Förbränningsegenskaper hos pellets - fysikaliska egenskaper och bränsleindex

Sven Hermansson, Peter Sundberg, Robert Samuelsson
Christoffer Boman, Markus Broström, Anders Rebbling, Dan Boström
Ida-linn Näzelius, Amit Biswas, Kentaro Umeki, Marcus Öhman

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

SP Rapport 2016:08

Förbränningsegenskaper hos pellets - fysikaliska egenskaper och bränsleindex

Sven Hermansson, Peter Sundberg, Robert Samuelsson
Christoffer Boman, Markus Broström, Anders Rebbling, Dan Boström
Ida-linn Näzelius, Amit Biswas, Kentaro Umeki, Marcus Öhman

Abstract

Combustion properties of pellets - physical properties and fuel indices

Biomass provides a source of renewable energy, which through combustion can supply heat and electricity to communities. It is a challenge to achieve efficient combustion and knowledge on how the fuel's properties affect combustion is an important means in this process. However, in the field of wood pellet combustion it is difficult to find comprehensive knowledge of how the key physical properties affect the combustion behavior. For example, how the mechanical durability and the density influence the combustion rates. Furthermore, when combusting pellets of other raw materials than pure stem wood it is crucial to be able to predict the tendencies to of slagging and emissions of fine particles. However, the fuel index tools that are today available for coal fuels are not applicable for biomass fuels. Therefore, in this work combustion tests were performed to investigate how moisture content, density and durability affect the conversion time for wood pellets. Furthermore, work was performed to develop two fuel indices: one index for prediction of slagging and one index for the prediction of emissions of fine particles.

When using stable combustion conditions, ie high temperature and abundant air supply, the results from this research project show that the physical properties of the fuel pellets have little influence on the conversion rates, while on the other hand the choice of raw material clearly shows influence. This leads to an important conclusion, namely that disturbances reported by stake holders due to variations in physical properties in domestic scale boilers more likely is induced in the ignition phase more, or caused by unknown variations in raw material. A third plausible alternative is that it could be caused by improper control or feeding systems.

The most important result from the part of the project including ash transformation issues is that a reliable fuel index for the prediction of slagging has been developed and successfully validated. This slagging index applies the contents of K, Na, Ca, Mg and Si to predict the degree of slagging problems in a fixed bed combustion device and it has been shown to be superior to other previous suggested similar indices. However, the work also shows that is a challenge to produce a general fuel index for the prediction of fine particle-emissions. Therefore, three sub-areas for separate fuel indices for phosphorous lean fuels are suggested: 1) pure stem wood fuels of low Si content, 2) ash rich forest fuels and woody energy crops, and 3) straw and grass fuels.

Key words: pellets, combustion, durability, density, fuel index, ash chemistry

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
SP Technical Research Institute of Sweden

SP Rapport 2016:08
ISBN 978-91-88349-15-6
ISSN 0284-5172
Borås

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

Innehållsförteckning

Förord **5**

Sammanfattning **6**

1 Bakgrund **8**

2 Mål **10**

3 Genomförande **10**

4 AP 1 Pelletsbränslens fysikaliska egenskapers inverkan på förbränningen **11**

4.1 Introduktion 11
4.2 Mål 14
4.3 Genomförande 14
4.3.1 Försöksplanering 15
4.3.2 Makro-TGA av enstaka pellets 16
4.3.3 Labbförsök med flera pellets 18
4.3.4 Validering i fullskala 18
4.4 Resultat 20
4.4.1 Makro-TGA av enstaka pellets 20
4.4.2 Labbförsök med flera pellets 22
4.4.3 Validering i fullskala 24
4.4.4 Bränslesammansättning 26
4.5 Slutsatser 26
4.6 Rekommenderad fortsättning 27
4.7 Måluppfyllelse 27
4.8 Källförteckning 29

5 AP2 Utveckling och verifiering av bränsleindex **31**

5.1 Bakgrund 31
5.2 Mål 32
5.3 Genomförande 32
5.3.1 Generering av bränsleindex 32
5.3.2 Validering av bränsleindex 36
5.4 Resultat & Diskussion 38
5.4.1 Slaggningsindex 38
5.4.2 Partikelindex 41
5.5 Slutsatser 48
5.6 Rekommenderad fortsättning 48
5.7 Måluppfyllelse 48
5.8 Referenser 50

6 AP1 – Bilaga 1 **52**

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

Förord

Projektet har genomförts som ett samarbete mellan SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Sveriges Lantbruksuniversitet SLU, Umeå Universitet, Luleå Tekniska Universitet, SCA Bionorr, KLm Energi AB och Janfire AB.

Projektutförarna vill rikta ett särskilt tack till finansiärerna Energimyndigheten, Skellefteå Kommun, SCA Bionorr, KLm Energi AB och Janfire AB, vilka möjliggjort detta projekts genomförande. Ett särskilt tack utgår även till Fredrik Anderholdt Helgesson, Ylva Carlborg, Gustav Häggström och Johan Sjölander, dåvarande studenter vid civilingenjörsprogrammet i energiteknik vid Umeå Universitet, och som utfört delar av labbförsöken i arbetspaket 1.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

Sammanfattning

God kunskap om ett bränsles grundläggande inverkan på omvandlingsprocessen är en förutsättning för att i tillämpad skala nå låga emissionsnivåer och hög verkningsgrad. Här framstår pelletsbränslens fysikaliska egenskapers inverkan samt väl fungerande bränsleindex som viktiga kunskapsluckor. I dagsläget saknas emellertid till stor del kunskap om exempelvis pellethållfasthetens inverkan på omvandlingsprocessen och de bränsleindex för slaggning som finns kolförbränningsområdet är inte applicerbara på biobränslen. Inom detta projekt har därför forskning genomförts med syftet att öka kunskapen inom dessa två områden.

Inom projektet har forskningsarbete utförts för att öka kunskapsnivån kring fysikaliska pelletsegenskapers inverkan på omvandlingsförloppet samt för att ta fram två bränsleindex för prediktion av slaggning och partikelemissioner. Förbränningsförsök i labbskala och villskala har genomförts för att påvisa inverkan av pellets fysikaliska egenskaper på omvandlingstid. 21 olika pelletssorter har undersökts, av fyra olika råvarublandningar av gran- och tallspån. I samband med ett av förbränningsförsöken undersöktes även RFID-teknikens potential att hjälpa till med att uppnå spårbarhet av ett bränsleflöde. Indexet för slaggning togs fram utifrån resultat från kontrollerade förbränningsförsök i undermatad pelletsbrännare (20 kW) av 31 st. olika pelleterade biobränslen (8 olika stamveds-, 2 energiveds-, 9 olika grot-, 4 olika bark-, 2 olika salix-, 2 olika vetehalm-, 2 olika rörflen- samt 2 olika hampapellets), samt statistisk utvärdering genom s k t-test där signifikanta skillnader i asksammansättning och askhalt mellan olika grader av slaggningsproblem kvantifieras. Arbetet med partikelindex utfördes experimentellt med nya förbränningsförsök i samma undermatade pelletsbrännare (20 kW) och delvis utifrån resultat från samma försökserier som för slaggningsindexet. Dessa kompletterades dessutom med data från andra tillgängliga studier. Sammantaget användes data från sju separata studier med 13 st olika sortiment av skogsbränslen (stamved, energived, grot, bark m m), energiskog (salix, poppel) och vetehalm. Dessutom inkluderades 9 st försök där sameldning mellan sådana biobränslen och torv utförts.

Forskningen kring de fysikaliska egenskaperna hos en pellets visar att, vid de stabila förbränningsförhållanden (hög temperatur och god tillgång på syre) som tagits i beaktning i denna studie, så har några entydiga skillnader i omvandlingstid för pelletar av olika densitet, hållfasthet och fukthalt, inte kunnat påvisas. Däremot visar resultaten att det föreligger en signifikant skillnad i omvandlingstid mellan olika pelletråvaror. Projekt har därmed tillfört ny och viktig kunskap inom området, genom att visa att några störningar i förbränningen vid stabil och kontinuerlig drift inte torde orsakas av variationer i fysikaliska pelletegenskaper. Därmed är en viktig följdslutsats att de problem som rapporteras av industrin troligen kan härröra antingen från kvalitetsändringar hos råvaran eller att upptändningsfasen (lägre temperatur och ojämn värmetillförsel) är mer känslig för varierande kvalitet beträffande fysikaliska egenskaper än vad förbränningen är när den väl uppnått stabilitet. Det är också möjligt att problemen orsakas av något annat än själva förbränningen, exvis inmatning eller styrning.

De övergripande resultaten från framtagandet av bränsleindex är att ett slaggningsindex har genererats där graden av slaggningsproblem på och omkring rostern i brännar- och rosterutrustning för ett biobränsle kan förutsägas utifrån dess K, Na, Ca, Mg och Si-halt. Detta slaggningsindex kan med betydligt bättre noggrannhet än tidigare framtagna index förutsäga grad av slaggningsproblem i en förbränningsutrustning. Arbetet med partikelindex visar att det är svårt att presentera ett generellt gällande index för partikelbildning. Med anledning av detta har tre sammansättningsområden (m a p Si-K-Ca) identifierats där submodeller bör utvecklas, map för fosforfattiga bränslen;

i) rena stamvedsbaserade bränslen med låg Si-halt (<120 mg/kg TS),

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

ii) övriga mer ”askrika” skogsbiobränslen och energiskog (aska >1-2%) och energiskog, och

iii) halm och gräsbränslen.

Resultat från de askkemiska studierna som innefattats av projektet är att halmbränslen uppvisar generellt sett mycket höga partikelemissioner (>150 mg/Nm3), samtidigt som att de uppvisar stor benägenhet att bilda slagg, samt att askrika skogsbiobränslen och energiskog (samt i sameldning med torv) ger upphov till mycket varierande partikelemissioner (20-200 mg/Nm^3). Det senare förklaras av komplexa askkemiska processer som bestämmer fördelning av kalium mellan olika askfraktioner. Fortsatt arbete behövs för att utvecka de askkemiska modellerna och generera applicerbara index. För rena (okontaminerade) stamvedsbränslen (<120 mg Si/kg TS) tycks det dessutom finnas ett direkt samband mellan halten kalium i bränslet och bildning av fina partiklar, vilket således kan användas som ett första index för att bedöma potentialen för partikelbildning. Analysen baseras emellertid endast på ett fåtal experiment, varvid fortsatt verifiering är nödvändig.

Utifrån tillgänglig kunskap och slutsatserna i projektet föreslås följande fortsatta aktiveteter inom området:

- Utreda inverkan av fysikaliska pelletegenskaper vid *antändningsprocessen*, kombinerat med generiska studier av strukturella skillnader i råpellets och pelletskoks för olika hållfastheter och densiteter.
- Framtagande av upptändningssekvenser som är robusta för variationer i fysikaliska bränsleegenskaper.
- Djuplodande undersökning av störningar i villapannor som tros vara orsakade av variationer i bränslekvalitet.
- Utarbetande av kostnadseffektiva metoder för mätning, styrning och reglering i villaskala för att kunna kompensera för variationer i fysikaliska bränsleegenskaper, inklusive demonstration av hur RFID kan användas för att automatiskt justera systemet för olika kvaliteter.
- Fortsatt utvärdering och utveckling av här föreslagna bränsleindex för ökad precision och applicerbarhet.
- Generera partikel- och slaggningsindex för P-rika biobränslen.
- Generera mer valideringsresultat från fullskale-rosterutrustning där massbalanser vad gäller slaggbildning och partikelemissioner kan slutas.
- Fortsatt kartläggning av de grundläggande askkemiska processerna, både i system som domineras av ask-systemet K-Ca-Si, men även med inverkan av t ex aluminium och svavel (relevant för olika additiv), samt i asksystem där även fosfor finns.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

1 Bakgrund

Pellets är en energibärare med potential att anpassas utifrån både dagens och framtidens behov och krav, beträffande råvarusammansättning, additiv och fysikaliska egenskaper. De kvalitetsstandarder som idag existerar för bränslepellets är relativt innehållsfattiga med avseende på kemiska och fysikaliska parametrar. Trots det finns det osäkerheter kring hur de ingående parametrarna påverkar förbränningen. Standarderna bör därför kompletteras med relevanta parametrar för bedömning och kvalitetssäkring av ett pelletsbränsles applicerbarhet i användarledet. Denna kunskap är viktig för att:

i) styra och optimera råvaruproduktionen, pelleteringen och hanteringen pelletsbränslet och
ii) utveckla ny teknik samt förbättra befintlig för förbränning, rökgasrening och askhantering – inte minst för säkrad svensk miljöteknikexport.

Två delområdena inom termokemisk omvandling av biomassa som är viktiga för en förbättrad kunskap om pelletsbränslen samt förbättrad standardisering av densamma är: *bränsleomvandling* och *askkemiska aspekter*. Bränslets förbränningsegenskaper, m a p kemisk och fysikalisk karaktäristik, ger fundamental kunskap för utformning av förbränningsanläggningar och deras drift. Kunskaper om hur ett bränsles fysikaliska egenskaper, skapade ur produktionsprocessen, ger ökade möjligheter för flexiblare utformning av pelletsbränslen och förbränningsanläggningar. Beträffande asksidan finns generellt ett visst samband mellan mängd askbildande element i bränslet och omfattningen av problemen. Dock är det i många fall askans sammansättning, i kombination med termisk och kemisk miljö, som är avgörande för om det blir problem eller ej. Sammankopplat med vilka förutsättningar som förbränningen ger (fysikaliska bränsleegenskaper, samt omvandlingsteknik) ger detta förutsättningarna för fenomen som slaggning på rosten, beläggningsbildning/korrosion och partikelemissioner. För att få en pellets som både är bra att tillverka, transportera och elda bör därför den pågående grundläggande forskningen kring askans beteende i pelletsförbränning i ett utvecklat skede kopplas samman med kompletterande kunskaper kring pelletens specifika egenskaper utifrån dess produktionsutformning, och presenteras på ett sådant sätt att industrin kan tillgodogöra sig informationen. Lämpligt paketerad information i form av ett så kallat bränsleindex som inkluderar dessa nödvändiga ingredienser bedöms ha stor potential att förbättra standardisering och integrering av bränslekedjan. Kan detta dessutom kombineras med kunskap om hur de fysikaliska egenskaperna hos en pellets kan inverka på förbränningen och asktransformationen skapas ytterligare möjligheter att styra bränsle och förbränning till hög effektivitet och låga emissioner.

Detta projekt är en fortsättning på det avslutade projektet ”Förbränningskaraktärisering och förbränningsteknisk utvärdering av olika pelletbränslen P30646-1” och på delar av det pågående projektet ”Förbränningsegenskaper hos pelleterade biobränslen - forskning för framtida kvalitetssäkrade och konkurrenskraftiga bränslekedjor P30646-2”. I syntesen av det inledande projektet, P30646-1, konstaterades att betydande framsteg gjorts kring förståelsen för askans beteende då askrika bränslen nyttjas – även fosforrika sådana. Dessutom identifierades några punkter vara av stor vikt, och som motiverar fortsatt forskning inom området:

1) utökad samverkan och integrering gentemot råvarusidan och bränsleproduktionsledet, samt skapande av ett helhetsperspektiv gentemot hela bränslekedjan,
2) bränsleomvandlingen och dess koppling till askkemin,
3) grundläggande kunskapsuppbyggnad kring askkemiska förlopp, samt
4) omsättning av kunskaper i relevanta och användbara kvalitetsverktyg för industrin.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

Inom det delvis parallellt genomförda projektet P30646-2 (”Förbränningsegenskaper hos pelleterade biobränslen - forskning för framtida kvalitetssäkrade och konkurrenskraftiga bränslekedjor”) möjliggjorde därför Energimyndigheten fördjupning av de fundamentala kunskaperna inom den komplexa askkemin för nya råvarutyper. Dessutom gavs uppdraget att i två förstudier i samverkan med pellets- och förbränningsindustrin undersöka nyttan av fördjupad kunskap kring de fysikaliska pelletsegenskapernas inverkan på förbränningsförloppet, samt nyttan av att sammanfoga kemiska och fysikaliska egenskapers inverkan på askproblematik i ett så kallat bränsleindex. I förstudien om bränsleindex klarlades tillsammans med pellets- och förbränningsindustri, hur ett sådant bränsleindex lämpligen bör definieras, utformas och valideras för att vara användbart för olika branschaktörer. Förstudien visar att de föreslagna index för biobränslen som idag finns tillgängliga är mycket begränsade och ej generellt applicerbara för att kvantitativt bedöma potentiella ask- och emissionsrelaterade problem. Branschen är intresserad av att i första hand ta fram bränsleindex som bör kunna svara på frågorna:

1) vilken grad av slaggproblem kan förväntas då ett visst bränsle förbränns i en viss eldningsutrustningskategori (med fokus mot brännare och rostanläggningar), samt
2) vilken koncentration av fina askpartiklar (< 1 µm) kan förväntas i de råa rökgaserna då ett visst biobränsle förbränns i en viss typ av anläggning.

Med anledning av förstudiens utfall, gavs därför i uppdrag inom detta projekt att l ta fram dessa två bränsleindex så att dessa kan användas av avnämnare för att prediktera slaggning och partikelemission.

I förstudien kring pelletsegenskaper som genomfördes i projektet P30646-2 (”Förbränningsegenskaper hos pelleterade biobränslen - forskning för framtida kvalitetssäkrade och konkurrenskraftiga bränslekedjor”) medverkade Janfire AB, Ariterm AB, Skellefteå Kraft AB, Värmeprodukter AB, ENA Energi AB, Jönköping Energi AB, Växjö Energi AB, BooForssjö Energi AB, Stora Enso Bioenergi AB, SCA Bionorr, EON Värme AB, Neova AB, Fortum, Vattenfall, Pelletsförbundet och SLU. Flertalet av pelletstillverkarna och anläggningstillverkarna välkomnade mer kunskap kring inverkan av densiteten, mekanisk hållfasthet, råvaran och fukthalten på förbränningsprocessen. För de småskaliga anläggningarna upplevdes varierande pelletskvalitet som mycket problematiskt. Även om A1-standard medger en viss flexibilitet i kvalitet beträffande densitet, hållfasthet och fukthalt måste tillverkarna i praktiken hålla mycket jämn kvalitet. Ökade kunskaper inom området bedömdes då kunna leda till både mer flexibel och lönsam pelletsproduktion och mer flexibla och konkurrenskraftiga pannor och kaminer. Den tillgängliga informationen i vetenskaplig litteratur var dock inte tillräcklig för att kunna förklara de fenomen som beskrivs av både pelletsindustrin och förbränningsindustrin, samt hade iakttagits i inledande laborativa observationer.

Densiteten beskrivs i litteraturen inte ha någon signifikant inverkan på omvandlingstiden av en bränslepartikel. Parameterstudierna i litteraturen sträcker sig emellertid enbart från normala trädensiteter upp till en (enda) moderat pelletsdensitet. De potentiella effekterna på förbränningsprestanda av de högre densiteterna, vilka bekräftas av pelletsindustri och -användare som önskvärda, för att uppnå en hög hållfasthet, finns ej undersökta. Delar av industrin anger dessutom att den hårda och lättransporterade pelleten tenderar att orsaka antändningssvårigheter (enhälligt) och förhöjda förbränningstemperaturer (flera anläggningstillverkare). Det senare misstänks dessutom kunna kopplas till högt materialslitage och ökade emissioner. Här finns alltså en klar koppling till förutsättningar för askproblematik. Kompletterande labbförsök vid LTU med industriellt framtagen pellets av moderat till hög densitet, är i linje med observationerna – utbränningstiden ökade närmast tröskellikt vid ett visst gränsvärde mot hög densitet, vilken tidigare i litteraturen alltså ej undersökts. Förändringen ses i inledande analys med elektronmikroskop kunna bero på en generisk förändring i strukturen av pelleten, men hur

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

detta är sammankopplat med produktionsparametrar och övriga fysikaliska bränsleparametrar är ej känt.

Vidare uppger flera av de tillfrågade industriaktörerna att fukthalten verkar påverka pelletens hållfasthet under förbränningen. Höga fukthalter verkar kunna leda till söndersprängning av pellets, vilket orsakar kortare utbränningstid med förändrade krav på utrustningsutformning. Emellertid är kritiska fukthaltsnivåer, samt hur detta kan tänkas samverka med densitet och mekanisk hållfasthet, oklart.

Sammanfattningsvis visar förstudien att kunskap kring pelletsegenskapers inverkan på förbränningen efterfrågas av industrin, men till stor del saknas i dagsläget. Bedömningen görs att tillämpad forskning inom området har potential att bidra till ökad flexibilitet och lönsamhet i dagsläget både hos pelletsindustrin och hos tillverkare av småskalig förbränningsutrustning, samt bidra med viktig kunskap till forskningen kring utformning av framtidens pelletsbränslen av nya råvaror. Med anledning av detta har det genomförts ett arbetspaket som djupgående undersöker inverkan av densitet, mekaniska hållfasthet och fukthalt hos pellets på förbränningsprocessen.

2 Mål

Målen för projektet i helhet var att:

- Generera bränsleindex som skall kunna nyttjas av bränsletillverkare, anläggningstillverkare och kunder för att beskriva slaggningsproblematiken samt potentiella emissionsfaktorer vad gäller emissioner av fina askpartiklar i brännare och rostanläggningar.
- Utvärdera och validera framtagna bränsleindex mot ny experimentella data från labb och fullskaleförsök, samt att producera tre vetenskapliga artiklar som kommer att ingå i doktorsavhandlingar.
- Bestämma vilken inverkan som variationer i fysikaliska pelletsegenskaper, t ex densitet, fukthalt och mekanisk hållfasthet, har på förbränningen. Knutet till detta är även målet att producera en vetenskaplig artikel och en licentiatuppsats.
- Utifrån ett förbränningsperspektiv ge utlåtanden till pellets- och förbränningsindustrin kring hur vissa egenskapskombinationer kan ge upphov till särskilda omständigheter relevanta för askkemiska aspekter och design och/eller reglering av förbränningsutrustning för små- och närvärmeskalan.

3 Genomförande

Projektet har genomförts i två arbetspaket (AP): AP 1 Pelletsbränslens fysikaliska egenskapers inverkan på förbränningen, och AP 2 Utveckling och verifiering av bränsleindex.

Arbetet har delats in i en inledande teoretisk process, en laborativ fas och en slutlig validering i fullskala. Den teoretiska inledningen har innefattat litteraturstudier och försöksplanering. Den laborativa fasen har innefattat förbrännings- och asktransformationsförsök i labbskala, genomförda vid Umeå Universitet, Luleå Tekniska Universitet och SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut. Validering i fullskala har genomförts i samarbete med Skellefteå Kraft och Janfire. Ingående beskrivning av de olika faserna och dess resultat beskrivs under respektive AP-kapitel.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

4 AP 1 Pelletsbränslens fysikaliska egenskapers inverkan på förbränningen

AP1 ”Pelletsbränslens fysikaliska egenskapers inverkan på förbränningen” har utförts av SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut tillsammans med Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU), Umeå Universitet (UmU), Janfire och SCA Bionorr. Genomförare har främst varit Peter Sundberg (SP) under handledning av Sven Hermansson och Claes Tullin (SP). Markus Broström (UmU) har bistått med rådgivning och laboratorieresurser. Robert Samuelsson (SLU) har bistått med pellets samt stött med dataanalys. Delar av labbförsöken har genomförts av Fredrik Anderholdt Helgesson, Ylva Carlborg, Gustav Häggström och Johan Sjölander, studenter vid civilingenjörsprogrammet i Energiteknik vid Umeå Universitet. AP1 har finansierats av Energimyndigheten, Skellefteå Kommun och Janfire.

4.1 Introduktion

Underlag från både pelletstillverkare och –användare har gett en kvalitativ bild om vilka oönskade effekter som kan uppstå vid förbränning av pellets med olika fysikaliska egenskaper. Observationer från användare har till exempel indikerat att pellets med hög densitet kan vara svår att antända, att de kan uppvisa en längre omvandlingstid och att de kan ge upphov till en högre förbränningstemperatur. Det har också observerats att en hög fukthalt på pelleten kan orsaka så kallad ångsprängning, vilket i sin tur påverkar förbränningsförloppet. De viktigaste resultaten från litteraturstudien och djupintervjuerna presenteras nedan.

Pellets skiljer sig i grunden signifikant från oprocessade träbränslen [1]. Vanliga träbränslen karaktäriseras av den struktur som materialet naturligt fått i tillväxtprocessen, med icke-isotropa fibrer och kapillärer. I en pellets har trästrukturen slagits sönder i mindre korn (storleksordningen millimeter), vilka sedan åter sammanfogats till en ny enhet genom högt tryck och hög temperatur. På så vis kan exempelvis sågspån användas för att forma ett helt nytt lättransporterat bränsle, med annorlunda partikelstruktur; i tillverkningsprocessen kan både densitet, hårdhet, hållfastet och fukthalt varieras för önskat resultat.

Inom pelletstillverkningen pågår sedan lång tid tillbaka forskning kring sambanden mellan dessa olika parametrar [2-6]. Forskningen kring pellets har hittills främst varit inriktad på att tillverka en pellets som är effektiv att producera och transportera. Hittills har dessvärre utvärderingsstudier kring förbränningsegenskaper specifikt för pellets – ”hur brinner egentligen de pellets som produceras?” – varit lätträknade. De förbränningsstudier som finns tillgängliga är framför allt inriktade på jämförelser mellan pellets av olika sorters råvaror, för att undersöka möjligheten till användning av andra råvarukällor än rent trä, samt förbränningsstudier med pellets av konstanta fysikaliska egenskaper [7-11]. Emellertid är det vanskligt att frikoppla råvarans inverkan på förbränningen från de fysikaliska egenskaperna. Kemin ger sitt bidrag till förbränningen och fysiken (mass- och värmetransport) ger sitt. En viss kombination av egenskaper skulle exempelvis kunna leda till en omvandlingsprocess som är ogynnsam för en specifik råvara, och vice versa. Detsamma gäller för pellets av den mest vanliga råvaran – sågspån.

I förstudien har signaler fåtts från både pelletstillverkare och användarsidan om att variationer i en pellets fysikaliska egenskaper kan påverka förbränningen i de fullskaliga pannorna. Pellets av högre densitet upplevs vara svårare att antända, kräva längre

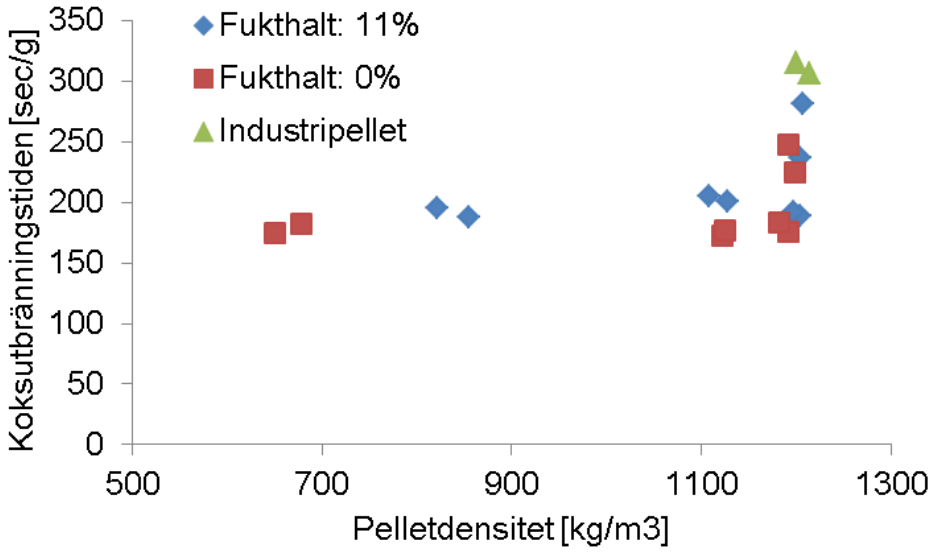
© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

omvandlingstid och ge upphov till högre maxtemperaturer. Kopplat till detta upplevs även förhöjda stoftutsläpp och materialslitage. Emellertid är detta enbart kvalitativa observationer, varför en vetenskaplig undersökning av fenomenen välkomnas av flera av de tillfrågade. Det behövs helt enkelt kunskap om vad en brännare förbränningsmässigt förväntas klara av, vilket i dagsläget saknas hos brännartillverkarna. Bättre kunskap kring detta bedöms kunna medverka till förbättrad bränsleflexibilitet i förbränningen, genom förbättrad utformning och styrning av förbränningsanläggningar. Den ökade flexibiliteten i förbränningen som detta bedöms kunna bidra till, tillåter även pelletstillverkarna att öka sin flexibilitet och lönsamhet i produktionen.

De generella studier om förbränning av bränslen med olika fysikaliska egenskaper som finns tillgängliga är i princip uteslutande utförda på solida bränslepartiklar – d.v.s. kol-, trä- och kokspartiklar huggna ur ett större stycke (kolbitar, träflis, utmejslade träbitar). För denna typ av termiskt stora partiklar (d.v.s. partiklar som under omvandlingen utvecklar temperaturgradienter inom partikeln) finns ett antal studier publicerade [14-24]. Exempelvis är inverkan på förbränningen utifrån densitet, fukthalt och fördelning mellan flyktiga komponenter och koksåterstod relativt väl undersökt. Experimentella och teoretiska kunskaper kring pellets specifika fysikaliska egenskapers – exempelvis densitet, hållfasthet/hårdhet, kornstorlek och fukthalt – inverkan på förbränningen är dock begränsade. Tre studier har identifierats där förbränning av en sorts pellets modellerats och jämförts mot labbförsök [19,21,22]. Resultaten visar att det för just den sorts pellets som undersökts inte är någon stor skillnad i resultat jämfört med solida träpartiklar. För parameterstudier kring pelletspecifika egenskaper finns dock endast en studie publicerad. Denna gjordes för kornstorlek, och visade sig ha låg inverkan [21] på omvandlingstiden. Emellertid saknas i litteraturen information kring hur densitet, fukthalt och mekanisk hållfasthet påverkar förbränningen, specifikt för pellets.

Studier utförda vid Luleå Tekniska Universitet [25] visar att pelleteringsprocessen mycket väl kan ha signifikant inverkan på koksomvandlingen. I Figur 1 ses resultaten från förbränning av pellets av olika densiteter, i form av utbränningstiden för koksåterstoden. För låg och medelhöga densiteter är resultaten i linje med Thunmans studier kring densitetens inverkan (för pellets testades dock där endast en pelletssort); förändringar upp till 1100 kg/m3 har ingen större inverkan på förbränningsförloppet. Däremot ses i Biswas studier en tydlig inverkan av densiteten inom de industriellt relevanta marginalerna, över 1100-1200 kg/m3, motsvarande bulkdensitet 650-700 kg/m3. SEM (elektronmikroskopering) visar att detta verkar kunna bero på en förändring i den inre strukturen, på grund av plastisk deformation under pelletstillverkningen. För solida träpartiklar har den inre icke-isotropa värme- och masstransporten beskrivits utifrån transport längs träets kapillärsystem [26]. I den enda pelletsspecifika förbränningsmodelleringsstudie som påträffats i litteraturen, har antagits att porositeten växer homogent inom partikeln, och utgått ifrån att den isotropa porositeten ökar linjärt utifrån omvandling och krympning [22]. Denna modell antar dock att materialet är helt homogent, och eventuell plasticering av materialet har inte inkluderats. Sammanfattningsvis är det alltså till stor del oklart hur den inre strukturen i en pellets, och därmed förbränningen, påverkas av en förskjutning mot högre pelletsdensiteter.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB



Figur 1: Inverkan av pelletdensitet på koksutbränningstiden vid labbförsök, från vetenskaplig publikation [25].

Intervjuerna och litteraturstudien i förstudien ger även signaler om att fukthalten kan ha signifikant inverkan på pelletens hållfasthet under förbränningen. Höga fukthalter verkar kunna leda till sönderspräng ning av pelletsen, möjligtvis genom ångexplosion i partikelns inre. Sönderspräng ningen ger upphov till ett större antal partiklar av mindre storlek, vilket medför ett snabbare förbränningsförlopp, en tätare bädd och en kortare koksbädd. I förlängningen leder detta till att design och drift av en anläggning, på samma sätt som för hårdhet och densitet, behöver anpassas för bibehållen driftkvalitet, jämfört med pellets som håller ihop under omvandlingen. Denna anpassning uppges av svaranden i förstudien i dagsläget vara svår att åstadkomma, eftersom grundläggande kunskaper kring sönderfallen saknas; även här välkomnas en vetenskapligt upplagd studie kring fenomenet. Beträffande orsak till sönderspräng ningar har Grönli [27] försökt mäta trycknivån inne i träpartiklar för att se om ett högt interpartikulärt tryck kan vara orsaken. Slutsatsen var att trycket i de studerade solida träbitarna inte var tillräckligt högt. Emellertid kan misstänkas att förhållandena i en pellets kan bli annorlunda; en pellet skulle i tillverkningsprocessen tänkas bli tillräckligt tät för att bygga upp de tryck som krävs för sönderspräng ning. Även här förefaller alltså finnas en koppling mellan pelletens inre struktur och förbränningsförloppet.

De variationer i bränsleegenskaper som rapporterats i förstudien, uppges främst ha betydande inverkan på eldning i småskala (gård och villa) och i mindre närvärmeskala. De större när- och fjärrvärmepannor som eldas antingen helt eller delvis med pellets är något mer robusta än de mindre pannorna. I de större pannorna utgör pelletens hållfasthet under transport och inmatning den kritiska parametern; får man in bränslet i pannan så klarar man av att elda det relativt bra, även om det innebär utmaningar med driftjusteringar. Undantag är en användare som menar att en jämn kvalitet även här är viktig, samt att sönderfall av pellets på rosten ger en hel del merarbete i drift, i och med att bädden blir kompaktare och känsligare för genomblås och sticklågor. Man uppger även att alternativa råvaror är intressant för framtiden, men att det i de flesta fall av ekonomiska skäl idag inte är aktuellt. När de nya råvarorna blir aktuella kommer det däremot att ställas högre krav på driftjustering efter råvaru- och egenskapskvalitet. För de något större pelletspannorna kommer alltså i framtiden möjligheten att spåra kvalitetsändringar samt att korrigera för dessa i driften att vara den kritiska parametern. I och med att de större närvärmepannorna kan motivera något större investeringar bedöms att det i detta segment finns marginal för nya drift- och reglerstrategier samt kvalitetsspårningssystem. Här framstår Radio Frequency Identification (RFID) som en

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

intressant metod. Med hjälp av RFID kan då förändringar i kvalitet spåras kontinuerligt genom att bränsleflödet förses med spårnings-taggar med information om kvaliteten, vilka läses av automatiskt i pannan. Ett sådant system skulle i praktiken kunna leda till förbättrad bränsleflexibilitet. I ett utvecklat skede skulle även de småskaliga pannorna kunna dra nytta av detta; som nämnts ovan visar förstudien att de småskaliga pannorna har lägst flexibilitet beträffade förändringar i bränslekvalitet och därför högst behov av kvalitetsspårning. Alla tillfrågade pelletproducenter uppger att de för att tillfredsställa det småskaliga segmentet måste hålla en mycket jämn egenskapskvalitet hos sin pellets. Även om klass A1-standarden medger moderata variationer i fukthalt, bulkdensitet och hållfasthet, medför en förändring av någon av dessa parametrar förbränningsstörningar och att pelletsen då beskylls för att vara dålig. Liknande erfarenheter uppges från mindre närvärmeanläggningar, vilka skall kunna gå helt per automatik. Pellettillverkarna upplever detta som ett stort problem. Man anser att man måste kunna tillverka pellets enligt de begränsade frihetsgrader som ändå finns i gängse europeiska standarder, och att pannorna skall kunna klara av detta. Den naturligt varierande kvaliteten hos sågspånsråvaran försvårar dessutom. En mindre avvikelse i pelletkvalitet i en pelletbatch kan därför innebära att den måste säljas som industrikvalitet, vilket medför minskade inkomster. Tillverkarna av anläggningar håller med; man upplever att man inte vet vilka krav som ställs på brännarna för att kunna elda pellets av något varierande kvalitetet beträffande fysikaliska egenskaper. I detta avseende är alltså de tillfrågade pellettillverkarna och panntillverkarna ense – bättre grundläggande kunskaper kring pelletskvalitetens inverkan på förbränningsprocessen har potential att medverka både till förbättrad lönsamhet i pellettillverkning och till flexiblare och mer konkurrenskraftiga pannor.

4.2 Mål

Målet med AP1 har varit att:

- Bestämma vilken inverkan som variationer i fysikaliska pelletsegenskaper, tex densitet fukthalt och mekaniska hållfasthet, har på förbränningen. Knutet till detta är även målet att producera en vetenskaplig artikel och en licentiatuppsats.

- Utifrån ett förbränningsperspektiv ge utlåtanden till pellets- och förbränningsindustrin kring hur vissa egenskapskombinationer kan ge upphov till särskilda omständigheter relevanta för askkemiska aspekter och design/eller reglering av förbränningsutrustning för små- och närvärmeskalan.

Ett delmål i projektet har även varit att undersöka om det är principiellt möjligt att uppnå spårbarhet i ett bränsleflöde med hjälp av RFID-teknik. Tillämpat i industriell skala kan en god spårbarhet ge möjligt att, redan då pelleten är på väg in i en brännare eller en panna, få information om pelletens beskaffenhet. Den informationen kan i sin tur användas för att justera driftförhållandena i ett led att optimera förbränningen.

4.3 Genomförande

Under projektets gång har träpellets med olika fysikaliska egenskaper testeldats i anläggningar på labbskalenivå hos UmU och SP, samt på villabrännarnivå hos Janfire. Pelleten valdes ut för att uppnå en variation i fukthalt, densitet och hållfasthet som ryms inom gällande pelletsstandard.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

Övervägande andel träpellets som användes hade producerats av SLU, på deras försöksanläggning på Röbäcksdalen. Pelleten var ett urval av pellets från Energimyndighetens projekt P20569-3 ”Produktionsteknisk plattform för svensk pelletsindustri”. För försöken på villbrännarnivå nyproducerades även en kompletterande mängd pellets. Råvaran bestod av typiska spånråvarublandningar som används i svensk pelletsproduktion.

Under projektets gång hölls ett fortlöpande informationsutbyte med en referensgrupp som bildats specifikt för projektet. Detta gav möjlighet att presentera resultat från de senast genomförda försöken och samtidigt få återkoppling på dem, för att därefter ta gemensamt beslut om fortsatta försök.

4.3.1 Försöksplanering

Försöksdesignen utarbetades i samråd med projektdeltagarna, baserat på deras erfarenheter dels från forskning om pellets, dels från industriell tillverkning av pellets. Försöksdesignen utmynnade i ett planeringsschema där labbförsök stod för basen i resultatinsamlingen. Resultaten från labbförsöken validerades därefter i fullskala. Inför varje försöksomgång genomfördes planeringsmöten för att aktualisera försöket, bestämma slutligt försöksupplägg och säkerställa resurser.

Det senaste årtiondet har ett arbete pågått för att förena nationella pelletsstandarder i en gemensam internationell standard, EN*plus.* Denna är i sig är uppdelad i olika kvalitetskategorier beroende på vem slutanvändaren är. I och med att den är baserad på ett flertal nationella standarder är kraven generellt sett relativt vida, såsom spannet för fukthalt och bulkdensitet: oavsett underkategori är kravet att pelletens fukthalt ska vara lika med eller lägre än 10,0 %, och bulkdensiteten ska återfinnas mellan 600 – 750 kg/m3. EN*plus* ställer dock tuffare krav på hållfasthet, som måste vara lika med eller högre än 98,0 % för ENplus A1, kategorin avsedd för den privata marknaden. Med detta i åtanke fanns önskemål att genomföra försök där några pelletssorter hade hög hållfasthet.

Totalt testeldades 21 pelletssorter under projektets gång, fördelat i fyra olika grupper baserat på vilken råvara som använts; samma råvara har använts inom respektive grupp. Under testerna följdes omvandlingstid upp för att kartlägga tid för avgasning och koksförbränning. Grupperindelningen framkommer i Tabell 1.

Tabell 1: Gruppindelningen för pelleten. Parameterkolumnerna anger inom vilket spann pelleten låg.

Beteckning	Fukthalt (%)	Pelletdensitet (kg/m3)	Bulkdensitet (%)	Hållfasthet (%)
Grupp 1	5,9 - 11,7	1130 - 1270	555 - 755	90,2 - 97,5
Grupp 2	5,3 - 9,5	1215 - 1250	645 - 735	88,5 - 95,8
Grupp 3	5,7 - 8,3	1175 - 1270	630 - 715	95,0 - 97,2
Grupp 4	6,2	1245	680	98,8

Ett urval av parameterdata (densitet, fukthalt, hållfasthet) för den använda pelleten återfinns i Tabell 3 i Bilaga 1.

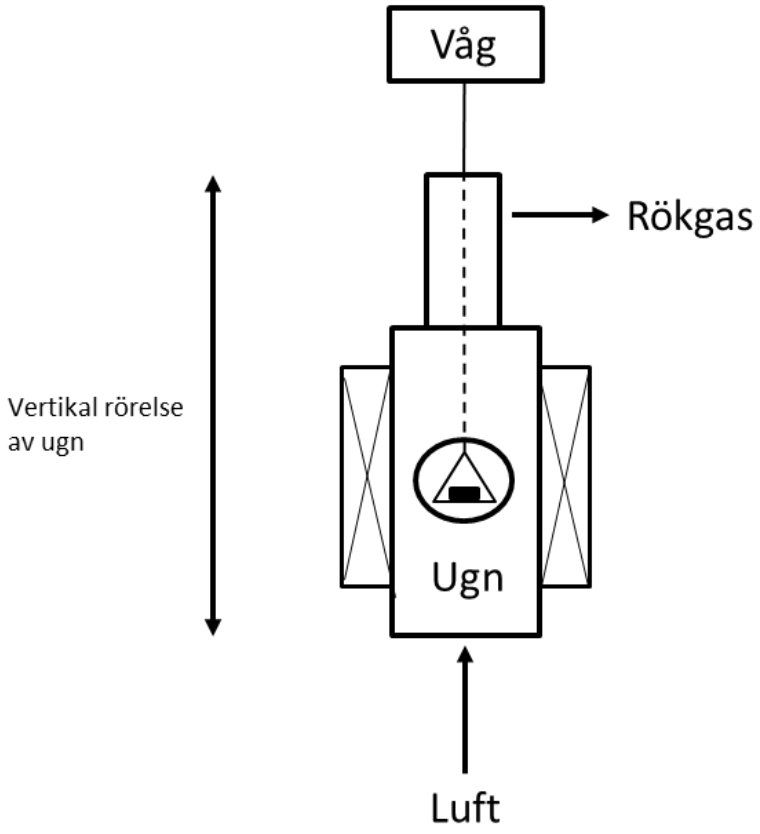
Samlingsprover från respektive grupp skickades in för analys av bland annat värmevärde, flykthalt, askhalt, samt C-, H-, S-, och O-halt. Värmevärde gav en möjlighet att, tillsammans med uppmätt omvandlingstid, beräkna det specifika energiinnehåll som grupperna hade samt den effekt som utvecklas vid förbränning. En sammanställning av analysvärdena finns i Bilaga,

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

4.3.2 Makro-TGA av enstaka pellets

Pelleten analyserades enstycksvis i labbskala hos UmU i en förbränningsugn. Försöksuppställningen gav möjlighet att undersöka förbränningsegenskaperna hos ett biobränsle genom termogravimetrisk analys (TGA). Under TGA mäts massavgång som funktion av tid eller av temperatur under kontrollerade och av användaren väl definierade förhållanden.

Ugnens temperatur gavs av termoelektriska element. Förvärmd luft tillsattes i botten av ugnen genom en flödesriktare, utformad för att ge ett laminärt flöde fram till biobränslet. En laboratorievåg gav uppföljning på massavgången under försökets gång, och på vågen hängdes en nätkorg där biobränslet placeras inför försöken. Ugnen i sig var upphängd i ett stativ och kunde genom ett pneumatiskt system höjas/sänkas längsmed stativet. I toppen av ugnen satt en pneumatisk lucka som öppnades upp i samband med att ugnen höjdes/sänktes. Ungen var försedd med ett siktglas som möjliggjorde visuell överblick av förloppet. Principiell bild av försöksuppställningen visas i Figur 2.



Figur 2: Försöksuppställning hos för TGA av enstaka pellets vid UmU.

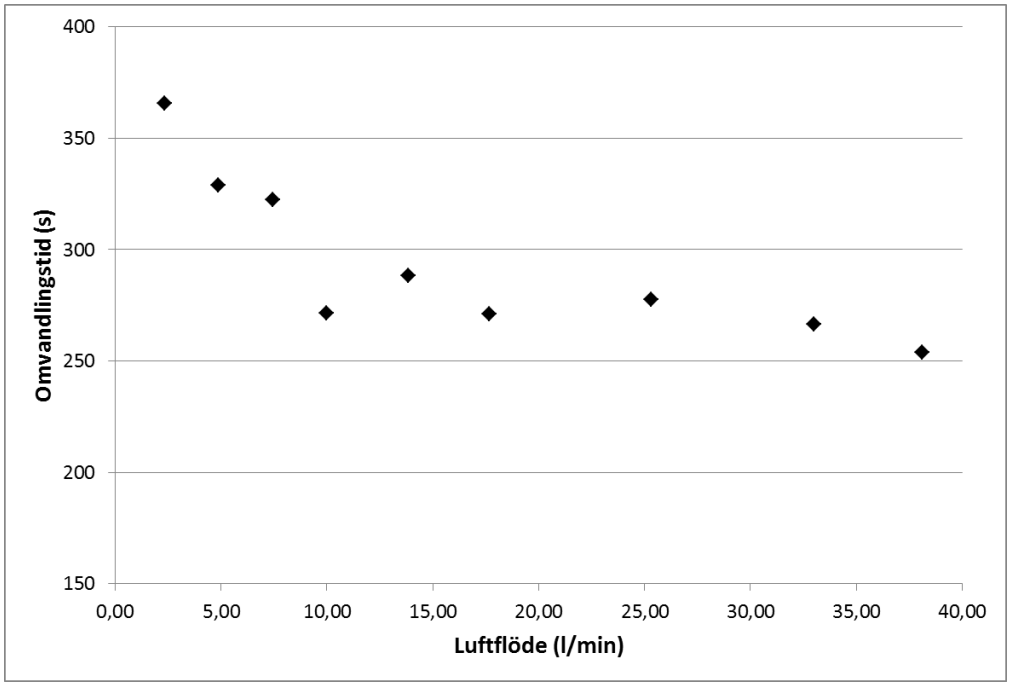
Inför försöken genomfördes en beräkning för att teoretiskt bestämma tillräckligt högt luftflöde för att transporten av värme och syre in till partikeln inte ska bli begränsande för förbränningsförloppet. Här beräknades Dammköhler-talet (Da), kvoten mellan koksförbränningshastigheten och transporthastigheten av syre till partikeln, samt Biot-talet (Bi), kvoten mellan pelletens interna och externa motstånd mot värme- och masstransport.

Om Bi-talet är mycket större än 1, är pelleten att betrakta som termiskt tjock, vilket innebär det att tillgången av värme och reaktanter vid dess yta är större än vad som kan distribueras in i den. Om dessutom Da-talet är mindre än 1, innebär det att det finns

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

tillräckligt med syre vid partikelytan för att detta inte ska bli begränsande. Ett stort Bi-tal och ett litet Da-tal krävs alltså om man ska kunna studera kinetiken vid ytan som oberoende av transportbegränsningar. För att erhålla dessa värden, vid en temperatur som är relevant för förbränning, krävs relativt höga strömningshastigheter runt partikeln. Överslagsberäkningar ger att hastigheter över ca 15 m/s i bulkflödet vid 800 ˚C är önskvärda vid 800 ˚C, framför allt för att uppnå Da-tal som närmar sig 1.

Det exakta bulkflödet runt partikeln i makro-TGA-reaktorn är emellertid svårt att uppskatta, då flödet inte är helt jämnt. Framför allt var det svårt att bestämma den diameter som luftströmmen har när den är i nivå med pelleten. Luften inkom via flödesriktaren, vilken hade en diameter av ca 5 cm. Luftströmmen fördelas dock över större en area innan den nådde fram till pelleten, men det var uppenbart att ett perfekt pluggflöde inte uppnåddes. Den diametern för kärnflödet uppskattades därför till 7,5 cm vid beräkningarna. Beräkningen av Biot-tal visade då att ett ingående luftflöde att vid ett luftflöde av 10 l/min motsvarade $Bi_{värme}$ = 2,8, Bi_{mass} = 1,5 och Da = 10. För att validera beräkningarna gjordes ett separat förbränningstest där luftflödets inverkan på förbränningshastighet undersöktes. Resultatet från luftflödestestet visas i Figur 3.Vid ca 10 – 15 l/min planar kurvan ut vilket indikerar att god värme- och masstransport in till pelleten föreligger. Resultaten indikerar alltså att den faktiska hastigheten vid pelleten är betydligt högre än vad som approximerats i beräkningarna och att ett flöde över 10-15 l/min i praktiken ger tillräcklig tillförsel av värme och syre till partikeln för att dessa faktorer inte ska bli begränsande. Önskvärt blev därmed att under försöken ansätta luftflödet till minst 10 l/min. Data från beräkningen finns presenterade i Bilaga 1.



Figur 3: Luftflödets påverkan på omvandlingstiden. Totalt testades nio olika luftflöden. Medelvärdet för varje individuellt luftflöde markeras i figuren med svarta punkter. n=3.

För försöken värmdes ugnen upp till drifttemperatur 800 ˚C och luftflödet ansattes till 10 l/min. Försök med högre luftflöde genomfördes, men gav upphov till svängningar av nätkorgen där pelleten låg, vilket i sig bedömdes kunna störa förbränningsförloppet. För varje försök ändslipades pelleten för att ligga nära 10,0 mm i längd, och diameter och längd bokfördes för beräkning av volym. Därefter placerades en pellets i nätkorgen, varpå ugnen höjdes upp över pelleten. Via siktglaset filmades försöken och från filmerna erhölls tidpunkter för antändning, slocknad flamma och slocknad koks, varifrån tidåtgång för

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

avgasning och koksförbränning kunde bestämmas. Massavgången för pelleten registrerades via laboratorievågen.

4.3.3 Labbförsök med flera pellets

Pelleten testeldades flerstycksvis i labbskala hos SP Energiteknik i Borås i en förbränningsugn. Försöksuppställningen gav möjlighet att undersöka förbränningsegenskaperna hos ett biobränsle genom rökgasanalys under kontrollerade och av användaren väl definierade förhållanden. Dessa försök var en uppskalning från TGA-försöken, då ett flertal opreparerade pelletar användes.

Ugnen var utformad som en rörcylinder av ca 1,5 m höjd med en inre diameter av ca 7 cm. Biobränslet tillsattes genom en toppöppning genom vilken en nätkorg sänktes ned i ugnen. Ugnen värmdes upp av termoelektriska element. I ugnen tillsattes ouppvärmd luft i botten. Rökgaser insamlades via en rökgassond som var kopplad till ett analysinstrument för uppföljning av NO, O2, CO och CO2. Temperaturgivare längs ugnen gav temperaturer under olika stadier av förbränningen.

För försöken värmdes ugnen upp till 800 ˚C, vilket ansattes som drifttemperatur. Luftflödet ansattes till 30 l/min, vilket motsvarade en lufthastighet av 0,5 m/s (Bi_{massa} = 8, $Bi_{värme}$ = 5, Da = 6). För varje försök valdes sju pelletar ut av liknande längd, 10 ± 2 mm, dock inte ändslipade, som placerades i nätkorgen. Nätkorg sänktes därefter ned i ugnen och från rökgasanalysen kunde tidåtgång för avgasning och koksförbränning bestämmas.

4.3.4 Validering i fullskala

Pelleten testeldades flerstycksvis på villabrännarnivå hos Janfire i Åmål och motsvarade de förutsättning och förhållanden som råder ute hos privatkund. Försöksuppställningen gav möjlighet att undersöka förbränningsegenskaperna hos ett biobränsle genom rökgasanalys, temperatur- och massavgångsuppföjning under av användaren definierade förhållanden.

En brännare, Janfire Flex A, var monterad på en prototyppanna, Integral Typ 25. Vid sidan av brännaren var en våg placerad och på denna satt matningssystemet till brännaren: ett litet tråg för biobränslet, med en kort matarskruv därunder som matade in bränslet i brännaren. Matningssystemet och brännaren var sammankopplade via en mjuk damask. Två siktglas var installerade ovanför förbränningsutrymmet; en för visuell kontroll av förbränningsförloppet och en som används av en IR-tempgivare. Temperaturer för förloppet insamlas dels via IR-tempgivaren, dels också via en tempgivare som var installerad i botten av brännarkoppen. En uppföljning på rökgasernas tillstånd insamlas via en rökgasprob som var kopplad till ett analysinstrument för analys av temperatur, NOx, O2, CO och CO2. Försöksuppställningen visas i Figur 4.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

Figur 4: Försöksuppställning hos Janfire. Matningssystemet är uppställt på våg och en damask förbinder detta med brännaren. IR-mätaren är placerad vid siktglaset, rakt ovanför förbränningsutrymmet.

Inför varje försök fylldes tråget med pellets och tillsatt vikt pellets bokfördes. Brännaren startades och fick uppnå stabil drift med testpelleten. Rökgasfläkten justerades för att uppnå en O2-halt i rökgaserna på ca 12 % under drift. Vid behov justerades massflödet av pellets för att vara så lika som möjligt mellan de olika försöken. Efter ca 10 minuter med stabil drift stoppades inmatningen och vikt och tidpunkt för stoppögonblicket bokfördes. Rökgasfläkten fick vara i drift även efter stopp samma förhållanden under försökets gång. Tidpunkt när flamman i bädden slocknat samt tidpunkt för när CO-halten nått 30 ppm bokfördes, vilket sedan användes för att bestämma tidåtgång för avgasning och koksförbränning.

Det genomfördes också försök att med hjälp av RFID-teknik uppnå spårbarhet i ett bränsleflöde. På SLU:s försöksanläggning på Röbäcksdalen hade pellets producerats och placerats i 100 l:s kärl, i väntan på transport. I kärlen placerades därefter fem stycken

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

RFID-taggar, inskannade med löpnummer, ned i pelleten. RFID-taggarna fick sedan följa med leveransen från SLU i Umeå till Janfire i Åmål. I samband med förbränningsförsöken hos Janfire togs RFID-taggarna upp ur pelleten och lästes av för att se att de klarat transporten. De släpptes därefter ned i tråget och transporterades via matningssystemet ned i brännarkoppen. RFID-taggarna togs därefter upp för att kontrollera att informationen i dem gick att läsa av.

4.4 Resultat

Resultaten från de olika försöken har sammanställts för att ge en resultatbild uppdelat på de undersökta parametrarna: fukthalt, densitet och hållfasthet. Tabell 2 sammanfattar resultaten.

Tabell 2: Resultatsammanfattning från försöken. Korrelationens styrka mellan omvandlingstid och aktuell parameter är förtydligad med färgton; desto mörkare färgton, desto starkare korrelation. Korrelationens riktning är angiven med uppåtriktad pil för positiv korrelation, nedåtpil vid negativ korrelation.

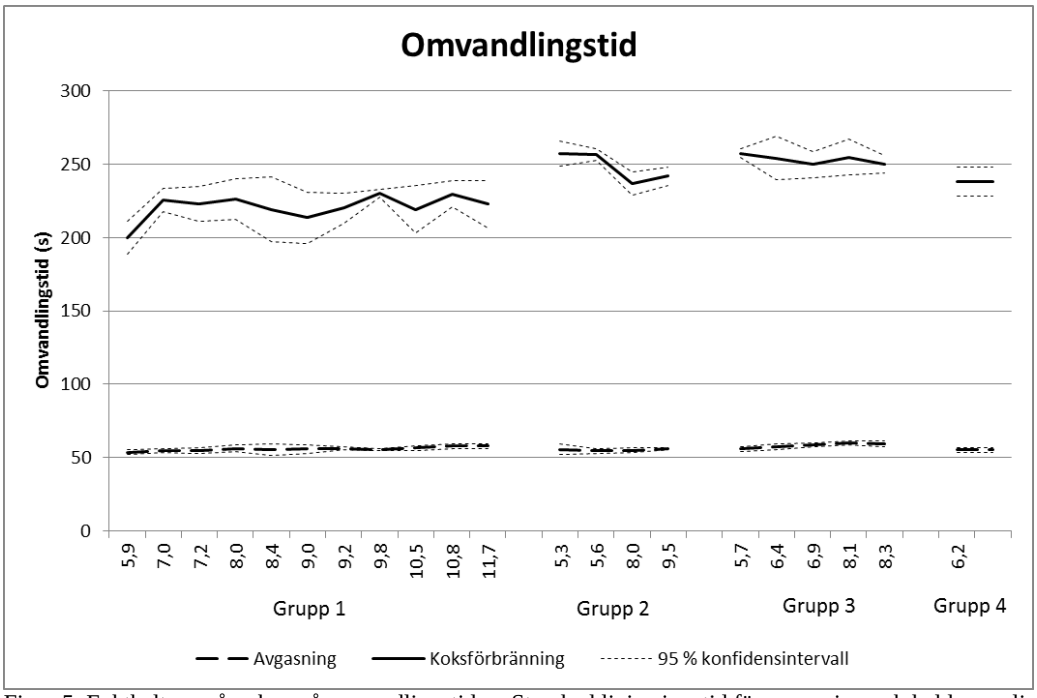
Parameter	Grupp (nr)	Plats	Korrelationens styrka och riktning
Fukthalt	1	UmU	Svag ↑
		SP	Svag ↑
	2	UmU	God ↓
		Janfire	Mycket svag ↓
	3	UmU	Obetydlig
		Janfire	God ↓
Densitet	1	UmU	Svag ↓
		SP	Mycket svag ↑
	2	UmU	Svag ↑
		Janfire	Måttlig ↑
	3	UmU	Obetydlig
		Janfire	God ↑
Hållfasthet	1	UmU	Måttlig ↑
		SP	Obetydlig
	2	UmU	Måttlig ↑
		Janfire	God ↑
	3	UmU	Svag ↓
		Janfire	Måttlig ↓

4.4.1 Makro-TGA av enstaka pellets

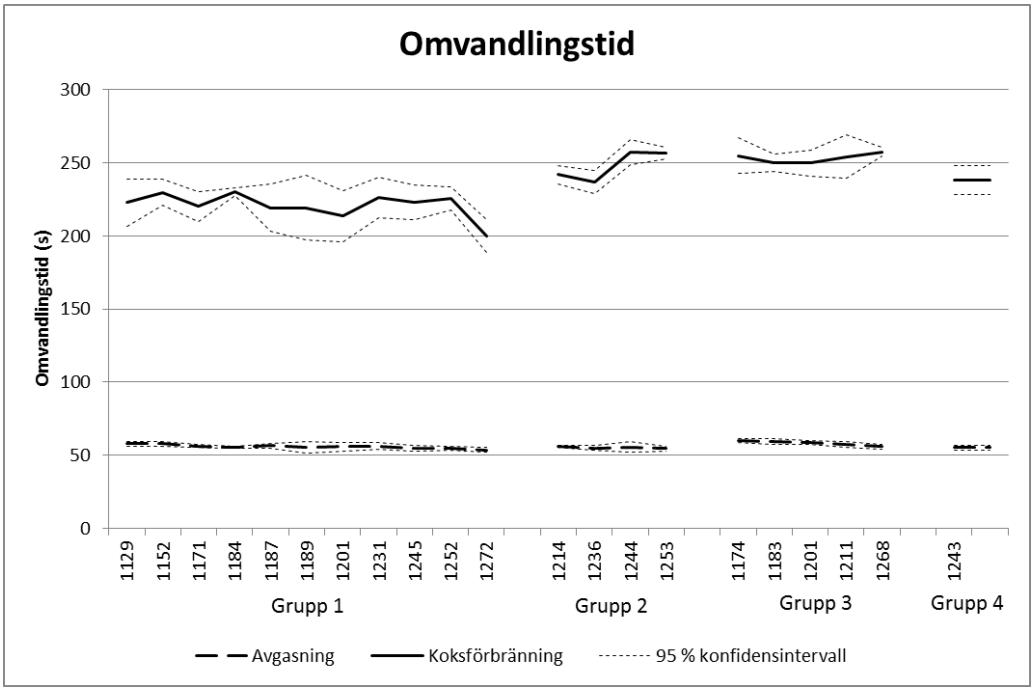
Makro-TGA av enstaka pellets genomfördes försök med samtliga pelletssorter, från samtliga grupper. Försöken visade att det, beroende på grupp, råder obetydlig till god korrelation mellan fukthalt och omvandlingstid, medan det finns obetydlig till svag korrelation mellan pelletdensitet och omvandlingstid. En måttlig korrelation kunde identfieras mellan hållfasthet och omvandlingstid för Grupp 1och 2, medan en stigande

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

omvandlingstid vid ökande hållfasthet för grupp 1 och 2, medan Grupp 3 visade på svag, negativ korrelation.

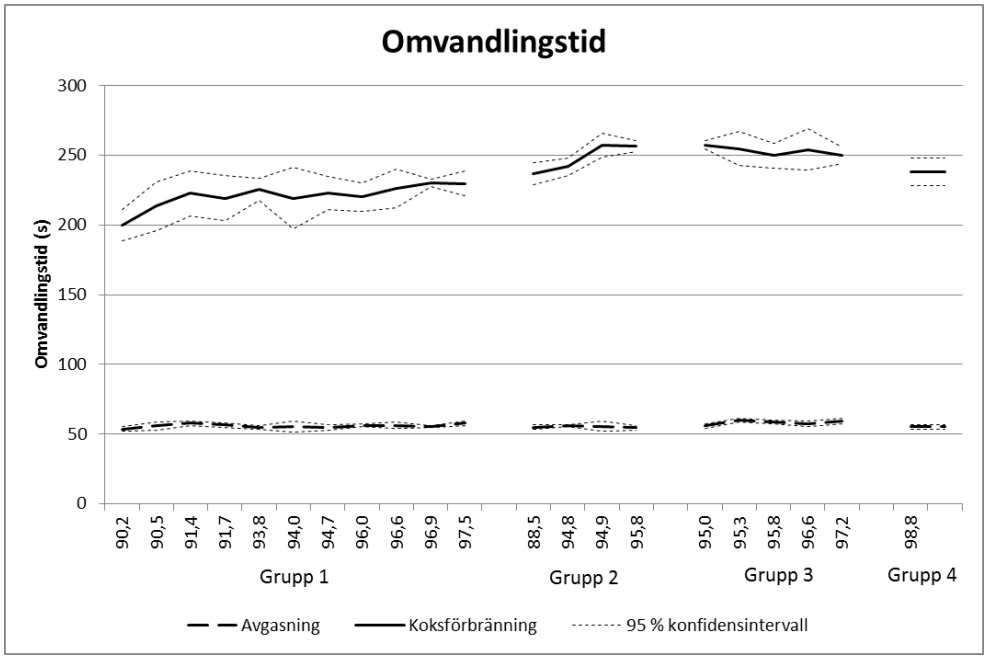


Figur 5: Fukthaltens påverkan på omvandlingstiden. Streckad linje visar tid för avgasning och heldragen linje visar tid för koksförbränning. Punktlinjer markerar 95 % konfidensintervall. Fem replikat per pelletssort, n = 5. R2, Grupp 1 = 0,323; R2, Grupp 2 = 0,713; R2, Grupp 3 = 0,014.



Figur 6: Pelletdensitetens påverkan på omvandlingstiden. Streckad linje visar tid för avgasning och heldragen linje visar tid för koksförbränning. Punktlinjer markerar 95 % konfidensintervall. Fem replikat per pelletssort, n = 5. R2, Grupp 1 = 0,274; R2, Grupp 2 = 0,404; R2, Grupp 3 = 0,035.

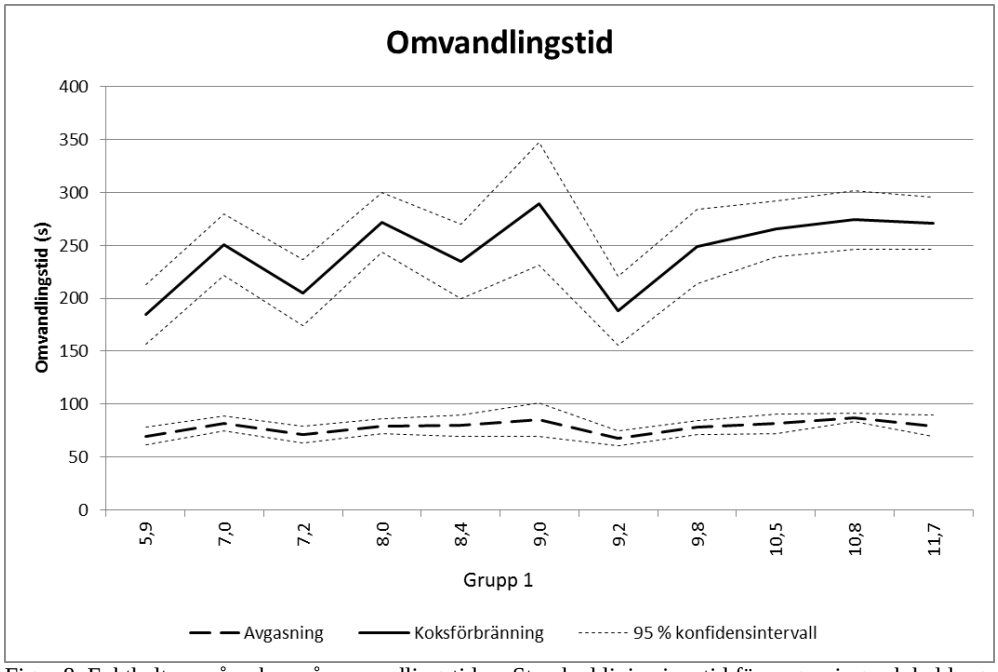
© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB



Figur 7: Hållfasthetens påverkan på omvandlingstiden. Streckad linje visar tid för avgasning och heldragen linje visar tid för koksförbränning. Punktlinjer markerar 95 % konfidensintervall. Fem replikat per pelletssort, n = 5. R2, Grupp 1 = 0,566; R2, Grupp 2 = 0,641; R2, Grupp 3 = 0,388.

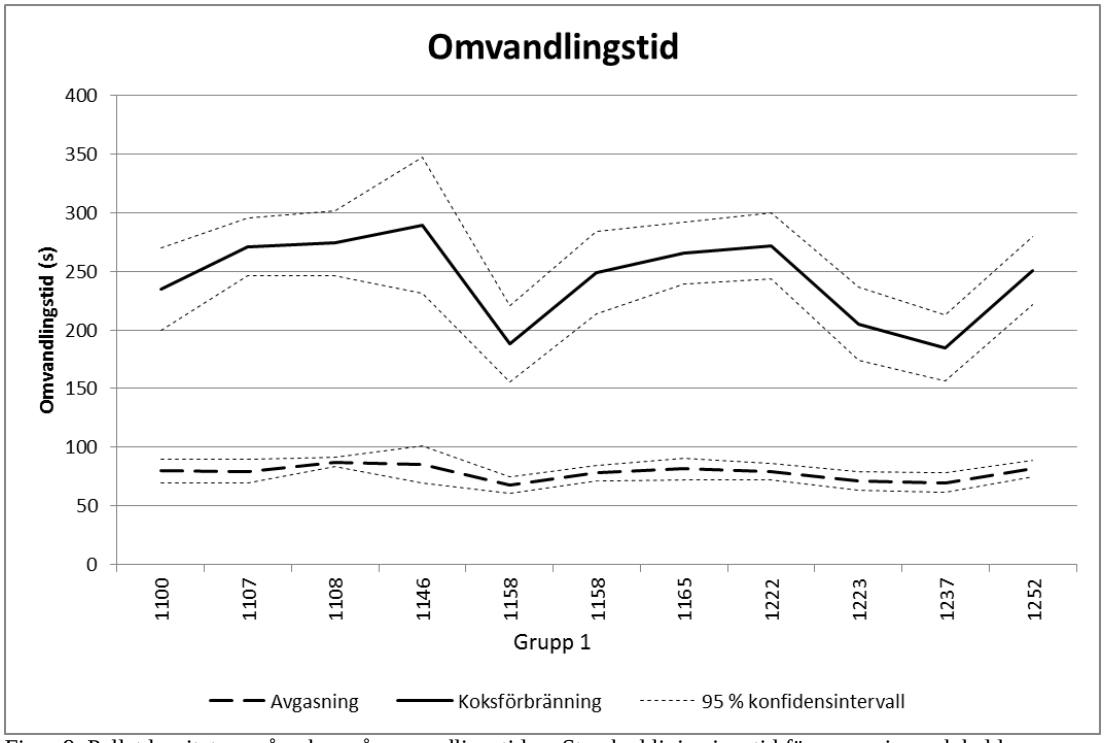
4.4.2 Labbförsök med flera pellets

Hos SP genomfördes försök pellets från Grupp 1. Försöken visade att det råder svag korrelation mellan fukthalt och omvandlingstid samt mycket svag korrelation mellan pelletdensitet och omvandlingstid. Korrelationen mellan hållfasthet och omvandlingstid var obetydlig.

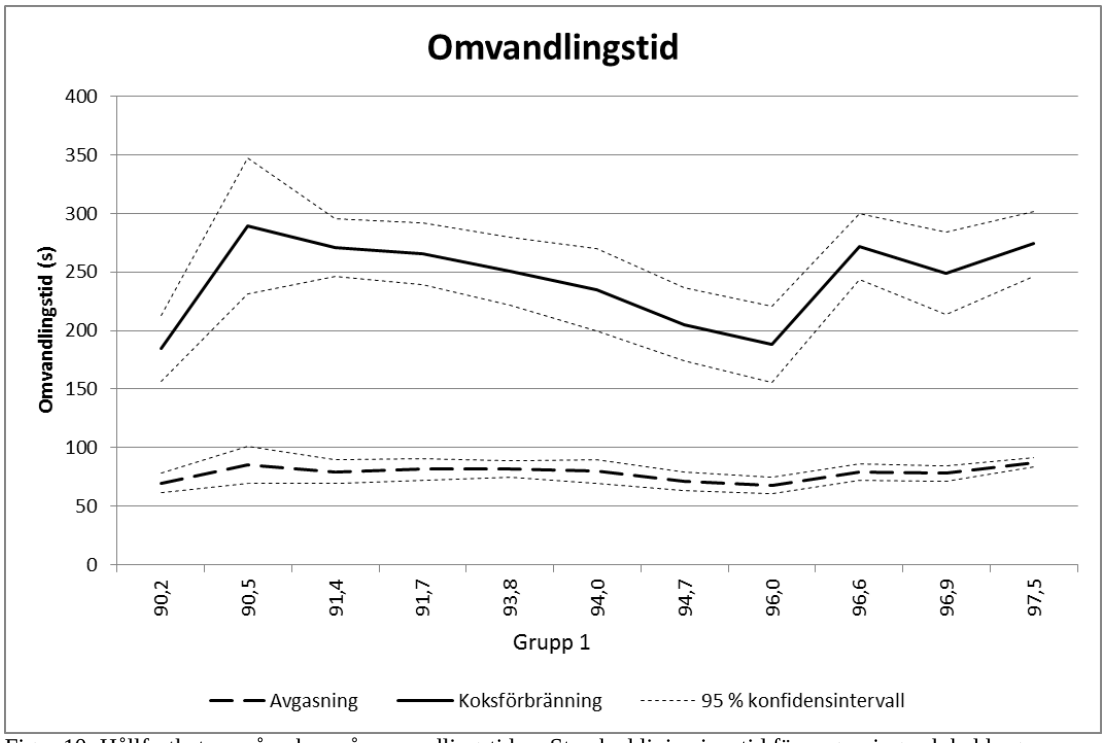


Figur 8: Fukthaltens påverkan på omvandlingstiden. Streckad linje visar tid för avgasning och heldragen linje visar tid för koksförbränning. Punktlinjer markerar 95 % konfidensintervall. Fem replikat per pelletssort, n = 5. R2 = 0,317.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB



Figur 9: Pelletdensitetens påverkan på omvandlingstiden. Streckad linje visar tid för avgasning och heldragen linje visar tid för koksförbränning. Punktlinjer markerar 95 % konfidensintervall. Fem replikat per pelletssort, n = 5. R2 = 0,148.

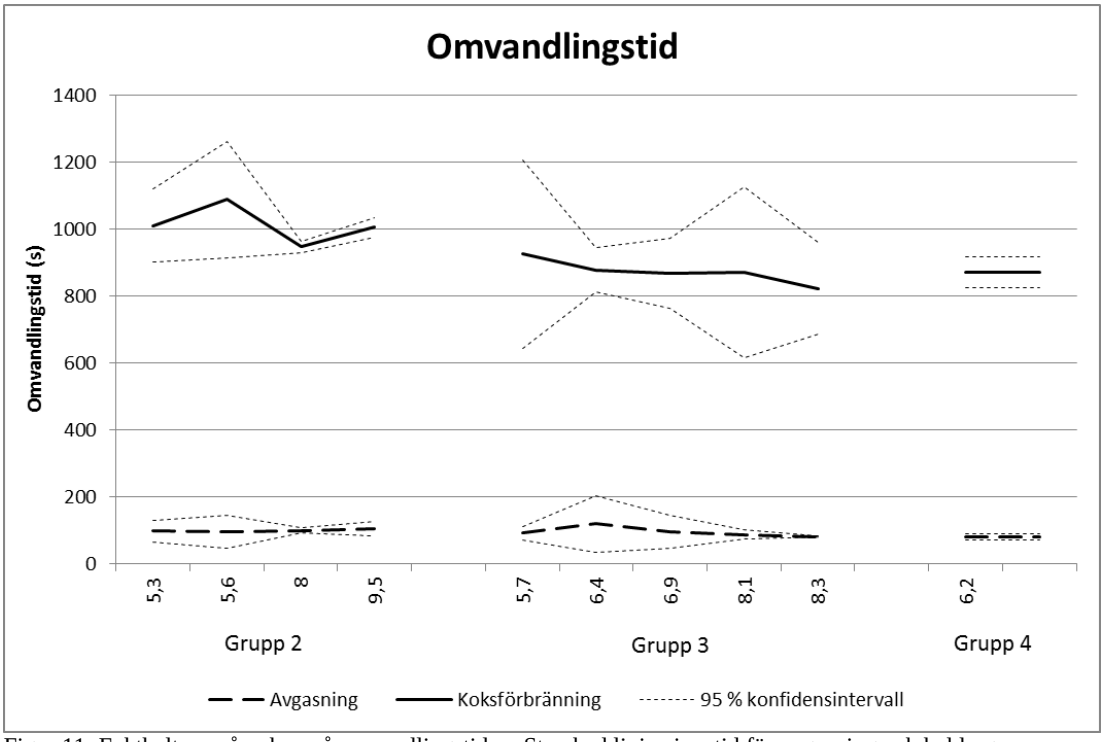


Figur 10: Hållfasthetens påverkan på omvandlingstiden. Streckad linje visar tid för avgasning och heldragen linje visar tid för koksförbränning. Punktlinjer markerar 95 % konfidensintervall. Fem replikat per pelletssort, n = 5. R2 = 0,005.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

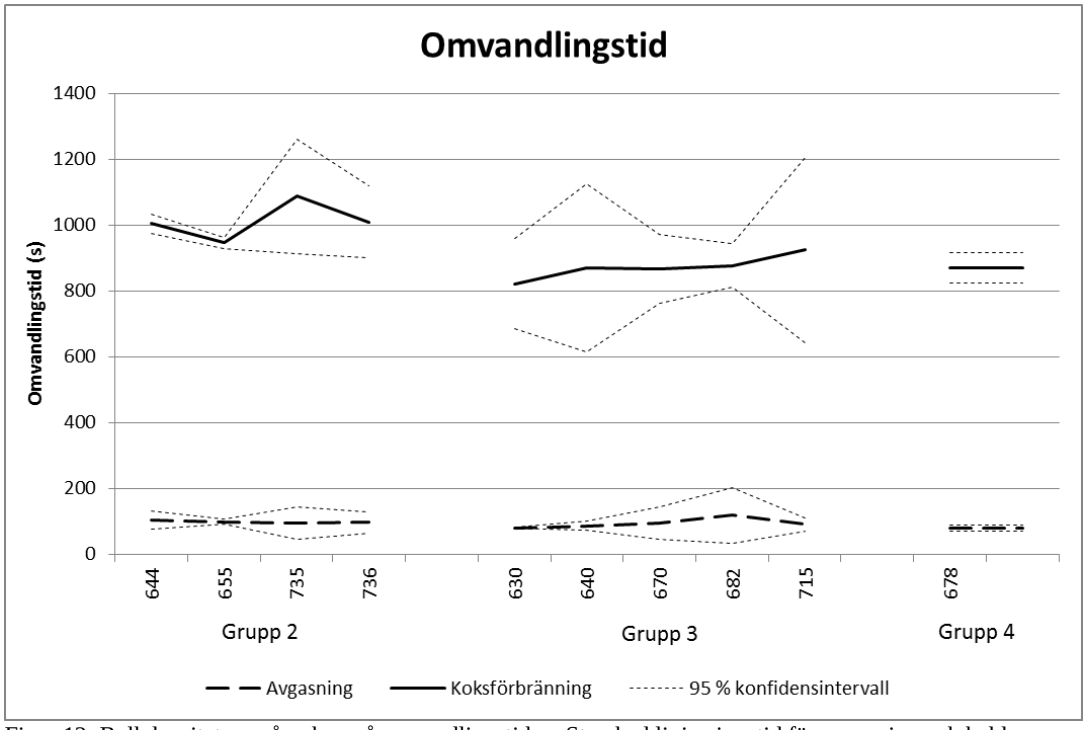
4.4.3 Validering i fullskala

Hos Janfire genomfördes försök med pellets från Grupp 2, 3 och 4. Försöken visade att det råder mycket svag korrelation mellan fukthalt och omvandlingstid för Grupp 2, medan det för Grupp 3 fanns en god korrelation däremellan. Korrelationen mellan bulkdensitet och omvandlingstid var måttlig för Grupp 2, medan det för Grupp 3 fanns en god korrelation. Korrelationen mellan hållfasthet och omvandlingstid var god för Grupp 2, där en ökande hållfasthet gav en längre omvandlingstid. För Grupp 3 gällde dock, med måttlig korrelation, ett omvänt förhållande, där en högre hållfasthet gav en kortare omvandlingstid.

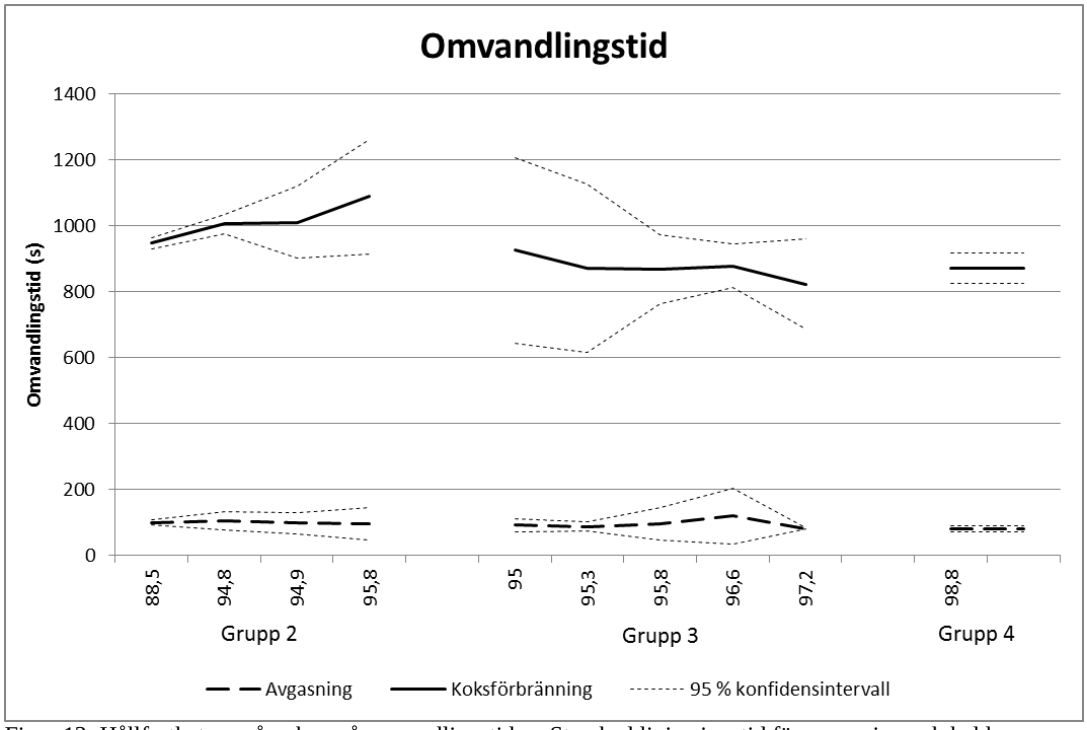


Figur 11: Fukthaltens påverkan på omvandlingstiden. Streckad linje visar tid för avgasning och heldragen linje visar tid för koksförbränning. Punktlinjer markerar 95 % konfidensintervall. Tre replikat per pelletssort, n = 3. R2, Grupp 2 = 0,231; R2, Grupp 3 = 0,827.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB



Figur 12: Bulkdensitetens påverkan på omvandlingstiden. Streckad linje visar tid för avgasning och heldragen linje visar tid för koksförbränning. Punktlinjer markerar 95 % konfidensintervall. Tre replikat per pelletssort, n = 3. R2, Grupp 2 = 0,412; R2, Grupp 3 = 0,841.



Figur 13: Hållfasthetens påverkan på omvandlingstiden. Streckad linje visar tid för avgasning och heldragen linje visar tid för koksförbränning. Punktlinjer markerar 95 % konfidensintervall. Tre replikat per pelletssort, n = 3. R2, Grupp 2 = 0,729; R2, Grupp 3 = 0,404.

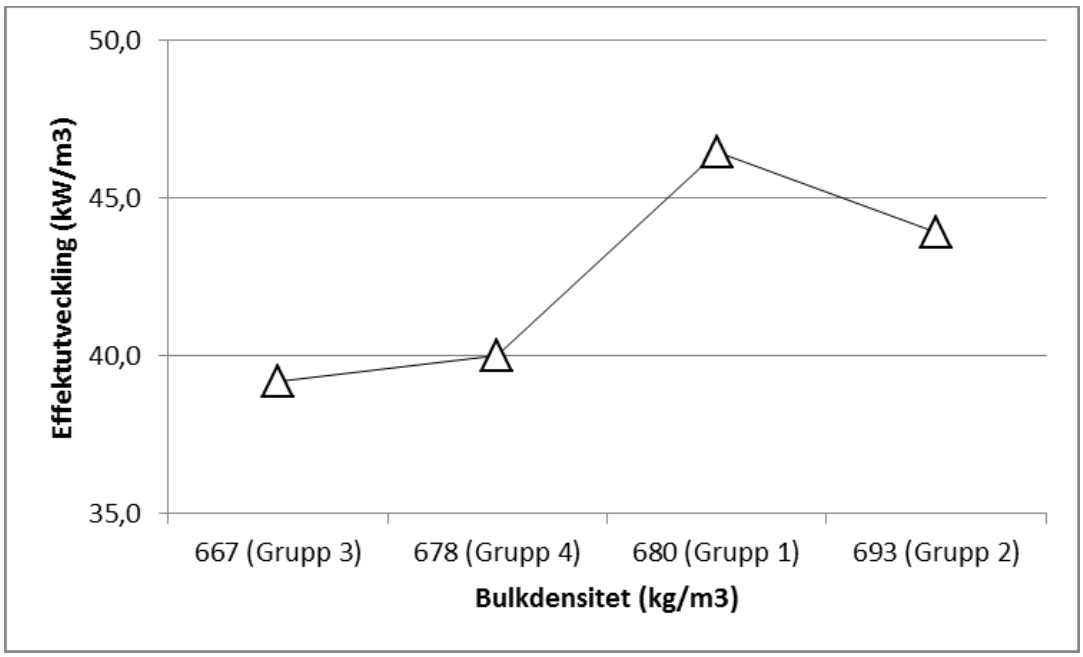
Försöket med RFID-teknik för att uppnå spårbarhet visade att samtliga RFID-taggar klarade av att transporteras från producent till slutdestination utan skador på RFID-taggarna. Även färden genom matningssystemet fortlöpte utan problem och informationen i RFID-taggarna gick att läsa av.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

4.4.4 Bränslesammansättning

Det var överlag små skillnader mellan värmevärde, flykthalt, askhalt samt C-, H-, S-, och O-halt mellan de olika grupperna, se Tabell 4.

Baserat på analyserna och de omvandlingstider som uppmätts under försöken kunde specifik effektutveckling beräknas, se Figur 14. Data från beräkningen finns i Bilaga 1, Tabell 6.



Figur 14: Effektutveckling under förbränning. Trianglar indikerar effektutvecklingen vid förbränning av en enskild pellet från respektive grupp.

4.5 Slutsatser

Försök har genomförts för att påvisa inverkan av pellets fysikaliska egenskaper på omvandlingstid. 21 olika pelletssorter har undersökts, av fyra olika råvarublandningar av gran- och tallspån. I samband med ett av förbränningsförsöken undersöktes även RFID-teknikens potential att hjälpa till med att uppnå spårbarhet av ett bränsleflöde.

Resultaten visar att, under de stabila förbränningsförhållanden (hög temperatur och god tillgång på syre) som tagits i beaktning i denna studie, så föreligger en signifikant skillnad i omvandlingstid mellan olika pelletråvaror. Några entydiga skillnader i omvandlingstid för pelletar av samma råvara men av olika densitet, hållfasthet och fukthalt vid samma förhållanden har emellertid inte kunnat påvisas. Några tecken på att en högre fukthalt genererar söndersprängning av pelleten, något som kan leda till ett snabbare förbränningsförlopp och högre förbränningstemperatur, kunde heller inte upptäckas. Ej heller kunde resultaten i den tidigare studie som visat att höga pelletdensiteter leder till längre omvandlingstid verifieras. En osäkerhet är emellertid att de generellt var relativt stor spridning i omvandlingstid för de pelletssorter som testeldades, vilket inverkar negativt på datakvaliteten. En orsak till detta kan vara att även om pelleten är producerad ur en och samma råvara kan det finnas en viss skillnad i till exempel råvarusammansättning och fraktionsstorlek mellan de individuella pelletarna.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

Den litteraturgenomgång som gjorts inom projektet visar tydligt på att det saknas entydig information om hur omvandlingstid påverkas av pelletarnas hållfasthet och densitet, trots att pelletindustrin och användarna tydligt indikerar att en inverkan finns i fullskalig applikation. Detta projekt har därmed tillfört ny och viktig kunskap inom området, genom att visa att några störningar i förbränningen vid stabil och kontinuerlig drift inte torde orsakas av variationer i fysikaliska pelletegenskaper. Därmed är en viktig följdslutsats att de problem som rapporteras av industrin troligen kan härröras från upptändningsfasen (lägre temperatur och ojämn värmetillförsel) eller att problemen orsakas av något annat än själva förbränningen. En villabrännare styrs effektmässigt genom bränslematningshastigheten, vilken i sin tur är baserad på pelletens bulkdensitet - valt effektläge påverkar matarskruvens drifttid. Jämn drift förutsätter då emellertid att pelletens specifika effektutveckling i förhållande till dess volym är lika oavsett bulkdensitet. Om man antar att kommersiell pellets har liknande variationer i bulkdensitet som i denna studie, innebär detta att en effektvariation på upp till 20 % kan åstadkommas.

De bakomliggande orsakerna till de differenser i omvandlingstid som uppkom mellan olika grupper bör undersökas vidare. Olika råvaror kan ha olika struktur, inte nödvändigtvis kopplade mot fysikaliska egenskaper, vilket kan påverka omvandlingstiden. Det skulle därför vara intressant att undersöka strukturen på pelleten i de olika grupperna med hjälp av SEM- och BET-analys, och jämföra detta mot omvandlingstid.

Försöken med RFID-teknik visade att tekniken är användbar för att uppnå spårbarhet i ett bränsleflöde. RFID-taggarna stod emot påfrestningen under transport och hantering i inmatningssystemet, där alla använda RFID-taggar var i fungerande skick och kunde delge sin information vid slutstationen. Därmed anses att RFID kan användas för att spåra bränslekvaliteter i villaskala.

4.6 Rekommenderad fortsättning

Utifrån slutsatserna från AP1 är följande fortsatta forskning inom området motiverad:

- Inverkan av fysikaliska pelletegenskaper vid upptändningsprocessen, kombinerat med generiska studier av strukturella skillnader i råpellets och pelletskoks för olika hållfastheter och densiteter.

- Framtagande av upptändningssekvenser som är robust för variationer i fysikaliska bränsleegenskaper.

- Djuplodande undersökning av störningar i villapannor som tros vara orsakade av variationer i bränslekvalitet.

- Utarbetande av kostnadseffektiva metoder för mätning, styrning och reglering för att kunna kompensera för variationer i fysikaliska bränsleegenskaper, inklusive demonstration av hur RFID kan användas för att automatiskt justera systemet för olika kvaliteter.

4.7 Måluppfyllelse

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

Mål 1: Bestämma vilken inverkan som variationer i fysikaliska pelletsegenskaper, tex densitet fukthalt och mekaniska hållfasthet, har på förbränningen. Knutet till detta är även målet att producera en vetenskaplig artikel och en licentiatuppsats.

Målet är delvis uppfyllt. Den experimentella studien har visat att, vid förhållanden som karaktäriserar stabil och jämn drift, så har de fysikaliska egenskaperna inte någon signifikant inverkan på omvandlingstiden. En licentiatuppsats har påbörjats. Ett konferensbidrag har accepterats för presentation vid en internationell biomassakonferens. Delar av resultaten kommer vidare även att användas i en vetenskaplig artikel, tillsammans med resultat från fortsatta studier om upptändningen. Anledningen till att någon vetenskaplig artikel ej publicerats är att resultaten bör publiceras tillsammans med en bredare studie som även innefattar upptändningsfasen.

Mål 2: Utifrån ett förbränningsperspektiv ge utlåtanden till pellets- och förbränningsindustrin kring hur vissa egenskapskombinationer kan ge upphov till särskilda omständigheter relevanta för askkemiska aspekter och design/eller reglering av förbränningsutrustning för små- och närvärmeskalan.

Målet är uppfyllt. Resultaten kommuniceras som att den jämna och kontinuerliga driften inte är känslig för olika egenskapskombinationer hos pelleten. Vid stabil drift verkar alltså inte de fysikaliska egenskapskombinationerna sätta några generella gränser beträffande askkemiska aspekter och design/eller reglering av förbränningsutrustning för små- och närvärmeskalan. Däremot antyder resultaten i kombination med rapporterade observationer att det snarare är upptändningsfasen eller regleringen vid upptändningsfasen som kan vara känslig för olika egenskapskombinationer.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

4.8 Källförteckning

1.W. Stelte, A.R. Sanadi, L. Shang, J.K. Holm, J. Ahrenfeldt, U.B. Henriksen, Recent developments in biomass pelletization – A review, Bio Resources. 7 (2012) 4451–4490.

2. Larsson SH, Rudolfsson M. Temperature control in energy grass pellet production - effects on process stability and pellet quality. Applied Energy. 2012;97:24-9.iew, Bio Resources. 7 (2012) 4451–4490.

3. Larsson SH, Rudolfsson M. Temperature control in energy grass pellet production - effects on process stability and pellet quality. Applied Energy. 2012;97:24-9.

4. Larsson SH, Rudolfsson M, Nordwaeger M, Olofsson I, Samuelsson R. Effects of moisture content, torrefaction temperature, and die temperature in pilot scale pelletizing of torrefied Norway spruce. Applied Energy. 2012;102(0):827-32.

5. Larsson SH, Thyrel M, Geladi P, Lestander TA. High quality biofuel pellet production from pre-compacted low density raw materials. Bioresource Technology. 2008;99(15):7176-82.

6. Samuelsson R, Larsson SH, Thyrel M, Lestander TA. Moisture content and storage time influence the binding mechanisms in biofuel pellets. Applied Energy. 2012;99:109-15.

7. Samuelsson R, Thyrel M, Sjöström M, Lestander TA. Effect of biomaterial characteristics on pelletizing properties and biofuel pellet quality. Fuel Process Technol. 2009;90(9):1129-34.

8. Gilbe C, Öhman M, Lindström E, Boström D, Backman R, Samuelsson R, et al. Slagging characteristics during residential combustion of biomass pellets. Energy & Fuels. 2008;22(5):3536-43. PubMed PMID: WOS:000259332600089.

9. Lindström E, Larsson SH, Boström D, Öhman M. Slagging characteristics during combustion of woody biomass pellets made from a range of different forestry assortments. Energy & Fuels. 2010;24:3456-61. PubMed PMID: WOS:000278851200025.

10. Rhen C, Ohman M, Gref R, Wasterlund I. Effect of raw material composition in woody biomass pellets on combustion characteristics. Biomass and Bioenergy. 2007;31(1):66-72.

11. Öhman M, Boman C, Hedman H, Nordin A, Boström D. Slagging tendencies of wood pellet ash during combustion in residential pellet burners. Biomass and Bioenergy. 2004;27(6):585-96.

12. Öhman M, Nordin A, Hedman H, Jirjis R. Reasons for slagging during stemwood pellet combustion and some measures for prevention. Biomass and Bioenergy. 2004;27(6):597-605. PubMed PMID: ISI:000224440600010.

13. C. Erlich, M. Ohman, E. Bjornbom, T. Fransson, Thermochemical characteristics of sugar cane bagasse pellets, Fuel. 84 (2005) 569–575.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

14. R. Mehrabian, R. Scharler, I. Obernberger, Effects of pyrolysis conditions on the heating rate in biomass particles and applicability of TGA kinetic parameters in particle thermal conversion modelling, Fuel. 93 (2012) 567–575.

16 C. Di Blasi, Combustion and gasification rates of lignocellulosic chars, Progress in Energy and Combustion Science. 35 (2009) 121–140.

17 C. Diblasi, Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis, Progress in Energy and Combustion Science. 34 (2008) 47–90.

18 Y. Yang, C. Ryu, A. Khor, N. Yates, V. Sharifi, J. Swithenbank, Effect of fuel properties on biomass combustion. Part II. Modelling approach—identification of the controlling factors, Fuel. 84 (2005) 2116–2130.

19 H. Thunman, B. Leckner, Influence of size and density of fuel on combustion in a packed bed, Proceedings of the Combustion Institute. 30 (2005) 2939–2946.

20 N.P.K. Nielsen, D.J. Gardner, T. Poulsen, C. Felby, Importance of temeprature, moisture content and species for the conversion process of wood residues into fuel pellets, Wood and Fiber Science. 41 (2009) 414–425.

21 D. Bergström, S. Israelsson, M. Öhman, S.-A. Dahlqvist, R. Gref, C. Boman, et al., Effects of raw material particle size distribution on the characteristics of Scots pine sawdust fuel pellets, Fuel Processing Technology. 89 (2008) 1324–1329.
22 J. Porteiro, E. Granada, J. Collazo, D. Patiño, J.C. Morán, A Model for the Combustion of Large Particles of Densified Wood, Energy & Fuels. 21 (2007) 3151–3159.

23 J. Porteiro, J. Collazo, D. Patino, E. Granada, J.C.M. Gonzalez, J.L. Miguez, Numerical Modeling of a Biomass Pellet Domestic Boiler, Energy & Fuels. 23 (2009) 1067–1075.

24. Henrik Thunman, Kent Davidsson, Bo Leckner, Separation of drying and devolatilization during conversion of solid fuels, Combustion and Flame, Volume 137, Issues 1–2, April 2004, Pages 242-250.

25. Biswas AK, Rudolfsson M, Broström M, Umeki K, Effect of pelletizing conditions on combustion behaviour of single wood pellet, Applied Energy, Volume 119, 2014, Pages 79-84

26. Henrik Thunman, Bo Leckner, Thermal conductivity of wood—models for different stages of combustion, Biomass and Bioenergy, Volume 23, Issue 1, July 2002, Pages 47-54

27. Grönli, M.G. A theoretical and experimental study of the thermal degradation of biomass. PhD. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway, 1996.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

5 AP2 Utveckling och verifiering av bränsleindex

AP2 ”Utveckling och verifiering av bränsleindex” har letts av Umeå Universitet och utförts tillsammans med Luleå Tekniska Universitet, Skellefteå Kraft samt KLm Enerig och Mekanik AB. Genomförare har varit genom Christoffer Boman, Anders Rebbling, Dan Boström, Ida-linn Näzelius och Marcus Öhman. AP2 har finansierats av Energimyndigheten, Skellefteå Kraft AB och KLm Enerig och Mekanik AB.

5.1 Bakgrund

Inom kolförbränningsområdet finns flertalet (empiriska) användbara bränsleindex för bestämning av askors tendens att smälta utgående ifrån askans kemiska elementsammansättning. Dessa index finns sammanställda och delvis omformulerade för biobränslen i Bränslehandboken som framtagits i Värmeforsks regi[i]. Det är väl känt såväl i forskarsamhället som i branschen att inget av de index som finns för kol fungerar tillfredställande för biobränslen, de ger i vissa fall dock en första indikation på potentiella risker för uppkomsten av askrelaterade driftsproblem (slaggning, beläggnings- och partikelbildning). Det borde dock finnas förutsättningar för att ta fram liknande användbara bränsleindex för biobränslen som för kol. Detta eftersom biobränslens askbildande grundämnen inte är bundna i en huvudsakligen inert mineralform samt att de mekanismer som är ansvariga för problem är starkt beroende av bränslets sammansättning.

Man bör dock skilja på vilken askssammansättning, d v s vilket problemområde man avser att beskriva; askbildning och askrelaterade problem som uppstår i eldstaden respektive askrelaterade driftsproblem som uppstår i konvektionsdelen. Man bör även i dessa index indikera för, vilken förbränningsutrustning och för vilka bränsletyper de olika indexerna är relevanta för då askbildningsprocessen skiljer sig kraftigt mellan olika asksammansättningar (t ex P↔Si systemet) i biobränslen.

I en nyligen utförd förstudie som utförts inom ramen för projektet ”Förbränningsegenskaper hos pelleterade biobränslen - forskning för framtida kvalitetssäkrade och konkurrenskraftiga bränslekedjor”[ii] har forskare tillsammans med industrin (utrustningstillverkare, bränsletillverkare och användare) klarlagt hur ett bränsleindex lämpligen skall definieras, utformas och valideras för att vara användbart för olika branschaktörer. Förstudien visar också att de föreslagna index för biobränslen som idag finns tillgängliga är mycket begränsade och ej generellt applicerbara för att kvantitativt bedöma potentiella ask- och emissionsrelaterade problem.

Resultaten från förstudien visar att branschen är intresserad av att ta fram bränsleindex som bör kunna svara på frågorna:

1) Vilken grad av slaggproblem kan förväntas då ett visst bränsle förbränns i en viss eldningsutrustningskategori (med fokus mot brännare och rosteranläggningar)

2) Vilken koncentration (mycket låg <25 mg/Nm^3 vid 10% O_2 t.g., låg 25-80 mg/Nm^3 moderat 81-150 mg/Nm^3, hög >150 mg/Nm^3) av fina ask partiklar (<1 μm) kan förväntas i de råa rökgaserna då ett visst biobränsle förbränns i en viss typ av anläggning

Väl fungerande bränsleindex skulle kunna användas för kvalitetssäkring av bränslen men också vara ett stöd vid klassificering av bränslen samt kunna implementeras i förbränningsanläggningars driftsstrategi och/eller i anläggningarnas styrsystem. Fungerande bränsleindex skulle också kunna nyttjas för val av råvara/mixar och additiv i

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

pellets-/bränsleproduktionen. Sådana bränsleindex finns ej utvecklade för en bred biobränslebas.

5.2 Mål

- Generera bränsleindex som skall kunna användas av bränsletillverkare, anläggningstillverkare och kunder för att beskriva slaggningsproblematiken samt potentiella emissionsfaktor vad gäller emissioner av fina askpartiklar i brännare och rosteranläggningar.
- Utvärdera och validera framtagna bränsleindex mot nya experimentella data från lab.- och fullskaleförsök.
- Producera 3 vetenskapliga artiklar som kommer att ingå i doktorsavhandlingar.

5.3 Genomförande

5.3.1 Generering av bränsleindex

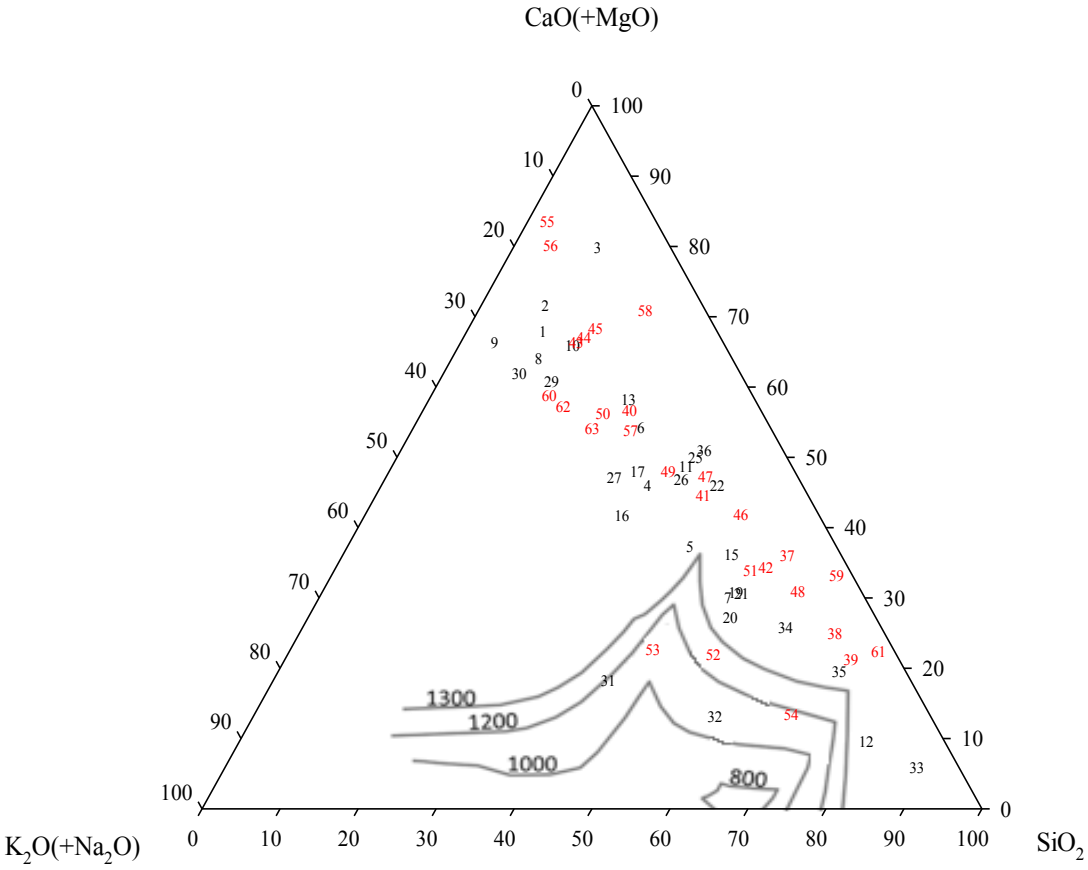
Datan som används vid generering av indexen har tagits fram i tidigare STEM finansierade forskningsprojekt under de senaste 10-15 åren och behandlar sammantaget ett 40 tal kontrollerade brännarförsök utförda med ett 30 tal olika biobränslen som väl representerar variationerna i Skandinaviska biobränslen (gräs, strå, bark, stamved, salix, skogsbränslen).

Slaggningsindex

Slaggningsindexet togs fram utifrån resultat från dels: 1) kontrollerade förbränningsförsök i undermatad pelletsbrännare (20 kW) av 31 st. olika pelleterade biobränslen (8 olika stamveds-, 2 energiveds-, 9 olika grot-, 4 olika bark-, 2 olika salix-, 2 olika vetehalm-, 2 olika rörflen- samt 2 olika hampapellets) samt 2) statistisk utvärdering genom s k t-test där signifikanta skillnader i asksammansättning och askhalt mellan olika grader av slaggningsproblem kvantifieras.

Av Figur 1 nedan framgår asksammansättningen (normaliserad till SiO_2-K_2O(+Na_2O)-CaO(+MgO) systemet) hos de 31 pelleterade biobränslena som använts för att ta fram indexet. Mer detaljerad information om de kontrollerade förbränningsförsöken återfinns i Näzelius et al 2015.[iii] Det genererade indexet presenteras i form av ett ternärt diagram inom systemet SiO_2-K_2O(+Na_2O)-CaO(+MgO). Det generade indexet är applicerbart på bränslen som har lågt fosforinnehåll vilket utgör den absoluta huvuddelen av alla biobränslen. Ett antal biobränslesortiment går därför inte att bedöma utifrån det genererade slaggningsindexet, och exempel på sådana är olika slambränslen, spannmål-/spannmålssrester, rester från biodiesel och etanoltillverkning.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB



Figur 1. De använda biobränslenas asksammansättning normaliserat till SiO_2-K_2O(+Na_2O)-CaO(+MgO) systemet. De svarta siffrorna korresponderar till de bränslen som använts för att formulera slaggningsindexet och de röda för att validera indexet.

Partikelindex

I det nya föreslagna MCP-direktivet inom EU föreslås emissionsnivåer för mellanskaliga värmepannor i intervallet 1-50 MW. Stoft är definierat som total-stoft (PM_{tot}) i rökgaserna mätt med standard filterprovtagning, och nivåer anges för för såväl befintliga anläggningar som nya anläggningar, i olika storleksklasser. Följande emissionsnivåer för stoft anges;

Befintliga biomassaanläggningar (vid 6% O_2):

1-5 MW (fr o m 1 jan 2025):	50 mg/Nm^3
5-20 MW (fr o m 1 jan 2030):	30 mg/Nm^3

Nya anläggningar:

1-5 MW (fr o m 2019*):	50 mg/Nm^3
5-20 MW (fr o m 2019*):	30 mg/Nm^3

** Uppskattat av Naturvårdsverket (2015-10-15)*

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

En omräkning av 30 respektive 50 mg/Nm^3 vid 6% O_2 ger ca 22 respektive 36 mg/Nm^3 vid 10% O_2.

Inom EU´s EcoDesign direktiv regleras bl a emissionsnivåer för små (<50 kW) kaminer och pannor, och det finns ett antal olika nivåer för olika typklasser och tidpunkter för implementering. Nämnas kan att för småskaliga pelletsanläggningar gäller vid 2018 en stoftemissionsnivå på 40 mg/Nm^3 (vid 10% O_2). Enligt tidigare föreslagna nivåer för indelning av partikelemissionerna i fyra olika kategorier, samt med viss koppling till de lägre nivåerna föreslagna inom MCP och EcoDesign direktiven har följande nivåer för koncentrationen av stoft (allt som fina askpartiklar, PM_1) använts i klassificeringen i denna rapport:

Mycket låg *<25 mg/Nm^3 (vid 10% O_2)*

Låg *25-80 mg/Nm^3 (vid 10% O_2)*

Moderat 81-150 mg/Nm^3 (vid 10% O_2)

Högt *>150 mg/Nm^3 (vid 10% O_2)*

Arbetet med partikelindex utfördes experimentellt med förbränningsförsök i samma undermatade pelletsbrännare (20 kW) som användes för slaggningsindexet, och delvis från samma försökserier och delvis från försök utförda i andra studier/kampanjer. Sammantaget användes data från sju separata studier [iv,v,vi,1,2,3,4], med 13 st olika sortiment av skogsbränslen (stamved, energived, grot, bark m m), energiskog (salix, poppel) och vetehalm. Dessutom inkluderades 9 st försök där sameldnig mellan sådana biobränslen och torv utförts. Detta är således ett relativt begränsat antal studier/försök som kunnat användas för utvärdering av ett partikelindex, vilket också visade sig ge problem.

Utifrån storleksfraktionerad mätning med en 13-stegs lågtrycksimpaktor har emissionerna av fina partiklar (< 1 um) bestämts genom att utifrån peakvärden i storleksfördelningen i finmoden uppskatta totala emissionerna genom att dividera peakvärdet med en empiriskt bestämd faktor (1.6) för att ge en uppskattad total masskoncentration av fina partiklar. Detta för att kunna jämföra mätdata från olika studier där det i vissa fall inte varit möjligt att titta på orginaldatafiler från mätningarna.

Det är välkänt att fina askpartiklar dominerar vid god förbränning av dessa biobränslen i brännare och rosteranläggningar, och det är även välkänt att dessa askpartiklar helt domineras av salter med kalium (t ex K_2SO_4, KCl och K_2CO_3). Eftersom kalium (K) förekommer i så mycket högre halter än t ex natrium (Na) och zink (Zn) i den typ av biobränslen som här är aktuella, är det endast nödvändigt att beakta beteendet av K i förbränningen för att kunna bedöma potentialen för bildning av fina partiklar. Att förångningen (avgången) av K från bränslet under förbränningen är det som styr bildningen av fina partiklar för biobränslen har diskuteras i tidigare biobränsleforskning generellt och i arbeten kring bränsleindex specifikt, t ex i Sommersacher et al, 2012[5].

Ett index för fina askpartiklar kan genereras på olika sätt. I detta arbete diskuteras detta utifrån tre delsteg/moment, med beskrivning av utfört arbete, resultat, pågående arbete och behov av fortsatt utredning.

.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

1. Relationen mellan partikelemissioner och kaliuminnehåll i bränslet.

Som ett första steg har en utvärdering gjorts där sambandet mellan partikelemissionerna och mängden K i bränslet utvärderas. Denna typ av enkelt index har även föreslagits i Sommersacher et al, 2012. I detta första steg antas alltså emissionen av fina partiklar vara en funktion av halten K i bränslet och kan skrivas,

$$y_1 = f(x_1)$$

där y_1 är emissionen av fina askpartiklar PM_1 (mg/Nm^3 vid 10% O_2) och x_1 är halten K i bränslet (mg/kg TS).

2. Relationen mellan partikelemissioner och enkla askkemiska aspekter.

Vidare kan partikelemissionerna, i likhet med slaggbildning, sättas in i ett något mer komplext askkemiskt perspektiv, och för bränslen med låga halter fosfor (P), har systemet med askkomponenterna SiO_2-K_2O(+Na_2O)-CaO(+MgO) störst betydelse, vilket diskuterats ovan i samband med beskrivning av slaggningsindex. Om man beskriver den huvudsakliga askkemin av betydelse för avgång av kalium från bränslet och därmed bildning av fina partiklar, kan ett samband mellan halterna Si, K och Ca i ett bränsle och partikelemissionerna beskrivas som,

$$y_1 = f(x_1, x_2, x_3)$$

där y_1 är emissionen av fina askpartiklar PM_1 (mg/Nm^3 vid 10% O_2) och x_1 , x_2 och x_3 är halten Si, K och Ca, respektive, i bränslet (mg/kg TS). Relationen mellan dessa askbildande element kan grafiskt illustreras i ett ternert sammanstättningsdiagram, i likhet med vad som presenterats i samband med framtagandet av slaggningsindex.

3. Avancerade metoder för bestämning av prediktion av partikelemissioner och generering av index.

För mer avancerad metoder att ta fram ett index för partikelbildning kan något av följande tillvägagångssätt användas enskilt eller, mer troligt, kombinerat;

1. Kombinerad information från asksammansättning med empiriska data på slaggbildning och slagg/asksammansättning.

   $$PM_1 \text{ potential (relativt eller absolut)} \sim K_{\text{tillfört bränsle}} - K_{\text{fasta faser i bottenaska}} - K_{\text{slagg i bottenaska}}$$

2. Askkemisk härledning utifrån grundläggande- (termodynamiska) och processkemiska antaganden. Reaktionsvägar och bildning av olika komponenter (fasta faser och smältor) kartläggs med fokus att beskriva kaliums beteende och hur stor andel som bildar fina partiklar. Hänsyn tas till hur kalium binds upp i bottenaskan av fasta eller smälta former av; K-silikater, K/Ca-silkater, K/Al-silkater, K/Ca-karbonater, K/Ca-sulfater, K/Ca-fosfater.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

3. Teoretisk jämviktskemisk (termodynamisk) modellering av kaliums beteende i ett asksystem med fokus på att bestämma andelen/mängen kalium som föreligger i gasfasen under olika processförhållanden (temperatur, tryck och atmosfär) relevanta för den studerade förbränningsprocessen.

I detta projektet har utvärderingar kring partikelindex i första hand gjorts enligt metod 1 och 2, samt med några exempel från metod 3. Detta beror dels på projektets begränsade omfattning men även på det faktum att en fördjupad och bredare utvärdering/utveckling av denna typ av bränsleindex, kräver en större matris av mätvärden framtagna under väl kontrollerade förhållanden. Fortsatt utveckling och utvärdering av dessa olika metoder för att förbättra olika index och prediktionsmodeller är därför nödvändig.

5.3.2 Validering av bränsleindex

Validering av slaggningsindex

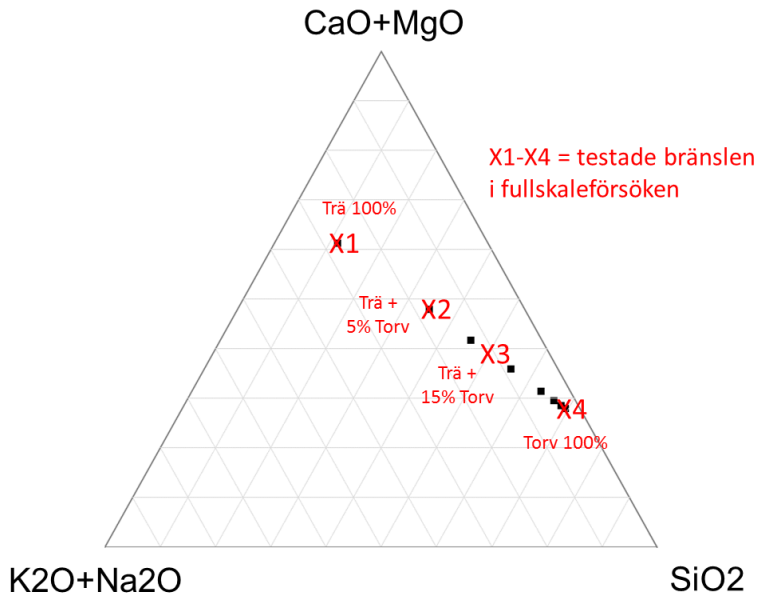
Slaggningsindexet valideras med resultat från dels: 1) kontrollerade förbränningsförsök i undermatad pelletsbrännare (20 kW) av 18 st. olika pelleterade biobränslen/biobränslemixar (olika mixar av stamved och torv, salix och torv, energived och torv, grot och torv samt vetehalm och torv), d v s helt nya sortiment/prover som inte ingått som data vid formuleringen av slaggningsindexet samt 2) försök i 2 MW rosterpanna (rörlig snedroster som ägs av Skellefteå Kraft AB) med 9 olika pelleterade biobränslen (pellets av energived och barkad energived, 3 olika stamveds-, 2 olika torvpellets samt pellets producerad av olika inbladningsgrader av torv i stamved) d v s helt nya bränsleprover som inte ingått som data vid formuleringen av slaggningsindexet.

Av figur 1 framgår asksammansättningen (normaliserad till SiO_2-K_2O(+Na_2O)-CaO(+MgO) systemet) hos de 27 pelleterade biobränslena som använts vid valideringsförsöken. Mer detaljerad information om valideringsförsöken återfinns i Näzelius et al 2016[6].

Validering av partikelindex

Validering av partikelindexet var planerat att utföras; 1) dels genom dedikerade nya förbränningsförsök i undermatad pelletsbrännare (20 kW) med olika biobränslen, i likhet med för slaggningsindex, och 2) dels genom försök i försök i 2 MW rosterpanna (rörlig snedroster som ägs av Skellefteå Kraft AB), med 4 olika pelleterade biobränslen; ren träpellets (energived), trä med 5% torv, trä med 15% torv, samt ren torv.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB



Figur 2. Sammansättning i systemet SiO_2-K_2O(+Na_2O)-CaO(+MgO) av de bränslen (trä, torv och trä/torv-mixar) som användes i valideringsförsöken i rosterpanna i fullskala.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

5.4 Resultat & Diskussion

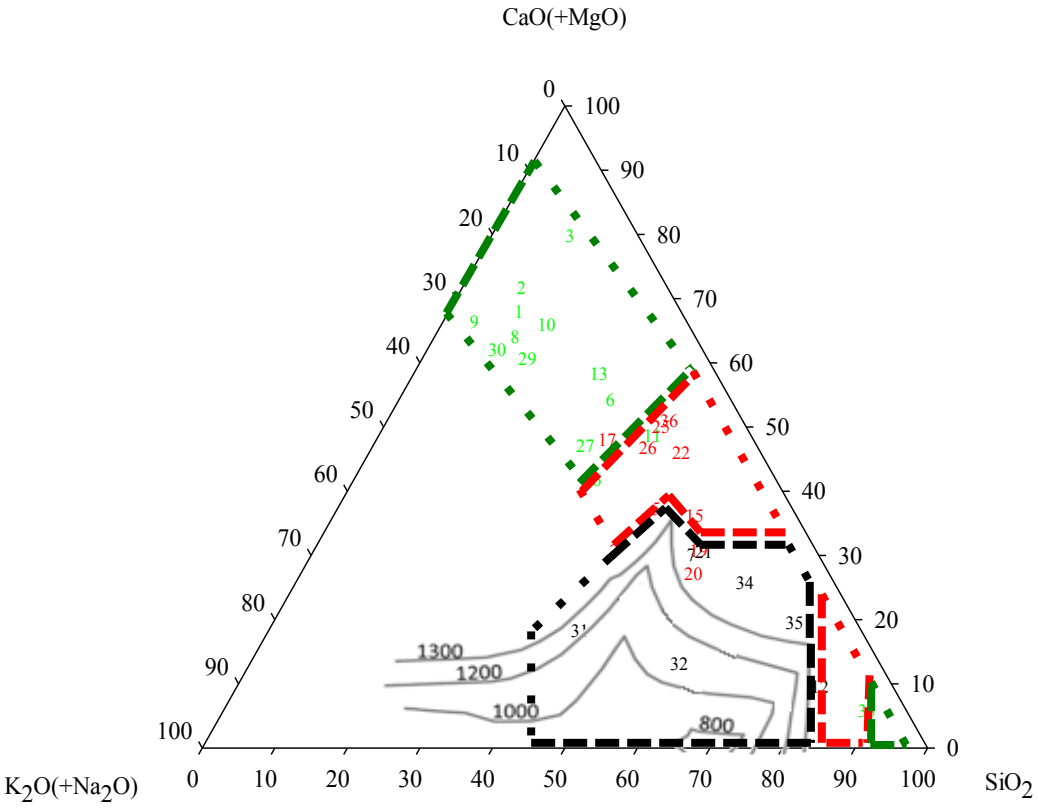
5.4.1 Slaggningsindex

Formulering av slaggningsindex

Resultaten från den statistiska utvärderingen (t-testet) visade på att det var möjligt att formulera ett slaggningsindex där graden av slaggningsproblem kunde delas in i tre kategorier; ingen/låg (där 7 vikts-% av ingående mängd bränsleaska bildade slagg i brännaren), låg/moderat (7-50 vikts-%), moderat/kraftig (> 50 vikts-%) och där följande askelement (angivna som oxider) visade på signifikanta skillnader ($p<0.05$) i sammansättningen hos bränslet mellan de tre kategorierna; SiO_2, CaO och K_2O. Dessutom påvisades att askhalten hade signifikanta skillnader mellan två av problemkategorierna(-graderna). De askbildande element som rent statistisk visade ha signifikant betydelse på slaggningstendensen hos bränslet visade också vara de element som är kritiska utifrån ett slaggbildningsmekanistiskt perspektiv.[iii]

Utifrån resultaten från de kontrollerade förbränningsförsöken, den statistiska utvärderingen och tidigare kunskap i området har därför ett slaggningsindex som beskriver den förväntade slaggningsproblembilden/-tendensen för ett P-fattigt biobränsle sammanställts. Indexet beskrivs som områden i ett ternärt system bestående av komponentera SiO_2-K_2O(+Na_2O)-CaO(+MgO). Bränsleaskelementen Si, K, Na, Ca och Mg i ett bränsle räknas om till oxider och normeras till systemets 3 komponenter d v s SiO_2, K_2O+Na_2O och CaO+MgO som tillsammans utgör 100 vikts-%. Om ett bränsle har lika många vikts-% av alla 3 komponenter (33,33 vikts%) hamnar därför det bränslet i mitten av detta diagram. Bränslen som med sin sammansättning hamnar inom det grön streckade området i figur 2 antas enligt detta index ge en låg slaggningsproblematik i brännar- och rostereldade pannor som saknar aktiv askutmatning och inga problem i pannor som har aktiv askutmatning (t.ex. rörliga rosters). Bränslen som med sina sammansättningar hamnar inom det röda området i figur 3 antas ge moderata slaggningsproblem i utrustning som saknar aktiv askutmatning och låga problem i utrustnings som har effektiv askutmatning. Bränslen som med sin sammansättning hamnar inom det svart streckade området antas ge kraftiga slaggningsproblem i anläggningar som saknar aktiv askutmatning och mer moderata problem i anläggningar med effektiv askutmatning. En mer utförlig resultatsammanställning återfinns i Näzelius et al. 2016.[6]

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

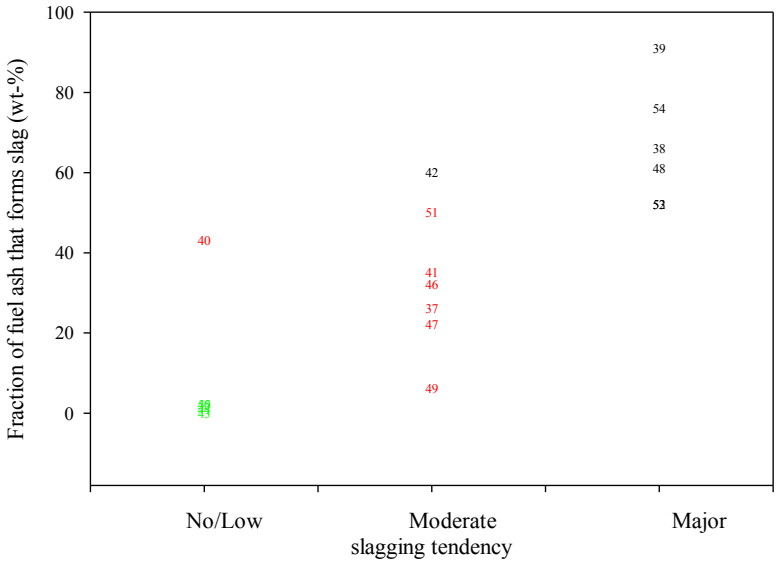


Figur 3. Genererat slaggningsindex. Grönstreckade områden anger bränslesammansättningar som ger inga/låga slaggningsproblem. Rödstreckade områden anger bränslesammansättningar som ger låga/moderata slaggningsproblem och svartstreckade områden anger bränsle-sammansättningar som ger moderata/kraftiga slaggningsproblem.

Validering av slaggningsindex

Av figur 4 framgår att det genererade slaggningsindexet klarar att prediktera slaggnings-problematiken i den undermatade pelletsbrännaren för 17 av de 19 valideringsbränslena. Anledningen till att slaggningsindexet inte klarar av att prediktera två bränslen kan bero på att dessa bränslemixar innehåller kontaminerat material.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB



Figur 4. Validering av det genererade slaggningsindexet utifrån resultat från de 19 valideringsförsöken i undermatad pelletsbrännare (20 kW). På x-axel anges till vilken problemkategori (inga/låg, låg/moderat samt moderat/kraftig) slaggningsindexet har predikterat att de använda valideringsbränslena hamnar inom. De färgade siffrorna (grönt=inga/låg, röd=låg/moderat, svart=moderat/kraftig) och värdet på Y axeln anger det aktuella resultaten från valideringsförsöken.

Tidigare framtagna asksmält-/slaggningsindex i litteraturen[7,8,9,10,11,12,13,vii] har också inom ramen för detta arbete validerats mot de 70-talet förbränningsförsök som använts i detta arbete för att såväl formulera som validera det framtagna slaggningsindexet. Alla dessa tidigare index misslyckas kraftigt med att såväl kvalitativt som kvantitativt prediktera slaggningstendensen (se mer detaljer i Näzelius 2016[6]).

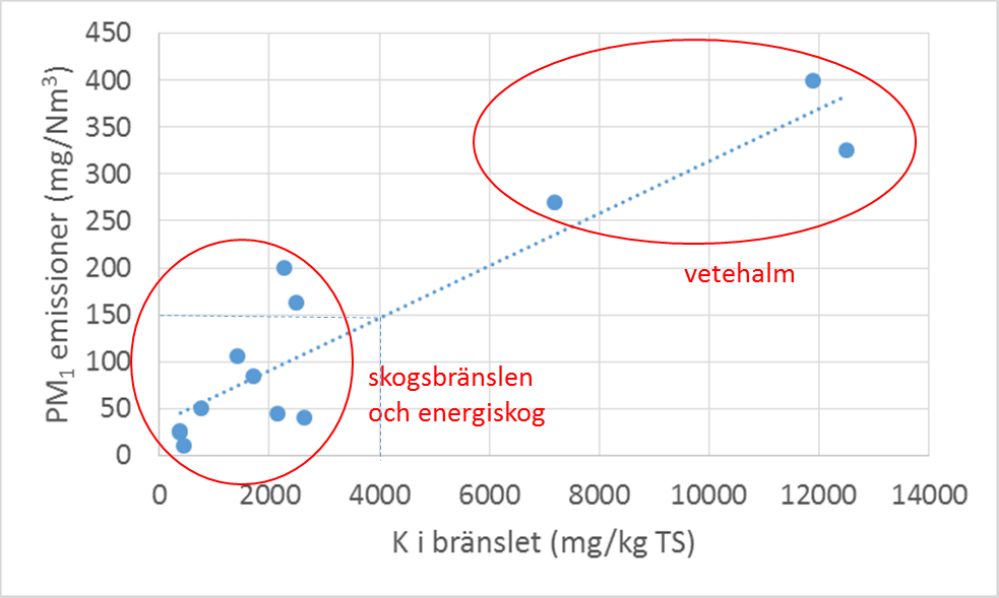
Det framtagna slaggningsindexet som bygger på mängden slagg som bildas i utrustningen kunde tyvärr inte valideras mot fullskaleförsöken i 2 MW:s pannan p g a att det inte gick att sluta massabalansen vad gäller bildad mängd slagg i förhållande till total teoretiskt bildad mängd aska under försöken. Därför togs i detta projekt även ett slaggningsindex fram som predikterar sintringsgraden hos den bildade slaggen. Detta index ger i sig inte ett mått på potentiell slaggningsproblemetiken och dessutom så visade sig att detta index inte med tillräcklig god noggrannhet kunde prediktera sintringsgraden varför detta index inte redovisas i denna rapport (för mer detaljer se Näzelius et al. 2016[6]).

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

5.4.2 Partikelindex

Formulering och validering av partikelindex

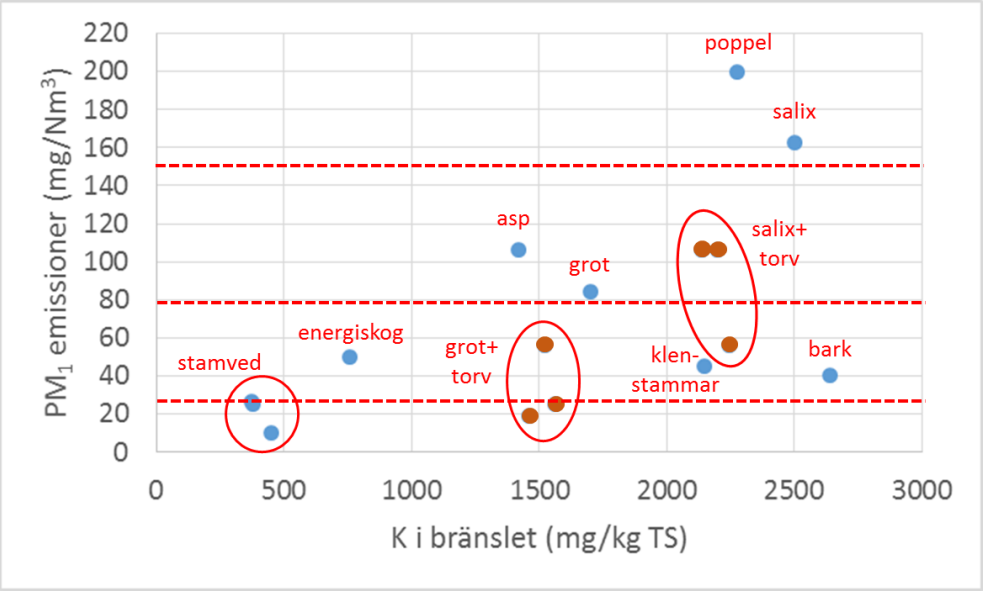
1. Relationen partikelemissioner och kaliuminnehåll i bränslet.
Då matriser för utvärdering av partikelindex är relativt begränsad har det inte varit möjligt att erhålla några statiska utvärderingar av t ex förekomsten av olika sub-grupper av bränslen/sammansättningar.
Iställer gjordes först en inledande sammanställning över hur PM1 emissionerna varierar som funktion av totala halten K i bränslena (figur 5). I figur 4 ses att det tycks finnas ett generellt samband mellan ökad kaliumhalt i bränslet och ökade partikelemissioner. Två tydliga grupper av bränslen kan identifieras, dels vetehalm och dels skogsbränslen och energiskog. Det är dock tydligt att det på en mer detaljerad nivå, för enbart katagorin skogsbränslen/energiskog, finns stora variationer som inte förklaras enbart av halten K i bränslet. En slutsats skulle kunna vara att emissionerna från vetehalm alltid hamnar i kategorin ”hög”, medan det inom gruppen skogsbränslen/energiskog finns en spridning av emissionerna inom alla kategorier, ”låg”, ”moderat” och ”hög”.



Figur 5. Emissioner av fina askpartiklar (PM_1) som funktion av totalt kalium i bränslet. Gränsen för kategorin ”hög” partikelkoncentration (>150 mg/Nm3) markeras som en K-halt i bränslet >4000 mg/kg TS. De två energiskogsbränslena (Salix och Poppel) ligger dock över gränslen för ”hög” trots K-halter under 4000 mg/kg TS (drygt 2000 mg/kg TS).

För att mer i detalj studera förhållandet inom kategorin skogsbränslen och energiskog, visas i Figur 6 en motsvarande plott där enbart dessa bränslen visas. Eftersom det inom detta segment kan förekomma sortiment där torv sameldas, samt att det inom forskningen studerats effekterna av sameldning bio-torv i samma typ av förbränningsutrustning och med samma metoder, har vi även inkluderat ett antal experimentella punkter där torv sameldats med Grot och Salix. Utifrån detta är det tydligt att det finns en stor spridning i data i det område där K-halten i bränslet övrestiger ca 1000 mg/kg TS, d v s andra sortiment än rena (okontaminerade) stamvedsbränslen. Detta trots att dessa i samtliga fall har askhalter >2 vikt% att jämföra med de rena stamvedsbränslena som har askhalter på 0.3-0.4 vikt%.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

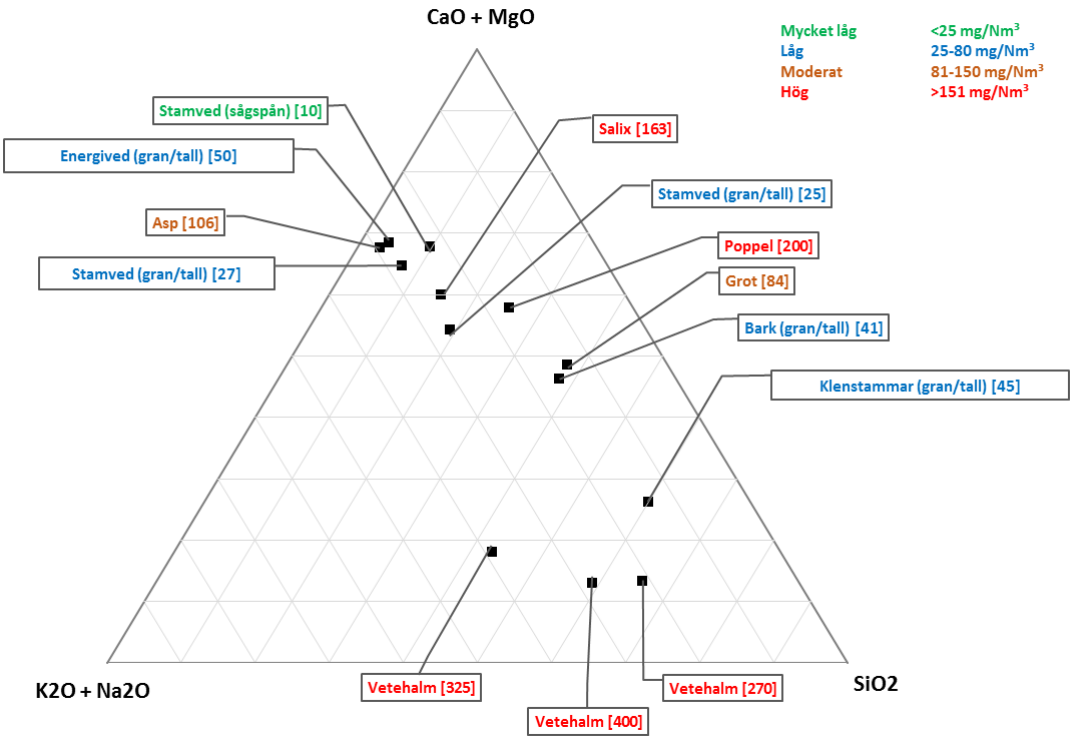


Figur 6. Emissioner av fina askpartiklar (PM_1) som funktion av totalt kalium i bränslet, för rena skogsbiobränslen och energiskog (blå punkter) samt bränslemixar av grot- och salix- med torv (bruna punkter). De streckade röda linjerna visar de nivåer för kategorisering av partikelemissioner som här definierats.

2. Relationen mellan partikelemissioner och enkla askkemiska aspekter.
För att utreda mer i detalj relationen mellan olika askelement i systemet (K-Ca-Si) och inverkan på partikelemissionerna, har de använda bränslena (skogsbränslen, energiskog, vetehalm och bio/torv-mixar), placerats in i det ternära sammansättningsdiagrammet i figur 7 och 8. Som tidigare diskuterats är det helt dominerande att beakta relationerna mellan K-Ca-Si, emedan man vanligtvis brukar visa denna typ av diagram i form av korresponderande oxider av K, Ca och Si, samt att man kan inkludera även Na tillsammans med K och Mg tillsammans med Ca.

Fyra saker kan relativt enkelt härledas ur dessa diagram; *i)* vetehalm (och motsvarande gräsbränslen) föreligger i ett relativt eget definierat askkemiskt område och uppvisar alltid både ”hög” partikelnivåer och kraftiga slaggningstendenser, *ii)* av de rena biobränslena är det endast okontaminerade stamvedsbränslen som hamnar i kategorin ”mycket låg” eller ”låg” (men mycket nära ”mycket låg”) koncentraion av partiklar i rökgaserna, *iii)* för övriga sortiment av skogsbiobränslen och energiskog föreligger en stor spridning vad gäller askkemisk sammansättning vad gäller relationen K-Ca-Si samt partikelemissioner utan tydliga (enkla) trender vad gäller kopplingen mellan dessa två storheter, och *iv)* sameldning mellan ”askrika” skogbränslen/energiskog och torv kan reducera emissionerna av fina askpartiklar.

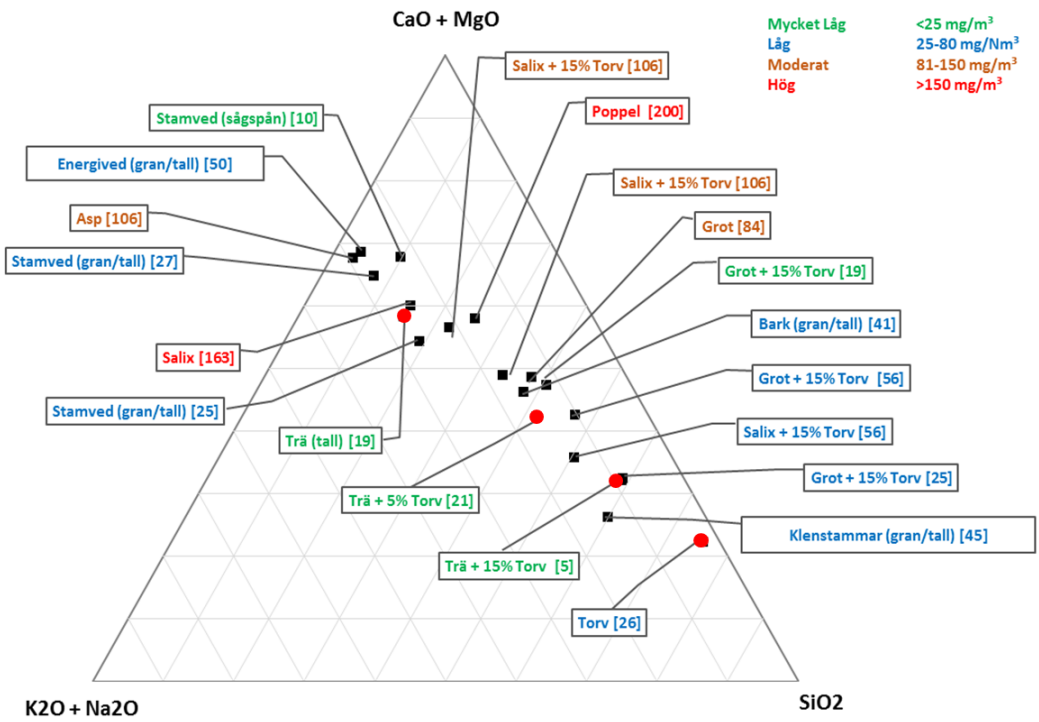
© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB



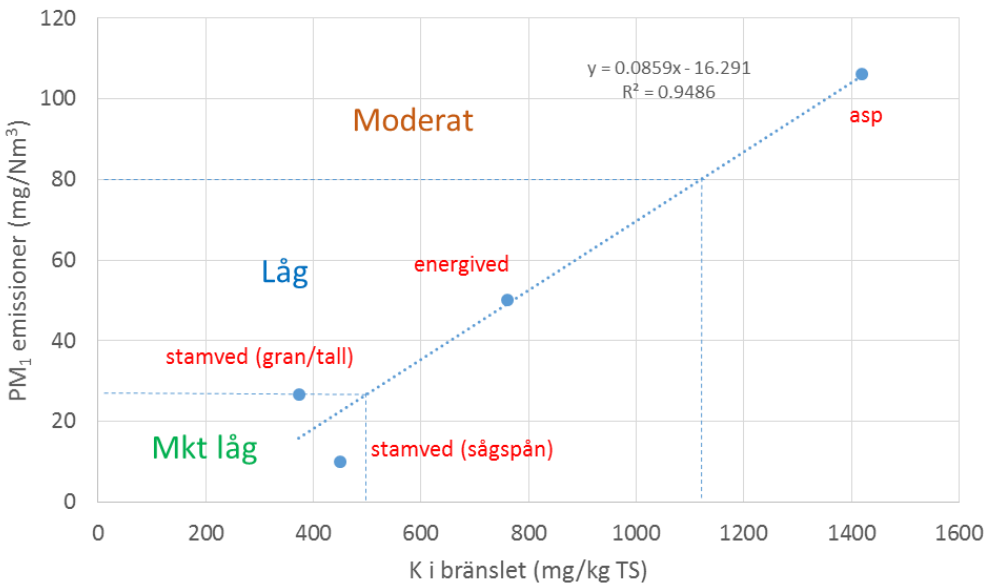
Figur 7. Emissioner av fina partiklar som funktion av sammansättningen för alla här rena studerade bränslen/sortiment (ej torvmixar), definierat som relationen mellan Si, K och Ca i systemet SiO_2-K_2O(+Na_2O)-CaO(+MgO).

De skogsbränslen med mycket låga halter Si placerar sig mycket nära linjen K_2O+Na_2O – CaO+MgO, och i figur 8 ses att dessa är två sortiment av stamved, energived och asp. Gemensamt för dessa är att Si-halten i bränslet är <120 mg/kg TS och kvoten Si/K utifrån bränsledata är <0.25. Trots att dessa bränslen har en mycket lika sammansättning med avseende på Si, K och Ca, så uppvisar dom alltså mycket olika partikelemissioner, med en spridning melln 10-106 mg/Nm^3. Det stora överskottet på kalium i dessa bränslen kan antas bilda/föreligga som karbonater och ev sulfater i askan i förbränningen. Som ses i figur 9, finns ett nästa linjärt samband mellan PM_1 emissionerna och halten K i dessa bränslen, vilket gör att man kan anta att det är samma askkemiska processer som bestämmer t ex bildning av fina askpartiklar i dessa bränslen, d v s fraktioneringen av K mellan bottenaska och fina partiklar (gas-till-partikelbildning).

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB



Figur 8. Emissioner av fina partiklar som funktion av sammansättningen för enbart skogsbiobränslen, energiskog och bio/torv-mixar, definierat som relationen mellan Si, K och Ca i systemet SiO_2-K_2O(+Na_2O)-CaO(+MgO). Värdena inom klammrarna anger uppmätta PM1 emissionerna (i mg/Nm3). Röd prickar markerar punkter från valideringsförsöken i fullskala.



Figur 9. Emissionen av fina partiklar i fyra specifika Si-fattiga skogsbiobränslen som funktion av halten totalt kalium i bränslet där de olika halterna för K i bränslet som korrelerar till de olika partikelemissionskategorierna är markerade; ”mkt låg” <500 mg/kg TS, ”låg” 500-1100 mg/kg TS och ”moderat” >1100 (max ca 4000) mg/kg/TS).

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

Avancerade metoder för bestämning av partikelindex.

Resultaten i denna studie har visat att det för mer askrika och Si-innehållande skogsbränslen (ej rena stamvedsbränslen), energiskog och bio/torv-mixar, föreligger ett mer komplext samband mellan askkemiska processer och bildning av fina oorganiska ask partiklar, än enbart att en bestämd fraktion av K i bränslet avgår och bilder partiklar. Tidigare redovisades tre olika avancerade metoder för att utreda dessa samband och möjliggöra förenklade formuleringar och index för detta. P g a att antalet studier/datapunkter är alltför få i antal, samt att det saknas viss information i några fall, är en generell utvärdering inte möjlig i denna studie. I det följade redovisas istället ett exempel på hur en kombination av information från asksammansättning och empiriska data på slaggbildning och slagg/asksammansättning, kan användas för att bättre beskriva bildning av fina partiklar (PM_1 potential) enligt följande:

$$PM_1 \text{ potential (relativt eller absolut)} \sim K_{\text{tillfört bränsle}} - K_{\text{fasta faser i bottenaska}} - K_{\text{slagg i bottenaska}}$$

Ett exempel på detta kan vara att jämföra punkterna ”Grot [84]” med ”Grot + 15% Torv [25]” i figur 8, där en stor skillnad i partikelemissioner (84 respektive 25 mg/Nm3) föreligger och en viss skillnad i sammansättning m a p K(+Na)-Ca(+Mg)-Si. Tanken är här att utifrån tidigare forskning kunna anta ett värde på dels andelen bildad slagg och dels andel K i denna slagg. Detta är dock förknippat med stora osäkerheter, varvid följade beräkning endast skall ses som ett exempel på tillvägagångssättet.

Dessa bränslen och analyser ingick i en studie med Fagerström et al, 2014[4], där olika skogsbränslen sameldades med olika torvsorter i den utrustning som beskrivits tidigare. De data/information som behövs för detta redovisas i tabell 1 och resultatet av beräkningar redovisas i tabell 2.

Tabell 1. Experimentellt bestämda data (Fagerström et al, 2014) som behövs för beräkning av fördelning av kalium mellan slagg, fasta faser och fina partiklar.

	Askhalt (% av TS)	$K_{bränsle}$ (mg/kg TS)	Andel slagg av aska (%)	K_{slagg} (vikt-%)	K avgång (%)	PM_1 emission (mg/Nm^3)
Grot	2.4	1700	5	10	10.2	84
Grot + 15% Torv	3.6	1565	60	7	3.5	25

Tabell 2. Beräknade värden (utifrån data i tabell 1) av fördelning av kalium i olika askfraktioner med koppling till bildning av fina askpartiklar (PM_1).

	K i slagg (mg/kg TS)	K i fasta faser* (mg/kg TS)	K i PM_1 (mg/kg TS) – från exp.
Grot	120	1407	173
Grot + 15% Torv	1512	0	55

* Beräknat utifrån $K_{fasta\ faser} = K_{bränsle} - K_{slagg} - K_{PM1}$

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

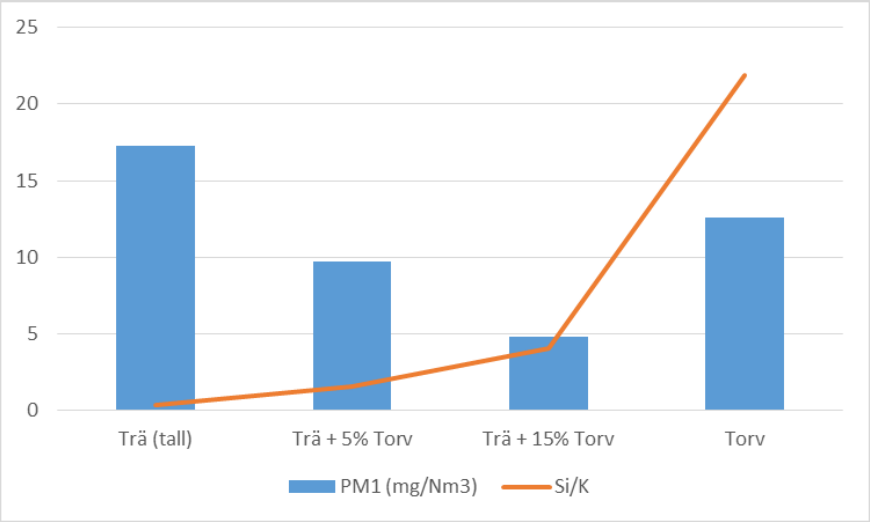
Trots att räkneexemplet ovan är förknippat med ett antal antaganden och andra osäkerheter, visar det ändå på några viktiga aspekter;

- Andelen kalium som fördelas mellan slagg och fasta faser i bottenaskan skiljer sig tydligt åt i dessa två bränslesortiment, vilket i sin tur antagligen har direkt koppling till uppmätt skillnad vad gäller emissioner av fina partiklar, d v s avgång av kalium till gasfasen.
- Det är viktigt att få bra experimentell bestämda massbalanser, både för askmaterialet totalt sett och för enskilda element (främst K), som är generellt applicerbara för olika bränslen, vilket dock är nödvändigt för att kunna utveckla denna metod vidare.
- Kvoterna mellan beräknad K i PMP1 för de två bränslena (173/55 = 3.2) är mycket lika med kvoten i PM1 emissioner mellan bränslena (84/25 = 3.4). En uppskattning av mängden fina partiklar (här antaget som 70% K_2SO_4 och 30% KCl) utifrån andelen K som avgått från bränslet visar att det finns en samstämmighet med den faktiska uppmätta emissionerna av PM_1. Detta illustrerar att man utifrån antagande om andelen kalium som avgår från ett bränsle kan prediktera/förutsäga emissionerna av fina askpartiklar i denna typ av förbränningssystem.

En generell beskrivning av de askkemiska processerna utifrån ett bredare bränsle- och teknikperspektiv är mycket komplext. För att kunna utveckla förenklade verktyg att beskriva detta och prediktera fenomen såsom slaggbildning och partikelemissioner behövs det antagligen utvecklas olika ”sub-modeller” som kan appliceras på vissa delar (bränslesorter, förbränningssystem etc). Dessa kan i sin tur tas fram på olika sätt, i vissa fall genom att presentera relativt enkla index (t ex K-halt i bränsle eller enkla kvoter mellan vissa element), men i andra fall kräver mer avancerade tillvägagångssätt för att möjliggöra förenklade index/modeller.

Fälttester i närvärmepanna för validering av bränsleindex.
Från försöken i närvärmepannan i Bureå, tillsammans med Skellefteå Kraft, erhölls partikelemissioner (fina askpartiklar) för de fyra testade sortimenten, vilka redoviasas i figur 9 tillsammans med kvoten Si/K i bränslesortimenten. Det är tydligt att partikelemissionerna uttryckt som PM_1, i samtliga fall understeg 25 mg/Nm_3 (vid 10% O_2). Utifrån sammansättningen redovisad i figur 2, är det ockås tydligt att inblandningen av torv ökade halten Si (och Ca) i bränslet, vilket också ses i den ökande Si/K kvoten. Resultaten visade på att partikelemissionerna (PM_1) minskade succesivt med ökad inblandningsgrad av torv, med lägst emissioner för mixen med 15% torv. Detta är i linje med tidigare forskning och i linje med antagande om en ökad uppbindning av kalium i bottenaska och slagg med ökad halt tillgängligt Si. Att partikelemissionerna sedan ökar igen då 100% torv eldades kan eventuellt förklaras av att man då är i ett område askkemiskt där stabila Ca-silikater bildas vilket för att en större mängd K avgår till gasfasen. Eftersom projektet inte resulterat i ett generellt index för partikelbildning i denna del av systemet SiO_2-K_2O-CaO, och ej heller med sådan upplösning för emissioner <25 mg/Nm3, kan dessa resultat endast ses som en generellt validering av de askkemiska modeller som utvecklats och hur sameldning med torv, d v s aktiv förändring av askkemin, påverkar bildning av slagg och fina askpartiklar.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB



Figur 9. Partikelemissioner (PM1) uppmätta i fullskaleförsök i 2MW närvärmepanna (rosterpanna) hos Skellefteå Kraft, samt med inkluderad kvot Si/K i de nyuttjade bränslesortimenten av trä, torv och trä/torv-mixar.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

5.5 Slutsatser

- Ett slaggningsindex har genererats där graden av slaggningsproblem på och omkring rostern (ingen/låg, låg/moderat, moderat/kraftig) i brännar- och rosterutrustning för ett biobränsle kan förutsägas utifrån dess K, Na, Ca, Mg och Si-halt.

- Slaggningsindexet kan med betydligt bättre noggrannhet än tidigare i litteraturen framtagna index förutsäga upplevd grad av slaggningsproblem i en förbränningsutrustning.

- Arbete med partikelindex har visat på att det är svårt att, i dagsläget, presentera ett generellt gällande index för partikelbildning. Tre sammansättningsområden (m a p Si-K-Ca) har identifierats där sub-modeller kan/bör utvecklas (för fosforfattiga bränslen); *i)* rena stamvedsbaserade bränslen med låg Si-halt (<120 mg/kg TS), *ii)* övriga mer ”askrika” skogsbiobränslen och energiskog (aska >1-2%) och energiskog, och *iii)* halm och gräsbränslen.

- Halmbränslen uppvisar generellt sett mycket höga partikelemissioner (>150 mg/Nm3), samtidigt som att de uppvisar stor benägenhet att bilda slagg.

- För askrika skogsbiobränslen och energiskog, samt i sameldning med torv, varierar partikelemissionerna i intervallet 20-200 mg/Nm^3, alltså från ”mkt låga” halter till ”höga”, utifrån föreslaget klassificering. Detta förklaras av komlexa askkemiska processer som bestämmer fördelning av kalium mellan olika askfraktioner. Fortsatt arbete behövs för att utvecka de askkemiska modellerna och generera applicerbara index.

- För rena (okontaminerade) stamvedsbränslen (<120 mg Si/kg TS) tycks det finnas ett direkt samband mellan halten kalium i bränslet och bildning av fina partiklar, vilket visas i figur 9, och således kan användas som ett första index för att bedöma potentialen för partikelbildning. Analysen baseras dock endast på ett fåtal experiment varvid fortsatt verifiering är nödvändig.

5.6 Rekommenderad fortsättning

- Fortsatt utvärdering och utveckling av här föreslagna bränsleindex för ökad precision och applicerbarhet.

- Generera partikel- och slaggningsindex för P-rika biobränslen.

- Generera mer valideringsresultat från fullskale-rosterutrustning där massbalanser vad gäller slaggbildning och partikelemissioner kan slutas.

- Fortsatt kartläggning av de grundläggande askkemiska processerna, både i system som domineras av ask-systemet K-Ca-Si, men även med inverkan av t ex aluminium och svavel (relevant för olika additiv), samt i asksystem där även fosfor finns.

5.7 Måluppfyllelse

- Projektet har genererat, utvärderats och validerat ett slaggningsindex.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

- Projektet har genererat ett enkelt index för partikelbildning för rena stamvedsbränslen. För mer askrika skogsbränslen, energiskog och halm/gräsbränslen, behövs dock fortsatt forskning och utveckling för att generera relevanta partikelindex.

- Projektet har identifierat olika delområden (kategorier av bränslen) där sub-modeller med askkemiska index bör utvecklas, och även presentera olika metoder kring hur detta bör gå till.

- Två journalartiklar inom slaggningsindexområdet har genererats i detta projekt (se Näzelius et al 2015[iii], Näzelius et al 2016[6]). Dessa kommer ingå i Ida-linn Näzelius doktorsavhandling som planeras att färdigställas under våren 2016.

- En journalartikel med fokus på utveckling av förenklade modeller och/eller index för partikelbildning kommer genereras utifrån arbete inom projektet. Detta planeras ingå i Anders Rebblings doktorsavhandling (planerad till 2019).

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

5.8 Referenser

i) Strömberg, B., Herstad Svärd, S. Bränslehandboken 2012, SVF Rapport 1234, Värmeforsk 2012, ISSN 1653-1248

ii) Hermansson, S., Rönnbäck, M., Boman, C., Boström, D., Fagerström, J., Rebbling ,A., Öhman, M., Näselius, I.-N., Olwa, J. Förbränningsegenskaper hos pelleterade biobränslen - forskning för framtida kvalitetssäkrade och konkurrenskraftiga bränslekedjor. SP Rapport 2015:xx, ISBN 978-91-88001-90-0, ISSN 0284-5172, Borås 2015

iii) Näzelius, I.L., Fagerström, J., Boman, C., Boström, D., Öhman, M. Slagging in Fixed-Bed Combustion of Phosphorus-Poor Biomass:Critical Ash-Forming Processes and Compositions. Energy Fuels 2015, 29, 894−908

iv) Fagerström J, Näzelius I-L, Gilbe C, Boström D, Öhman M, Boman C. Influence of peat ash composition on particle emissions and slag formation in biomass grate co-combustion. Energy and Fuels 2014;28(5):3403–3411.

v) Gilbe C, Öhman M, Lindström E, Boström D, Backman R, Samuelsson R, Burvall J. Slagging characteristics during residential combustion of biomass pellets. Energy and Fuels 2008;22:3536-3543.

vi) Díaz-Ramírez M, Boman C, Sebastián F, Royo J, Xiong S, Boström D. Ash characterisation and transformation behaviour from novel crops fixed bed combustion: Poplar, Brassica and Cassava fuels. Energy and Fuels 2012;26:3218-3229.

vii) Lindström E, Öhman M, Boström D, Boman C, Danielsson B, Palm L, Degerman B. Effekt av additivinblandning i bark- och skogsbränslepelletskvalitéer för motverkande av slaggning i eldningsutrustning / Effect of fuel-additives on slag formation during combustion of woody biomass pellets). Swedish Energy Agency, Report P 21464-1, February 2006, and Umeå University ETPC Report 06-02 (ISSN 1653-0551).

viii) Boman C, Fagerström J, Gårdbro G, Steinvall E, Boström D. Reduction of combustion alkali aerosols by addition of kaolin to pelletized biomass fuels. European Aerosol Conference, EAC 2012. Granada, Spain. September 2-7, 2012.

ix) Boman C, Boström D, Öhman M. Effect of fuel additive sorbents (kaolin and calcite) on aerosol particle emission and characteristics during combustion of pelletized woody biomass. 16th European Biomass Conference & Exhibition. Valencia, Spain. June 2-6, 2008.

x) Boman C, Israelsson S, Öhman M, Lundmark B. Förbränningsegenskaper och miljöprestanda vid småskalig eldning med pelleterad lövvedsråvara av asp / Combustion properties and environmental performance during small scale combustion of pelletized hardwood raw material of aspen. Swedish Energy Agency, Report P30011-01. May 2007, and Umeå University ETPC Report 07-01 (ISSN 1653-0551).

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

xi) Sommersacher P, Brunner T, Obernberger I. Fuel indexes: A novel method for the evaluation of relevant combustion properties of new biomass fuels. Energy and Fuels 2012; 26, 380−390.

xii) Näzelius, I.L., Boman, C., Rebbling, A., Boström, D., Öhman, M. Fuel indices for estimation of slagging of phosphorus-poor biomass in fixed bed combustion. Inskickad till tidskriften Energy&Fuels.

xiii) Gilbe, C., Öhman, M., Lindström, E., Boström, D., Backman, R., Samuelsson, R., Burvall, J. Slagging Characteristics during Residential Combustion of Biomass Pellets, Energy and Fuels, 2008, 22, 3536-3543

xiv) Xiong, S., Öhman, M., Zhang, Y., Lestander, T., Corn Stalk Ash Composition and Its Melting (Slagging) Behavior during Combustion, Energy and Fuels, 2010, 24, 4866-4871

xv) Mineral Impurities in Coal Combustion, Rask, E., Hemisphere Publishing Corporation, 1985, ISBN: 0-89116-362-X

xvi) Lindström, E., Larsson, S. H., Boström, D., Öhman, M. Slagging Characteristics during Combustion of Woody Biomass Pellets Made from a Range of Different Forestry Assortments, Energy and Fuels, 2010, 24, 3456-3461

xvii) Pronobis, M., Evaluation of The Influence of Biomass Co-Combustion on Boiler Furnace Slagging by Means of Fusibility Correlations, Biomass and Bioenergy, 2005, 28, 375-383

xviii) McLennen, AR, Bryant, GW., Bailey, CW., Stanmore, BR., Wall, TF., Index for iron-based slagging for pulverized coal firing in oxidizing and reducing conditions, Energy and Fuels, 2000, 14, 349-54

xix) Lawrence A., Kumar, R., Nandakumar, K., Narayanan, K., A novel tool for assessing slagging propensity of coals in PF boiler, Fuel, 2008, 87, 946-959

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

6 Slutsatser

Försök har genomförts för att påvisa inverkan av pellets fysikaliska egenskaper på omvandlingstid. 21 olika pelletssorter har undersökts, av fyra olika råvarublandningar av gran- och tallspån. I samband med ett av förbränningsförsöken undersöktes även RFID-teknikens potential att hjälpa till med att uppnå spårbarhet av ett bränsleflöde. Vidare har ett bränsleindex för prediktion av slaggning hos biobränsle tagits fram, samt tre undergrupper för bränsleindex för prediktion av partikelemissioner föreslagits.

Resultaten visar att, under de stabila förbränningsförhållanden (hög temperatur och god tillgång på syre) som tagits i beaktning i denna studie, så föreligger en signifikant skillnad i omvandlingstid mellan olika pelletråvaror. Några entydiga skillnader i omvandlingstid för pelletar av samma råvara men av olika densitet, hållfasthet och fukthalt vid samma förhållanden har emellertid inte kunnat påvisas. Några tecken på att en högre fukthalt genererar söndersprängning av pelleten, något som kan leda till ett snabbare förbränningsförlopp och högre förbränningstemperatur, kunde heller inte upptäckas. Ej heller kunde resultaten i den tidigare studie som visat att höga pelletdensiteter leder till längre omvandlingstid verifieras. En osäkerhet är emellertid att de generellt var relativt stor spridning i omvandlingstid för de pelletssorter som testeldades, vilket inverkar negativt på datakvaliteten. En orsak till detta kan vara att även om pelleten är producerad ur en och samma råvara kan det finnas en viss skillnad i till exempel råvarusammansättning och fraktionsstorlek mellan de individuella pelletarna.

Den litteraturgenomgång som gjorts inom projektet visar tydligt på att det saknas entydig information om hur omvandlingstid påverkas av pelletarnas hållfasthet och densitet, trots att pelletindustrin och användarna tydligt indikerar att en inverkan finns i fullskalig applikation. Detta projekt har därmed tillfört ny och viktig kunskap inom området, genom att visa att några störningar i förbränningen vid stabil och kontinuerlig drift inte torde orsakas av variationer i fysikaliska pelletegenskaper. Därmed är en viktig följdslutsats att de problem som rapporteras av industrin troligen kan härröras från upptändningsfasen (lägre temperatur och ojämn värmetillförsel) eller att problemen orsakas av något annat än själva förbränningen. En villabrännare styrs effektmässigt genom bränslematningshastigheten, vilken i sin tur är baserad på pelletens bulkdensitet - valt effektläge påverkar matarskruvens drifttid. Jämn drift förutsätter då emellertid att pelletens specifika effektutveckling i förhållande till dess volym är lika oavsett bulkdensitet. Om man antar att kommersiell pellets har liknande variationer i bulkdensitet som i denna studie, innebär detta att en effektvariation på upp till 20 % kan åstadkommas.

Ett slaggningsindex har genererats där graden av slaggningsproblem på och omkring rosten (ingen/låg, låg/moderat, moderat/kraftig) i brännar- och rosterutrustning för ett biobränsle kan förutsägas utifrån dess K, Na, Ca, Mg och Si-halt. Slaggningsindexet kan med betydligt bättre noggrannhet än tidigare i litteraturen framtagna index förutsäga upplevd grad av slaggningsproblem i en förbränningsutrustning.

Arbete med partikelindex har visat på att det är svårt att, i dagsläget, presentera ett generellt gällande index för partikelbildning. Tre sammansättningsområden (m a p Si-K-Ca) har identifierats där sub-modeller kan/bör utvecklas (för fosforfattiga bränslen); *i)* rena stamvedsbaserade bränslen med låg Si-halt (<120 mg/kg TS), *ii)* övriga mer ”askrika” skogsbiobränslen och energiskog (aska >1-2%) och energiskog, och *iii)* halm och gräsbränslen. Vidare visar studien att halmbränslen generellt uppvisar sett mycket höga partikelemissioner (>150 mg/Nm3), samtidigt som att de uppvisar stor benägenhet att bilda slagg. För askrika skogsbiobränslen och energiskog, samt i sameldning med torv, varierar partikelemissionerna i intervallet 20-200 mg/Nm^3, alltså från ”mkt låga” halter till ”höga”, utifrån föreslaget klassificering. Detta förklaras av komplexa askkemiska processer som bestämmer fördelning av kalium mellan olika askfraktioner. Fortsatt arbete behövs för att utveckla de askkemiska modellerna och generera applicerbara index. För

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

rena (okontaminerade) stamvedsbränslen (<120 mg Si/kg TS) tycks det finnas ett direkt samband mellan halten kalium i bränslet och bildning av fina partiklar, vilket visas i figur 9, och således kan användas som ett första index för att bedöma potentialen för partikelbildning. Analysen baseras dock endast på ett fåtal experiment varvid fortsatt verifiering är nödvändig.

7 Rekommenderad fortsättning

Utifrån slutsatserna från AP1 är följande fortsatta forskning inom fysikaliska pelletsegenskaper motiverade:

- Inverkan av fysikaliska pelletegenskaper vid upptändningsprocessen, kombinerat med generiska studier av strukturella skillnader i råpellets och pelletskoks för olika hållfastheter och densiteter,
- Framtagande av upptändningssekvenser som är robust för variationer i fysikaliska bränsleegenskaper,
- Djuplodande undersökning av störningar i villapannor som tros vara orsakade av variationer i bränslekvalitet,
- Utarbetande av kostnadseffektiva metoder för mätning, styrning och reglering för att kunna kompensera för variationer i fysikaliska bränsleegenskaper, inklusive demonstration av hur RFID kan användas för att automatiskt justera systemet för olika kvaliteter.

Utifrån slutsatserna från AP2 är följande fortsatta forskning inom bränsleindex motiverade:

- Fortsatt utvärdering och utveckling av här föreslagna bränsleindex för ökad precision och applicerbarhet.
- Generera partikel- och slaggningsindex för P-rika biobränslen.
- Generera mer valideringsresultat från fullskale-rosterutrustning där massbalanser vad gäller slaggbildning och partikelemissioner kan slutas.
- Fortsatt kartläggning av de grundläggande askkemiska processerna, både i system som domineras av ask-systemet K-Ca-Si, men även med inverkan av t ex aluminium och svavel (relevant för olika additiv), samt i asksystem där även fosfor finns.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

8 AP1 – Bilaga 1

Tabell 3: Parameterdata för försökspelleten.

Grupp	Pelletssort	Pelletdensitet (kg/m3)	Fukthalt (%)	Hållfasthet (%)	Bulkdensitet (kg/m3)
Grupp 1	1	1152	10,8	97,48	590
	2	1184	9,8	96,94	710
	3	1231	8,0	96,62	730
	4	1171	9,2	95,96	680
	5	1245	7,2	94,68	737
	6	1189	8,4	94,04	687
	7	1187	10,5	91,7	637
	8	1129	11,7	91,4	557
	9	1201	9,0	90,48	657
	10	1272	5,9	90,16	743
	11	1252	7,0	93,8	753
Grupp 2	12	1253	5,6	95,8	735
	13	1244	5,3	94,9	736
	14	1214	9,5	94,8	644
	15	1236	8,0	88,5	655
Grupp 3	16	1183	8,3	97,2	630
	17	1211	6,4	96,6	681
	18	1201	6,9	95,8	670
	19	1174	8,1	95,3	640
	20	1268	5,7	95	715
Grupp 4	21	1243	6,2	98,8	678

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

Tabell 4: Analysvärden för försökspelleten.

Parameter	Grupp 1	Grupp 2	Grupp 3	Grupp 4	Not
Fukthalt (%)	7,6	6,6	5,9	5,6	
Askhalt (% av TS)	0,3	0,3	0,4	0,2	
Askhalt, lev. tillstånd (%)	0,3	0,3	0,3	0,2	
Flykthalt (% av TS)	83,8	83,8	84,2	84,1	
Flykthalt	77,4	78,3	79,3	79,4	
Svavel (% av TS)	0,015	0,013	0,039	0,05	
Svavel, lev. tillstånd (%)	0,014	0,012	0,037	0,047	
Klor CL (% av TS)	0,011	0,011	0,015	0,011	
Klor CL, lev. tillstånd (%)	0,01	0,01	0,014	0,01	
Kol C (% av TS)	50,9	50,9	51,1	51,4	
Kol C, lev. tillstånd (%)	47	47,5	48,1	48,6	
Väte H (% av TS)	6	6,1	6,1	6,2	
Väte H, lev. tillstånd (%)	6,4	6,4	6,4	6,5	
Kväve N (% av TS)	0,11	0,11	0,11	0,11	
Kväve N, lev. tillstånd (%)	0,1	0,1	0,1	0,1	
Syre O, beräknat (% av TS)	42,7	42,6	42,3	41,9	
Syre O, beräknat, lev. tillstånd (%)	46,2	45,7	45	44,6	
Kalorimetriskt värmevärde	18,779	18,999	19,297	19,516	
Kalorimetriskt värmevärde, torrt prov (MJ/kg)	20,33	20,346	20,496	20,669	
Effektivt värmevärde, lev. tillstånd, konstant vol. (MJ/kg)	17,464	17,678	17,972	18,179	
Effektivt värmevärde, torrt prov, konstant vol. (MJ/kg)	19,097	19,094	19,232	19,389	
Effektivt värmevärde, torrt prov, konstant vol., askfritt (MJ/kg)	19,15	19,152	19,3	19,436	
Effektivt värmevärde, lev. tillstånd, konstant tryck (MJ/kg)	17,389	17,603	17,898	18,104	
Effektivt värmevärde, torrt prov, konstant tryck (MJ/kg)	19,026	19,024	19,161	19,318	
Effektivt värmevärde, torrt prov, konstant tryck, askfritt (MJ/kg)	19,08	19,081	19,229	19,365	
"Fixed carbon" (%)	14,7	14,8	14,5	14,8	
Fukthalt vid försök (%)	8,9	7,1	7,1	6,2	Medeltal för Grupp 1, 2 och 3
Pelletsdensitet vid försök (kg/m3)	1201	1237	1207	1243	Medeltal för Grupp 1, 2 och 3
Hållfasthet vid försök (%)	93,9	96	96	98,8	Medeltal för Grupp 1, 2 och 3
Avgasning (s)	55,8	58,1	58,1	55	Medeltal för Grupp 1, 2 och 3
Koksförbränning	220,8	248,1	253,3	238,1	Medeltal för Grupp 1, 2 och 3
95 % konfidens, avgasning, +/- (s)	2	1,8	1,6	1,8	Medeltal för Grupp 1, 2 och 3
96 % konfidens, koksförbränning, +/- (s)	12,6	6,6	8,9	10	Medeltal för Grupp 1, 2 och 3

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

Tabell 5: Matris för beräkning av Biot-tal.

Luft				
V	0,15	m/s		
"Aktiv diameter" vid partikel	0,075	m		
"Aktiv area" vid partikel	0,0044	m2		
Luftflöde	10	l/min		
Pellet				
Dia	8	mm		
Längd	10	mm		
Klotradie	4,9	mm		
Klotarea	305,7	mm2		
Lc	1,6	mm		
k	0,32	W/mK		
Densitet	1200	kg/m3		
Koks				
Klotradie	4,6	mm		
Klotarea	268,7	mm2		
Lc	1,5	mm		
k	2,83	w/mK		
Panna				
Ste-bolt	5,67E-08	W/m2K4		
Emissivitet pannvägg	0,85			
Beräkning				
Temp, ursprunglig (T(r0))	25	C ↔	298	K
Temp, slutlig (T(oändligt))	900	C ↔	1173	K
Temp, medel	462,5	C ↔	735,5	K
Temp, film partikel	681,3	C ↔	954,25	K
Kinematisk viskositet	2,01E-04	m2/s		
Diffusivitet	2,73E-04	m2/s		
Cp	1083,52	J/kgK	Tabellerat	
k (luft/gas)	0,071	W/mK		
Prandtl	0,737			
Re	7,29			
Nu	1,50			
hc	11	W/m2K		
h rad	176	W/m2K		
Bi (värme)	**2,8**			
D	6,00E-05	m2/s		
hm	0,018	m/s		
Bi (mass)	**1,5**			

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

Tabell 6: Matris för beräkning av effektutveckling. Värdena utgörs av medelvärden för alla pelletssorter inom respektive grupp.

	Grupp 1	Grupp 2	Grupp 3	Grupp 4
Flyktavgång (s)	55,8	58,1	58,1	55
Koksförbränning (s)	199,8	220,8	248,1	253,3
Värmevärde (MJ/kg)	17,464	17,678	17,972	18,179
Bulkdensitet (kg/m3)	680	692,5	667,2	678
Effektutveckling (kW/kg)	68,3	63,4	58,7	59,0
Effektutveckling (kW/m3)	46,5	43,9	39,2	40,0

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

SP-koncernens vision är att vara en internationellt ledande innovationspartner. Våra 1 400 medarbetare, varav över hälften akademiker och cirka 380 med forskarutbildning, utgör en betydande kunskapsresurs. Vi utför årligen uppdrag åt fler än 10 000 kunder för att öka deras konkurrenskraft och bidra till hållbar utveckling. Uppdragen omfattar såväl tvärtekniska forsknings- och innovationsprojekt som marknadsnära insatser inom provning och certifiering. Våra sex affärsområden (IKT, Risk och Säkerhet, Energi, Transport, Samhällsbyggnad och Life Science) svarar mot samhällets och näringslivets behov och knyter samman koncernens tekniska enheter och dotterbolag. SP-koncernen omsätter ca 1,5 miljarder kronor och ägs av svenska staten via RISE Research Institutes of Sweden AB.

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
Box 857, 501 15 BORÅS
Telefon: 010-516 50 00, Telefax: 033-13 55 02
E-post: info@sp.se, Internet: www.sp.se
www.sp.se

SP Rapport :
ISBN
ISSN 0284-5172

Mer information om SP:s publikationer: **www.sp.se/publ**

PART OF RI.SE

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB