



Förbränningsegenskaper och miljöprestanda vid småskalig eldning med pelleterad lövvedsråvara av asp

Christoffer Boman, Samuel Israelsson, Marcus Öhman,
Bo Lundmark



GLOMMERS
MILJÖENERGI AB

Umeå Universitet 2007
STEM Slutrapport (P 30011-01)
ETPC Report 07-01

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

Christoffer Boman, Samuel Israelsson, Marcus Öhman*

Energiteknik och Termisk Processkemi, Umeå Universitet, 901 87 Umeå

* Ny adress: Avd för Energiteknik, Inst för Tillämpad fysik, maskin- och materialteknik, 971 87 Luleå

Bo Lundmark

Glommers Miljöenergi AB, Storgatan 1, 930 81 Glommersträsk

STEM - Småskalig bioenergianvändning

Slutrapport av delprojekt (P 30011-01)

ISSN 1653-0551

ETPC Report 07-01

FÖRORD

Föreliggande rapport redovisar en studie finansierad av direkta medel i form av en utvecklingscheck från Energimyndigheten (STEM) och av naturabidrag från Glommers Miljöenergi AB. Projektet har bedrivits under 2006 inom STEM's program för forskning och utveckling "Småskalig bioenergianvändning". Författarna vill tacka Ulf Nordström vid ETPC, Umeå universitet för teknisk support, Rainer Backman, även han vid ETPC, för värdefulla diskussioner i samband med utvärdering av resultat samt Iwan Wästerlund vid SLU i Umeå för råd i samband med val av lövvedsråvara.

Umeå i Maj 2007

Christoffer Boman, Projektledare

SAMMANFATTNING

Mängden sågspån av traditionell barrvedsråvara som finns tillgänglig för produktion av bränslepellets är begränsad och redan idag upplever branschen en tydlig brist på tillgänglig inhemsk råvara. För att klara en ökad efterfrågan kommer sannolikt nya alternativa råvaror för pelletsproduktion därför börjar nyttjas. För den småskaliga marknaden är det viktigt att nya alternativa råvaror motsvarar dagens stamvedspelletts för att säkerställa en hög tillgänglighet, effektivitet och låga emissioner. En sådan alternativ råvara för pelletstillverkning är lövvedsspån. Inom Sverige är dock tillgången på lövvedsspån från sågverk relativt liten, men något som diskuteras är att nyttja gallringsfraktioner (mindre träd och sly) av t ex björk och asp.

Den övergripande målsättningen var därför att studera förbränningsegenskaper och miljöprestanda vid eldning med pelleterad lövvedsråvara i typiska pelletsanläggningar för den småskaliga marknaden. Pelleterad aspråvara användes med de specifika delsyftena att bestämma; *i*) förbränningsprestanda (askbildning, tillgänglighet och slagningstendens), *ii*) miljöprestanda (emissioner av CO, NO, SO₂, HCl och stoft) i befintliga småskaliga anläggningar och *iii*) förbränningsegenskaper (utbränningshastighet/reaktivitet) vid kontrollerad förbränning av enskilda pellets. Projektet kan ses som en förstudie som möjliggör en preliminär bedömning av potentialen för nyttjandet av pelleterad lövvedsråvara (i detta fall obarkad asp) i småskaliga anläggningar utifrån förbränningsaspekter.

Pellets (Ø 8 mm) från obarkad aspråvara med grenar och kvistar inkluderat tillverkades vid Glommers Miljöenergi AB. Förutom en något trögare malning, upvisade aspråvaran helt godtagbara pelleteringsegenskaper och den producerade pelletsen var likvärdig med typisk träpellets av barrvedsråvara på marknaden idag m a p bulkdensitet, längd och finfraktion. Innehållet av bark i råvaran ökade dock halterna av askbildande element (K, Ca och Mg) samt vissa spårmetaller (Zn, Cu och Pb) jämfört med aspflis (stamved) och referensträpellets. Eldningstester (24 h) i två för marknaden typiska pelletsbrännare utfördes och askbildning, slagningstendens och emissioner (gaser och partiklar) karakteriserades både kvantitativt och kvalitativt. Vidare genomfördes analys av förbränningsförlopp/koksreaktivitet och koksutbyte hos enskilda asppelletts och olika referenspellets i en atmosfärisk eluppvärmd laboratorieugn. Även koksensitet och pelletsens krympning och viktminskning efter pyrolys bestämdes.

Inga driftmässiga problem (t ex slagning) konstaterades under eldningsförsöken med asppellettsen, vilket sannolikt berodde på den låga halten kisel och höga halten kalcium. Något högre emissioner av CO, NO och stoft kunde konstateras i jämförelse med referensvärden för kontinuerlig förbränning av träpellets i villabrännare. Stoftet (massan PM₁₀) utgjordes till ca 95% av submikrona partiklar främst bestående av kalium, kol och svavel (sannolikt i form av kaliumkarbonat/sulfat). Högre halter kalium i asppelletts jämfört med referensträpellets, förklarar troligen de högre halterna stoft i rökgaserna. Studien visar vidare att förbränningsförloppet (torkning, pyrolys och koksförbränning) samt koksutbytet för den studerade asppellettsen var likvärdigt med referenspellets. Utifrån denna relativt begränsade studie, kan slutsatsen dras att aspråvara tycks ha god potential att utgöra råvara för produktion av bränslepellets utifrån aspekter rörande pelleteringsegenskaper, pellets kvalitet och förbränningsegenskaper. Man måste dock vara uppmärksam på risken för förhöjda halter av askbildande element och vissa spårmetaller i pelletsen samt förhöjda emissioner av såväl gaser som partiklar i jämförelse med dagens träpellets på marknaden. Dessa aspekter är dock till största delen relaterade till innehållet av bark o dl i pelletsråvaran och sammanfaller därför med de generella frågeställningar (bränsle-, tekniska- och miljömässiga) som är aktuella om/när råvarubasen för bränslepellets skall utvidgas med nya skogssortiment och åkergrödor.

ABSTRACT

The overall objective of the project was to study the combustion properties and emission performance during combustion of pelletized hardwood raw material in typical residential appliances. Unbarked aspen trees including branches and twigs were used in this project with the specific objectives to determine; *i*) combustion performance (ash formation, accessibility and slagging tendencies), *ii*) environmental performance (emissions of gases and particles) in present residential appliances and *iii*) combustion characteristics (total conversion time/reactivity) of single pellets. The project was a pilot study that enables a first evaluation of the potential of pelletized hardwood (deciduous) raw material to be used in residential combustion appliances. The aspen raw material showed fully acceptable pelletizing properties and the produced pellets were comparable with present softwood pellets with respect to bulk density, length and fraction of fine material. The inclusion of bark increased the concentrations of some major ash forming elements (K, Ca and Mg) as well as some trace metals (Zn, Cu and Pb) compared to chips (low-bark) of the aspen material and reference wood pellets. No operation problems (e.g. ash related) were seen during the 24 h combustion tests that were performed in two typical pellet burners. The low slagging tendency was probably related to the low content of silicon and high content of calcium in the aspen fuel. Somewhat higher emissions of CO, NO and PM_{tot} were determined for the aspen fuel compared to reference values for residential wood pellet combustion at nominal load. The PM was totally dominated (~95%) by fine submicron particles consisting mainly of potassium, carbon and sulfur, presumably as potassium carbonates and sulfates. The increased PM emissions are most certainly caused by the relatively high concentrations of potassium in the aspen fuel used. Further, the combustion characteristics/char reactivity and char yield for single pellets of aspen and reference pellets were performed in an electrically heated laboratory heated furnace. Also, char density and pellets shrinkage and weight reduction after pyrolysis were determined. In principal, very similar combustion behavior were seen for the aspen pellets compared to reference wood pellets. On conclusion, this relatively small study, illustrate that aspen raw material seem to have a good potential to be used for production of fuel pellets regarding aspects of pelletizing process, pellets quality and combustion properties. However, one must consider the fact that this kind of whole tree assortments will increase the content of ash forming elements and trace metals in the fuel (and therefore also in the ash and emissions) as well as potentially increased emissions of both gases and particles compared to present stemwood based fuel pellets. These aspects are, however, related to the presence of bark and other non-stemwood fractions in the fuel, and therefore coincide with the general issues (fuel-, technical- and environmental orientated) to consider if/when the fuel feedstock for pellets production is to be expanded with new forest and agricultural based raw materials.

INNEHÅLL

1	INLEDNING	6
1.1	Bakgrund	6
1.2	Syfte	7
2	GENOMFÖRANDE	8
2.1	Nyttjad asppellets	8
2.2	Förbränningsförsök i pelletsbrännare	9
2.3	Förbränningsstudier av enskilda pellets	10
3	RESULTAT OCH DISKUSSION	12
3.1	Pellets kvalitet för nyttjad asppellets	12
3.2	Förbränningsprestanda (pelletsbrännare)	14
3.3	Miljöprestanda	14
3.3.1	<i>Emissioner (gaser och stoft)</i>	14
3.3.2	<i>Partiklar (storleksfördelning och sammansättning)</i>	15
3.4	Förbränningsegenskaper (enskilda asppellets)	16
3.4.1	<i>Förbränningsförlopp</i>	16
3.4.2	<i>Koksutbyte, -krympning och -densitet</i>	18
4	SLUTSATSER	19
5	REFERENSER	20

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

Dagens råvara för produktion av biobränslepellets utgörs huvudsakligen (>90 %) av barrvedsspån från sågverk och annan trävaruindustri [1, 2]. Produktionen i Sverige har ökat kraftigt under de senaste 10 åren och uppgår idag till ca 1 miljon ton pellets per år med en tillkommande import på ca 300 000 ton/år [3], varav en ökande andel (idag 35%) förbrukas på den småskaliga villamarknaden. Mängden spån som finns tillgänglig för pelletstillverkning är dock helt beroende av produktionen i svensk sågverksindustri. Visserligen har denna produktion ökat under de senaste 20 åren liksom andelen spån som används till förbränning, men idag utnyttjas i princip allt tillgängligt spån som produceras i dessa (större) sågverk på olika sätt och potentialen för ett rationellt nyttjande av spån från mindre sågverk är sannolikt begränsad [2]. Detta gör att pelletsproducenterna redan idag upplever en tydlig brist på tillgänglig inhemsk råvara och för att klara en ökad efterfrågan av bränslepellets måste därför antingen importen av färdig barrvedsbaserad pellets öka och/eller att nya alternativa råvaror för pelletsproduktion börjar nyttjas. Som alternativa råvaror för framtida pelletsproduktion har tidigare diskuterats, och i olika grad studerats potentialen i, såväl torv, bark, GROT, energigrödor (t ex rörlfen och salix) som lignin och hydrolysrester. De flesta av dessa råvaror innebär dock en försämring av bränslekvaliteten jämfört med dagens stamvedspelletts med en ökad askhalt och därtill relaterade driftproblem samt försämring av förbränningsprestandan. Denna typ av bränslen lämpar sig därför bäst att användas i lite större anläggningar där ask- och emissionsaspekterna kan hanteras bättre. För den småskaliga marknaden kommer det dock sannolikt vara mycket viktigt att sådana alternativa råvaror motsvarar dagens "rena" stamvedspelletts för att säkerställa en hög tillgänglighet, effektivitet och låga emissioner.

Som ett ytterligare alternativ till dagens barrvedsspån skulle därför lövvedsspån kunna utgöra en möjlig råvara för pelletstillverkning. Inom Sverige är tillgången på lövvedsspån från sågverk generellt sett relativt liten idag jämfört med barrvedsspån [2]. Något som dock diskuteras idag är möjligheter att nyttja gallringsfraktioner (mindre träd och sly) av t ex björk och asp för bränsleproduktion. En stor potential för nyttjande av sådan lövträdråvara finns också i t ex Ryssland, där Glommers Miljöenergi för närvarande har ett uppdrag inom ett Interreg projekt "*Kartläggning och analys av kommersiella användningsområden för vit biolövmassa*" med syfte att utreda hur ett överskott av sådan vit lövvedsmassa i Ryssland skulle kunna utnyttjas bl a för bränsleproduktion. Produktion av bränslepellets kan därför vara ett möjligt alternativ för att nyttja denna råvara och den föreliggande studien utgör en kompletterande delstudie för att bedöma aspråvarans egenskaper för bland annat pelletsproduktion och nyttjande för förbränning i småskaliga pelletsbrännare.

Lövträd består generellt av "hårdare" träslag med högre densitet och energivärde jämfört med barrved. Olika träslag skiljer sig även åt vad gäller sammansättning såsom innehåll av cellulosa, hemi-cellulosa, lignin och extraktivämnen. Dessutom varierar förekomsten av olika näringsämnen och askbildande element kraftigt mellan olika delar på träden, d v s stamved, grenar, bark, näver, blad och barr. Dessa skillnader påverkar såväl pelleteringsegenskaper och bränslekvalitet som förbrännings- och miljöprestanda. Inverkan av råvara och pellets kvalitet på förbränningsresultatet och känsligheten hos småskaliga pelletsanläggningar för "sämre" pelletskvalitet har även påvisats och diskuterats tidigare [4-9]. Potentialen och möjligheterna för att nyttja lövvedsråvaror för produktion av bränslepellets för värmeproduktion i småskaliga förbränningsanläggningar har, så vitt vi känner till, dock inte studerats tidigare.

Syfte

Den övergripande målsättningen med projektet var att studera förbränningsegenskaper och miljöprestanda vid eldning med pelleterad lövvedsråvara i typiska pelletsanläggningar för den småskaliga marknaden.

I denna studie användes pelleterad aspråvara med de specifika delsyftena att bestämma; *i*) förbränningsprestanda (askbildning, tillgänglighet och slagningstendens), *ii*) miljöprestanda (emissioner av CO, NO, SO₂, HCl och stoft) i befintliga småskaliga anläggningar och *iii*) förbränningsegenskaper (utbränningshastighet/reaktivitet) vid kontrollerad förbränning av enskilda pellets.

Projektet kan ses som en förstudie, som möjliggör en preliminär bedömning av potentialen för nyttjandet av pelleterad lövvedsråvara (i detta fall obarkad asp) i småskaliga anläggningar utifrån förbränningsaspekter.

2 GENOMFÖRANDE

2.1 Nyttjad asppellets

5 m³ långved av aspråvara (typ massavedsasp), inkluderat grenar och kvistar, huggen i Glommersträsk-området valdes som råvara för pelletering. Efter samråd med professor Iwan Wästerlund vid den Skogsvetenskapliga fakulteten vid SLU i Umeå, framkom att kvaliteten på svensk asp bör vara likvärdig med asp hämtat från St Petersburg. Detta möjliggjorde att hanteringen från uttag i närområdet till pelletering kunde följas på ett bättre sätt. Råvaran lades på tork över sommaren, själtorkade till en fukthalt på ca 15-16 % , flisades obarkad i en mindre flistugg samt maldes i befinlig hammarkvarn hos Glommers Miljöenergi AB. En iakttagelse vid malningsprocessen genom hammarkvarnen var att aspråvaran gick tyngre att mala än andra tidigare hanterade träslag i samma anläggning, t ex tall, gran och björk, vilket skulle kunna bero på att aspved är ett lite mjukare träslag än dessa övriga träslag. Av färdig mald råvara framställde sedan Glommers Miljöenergi AB ca 700 kg asppellets (se Figur 1) i sin pelletspress (OGM 1.5 foderpress från Ryssland) med matrisdiameter på 8 mm och en presslängd på 55 mm. Erfarenheterna utifrån pelleteringen var goda med insatsvärden på maskinen som var godtagbart jämförbara med annan hanterad träråvara. I Tabell 1, redovisas värmevärde och sammansättningen på den studerade asppelletsen med "vanlig" barrvedspellets från Glommers Miljöenergi som jämförelse.



Figur 1. Foto på den nyttjade asppelletsen

Tabell 1. Karakteristik för den nyttjade asppelletsen samt barrvedspelletts som saluförs av Glommers Miljöenergi, som referens. (* ingen analys tillgänglig)

		Asppelletts i denna studie	"Vanlig" barrvedspelletts från Glommers Miljöenergi
Eff. Värmevärde	MJ/kg TS	18.32	ca 18.1
Eff. Värmevärde	MJ/kg prov	16.64	
Fukthalt	% av prov	8.1	5-8
Askhalt	% av TS	1.0	ca 0.3
C	% av TS	49.2	*
H	% av TS	6.8	*
O	% av TS	42.9	*
N	% av TS	0.1	*
Cl	% av TS	0.02	0.01
S	mg/kg TS	134	46
SiO ₂	% av TS	0.0179	0.0187
Al ₂ O ₃	% av TS	0.0034	0.0051
CaO	% av TS	0.354	0.0932
Fe ₂ O ₃	% av TS	0.0125	0.0031
K ₂ O	% av TS	0.171	0.0472
MgO	% av TS	0.0476	0.0287
MnO	% av TS	0.0042	0.0123
Na ₂ O	% av TS	0.0016	0.0014
P ₂ O ₅	% av TS	0.0439	0.0079
TiO ₂	% av TS	0.0001	0.0002
As	mg/kg TS	<0,1	<0.1
Cd	mg/kg TS	0.233	0.114
Co	mg/kg TS	0.101	0.0129
Cr	mg/kg TS	0.262	0.176
Cu	mg/kg TS	2.03	0.643
Hg	mg/kg TS	<0.02	<0.01
Ni	mg/kg TS	0.070	<0.05
Pb	mg/kg TS	0.744	<0.05
Sn	mg/kg TS	<0.2	<0.08
V	mg/kg TS	0.0241	0.0238
Zn	mg/kg TS	36.1	9.03

2.2 Förbränningsförsök i pelletsbrännare

Två typiska och på marknaden mycket vanliga pelletsbrännare användes för studier av förbränningsprestanda i befintliga småskaliga anläggningar. Den ena brinner med uppåtbrinnande låga i en bränslekopp dit pelletsen matas uppifrån (ÖM=övermatad), medan den andra också är en uppåtbrinnande brännare men där pelletsen matas underifrån upp genom brännarkoppen (UM=undermatad). Brännarna är gjorda för att nyttjas med sådan träpellets av barrskogsråvara som idag dominerar marknaden. Försöken genomfördes med brännarna anslutna i en för ändamålet anpassad panna av märket Combifire med en eldstadsvolym på 120 liter och en vattenvolym av 200 liter, som även används som referenspanna vid P-märkning av pelletsbrännare. Temperaturen mättes med termoelement (typ N) på tre positioner i området där askan avsätts för respektive brännare. Förbränningsförsöken genomfördes under 24 h för respektive brännare. Den undermatade brännaren eldades med kontinuerlig drift vid en bränsleeffekt på ca 10 kW. Den övermatade brännaren eldades med intermittent drift med en uttagen effekt i pannvattenkretsen på 4.6 kW, där de erhållna gång- och paustiderna var 20 minuter respektive 15 minuter. Syrehalten (O₂ torra gaser) i rökgaserna under drift var 10-12% och 9-11% för den övre- respektive undermatade brännaren.

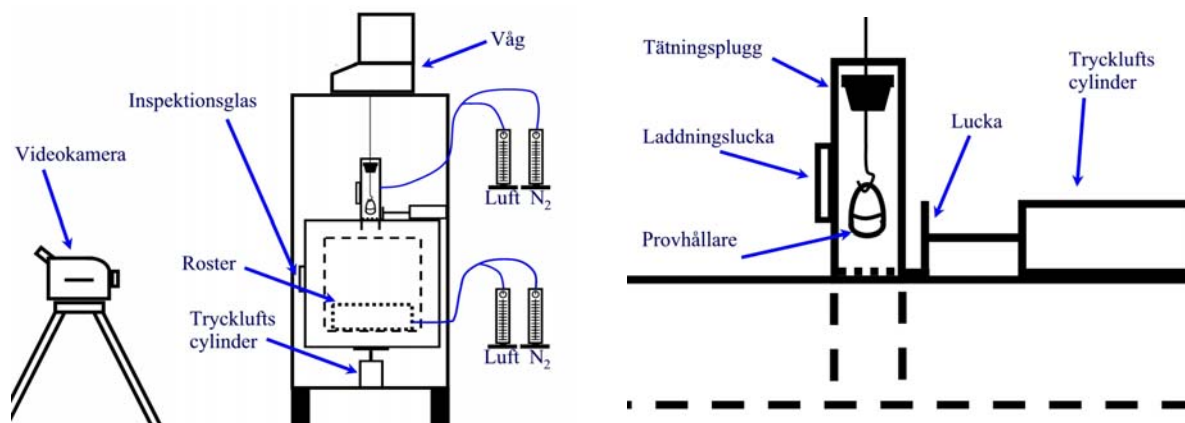
Under förbränningsförsöken analyserades rökassammansättningen kontinuerligt m a p O₂, CO och NO med elektrokemiska sensorer. Under avgränsade provperioder (20-40 min) i början respektive slutet av eldningsperioden analyserades även halterna SO₂ och HCl i rökgaserna m h a FTIR-spektroskopi. Under dessa perioder genomfördes även provtagning av totalstof (PM_{tot}) enligt principer i standardmetod (SS-EN 13284-1), samt storleksfraktionerad partikelprovtagning med en 13-steps lågtrycksimpaktor (DLPI 0.03-10 µm) som även ger fördelning av PM₁, PM_{2.5} och PM₁₀. Utifrån halterna av CO i rökgaserna samt beräknade värden av rökgasflöden bestämdes även förbränningsverkningsgraden i respektive försök.

Efter provperiodens slut inspekterades brännaren med avseende på slaggbildning och mängden avsatt aska och slagg att bestämdes. Graden oförbränt material i avsatt aska bestämdes genom inaskning vid 550°C enligt standardförfarande. Eventuell bildad slagg och insamlade partikelprover analyserades m a p elementarsammansättning med svepelektronmikroskopi (SEM) med tillhörande energidispersiv röntgenanalys (EDS).

2.3 Förbränningsstudier av enskilda pellets

Analys av förbränningsförlopp/koksreaktivitet (koksutbränningshastighet) och koksutbyte hos enskilda asppellets utfördes i en atmosfärisk eluppvärmd laboratorieugn (Figur 2). Även koksdensitet och pelletsens krympning (längd och bredd) och viktminskning efter pyrolys bestämdes. Provmethoden, som har tagits fram av processkemiska gruppen vid Åbo Akademi, har tidigare använts i olika sammanhang av UmU tillsammans med flera samarbetspartners (SLU, KTH och ETC) för att karaktärisera olika bränslepelletsars förbränningsegenskaper [9-11]. Vid dessa analyser studeras de olika stegen i förbränningsförloppet; *torkning*, *pyrolys* och *koksförbränning*, för enskilda pellets genom visuell filmning genom ett inspektionsglas (Figur 3). Tiden för de olika faserna bestäms vilket möjliggör en bedömning av utbränningshastighet och reaktivitet.

Försöken utfördes vid varierande gasatmosfär (syrehalt i kvävgas) och ugnstemperatur. Förbränningsförlopp/koksreaktivitet studerades även för referenspellets av ren gran respektive tall producerad av Glommers Miljöenergi AB, samt för en kommersiell träpellets (SoLett Biopellets från Skellefteå Kraft). Densiteten på den enskilda pelletsen ska hellst vara så likvärdig som möjligt mellan de studerade pelletserna vid jämförelse av förbränningsförlopp av detta slaget och var i denna studie; asppellets 1175±10 kg/m³, SoLett pellets 1210±11 kg/m³, granpellets 1203±21 kg/m³ och tallpellets 1228±34 kg/m³.



Figur 2. Försöksugn med tillhörande utrustning (vä) samt förstoring av provhållare m m (hö).



Figur 3. Illustration över förbränningsförloppet (t.v. torkning, mitten avgasning och förbränning av flyktiga ämnen och t.h. koksförbränning) hos en enskild träpellets.

Totala *utförbränningsförsök* utfördes med de olika pelletskvalitéerna vid två olika experimentella förhållanden, nämligen vid låg temperatur och syrehalt (800°C och 10% O₂) respektive vid hög temperatur och syrehalt (1000°C och 21% O₂), vilket förväntas motsvara två relevanta förhållanden där reaktiviteten antas öka som funktion av både ökande temperatur och syrehalt. Tre till fyra replikat utfördes med varje pelletskvalite för respektive försöksinställning. Luftflödet genom ugnen var 15 Nl/min, vilket är det högsta möjliga i denna uppställning och skapar god turbulens invid pelletsen.

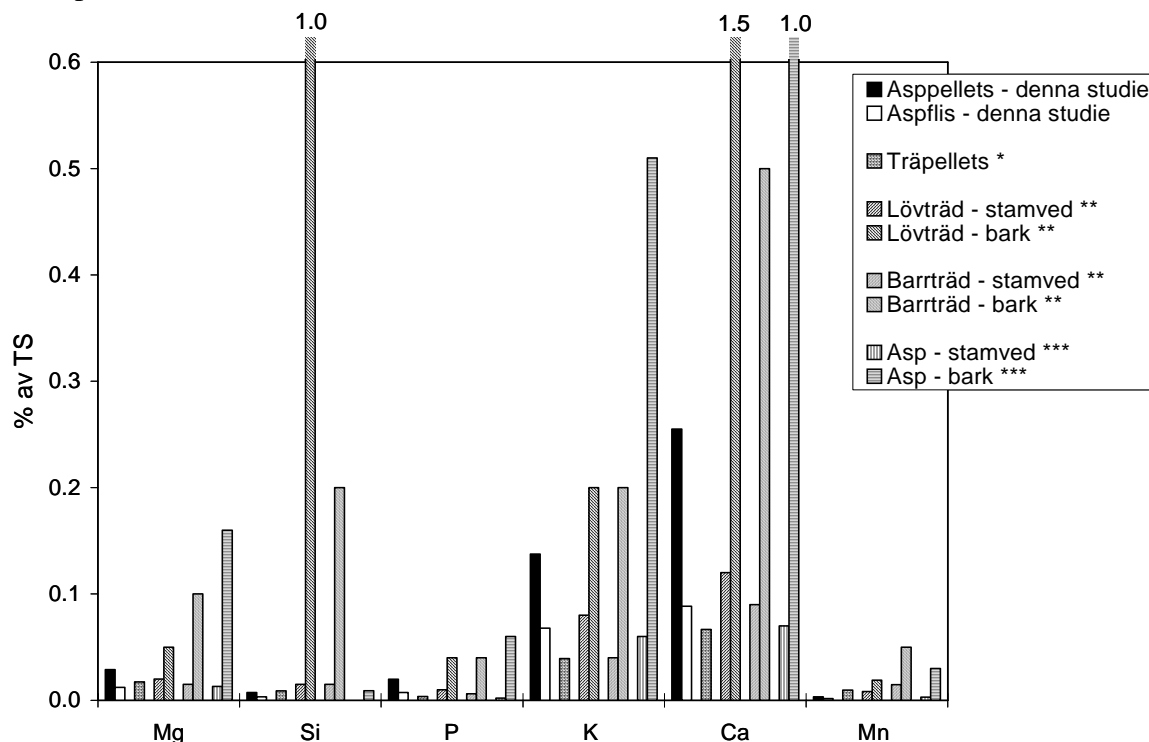
Pyrolysförsök för framställning av koks genomfördes också för den studerade asppelletsen och SoLett referenspellets, vid samma förhållanden som i utbränningsförsöken. Koksen framställdes genom att avbryta eldningen när pyrolysfasen slutat (lågan slocknat) och därefter lyfta upp pelletsen i en atmosfär av kvävgas för kylning (quenchning) och därefter förvaring i exikatorskåp (ca 32 h) och vägning på analysvåg. Därefter fotograferades varje koksbit på ”fram” och ”baksidan”, d v s koksen roterades 180° mellan bilderna. Utifrån dessa bilder uppskattades längd och diameter med en noggrannhet bedömd till ca 0.25 mm per avläst värde. Från dessa data bestämdes sedan pelletsens koksutbyte efter pyrolysis genom att beräkna förhållandet mellan koksens och pelletsens vikt (m/m_0) samt att pelletsetens krympning beräknades genom motsvarande förhållande för längd (l/l_0) och diameter (d/d_0). Även den producerade koksens densitet uppskattades.

En utförligare beskrivning av laborarieugnen och metodiken som användes i denna studie finns beskriven i en parallell studie nyligen rapporterad till Energimyndigheten, där partikelfraktionsfördelningens effekt på utbränningshastigheten hos olika träpellets vid nyttjande av olika sönderdelningsmetoder av stamvedsråvaran studerats [12].

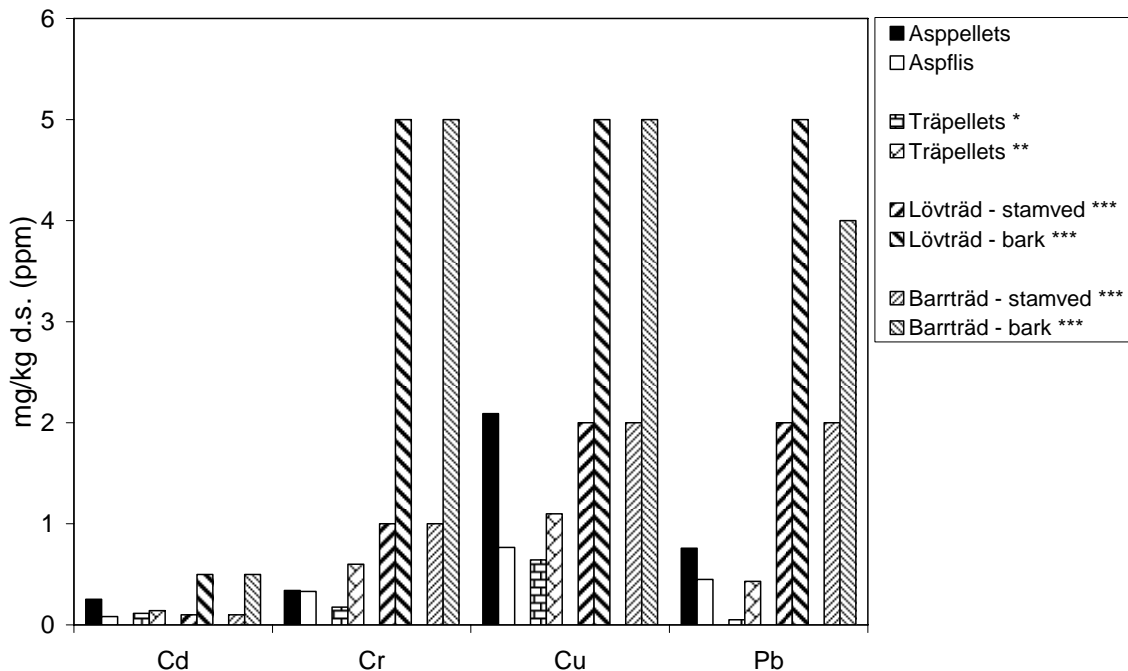
3 RESULTAT OCH DISKUSSION

3.1 Pelletskvalitet för nyttjad asppellets

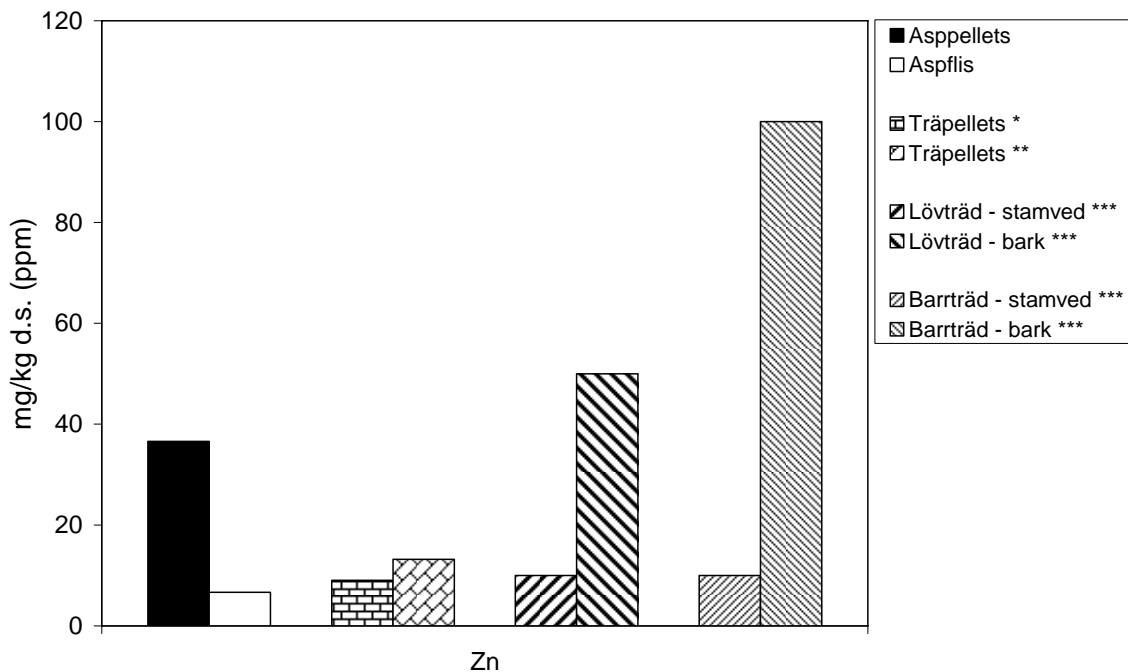
Bulkdensiteten för den producerade asppelletsen bestämdes till 645 kg/m^3 , vilket är likvärdigt med mycket av den pellets som finns på marknaden idag. Det kan t ex jämföras med Solett biopellets (Skellefteå Kraft) med en bulkdensitet som i detta sammanhang bestämdes till 640 kg/m^3 och Glommers Miljöenergi's "vanliga" träpellets (barrved) med ett normalt värde på ca 680 kg/m^3 . Andelen finfraktion i bränslet ($<5.5 \text{ mm}$) bestämdes i två bulkprover (3 resp 2 kg), genom siktning för hand, till 1.3 respektive 1.6 %. Pellets längd bestämdes till $12 \pm 5 \text{ mm}$ (3-26 mm) genom mätning av 100 st slumpvis utvalda pelletsar. Som ses i Tabell 1 så har den nyttjade asppelletsen en högre askhalt jämfört med "vanlig" barrvedspelletts som saluförs idag. Detta förklaras av att den aktuella asppelletsen är producerad av obarkade aspträd inklusive grenar och kvistar där inslaget av bark blir större än i sågspånsbaserad träpellets. Bark från såväl barr- som lövträd innehåller generellt sett högre halter av askämnen och spårmetaller än ren stamved. För att tydliggöra detta analyserades både den producerade asppelletsen och flis med låg andel av bark från den asprävara som användes. Resultaten från dessa bränsleanalyser visas i Figur 2, 3 och 4, där halterna av de dominerande askelementen och spårmetallerna i asppelletsen och aspflisen jämförs med dels vanlig träpellets från Glommers Miljöenergi AB, samt Europeisk referensdata för träpellets samt stamved och bark från löv- respektive barrträd. Som ses innehåller asppelletsen högre halter askämnen (t ex kalcium och kalium) samt spårmetaller (t ex zink, koppar och bly) än flisen från samma råmaterial. Halterna av kisel och aluminium är dock låga även i asppelletsen, vilket tyder på låg grad av kontaminering av sand och jord. Den förhöjda halten spårmetaller i asppelletsen jämfört med aspflisen och "vanlig" träpellets är, som sagt, väntad, men dock relativt låg i jämförelsen med Europeiska referensdata för såväl löv- som barrträd.



Figur 2. Innehåll av dominerande askbildande ämnen i studerad asppellets och aspflis i jämförelse med olika referensdata för relevanta biobränslen/biomassa; * Barrvedspelletts från Glommers Miljöenergi AB, ** Europeiska referensdata (CEN/TC 335—WG2 N94) [13], *** Werkelin J m fl, 2005 [14].



Figur 3. Innehåll av dominerande spårmetaller (förutom zink) i studerad asppellets och aspfliis i jämförelse med olika referensdata för relevanta biobränslen/biomassa; * Barrvedspelletts från Glommers Miljöenergi AB, ** Obernberger I m fl, 2004 [15], *** Europeiska referensdata (CEN/TC 335—WG2 N94) [13].



Figur 4. Innehåll av zink i studerad asppellets och aspfliis i jämförelse med olika referensdata för relevanta biobränslen/biomassa; * Barrvedspelletts från Glommers Miljöenergi AB, ** Obernberger I m fl, 2004 [15], *** Europeiska referensdata (CEN/TC 335—WG2 N94) [13].

3.2 Förbränningsprestanda (pelletsbrännare)

Förbränningsförsöken genomfördes under 24 timmar utan driftstopp eller andra driftproblem. Temperaturen i området där askan avsättes, under drift, varierade mellan 900-1100 °C för båda brännarna och förändrades inte över testperioden.

Halten oförbränt material i askan som deponerats på botten av pannan bestämdes enligt standardmetod för askhaltsbestämning (SS 187171) till 4.7% och 11% för den överrespektive undermatade brännaren. Då O₂ halterna under försöken likväl som egenskaper som bulkdensitet, koksmängd och koksdensitet var likvärdiga med "normal" träpellets, så borde möjligen halterna oförbränt i askan vara lägre än vad som nu var fallet. Detta kan möjligen förklaras av att askan för den studerade asppelletsen beter sig annorlunda än för "vanlig" träpellets och att koksfragment eventuellt "flyger" ur brännarkoppen lättare än det annars brukar. Detta kan då även möjligen förklara de förhöjda CO-halter om sådant material ligger och pyr på pannbotten. Genom intrimning/justering av anläggningarna kan denna effekt eventuellt reduceras.

Den avsatta askan på pannbotten och i brännarkoppen var för båda brännarna mycket "fluffig" och ingen slaggbildning kunde konstateras i något fall (Figur 5). I den övermatade brännaren avsattes en mindre mängd (ca 20 g) "askkakor" i brännaren vilka dock var mycket porösa och sannolikt inte påverkar driftprestandan. Den låga slaggningstendensen för den studerade asppelletsen är förväntad med tanke på bränslets låga innehåll av "kritiska" askbildande element, där främst den relativt låga halten kisel, kalium och aluminium samt relativt höga halten kalcium, är positivt för att undvika bildning av föreningar som smälter och bildar slagg på rostret i brännaren.



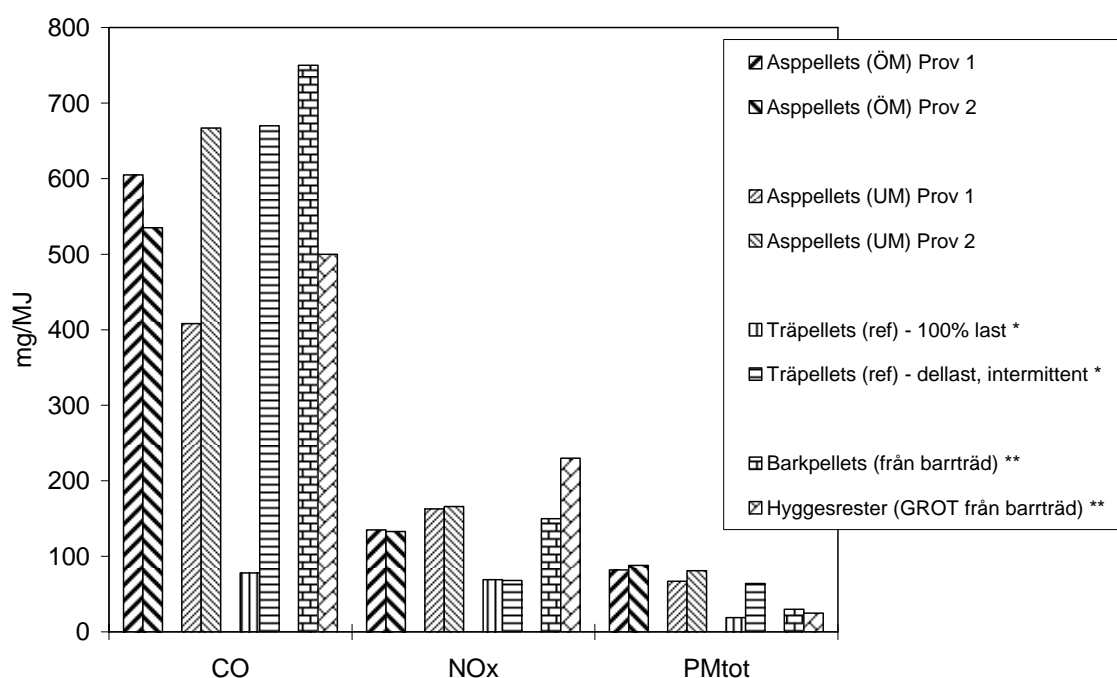
Figur 5. Brännarkoppen för den övermatade (vänster) respektive undermatade (höger) brännaren efter 24 h förbränningsförsök med asppellets.

3.3 Miljöprestanda

3.3.1 Emissioner (gaser och stoft)

Resultat från emissionsmätningarna av gaser redovisas som medelhalter under perioder av 20 minuter i samband med stoftprovtagning i början respektive slutet av eldningsförsöken och sammanfattas i Figur 6. Förbränningen var relativt god och stabil för båda brännarna med CO-halter <1500 ppm (vid 10% O₂), vilket gav medelemissioner för CO på 400-600 mg/MJ_{br}. Detta är något högre än vad man kan förvänta sig vid mer optimerad förbränning av träpellets,

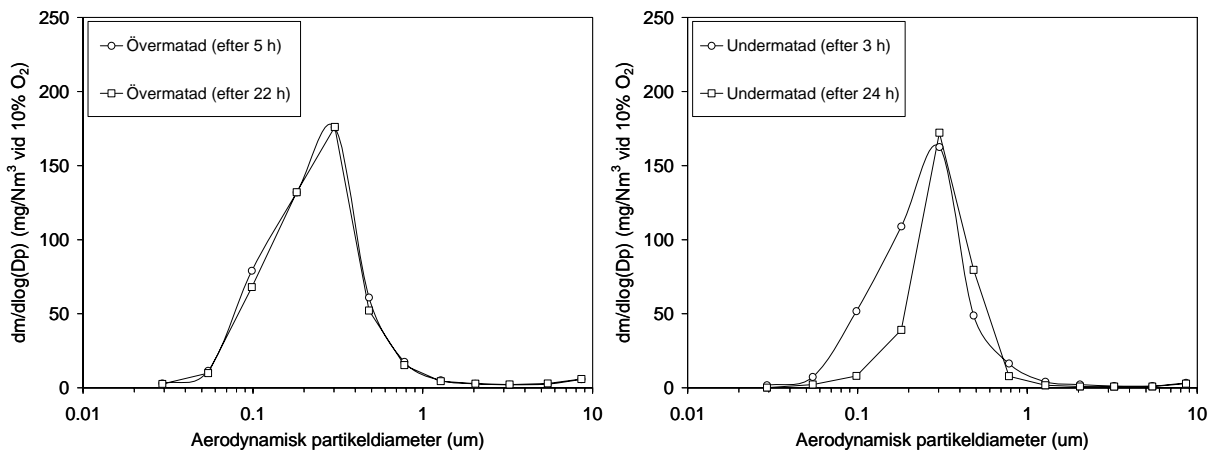
men kan sannolikt reduceras genom justeringar/anpassningar av utrustning till det aktuella bränslet. Emissionerna av NO_x var ca dubbelt så höga (130-160 $\text{mg}/\text{MJ}_{\text{br}}$ som NO_2) som jämfört med dagens träpellets (ca 70 mg/MJ som NO_2) och är i nivå med vad som konstaterats i studier med bark- och grotpellets. Även totalstofthalten (PM_{tot}) var högre (ca 70-85 $\text{mg}/\text{MJ}_{\text{br}}$) än vanlig vad som är normalt för kommersiell träpellets och även uppmätta halter för bark- och grotpellets. Då de filter som användes var ljusgrå eller ljusbruna efter provtagningen tyder detta på att partiklarna till allra största delen består av oorganiska askämnen med låg halt oförbränt sot. De relativt höga halterna stoft kan då troligen förklaras av relativt höga halter kalium i bränslet tillsammans med låga halter kisel. En stor del av kaliumet kan då avgå från bränslet i förbränningen, utan att bindas upp av kisel och sedan bilda submikrona partiklar då rökgaserna kyls. Halterna av SO_2 i rökgaserna var i samtliga försök <1 ppm och halten HCl (brännare UM) var 2-4 $\text{mg}/\text{MJ}_{\text{br}}$.



Figur 6. Emissionsvärden ($\text{mg}/\text{MJ}_{\text{br}}$) uppmätta för den studerade aspelletsen i övermatad (ÖM) respektive undermatad (UM) brännare i jämförelse med förbränning av; * Referensdata träpellets (Johansson L m fl, 2003 [16]) och ** Eldningsstudier med pellets av bark och hyggesrester (opublicerade data, ETPC, Umeå universitet).

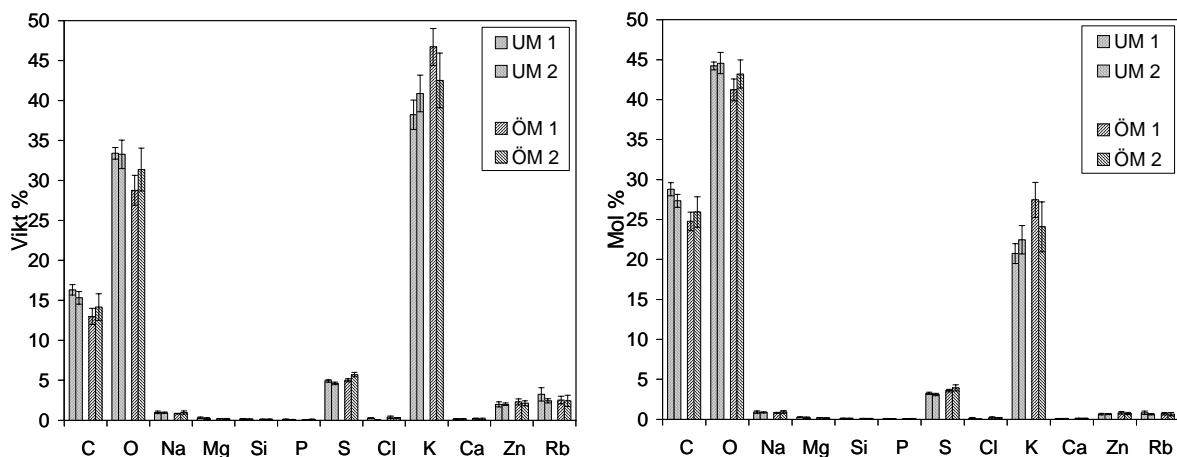
3.3.2 Partiklar (storleksfördelning och sammansättning)

Provtagning för bestämning av rökgasernas partikelstorleksfördelning i intervallet $0.03\text{-}10\ \mu\text{m}$ genomfördes i början respektive slutet av eldningsperioden för de båda brännarna (Figur 7). För den övermatade brännaren syntes ingen skillnad mellan början respektive slutet av provperioden, medan en viss förskjutning av storleksfördelningen mot större partiklar kunde ses för den undermatade. Detta illustreras av att de fina ($< 1\ \mu\text{m}$) partiklarnas massmediandiameter (MMD) för den övermatade brännaren var $0.231\ \mu\text{m}$ respektive $0.232\ \mu\text{m}$ och för den undermatade brännaren $0.246\ \mu\text{m}$ respektive $0.314\ \mu\text{m}$.



Figur 7. Partikelstorleksfördelning (insamlad stofmassa) från provtagning i början respektive slutet av eldningsperioden vid förbränning av asppelletts i två olika typiska pelletsbrännare.

Elementarsammansättningen på partiklarna, som visas i Figur 8, domineras av kalium, kol, syre och svavel samt en mindre andel natrium, zink och rubidium. Övriga ämnen var <1 vikt% och därför inte möjliga att kvantifiera med analysmetoden (SEM/EDS). Utifrån molförhållandena kan ses att partiklarna sannolikt främst består av kaliumkarbonat (K_2CO_3) och kaliumsulfat (K_2SO_4) samt en viss del oförbränt kol. Hur stor del som eventuellt är oförbränt kol är dock svårt att avgöra utifrån dessa analyser eftersom kvantifieringen av kol och syre är relativt osäker med denna metod, men som sagts tidigare så tyder färgen på stofffiltren på låga halter sot.



Figur 8. Elementarsammansättning av partiklar (SEM analys) på platta nr 5 (geometrisk medeldiameter = $0.304 \mu m$) vid förbränning av asppelletts, visade som Vikt-% (vänster) respektive Mol-% (höger) för den undermatade (UM) respektive övermatade (ÖM) brännaren. Data presenteras som medelvärden av 3 st areaanalyser ($100 \times 100 \mu m$) per platta med standardavvikelser.

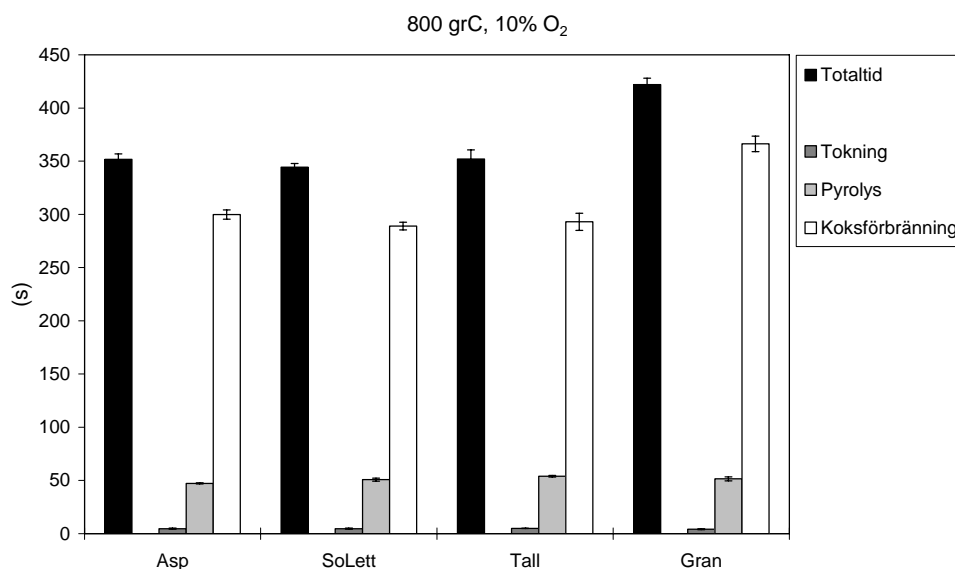
3.4 Förbränningsegenskaper (enskilda asppelletts)

3.4.1 Förbränningsförlopp

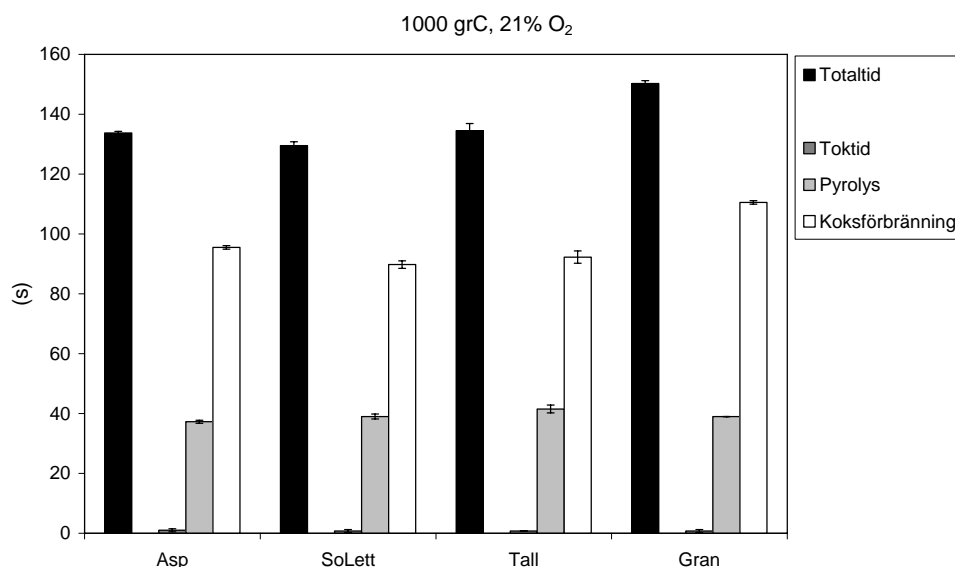
Tiden för torkning, pyrolys och koksförbränning samt total konversionstid för de olika studerade pelletskvaliteterna, framgår av Figur 9 och 10. Som ses i resultaten utgör torkningen endast en marginell del av den totala utbränningstiden medan det dominerande processsteget

är koksförbränningen. Vidare ses att den totala utbränningstiden generellt sett, för alla studerade pelletskvaliteer, ökade markant i försöken med 800°C och 10% O₂ jämfört med vid 1000°C och 21% O₂. Denna skillnad i utbränningstid förklaras till största delen av en ungefärlig 300%-ig ökning av kokstiden vid förutsättningarna med lägre reaktivitet (lägre temperatur och syrehalt), medan pyrolystiden endast ökade ca 20% i samma jämförelse.

Resultatet från denna studie visar vidare på att förbränningsförloppet var mycket lika för den studerade asp- och tallpelletsen samt SoLett biopellets. En förlängd koksförbränningstid kunde dock konstateras för granpelletsen. Med fokus på aspelletsens förbränningsegenskaper i detta arbete, kan konstateras att den i denna studie inte verkar skilja sig från en typisk träpellets på marknaden i dag samt ren tallpellets. Avvikelsen för granpellets är inte möjlig att förklara inom ramen för detta arbete, men kan eventuellt bero på skillnader i partikelstorleksfraktionering och/eller kompakteringsgrad av pelletsen, vilket diskuteras mer i detalj av Israelsson m fl [12] för barrvedspellets specifikt.



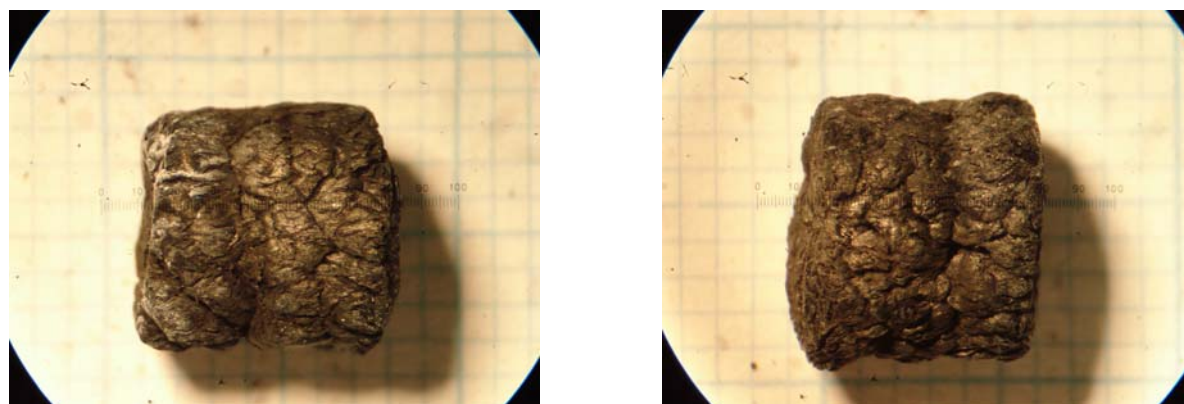
Figur 9. Tid för Torkning, Pyrolys och Koksförbränning samt Total konversionstid vid 800°C och 10% O₂ för de olika studerade pelletskvalitéerna.



Figur 10. Tid för Torkning, Pyrolys och Koksförbränning samt Total konversionstid vid 1000°C och 21% O₂ för de olika studerade pelletskvalitéerna.

3.4.2 Koksutbyte, -krympning och -densitet

I Figur 11 ses bilder från ett ljusmikroskop på typiska kokrester efter pyrolys av asppellets respektive SoLett pellets.



Figur 11. Mikroskopibilder på typisk koksåterstod från pyrolysförsöken vid 1000 °C och 21% O₂ för asppellets (vänster) respektive SoLett pellets (höger).

Utifrån dessa bilder uppskattades pelletsens längd och diameter med en noggrannhet bedömd till ca 0.25 mm och från dessa data tillsammans med vägning bestämdes sedan pelletsens koksutbyte (m/m_0) krympning/expansion i längd (l/l_0) och diameter (d/d_0) efter pyrolys. Även den producerade koksens densitet uppskattades utifrån detta. Resultatet från dessa mätningar visas i Tabell 2. Som ses i tabellen så erhöles ett lägre koksutbyte och koksens densitet i försöken med 1000°C och 21% O₂, medan en likvärdig krympning kunde konstateras för de två pelletskvalitéerna. Koksutbytet och krympnings/expansionsgraden mycket likvärdiga mellan asppellets och SoLett. En något högre koksens densitet erhöles för asppellets jämfört med SoLett pellets, vilket kan (helt eller delvis) förklaras av en något större krympning i diameter under pyrolysen för asppelletsen.

	m/m_0 (%)	l/l_0 (%)	d/d_0 (%)	Koksdensitet (kg/m ³)
<i>800°C, 10% O₂</i>				
Asppellets	14.3 ± 0.2	89.9 ± 1.7	83.3 ± 0.7	270 ± 8.7
SoLett Biopellets	13.3 ± 0.2	89.0 ± 3.1	87.9 ± 3.2	234 ± 15.8
<i>1000°C, 21% O₂</i>				
Asppellets	11.8 ± 0.1	88.2 ± 1.8	85.0 ± 1.8	219 ± 7.3
SoLett Biopellets	11.1 ± 0.2	88.1 ± 1.4	89.1 ± 2.6	193 ± 13.4

Tabell 2. Koksutbyte (m/m_0), krympning/expansion i längd (l/l_0) och diameter (d/d_0) samt koksens densitet efter pyrolys av asppellets och SoLett Biopellets, redovisade som medelvärden från 4 st pyrolyserade pellets per experimentell punkt.

4 SLUTSATSER

Pellets (Ø 8 mm) från obarkad aspråvara med grenar och kvistar inkluderat tillverkades vid Glommers Miljöenergi AB. Förutom en något trögare malning, upvisade aspråvaran helt godtagbara pelleteringsegenskaper och den producerade pelletsen var likvärdig med typisk kommersiell träpellets av barrvedsråvara på marknaden idag m a p bulkdensitet, längd och finfraktion. Innehållet av bark i råvaran ökade dock halterna av askbildande element (här främst K, Ca och Mg) samt vissa spårmetaller (t ex Zn, Cu och Pb) jämfört med aspflis (stamved) och referensträpellets.

Inga driftmässiga problem konstaterades under de 24-h eldningsförsök som genomfördes i två olika pelletsbrännare. Ingen/mycket låg slaggningstendens kunde identifieras under dessa försök, vilket sannolikt berodde på den låga halten kisel och höga halten Ca i den aktuella aspelletsen. Något högre emissioner av såväl CO, NO och stoft kunde konstateras i jämförelse med referensvärden för kontinuerlig förbränning av träpellets i villabrännare. Stoftet (massan PM_{tot}) utgjordes till ca 95% av partiklar < 1 µm, som främst bestod av kalium, kol och svavel (sannolikt i form av kaliumkarbonat/sulfat). Högre halter kalium i aspellets jämfört med referensträpellets, förklarar troligen de högre halterna stoft i rökgaserna.

Eldningsförsök med enstaka pellets visade på att förbränningsförloppet (torkning, pyrolys och koksforbränning) för den studerade aspelletsen var likvärdigt med såväl en kommersiell träpellets (SoLett Biopellets) som specifikt pelleterad tallråvara. Koksutbytet var även likvärdigt, dock med en något större krympning i diameter och högre koksdensitet, jämfört med SoLett pellets.

Utifrån denna relativt begränsade studie, kan slutsatsen dras att aspråvara tycks ha god potential att utgöra råvara för produktion av bränslepellets utifrån aspekter rörande pelleteringsegenskaper, pellets kvalitet och förbränningsegenskaper. Genomförda eldningsförsök i småskaliga pelletsbrännare tyder inte på någon uppkomst av driftmässiga problem. Man måste dock vara uppmärksam på risken för förhöjda halter av askbildande element och vissa spårmetaller i pelletsen samt förhöjda emissioner av såväl gaser som partiklar i jämförelse med dagens träpellets på marknaden. Dessa aspekter är dock till största delen relaterade till innehållet av bark, grenar och kvistar i pelletsråvaran och sammanfaller därför med de generella frågeställningar (bränsle-, tekniska- och miljömässiga) som är aktuella om/när råvarubasen för bränslepellets skall utvidgas med nya skogssortiment och åkergrödor.

5 REFERENSER

1. Vinteräck J. *Wood pellet use in Sweden - a systems approach to the residential market*. Doktorsavhandling. Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU). Uppsala, Sverige, 2000.
2. Martinsson L. *Råvaror för framtida tillverkning av bränslepellets i Sverige*. Värmeforsk. Rapport 813, 2003.
3. Pelletsindustrins Riksförbund (PiR). Officiell statistik, 2006. (www.pelletsindustrin.org)
4. 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;27:585-596.
5. Öhman M, Boman C, Hedman H, Nordin A, Pettersson P, Lethikangas P, Boström D, Westerholm R. *Beläggnings-/slaggbildning och partikelutsläpp vid förbränning av olika pelletskvaliteter i pelletsbrännare (<20 kW)*. STEM Rapport, 2000.
6. Öhman M, Hedman H, Nordin A, Jirjis R. *Variationer i bränsleaskan hos pellets tillverkade av stamved och dess påverkan på beläggningen (slaggbildningen) vid förbränning*. STEM Rapport, 2002.
7. Jirjis R, Öhman M, Vinterbäck J, Engberg E. *Variationer inom träråvaran för pelletstillverkning och deras påverkan på pelletskvaliteten*. STEM Rapport, 2002.
8. Bachs B, Dahlström J-E, Persson P, Tullin C. *Eldningstester med olika pelletskvaliteter*. STEM, 1999. Projektrapport från programmet småskalig förbränning av biobränslen.
9. Rhen C, Öhman M, Gref R, Wästerlund I. *Effect of raw material composition in woody biomass pellets on combustion characteristics*. Biomass and Bioenergy 2007;31(1):66- 72.
10. Erlich C, Öhman M, Björnbom E, Fransson T. *Thermochemical characteristics of sugarcane bagasse pellets*. Fuel 2005;84:569-575.
11. Öhman M, Boman C, Hedman H, Eklund R. *Combustion of pelletized hydrolysis residues from lignocellulosic ethanol production in residential pellet appliances*. Energy and Fuels 2006;20:1298-1304.
12. Israelsson S, Henriksson G, Boman C, Öhman M. *Påverkan av partikelfraktionsfördelningen på utbränningshastigheten hos träpellets vid nyttjande av olika sönderdelningsmetoder*. Energimyndigheten 2007, Slutrapport P 22592-1. Även som ETPC Report 07-02, ISSN 1653-0551, Umeå Universitet 2007.
13. CEN/TC 335—WG2 N94. Final draft. European Committee for Standardization, editor. Solid biofuels—fuel specifications and classes. Brussel, Belgien, 2003.
14. Werkelin J, Skrifvars B-J, Hupa M. *Ash-forming elements in four Scandinavian wood species - Part 1: Summer harvest*. Biomass and Bioenergy 2005;29:451-466.

15. Obernberger I, Thek G. *Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour*. Biomass and Bioenergy 2004;27:653–669.

16. Johansson L m fl. *Kvantifiering och karakterisering av faktiska utsläpp från småskalig biobränsleeldning*. SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut och IVL Svenska Miljöinstitutet. Energimyndigheten Biobränsle-Hälsa-Miljö, Rapport P-12644-1, 2003.