserna sveps med innan de tänds, eller om strålningsintensiteten från fronten är hög, kan koksytan tända innan gaserna tänds.

När koksytan tändes sker heterogen koksförbränningen:



Utvecklad temperatur ligger mellan 1000 – 1300 °C.

Om temperaturen är tillräckligt hög och uppehållstiden inte för kort sker även heterogena för-gasningsreaktioner:



Dessa reaktioner kräver en temperatur på 750 – 1000 °C. De är endoterma och långsammare än förbränningsreaktionen.

Så länge gaser strömmar ut ur partikeln har syre svårt att nå in till partikelns yta. De heterogena reaktionerna sker både på partikelns ytteryta och på ytan av hålrum inuti partikeln. Reaktionen är diffusionsstyrda, d.v.s. transporthastigheten av reaktanter från omgivningen in till partikelns yta och in i partikelns porer begränsar reaktionshastigheten. Kokspartikeln minskar i densitet, krymper och till slut återstår endast obrännbar aska.

Genomförda mätningar

Syfte

Syftet med mätningarna är att ge en beskrivning av förbränningsförloppet inuti bädden med antändning, gasförbränning, uppbyggnad av koksbedd och förbränning och förgasning av koksen. Uppmätta antändningshastigheter och temperatur i antändningsfronten används för validering av en modell för antändningshastighet. Koncentrationsmätningarna tillsammans med uppmätt luftflöde och viktavgång ger underlag till att beräkna en massbalans under förbränningsförloppet. Beräkning av massbalans tjänar två syften. Dels ger beräkningarna en kontroll av att mätresultaten är riktiga och trovärdiga. Dels kan beräkningarna ge kompletterande information om de ämnen som vanligen inte mäts, som väte och kväve, eftersom de är besvärliga att mäta.

Metod

Mätningarna genomfördes i en experimentrigg byggd för att ge endimensionella förlopp i bränslebädden, vilket underlättar tolkningen och jämförelsen med matematiska modeller. Experimentriggen eldas satsvis. Eftersom läget längst med rosten motsvarar tiden vid förbränning av en sats bränsle, vilket illustreras i Figur 1, kan resultaten generaliseras till kontinuerlig förbränning på rost. Bränslebädden tänds på den övre ytan och antändningen rör sig motströms den tillförda primärluften. För att ge en heltäckande beskrivning mäts alla ämnen i gasfas som förekommer i större koncentrationer. Tids- och rumsupplösning i mätsystemet väljs så att antändningsfronten blir tillräckligt väl beskriven. Även temperaturmätningarna ger information om antändningens förlopp, om gasförbränning, koksförbränning och förgasning och om koksskiktet i bädden. Temperaturmätningen kompletterar viktmätningen vid bedömning av koksåterstand genom att visa när fronten når rosten. Genom att beräkna adiabatisk förbränningstemperatur (eller någon annan typ av värmebalans) kan man kontrollera att beräknad massbalans ligger i rätt område.

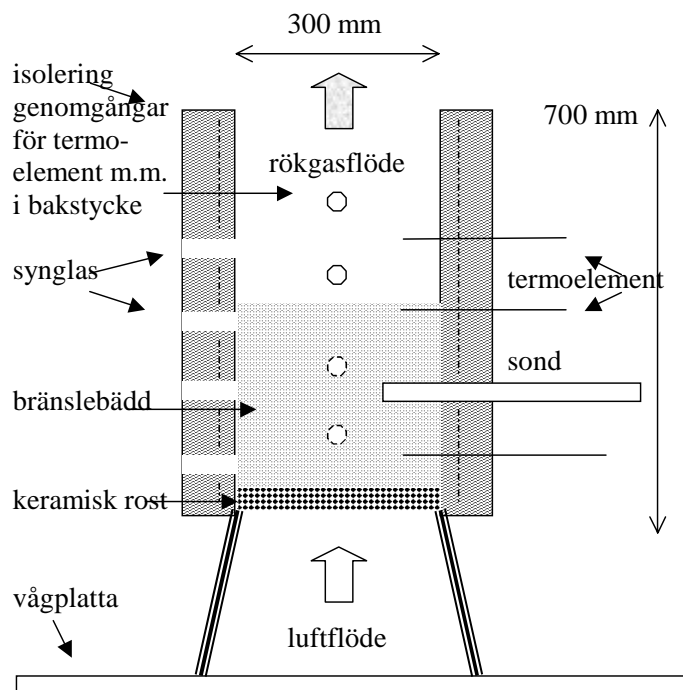
Experimentell utrustning

Experimentriggen är byggd för mätningar av förbränning av fasta bränslen på rost, se Figur 2. Entydiga och väl definierade randvillkor skapas genom att primärluften tillförs jämnt över rostytan, genom att väggarna är lätta och väl isolerade för att ge en jämn temperatur tvärs bädden, genom att tändningen av bränslebädden sker jämnt över övre bäddytan och bränslet är homogent till storlek och kvalitet. Riggen är beskriven i detalj i (Rönnbäck 2003).

Inför de i augusti 2003 genomförda mätningarna förbättrades och kompletterades experimentriggen på ett flertal punkter. Syftet var att

- få en helt tät riggkonstruktion för att undvika luftläckage,
- mäta viktavgången med god noggrannhet,
- bättre definiera läget för temperaturmätningarna,
- med termoelement bättre kontrollera hur horisontell antändningsfronten rör sig ned genom bädden, d.v.s. hur endimensionell antändningsfronten är,
- mäta bäddens höjdförändring kontinuerligt,

- med högt tryckfall över rosten och förbättrad tändmetod initiera en horisontell antändningsfront
- mäta kvävgas och vätgas för att sluta massbalansen,
- mäta kolväten och kvävehaltiga föreningar som ammoniak NH_3 och vätecyanid HCN .



Figur 2. Skiss över experimentriggen. Genomgångar för synglas, termoelement och gassond finns fördelade på 3 sidor.

Tät riggkonstruktion

I tidigare experiment tillät konstruktionen att tillförd primärluft smet mellan keramplattorna och plåten i väggen, se Figur 3. Rosten består av en keramplatta, samma material som i väggplattan. Läckaget uppstod då den hålade plåt som rosten vilade på blev aningen bucklig av värmen från förbränningen. Tätningen mellan rosten och den fals den vilade på blev då sämre och ett läckage uppstod. Läckaget förvärrades av att väggplattorna krympte något och böjde sig inåt (p.g.a. den höga temperaturen) efter ett antal experiment. Tillförd ythastighet till bädden blev därför lägre än uppmätt.

För att förhindra läckaget stoppades keramplattan ned i en plåtficka, varvid all luft tvingades genom rosten, se Figur 4. Genom att lägga keramplattan under falsen, förbättras tätningen mellan platta och fals då primärluften trycker på underifrån. Det finns dock fortfarande en risk att läckage uppstår i springor mellan keramplattorna. Dessa tätades därför med pannkitt och tätningen kontrollerades mellan varje experiment.

Byte av våg

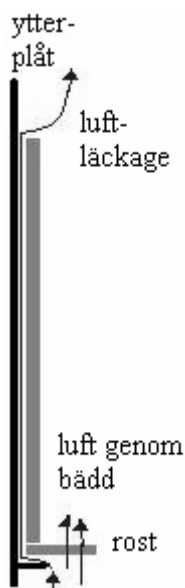
En bättre våg med noggrannheten ± 10 gram hyrdes in för mätningarna.

Temperaturmätningar: nivå och endimensionalitet

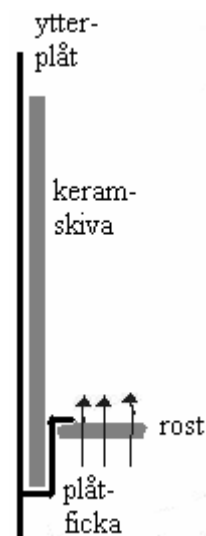
Temperaturmätningarna sker med termoelement instuckna från sidan i bädden. Tidigare har 3-mm termoelement används eftersom de tål den höga temperaturen väl. Dessa är relativt styva

och bär upp sig själva. Dock kan de böjas något då riggen fylls av bränsle, och den exakta positionen för varje temperaturmätning belastas med en osäkerhet. Därför byttes de ut mot tunnare termoelement som bärs upp av keramikrör. Försiktighet måste då iaktas då riggen fylls, men läget får större noggrannhet.

För att få en uppfattning om antändningsfrontens endimensionalitet då den rör sig genom bädden monterades 4 termoelement på samma höjd över rosten i ett keramrör. I själva rostytan monterades också 4 termoelement fördelade över ytan. Elementen stacks genom rosten nedifrån.



Figur 3. Äldre konstruktion. Luftläckaget mellan keramplattan och plåtväggen uppstod då den hålade plåt som rosten vilade på blev en aning bucklig på grund av värmen från förbränningen.



Figur 4. Ny konstruktion. Genom att sticka ned keramskivan i en ficka förhindras luftläckage mellan skiva och vägg. Genom att lägga keramplattan under falsen, förbättras tätningen mellan platta och fals då primärluften trycker på underifrån.

Kontinuerlig bäddhöjdsättning

Bäddhöjden mäts kontinuerligt genom manuell avläsning av läget på en pinne, som står på bädden med en kors. Höjdpinnen har krånglat vid tidigare mätningar. Dels var den så tung att den tenderade att sjunka ned i kokslagret, dels ville den gärna fastna i sin styrning. Vikten minskades genom att hyvla av material från kors och stång, och höjden på styrningen minskades, vilket gjorde höjdpinne användbar.

Högt tryckfall över rosten

Ett högt tryckfall över rosten ger en jämn hastighetsprofil genom bädden. Därför användes en porös keramisk platta som rost.

Förbättrad tändmetod

I tidigare experiment har bränslebädden antänds med en svetslåga. Det har då varit svårt att få en jämn tändning över hela ytan. Risk har funnits att tändmetoden har initierat kanalbildning och/eller sned antändningsfront. För att tända bränslebädden jämnt över ytan inköptes en tändplatta med elektriskt uppvärmda kantalspiraler. Genom att lägga plattan som ett lock över

riggen och tända bränslet genom strålningsvärmens från spiralerna, förväntas tändningen av bränslebädden ske jämnare över ytan. Plattan är försedd med isolering utåt och med ett termoelement som avläser temperaturen strax under tändplattan. Kanaler i plattan släpper igenom ett gasflöde under tändförloppet. Termoelementet kopplas till en reglering för att undvika att kantalspiralerna överhettas. Idén med tändplattan är att via strålningsvärme upphetta ytan på bränslet och få en tändning av koksen. Det avgasade gasflödet förs bort av ett mindre luftflöde för att undvika gasexplosion. Så fort koksen har tänt avlägsnas plattan.

Mätning av kvävgas och vätgas

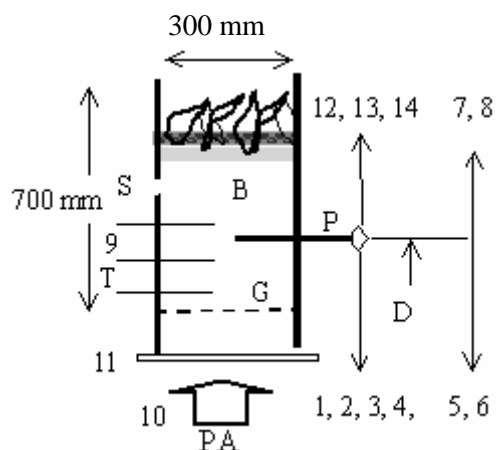
Mätning av kvävgas och vätgas skedde genom att bäddgas samlades upp i en påse under stationära faser av avgasning. Även lättare kolväten kunde analyseras från påsarna. Vid varje experiment fylldes tre påsar, och insamlingstiden för varje påse var cirka 5 minuter. Insamlad gas analyserades med en gaskromatograf GC och resultatet gav medelvärde för kväve och väte under insamlingstiden. Analysen gav även halten av syre och av metan, och i vissa fall av eten, etan och bensen.

Absorption av gaser

För att mäta tyngre kolväten adsorberades gas i tenaxrör, som senare utvärderades med gaskromatografi GC. Kvävehaltiga ämnen som ammoniak NH_3 och vätecyanid HCN adsorberades i lösning vilket kompletterade den kontinuerliga mätningen med FTIR av dessa ämnen.

Mätuppställning och uppmätta parametrar

Koncentrationer i gasen mäts kontinuerligt med en extraktiv sond instucken i bädden, se Figur 5 och Tabell 1. Sonden är kyld med silikonolja som håller en temperatur av $190\text{ }^\circ\text{C}$, för att kvävehaltiga ämnen inte ska kondensera på väg till analysinstrumenten. Ammoniak har en tendens att reagerar med metallytor, och därför stacks ett kvartsglasrör in i sonden så att gasens kontakt med metall minimerades. Vissa instrument (FTIR och FID) kräver att utsugen gas späds till halter inom instrumentets mätområde. Spädning skedde med torr, uppvärmd luft.



Figur 5. Experimentuppställning. Bränslebädd B, spädutrustning D, rost G, sond P, primärluft PA, synnglas S och termoelement T. Mätutrustning 1-14 ges i Tabell 1.

Viktminskning, tillfört primärluftflöde och temperaturer mäts kontinuerligt under förbränningen. Absorption av NH_3 , HCN , utsug till påse för vä- och kvävgas och lättare kolväten och utsug till tenaxrör för tyngre kolväten skedde under del av avgasperioden för senare analys. Erhållna värden ger då ett medelvärde under den tidsperiod utsug har skett. Det är inte meningsfullt att genomföra utsug till påse under en transient process eftersom resultatet blir

ett medelvärde. Resultatet av absorption av NH_3 och HCN redovisas inte i denna rapport, utan i en separat arbete (Samuelsson 2006).

THC i torkade gaser

Under mätningarna kopplades även ett THC-instrument (FID) till torkade, utspädda gaser. Syftet var att få information om innehållet av kolväten i torkade gaser. Tyvärr visade det sig att instrumentet inte var pålitligt, och har inte använts vid utvärderingarna av data.

Temperaturmätningar

Temperaturer mättes med termoelement av typ K och typ N. Alla heta temperaturer mäts med typ N. Termoelement finns i primärgasflödet, i rosten, instuckna i bädden på olika höjd över rosten och i gasflödet. Det finns även termoelement på utsidan av riggen för att få en uppfattning om förlusterna genom väggen.


Tabell 1. Mätutrustning. Siffrorna i vänstra kolumnen refererar till Figur 5.

Nr	Mätt komponent	Mätområde	Gasbehandling	Type of instrument
1	CO_2	0 – 20 vol-%	Torkad, rumstempererad	NDIR
2	O_2	0 – 100 vol-%	Torkad, rumstempererad	Paramagnetisk
3	CO	0 – 30 vol-%	Torkad, rumstempererad	NDIR
4	CH_4	0 – 10 vol-%	Torkad, rumstempererad	NDIR
5	CO_2	0 – 20 vol-%	Torkad, utspädd, rumstempererad	NDIR
6	NO , NO_2 , NO_x	0 – 10 000 ppm	Torkad, utspädd, rumstempererad	Chemiluminescence
7	H_2O , NH_3 , HCN , CH_4 , C_2H_4 , CO_2	Kalibreras för varje komponent	Ej torkad, utspädd, 190 °C	FTIR
8	THC	1-100 000 ppm	Ej torkad, utspädd, 190 °C	FID
9	Temperaturer			Termoelement N och K
10	Viktändring			Våg
11	Luftflöde			Prandtlrör
12	NH_3 , HCN			Absorption
13	N_2 , H_2 , CH_4 , O_2 Lättare kolväten			Gaskromatografi
14	Tyngre kolväten			Tenaxrör

Resultat från genomförda experiment

Sammanlagt sex experiment genomfördes vid olika primärluftsflöden. Vid experimenten användes träpellet av pressat sågspån. Egenskaper hos använt bränsle återfinns i Tabell 2.

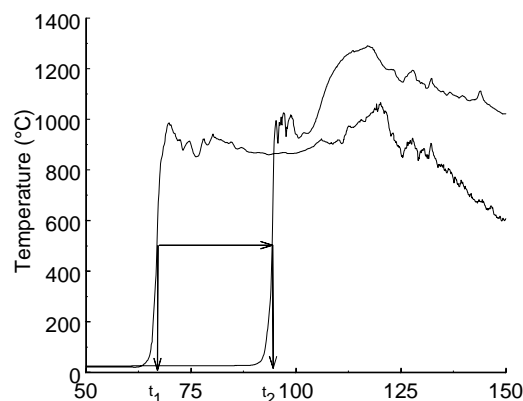
Tabell 2. Bränsleegenskaper.

Bränsle:							träpellet av sågspån diameter 8 mm längd 12-20 mm
Bäddporositet:							0,42
Bäddensitet för torrt bränsle:							596 kg _{ts} /m ³
Fukthalt uppmätt vid experimenttillfället:							11 vikt-%
Bäddensitet för vått bränsle:							670 kg/m ³
Elementaranalys på använt bränsle (träpellet)	aska (vikt-%, ts)	c (vikt-%, ts)	o (vikt-%, ts)	h (vikt-%, ts)	n (vikt-%, ts)	Hi (kJ/kg _{ts})	
	0,39	50,5	43,1	6,2	0,15	18,5	

I Tabell 3 visas ilagd vikt och tillförd primärluft tillsammans med en del mätresultat från de genomförda experimenten. Medelvärde för uppmätt bäddensitet är 663 kg/m³ vilket stämmer bra med de 661 kg/m³ som uppmättes vid torkprovet. Variationen visade en standardavvikelse som motsvarar 3 % av vikten. Bränslet kan alltså anses vara homogent och fylla upp riggen på likvärdigt sätt i de olika experimenten. Fukthalt i tillförd primärluft mättes med FTIR-instrumentet. Halten varierar mellan 1 och 2,5 vol-% beroende på väderlek och till viss del på omräkning från utspädd till outspädd gas.

Från mätningarna beräknades antändningshastigheten, d.v.s. antänt bränsle per m² som $I = \rho_b \cdot \Delta h / \Delta t$, där ρ_b är bränslebäddens densitet (kg/m³), Δh är höjden mellan två termoelement (m) och Δt är tiden mellan att termoelementen når temperaturen 500 °C (s), se Figur 6.

Den högsta temperaturen i själva antändningsfronten (vid 67 minuter i Figur 6) noterades och i Tabell 3 visas ett medelvärde av dessa för varje experiment. Frontens bredd är definierad från att syrehalten i torra gaser börjar gå ned, tills den är i princip noll. Frontens upplösning är beräknad på tillförd luftflöde enligt en modell beskriven i (Rönnbäck m fl. 2002).



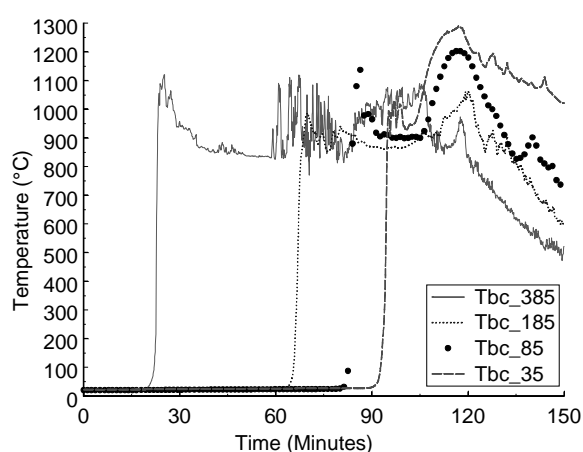
Figur 6. Figuren illustrerar hur antändningshastigheten beräknas: $I = \rho_b \cdot \Delta h / \Delta t$ (kg/m²s).

Tabell 3. Ilagd vikt och mätresultat. Bäddhöjden var 400 mm och sonden placerad 235 mm över rosten.

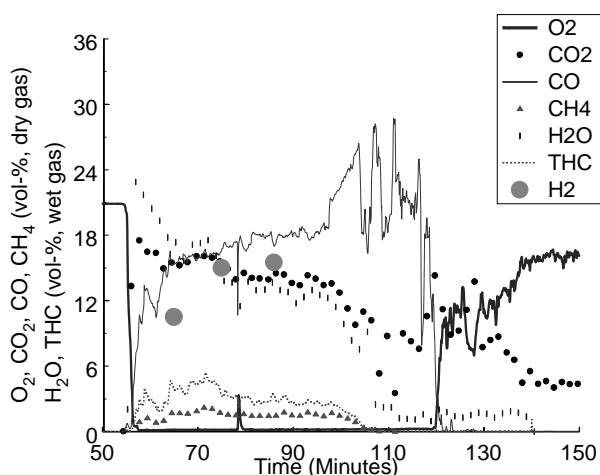
Datum	Ilagd vikt (kg)	Tillfört primärluftsflöde (kg/m ² s)	Antändningshastighet (kg/m ² s)	Medeltemperatur i antändningsfront (C)	Koksandel (kvar vid start av koksförbränning/hela vikten)	Fronten bredd (mm)	Frontens upplösning
030814	23,74	0,045	0,022	776	0,08	24	25
030815	25,81	0,09	0,046	1003	0,12	12	18
030812	23,74	0,09	0,054	1027	0,04	23	10
030813	26,56	0,18	0,054	1088	0,05	25	12
030818 nr2	24,74	0,27	0,069	1170	0,02	34	11
030818	27,02	0,39	0,086	1213	0,02	83	9

Uppmätta temperaturer i centrum av bädden och kontinuerligt uppmätta koncentrationer av O₂, CO₂, CO, CH₄, THC och H₂O visas för alla experimenten i Bilaga 3 respektive Bilaga 4. Resultaten exemplifieras här av Figur 7 (uppmätta temperaturer), Figur 8 (uppmätta koncentrationer) och Figur 9 (koncentrationer och antändningsfrontens läge).

Bränslebädden tänds på ytan med det elektriska elementet och antändningsfronten rör sig nedåt, mot rosten och mot primärluftsflödet. Vid 52 minuter (se Figur 9) når fronten sonden. Bränslet torkar och halten vattenånga ökar från omgivningsluftens 2 % samtidigt som luftens syre späds ut. Vid 54 minuter ökar halten vattenånga drastiskt samtidigt som halten syre sjunker. Strax därefter syns producerad koldioxid öka. Förbränning av pyrolysgaser har då tagit fart. Först när syrehalten är nästan noll blir oförbrända gaser som kolmonoxid, metan och andra kolväten (THC), synliga. Om frontens bredd definieras utifrån att syret sjunker från 21 till 0 %, blir bredden i detta fall 25 mm. Antändningsfronten är alltså tunn, väl definierad och med stora gradienter i temperatur och koncentrationer. Upplösningen i gasanalysen uppskattas till samma storlek som fronten eller mindre, se Tabell 3.



Figur 7. Temperaturer 35, 85, 185 och 385 mm över rosten. Primärluftsflöde 0,18 (kg/m²s).



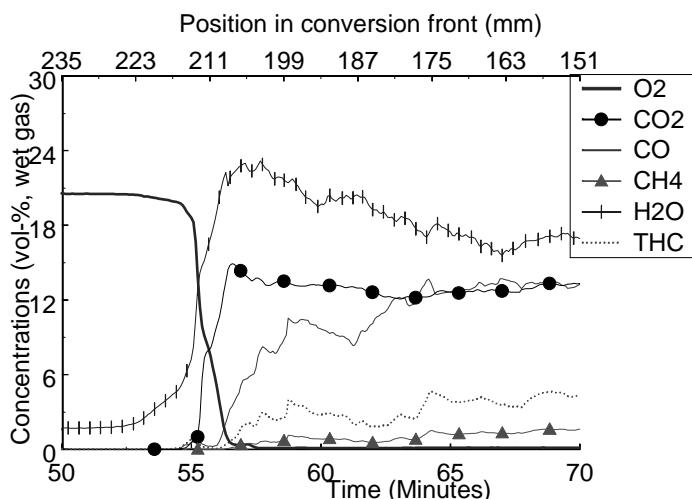
Figur 8. Koncentrationer av O₂, CO₂, CO, CH₄, H₂O, THC och H₂. Primärluftsflöde 0,18 (kg/m²s).

Ovanför antändningsfronten kommer ett skikt med koks att ackumuleras. Vid lägre luftflöden kommer skiktet att kontinuerligt öka i tjocklek. Vid lite högre luftflöden är koksskiktet kon-

stant tjockt och blir allt tunnare ju högre luftflödet är. Temperaturen uppmätt med termoelement, Figur 8, visar att temperaturen höjs snabbt från rumstemperatur till frontens temperatur då det utsätts för strålning från glödande koks i fronten. Uppmätt temperatur når ett maximum i antändningsfronten och sjunker sedan något. Detta hänger samman med att värmeutvecklingen är stor från både glödande koks och gasförbränning i fronten där syre finns tillgängligt.

Strax ovanför fronten kommer termoelementets temperatur att närma sig temperaturen hos glödande koks, och sjunker då. När bädden sjunker kommer termoelementet att hamna i gasfas ovanför koksskiktet och utsätts då från kylning från omgivningen. Dess temperatur sjunker då ytterligare, för att ligga konstant tills antändningsfronten når rosten. När allt bränsle är avgasat kommer det ackumulerade koksskiktet att slutförbrännas. Detta syns i gasanalysen genom att metan, vattenånga och kolväten går mot noll. Samtidigt ökar halten kolmonoxid samtidigt som halten koldioxid sjunker och temperaturen ökar. Att halten kolmonoxid ökar hänger samman med att omvandlingen av kolmonoxid till koldioxid går långsammare då halterna av syre och vattenånga är låga. När bränslet börjar ta slut och halten syre ökar, kommer också halten koldioxid att öka på kolmonoxidens bekostnad. Ju högre primärluftsflödet är, ju tunnare blir koksskiktet och slutförbränningsfasen blir kortare och till slut inte synbar, se Bilaga 3 och Bilaga 4.

Strax nedströms antändningsfronten syns en topp i vattenånga och i koldioxid. Dessa toppar försvinner vid högre luftflöden. Topparna hör troligtvis ihop med förgasningsprocesser i koksskiktet och gasfasreaktioner, vars sammanlagda effekt blir att halten vattenånga och koldioxid sjunker samtidigt som vätgas och kolmonoxid ökar. För detaljer i processerna krävs mer insikt i kinetiken i antändningsfronten.



Figur 9. Koncentrationer av O₂, CO₂, CO, CH₄, H₂O, THC och H₂ i våta gaser. Tid på nedre x-axel och antändningsfrontens höjd över rosten på övre. Primärluftsflöde 0,18 (kg/m²s).

Resultat från mätning av kvävgas och vätgas

Mätning av kvävgas och vätgas skedde genom att gas från sonden samlades upp i en påse under stationära faser av avgasning. Vid varje experiment fylldes påsar vid tre tillfällen under vardera cirka 5 minuter. Insamlad gas analyserades med en gaskromatograf och resultatet ger medelvärde för kväve och väte under insamlingstiden. Analysen gav även halten av syre och av metan, och i vissa fall av eten, etan och bensen. Resultaten återfinns i sin helhet i Bilaga 1: Analyser av gaser från förbränningsprov. Påsarna som användes var speciellt avsedda för gasprovtagning och extremt täta, men ett litet inläckage av lust skedde ändå mellan

provtagning och analys. Värden korrigerade för inläckage av syrgas finns i Bilaga 2. Korrigeringarna är för $H_2 < 1,6 \%$ (med ett undantag) och för $N_2 < 2,5 \%$ (med tre undantag).

Vätgashalterna ligger mellan 8 och 20 % (korrigerade värden i torr gas). I Bilaga 5 återfinns resultaten inlagda i diagram tillsammans med kontinuerligt uppmätta halter av CO_2 , CO och H_2O . Generellt återfinns de höga halterna vätgas vid låga primärluftsflöden. I fyra fall är vätgashalten lägst nära antändningsfronten. I ett fall (det högsta flödet) är alla tre proverna tagna relativt sent efter att fronten har passerat sonden och en punkt nära fronten saknas. I ett fall, flödet $0,09 \text{ kg/m}^2\text{s}$ är vätgashalten högst nära fronten. Höjningen av vätgashalt med avstånd från fronten sammanfaller i de flesta fall med en motsvarande sänkning av halten vattenånga.

Koksprover

Under mätningarna togs koks ut från det aktiva koksskiktet med ett specialbyggt instrument (en stång med en skrapa i ena änden). Koksprovet lades omedelbart i ett kärl där det fick svalna i ett kvävgasflöde och skickades sedan på analys. Tre analyser gjordes, se resultat i Tabell 4. Analys skedde sedan på innehåll av aska, kol, väte och kväve. Skillnaderna mellan de tre proverna är små. Syrenehållet beräknas med differens.

Tabell 4. Resultat från tre koksprov.

	030813 tillförd primärlufts- flöde $0,09 \text{ kg/m}^2\text{s}$		030814 tillförd primärlufts- flöde $0,045 \text{ kg/m}^2\text{s}$		030815 tillförd primärluftsflöde $0,18 \text{ kg/m}^2\text{s}$		Beräknat medel- värde
	vikt - % torrt	vikt - % torrt, askfritt	vikt - % torrt	vikt - % torrt, askfritt	vikt - % torrt	vikt - % torrt, ask- fritt	vikt - % torrt, askfritt
aska	5,3		3,9		5,1		
kol	89,2	94,2	90,5	94,2	90,6	95,5	94,6
väte	0,5	0,5	0,8	0,8	0,5	0,5	0,6
kväve	0,23	0,2	0,17	0,2	0,23	0,2	0,2
syre	4,9	5,2	4,5	4,7	3,5	3,7	4,5
Summa:	100,13	100,1	99,87	99,9	99,93	99,9	

Tjäranalys

Motsvarande analys görs av de tjäror som har kondenserat på insidan av det kvartsglasrör som är monterat inuti sonden. Ett prov skrapas från kvartsglasrörets insida efter avslutad mätning. Två kvartsglasrör valdes för tjärprov efter genomförda mätningar, från 030814 och 030815. Först blåstes/sopades material ut ur rören. Det är möjligt att detta material innehåller flygaska och sot. När allt löst material var borttaget skrapades ytterligare material bort från det ena glasröret (030814). I det andra röret (030815) fanns inte tillräckligt med material kvar för ett prov. Resultatet syns i Tabell 5.

Det är troligt att både flygaska och sot fastnar på insidan av glasröret. När prov blåses/sopas ut ur röret är det troligt att halten av aska och av kol är högre, än när tjära skrapas direkt från ytan. Det utskrapade provet har något lägre kolhalt än det utblåsta, vilket skulle kunna bekräfta att det löst fastsatta materialet har inslag av koks, men skillnaden är liten. Om man antar att en viss mängd av differensen är aska, påverkas molförhållandet mellan syre och kol, men skillnaden är liten. Molförhållandet mellan väte och kol är högst i det utskrapade provet.

Tabell 5. Resultat från tre tjärprov.

	030814 tillförd primärluftsflöde 0,045 kg/m ² s		030815 tillförd primärluftsflöde 0,09 kg/m ² s		030814 tillförd primärluftsflöde 0,045 kg/m ² s	
	prov blåst/sopat		prov blåst/sopat		prov skrapat	
	vikt - %		vikt - %		vikt - %	
kol, C	80,2		78,2		78,2	
väte, H	3,9		2,1		4,7	
kväve, N	0,35		0,15		0,45	
syre, O, beräknad med differens	aska = 0 %	aska = 5 %	aska = 0 %	aska = 5 %	aska = 0 %	aska = 5 %
	15,55	10,6	19,55	14,6	16,55	11,7
molförhållande H ₂ /C	0,29	0,29	0,16	0,16	0,36	0,36
molförhållande O ₂ /C	0,07	0,05	0,09	0,07	0,08	0,06

Jämförelse med tidigare experiment

Antändningshastighet och maxtemperatur i fronten är inlagda i Figur 10 tillsammans med resultat från mätningar i tidigare delprojekt med dels samma pellet, dels trästavar i samma storlek. Pelleten och trästavarna har mycket snarlik elementaranalys och fukthalt, men stavar-
nas densitet är hälften av pelletens. Figuren visar att de senast uppmätta antändningshastighe-
terna stämmer väl med tidigare uppmätta.

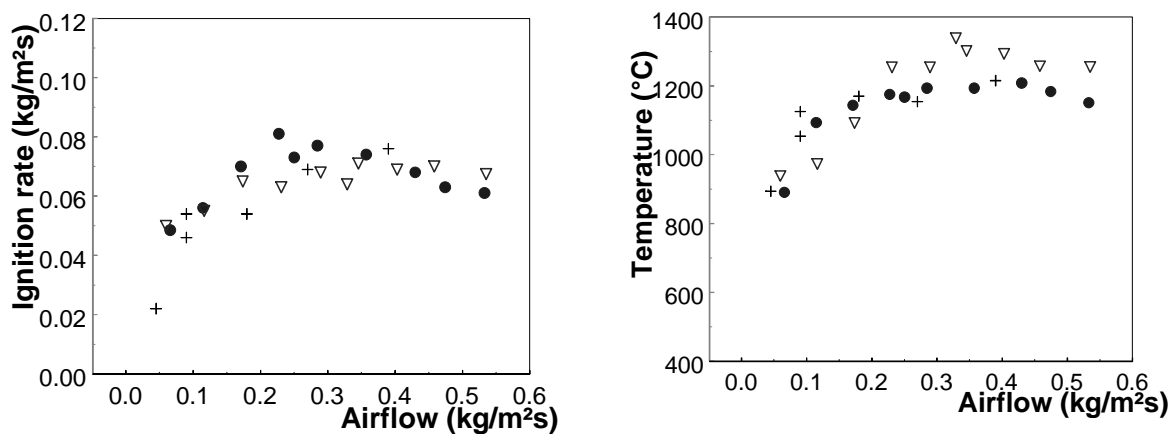


Figure 10 Ignition rate (kg ignited fuel per m² cross sectional area of the bed and second) and maximum temperature in the ignition front versus airflow. Solid wood cylinders d 8×1 20, bed density 279 kg_{dry}/m³ (●), wood pellet d 8 × 1 20, bed density 593 kg_{dry}/m³ (▽), latest experiments: wood pellet d 8 × 1 12-20, bed density 596 kg_{dry}/m³ (+), all dimensions in mm. Moisture content all fuels 9 – 10 %.

Genomförda massbalanser

Vid omvandlingen av bränsle i bränslebädden bildas, tillsammans med tillsatt primärluft, vattenånga, pyrolys- och förbränningsgaser, koks och aska. För samma bränsle kommer fördelningen mellan olika ämnen att bero av fukthalten och av primärluftflödets storlek. Koks och aska stannar i bädden medan vattenånga och andra gaser lämnar den. Den gas som sugts ut av sonden kyls till 190 °C. Gasen passerar sedan en tjärfälla och ett partikelfilter. Till vissa instrument förs gasen genom slangar uppvärmda till 190 °C. Beroende på instrumentets mätområde kan gasen behöva spädas med luft. Andra instrument kräver torkad, rumstempererad luft, och den gas som förs till dessa instrument kommer först att passera en kylare där vattenånga fälls ut.

De ämnen som vanligtvis mäts i förbränningsssammanhang är CO, CO₂ och O₂. De mäts med infraröd (CO och CO₂) eller paramagnetisk (O₂) teknik i torkade gaser. Andra ämnen, som kvävgas och vätgas, mäts i princip aldrig. Kolväten mäts med flamjonisationsanalysator, FID, eller Fourier Transform Infra Red teknik, FTIR. De kolväten som har en kondensationspunkt över den temperatur som dessa instrument arbetar vid (här 190 °C) kommer aldrig med i mätningarna. Här kallas dessa kolväten för tjäror. Genom att genomföra en massbalansberäkning baserad på uppmätta koncentrationer kan halterna av kväv- och vätgas och av tjäror beräknas. Sådana massbalansberäkningar är genomförda och beskrivs i (Rönnbäck m fl. 2004). Beräkningarna är validerade med mätningar av kväv- och vätgas. Resultatet visar att beräkningarna överensstämmer väl med de validerande mätningarna. Beräkningarna kan alltså användas för att beräkna kväv- och vätgashalter, och även hur mycket tjära som avgår från bädden.

Om förbränningen hade varit perfekt endimensionell hade förhållandet mellan tillförd primärluft och omvandlat bränsle varit känt genom mätning av luftflödet och mätning av viktförlust från riggen. Men förhållandet varierar över tvärsnittsytan på bädden. Med massbalansberäkningar kan man också beräkna det lokala stökiometriska förhållandet vid sondspetsen. Beräkningarna ger även en ökad detaljkunskap om omvandlingen av bränsle i antändningsfronten, och man får en kontroll av att de mätningar man gör verkligen stämmer.

Här följer en kort beskrivning av massbalansberäkningarna.

Följande molflöden ingår i massbalansberäkningen: syre (1) och kväve (2) som härstammar från tillförd luft, vattenånga (3) varav en liten del härstammar från fukt i tillförd luft, kolmonoxid (4), koldioxid (5), vätgas (6) och kolväten. Kolväten delas upp i fyra grupper: metan (7), andra lätta kolväten C_iH_j (8), tyngre kolväten C_aH_bO_c (9) och tjäror C_{tar}H_{tar}O_{tar} (10). Med andra lätta kolväten C_iH_j avses de kolväten (förutom CH₄) som kvarstår i gasfas efter det att utsugen gas har kylts till rumstemperatur. CH₄ och C_iH_j kvarstår alltså i den gas som når instrument som arbetar med torkad, rumstempererad gas. Med tyngre kolväten avses de ämnen som kvarstår i gasfas efter att utsugen gas har kylts till 190 °C men har kondenserat vid rumstemperatur. Dessa kolväten återfinns i den gas som når de instrument som arbetar med varm gas. Med tjäror avses de kolväten som kondenserar vid 190 °C. Tjäror kommer aldrig att nå något av instrumenten, utan fastnar på insidan av sonden eller i efterföljande tjärfälla. Vissa instrument (FID och FTIR) är inte anpassade för de höga halter av vissa ämnen som uppstår i antändningsfronten. Utsugen gas måste därför spädas, vilket sker med torr, varm luft. Från spädningen härstammar ytterligare två molflöden, nämligen syre (11) och kväve (12). Förhållandet mellan tillförd primärluft och omvandlat bränsle varierar över tvärsnittsytan på

bädden, och vid sondspetsen är förhållandet $\Omega = m_{air}/m_{fuel}$ (13). Dessa 12 molflöden och ett förhållande utgör ett ekvationssystem med 13 okända.

Vid mätningarna mäts mol- (eller volym-) andelen X_i av molflödet n_i gasen.

$$X_i = n_i / \sum_j n_j \quad (\text{Ekv. 1})$$

Förening eller ämne mätt i torr gas utan spädning:	$i = 1,4,5,7$	$j = 1,2,4-8$
Förening eller ämne mätt i torr gas med spädning:	$i = 5$	$j = 1,2,4-8,11,12$
Förening eller ämne mätt i spädd, ej torkad gas:	$i = 3,5,7$	$j = 1-9,11,12$
Spädgas:	$i = 11,12$	$j = 11,12$

Av de tio ekvationerna kommer två att inte tillföra någon extra information.

Ytterligare en ekvation härleds från flamjonisationsanalysatorn. Detta instrument räknar antalet kolatomer i olika kolväten, och relaterar dessa till kalibrergasen, i detta fall metan CH_4 . Olika kolväten är belastade med olika responsfaktorer, d.v.s. instrumentet viktar kolatomerna något olika beroende på hur de sitter. Responsfaktorn för metan är vanligen ett och responsfaktorer för andra kolväten finns i analysatorns manual. Här beräknas molandelen av kolväten som

$$X_{THC} = (n_1 + \phi_1 n_8 + \phi_2 n_9) / \sum_{j=1-9,11,12} n_j \quad (\text{Ekv. 2})$$

ϕ_1 och ϕ_2 är responsfaktorer för kolvätena (8) respektive (9). De lätta kolvätena (8) analyserades med gaskromatografi GC och befanns bestå av metan (strax under 50 %) och andra kolväten till stor del eten, C_2H_4 , etan, C_2H_6 and bensen, C_6H_6 . Vid beräkning av massbalansen användes C_iH_j uttryckt som C_2H_4 med $\phi_1 = 1.90$. De tunga kolvätena $\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c$ representeras av $\text{C}_6\text{H}_{6.2}\text{O}_{0.2}$ with $\phi_1 = 6$ (Adams 1980).

Massfraktion av de fyra grundämnena kol C, väte H, syre O och kväve N beräknas som

$$Y_i = \frac{Y_{i,fuel} - Y_{char} Y_{i,char} + \Omega Y_{i,air}}{1 - Y_{char} + \Omega} = \frac{\sum_j \gamma_{i,j} n_j M_i}{\sum_i \sum_j \gamma_{i,j} n_j M_i} \quad (\text{Ekv. 3})$$

där index i representerar C, H, O och N, och j förening (1) till (10). $Y_{i,fuel}$ och $Y_{i,char}$ är massfraktioner av grundämnet i i bränsle och koks, där Y_{char} är massfraktionen av kvarvarande bränsle nedströms antändningsfronten (dvs koks). I denna fraktion ingår även bränslets askinnehåll (som är marginellt). $\gamma_{i,j}$ är den stökiometriska koefficienten för ämne i i föreningen j , n_j är molflöden av j och M_i är molmassan hos ämnet i . Ekvation 3 ger fyra ekvationer till massbalansen. Sammansättningen hos tjära och koks fås genom provtagning. Massandelen koks fås genom att mäta den vikt som kvarstår då allt bränsle är övertänt i varje experiment.

Genom att lösa det beskrivna systemet av 13 ekvationer fås sammansättningen i gasen vid sondspetsen, inklusive de tjäror som aldrig når något mätinstrument. Flödet av spädgas regleras med en massflödesregulator, varför molflödena n_{11} och n_{12} (mol/s) är kända. Detta används för att beräkna övriga molflöden i mol/s. Tillförd primärluft per yt- och tidsenhet ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$) vid sondspetsen kan sedan beräknas med

$$m_{air} = G \cdot \Omega / A \quad (\text{Ekv. 4})$$

där G är uppmätt massändring (kg/s), Ω är det beräknade förhållandet mellan luft och bränsle och A rostens yta (m^2).

För att validera beräkningarna mättes vätgas H_2 och kvävgas N_2 och kolväten med GC under kortare perioder. Ett annat sätt att validera resultatet är genom att jämföra den beräknade adiabatiska temperaturen; den ska vara nära den mätta temperaturen i centrum av bädden där värmeförluster till omgivningen är liten. Den adiabatiska temperaturen beräknas med

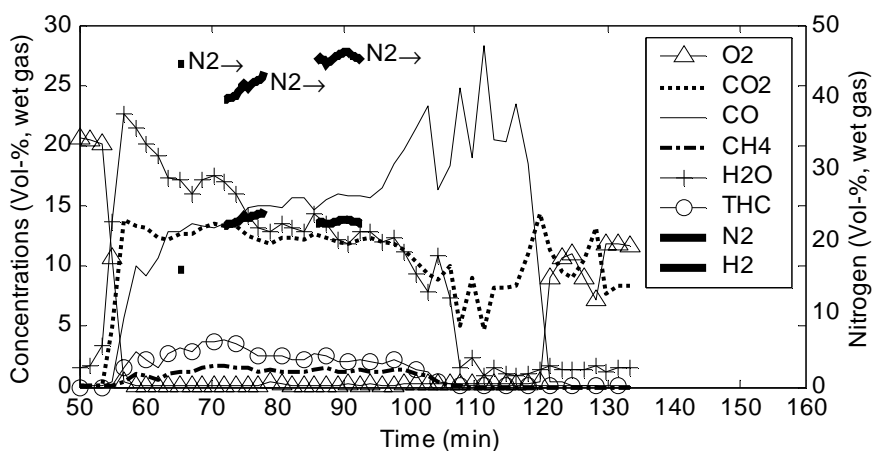
$$\sum_j \left[n_j \int_{T_{ref}}^{T_{ad}} c_{pj} dT \right] = H_{s,fuel} \cdot m_{fuel} (1 - Y_m) - \sum_j n_j M_j H_{s,j} \quad (\text{Ekv. 5})$$

$H_{s,fuel}$ och $H_{s,j}$ är övre värmevärde hos bränslet (J/kg) och hos ämne j , Y_m är massfraktionen av fukt i bränslet, m_{fuel} är avgasat bränsle (kg/s), och c_p är specifik värmekapacitet (J/mole,K).

När massbalansberäkningar genomförs baserat på uppmätta koncentrationer, måste hänsyn tas till transienter i förloppen. I själva förbränningsfronten kommer tillfört bränsle i ekvation 3 att bestå först av endast vattenånga, sedan av en ökande andel avgasat material, och tills slut, nedströms fronten, av en konstant tillförsel av fukt, gaser och koks. I beräkningarna simuleras transienten genom att låta vattenhalten minska från 100 % till 11 % med ett kvadratisk uttryck. Halten av flyktigt material ökar samtidigt från noll till 89 %.

Resultat av massbalansberäkningar

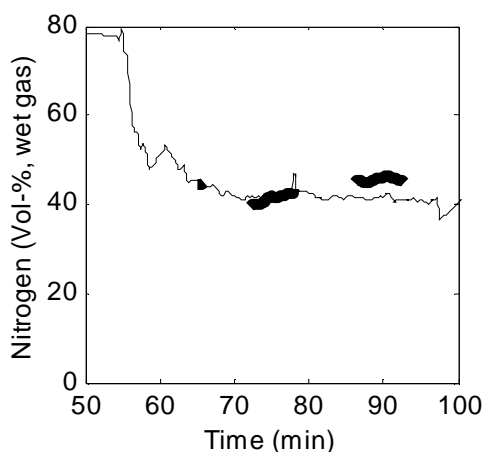
Massbalansberäkningar genomfördes på sex mätningar. Här redovisas resultaten i korthet. För detaljer, se (Rönnbäck m fl. 2004). Figur 11 visar uppmätta föreningar i gasfas vid primärluftsflödet 0,14 m/s (0,18 kg/m²s). Bränslet är träpellets. Bränslebädden tänds på ytan och vid 52 minuter når antändningsfronten sonden, som är instucken i bränslebädden 235 mm ovanför rosten. Halten vattenånga är 2 % i inkommande luft, och ökar något då bränslet torkas i antändningsfronten. Efter några minuter ökar både halten vattenånga och koldioxid snabbt samtidigt som syrehalten minskar, vilket indikerar att förbränning sker, d.v.s. pyrolysgaserna koldioxid, metan och väte förbränns till koldioxid och vatten.



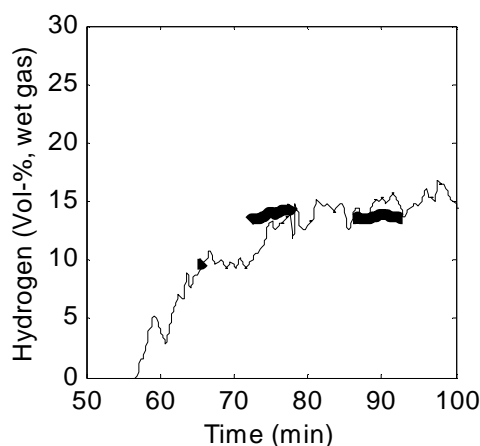
Figur 11. Uppmätta föreningar i gasfas. Bränsle träpellets. Tillfört primärluftsflöde 0,14 m/s (0,18 kg/m²s).

Först när syrehalten har sjunkit ned till några procent börjar oförbrända gaser, d.v.s. kolmonoxid, metan och andra kolväten (THC) att öka. Området med skarpa gradienter är strax under 20 mm tunt. Vid ca 60 minuter ligger antändningsfronten väl under sonden, och en mätperiod med relativt stabila halter följer då antändningsfronten rör sig ned genom bränslebädden. Under den här perioden tas tre påsprov med gas, och de analyserade värdena för kväve och väte ligger inlagda i Figur 11.. Alla halter är omräknade till halter i fuktig gas. Vid 100 minuter når antändningsfronten rosten. Halten av kolmonoxid ökar plötsligt då den ackumulerade koksen börjar att förbrännas. Vid 120 minuter sjunker halten kolmonoxid, följt av en kort topp i koldioxid. Därefter börjar halten syre att öka, temperaturerna går ned och bränslet är i princip färdigbränt vid 140 minuter.

Resultat av beräkning av kväv- och vätgashalter visas i Figur 12 och Figur 13. Beräknad halt är validerad med kväv- och vätgas mätt med påsprov under tre perioder och överensstämmelsen är god.

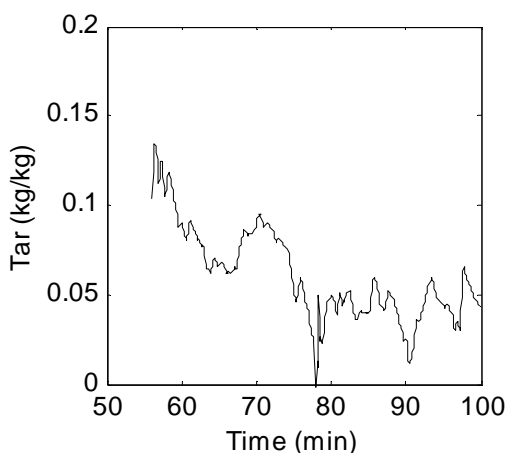


**Figur 12. Beräknad kvävgashalt (tunn linje), mätt halt (tjock linje).
Träpellets, primärluftsflöde $0,18 \text{ kg/m}^2\text{s}$.**

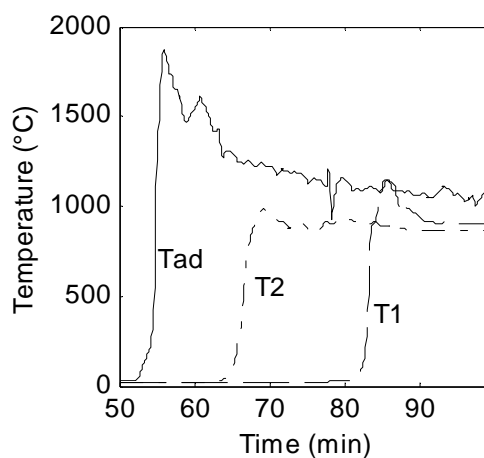


**Figur 13. Beräknad vätgashalt (tunn linje), mätt halt (tjock linje).
Träpellets, primärluftsflöde $0,18 \text{ kg/m}^2\text{s}$.**

I Figur 14 visas beräknad mängd tjära som avgår från bränslebädden per kg avgasat bränsle. Halten tjära är högst nära antändningsfronten och sjunker med avståndet till fronten. Troligen sker en viss sönderdelning av stora kolvätemolekyler till mindre i gasfasen där temperaturen är hög. I Figur 15 visas beräknad adiabatisk temperatur vid sondspetsen 235 mm över rost

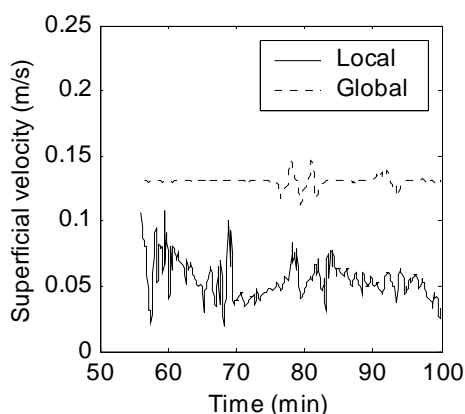


**Figur 14. Beräknad tjära som avgått från bränslet i kg tjära per kg avgasat bränsle.
Träpellets, primärluftsflöde $0,18 \text{ kg/m}^2\text{s}$.**

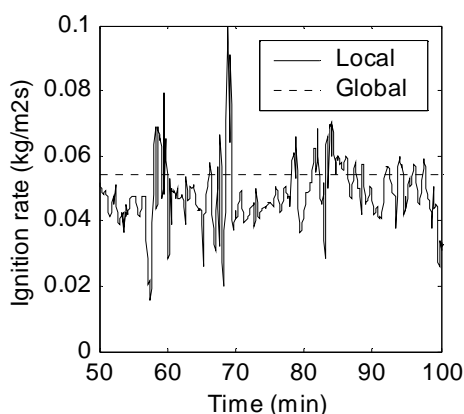


**Figur 15. Mätta temperaturer T1: 85 mm över rost, T2: 185 mm över rost. Beräknad adiabatisk temperatur vid sonden 235 mm över rost.
Träpellets, primärluftsflöde $0,18 \text{ kg/m}^2\text{s}$.**

tillsammans med två temperaturer uppmätta 185 respektive 85 mm över rost. I den stabila avgasningsfasen från ca 70 till 100 minuter ligger den beräknade temperaturen 150 -200 grader över den uppmätta. En värmebalansberäkning över termoelementen där dessa exponeras av experimentriggens rökgasrör, som är ca 500 °C, förklarar denna skillnad. I antändningsfronten, ca 55-65 minuter, är den beräknade adiabatiska temperaturen betydligt högre än den uppmätta. För att förstå orsaken till denna skillnad krävs en mer detaljerad studie av kinetik och värmeutveckling i antändningsfronten. Primärluftsflödet kan mätas via tillförd luft (globalt) eller beräknas vid sondens spets genom massbalansberäkning (lokalt), se Figur 16. Beräkningen visar att luftflödet vid sondspetsen var lägre än det globalt tillsatta luftflödet. Detta orsakades av ojämnheter i rosten, och återkom i alla experimenten. Antändningshastigheten kan beräknas från uppmätta temperaturer i bädden (globalt) och från massbalansberäkningen vid sondens spets (lokalt), se Figur 17. Överensstämmelsen mellan global och lokal (medelvärderad) antändningshastighet är god. Antändningsfronten har en tendens att jämna ut sig själv, eftersom värmeflödet från fronten sker huvudsakligen via strålning, och strålningen sker åt alla håll. Antändningshastigheten som funktion av tillförd primärluft för de ingående experimenten stämmer väl med tidigare resultat. Detta antyder att det globala luftflödet har större betydelse för antändningshastigheten än lokala ojämnheter i luftflödet.



Figur 16. Global och lokal beräkning av primärluftens ythastighet. Träpellets, primärluftsflöde 0,18 kg/m²s.



Figur 17. Global och lokal beräkning av antändningshastighet. Träpellets, primärluftsflöde 0,18 kg/m²s.

Modell för antändningsfrontens hastighet

Hur snabbt antändningen av ett bränsle på en rost sker är en viktig parameter för dimensionering av rosten. Ju snabbare bränslet övertänds, ju högre blir effektutvecklingen per ytenhet. Effektutvecklingen beror även av bäddens tjocklek och transporthastigheten längst rosten, och av fördelning av primärluft i olika zoner av rosten. En snabb övertändning önskas för att pannan ska bli så kompakt som möjligt, samtidigt som ett lågt primärluftsflöde eftersträvas för att hålla nere kväveoxidbildningen. Det är också viktigt att rosten är jämnt täckt av bränsle och att förbränningen avslutas vid asklådans kant. Ojämnheter ger genomblåsningar och/eller bara fläckar på rosten vilket kan resultera i materialskador och i spikar i emissioner.

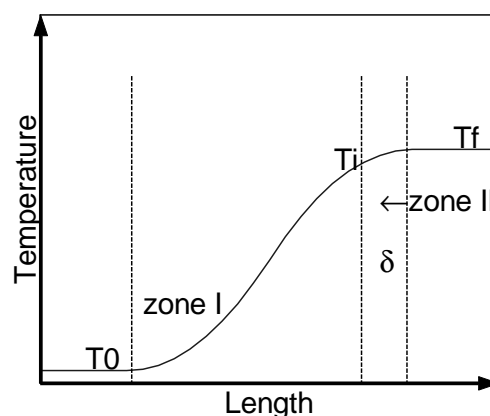
Antändningshastigheten beror av ett antal parametrar som bränslets fukthalt och densitet, partikelstorlek, och tillsatt primärflöde. Antändningshastigheten beror också av om antändningen sker med eller mot luftflödet. Detaljerade matematiska modeller av antändningsfronten blir omfattande. Det finns sådana modeller presenterade i litteraturen. Enkla modeller har fördelen av att vara mer transparenta. Här har en sådan enkel modell tagits fram. Den är baserad på teori för laminär flamförbränning. Syftet med modellen är att kunna kvalitativt studera hur ett antal parametrar påverkar antändningens hastighet. Den presenteras här i korthet; för detaljer se (Rönnbäck m fl. 2005).

Teori

Hastigheten med vilken en laminär flamma rör sig i en gas definieras som den hastighet den brännbara gasen rör sig relativt en förbränningsfront som är vinkelrät mot gasens rörelseriktning. Teorin finns väl beskriven i böcker om förbränning, exempelvis (Glassman 1987). Teorin säger att frontens kan delas upp i två zoner, se Figur 18, och att hastighet kontrolleras av värmeväxlingen från zon II, där värmeutveckling sker, till zon I, där bränslets temperatur höjs. Zonerna möts i den punkt där temperaturen är T_i (K), antändningstemperaturen. Diffusion och kemiska reaktioner försummas i zon I. Den värme som höjer temperaturen till T_i i zon I motsvaras av den värme som leds bort från den reaktiva zonen. Om vi antar att temperaturen höjs linjärt så kan kurvans lutning approximeras med $(T_f - T_i)/\delta$. T_f är den slutliga flamtemperaturen (K) och δ är bredden på zon II (m). Entalpi-balansen blir då

$$\dot{m} c_p (T_i - T_0) = k \frac{(T_f - T_i)}{\delta} A \quad (1)$$

där \dot{m} är flödet av obränt bränsle (kg/s), c_p är bränslets specifika värmekapacitet (J/kg/K), T_0 är bränslets ursprungliga temperatur (K), k är bränslets konduktivitet (W/mK) och A är tvärsnittets yta (m²).



Figur 18. Flammans struktur. Bränslet värms i zon I och reaktionerna sker i zon II som har bredden δ (m).

Ekvation (1) beskriver ett endimensionellt problem och massflödet är då

$$\dot{m} = \rho Au \quad (2)$$

där ρ är densitet (kg/m^3) och u hastighet hos gasen (m/s). Eftersom den obrända gasen rör sig vinkelrätt mot antändningsfronten kan vi sätta $u = u_L$ där u_L är flammans hastighet. Ekvation (2) i (1) ger

$$u_L = \frac{k}{\rho c_p} \frac{(T_f - T_i)}{(T_i - T_0)} \frac{1}{\delta} \quad (3)$$

Eftersom δ är reaktionszonens bredd kan δ relateras till u_L

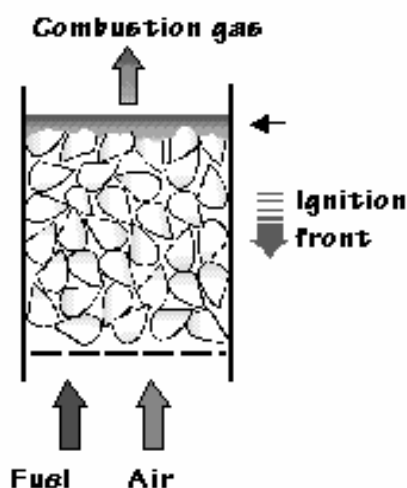
$$\delta = u_L t = u_L / R \quad (4)$$

där t är reaktionstiden och R är reaktionshastigheten för förbränningen i fronten. Ekvation (4) i (3) ger

$$u_L = \left(\frac{k}{\rho c_p} \frac{(T_f - T_i)}{(T_i - T_0)} \frac{1}{t} \right)^{1/2} \sim (\alpha R)^{1/2} \quad (5)$$

där $\alpha = \lambda/(\rho c_p)$ är den termiska diffusiviteten för gasen (m^2/s). Ekvation (5) är ett användbart uttryck för att uppskatta hastigheten hos en laminär flamma. En av nackdelarna med teorin är att den kräver ett värde på antändningstemperaturen, vilken är svår att mäta, ja t.o.m. att definiera, i en verklig flamma.

Laminär flamteori har tidigare använts för att beräkna högsta möjliga hastighet hos en antändningsfront i en fast bädd av biobränsle (Thunman 2001). Här används den för att uppskatta hastigheten och undersöka hur den påverkas av olika parametrar. Figur 19 visar en bränslebädd där antändningsfronten rör sig motströms luftflödet. Uppvärmning av färskt bränsle sker huvudsakligen via strålning från glödande koksytor och till viss del från flammor hos redan brinnande bränsle. I analogi med teorin för laminär flamhastighet kan man definiera en reaktiv zon där temperaturen hos gas och kokspartiklar höjs från T_i till T_f , och en zon där färskt bränsle värms från T_0 till T_i . I ett gasflöde definieras flammans hastighet relativt den obrända gasens. I den fasta bädden kommer flamhastigheten att definieras som antändningens hastighet relativt de fasta partiklarna.



Figur 19. Antändning av bränsle i en fast bädd där luften tillförs motströms antändningsfrontens rörelse.

Hur snabbt det brännbara materialet i en bränslepartikel blir tillgängligt avgörs av

hur snabbt den enskilda partikeln kan torka och pyrolysera. Torkning och pyrolys av den enskilda partikeln kan ske i sin helhet i antändningsfronten, eller så kan det inre av partikeln avsluta sin torkning och pyrolys nedströms fronten. Torkning och pyrolys beror av partiklens Biot-tal $Bi = h/k_s d_p$, där h är värmeöverföringskoefficienten ($\text{W/m}^2\text{K}$), k_s är termisk konduktivitet hos det fasta bränslet (W/mK) och d_s den karaktäristiska storleken hos partikeln. Den obrända gasen i teorin för laminär flamma motsvaras vid förbränning av fast bränsle i bädd av det bränsle och den luft som kontinuerligt tillförs förbränningszonen. Ekvation (5) applicerad på den fasta bädden blir då

$$u_L = \left(\frac{k_b}{\rho_b c_{p,b}} \frac{(T_f - T_i)}{(T_i - T_0)} \frac{1}{t_b} \right)^{1/2} \quad (6)$$

där k_b , ρ_b , $c_{p,b}$ och t_b avser den fasta bädden.

Bäddstorheter

Värmeöverföringen i bädden beskrivs med en effektiv värmeöverföringskoefficient där effekten av strålning inkluderas genom $k \sim T^3$,

$$k_{eff} = 4v\sigma d_s T^3 + (1 - v)k_s \quad (7)$$

v är bäddens porositet (-) och σ är Stefan-Boltzmanns konstant ($\text{W/m}^2\text{K}^4$). Termisk konduktivitet i det fasta materialet beräknas som

$$k_s = 0.0237 + 0.0002\rho_s(1 + 2X_m/(1 - X_m)) \quad (8)$$

ρ_s är bränslets densitet (kg/m^3) och X_m dess fukttinhåll ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$). Eftersom värmeöverföring sker huvudsakligen genom strålning bör k_{eff} beräknas vid en temperatur mellan T_i och T_f .

Bäddens specifika värmekapacitet beräknas genom att vikta fast bränsle och luft

$$c_{p,b} = c_{ps}(1 - v) + c_{pl}vK_{af} \quad (9)$$

c_{ps} och c_{pl} är specifikt värme hos bränsle ($\text{J/kg}_{\text{fuel}}\text{K}$) respektive luft ($\text{J/kg}_{\text{air}}\text{K}$), och K_{af} förhållandet mellan tillförd luft och tillfört bränsle i förbränningsfronten ($\text{kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$). c_{ps} beräknas med hänsyn till bränslets fukthalt enligt

$$c_{ps} = c_{ps,df} + 4200X_m \quad (5)$$

c_{pl} och $c_{ps,df}$ ($\text{J/kg}_{\text{dryfuel}}\text{K}$) beräknas vid $(T_i + T_0)/2$ med uttrycket

$$c_{ps,df} = 4.206T - 37.7 \quad (6)$$

Antändningstemperatur och slutlig temperatur

Antändning av färskt bränsle sker genom strålning från en pilotflamma. I litteraturen anges antändningstemperaturer mellan 300 och 450 °C för organiska material. Som slutlig temperatur kan den adiabatiska temperaturen användas, här modifierad med hänsyn till värmeförluster till omgivningen

$$\sum_j \left[n_j \int_{T_0}^{T_f} c_{pj} dT \right] = H_{u,df} - H_{vap} X_m / (1 - X_m) - \sum_j n_j M_j H_{u,j} - A \sigma \varepsilon (T_f^4 - T_{wall}^4) / (A \rho_s u_L (1 - \nu)) \quad (7)$$

där n är molflödet (mol/kg_{dryfuel}) för $j = \text{O}_2, \text{N}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{CO}, \text{CO}_2, \text{H}_2, \text{C}_i\text{H}_j, \text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c$ och koks. $H_{u,df}$ är det effektiva värmevärdet för bränslet (J/kg_{dryfuel}) och $H_{u,j}$ är reaktionsvärmets hos förening j . Molflödet beräknas genom massbalansberäkning. Värmeutbytet mellan förbränningsfronten och väggen i experimentrörigen beräknas med sista termen i höger led där T_{wall} är väggtemperaturen (K) och A är bäddens tvärsnittsytan (m²). Förlusttermen är relevant i första hand då förbränningsfronten inte är täckt med koks, d.v.s. nära stökiometriska och vid överstökiometriska förhållanden.

Reaktionstid

Eftersom torkning av bränslepartikeln tar mycket energi, väljs torktiden till den relevanta reaktionstiden i (6). Torktiden beräknas på två sätt. Ekvation (8) är härledd från en värmebalans över en endimensionell platta, medan ekvation (9) är härledd från värmeöverföring till partikeln. Ekvation (9) ger, speciellt vid låga luftflöden, en längre torktid än ekvation (8).

$$t = \int_{d_s}^0 \frac{X_m}{(1 - X_m)} \rho_{s,df} (H_{vap} + \int_{T_0}^{T_s} c_{p,H_2O} dT) \frac{d_s - d_m}{4k_s (T_s - T_b)} dd_m \quad (8)$$

$$t = \frac{X_m}{(1 - X_m)} \frac{\rho_{s,df}}{4k_{s,df}} \frac{H_{m,eff} d_s^2}{(T_h - T_m)} f[X_{m0}] \quad (9)$$

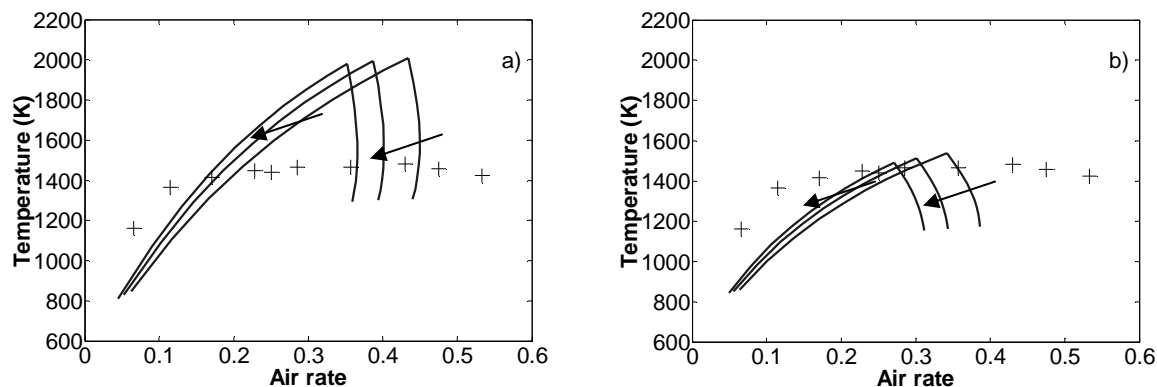
T_s är partikelns yttemperatur (K), T_b är vattnets kokpunkt (K), $\rho_{s,df}$ är densitet hos torrt bränsle (kg_{dryfuel}/m³), H_{vap} är förångningsvärmets (J/kg_{H2O}), $c_{p,H2O}$ är vattenångans specifika värme (J/kg_{H2O}K) och d_m är den fuktiga kärnans diameter. T_s beräknas vid $(T_f + T_i)/2$. $k_{s,df}$ är termisk konduktivitet hos det torra bränslet (W/mK), $H_{m,eff} = H_{vap} + c_{ps}(T_b - T_0)/X_m$, dvs förångningsvärmets plus den energi som krävs för att öka temperaturen hos den fuktiga partikeln till förångningstemperaturen. (J/kg_{H2O}). T_h är omgivningens temperatur (K). När all fukt har torkat, $f[X_m \rightarrow 0] \rightarrow (2 + Bi)/(2(N + 1)Bi)$. N är en formfaktor. Värme överförs huvudsakligen via strålning och $h_{eff} = \varepsilon \sigma (T_0^2 + T_h^2)(T_0 + T_h)$. T_h beräknas vid $(T_f + T_i)/2$.

Resultat

Beräkningar genomfördes och jämfördes med mätresultat med träcylindrar, diameter 8 mm, längd 20 mm och fukthalt 10 %. Vid beräkningarna var den karaktäristiska storleken på bränslepartikeln 8 mm, fukthalten 8, 10 och 12 % och luft-bränsleförhållandet mellan 0,2 och 2. Antändningstemperaturen T_i var 620 K och väggtemperaturen T_w var 870 K.

I Figur 20 visas beräknad och uppmätt temperatur vid olika luftflöden. I a) har förlusttermen i (7) försumrats. Vid låga luftflöden ökar både uppmätt och beräknad temperatur med ökat luftflöde. Förbränningen begränsas här av tillgången på syre. Från experimenten vet man att antändningsfronten vid låga luftflöden täcks av ett ackumulerande lager koks. Över ett visst luftflöde, i detta fall ca 0,2 kg_{luft}/m²s, kommer förbränningen istället att bli begränsad av sy-

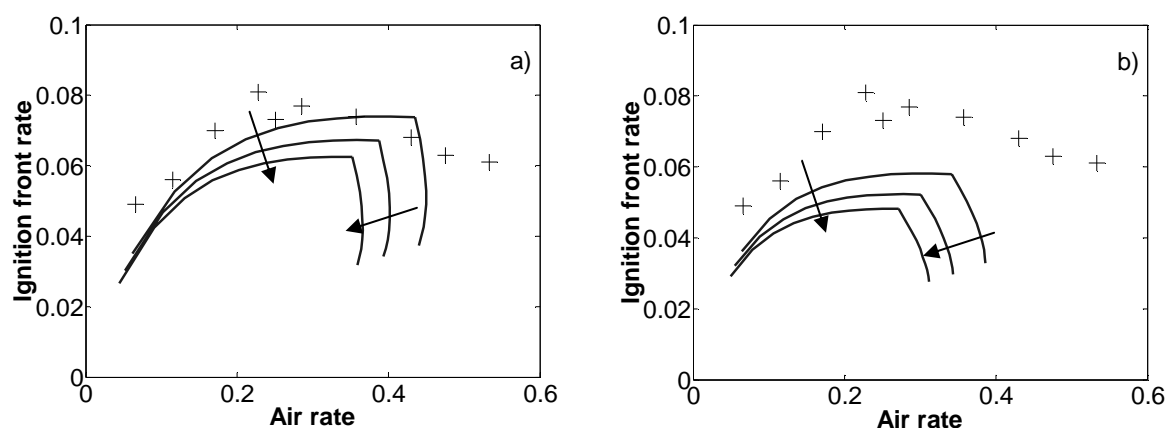
rets diffusion till brännbart material och blandningen mellan luft och brännbara gaser. Koks- lagret tunnas ut och vid ökande luftflöden blir det mycket tunt och antändningsfronten exponeras mot omgivningen. Här blir förluster till omgivningen betydelsefulla. Uppmätta temperaturer stabiliseras kring 1400 K. Beräknade temperaturer fortsätter att öka så länge luftbränsleförhållandet är lägre än ett. Vid stökiometri sjunker temperaturen och fortsätter att sjunka med ökande luftflöde.



Figur 20. Beräknad sluttemperatur T_f s.f.a. luftflöde ($\text{kg}_{\text{luft}}/\text{m}^2\text{s}$). a) Sluttemperatur beräknad utan förluster. b) Sluttemperatur beräknad med förluster. Reaktionstid enligt (8). Uppmätt (+), fukthalt 10 %. Beräkningar med fukthalterna 8, 10 och 12 %. Pilarna indikerar ökande fukthalt.

Beräkningsmodellen visar att förluster till omgivningen är viktiga men inte den enda faktorn som påverkar temperaturen i antändningsfronten. Nära och över stökiometri kommer pyrolysgaser att transporteras bort från fronten och avge sin energi nedströms fronten. I själva fronten upprätthålls temperaturen på en ganska jämn nivå av glödande koks.

Antändningshastigheten i $\text{kg}_{\text{bränsle}}/\text{m}^2\text{s}$ beräknas genom att avståndet i höjled mellan två termoelement divideras med den tid som skiljer mellan att de nått temperaturen $500\text{ }^\circ\text{C}$, och multipliceras med bäddens densitet. I Figur 21 visas beräknad och uppmätt antändningshastighet vid olika luftflöden. I a) har förlustertermen i (7) försumrats.



Figur 21. Beräknad antändningshastighet ($\text{kg}_{\text{bränsle}}/\text{m}^2\text{s}$) s.f.a. luftflöde ($\text{kg}_{\text{luft}}/\text{m}^2\text{s}$). a) Antändningshastighet beräknad utan förluster. b) Antändningshastighet beräknad med förluster. Reaktionstid enligt (8). Uppmätt (+), fukthalt 10 %. Beräkningar med fukthalterna 8, 10 och 12 %. Pilarna indikerar ökande fukthalt.

Vid låga luftflödet, där tillgången på syre begränsar förbränningen, ökar både uppmätt och beräknad antändningshastighet med ökat luftflöde. Över ca $0,2\text{ kg}_{\text{luft}}/\text{m}^2\text{s}$ kommer uppmätta

värden att sjunka något, medan beräknade fortsätter att öka ända tills luft-bränsleförhållandet är ett. Då sjunker beräknade antändningshastigheter snabbt. Beräknade antändningshastigheter är kvalitativa värden där valet av temperaturer där bäddstorheter beräknas spelar roll den absoluta nivån.

Inflytande av fukthalt syns både i Figur 20 och Figur 21. Ökad fukthalt leder till längre torktider varvid kurvorna flyttas mot lägre luftflöden. Antändningshastigheten sänks också, medan värdet på temperaturen är tämligen oförändrad, ja t.o.m. ökar något. Detta överensstämmer väl med erfarenhet från mätningar.

Experiment har visat att förändringar i bränslepartiklarnas storlek ger ett litet inflytande på temperatur i fronten och på antändningens hastighet. Beräkningar med den enkla modellen beskriven här lyckas inte återge detta, utan när diametern ökar kommer torktiden att öka och antändningshastigheten därmed att minska. Modellen tar inte hänsyn till att stora bränslepartiklar kommer att delvis torka och avgasa nedströms antändningsfronten.

Vid en förbättring av modellen bör det vara lämpligt att använda temperaturen för glödande koks som slutlig temperatur i antändningsfronten. Temperaturen kan då beräknas med en värmebalans för kokspartikeln. Modellen bör även ta hänsyn till partikelns termiska storhet, Biot-talet, så att det faktum att större partiklar inte pyrolyserar helt och hållet i antändningsfronten tas i beaktande.

Referenser

- Adams, T. N. (1980). *Combustion and Flame* 39: 225-239.
- Axell, M. (2000). "Förbränningsförlopp i en bädd av biobränsle". Lic. Eng., Dept. of Energy Technology and Energy Conversion, Chalmers University of Technology, Göteborg.
- Borman, Gary L., Ragland, Kenneth W. (1998). "Combustion Engineering. U.S.A., WCB/McGraw-Hill.
- Glassman, Irvin (1987). "Combustion. London, Academic Press.
- Horttanainen, Mika (2001). "Propagation of the ignition front against airflow in packed beds of wood particles". Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta.
- Kanury, A.M. (2002). "Flaming Ignition of Solid Fuels, Handbook of Fire Protecting Engineering, third edition, ISBN 087765-451-4.
- prCEN/TS, 15370-1 "Solid biofuels - Method for the determination of ash melting behaviour - Part 1: Characteristic temperatures method."
- Rönnbäck, M., Samuelsson, J., Tullin, C., Thunman, H., Leckner, B. (2004). "Gas composition in a fixed bed of biofuel - measurements in and above a downward propagating front." *Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion*, Victoria.
- Rönnbäck, Marie, Samuelsson, Jessica, Tullin, Claes. (2002). "Gasanalys i en brinnande bädd av biobränsle - metod och möjlighet." SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut.
- Rönnbäck, Marie, Thunman, Henrik, Tullin, Claes, Leckner, Bo (2005). "Ignition rate in fixed biofuel beds - a model based on combustion front theory." *International Flame Research Foundation Swedish -Finnish Flame Days 2005 October 18-19, Borås.*
- Rönnbäck, Marie., Leckner, Bo., Tullin, Claes., Gustavsson, Lennart., Samuelsson, Jessica (2003). "Förbränningsförlopp i en bädd av biobränsle II." Statens Energimyndighet, Borås.
- Samuelsson, J (2006). "Conversion of Nitrogen in a Fixed Burning Bed of Biofuel". Thesis of Lic. Eng., Dept. of Energy Technology and Energy Conversion, Chalmers Univ. of Tech., Göteborg, To be printed febr. 2006.
- Samuelsson, Jessica, Rönnbäck, Marie, Tullin, Claes (2003). "Omvandling av bränslekväve i en biobränslebädd - en experimentell studie." Programmet småskalig förbränning. Energi-myndigheten.
- Thunman, H., Leckner, B. (2001). "Ignition and propagation of a reaction front in cross-current bed combustion of wet biofuels." *Fuel*(80): 473-481.

Bilagor

Bilaga 1: Analyser av gaser från förbränningsprov

R A P P O R T

utfärdad av ackrediterat laboratorium/*REPORT issued by an Accredited Laboratory*

ETf
Marie Rönnbäck

Handläggare, enhet / <i>Handled by, department</i>	Datum / <i>Date</i>	Beteckning / <i>Reference</i>	Sida / <i>Page</i>
K. Pointet, Kemi och Materialteknik, gs 033 16 57 28, Karine.Pointet@sp.se	2003-09-03	KMo I3:17	1 (4)

Analyser av gaser från förbränningsprov

Provföremål och uppdrag

Tenaxrör och Tedlarpåsar från en provserie vilka önskades analyserade med avseende på permanenta gaser, lätta kolväten och VOC.

Provtagningen är utförd av uppdragsgivaren. Proven ankom laboratoriet 2003-08-12 t o m 2003-08-19. Analysen av tenaxrören och påsarna utfördes 2003-08-13 t o m 2003-08-20. Proverna märktes av uppdragsgivaren.

Metod

Adsorbentrören har desorberats termiskt och analyserats i princip enligt SP-metoden 0601. Denna innebär i korthet gaskromatografisk analys med flamjonisationsdetektor och masselektiv detektor (GC-FID och GC-MS). Enskilda ämnen har identifierats med masspektrometer.

Gaser ur Tedlarpåsar har analyserats på gaskromatograf (GC) med en Molecular Sieve 5A som kolonn, argon som bärgas och en TCD-detektor för permanenta gaser och en Poraplot kolonn och FID-detektor för lätta kolväten.

Resultat

Permanent gaser och lätta kolväten

Provningsdatum	Prov	Vätgas %	Syrgas %	Kvävgas %	Metan %	Eten ppm	Etan ppm	Bensen ppm
2003-08-12	påse 1	16,5	1,0	50,5	2,0			
	påse 2	15,5	1,0	56,0	1,5	1600	100	200
	påse 3	11,0	2,0	58,5	1,0			
2003-08-13	påse 1	10,5	2,0	55,0	1,0			
	påse 2	15,0	1,5	49,5	1,5	4400	500	300
	påse 3	15,5	1,0	55,0	1,5			
2003-08-14	påse 1	6,5	4,0	59,0	2,5			
	påse 2	15,0	1,5	48,5	4,0	10500	2500	300
	påse 3	19,0	1,5	43,0	3,0	7350	500	250
2003-08-15	påse 1	11,5	4,0	63,0	1,5			
	påse 2	16,5	1,0	49,0	2,5	3360	250	330
	påse 3	18,0	1,0	47,5	2,5	3000	350	320
2003-08-18 dag	påse 1	10,5	1,0	56,5	1,0			
	påse 2	10,5	1,0	58,0	1,0	150	-	210
	påse 3	10,0	2,0	58,5	1,0	110	-	130
2003-08-18 kväll	påse 1	8,5	2,0	57,0	0,5			
	påse 2	11,5	1,5	49,5	1,0	1400	-	400
	påse 3	11,5	2,5	53,5	1,0	1400	-	350

Resultat av GCFID analysen av gaser redovisas i bilagorna 1-6. Andra toppar som identifierats är acetylen, propen, propyn, propadien, butadien, cyclopentadien.

Tyngre kolväten

Resultat av GCMS analysen av gaser samlade på tenaxrören (samt backup rören) redovisas i bilagorna 7-12.

Prov	Dominerande ämnen	Koncentration, toluenekvivalent mg/m ³	Andra ämnen	Backup rör
12/08/03	Totalemission (TVOC), Varav dominerar: bensen toluen	1200 670 320	xylene, phenyletyn, styren, PAHs	butadien, propen, propyn, propadien
13/08/03	Totalemission (TVOC), Varav dominerar: bensen toluen	1330 1060 230	butadien, cyclopentadien xylene, phenyletyn, styren, furan, propadien, pentadien	butadien, propen, propyn, propadien
14/08/03	Totalemission (TVOC), Varav dominerar: bensen, toluen, furan, aceton, cyclopentadien	10520 1450 1200	xylene, styren, PAHs, butanone, butenone, fenol, metylfenol, dibenzofuran	butadien, buten, levoglucosan
15/08/03*	Totalemission (TVOC), Varav dominerar: bensen toluen	1480 1170 260	butadien, cyclopentadien, phenyletyn, styren, butenone, metylfuran	butadien, propen, propyn, propadien
18/08/03 dag	Totalemission (TVOC), Varav dominerar: bensen	1420 1320	toluen, phenyletyn, styren, PAHs, furfural, butanone	propadien, butenyne, butadiyn
18/08/03 kväll	Totalemission (TVOC), Varav dominerar: bensen	1660 1460	toluen, phenyletyn, styren, PAHs, butenyn, butadiyn, cyclopentadien	propadien, bensen

* från påse 2 till tenax

Kommentar

Resultaten av bensen analyserade på inlämnade tenaxrör stämmer bra med bensen analyserade direkt ur påsar.

SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut Organisk analytisk kemi

Conny Haraldsson
Tekniskt ansvarig

Karine Pointet
Teknisk handläggare

Bilagor

1. Gaskromatogram, gasprov från påse 2, 12/08/03
2. Gaskromatogram, gasprov från påse 2, 13/08/03
3. Gaskromatogram, gasprov från påse 2, 14/08/03
4. Gaskromatogram, gasprov från påse 2, 15/08/03
5. Gaskromatogram, gasprov från påse 2, 18/08/03 dag
6. Gaskromatogram, gasprov från påse 2, 18/08/03 kväll
7. Gaskromatogram, gasprov insamlad på tenaxrör, 12/08/03
8. Gaskromatogram, gasprov insamlad på tenaxrör, 13/08/03
9. Gaskromatogram, gasprov insamlad på tenaxrör, 14/08/03
10. Gaskromatogram, gasprov insamlad på tenaxrör, 15/08/03
11. Gaskromatogram, gasprov insamlad på tenaxrör, 18/08/03 dag
12. Gaskromatogram, gasprov insamlad på tenaxrör, 18/08/03 kväll

Bilaga 2: Korrigerade halter av kvävgas och vätgas

Påsarna som användes var speciellt avsedda för gasprovtagning och extremt täta, men ett litet inläckage av lust skedde ändå mellan provtagning och analys. I Tabell B 1 visas halter av kväv- och vätgas från påsprövs (H₂ och N₂) och korrigerade med hänsyn till inläckage av syre (H_{2,korr} och N_{2,korr}), beräknat med

$$N_{2,korr} = N_2 + (N_2 - 79)(O_2/21 - O_2)$$

$$H_{2,korr} = H_2(1 + O_2/(21 - O_2))$$

där O₂ är syrehalt uppmätt i påsen. Korrigeringarna är för H₂ < 1,6 % (med ett undantag) och för N₂ < 2,5 % (med tre undantag).

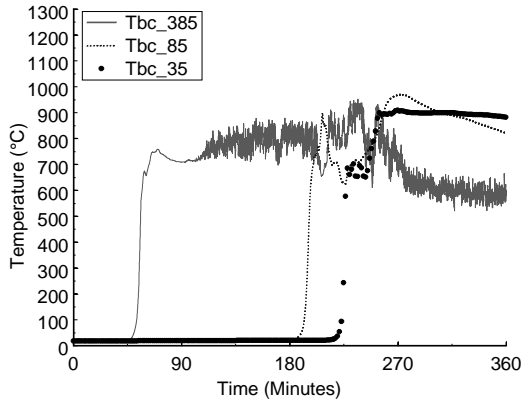
Tabell B 1. Halter uppmätta i påsprövs (H₂ och N₂) och korrigerade med hänsyn till inläckage av syre (H_{2,korr} och N_{2,korr}).

Primärluftsflöde (kg/m ² s)	Prov	Syrgas (%)	I påse			I påse		
			H ₂ (%)	H _{2,korr} (%)	Korrigerat med H ₂ -H _{2,korr} (%)	N ₂ (%)	N _{2,korr} (%)	Korrigerat med N ₂ -N _{2,korr} (%)
0,09	påse 1	1,00	16,50	17,33	0,82	50,50	49,08	-1,43
	påse 2	1	15,5	16,28	0,78	56	54,85	-1,15
	påse 3	2	11	12,16	1,16	58,5	56,34	-2,16
0,18	påse 1	2	10,5	11,61	1,11	55	52,47	-2,53
	påse 2	1,5	15	16,15	1,15	49,5	47,23	-2,27
	påse 3	1	15,5	16,28	0,78	55	53,80	-1,20
0,045	påse 1	4	6,5	8,03	1,53	59	54,29	-4,71
	påse 2	1,5	15	16,15	1,15	48,5	46,15	-2,35
	påse 3	1,5	19	20,46	1,46	43	40,23	-2,77
0,09	påse 1	4	11,5	14,21	2,71	63	59,24	-3,76
	påse 2	1	16,5	17,33	0,82	49	47,50	-1,50
	påse 3	1	18	18,90	0,90	47,5	45,93	-1,58
0,39	påse 1	1	10,5	11,03	0,53	56,5	55,38	-1,13
	påse 2	1	10,5	11,03	0,53	58	56,95	-1,05
	påse 3	2	10	11,05	1,05	58,5	56,34	-2,16
0,27	påse 1	2	8,5	9,39	0,89	57	54,68	-2,32
	påse 2	1,5	11,5	12,38	0,88	49,5	47,23	-2,27
	påse 3	2,5	11,5	13,05	1,55	53,5	50,05	-3,45

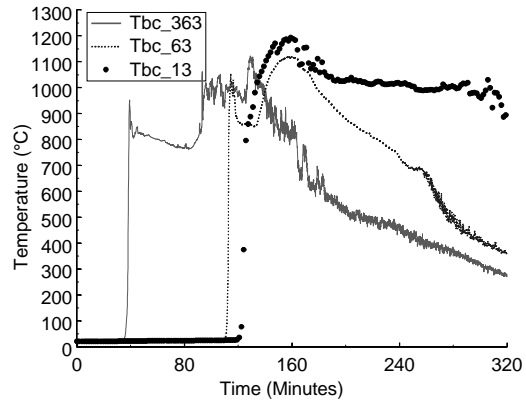
Bilaga 3: Uppmätta temperaturer

Figur B 1 - Figur B 6 visar uppmätta temperaturer i centrum av bränslebädden. Tbc_385 visar att termoelementet är placerat 385 mm över rosten osv. Ursprunglig bäddhöjd är i alla fall cirka 400 mm. Snabba fluktuationer i temperaturen, exempelvis för Tbc_385 i Figur B 1 orsakas av störningar i mätsystemet. I Figur B 3 sjunker temperaturen för Tbc_340 därför att elementet tillfälligt tas ut.

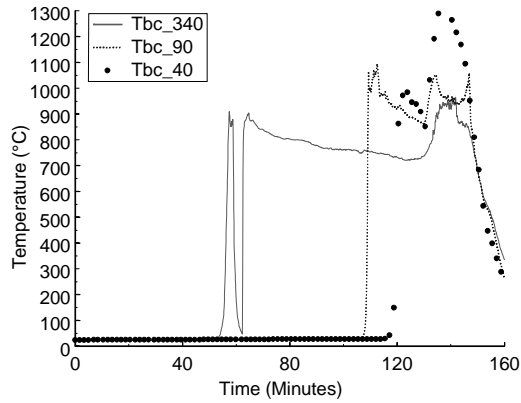
När antändningsfronten når ett termoelement stiger temperatur snabbt till ett högsta värde, eftersom energiutvecklingen blir hög där tillgången på syre är god termoelementet kommer sedan, beroende på luftflödets storlek, att ligga i ett kokslager nedströms fronten, där temperaturen sjunker pga förgasningsreaktioner och/eller fortsatt avgasning. När kokslagret sjunkit under termoelementet och detta exponeras mot riggens och rökrörets innerväggar sjunker dess temperatur ytterligare. När allt bränsle är övertänt återstår ett lager koks på rosten. Temperaturen höjs i gasströmmen då koksen slutförbränns. Då primärluftsflödet ökar kommer temperaturen i fronten att öka, kokslagret blir tunnare, hela förloppet kortare och slutförbränningsfasen kortare.



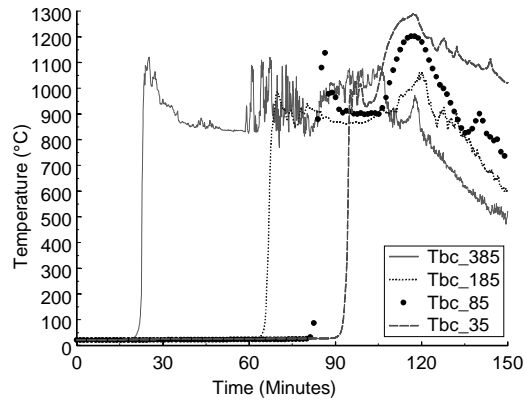
Figur B 1. Primärluftsflyde 0,045 (kg/m²s). Temperaturer 35, 85 och 385 mm över rosten.



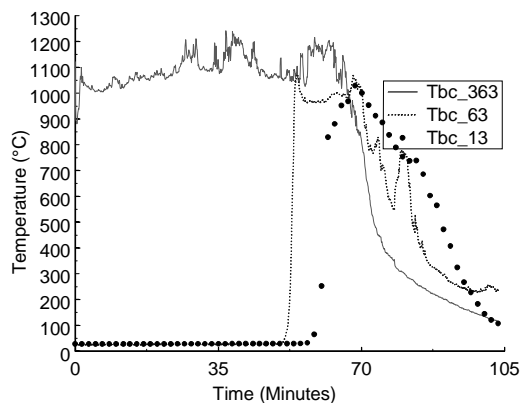
Figur B 2. Primärluftsflyde 0,09 (kg/m²s). Temperaturer 13, 63 och 363 mm över rosten.



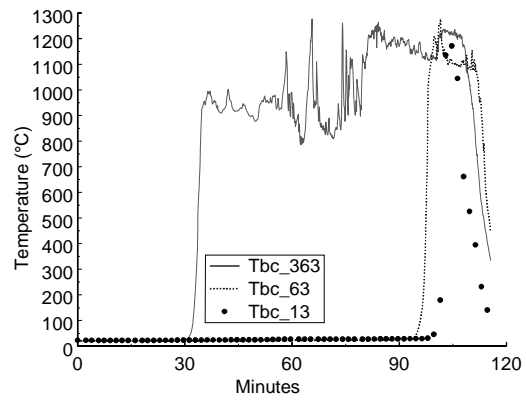
Figur B 3. Primärluftsflyde 0,09 (kg/m²s). Temperaturer 40, 90 och 340 mm över rosten.



Figur B 4. Primärluftsflyde 0,18 (kg/m²s). Temperaturer 35, 85, 185 och 385 mm över rosten.



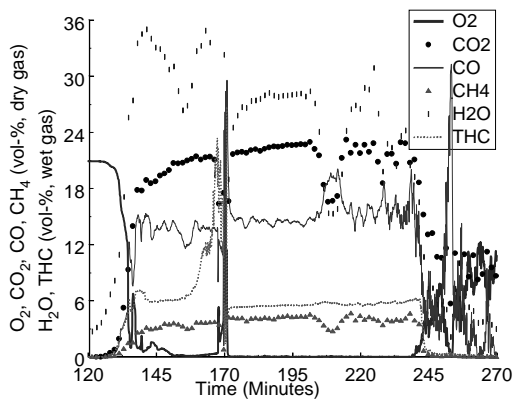
Figur B 5. Primärluftsflyde 0,27 (kg/m²s). Temperaturer 13, 63 och 363 mm över rosten.



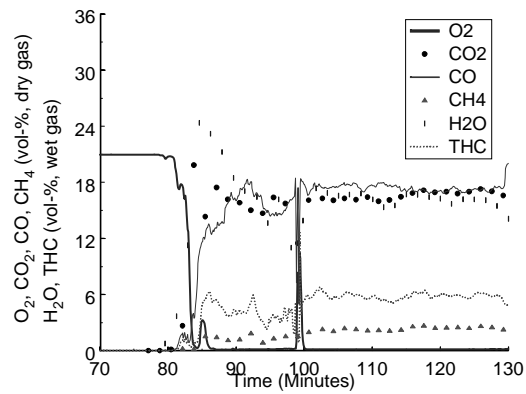
Figur B 6. Primärluftsflyde 0,39 (kg/m²s). Temperaturer 13, 63 och 363 mm över rosten.

Bilaga 4: Kontinuerligt mätta gaskoncentrationer

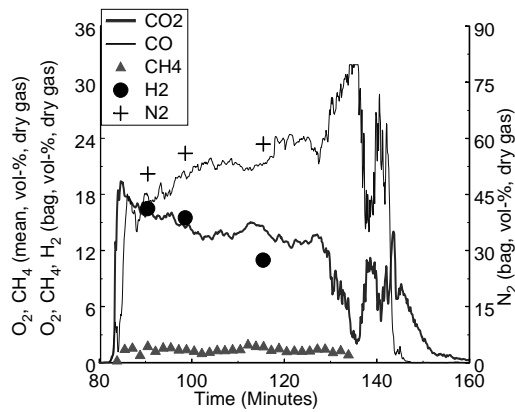
Figur B 7 - Figur B 12 visar uppmätta gaskoncentrationer. Gassonden är placerad mellan 235 till 240 mm över rosten och bäddens höjd är från start cirka 400 mm. O₂, CO₂, CO och CH₄ är uppmätta i torkad gas. H₂O och THC är uppmätta i fuktig, utspädd gas och omräknade till fuktig, ej utspädd gas. Korta spikar där syrehalten ökar och övriga gaser minskar orsakas av att gassonden tillfälligt satt igen. Den renblåses då med tryckluft.



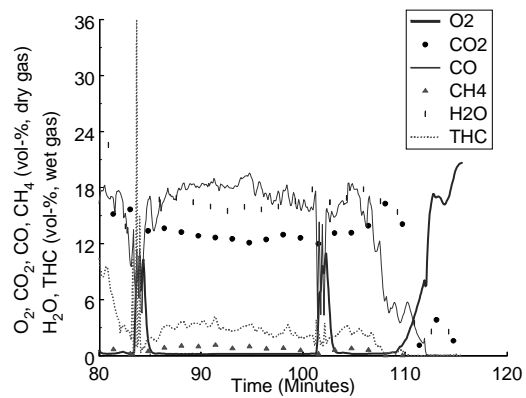
Figur B 7. Primärluftsflöde 0,045 (kg/m²s).



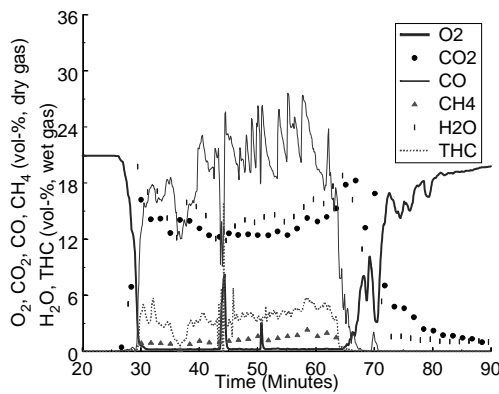
Figur B 8. Primärluftsflöde 0,09 (kg/m²s).



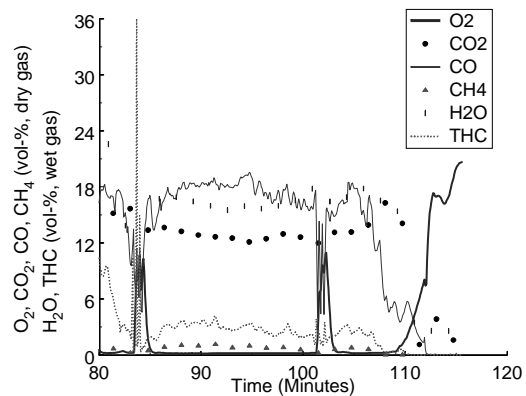
Figur B 9. Primärluftsflöde 0,09 (kg/m²s).



Figur B 10. Primärluftsflöde 0,18 (kg/m²s).



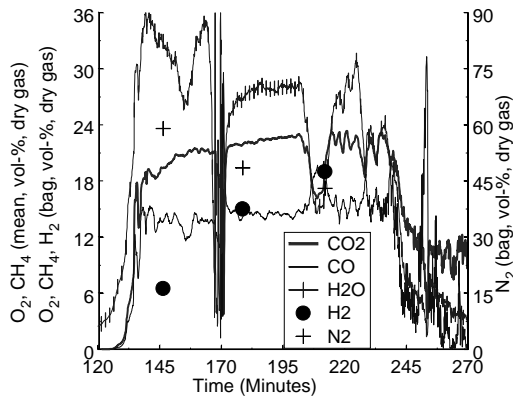
Figur B 11. Primärluftsflöde 0,27 (kg/m²s).



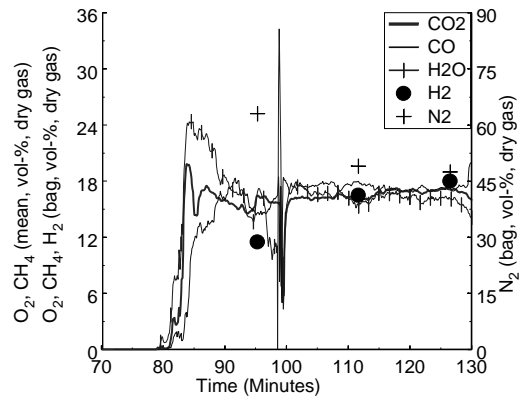
Figur B 12. Primärluftsflöde 0,27 (kg/m²s).

Bilaga 5: Uppmätta kvävgas- och vätgashalter

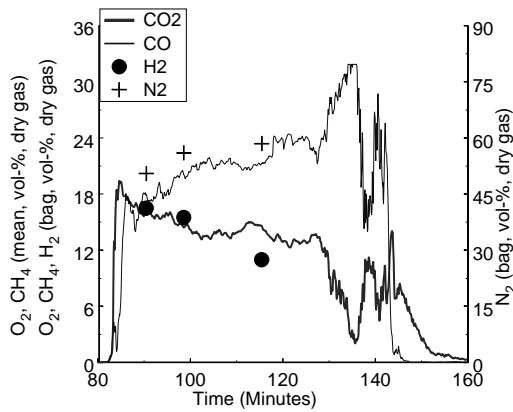
Figur B 13 - Figur B 18 visar med påsprov uppmätta kvävgas- och vätgashalter tillsammans med CO₂, CO och H₂O. Mätning av kvävgas och vätgas skedde genom att bäddgas samlades upp i en påse under stationära faser av avgasning. Vid varje experiment fylldes tre påsar, och insamlingstiden för varje påse var cirka 5 minuter. Insamlad gas analyserades med en gaskromatograf och resultatet ger medelvärde för kväve och väte under insamlingstiden. Analysen gav även halten av syre och av metan, och i vissa fall av eten, etan och bensen. Analysresultaten återfinns i sin helhet i Bilaga 1: Analyser av gaser från förbränningsprov. Att uppmätt syrgashalt i påsarna genomgående är större än noll tolkas som om ett litet inläckage av lust har skett till påsen. Därför räknas halterna om i massbalanserna, med antagandet att syrehalten i utsugen gas är noll, se Bilaga 2: Korrigerade halter av kvävgas och vätgas. Efter omräkning är de ursprungliga vätgashalterna mellan 0,53 till 1,53 % högre än vad påsprovet visar (med ett undantag på 2,7 %), och ursprungliga kvävgashalter är 1,05 till 3,76 % lägre (med ett undantag på 4,71 %).



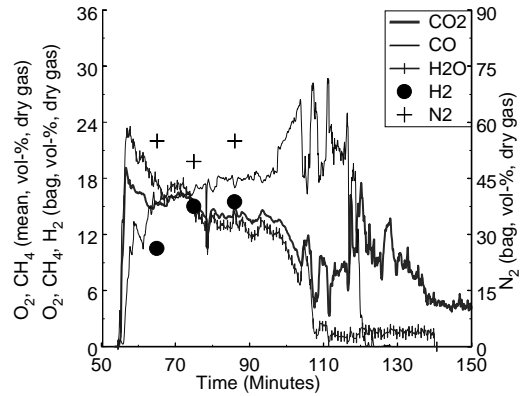
Figur B 13. Primärluftsflöde 0,045 (kg/m²s).



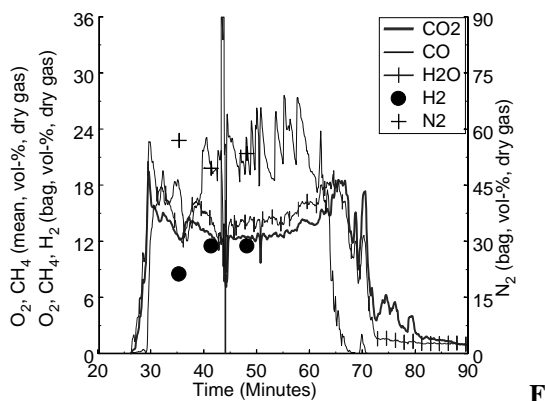
Figur B 14. Primärluftsflöde 0,09 (kg/m²s).



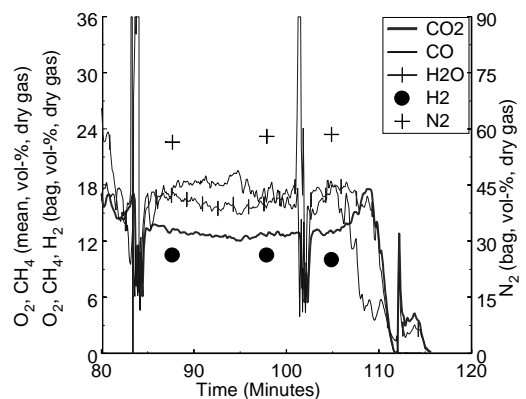
Figur B 15. Primärluftsflöde 0,09 (kg/m²s).



Figur B 16. Primärluftsflöde 0,18 (kg/m²s).



Figur B 17. Primärluftsflöde 0,27 (kg/m²s).



Figur B 18. Primärluftsflöde 0,39 (kg/m²s).

Bilaga Bidrag under projektet

Rapporter/konferensbidrag som har skrivits under projektets gång

1. Axell, M., Rönnbäck, M., Gustavsson, L., Persson, H., Leckner, B., (1988). *A test rig for studies of Combustion processes in a biomass fuel bed*, Exposé over förbränningsforskningen i Sverige, Chalmers Tekniska Högskola, 21-22 oktober Göteborg.
2. Axell, M. (2000). *Förbränningsförlopp i en bädd av biobränsle*. Licentiatrapport vid Institutionen för Energiteknik, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.
3. Axell, M., Rönnbäck, M., Gustavsson, L., Thunman, H., Leckner, B., (2000). *Combustion processes in a biomass fuel bed - Experimental results of the influence of air-flow and of particle size and density*, Nordic Seminar on Small Scale Wood Combustion, 17-18/2, Nådendal.
4. Energimyndighetens programkonferens inom programmet *Småskalig förbränning av biobränsle* i Lund, 30-31 augusti 2000.
5. Rönnbäck, M., Axell, M., Gustavsson, L., Thunman, H., Leckner, B., (2000). *Combustion processes in a biomass fuel bed - Experimental results*, Progress in Thermochemical Biomass Conversion, Tyrol.
6. Rönnbäck, M., Axell, M., Gustavsson, L., Thunman, H., Leckner, B., (2001). *Combustion processes in a biomass fuel bed - experimental results*, The Scandinavian-Nordic Section of the Combustion Institute, Göteborg.
7. Rönnbäck, M., Samuelsson, J., Tullin, C. (2002). *Gasanalys i en brinnande bädd av biobränsle - metod och möjlighet*, SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, 2002:28.
8. Thunman, H., Rönnbäck, M., Samuelsson, J., Leckner, B. (2002). *Combustion of bio-fuels in a fixed bed - a comparison between model and measurement*, Nordic Seminar - Thermochemical Conversion of Biofuels 12 November 2002, Trondheim.
9. Lindau, J., Rönnbäck, M., Samuelsson, J., Thunman, H., Leckner, B., (2002). *An estimation of the spatial resolution when measuring gas concentrations inside a converting fuel bed*, Nordic Seminar - Thermochemical Conversion of Biofuels 12 November 2002, Trondheim.
10. Energimyndighetens programkonferens inom programmet *Småskalig förbränning av biobränsle* i Lund, 30-31 augusti 2000, och i Växjö 20-21 januari 2003.
11. Rönnbäck, M., Leckner, B., Tullin, C., Gustavsson, L., Samuelsson, J. (2003). *Förbränningsförlopp i en bädd av biobränsle II*. Statens Energimyndighet, Borås.

-
12. Rönnbäck, M., Tullin, C., Samuelsson, J., Leckner, B., Thunman, B. (2003). *Extractive gas analysis from a burning fixed biofuel bed - method and measurements*. Scandinavian-Nordic and Italian sections of the Combustion Institute, Napoli.
 13. Rönnbäck, M., Samuelsson, J., Tullin, C., Thunman, H., Leckner, B., (2004). *Gas composition in a fixed bed of biofuel – measurements in and above a downward propagating front*. Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion, Victoria, Canada BC.
 14. Rönnbäck, M., Thunman, H., Tullin, C., Leckner, B. (2005). *Ignition rate in fixed biofuel beds – a model based on combustion front theory*. International Flame Research Foundation Swedish -Finnish Flame Days 2005 October 18-19, Borås

15. Extractive gas analysis from a burning fixed biofuel bed – method and measurements

¹M. Rönnbäck, ¹C. Tullin, ¹J. Samuelsson, ²B. Leckner, ²H. Thunman

*¹SP Swedish National Testing and Research Institute, P.O. Box 857,
SE - 501 15 Borås, SWEDEN*

*²Department of Energy Conversion, Chalmers University of Technology,
SE - 412 96 Göteborg, SWEDEN*

ABSTRACT

An experimental rig was built to investigate countercurrent combustion under well-defined conditions. Measurements were performed with extractive gas analysis from inside a burning fixed bed of biofuel in this rig. A number of species concentrations were measured, together with mass change and airflow. A gas suction probe was designed and a method was developed to achieve good accuracy and high spatial resolution of the ignition front transient. The influence of primary airflow, fuel particle size and moisture content on ignition and combustion rate, the length of the devolatilisation and char combustion phases, the maximum front temperature and temperatures and concentrations leaving the bed was investigated.

INTRODUCTION

Biofuels are recognized as a potential for energy production, provided that requirements of high efficiency and low emissions can be met. Variations in fuel quality (particle size, fuel density and moisture content, etc.) leads to design and control strategies that are different from those used for solid, low volatile fuels and liquid or gaseous fuels. This work deals with the fixed fuel bed, found in various types of grate-fired combustors. The ignition rate of the bed, the division into devolatilisation and char combustion/gasification and a possible reduction zone is important in order to estimate the power generated, for the design of the grate or for the control strategy, and may be crucial for the nitrogen chemistry. The gases leaving the bed (concentrations and temperature) constitute the boundary condition for the gas combustion downstream of the bed.

The objective of this investigation is to measure temperature and gas composition within a burning fixed biofuel bed and to improve the knowledge on how the combustion process is influenced by the primary airflow and by the size and moisture content of the fuel particles. Special care has been taken to perform the measurements in such a way that the results can be used for comparison with mathematical models.

EXPERIMENTAL CONDITIONS

An experimental rig, shown in *Fig 1*, for batch-fired combustion has been constructed to investigate the influence of different parameters. The fuel bed is ignited at the top and the ignition front moves downwards, (countercurrent combustion: the direction of the airflow is opposite to the direction of the ignition front). The rig is prolonged with a smoke pipe and secondary air is supplied in its end to prevent backmixing of air. To fulfill the requirements of well-defined start- and boundary conditions for the fixed bed and a one-dimensional combustion process, the rig has a well-insulated, light construction (to prevent the temperature to drop at the walls) and a high pressure drop over the grate (to provide an even air velocity pro-

file). Fuels chosen for the experiments are homogenous in size and content. The rig is easily accessible for different equipment such as suction probe and thermocouples, and it is equipped with sight glasses to visually study the combustion process.

Probe for extractive gas analysis

Extractive gas analysis from a burning packed bed requires equipment that can withstand the hot and dirty environment at the same time as the extracted hot gas must be cooled quickly to freeze the chemical reactions. The extracted gas flow must be small enough to give an accurate representation of the concentration profile inside the bed with sufficient spatial resolution, and the extracted gas must be cleaned, diluted, transported and temperature controlled. To this aim, a gas extraction probe was designed. The probe is cooled with silicon oil at a temperature of 190 °C. It is inserted into the bed from the side to minimize influence on the ignition front.

A number of gas compounds, given in *Table 1*, were measured continuously. Temperatures were measured upstream of the grate, inside the fuel bed and downstream of the bed, together with the primary air and the weight change during combustion. Extracted gas was diluted to be within the measurement range of all instruments and to protect some of them from fouling.

Method

To achieve good accuracy and high time and space resolution in each experiment a method has been developed, which among other things includes choice of volume flow through the probe, dilution of the gas and adaption of the experiment to the combustion situation. The resolution in time and space with the existing equipment was analysed. The weakest link proved to be the spatial resolution of the gas sampling in the bed, which is limited by the gas flow required for analysis, and by the inner diameter of the probe.

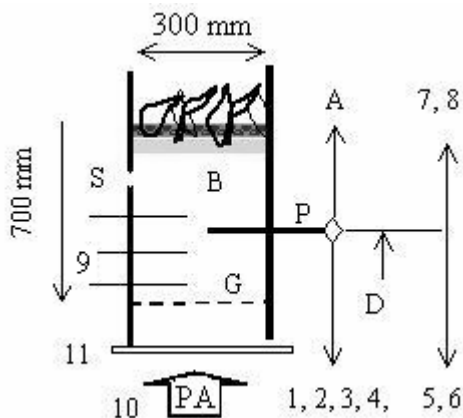


Fig. 1 Experimental set-up. Absorption line A, fuel bed B, dilution device D, grate G, suction probe P, primary air PA, and sight glasses S. Measurement devices 1-11 are given in Table 1.

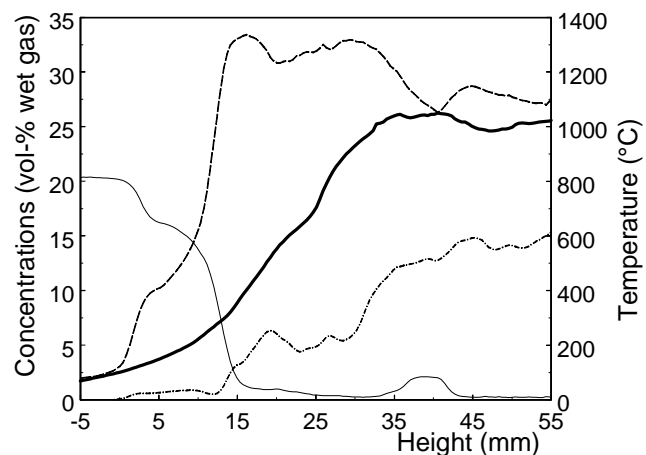


Fig. 2 Gas concentrations, oxygen (thin solid line), combustible products (dashed line) and combustible gases (dashed dotted line), and temperature (thick solid line) versus height in reaction front. Bark pellets, diameter 8 mm, length 20 mm with 9 % moisture, airflow 0.15-0.18 kg/m²s. The start of oxygen consumption in the front corresponds to zero mm.

Table 1 Measurement equipment. Numbers in left column refer to Fig. 1.

No	Measured compound	Measuring range	Gas treatment	Type of instrument
1	CO ₂	0 – 20 vol-%	Dried, room temperature	NDIR
2	O ₂	0 – 100 vol-%	Dried, room temperature	Paramagnetic
3	CO	0 – 30 vol-%	Dried, room temperature	NDIR
4	CH ₄	0 – 10 vol%	Dried, room temperature	NDIR
5	O ₂	0 – 100 vol-%	Dried, diluted, room temperature	Paramagnetic
6	NO, NO ₂ , NO _x	0 - 10 000 ppm	Dried, diluted, room temperature	Chemiluminescence
7	H ₂ O, NH ₃ , HCN	Calibrated for actual compound	Not dried, diluted, 190 °C	FTIR
8	THC	1-100 000 ppm	Not dried, diluted, 190 °C	FID
9	Temperatures			Thermocouples N and K
10	Weight change			Balance
11	Airflow			Pitot-tube

RESULTS FROM MEASUREMENTS

An example of concentration and temperature profiles in the ignition front is shown in *Fig. 2*. Ignition starts with drying of the particle, water vapor dilutes the air and the temperature rises. Ignition of devolatilised gases and of char surfaces follows rapidly, combustible products (water vapor and carbon dioxide) increase and the temperature rises to a peak by the heat produced by gas combustion (not so pronounced in *Fig. 2*). When the oxygen is more or less consumed, combustible gases (carbon monoxide and hydro carbons) increase. The temperature falls, approaching the surface temperature of the converting char. Heat excess is used for gasification reactions, which together with the water gas-shift reaction decreases the concentrations of carbon dioxide and water vapor, and increases the concentrations of carbon monoxide and hydrogen (the latter not measured).

Results from measurements performed with fuels of different densities and sizes are presented in *Fig. 3* together with earlier measurements [1]. Also rods (34×34×100 mm³) with different moisture contents (10, 16 and 28 %) were investigated. For detailed results see [2].

The influence of primary airflow can be described by dividing the combustion into regimes (as also done by others, for example [3]). At lower airflows the conversion is limited by the oxygen supply. Ignition rates and temperatures are low, all available oxygen is consumed, and a layer of char is accumulated downstream of the ignition front. Remaining char is burned in a final char combustion phase. At these low airflows, a relatively small increase in oxygen supply causes a relatively large increase in ignition rate and temperature. At a somewhat higher airflow the ignition rates and temperatures are stabilized. The conversion of char is faster, and the char layer maintains a constant height. All oxygen is still consumed, and a sub-stoichiometric gas with high temperature is produced. Maximum ignition rate and maximum temperature in the front are found in this regime. At still higher airflows, the ignition rate and measured temperature are somewhat lowered, and excess oxygen passes through the bed.

The maximum front temperature is not affected by increased moisture content, which is also shown by [3] and [4], but the ignition rate is decreased and the combustion regimes are narrower (with respect to airflow).

Combustion of char is a heterogeneous process limited by diffusion of oxygen to the particle's surface. Therefore the size of the char particles has a great influence on the combustion time. With highly volatile fuels, such as biofuels, the devolatilization time is a limiting factor. Even if the devolatilization time increases with the increase in particle size, the ignition front is spread along the surfaces of the large particles and the width of ignition front becomes wider.

It is noted that measured ignition rates and temperatures at lower airflows are more scattered when the particle size is increased, and that the transition to an over-stoichiometric regime requires higher airflow.

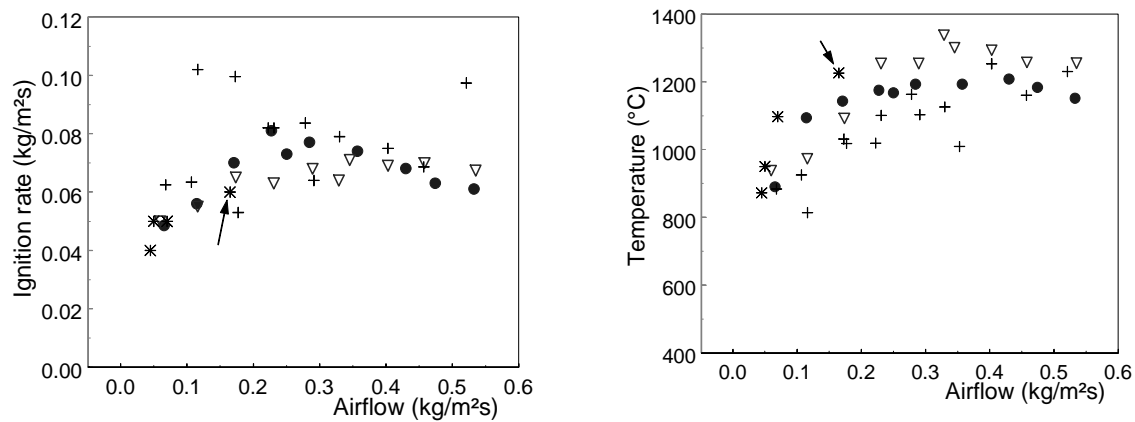


Fig. 3 Ignition rate (kg ignited fuel per m^2 cross sectional area of the bed and second) and maximum temperature in the ignition front versus airflow. Solid wood cylinders $d 8 \times l 20$, bed density $279 \text{ kg}_{dry}/m^3$ (\bullet), wood pellet $d 8 \times l 20$, bed density $593 \text{ kg}_{dry}/m^3$ (∇), bark pellet $d 8 \times l 20$, bed density $540 \text{ kg}_{dry}/m^3$ (*), wood cylinders $d 34 \times l 100$, bed density $258 \text{ kg}_{dry}/m^3$ (+), all dimensions in mm. Moisture content all fuels 9 – 10 %. The case shown in Fig. 2 is marked with an arrow.

FURTHER WORK

To measure inside a burning fuel bed with high resolution in time and space is a complicated and demanding task. The results produced fulfilled partly the requirements, partly not. The measured gas concentrations had good accuracy and high resolution in time and space, but the reaction front was often wrinkled or channeled. To facilitate a one-dimensional combustion process an electrical heater will be used to initiate a more even ignition on the bed surface. The thermocouples sometimes moved in the bed, and will be more firmly hold by ceramic tubes. Future measurements will also be improved by some reconstruction of the rig (to avoid an unfortunate air leakage). A more accurate balance will be used, and the change in bed height will be measured during combustion. To make possible a computation of an accurate mass balance, measurements of hydrogen and nitrogen will be added (using a gas chromatograph). Also the content of the unconverted char and of the tars condensing in the probe will be better known by taking of specimens. The volatile part of the hydrocarbons will be better known by adding a flame ionization detector to the dried, diluted gas line.

REFERENCES

- 1 Rönnbäck, M., Axell, M., Gustavsson, L., Thunman, H., Leckner, B.: *Progress in Thermochemical Biomass Conversion*, Tyrol, Austria, Sept., vol. 1 p. 743 (2000).
- 2 Rönnbäck, M., Leckner, B., Tullin, C., Gustavsson, L., Samuelsson, J.: *Förbränningsförlopp i en bädd av biobränsle II*. Statens Energimyndighet, Stockholm, (2003).
- 3 Gort, R.: *On The Propagation of a Reaction Front in a Packed Bed*. Enschede, Universiteit Twente, Enschede (1995).
- 4 Horttanainen, M., Saastamoinen, J., Sarkomaa, P.: *Energy & Fuels*, **16**: 676-686. (2002).

Gas composition in a fixed bed of biofuel – measurements in and above a downward propagating front

M. Rönnbäck, J. Samuelsson, C. Tullin

*SP Swedish National Testing and Research Institute, P.O. Box 857
SE-501 15 Borås, Sweden*

H. Thunman, B. Leckner

Department of Energy Conversion, Chalmers University of Technology SE-412 96 Göteborg, Sweden

ABSTRACT: The conditions inside and above a conversion front, propagating against the air flow, have been investigated in a fixed bed of biofuel. The aim of the work is to describe temperatures and gas concentrations in the bed and to obtain data with high accuracy and with a resolution in space and time that is high enough to be useful for validation of mathematical models. To close mass balances of the main species, (C, H, O, N), O₂, CO, CO₂, N₂, H₂, H₂O and hydrocarbons were measured, and samples of char and tar were analysed. For gas extraction an oil-cooled probe was used. The experimental rig was developed to achieve well-defined, one-dimensional, conditions. The measurements show the different episodes in the conversion front: initial heating by radiation, drying, release of volatiles, ignition and heat release, production of combustion products, depletion of oxygen followed by gasification reactions. During the stable devolatilisation phase a system of equations, based on concentrations measured by continuous gas analysis and mass balances, yields the content of tars, nitrogen and hydrogen (concentrations commonly not measured on-line).

Introduction

This work covers aspects of both combustors and gas generators. It investigates a fuel bed where the conversion propagates counter-current to the combustion air. Several research groups, using batch-fired rigs, have investigated this type of fixed bed. An early work [1] on the effect of under-fire air on ignition and combustion rates pointed at the influence of fuel and bed properties and of gasification reactions. A similar investigation [2] with air distributed at different heights in the bed, focused on combustion efficiency and the importance of mixing. The propagation of the conversion front has been studied both experimentally and theoretically, [3](prCEN/TS och 15370-1), [4], [5] and [6], and combustion was divided into different regimes. The speed of the ignition front is an important factor determining the release of volatiles, the power and stability [7] in combustion as well as in gasification [8]. Although already early investigators [1] had problems with channelling inside the bed and at the walls, the fixed bed has commonly been regarded as approximately one-dimensional and homogeneous. As the knowledge of the combustion processes in the bed has increased, attention has been paid to channelling [9].

The fixed bed has been modelled as a one-dimensional, continuous two-phase system, e.g. by [3], [4], [6] and [10]. The gas velocity is usually given and assumed constant because the influence of pressure gradients and resistance is considered negligible. Some models include individual particles described by empirical relations, [11] while other models treat the intrinsic particle behaviour, [12] and [13]. Better measurement data to validate and develop these models are frequently requested.

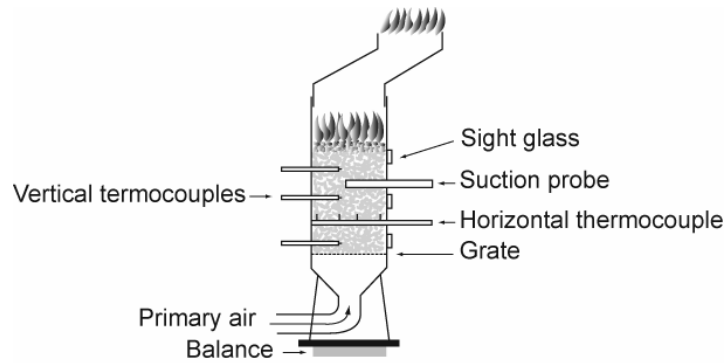


Fig. 1 Experimental rig.

The most common method for gas analysis has been to extract gas downstream of the bed to get at the overall conversion of the bed. The aim of the present work, on the other hand, is to measure temperature and gas composition within the burning fixed biofuel bed with high resolution in space and time to improve the understanding of the processes in the bed, and to obtain a basis for validation of mathematical models. The measurements also allow evaluation of gas composition by mass balance calculation; all major species were measured. The closure of a mass balance creates opportunities to investigate the local conditions inside the fixed bed, such as the local flow velocity.

Experimental Equipment and procedure

The experiments were performed in a batch-fired experimental rig having an inner cross-section of $0.3 \times 0.3 \text{ m}^2$ and height of 0.7 m, shown in Figure 1. To achieve a one-dimensional ignition process, the fuel is ignited at the top by radiation from electrical coils mounted on a plate above the fuel bed. After ignition, the plate is removed and a conversion front moves downward, counter-current to the air flow. To accomplish a one-dimensional combustion process the rig has a well-insulated, light construction, preventing the temperature to drop at the walls, and a high-pressure drop over the grate, made of a ceramic board, to provide an even cross-sectional air velocity profile.

Several sampling ports and windows are located on the furnace walls to allow measurement of local conditions, such as temperature and gas composition. The rig is placed on a balance, and prolonged with a smoke pipe to avoid back-mixing of air. Secondary air is supplied at the outlet of the pipe, which is displaced to prevent the conversion front to receive heat from the radiation of the flames at the outlet.

A gas probe for extractive gas analysis, Figure 2, was designed to withstand the hot

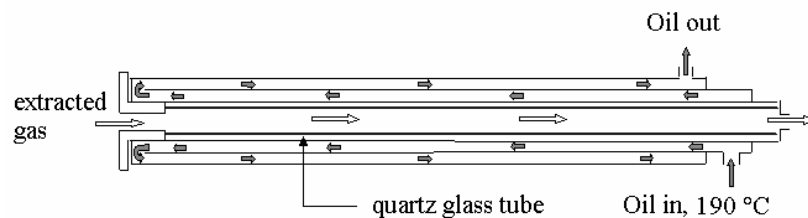


Fig. 2 Suction probe for gas analysis. Inner and outer dimensions in mm: quartz glass $d_i/d_y = 7/9$, stainless steel $d_i/d_y = 10/12$, stainless steel $d_i/d_y = 16/18$, steel 153 MA $d_i/d_y = 23/25$.

environment. The extracted gas is cooled by silicon oil at a temperature of $190 \text{ }^\circ\text{C}$ to freeze the chemical reactions. The probe was inserted into the bed from the side to minimize influence on the conversion front. To achieve a high spatial resolution, the extracted volume flow is low; the measured concentrations are mean values of the extracted volume. The spatial re-

solution of the gas analysis was investigated [14] and found higher than the width of the front. Some of the instruments [14], the FTIR (Fourier Transform Infra Red) spectrograph and the FID (Flame Ionization Detector), require dilution of the extracted gas to protect them from fouling. Dry air was used and the dilution factor was calculated by measuring the carbon dioxide both in diluted and in undiluted gas.

Continuous measurements were made of gas compounds: O₂, CO, CO₂, CH₄, H₂O, TOC (Total gaseous Organic Carbon), and of temperatures, mass change and primary air flow. Hydrogen and nitrogen were analysed by gas chromatography from gas extracted to a bag. During each experiment, three such bags were filled in sequence with approximately 5 minutes of sampling time for each bag. Temperatures were measured by thermocouples of type N mounted at different heights above the grate as shown in Figure 3. The thermocouples were placed in ceramic tubes with only the measurement point exposed to give the temperature in well-defined positions inside the bed. To explore the horizontality of the conversion front,

Table 1 Measurement equipment.

Instrument	Measured compound	Measuring Range	Gas treatment
NDIR	CO ₂	0 – 20 vol-%	Dried, room temperature
Paramagnetic	O ₂	0 – 100 vol-%	Dried, room temperature
NDIR	CO	0 – 30 vol-%	Dried, room temperature
NDIR	CH ₄	0 – 10 vol-%	Dried, room temperature
NDIR	CO ₂	0 – 20 vol-%	Dried, diluted, room temperature
FTIR	H ₂ O, CH ₄ , CO ₂	Calibrated	Not dried, diluted, 190 °C
FID	TOC	1-100 000 ppm	Not dried, diluted, 190 °C
GC	N ₂ , H ₂ , CH ₄ , O ₂		Dried, room temperature
Thermocouples	Temperatures		
Balance	Mass change		
Pitot-tube	Air flow		

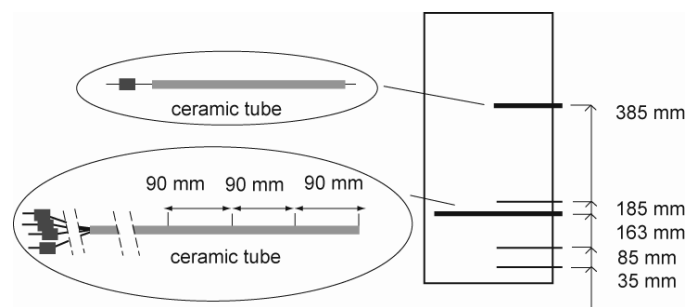


Fig. 3 Thermocouples mounted at different heights above the grate.

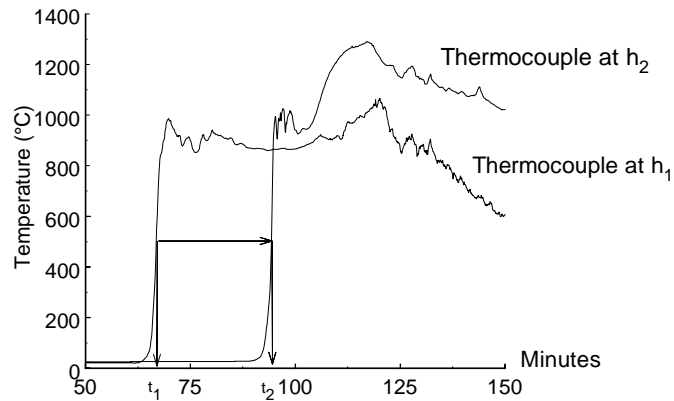


Fig. 4 The ignition rate is calculated as mass of ignited fuel per area of the bed per unit of time ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$).

thermocouples of type N were mounted at different distances in a ceramic tube. There were also four thermocouples (Type K) in the grate, one measuring the temperature of the primary air supplied, and one in the produced gas above the bed. The ignition rate of the conversion front is calculated as mass of ignited fuel per cross sectional area of the bed per unit of time ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$). Multiplying the distance between two thermocouples (h_1-h_2) with the bed density ρ_b and dividing with the time interval between the temperature rise (t_2-t_1) gives the ignition rate. In this work 500°C is chosen as ignition temperature, but the choice is not crucial, as seen in Figure 4.

The grate was cut from a ceramic board with a high pressure-drop, to provide an even air velocity profile. The air mass flow was measured by a pitot-tube together with the temperature and pressure of the air. Before each experiment, the rig was carefully checked for leakage of air between the pitot-tube and the fuel bed, and the air velocity above the bed was checked with a hot-wire anemometer. The velocity above the bed varied from point to point, but the mean value was consistent with the air flow supplied.

The experimental rig was designed to give a one-dimensional progress of combustion of the fuel batch. The gradient of the gas composition in the front is resolved by the small volume flow extracted by the probe. (A large volume flow evens out irregularities by averaging). The fuel, homogeneous in content, form and size, was chosen to minimize irregularities in the conversion and gas composition. In spite of these precautions, the probe, inserted in various positions, revealed non-negligible local variations across the cross-section of the bed.

Char samples were taken from the surface of the bed, through one of the holes in the side-wall, and immediately cooled by nitrogen. The results of a few experiments are shown in Table 2. Tars condense on the inside of the suction probe and in the tar trap of the transportation system. After each experiment, the quartz glass tube (see Figure 2) was removed. First, loosely attached material was brushed and blown away, and then tar was scraped from the inside surface and analysed. The amount of material was just enough to analyse the composition, but not the ash content. From Experiment 1 samples were removed in two steps, (1) loosely condensed, and (2) firmly condensed, to investigate any influence from the test procedure, but little difference was noticed. The fuel was pellets made of compressed sawdust, homogeneous in size, shape and moisture content, see data in Table 3. The pellet diameter was 8 mm and the length 12 to 20 mm.

Evaluation of gas composition and mass release

There are several motives for the evaluation of gas composition and mass release by a calculation. Firstly, the local air flow at the probe's orifice is not known. Secondly, species are measured as volume concentrations, some in dry sample gas, some in wet diluted gas. By mass

balance, molar flows of all major species are calculated, including hydrogen, nitrogen and fractions of hydrocarbons, and the mass release of

Table 2 Composition of char and tar.

	Char			Tar		
	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 4	Exp. 1(1)	Exp. 1(2)	Exp. 2
C ¹	94.2	95.5	94.2	80.2	78.2	78.2
H ¹	0.8	0.5	0.5	3.9	4.7	2.1
N ¹	0.2	0.2	0.2	0.35	0.45	0.15
O ^{1,2}	4.7	3.7	5.2	15.55	16.55	19.55
ash ³	3.9	5.1	5.3	-	-	-

¹(wt - %, daf), ²oxygen by difference, ³(wt - %, df)

Table 3 Fuel properties.

Elemental analysis		Fuel properties	
C ¹	50.5	H _i , lower heating value ² , (MJ/kg)	18.9
H ¹	6.2	Bed porosity	0.46
N ¹	0.15	Bed density ² (kg/m ³)	590
O ¹	43.1	Moisture content	11.3
ash ²	0.39	Bed density (kg/m ³)	670

¹(wt - %, daf), ²(wt - %, df)

tars. To close such calculations, compositions of tars, gaseous hydrocarbons and of the mass release are required. A third reason to formulate a set of balance relationships is to check the accuracy of the measurements and to increase the insight into the process.

The following molar flows are considered: oxygen (1) and nitrogen (2) originating from the air, water vapour (3), carbon monoxide (4), carbon dioxide (5), hydrogen (6) and hydrocarbons. (A small amount of the water vapour originates from the air). The hydrocarbons can be divided into four groups; methane (7), other light hydrocarbons C_iH_j (8), i.e. hydrocarbons except methane remaining in the gas after drying, heavy hydrocarbons C_aH_bO_c (9), i.e. hydrocarbons condensing at a temperature below 190 °C and not present in the dried gas, and tars C_{tar}H_{tar}O_{tar} (10). i.e. hydrocarbons condensing at a temperature above 190 °C and not reaching the gas analysers. Some of the instruments (FID and FTIR) require dilution by air, resulting in two additional “species”: oxygen (11) and nitrogen (12). All these molar flows are unknown, but the volume (or molar) concentrations of many of them are measured continuously on-line, as given in Table 1. If the system had been perfectly one-dimensional the elemental composition would have been known from the measurements of air flow and mass change. However, there are local variations across the cross-section that makes the mass ratio of air and fuel, $\Omega = m_{air}/m_{fuel}$ (13), local and unknown. This results in thirteen unknown parameters present in the system, 12 molar flows and one air-fuel ratio. From the measured gas mole fractions X_i the following equations can be formed, giving the molar flows n_i .

$$X_i = n_i / \sum_j n_j \quad (\text{Equ. 1})$$

species measured in dry gas without dilution: $i = 1,4,5,7 \quad j = 1,2,4-8$;
 species measured in dry gas with dilution: $i = 5 \quad j = 1,2,4-8,11,12$;
 species measured in diluted, wet gas: $i = 3,5,7 \quad j = 1-9,11,12$;
 dilution air: $i = 11,12 \quad j = 11,12$;

The sum of the molar flows 11 and 12 is assigned a value, and this can be used to relate all the molar flows to the flow of dilution air. Out of ten equations formed, two do not give any additional information.

Another equation is derived from the FID analyser that counts the carbon atoms in the hydrocarbons, related to the calibration gas, here methane. The actual mole fraction of the hydrocarbons is calculated from effective response factors, expressing the relative sensitivity of the analyser to various hydrocarbons. The response factor for methane is unity, and factors for other species are found in the manual of the analyser. The mole fraction is

$$X_{THC} = (n_1 + \phi_1 n_8 + \phi_2 n_9) / \sum_{j=1-9,11,12} n_j \quad (\text{Equ. 2})$$

where ϕ_1 and ϕ_2 are response factors for hydrocarbons. The light hydrocarbons were analysed with gas chromatography (GC) and found to consist of methane (slightly less than 50 %) and other HC, where ethene, C_2H_4 , ethane, C_2H_6 and benzene, C_6H_6 , were found. In the calculation, C_iH_j was expressed as C_2H_4 with $\phi_1 = 1.90$. Heavy hydrocarbons were represented by $C_6H_{6.2}O_{0.2}$ [15], with $\phi_1 = 6$.

From mass balances of the elemental components (C, H, O, N) four equations can be formed,

$$Y_i = \frac{Y_{i,fuel} - Y_{char} Y_{i,char} + \Omega Y_{i,air}}{1 - Y_{char} + \Omega} = \frac{\sum_j \gamma_{i,j} n_j M_i}{\sum_i \sum_j \gamma_{i,j} n_j M_i} \quad (\text{Equ. 3})$$

where index i represents the elements and j the major species 1 to 10. $Y_{i,fuel}$ $Y_{i,char}$ are the mass fractions of element i in fuel and char, Y_{char} mass fraction of fuel remaining after the conversion front has passed (char), $\gamma_{i,j}$ stoichiometric coefficient of element i in species j , n_j molar flow of species j and M_i is the molar mass of component i . The compositions of tar and char are determined from sampling (described above), and the mass fraction of char from the measurements of mass change in each experiment.

The mass fractions of elements in the fuel conversing in the front, change from nothing to drying to devolatilisation, must be considered. Upstream of the front, no fuel is converted and the measured gas composition is air. In the upstream end of the front, the fuel is dried and moisture is released, followed by an increasing amount of volatiles. Therefore, the fuel in equation 3 consists of water in the upstream end of the front, and of increasing amount of volatiles further downstream. At the downstream end of the front, the fuel content is consistent with fresh fuel minus char, and then remains constant as long as the front moves towards the grate. In the calculations, the transition from 100 % to 11 % water is accomplished by a quadratic equation. The content of volatile matter increases simultaneously from nothing to 89 %.

The system of 13 equations yields the composition of the gas at the probe's orifice, including species not measured on-line and tars that never reaches the instruments. The calculated molar flows are related to the molar flow of dilution air. For the calculation of the air flow supplied per unit grate area and time (kg/m^2s), the mass change measured with the balance, G (kg/s), the calculated ratio of air and fuel, Ω , and the grate area, A (m^2) was used:

$$m_{air} = G \cdot \Omega / A \quad (\text{Equ. 4})$$

In order to validate the calculations, H₂, N₂ and hydrocarbons were measured with a GC during shorter periods. Another way to validate the result is to compare with the calculated adiabatic temperature, which should be close to the measured temperature in the centre of the bed, where the heat loss to the surroundings is small:

$$\sum_j \left[n_j \int_{T_{ref}}^{T_{ad}} c_{pj} dT \right] = H_{s,fuel} \cdot m_{fuel} (1 - Y_m) - \sum_j n_j M_j H_{s,j} \quad (\text{Equ. 5})$$

$H_{s,fuel}$ and $H_{s,j}$, are the higher heating values of the fuel (J/kg) and of species j , Y_m mass fraction of moisture, m_{fuel} devolatilised fuel (kg/s), and c_p specific heat (J/mole,K).

Results

Six experiments were performed with superficial air velocities between 0.03 and 0.3 m/s at normal conditions (or 0.045 – 0.39 kg/m²s), and results are presented in Table 4. The bed

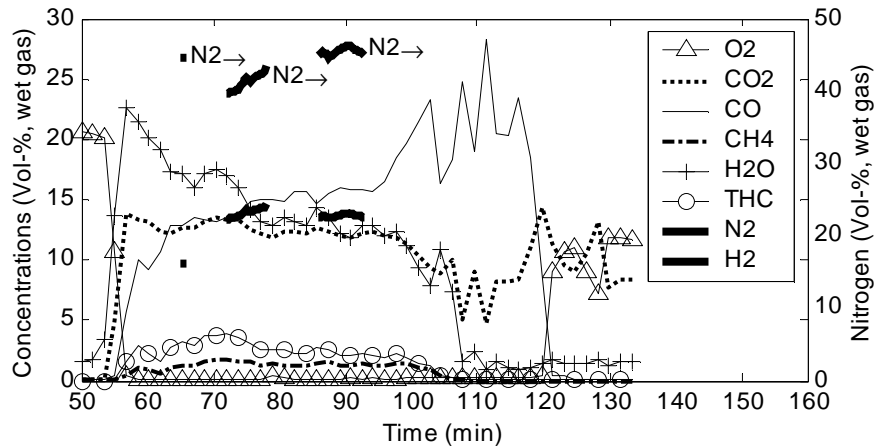


Fig. 5 Measured gas species during combustion of a batch. Experiment 4.

height was approximately 0.4 m and the quantities of fuel 24 to 27 kg. After ignition of the bed, the front propagated downwards with constant speed and linear mass reduction. A char layer was formed above the front, having constant or increasing height, depending on the conditions. This char layer was burnt in a final char combustion phase, after the front had reached the grate. The ignition rates and maximum temperatures in the conversion front were consistent with earlier results [16]. The front width was defined as the difference in height from where the oxygen concentration (in dry volume) starts to fall until it is depleted.

Figure 5 shows concentrations from Experiment 4. The surface of the bed is ignited at 6 minutes after start. After 52 minutes the conversion front reaches the level of the probe, which is 235 mm above the grate, and O₂ decreases and other gases are produced. The front proceeds beneath the probe, and the fuel is devolatilised and

Table 4 Experimental conditions.

Exp. No.	Superficial air velocity ¹ (m/s)	Ignition rate (kg/m ² s)	Maximum temperature in conversion front (average) (°C)	Front width (mm)	Spatial resolution in concentration measurements (mm)
1	0.03	0.022	776	24	25-43
2	0.07	0.046	1003	22	18-32
3	0.07	0.054	1027	23	10-18
4	0.14	0.054	1088	17	12-20
5	0.21	0.069	1102	34	11-18
6	0.30	0.086	1213	83	9-15

¹Supplied air flow (m³/s)/grid area (m²) at normal condition, 101325 Pa and 273,15 K

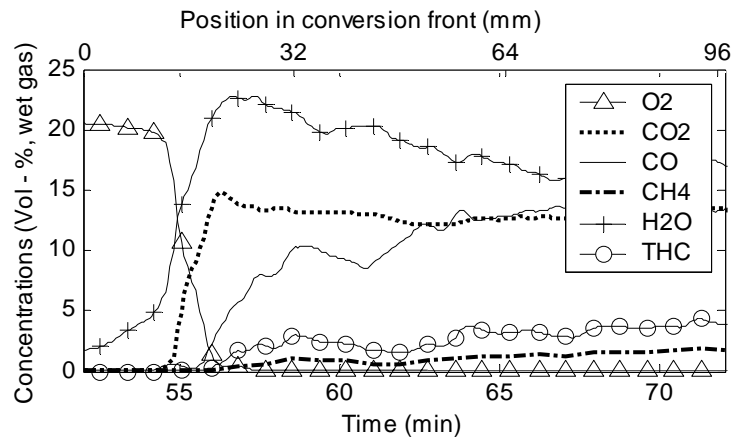


Fig. 6 Measured species in the conversion front. Experiment 4.

partly combusted and/or gasified while the front propagates towards the grate. During this period, three bag samples are taken and analysed for nitrogen and hydrogen. At 100 minutes, the conversion front reaches the grate and there is a peak in CO while the char is combusted. At 120 minutes, CO falls, followed by a short peak in CO₂, before oxygen increases, and CO₂ decreases. At 140 minutes, the fuel is finished.

All experiments show the same general features as described, except for the peak in carbon monoxide during the char combustion, which is not present at the two higher air flows. The ignition rate, the temperature in the conversion front and the front width increase when the air mass flow increases, as seen in Table 4, as well as the measured concentration of nitrogen, while hydrogen and methane decrease, as seen in Table 5.

Figure 6 shows a closer view of the species in the conversion front. When fuel particles are heated by radiation from glowing char and flames in the conversion front, just after 52 minutes, water vapour is released and the concentration of H₂O increases rapidly, diluting the air. As the temperature of the particles increase, they are devolatilised, and at some point gases and/or the surfaces of the particles are ignited, O₂ decreases and CO₂ and H₂O increase rapidly. Few minutes later, oxygen is consumed, and combustible gases such as carbon monoxide

Table 5 Concentrations in vol -%, dry gas, from gas chromatography, average from three bags taken in sequence during each experiment.

Exp. No	Superficial air velocity ¹ (m/s) ²	N ₂	H ₂	CH ₄
1	0.03	46.6	15.2	3.6
2	0.07	50.4	16.9	2.4
3	0.07	53.4	15.3	2.1
4	0.14	51.2	14.7	1.4
5	0.21	50.6	11.6	0.9
6	0.30	56.2	11.0	1.1

and hydrocarbon increase. After an initial peak, H₂O and CO₂ are reduced, while CO and H₂ increase, due to gasification reactions. About half of the hydrocarbons consist of methane that is measured with a separate instrument.

Mass balance calculations include the conversion front and the devolatilisation period until 100 minutes. Figure 7a-b show calculated concentrations of hydrogen and nitrogen compared with input from bag sampling for three periods. The analyses taken from the bags are mean values over the period in dry gas, and recalculated to wet gas the concentrations vary slightly. Figure 7c-e show calculated concentrations c) H₂O, d) CO₂ and e) CO. The calculated concentrations coincide with the measured ones. Figure 7f shows temperatures measured with thermocouples 85 mm and 185 mm above the grate, and the adiabatic temperature calculated at the position of the probe. Figure 8a shows CH₄-equivalencies measured with the FID, the calculated light hydrocarbons (as CH₄ + C₂H₄), the calculated heavy hydrocarbons (as C₆H_{6,2}O_{0,2}), and the calculated hydrocarbons summed into CH₄-equivalencies. Figure 8b shows tar emitted in the bed in kg tar per kg devolatilised fuel.

In Figure 9a ignition rate is calculated on the batch (globally) by means of thermocouples on top of and at the bottom of the bed, and locally, from the calculated gas composition. Figure 9b shows superficial velocity calculated from the supplied primary air flow (globally) and calculated locally from the calculated gas composition.

Discussion

The system of equations yields the molar composition of the major species in the gas. In order to connect the composition to an absolute number, either the measured mass change or the measured air flow can be used. Both are global measurements. Here, the mass change was used, and the local air flow was calculated. The mass release of fuel was considered uniform over the cross-section during the stable period of devolatilisation (58 – 100 minutes in Figure 5). The balance has a resolution of 1 gram. During the devolatilisation phase in Experiment 4, the mass change was in average 4.1 gram/s, measured every fifth second with a relative deviation of 20 % of the mean value. The assumption of a uniform mass release over the cross-section allocates variations into the calculated air flow. At the orifice of the probe the superficial velocity varies with time, see Figure 9b. The mean superficial velocity was found to be between 30 and 60 % of the supplied superficial velocity, see Table 6. A check under cold conditions showed that the air flow was redistributed through the bed, and that the air velocity distribution through the ceramic plate was uneven, resulting in a lower gas flow in the centre of the rig.

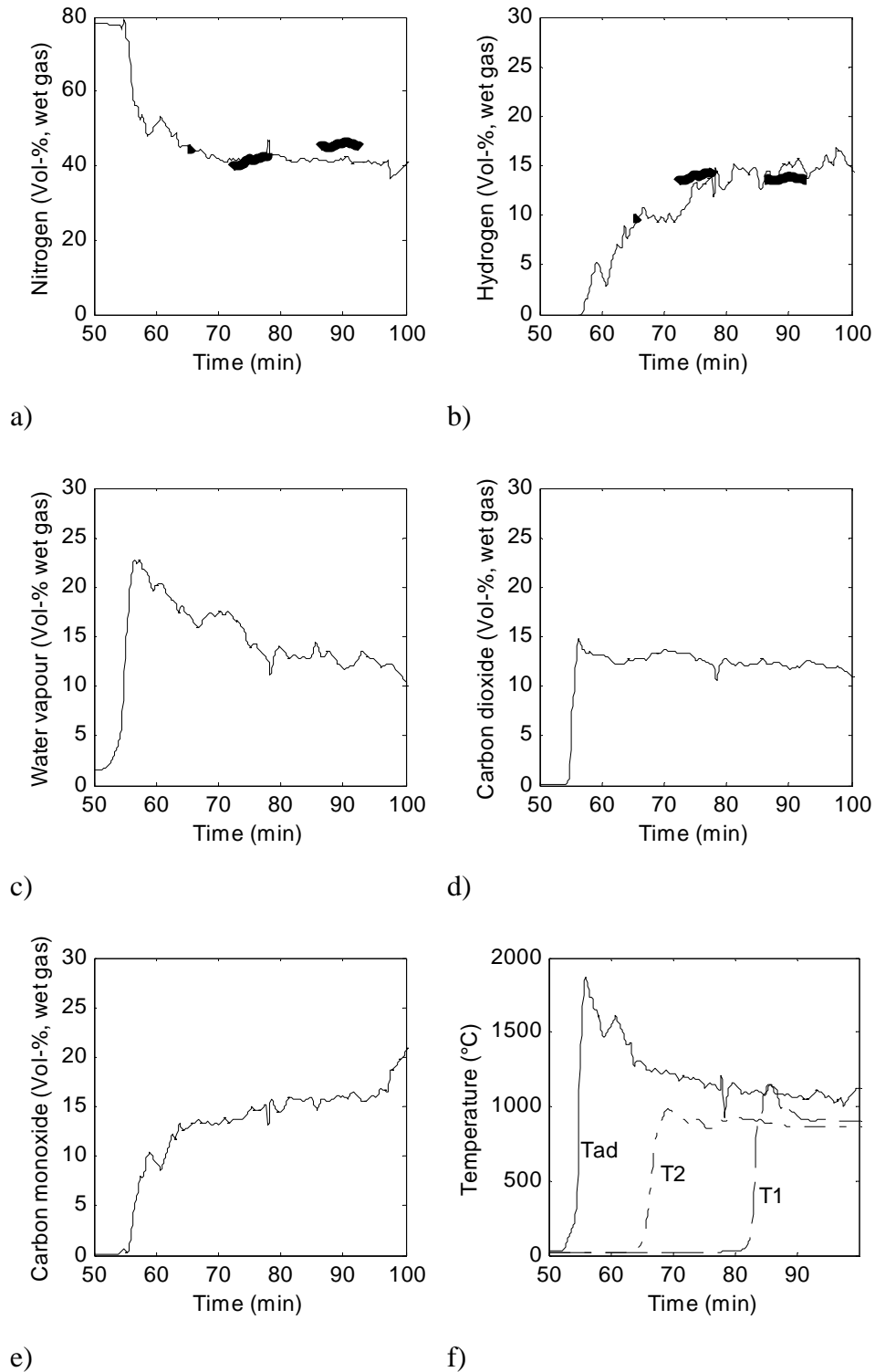


Fig. 7a-e Calculated gas composition. 7f) Measured temperatures T1: 85 mm above grate, T2: 185 mm above grate. Calculated adiabatic temperature Tad at position of probe 235 mm above grate. Experiment 4.

The global ignition rate, calculated from the entire fuel batch (Figure 9a), is compared with ignition rates measured by each of the four horizontal thermocouples, Table 7. The four thermocouples are positioned 163 mm above the grate. There is a spread in magnitude and a tendency to higher ignition rates close to the walls. The global ignition rate is also compared with ignition rate calculated locally, at the position of the probe, see Figure 9a. Locally, the ignition

rate varies with time, but the mean value is close to the global value in Table 6. The variation in ignition rate in Table 7 is less pronounced than the variation in air flow, because heat released in the conversion front radiates in all directions and irregularities in mass release over the cross-section are evened out. Ignition rates and maximum temperatures in the conversion front were

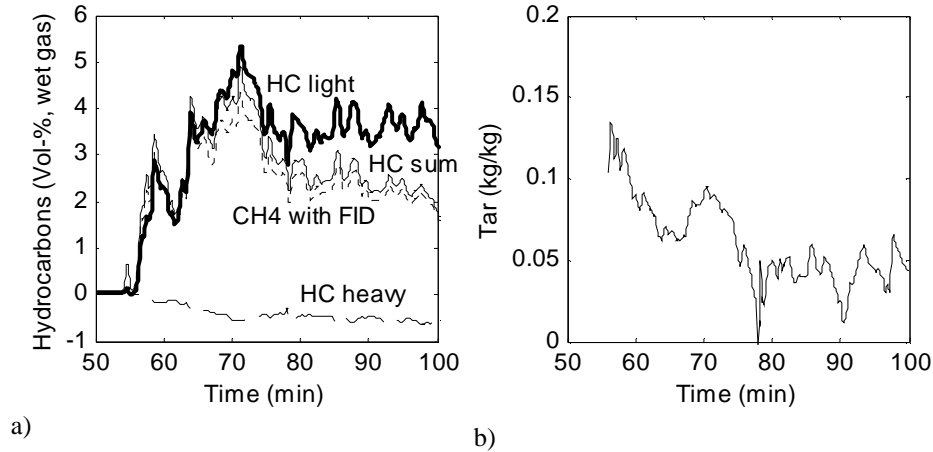


Fig. 8a) CH₄-equivalencies measured with FID (dots), calculated light hydrocarbons (thick line), calculated heavy hydrocarbons (dashed), sum of calculated hydrocarbons in CH₄-equivalencies (thin line). b) Tar emitted in the bed in kg tar per kg devolatilised fuel. Experiment 4.

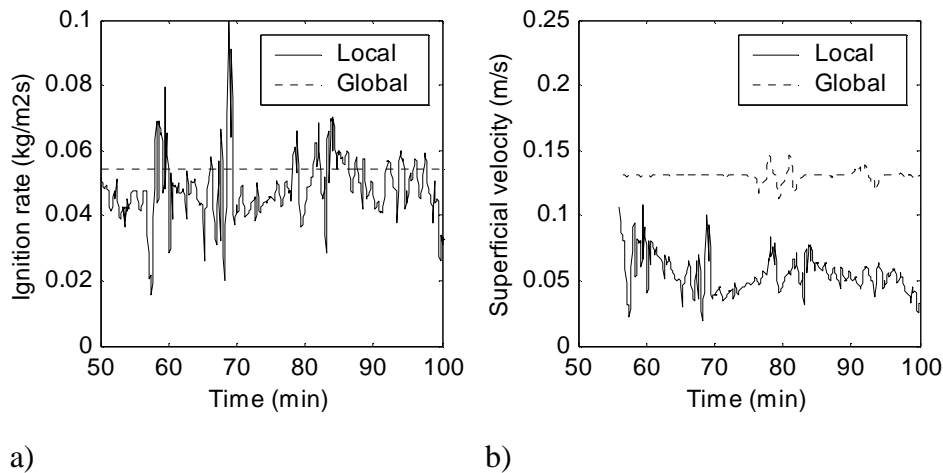


Fig. 9 Global and local calculations. a) Ignition rates b) Superficial velocities. Experiment 4.

consistent with earlier results. Therefore, it seems that the locally irregular air velocity seems to be of minor importance for global conditions, but nevertheless influences the local conditions.

The gas composition calculated by the system of equations is consistent with the measurements during the stable devolatilisation phase and capable of yielding the contents of nitrogen and hydrogen (concentrations that are commonly not measured on-line) and the emitted tar. During the transient phase of the conversion front (at 55 minutes) there is a small peak in N₂ and H₂ falls below zero, as shown in Figure 7a-b. This is caused by limited time- and space resolution, together with low measured values, close to the lower limits of the instruments, and time lags between the instruments, derived from differences in gas transportation and response times, that influences the accuracy of the measurements in the transient conversion front.

The hydrocarbons were divided into light hydrocarbons, heavy hydrocarbons and tars. The choice of stoichiometric coefficients has little influence on the calculation of hydrogen, nitro-

gen and air supply, but does influence the split between the fractions. The fraction of heavy hydrocarbons was very small; Figure 9a shows concentrations close to zero. The stoichiometric coefficients for light hydrocarbons were taken from the GC analysis, and the choice was not crucial. The tar is not presented in moles but in kg because no investigation into the details of the tar molecules was done.

The calculated adiabatic temperature in Figure 9b is around 200 °C higher than the measured temperatures during the later stable devolatilisation phase. The calculation is sensitive to the composition of the molar flows of hydrocarbons, including tars, whose heating values are estimated and therefore suffers from uncertainty. The calculated adiabatic temperature is higher than the measured ones, as heat losses are not included in the calculations.

Conclusions

In combustion devices where the conversion front propagates counter-current to the primary air, heating, drying, devolatilisation and ignition of combustible gas and char normally take place in a narrow and well-defined layer, the conversion front. Fresh fuel particles are heated mainly by radiation from glowing char in the front. The sight depth of radiation depends on the size of the fuel particles, and on their arrangement. Heat is generated by oxidation of

Table 6 Measured and calculated air flow based on average from three bag samples. Superficial velocities at normal conditions

Exp No.	Measured air flow		Calculated air flow	
	(kg/m ² s)	(m/s)	(kg/m ² s)	(m/s)
1	0.045	0.03	0.02	0.015
2	0.09	0.07	0.06	0.05
4	0.18	0.14	0.07	0.05
5	0.27	0.21	0.12	0.09
6	0.39	0.30	0.12	0.09

Table 7 Ignition rate (kg/m²s) calculated from the batch, and ignition rate calculated by each of the four thermocouples in the horizontal tube.

Exp. No.	Ignition rate from the batch	Ignition rate from 15 mm east wall	Ignition rate from 105 mm east wall	Ignition rate from 105 mm from east wall	Ignition rate from 15 mm from east wall
1	0.022	0.024	0.022	0.022	0.022
2	0.046	0.044	0.041	0.041	0.045
5	0.069	0.071	0.070	0.071	0.074
6	0.086	0.100	0.081	0.092	0.120

devolatilised gas and of char, and the hot gas flows through the already ignited fuel and through the char layer, away from the fresh fuel. The temperature measurements, Figure 4 and 7f, recognize the conversion front, the devolatilisation phase and the char combustion phase. The temperature rapidly increases when the thermocouples are reached by radiation from the

conversion front. After a short peak, the temperature is stabilized at a lower value. The peak is caused by heat released from oxidation of gas and char. When the oxygen is depleted, the temperature of the thermocouple approaches the conditions of its surrounding, that is, the temperature of the glowing char. The temperature of the char slightly decreases due to endothermic gasification reactions. When the char layer leaves the thermocouple (after yet a few minutes), the temperature of the thermocouple falls by heat loss to the walls of the rig and the smoke pipe. During the final char combustion phase, the temperature increases to a maximum.

The gas composition in the conversion front and during the devolatilisation phase can be described as follows: when fuel is heated by radiation from glowing char, moisture leaves the particles and oxygen and nitrogen are diluted. Downstream in the front, the temperature increases further and devolatilisation starts. Typical volatile gases, such as carbon monoxide, carbon dioxide and hydrocarbons, are now recognised. Hydrogen, released from the particles during devolatilisation, is assumed to be consumed as soon as it meets oxygen. As the temperature of the solid continues to rise, char combustion is initiated and consumes oxygen in competition with hydrogen. The gas is heated by convective heat exchange with the solid surfaces. When the temperature of the gas becomes high enough the gas ignites and the temperature rapidly increases. Where the oxygen is depleted, a heat source no longer exists, and the temperature of the gas moves towards that of the surface of the solid fuel. Some distance downstream of the ignition hydrogen and carbon monoxide form from gasification reactions ($\text{H}_2\text{O} + \text{C} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}$, $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$) and hydrogen and carbon dioxide from the water-gas shift reaction ($\text{H}_2\text{O} + \text{CO} \leftrightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$). A decrease in the concentration of H_2O and CO_2 and an increase in CO and H_2 confirm this behaviour during the devolatilisation phase. An increase of the sum of $\text{CO} + \text{CO}_2$ downstream indicates that gasification of the accumulating char takes place.

The bed consists of randomly oriented fuel particles, and during pyrolysis and ignition the environment around the particles is not smooth but consists of mixing of gases and an agitated flow, where heat transfer takes place. If the gas concentrations could be averaged over a cross-section of the bed, they would change smoothly in the vertical direction. They would then be more comparable to results of one-dimensional models. The extraction of gas causes some averaging of the concentrations in the flow direction, so the spatial resolution of the measured gas analysis is always restricted. The fact that pyrolysis gas is measured in the low-temperature zone of the front (Figure 6) is most probably an effect of mixing in the bed and in the extraction procedure. A point measurement with high spatial resolution would reduce such mixing, but the irregular environment would still be recognised.

The evaluation of gas composition by mass balances contributes with the concentrations of hydrogen, nitrogen and tars in the produced gas and with local conditions, such as local air mass flow and ignition rate. Especially, in the present tests the local air flow differed from the global air flow, while ignition rate, and therefore also mass release, was more consistent. This uneven lateral behaviour is an important feature of the fixed bed, which should be considered when evaluating measured results.

Acknowledgement

This work was financially supported by The Swedish Energy Agency.

REFERENCES

- 1 Rogers J.E., Sarofim A.F., Howard J.B. (1972) Effect of underfire air rate on a burning simulated refuse bed. ASME Nat. Incinerator Conf.: 14-17, New York.
- 2 Kuo J.T., Hsu W.-S., Yo T.-C. (1997) Effect of Air Distribution on Solid Fuel Bed Combustion. *Journal of Energy Resources Technology*, 119: 120-128.
- 3 Gort R. (1995) On The Propagation of a Reaction Front in a Packed Bed. Dr Thesis, Universiteit Twente, Enschede.

- 4 Fatehi M., Kaviany M. (1994) Adiabatic Reverse Combustion in a Packed Bed. *Combustion and Flame*, 99: 1-17.
- 5 Axell M., Rönnbäck M., Gustavsson L., Thunman H., Leckner B. (2000) Combustion processes in a biomass fuel bed - Experimental results of the influence of air flow and of particle size and density. Nordic Seminar on Small Scale Wood Combustion, Nordic Energy Research Programme, Nådendal.
- 6 Shin D., Choi S. (2000) The Combustion of Simulated Waste Particles in a Bed. *Combustion and Flame*, 121: 167-180.
- 7 Horttanainen M., Saastamoinen J., Sarkomaa P. (2002) Operational Limits of Ignition Front Propagation against Airflow in Packed Beds of Different Wood Fuels. *Energy & Fuels*, 16: 676-686.
- 8 La Fontaine H., Reed T. B. (1993) An Inverted Downdraft Wood-Gas Stove and Charcoal Producer. *Energy from Biomass and Wastes XV*, Institute of Gas Technology: 1023-1049.
- 9 Yang YB., Zakaria R., Nasserzadeh V., Swithenbank J. (2001) Investigation of Channel Formation due to Random Packing in a Burning Waste bed. *Journal of Trans IChemE - Process Safety and Environmental Protection*, 79 (No. 9, Part B): 267-277.
- 10 Di Blasi C. (2000) Dynamic behaviour of stratified downdraft gasifiers. *Chemical Engineering Science*, 55: 2931-2944.
- 11 Bryden K. M., Ragland K. W. (1996) Numerical Modeling of a Deep, Fixed Bed Combustor. *Energy & Fuels*, 10: 269-275.
- 12 Thunman H., Leckner B., Niklasson F., Johnsson F. (2002) Combustion of Wood particles - A particle Model for Eulerian Calculations. *Combustion and Flame*, 129: 30-36.
- 13 Peters, B. (2002) Measurement and Application of a Discrete Particle Model (DPM) to Simulate Combustion of a Packed Bed of Individual Fuel Particles. *Combustion and Flame*, (131): 132-146.
- 14 Rönnbäck M., Samuelsson J., Tullin C. (2002) Gasanalys i en brinnande bädd av bio-bränsle - metod och möjlighet. SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut.
- 15 Adams T. N. (1980) *Combustion and Flame*, 39: 225-239.
- 16 Rönnbäck M., Axell M., Gustavsson L., Thunman H., Leckner, B. (2000) Combustion processes in a biomass fuel bed - Experimental results. *Progress in Thermochemical Biomass Conversion*. Tyrol.

Ignition rate in fixed biofuel beds – a model based on combustion front theory

Marie Rönnbäck^{1*}, Henrik Thunman², Claes Tullin¹, Bo Leckner²

¹SP Swedish National Testing and Research Institute, P.O. Box 857, SE-501 15 Borås, Sweden

²Department of Energy Conversion, Chalmers University of Technology, SE-412 96 Göteborg, Sweden

*Corresponding author: marie.ronnback@sp.se, tel: + 46 33 16 55 05, fax: + 46 33 13 19 79

ABSTRACT

The rate of ignition of fuel on a grate is influenced by a number of parameters, such as superficial velocity of the air, fuel moisture content and density and particle size, and also on whether the air flow and the ignition front move in a co-current or a counter-current direction relative to each other. Detailed mathematical models of the ignition front are extensive; such models have been presented in the literature, but simple models have the advantage of being more transparent. Here a simple tool for estimation of ignition rate, based on laminar flame theory, has been developed. The model is aimed at qualitative estimations with the purpose of studying the importance of various influencing parameters. The model includes thermal diffusivity of the bed, ignition- and final temperature for the reactions and a relevant reaction time. In the low sub-stoichiometric region the model and measured results show the same trend for ignition front temperature. Closer to and above stoichiometry, the model shows that losses by radiation are important, but also that the energy emitted by combustible gas is released further away from the fuel with increasing air rate, while the temperature in the reactive layer is sustained by burning char.

Keywords: Ignition, biofuel, fixed bed, flame velocity

FLAME VELOCITY

The flame velocity, or laminar flame speed, is defined as the velocity at which unburned gases move through the combustion wave in the direction normal to the surface of the wave. The theory dates back to Mallard and Le Chatelier, see for example [1]. It proposes that propagation of heat back through layers of gas controls the propagation of the flame and that a flame consists of two zones separated at the point where the layer ignites. In Fig 1, the heat conducted from zone II (the reactive zone) equals the heat necessary to raise the unburned gases in zone I (the preheated zone) to the ignition temperature T_i at the boundary between zones I and II. Diffusion and chemical reactions are neglected in zone I.

The theory is summarized by

$$u_L = \left(\frac{k}{\rho c_p} \frac{(T_f - T_i)}{(T_i - T_0)t} \right)^{1/2} \approx \left(\frac{\alpha}{t} \right)^{1/2} \quad (1a)$$

where u_L is the flame velocity (m/s), $\alpha = k/\rho c_p$ the thermal diffusivity of the gas (m^2/s), k is the thermal conductivity (W/mK), ρ the density (kg/m^3), c_p the specific heat (J/kgK). T_f and T_i are the final and ignition temperatures (K), and T_0 the temperature of the unburned fuel (K). t is the reaction time (s).

This result is useful in predicting laminar flame spread. Unfortunately, the thermal theory requires an ignition temperature, which is difficult to measure and even to define in a real flame.

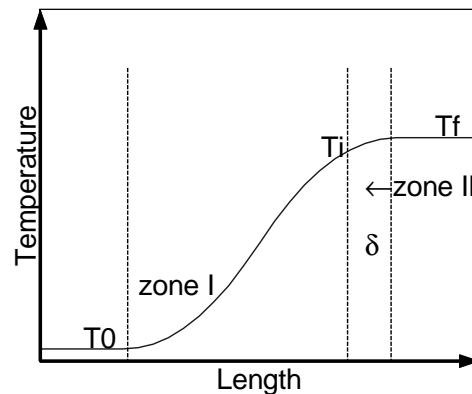


Figure 1. Flame structure according to Mallard and Le Chatelier. The fuel is heated in zone I and reacts in zone II with the width δ (m).

Theory of flame velocity applied on the ignition front in a fixed bio-fuel bed

Earlier, the laminar flame theory has been used to derive the maximum possible propagation rate of the reaction front [2]. Here, it will be used as a tool to estimate the propagation rate and the influence of various parameters. Figure 2 shows biofuel burning in a fixed bed, where the air is supplied counter-current to the direction of the ignition of fresh fuel. The volatile gas outside the fuel particles and the surface of the char particles are ignited. Heat is transferred mostly by radiation and to a lesser degree by conduction counter-current to the airflow. In analogy with the theory of flame velocity, the reactive zone is a layer of gas and particles where the temperature rises from T_i to T_f . In a gas flow, the velocity of the flame is its velocity relative the unburned gas. In the fixed bed, the flame velocity is the velocity of ignition relative the solid particles.

The mass flux of combustible gas is limited by the rate of drying and devolatilisation of separate fuel particles. Drying and devolatilisation can be completed inside or downstream of the reaction zone. The rates of drying and devolatilisation depend on the Biot number $Bi = h/k_s d_p$, where h is the heat transfer coefficient ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$), k_s is the thermal conductivity of the solid fuel (W/mK) and d_s the characteristic particle size. As the fuel particles are supplied to the reaction zone, air is supplied at a certain air/fuel-ratio. The unburned gas in the flame theory model corresponds to the mixture of solid particles and air. Equation (1a) applied on a fixed fuel bed becomes

$$u_L = \left(\frac{k_b}{\rho_b c_{p,b}} \frac{(T_f - T_i)}{(T_i - T_0)} \frac{1}{t_b} \right)^{1/2} \quad (1b)$$

where k_b , ρ_b , $c_{p,b}$ and t_b now concern the fuel bed.

Bed properties

The heat transfer in the bed is lumped into an overall thermal conductivity, $k_{eff} = k_b$ where the effect of radiation is included in $k \sim T^3$ [3],

$$k_{eff} = 4v\sigma d_s T^3 + (1 - v)k_s \quad (2)$$

v is the porosity of the bed (-) and σ is Stefan-Boltzmann's constant ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$). The thermal conductivity of the solid fuel is calculated according to [4]

$$k_s = 0.0237 + 0.0002\rho_s(1 + 2X_m/(1 - X_m)) \quad (3)$$

ρ_s is the particle density (kg/m^3) and X_m the moisture content ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$). Considering the great influence of radiation from the flames, k_{eff} should be taken at a temperature between T_i and T_f .

The specific heat of the bed is calculated as a weighted mean value for fuel and air

$$c_{p,b} = c_{ps}(1 - v) + c_{pl}vK_{af} \quad (4)$$

c_{ps} and c_{pl} are the specific heat of fuel ($\text{J}/\text{kg}_{\text{fuel}}\text{K}$) and air ($\text{J}/\text{kg}_{\text{air}}\text{K}$), and K_{af} the ratio of supplied air and fuel ($\text{kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$). c_{ps} is calculated considering the moisture content of the fuel as

$$c_{ps} = c_{ps,df} + 4200X_m \quad (5)$$

c_{pl} and $c_{ps,df}$ ($\text{J}/\text{kg}_{\text{dryfuel}}\text{K}$) are taken at $(T_i + T_0)/2$ and calculated [5]

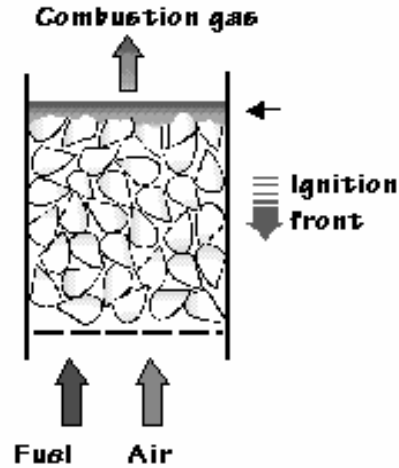


Figure 2. Ignition of a fixed fuel bed where air is supplied counter-current to the direction of the ignition of the fuel.

$$c_{ps,df} = 4.206T - 37.7 \quad (6)$$

Ignition temperature and final temperature

In a fuel bed where the reactive layer moves counter-current to the supplied air, the fresh fuel is ignited by a pilot flame, mainly by radiation. An ignition temperature (temperature of the surface) of a broad range of natural and synthetic organic solids is approximately 300 - 410 °C for piloted ignition with radiant exposure [6].

The adiabatic temperature can be used as final temperature T_f ,

$$\sum_j \left[n_j \int_{T_0}^{T_f} c_{pj} dT \right] = H_{u,df} - H_{vap} X_m / (1 - X_m) - \sum_j n_j M_j H_{u,j} \quad (7)$$

where n is molar flow (mol/kg_{dryfuel}) for $j = O_2, N_2, H_2O, CO, CO_2, H_2, C_1H_j, C_aH_bO_c$ and char. $H_{u,df}$ is the lower heating value of the fuel on dry substance (J/kg_{dryfuel}) and $H_{u,j}$ is the heat of reaction of the compounds j . The molar flows are calculated from the mass balance [7]. Gasi-fication reactions that would lower the temperature when carbon monoxide and water vapour passes an accumulated char layer are not included.

The reactive layer exchanges heat with the wall above the bed and the final temperature (Eq 7) can also be calculated with a heat-loss term added

$$\sum_j \left[n_j \int_{T_0}^{T_f} c_{pj} dT \right] = H_{u,df} - H_{vap} X_m / (1 - X_m) - \sum_j n_j M_j H_{u,j} - A \sigma \epsilon (T_f^4 - T_{wall}^4) / (A \rho_s u_L (1 - \nu)) \quad (8)$$

where T_{wall} is the temperature of the wall above the reactive layer (K) and A is the cross-sectional area of the bed (m²). Equation (7) is relevant when the reactive layer is covered by char, i.e. during sub-stoichiometric conditions. Equation (8) is relevant closer to or above stoichiometric conditions, when char or ash do not shield the reactive zone.

Reaction time

The drying time of a separate particle has been chosen to represent reaction time, as drying is the rate limiting process. It is calculated by two different models. Firstly, the drying time, described in [2], derived from a heat balance on a one-dimensional slab with thickness $d_s/2$ is calculated as

$$t = \int_{d_s}^0 \frac{X_m}{(1 - X_m)} \rho_{s,df} (H_{vap} + \int_{T_0}^{T_s} \frac{c_{p,H_2O}}{M_{H_2O}} dT) \frac{d_s - d_m}{4k_s (T_s - T_b)} dd_m \quad (9)$$

where T_s is the temperature on the particle surface (K), T_b is the boiling temperature of water (K), $\rho_{s,df}$ is the density of dry fuel (kg_{dryfuel}/m³), H_{vap} is the heat of vaporisation (J/kg_{H₂O}), c_{p,H_2O} is the heat capacity of vaporised water (J/kg_{H₂O}K) and d_m is the moist core diameter. T_s is taken at $(T_f + T_i)/2$. Secondly, drying time for a particle is calculated according to a model for drying of large particles [8]. This model is based on heat transfer to the particle, and gives, especially at low air rates, a longer drying time than the first model, where the surface tem-

perature is considered constant. The model is derived for one-dimensional geometries. The drying time is then calculated as

$$t = \frac{X_m}{(1 - X_m)} \frac{\rho_{s,df}}{4k_{s,df}} \frac{H_{m,eff} d_s^2}{(T_h - T_m)} f[X_{m0}] \quad (10)$$

where $k_{s,df}$ is the thermal conductivity of dry fuel (W/mK), $H_{m,eff} = H_{vap} + c_{ps}(T_b - T_0)/X_m$, i.e. the heat of vaporisation plus the energy needed to increase the temperature of the moist particle to boiling temperature per kg moisture (J/kg_{H2O}). T_h is the ambient temperature (K). When all moisture has dried $f[X_m \rightarrow 0] \rightarrow (2+Bi)/(2(n+1)Bi)$. n is the shape factor, where $n = 0$ for a infinite plate, $n = 1$ for an infinite cylinder and $n = 2$ for a sphere. Heat is transferred to the particle mainly by radiation, and $h_{eff} = \varepsilon\sigma(T_0^2 + T_h^2)(T_0 + T_h)$. T_h is taken as $(T_f + T_i)/2$. Finally, index m stands for moisture.

RESULTS AND DISCUSSION

Calculations were compared with measurements in a bed of wood cylinders, diameter 8 mm, length 20 mm and moisture content 10 % [12]. The calculations were performed with a characteristic particle size, $d_s = 8$ mm, at three moisture contents, 8, 10 and 12 %, and with air ratios, λ_{af} , between 0.2 and 2. Other fuel and bed properties were the same in the calculations as in the measurements. The results are for an ignition temperature of $T_i = 620$ K. Ignition temperatures between 570 – 680 have only a small influence on the result. The wall temperature was $T_{wall} = 870$ K according to the measurements.

Final temperature T_f vs. supplied air flow is shown in Fig 3. Temperature calculated with no heat loss, Eq (7), is shown in Fig 3a, and with heat loss to the surrounding, Eq (8), in Fig 3b, together with measured temperatures. The overall thermal conductivity, k_{eff} , is evaluated at T_i . The air ratio, defined as air supplied in relation to fuel converted in the reactive layer, is determined by the reaction rate of the fuel particles. A longer drying time, Eq (10), gives a leaner mixture, and for the same air ratio the temperature curve is displaced towards lower air rates (kg_{air}/m²s). At low air rates, both measured and calculated temperatures increase with an increase in air rate. Here, the combustion is limited by the amount of oxygen, and it is known from experiments that the reactive layer is covered by an accumulated layer

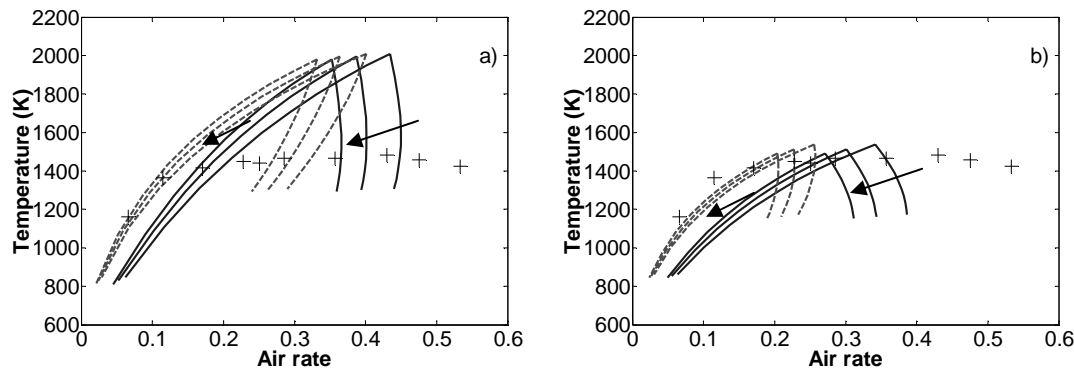


Figure 3. Calculated final temperatures (K) vs. air rates (kg_{air}/m²s). a) no heat loss Eq (7) b) with heat loss Eq (8). Drying times Eq (9) (lines), Eq (10) (dashed lines). Measured results (+), moisture 10 %. Calculations with moisture contents 8 – 12 %, the arrows indicate increasing moisture content.

of char. Above a certain point, here about $0.2 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{m}^2\text{s}$, the combustion is controlled by diffusion and mixing. The reactive layer becomes thinner with increasing air flow, and the layer becomes uncovered, exposed to the surroundings. The measured temperature in the reactive layer is stabilised slightly above 1400 K, and slightly below that level for air rates above $0.45 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{m}^2\text{s}$. Calculated temperatures continue to increase with increasing air rate until λ_{af} reaches 1, where the temperature decreases rapidly, because of the cooling effect of excess air. When the temperatures are lowered the reaction time is prolonged, which may lead to a reduction of the air rate when λ_{af} is increased as seen in Fig 3. When radiation loss, Eq 8, from the reactive layer to the surrounding is accounted for, Fig 3b, the temperature curves are flattened. Radiation loss occurs when the reactive layer is not covered by char, and increases with increasing temperature difference. The model shows that losses by radiation are important but not the sole factor influencing the temperature in the layer. It shows that closer to and above stoichiometry, combustible gas containing oxygen is transported away from the layer and emits its energy further away with increasing air rate. Cooling of the gas by excess air influences the gas temperature further away from the layer, while the temperature in the reactive layer is sustained by the burning char.

The velocity u_L of the ignition front relative the solid particles is measured by dividing the distance between two thermocouples by the time in which they reach a temperature of $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Multiplying u_L with the bed density gives the ignition rate in $\text{kg}_{\text{fuel}}/\text{m}^2\text{s}$. Ignition rates are seen in Fig 4a

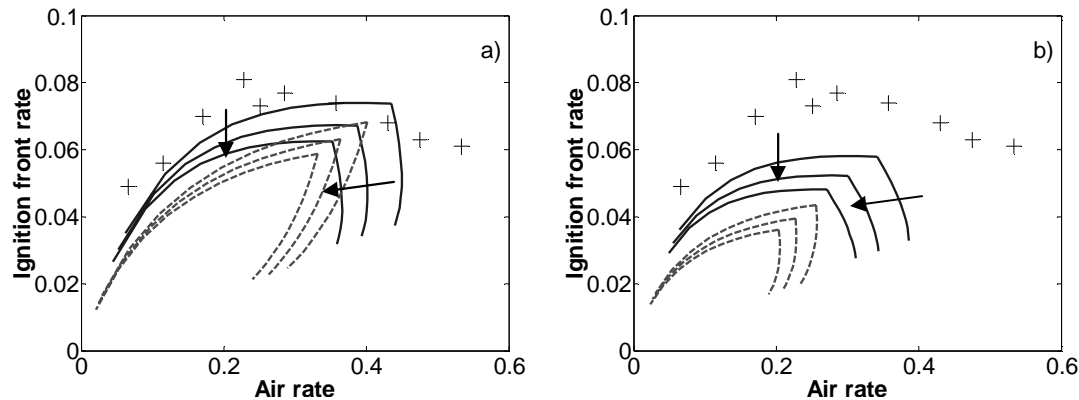


Figure 4. Calculated ignition rates ($\text{kg}_{\text{fuel}}/\text{m}^2\text{s}$) vs. air rates ($\text{kg}_{\text{air}}/\text{m}^2\text{s}$). a) ignition rates calculated using temperature with no heat loss Eq (7), b) ignition rates calculated using temperature with heat loss Eq (8). Drying times Eq (9) (lines), Eq (10) (dashed lines). Measured results (+), moisture 10 %. Calculations with moisture contents 8 - 12 %, the arrows indicate increasing moisture content.

using temperatures calculated without heat loss, and in Fig 4b with loss. The overall thermal conductivity, k_{eff} , is taken at T_i . When heat loss is accounted for, the curves are flattened. In the region limited by insufficient amount of oxygen both measured and calculated ignitions rates increase with increasing air rate. Above about $0.2 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{m}^2\text{s}$, measured ignition rates are slightly reduced with increasing air rate. Calculated ignition rates continue to increase until λ_{af} reaches unity, and then decrease rapidly.

The calculated ignition rates are qualitative values influenced by the choice of temperatures where properties (k_{eff} , c_{pl} , $c_{ps,df}$) are evaluated. Figure 5 shows the influence of temperature in Eq (2). k_{eff} is calculated at T_i (lower values) and at $(T_f + T_i)/2$ (higher values). An increased heat flow leads to an increased ignition rate. Both final temperatures and ignition rates are considerably increased when the higher values are chosen. Also the loss term in Eq (8) is reduced. In the fuel bed, radiation from the flames to fresh fuel is restrained by particles in the

reactive layer. Therefore, it is difficult to determine an absolute temperature in Eq (2). Calculated and measured temperatures show the same behaviour when $\lambda_{af} < 1$, but diverge when $\lambda_{af} > 1$. The expressions for temperature Eq (7-8) are not useful close to stoichiometry or for over-stoichiometric conditions, unless they are modified, considering the influence from burning char remaining in the reactive layer and from gas leaving the layer. If instead measured temperatures are used in Eq (1b), calculated ignition rates agree better with measured also at $\lambda_{af} > 1$, as seen in Fig 6a. k_{eff} is taken at T_i .

The calculated influence of fuel moisture content is seen in Fig 3 and 4. Increased moisture content leads to longer reaction times and for the same

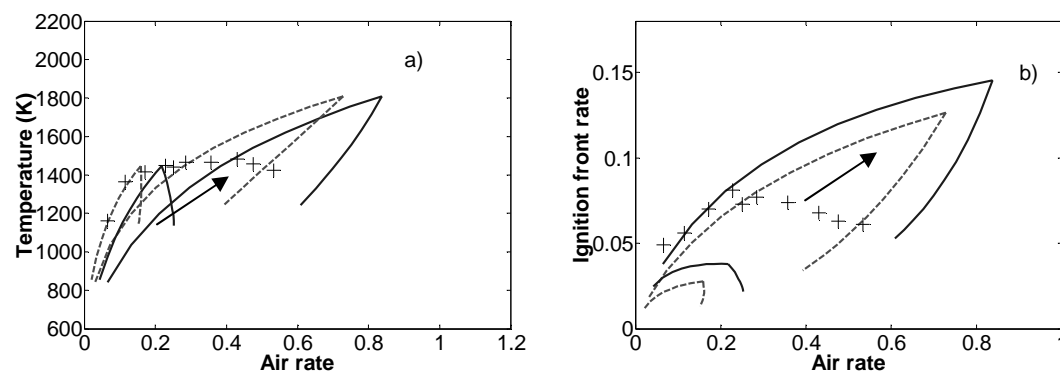


Figure 5. a) Final temperatures Eq (8) (K) vs. air rates ($\text{kg}_{\text{air}}/\text{m}^2\text{s}$). Drying times Eq. (9) (lines), Eq (10) (dashed lines). Measured results (+). b) Calculated ignition rates ($\text{kg}_{\text{fuel}}/\text{m}^2\text{s}$) vs. air rates ($\text{kg}_{\text{air}}/\text{m}^2\text{s}$), using temperature Eq (8). Drying times Eq (9) (lines), Eq (10) (dashed lines), Measured results (+). Moisture 10 %. The arrows indicate increasing temperature in Eq (2).

air ratio, the curves are displaced towards lower air rates. Also, the ignition rate is lowered, so the range for ignition becomes narrowed with increasing moisture content. The calculated temperatures are lowered at a given air ratio, and in the sub-stoichiometric region the temperature slightly increases at the same air rate when the moisture content increases. The same behaviour has been shown in measurements [9–12], where the possible range of air rates narrows down, and the temperature is negligibly influenced, or even slightly increased, when the moisture content increases.

The experimental results [9-12] show that a change in particle size had small effect on ignition rates as long as other properties were kept alike. The calculations show significantly lowered ignition rates when the particle size was increased by a factor three. The model is based on the reaction time of a particle, but in a fuel that contains a significant amount of volatile compounds, the devolatilisation starts on the surface of the particle, while the ignition front progresses downward in the bed. The reactive layer includes devolatilisation and char combustion of several layers of particles, and this is not accounted for in the model. Measurements of particles with the same form, size, content and moisture but with a difference by two times in density, showed that the ignition rate was little affected [12], see measured results in Fig 6b. However, in the calculations the ignition rate increased for the heavy particles, as shown in Fig 6b. This may be explained by the fact that a change in one particle property often is followed by changes in other properties. For example, an increased fuel density may require a change in the expression for calculation of thermal conductivity, k_s , because the inner structure of the fuel could be affected.

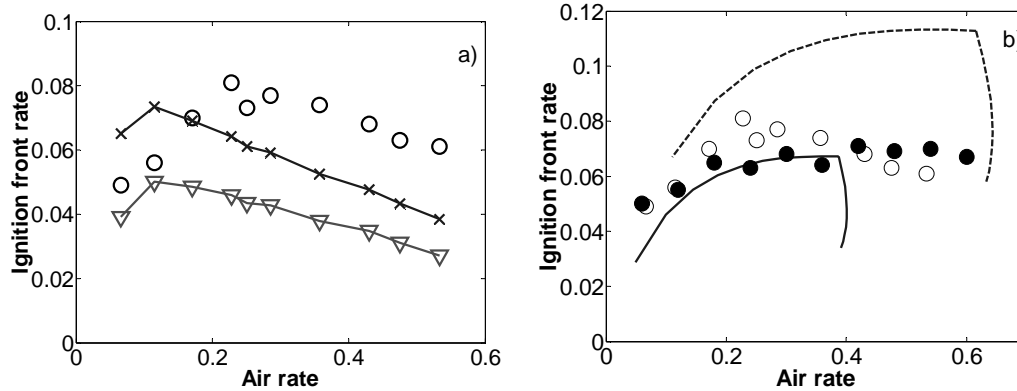


Figure 6. Ignition rates (kg_{fuel}/m²s) vs. air rates (kg_{air}/m²s). a) Measured results (circle), calculated with measured temperatures and drying time Eq (9) (line-cross), drying time Eq (10) (line-triangle). Moisture 10 %. b) Measured results wood (circle), compressed saw dust pellet (filled circles). Ignition rates calculated with temperatures Eq (7), reaction time Eq (9), wood (line), pellet (dashed line).

Acknowledgements

This work was financially supported by The Swedish Energy Agency and by CeCost.

REFERENCES

- [1] Glassman, I., "Combustion", Academic Press, New York (1987).
- [2] Thunman, H., Leckner, B., "Ignition and propagation of a reaction front in cross-current bed combustion of wet fuels" *Fuel* 80, 473-481 (2001).
- [3] Siegel, R., Howell, J.R., "Thermal radiation heat transfer" 3rd ed. Philadelphia, PA: Taylor & Francis, ISBN 0-89116-271-2 (1992).
- [4] MacLean, J.D., "Thermal Conductivity of Wood", *Trans. Am. Soc. of Heating and Ventilation Eng.*, 47, 323-354 (1941).
- [5] Koch, P., "Wood Science" 1, 203-214, (1969).
- [6] Kanury, A.M., "Flaming Ignition of Solid Fuels" *Handbook of Fire Protecting Engineering*, third edition, ISBN 087765-451-4 (2002).
- [7] Rönnbäck, M., Samuelsson, J., Tullin, C., Thunman, B., Leckner, B., "Gas composition in a fixed bed of biofuel – measurements in and above a downward propagating front" *Science in Thermal and Chemical Conversion*, 30 August – 2 September, Victoria, BC, Canada, (2004).
- [8] Thunman, H., Leckner, B., "Mathematical modelling of combustion in bio-fuelled small boilers" Dept of Energy Conversion, Chalmers University, Göteborg (2005).
- [9] Saastamoinen, J.J., Taipale, R., Horttanainen, M., Sarkomaa, P., "Propagation of the Ignition Front in Beds of Wood Particles" *Combustion and Flame* 123, 214-226 (2000).
- [10] Gort, A., "On the propagation of a reaction front in a packed bed" Thesis, Universiteit Twente, Enschede, (1995).
- [11] Horttanainen, M., "Operational Limits of Ignition Front Propagation against Airflow in Packed Beds of Different Wood Fuels" *Energy and Fuels* 16, 676-686 (2002).
- [12] Axell, M., "Förbränningsförlopp i en bädd av biobränsle" Thesis for Licentiate degree, Dept. of Energy Conversion, Chalmers University of Technology, Göteborg (2000)

Adams, T. N. (1980). Combustion and Flame 39: 225-239.

Axell, M. (2000). "*Förbränningsförlopp i en bädd av biobränsle*". Lic. Eng., Dept. of Energy Technology and Energy Conversion, Chalmers University of Technology, Göteborg.

Borman, Gary L., Ragland, Kenneth W. (1998). "*Combustion Engineering*. U.S.A., WCB/McGraw-Hill.

Glassman, Irvin (1987). "*Combustion*. London, Academic Press.

Horttanainen, Mika (2001). "*Propagation of the ignition front against airflow in packed beds of wood particles*". Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta.

Kanury, A.M. (2002). "*Flaming Ignition of Solid Fuels, Handbook of Fire Protecting Engineering, third edition, ISBN 087765-451-4*."

prCEN/TS, 15370-1 "*Solid biofuels - Method for the determination of ash melting behaviour - Part 1: Characteristic temperatures method*."

Rönnbäck, M., Samuelsson, J., Tullin, C., Thunman, H., Leckner, B. (2004). "*Gas composition in a fixed bed of biofuel - measurements in and above a downward propagating front*". Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion, Victoria.

Rönnbäck, Marie, Samuelsson, Jessica, Tullin, Claes. (2002). "*Gasanalys i en brinnande bädd av biobränsle - metod och möjlighet*". SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut.

Rönnbäck, Marie, Thunman, Henrik, Tullin, Claes, Leckner, Bo (2005). "*Ignition rate in fixed biofuel beds - a model based on combustion front theory*". International Flame Research Foundation Swedish -Finnish Flame Days 2005 October 18-19, Borås.

Rönnbäck, Marie., Leckner, Bo., Tullin, Claes., Gustavsson, Lennart., Samuelsson, Jessica (2003). "*Förbränningsförlopp i en bädd av biobränsle II*". Statens Energimyndighet, Borås.

Samuelsson, J (2006). "*Conversion of Nitrogen in a Fixed Burning Bed of Biofuel*". Thesis of Lic. Eng., Dept. of Energy Technology and Energy Conversion, Chalmers Univ. of Tech., Göteborg, To be printed febr. 2006.

Samuelsson, Jessica, Rönnbäck, Marie, Tullin, Claes (2003). "*Omvandling av bränslekväve i en biobränslebädd - en experimentell studie*". Programmet småskalig förbränning. Energi-myndigheten.

Thunman, H., Leckner, B. (2001). "*Ignition and propagation of a reaction front in cross-current bed combustion of wet biofuels*". Fuel(80): 473-481.