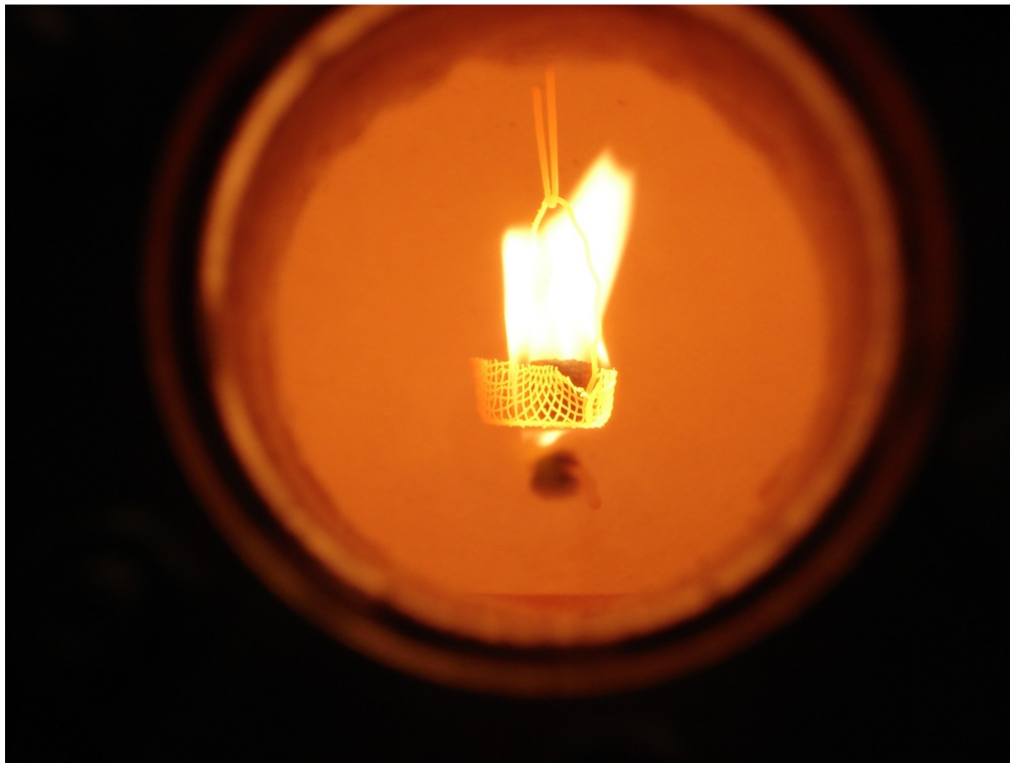




Förbränning av pellets framställda av defibrerad granråvara

*Combustion of pellets produced from refined
Norway spruce wood*



Gunnar Henriksson

**Arbetsrapport 221 2008
Examensarbete 15hp C**

**Handledare:
Rolf Gref**

Sveriges lantbruksuniversitet
Institutionen för skoglig resurshushållning
S-901 83 UMEÅ
www.srh.slu.se
Tfn: 018-671000



ISSN 1401-1204
ISRN SLU-SRG-AR-221-SE

Förbränning av pellets framställda av defibrerad granråvara

*Combustion of pellets produced from refined Norway spruce
wood*

Gunnar Henriksson

Examensarbete i ämnet skogshushållning med inriktning teknologi
Handledare: Rolf Gref
Examinator: Iwan Wästerlund

Förord

Detta arbete är den avslutande delen på min utbildning till högskoleingenjör i energiteknik med inriktning mot biobränslen. Mitt stora intresse för skog och biobränslen och tack vare en kurskamrats liknande intressen gjorde att jag fick kontakt med Rolf Gref på SLU. Det var för mig väldigt stimulerande att få träffa människor med liknande intressen och dessutom med ett stort engagemang i alla diskussioner oavsett det hade med utbildning eller samhällsfrågor i allmänhet att göra.

Olika omständigheter har bidragit till att detta arbete har dragit ut på tiden och tagit alldeles för lång tid att slutföra. Här måste jag rikta ett stort tack till framförallt Rolf som handledare för all hjälp och stöd, Sten-Axel Dahlqvist BTK/SLU och Marcus Öhman på Luleå tekniska universitet. Marcus som hjälpt till med förbränningen och sett till att jag fick en utrustning att använda. Tack också till Roland Tidström som har hjälpt till med fotografering och Henrik Sundström för givande diskussioner. De resultat som framkommit och de observationer som gjorts har skapat nya frågeställningar som skulle kunna ligga till grund för ytterligare undersökningar.

Umeå våren 2008

Sammanfattning

Idag används i huvudsak sågspån, kutterspån och flis som pellets råvara. Hammarkvarnar används ofta vid sönderdelning av råvaran innan pelletering. Massaindustrin däremot använder raffinörer som sönderdelare och får en s.k. defibrerad fiber vilken är helt olik den som hammarkvarnen producerar.

Syftet med detta arbete var att undersöka förbränningsegenskaperna och förbränningsförloppet för pellets producerad av defibrerad granråvara. Även inverkan av råvarans fraktionsfördelning (fraktionsstorleken) på förbränningsförloppet undersöktes. Pellets pressade av två olika fraktionsammansättningar och en industriproducerad referenspellets undersöktes (förbrändes).

Det som framkom antyder goda förbränningsegenskaper för raffinör pellets, däremot tycks fraktionsstorleken ha en inverkan på förbränningsförloppet. Pelleteringsegenskaperna var inte optimala för defibrerat material och det var stora problem att pressa materialet. Hållfasthet och densitet på de pellets som pressades motsvarade dock standardvärden för kommersiell pellets.

Vissa intressanta observationer gjordes, bland annat att fraktionsfördelning förändrades vid pelleteringen pga. en malningseffekt i pressen. Vid slipning av pelleten upptäcktes problem med hållfastheten som antyder att tendensen till smulning är större i pelletens konvexa del sedd i pressriktningen än i den andra änden.

Nyckelord: Biobränsle, defibrering, pelletering, partikelstorlek

Abstract

Fuel pellets are in Sweden mainly produced from sawdust and cutter shavings. Before the pelletising process the raw material is dried to attain consistent moisture content and ground up in a hammer mill. In the densification process (pelletising) the ground material is forced through holes in a rotating die. This heats up the wood particles which cause them to soften and self bond. After the process the pellets are cooled, sieved and bagged.

The milling process creates a wide range of particle sizes. How the particle size distribution influences the characteristics of pellets are still rather unclear although it is generally assumed that a mixture of particle sizes will increase pellet durability. The influence of particle size distribution of a pellet on burning characteristics is not known. In pulp mills the woody raw material is usually converted into chips which thereafter are treated in a defibrator into fibre bundles. Such a material is physically different from a mill ground material.

One of the main aims of this work was to investigate the burning characteristics of pellets produced from defibrated spruce wood and to compare these pellets with pellets made from mill ground saw dust. The influence of saw dust particle size distribution on burning characteristics was also evaluated for industrially produced and laboratory made pellets.

It was found that the char combustion time of pellets made from defibrated wood was somewhat longer than that of saw dust pellets. Anyhow, the differences were not statistically significant. The particle size distribution of the saw dust did affect the burning characteristics e.g. pellets made of a coarse fraction had faster char combustion than pellets made from a fine fraction. The investigation also revealed that during the pelletising (densification) process the saw dust was grinded to smaller particle sizes.

Key words: Biofuel, defibration, pelletising, partikel size

Innehållsförteckning

Förord	2
Sammanfattning	3
Inledning.....	6
Syfte	6
Pelleteringsprocessen	7
Förbränning	8
Faktorer som påverkar förbränningen	9
Material och metoder	10
Träråvaran	10
Pelletering.....	10
Förbränning	12
Resultat.....	14
Pelleteringsegenskaper	14
Förbränningsförlopp.....	17
Förlopp viktninskning	20
Diskussion	22
Referenser.....	24

Inledning

Pelletering av träråvara och förbränning av pellets ställer stora krav på både pelletsproducenter och tillverkare av förbränningsutrustning. De senaste årens ökande försäljning av pellets till villaägare, kommunala inrättningar och industrin har inneburit att en brist på råvara börjat uppstå. Massaindustrin har fått en ökande konkurrens om råvaran (Anon., 2007). Detta betyder också att skogsägare har fått flera möjligheter till ytterligare utnyttjande av skogen genom att producera skogsbränslen (energived). Skogsbränslen beskrivs som grenar och toppar (GROT), helved, flis och virke som massaindustrin inte vill ha (fel träslag, krokigt mm), och skadat virke (insekter, röta etc.). Nämnas bör att massaindustrin numera godtar en större andel rötved än tidigare, vilket kan tolkas som att industrin ser att det börjar dyka upp andra intressenter till massaveden.

Framtidens råvaror till förädlade biobränslen såsom bränsle pellets och briketter kommer att utgöras av ett varierande sortiment, såsom hela stockar som flisas där bark och rötved kan följa med i processen och toppar utan kvist där andelen kvistved är betydligt större än i stamved. Odlad och gödslad energiskog t.ex. sälg (*Salix*) och hybridasp kommer sannolikt också att utgöra en betydande del av råvaran. Detta kommer att ställa nya krav på produktion, skörd, förädling och förbränningsutrustning.

Redan nu har pelletsindustrin börjat använda massaved direkt från skogen som råvara och användningen kommer sannolikt att öka. För att hantera detta varierande sortiment på ett flexibelt sätt krävs en process som är anpassningsbar till varierande råvaruegenskaper. Att utifrån råvarans stora variation anpassa produktionslinjen till just den råvarans speciella egenskaper och även ha möjlighet att kundanpassa pelleten under löpande produktion kräver nya tekniker vid förbehandling av råvaran och pelleteringen.

Syfte

Syftet med föreliggande arbete var att undersöka pellets producerad med olika sönderdelningsprinciper samt materialets pelleterings- och förbränningsegenskaper. Råvaran begränsades till granved.

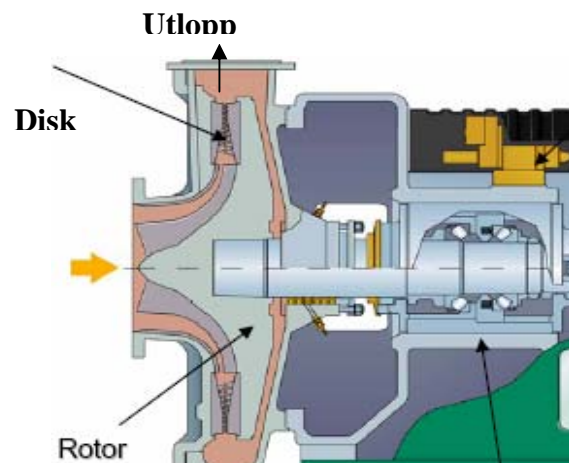
Pelleteringsprocessen

Bränslepelletts kan framställas från flera olika råvaror. I Sverige utgör för närvarande sågspån, kutterspån och flis de huvudsakliga råvarorna för pellets (Lehtikangas, 2001; Rhen, 2006) men som ovan redan framkommit kommer råvarusortimentet att utökas i framtiden. Vissa råvaruparametrar såsom fukthalt, kemisk sammansättning och fraktionsfördelning har stor betydelse för framställningen av pellets (Yadong & Liu, 2002; Bergström, 2005).

Pelleteringsprocessen kan indelas i huvudstegen: sållning, malning, torkning, pelletering, kylning och sållning. Då hela stockar börjar användas som råvara tillkommer ytterligare moment, flisning och ev. barkning. Utförligare beskrivning av pelleteringsprocessen kan hämtas från t.ex. Rhen (2006). Då sönderdelningen (malningen) utgör en viktig del av detta examensarbete kommer densamma att närmare beskrivas. Sönderdelningen (fraktioneringen) av råvaran sker ofta med hammar- eller kulkvarn. Sönderdelningen har stor betydelse för partikelstorleken och partikelgeometrin (Bergström, 2005).

De hammarkvarnar som idag används har den begränsningen att inga justeringar kan göras under drift, mer än eventuellt varvtalet. Det går inte att kompensera för förslitningar som uppkommer på slagor och anhåll vilket innebär att egenskaperna på spånet som lämnar kvarnen varierar med slagornas förslitning. Detta skapar en okontrollerbar blandning av spån och stickor av varierande form och längd.

Ett alternativ till hammarkvarnen är raffinören (figur 1), där man får en s.k. defibrerad råvara. Det finns ett flertal olika typer av tekniker beträffande raffinörer: trycksatta, kemiska, hög temperatur, vattenbegjutna, stenslipning och olika kombinationer av dessa.



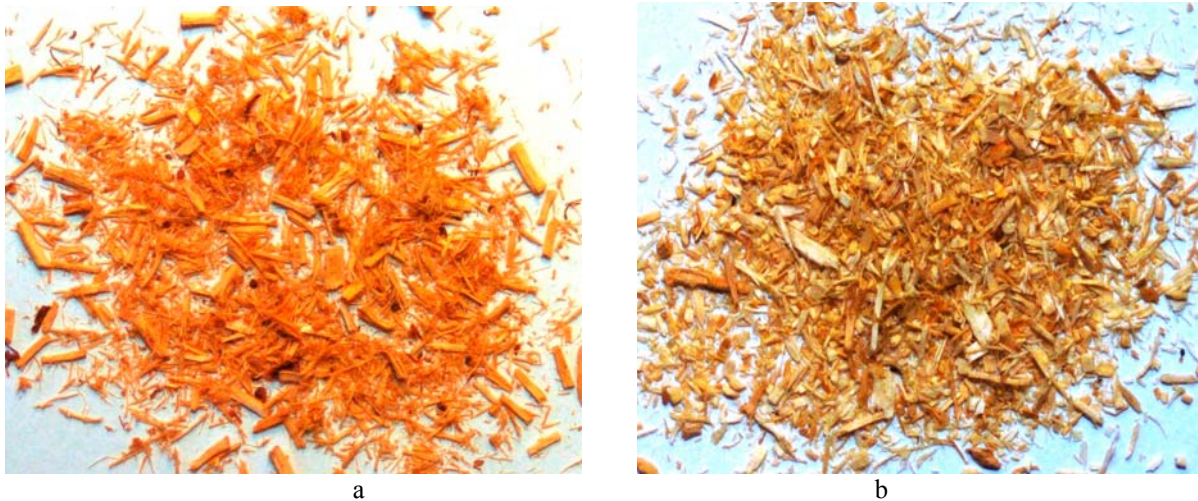
Figur 1. Krima HC-Refiner hos Cellwood i Nässjö och sprängskiss av densamma.

Figure 1. Krima HC-Refiner at Cellwood Nässjö and a detailed drawing.

Vid defibrering/raffinering används normalt färsk flis. Fukten i materialet underlättar bearbetningen vilket ger en lägre energiförbrukning. Flisen matas in mot rotorn som roterar med 1500 rpm. Materialet fortsätter sedan från rotorns centrum utåt mot disken. Detta sker med hjälp av centrifugalkraften men påverkas även av den vattenånga som bildas p.g.a. temperaturhöjningen i materialet. Utformningen på disken och avståndet mellan disk och

rotor bestämmer fiberns utseende. Avståndet mellan disk och rotor är justerbart under drift och det är även möjligt att påverka uppehållstid för materialet i raffinören (Sundholm, 1998).

Defibrerad råvara bestod i detta försök enbart av trådliknande fibrer med små andelar finfraktioner i motsats till spån från t.ex. hammarkvarn (figur 2). Längden på fibern bestäms av längden på det material (flis) som matats in i raffinören. En stor fördel med raffinörer är även möjligheten till snabba omställningar för olika storlekar på utgående material.



Figur 2 a. Defibrerad råvara, och b. spån från hammarkvarn.

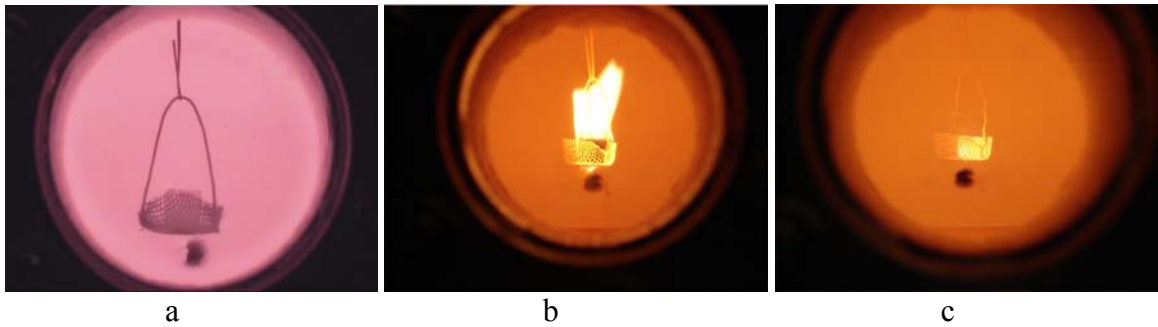
Figure 2 a. Refined wood chips, and b. sawdust from hammer mill.

Förbränning

Förbränningsförloppet indelas i tre huvudfaser: torkning, pyrolys och koksförbränning (figur 3). Under torkningen avgår den fukt som finns i pelleten och vissa flyktiga ämnen börjar förångas. Pyrolys är det stadium då de förångade ämnena antänds och förbränns. Pyrolysen pågår tills alla gasformiga ämnen förbränts. Vid pyrolysen är det frigjorda kolatomer som avgår från pelleten och reagerar med omkringliggande syre och antänds (Palchonok et al., 2002).

Koksförbränningen är den tidsmässigt längsta delen i förbränningen då alla gasformiga ämnen förbränts och återstoden skall glöda ut. Det innebär att syre måste ta sig in i den glödande pelleten för att kunna reagera med kolatomerna. En porös partikel med stora porer bör underlätta syreinträngningen och oxidationsreaktionen med kolatomerna (Erlich, 2005).

Under koksförbränningen kan askan påverka förbränningsförloppet genom att täppa till porer i kokspartiklarna så att syret inte får tillträde till kolatomerna. Askans egenskaper är beroende av dess kemiska sammansättning och av temperaturen som råder i eldstaden (ugnen).



Figur 3. Förbränningsförloppet: a. torkning; b. pyrolysis; c. koksförbränning.
Figure 3. Combustion stages: a. drying; b. pyrolysis; c. char combustion.

Faktorer som påverkar förbränningen

Tillförs luften på ett turbulent sätt har syret större möjligheter att reagera med kolatomerna i de flyktiga ämnena och förbränningen sker snabbare och mindre mängder oförbränt material lämnar eldstaden. Under koksförbränningen finns ett flertal faktorer som påverkar förbränningsförloppet. En viktig faktor är syrets reaktion med koksen under bildning av koldioxid. För att förbränningen skall kunna ske måste koldioxiden försvinna så att nytt syre kan reagera med koksen. Koldioxiden lägger sig som en film runt koksen men genom att öka luftflödet kan detta hinder minskas (Leckner, 1999; Israelsson et al., 2007).

En annan avgörande faktor som påverkar koksförbränningen är partikelytan där syret kan reagera med koksen. Är koksen så kompakt att förbränningen endast sker på ytan kommer förbränningsförloppet att se ut som om koksen krymper tills det endast återstår en liten glödande yta innan förbränningen upphör. Finns det däremot porer i koksen där syret kan tränga in sväller koksen (Erlich et al., 2005). Reaktionen mellan kol och syre kommer då även att ske inne i den porösa kokspartikel.

Material och metoder

Träråvaran

För försöket avverkades gran i Storuman ca 250 km nordväst om Umeå. Därefter flisades densamma i en trumtugg där flislängden kunde bestämmas under drift. Fraktionsbeteckningen och flislängderna var: G1 5 – 6 mm; G2 7 – 8 mm; G3 9 – 10 mm.

Flisen bearbetades sedan i raffinör hos Cellwood Machinery AB i Nässjö där olika inställningar prövades för att få ett så rinnande material som möjligt. Den process som användes i detta försök var RMP (Refiner Mechanical Pulp) där defibrering sker mekaniskt vid atmosfärstryck. Det raffinerade materialet transporterades sedan till i SLU i Umeå, avdelningen för skogsteknologi respektive enheten för biomassateknologi och kemi (BTC), Röbäcksdalen, för torkning och pelletering.

Materialet fördelades på en perforerad plåt och torkades med hjälp av varmluftsfläkt ned till ca 9,5 % fukthalt enligt den kontinuerliga fuktkontrollen. Ingen återfuktning av materialet gjordes. Denna fukthalt valdes för att passa till pelleteringsmaskinen (SPC 300). Under torkningen förändrades materialets egenskaper från att ha varit rinnande och relativt kompakt till ett voluminöst och trögt rinnande material. Detta medförde att det inte gick att pelletera den längsta fraktionen G3 utan enbart de kortare fraktionerna G1 och G2. Dessa var även de så trögt rinnande att pelletsmaskinen måste matas för hand. Maskinen hade problem att greppa materialet, vilket innebar en väldigt ojämn produktion och stora mängder opelleterat material kom ur maskinen. Kvaliteten på pelleten blev därmed också ojämn med en hög andel som inte höll ihop. Detta problem uppstod för såväl fraktion G1 som fraktion G2, dock betydligt mer vid pelletering av fraktion G2.

Pelletering

De pellets som användes i försöken var:

- pellets av raffinerat material producerat i pelletsmaskin vid BTC/SLU Röbäcksdalen (G1) matristjocklek 55 mm och 8 mm diameter
- industriellt tillverkad pellets tagna ur förråd hos slutanvändare (SK)
- pellets tillverkad i laboratoriepress med fraktion G1 och G3 (G1H & G3H)

Pellets av fraktionerna G1H och G3H tillverkades manuellt under kontrollerade former i laboratoriepress enligt beskrivning i Rhen (2004) och Bergström (2005). Från varje fraktion pressades 20 st pellets med 1,00 gram råmaterial till varje pellets. Densiteten varierades så att en serie med låg och en serie med hög densitet av varje fraktion tillverkades. Serien med den lägre densiteten tillverkades vid temperaturen 140°C och 100 MPa presstryck. Serien med den högre densiteten pressades vid temperaturen 180°C och presstrycket 290 MPa. Spånets fukthalt på ca 9,5 % matades ner i den uppvärmda 8 mm i diameter cylindern för hand. Sedan pressades pistongen ner i cylindern med hjälp av hydraulpress (figur 4). När respektive presstryck uppnåtts behölls detta tryck i 10 sekunder. Pelleten fick därefter svalna i tättslutande plastbehållare ett dygn innan vägning och mätning utfördes och densitet bestämdes.



Figur 4. Laboratorie pelletspress.

Figure 4. Laboratory scale pellet press.

Av pellets pressade vid Röbäcksdalen och de industriellt tillverkade togs 50 st. från varje fraktion för vidare försök. Pelletten kapades/slipades för att uppnå jämna ändytor för mätning med en mikrometer. Mikrometer användes för att få samma presstryck på ändytorna vid varje mätning. De vägdes med en noggrannhet på 0,01 g och densiteten per styck räknades fram utgående från diameter, längd och vikt data.

Tabell 1. Egenskaper för pellets använda vid förbränningsförsöken

Table 1. Characteristics of pellets used for combustion experiment

Pellet/nummer	Längd mm	Diameter mm	Vikt g	Densitet g/cm ³
G1 51	7,88	8,05	0,500	1,247
G1 52	8,01	8,02	0,501	1,238
G1 53	8,00	8,00	0,501	1,246
G1 54	7,83	8,03	0,498	1,256
G1 55	8,06	8,01	0,499	1,229
G1 58	7,85	8,03	0,500	1,258
G1 61	7,87	8,05	0,499	1,246
G1 63	7,83	8,02	0,495	1,251
SK 110	7,96	8,13	0,501	1,212
SK 111	8,27	7,98	0,501	1,211
SK 116	7,85	8,03	0,500	1,258
SK 117	7,98	8,12	0,500	1,210
SK 120	8,09	8,08	0,501	1,208
SK 122	7,92	8,20	0,500	1,195
SK 127	8,05	8,07	0,501	1,217
SK 128	7,91	8,11	0,499	1,221
G1H 226	7,71	8,19	0,502	1,236
G1H 230	7,80	8,18	0,501	1,222
G1H 231	7,65	8,19	0,500	1,241
G1H 232	7,80	8,18	0,496	1,210
G1H 234	7,61	8,18	0,481	1,203
G1H 235	7,68	8,18	0,492	1,219
G1H 236	7,85	8,18	0,500	1,212
G1H 237	7,75	8,17	0,501	1,233
G3H 281	7,68	8,25	0,500	1,218
G3H 283	7,66	8,21	0,499	1,231
G3H 284	7,68	8,13	0,501	1,257
G3H 286	7,79	8,20	0,501	1,218
G3H 289	7,90	8,15	0,501	1,216
G3H 290	7,74	8,13	0,500	1,244
G3H 291	7,55	8,16	0,500	1,266
G3H 292	7,76	8,15	0,498	1,230

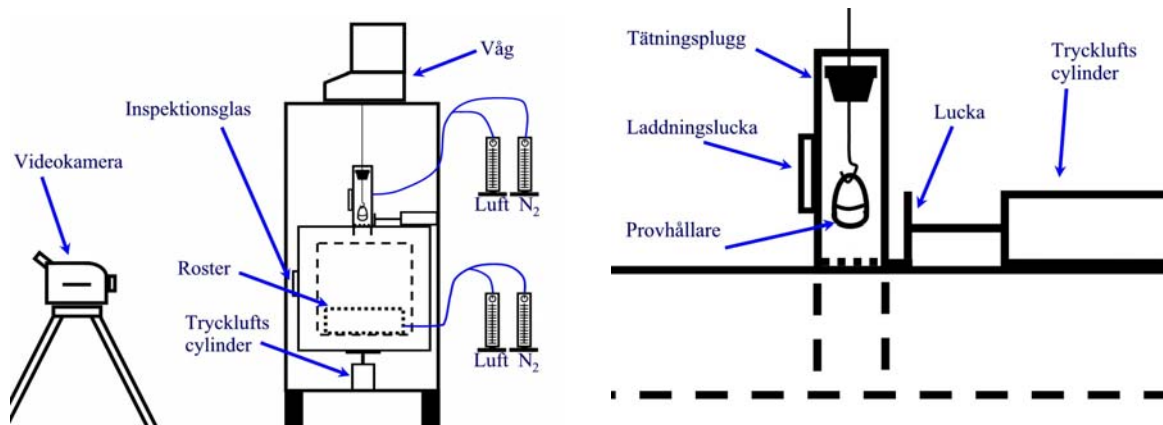
För en jämförelse av fraktionsstorleken och sammansättningen före och efter pelletering lades några pellets i vatten under ett dygn, silades sedan genom torkduk, lufttorkades 2 dygn och fotograferades sedan.

Tyvär visade det sig att det inte gick att sortera fram två densitetsnivåer med tillräckligt stor differens av de industriellt och BTC tillverkade pelletarna. Av de handgjorda pelletarna användes därför endast H-serien med den högre densiteten. Dessutom behövde vikten reduceras på pelleten för att passa till förbränningsugnen. Ugnens begränsade volym innebar att förbränningsgaser inte hinner avgå tillräckligt snabbt och inspektionsglas av kvartsglas i fronten på ugnen sotade igen om för stor massa förbränns. Således slipades all pellets ner till vikten $0,5 \text{ g} \pm 0,020 \text{ g}$.

Förbränning

Ugnen för förbränningsförsöken var eluppvärmd och temperaturen kunde varieras mellan 50-1000°C (Israelsson et al., 2007). Ugnens volym var 3,5 l med innermått 13,4 x 13,5 x 20,1 cm (B x H x D). Ett varierbart gasflöde bestående av en kontrollerad blandning av N₂ och luft tillfördes ugnen i botten via en rooster och i toppen. Gasflödet kunde varieras mellan 3-15 l/min med hjälp av en luftflödesmätare (modell SHO-RateII 1355). Syrehalten varierades med olika blandningar av kvävgas och torkad luft, där luften var filtrerad från universitetets tryckluftsystem. Rostret i ugnen var fyllt med metallspån vilket medförde att gasblandningen blev uppvärmd till ugnens temperatur innan den kom in i förbränningsutrymmet. Ugnen höll ett lätt övertryck och så även i laddningsstället när laddningsluckan var stängd, vilket medförde att endast gas från flödesmätarna kom i kontakt med provet under förbränningsförsöken. Atmosfären kunde bestämmas i ugnen och laddningsstället oberoende av varandra med hjälp av separata flödesmätare. Ugnstemperaturen styrdes med en euroterm regulator med tillhörande termoelement. Termoelementet var placerat 30 mm från det prov som analyserades och temperaturvariationen i ugnen var uppmätt till $\pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Pelleten placerades i en provhållare tillverkad av ett finmaskigt nät i rostfritt stål. Ugnen hissades upp med tryckluft, varvid samtidigt öppnades luckan så att provhållaren hamnade mitt i ugnen (figur 5). När provhållaren kommit mitt i ugnen tätar tätningspluggen öppningen och provhållaren hängde endast i vågen (modell Mettler Toledo PB503-s/FACT). Hela det beskrivna förloppet sker helt automatiskt. Registrerade viktdata från vågen plottades i ett vikt - tid diagram. Försöken antecknades noggrant i loggbok och förbränningsförloppet dokumenterades med digital videokamera. Torktid, pyrolystid (avgasning och förbränning av flyktiga ämnen) samt koksförbränningstid bestämdes utifrån videofilmen.



Figur 5. Förbrännings ugn samt detaljskiss av provhållare.
Figure 5. Combustion oven and the sample holder.

Pelletarna förbrändes styckvis, dels vid 1000°C och 21 % syrehalt och dels vid 800°C och 10 % syrehalt. Utifrån filmerna mättes tiderna från lågans uppträdande till dess försvinnande, då pelleten började glöda och då den slutat glöda. Även viktminskningen på pelleten registrerades under förbränningsförloppet.

Resultat

Pelleteringsegenskaper

Slipningen av pelleten förlöpte inte utan problem. Den slipades på en slipskiva med nr. 120 slippapper. Problemet bestod i att små bitar lossnade varför kasseringsprocenten blev hög. Pelleten har en urgröpt (konkav) och en avrundad (konvex) ände sedd i pressriktningen (figur 6). Det var alltid den konvexa sidan som var svår att slipa plan och där det uppstod smul. Oavsett hur mycket som slipades bort av pelleten uppstod smul. Finare papper, ändrad ansättningsvinkel mot slipskivan, ansättningsstryck hade ingen inverkan. Samtliga undersökta pelletstyper uppförde sig på liknande sätt utom de som var tillverkade i laboratoriepressen.



Figur 6. Ändslipad (tv) och oslipad pellet (th).

Figure 6. End cut (left) and non end cut pellet (right).

För att undersöka hur fraktionsstorleken på spånet i en pellets påverkar förbränningsförloppet brändes pellets tillverkade från den minsta (G1H) och den största (G3H) fraktionen). Vid enstycks pressningen märktes problemet vid inmatning med materialen G1 och G3 vilka var besvärliga att få ner i pressverktyget. Fraktionerna G1 och G2 var också besvärliga att pelletera (mata in) i pelleteringsmaskinen (SPC 300). Materialet bör rinna lätt för att inte bromsa upp flödet genom matrisen.

En intressant iakttagelse gjordes efter det att pelletarna blöttes upp i vatten och torkats. För de pellets som tillverkats maskinellt i matris (BTC eller industriellt) var inte fraktionsstorleken likadan före och efter pressen (Figur 7 och 8). Den färdiga pelleten hade en annan fraktionsstorlek och fraktionsfördelning än det ingående spånet. I den manuellt med laboratoriepress tillverkade pelleten däremot, förändrades inte fraktionsstorlek och fördelning nämnvärt (Figur 9 och 10).



Figur 7. Raffinerat spån (G1) före pelletering och i färdig pellet.
Figure 7. Refined sawdust (G1) before pelletizing and sawdust from a pellet.



Figur 8. Spån SK från hammarkvarn före pelletering och spån i färdig pellet SK.
Figure. 8. Sawdust SK from hammer mill before pelletizing and sawdust from a SK pellet.



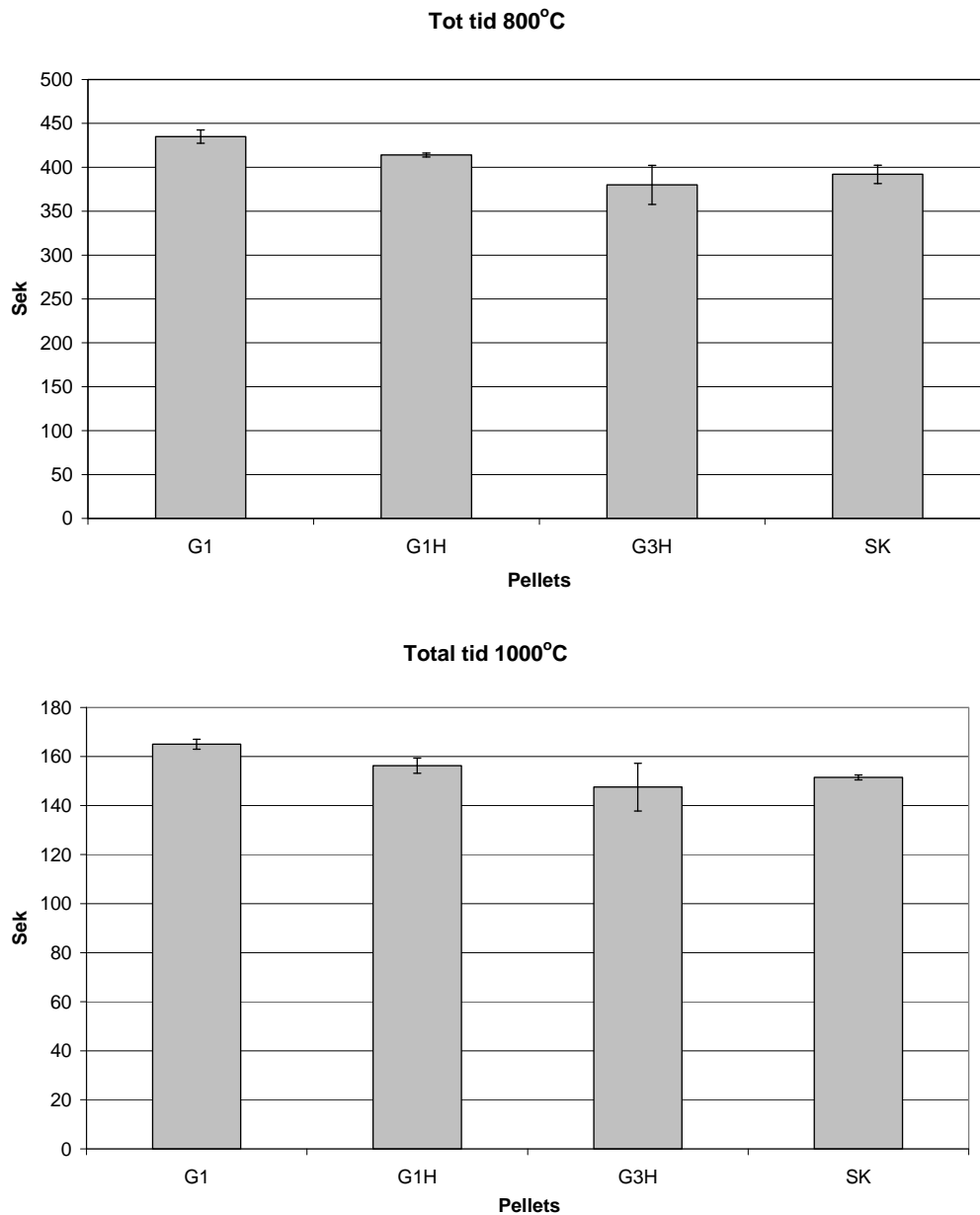
Figur 9. Raffinerat spån (G1) före pelletering och spån i färdig pellet G1H.
Figure 9. Refined sawdust G1 before pelletizing and sawdust in G1H pellet.



Figur 10. Raffinerat spån (G3) före pelletering och spån i färdig pellet G3H.
Figure 10. Refined sawdust (G3) before pelletizing and sawdust in corresponding pellet.

Förbränningsförlopp

Det totala förbränningsförloppet visas i figur 11 för respektive pellets och förbränningstemperatur. Det som kan utläsas är att den grövsta fraktionen G3H, verkade ha ett snabbare förbränningsförlopp än de övriga, dock med betydande variationer. Att tiden var olika för G1 och G1H där den laboratorietillverkade hade ett snabbare förlopp var anmärkningsvärt. G1 och G1H innehåller samma råvara men tillverkats på olika sätt.

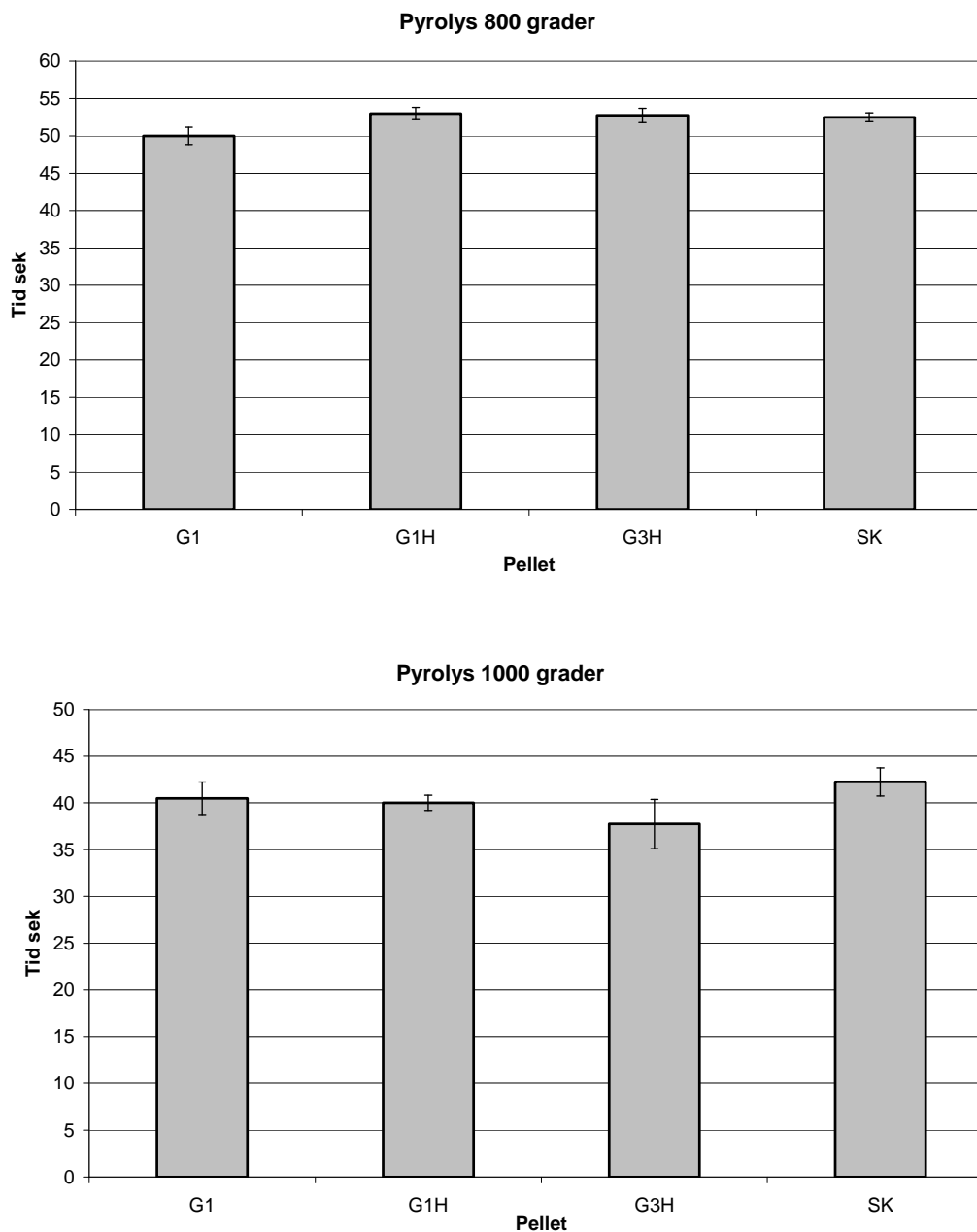


Figur 11. Total tid för förbränning vid 800 och 1000°C. Dessa tider innehåller torkning, pyrolys och koks förbränning. Standardavvikelsen markerad med stapel, n=4.

Figure 11. Total combustion time (drying, pyrolysis and char combustion) at 800 and 1000°C. Standard deviation marked with a bar, n=4.

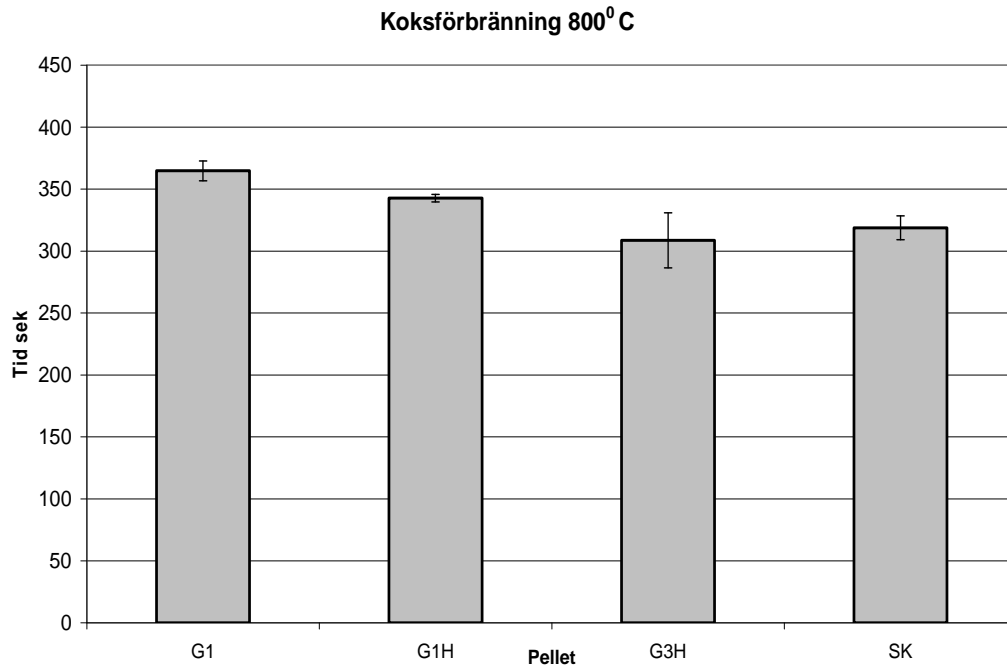
I dessa resultat redovisas inte torktiden, p.g.a. att fukthalten på färdig pellet varierade och svårigheter att fastställa exakt när torkfasen började. Variationer i torktiden påverkar dock inte pyrolys och koksförbränning i någon högre grad, eftersom torktiden är kort i förhållande till övriga delar i förbränningen.

Pyrolysförbränning redovisas i figur 12 för respektive pelletstyp och förbränningstemperatur. Snabba förbränningsförlopp och stora standardavvikelser gör att det inte kunde dras några säkra slutsatser från detta försök. Man skulle förvänta sig liknande trender för förloppen vid 800 och 1000°C men det upptäcktes inte vid försöket.



Figur 12. Pyrolysis förbränning vid 800 och 1000°C. Standardavvikelsen markerad med stapel, n=4.
Figure 12. Pyrolysis combustion at 800 and 1000°C. Standard deviation marked with a bar, n=4.

Koksförbränningen redovisas i figur 13. G3H uppvisade det snabbaste förloppet, dock med stora variationer men klart snabbare än G1 och G1H. Här var skillnaden mellan G1 och G1H också tydlig. Referens pelleten SK uppvisade ett snabbare koksförbränningsförlopp än både G1 och G1H och i stort sett likvärdig med G3H.

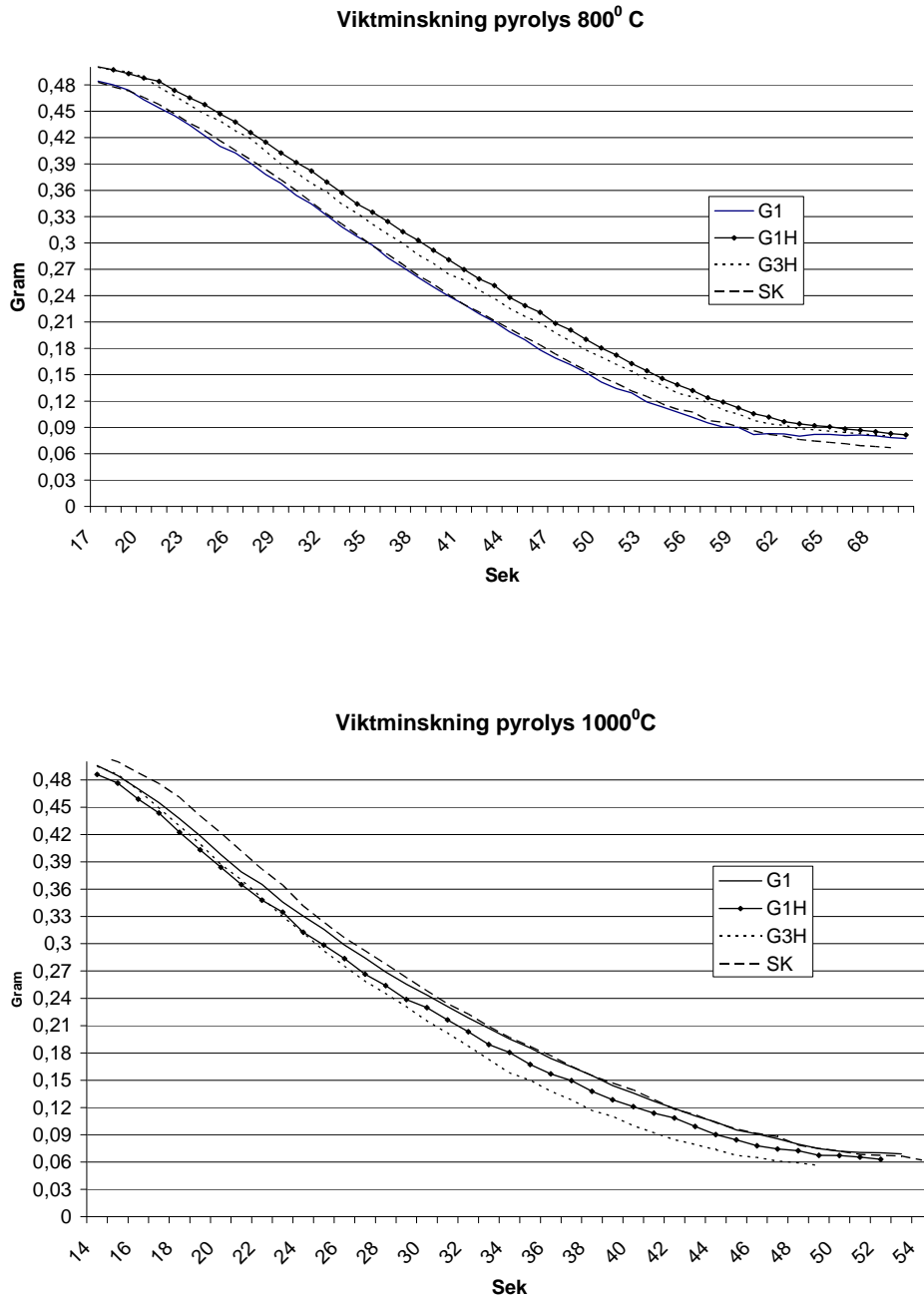


Figur 13. Tid för koksförbränning vid 800 och 1000°C. Standardavvikelsen markerad med stapel, n=4.
Figure 13. Char combustion time at 800 and 1000 °C. Standard deviation marked with a bar, n=4.

Det fanns tendenser som antydde att en pellet tillverkad av den grövre fraktionen uppvisade något snabbare koksförbränning än referensen. G3H hade det snabbaste förloppet men variationerna var stora. Hos G1 och G1H fanns skillnader där G1H hade ett snabbare förlopp trots att de var gjorda av exakt samma råmaterial.

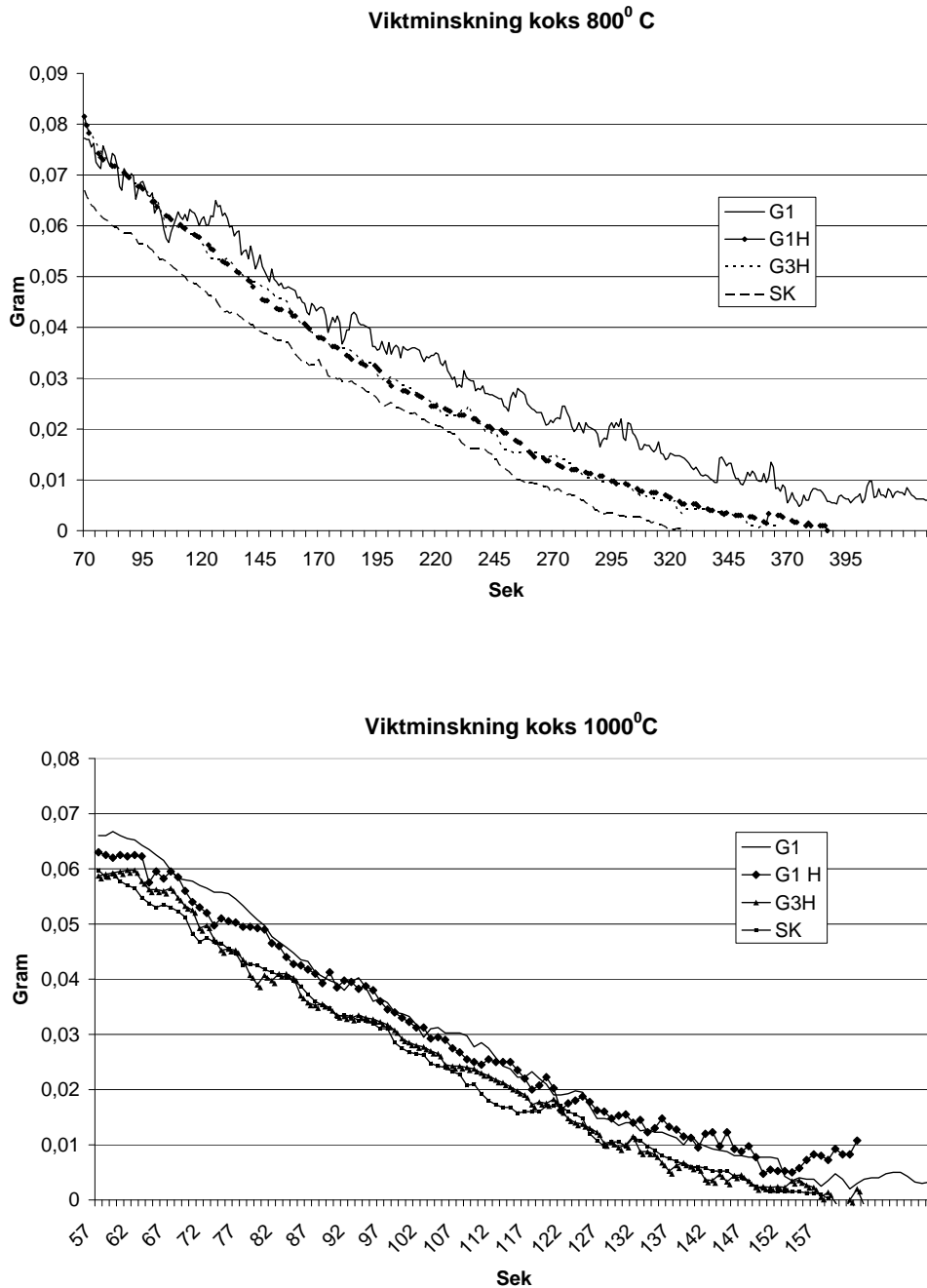
Förlopp viktminskning

I figur 14 visas medelvärden på viktminskningen för respektive pellet under pyrolys förloppet. Ingen pellet avvek utan viktminskningen per tidsenhet såg ut att vara i stort sett lika för samtliga pellets. Däremot noterades att koksen vid 800° C var något tyngre än om förbränningen skedde vid 1000° C.



Figur 14. Viktminskning under pyrolys förbränning vid 800 och 1000° C.
Figure 14. Weight loss during pyrolysis combustion at 800 and 1000° C.

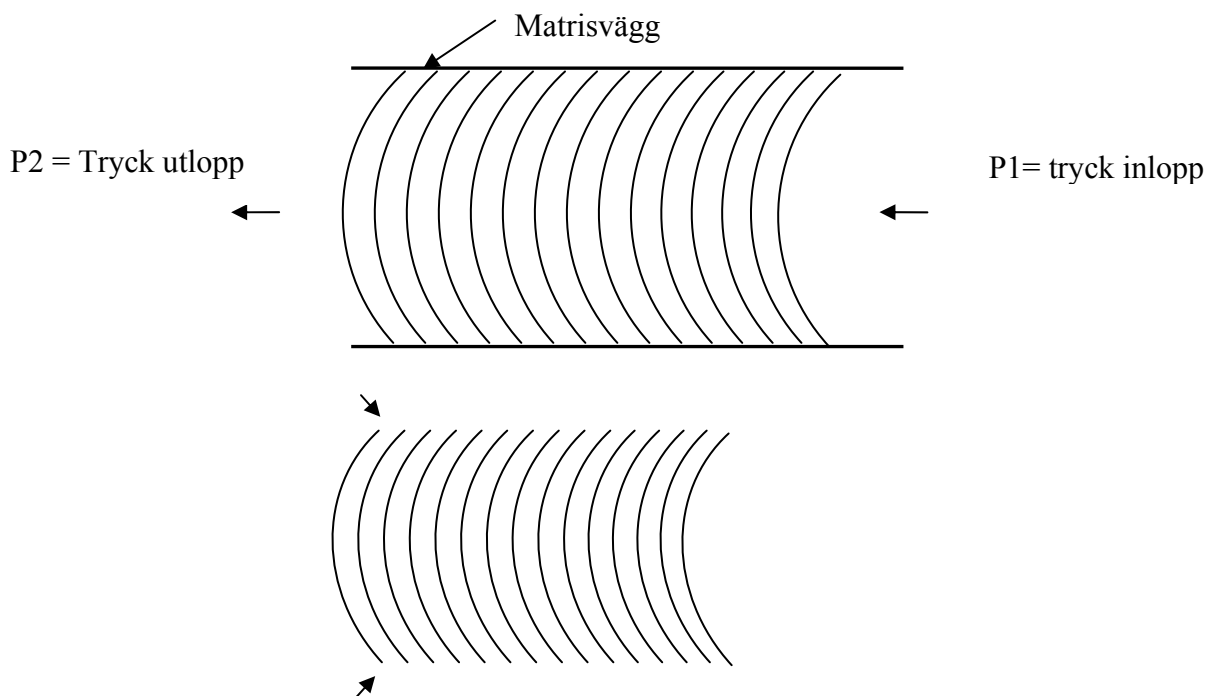
I figur 15 visas medelvärden för viktnedgången för respektive pellet under koksförbränningen. Inga skillnader observerades, utan viktnedgången var ungefär likadan för samtliga pellets. Viktnedgången per tidsenhet föreföll även att vara ungefär likadan oavsett vikten på koksen vid avslutad pyrolys förbränning.



Figur 15. Viktnedgång under koksförbränning vid 800 och 1000°C.
Figure 15. Weight loss during char combustion at 800 and 1000°C.

Diskussion

De problem som uppdagades vid slipningen av pelleten där all smulning skedde från den konvexa delen på pelleten är intressant. En ide till orsaken har växt fram och leder således till nedanstående resonemang (figur 16).



Figur 16. Modell för hur spån komprimeras i en pellets matris.

Figure 16. Model how sawdust is compressed in a pellets matrix.

$P1 > P2$ vilket innebär att ΔP utgörs av väggfriktionen (Holm et al. 2006). Detta innebär att hastigheten på materialet genom matrisen är högre i centrum än vid matrisväggen. Detta fenomen bör innebära att pelleten består av en konvex struktur i pressriktningen och förmodligen medför densitetsvariationer i pelleten p.g.a. högre tryck vid matrisvägg än i centrum. Detta bör också leda till en högre temperatur vid ytan på pelleten än i centrum vilket även det bidrar till högre densitet vid ytan än i centrum. Denna konvexa struktur bör då medföra invändiga spänningar och då ändytan på pelleten saknar mothåll, se pilar i figur 16, lossnar material i den konvexa änden lättare än i den konkava.

Förbränningsförloppet för pellet tillverkad av defibrerad råvara ser i detta arbete ut att ha ett något längre tidsförlopp, i vissa fall dock likvärdigt, när det gäller koks förbränningen jämfört med referenspelleten. Nu var referenspelleten inte tillverkad av samma råvara som de övriga utan innehöll även tallspån. Tall har i andra undersökningar uppvisat ett snabbare koksförbränningsförlopp än gran (Rhen, 2006).

Det som dock tydligt har framkommit var att G1H och G3H hade ett snabbare förlopp vid förbränningen än G1 särskilt vid 800° C och av dessa tre hade G3H det snabbaste förloppet. Bilderna på de i vatten upplösta pelletarna visar tydligt på skillnaden i fraktionsstorlek mellan dessa, nämligen att G1H och G3H bestod av grövre fraktioner än G1, (Figur 7, 9 och 10). Detta visar tydligt på att en grövre fraktion ger ett snabbare förbränningsförlopp.

Skillnaden mellan G1 och G1H kan endast förklaras med att den maskinellt tillverkade pelleten av G1 fraktionen har spånets malts ned i matrisen vid pelletering. Pressen i laboratoriet tillverkade pelleten där spånet inte bearbetas utan spånet komprimeras med bibehållen fraktionsstorlek. Pelleteringsmaskinen har således en malande funktion och åstadkommer därmed en finare fraktion i pelleten än vad som finns i utgångsmaterialet.

G1H och G3H som producerats i laborierpressen svälde dessutom i längdled vid förbränning vilket antyder att syre fick bättre tillträde att reagera med kokspartiklarna och kan delvis förklara den något snabbare förbränningen.

Slutsatser och kommentarer:

- Förbränningsförloppet för pellets av defibrerad råvara var lika eller något längre än referenspelleten,
- Matrispressen för pellets maler spånet så att spånets fraktionsstorlek före och efter pressen är helt olika.
- Om gran har ett längre förbränningsförlopp än tall bör detta innebära att brännare beter sig olika beroende på om det är tall eller gran som förbränns. Kan detta då kompenseras genom att variera fraktionsstorlek i pelleten för att uppnå likvärdiga förbränningsegenskaper oberoende av träslag?
- De finfraktioner som uppstår vid transport av pellets kommer antagligen från den konvexa änden på pelleten och uppstår troligen oavsett hur mycket som sällas på fabrik innan transport.
- Om invändiga spänningar finns, kan då pelletering utföras på ett sätt som minimerar dessa?
- Vad kan tillverkare av pelleterings utrustning göra för att minimera malning och ev invändiga spänningar?

Flera studier behövs i framtiden för att kunna effektivisera pelleteringsprocessen och framställa ett förädlat bränsle (pellets) med optimala transport och förbränningsegenskaper.

Referenser

Skriftliga

- Anon., 2007. Bioenergi – till vad och hur mycket. Formas fokuserar nr 11. Formas, Stockholm.
- Bergström D. 2005. Pelletering av tallspån – grundläggande studier. SLU. Inst. Skogsteknologi, Umeå. Studentuppsatser teknologi nr 80.
- Erlich C., Öhman M., Björnbom E. & Fransson T. H. 2005. Thermochemical characteristics of sugar cane bagasse pellets. *Fuel* 84: 569 – 75.
- Holm J. K., Henriksen U. B., Hustad J. E. & Sörensen L. H. 2006. Toward an understanding of controlling parameters in softwood and hardwood Pellets Production. *Energy and Fuels* 20: 2686-2694
- Israelsson S, Henriksson G, Bohman C. & Öhman M. 2007. Påverkan av partikelfraktionsfördelningen på utbränningshastigheten hos träpellets vid nyttjande av olika sönderdelningsmetoder. STEM Slutrapport (P22592-1)
- Leckner B., Hansson K.-M., Tullin C., Borodulya A. V., Dikalenko V. I. & Palchonok G. I. 1999. Kinetics of fluidized bed combustion of wood pellets. *Proceedings 15th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion*. Savannah, GA. Paper FBC 99-0049
- Lehtikangas P. 2001 Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. from fresh and stored sawdust. *Biomass and Bioenergy* 20:357-360.
- Palchonok G., Leckner B., Tullin C., Martinsson L. and Borodulya A. 2002. Combustion Characteristics of wood pellets. *Proceedings of First World Conference on Pellets*. Stockholm, Sweden. ISBN 91-631-2833-0.
- Rhen C. 2006. Basic studies on characterization, pelletizing and pellet combustion of spruce woody pellets. Faculty of Forestry Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences. *Acta Universitatis Agriculturae Suecicae*. Doctoral Thesis No 83.
- Sundholm J. 1998. Mechanical pulping, Fapet OY. ISBN 952-5216-05-5
- Yadong L. & Liu H. 2002. High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. *Biomass and Bioenergy* 19: 177 – 186.

Muntlig

Ek Peter. Cellwood Machinery AB Nässjö 2006.