

Förbränningskaraktärisering av rapsmjöl och förslag till optimalt nyttjande i olika förbränningsanläggningar

Gunnar Eriksson, Henry Hedman, Marcus Öhman, Dan Boström, Esbjörn Pettersson, Linda Pommer, Erica Lindström, Rainer Backman, Rikard Öhman

**Förbränningskarakterisering av rapsmjöl och
förslag till optimalt nyttjande i olika
förbränningsanläggningar**

**Combustion characterization of rape seed meal and
suggestions for optimal use in combustion
appliances**

Gunnar Eriksson, Henry Hedman, Marcus Öhman, Dan Boström,
Esbjörn Pettersson, Linda Pommer, Erica Lindström, Rainer
Backman, Rikard Öhman

A06-617

Abstract

Effektiva värmevärdet hos rapsmjöl är $18,2 \pm 0,3$ MJ/kg TS och askhalten varierar mellan 7-8 %. Bränslet har högt N- och S-innehåll, och bränslet är rikt på K, P, Ca och Mg. Partikelemissionerna från fluidbäddeldning och rosterförbränning med rapsmjölsblandningar var ungefär dubbelt så höga som från barkförbränning. Vid pulverförbränning av rapsmjöl ökade partikelemissionerna med en faktor 17 jämfört med träpulver. De höga NO_x och SO_x emissionerna från rapsmjölsförbränning innebär att materialet bör utnyttjas i storskaliga anläggningar med extern svavel- eller NO-rening, eller i relativt låga inblandningsgrader i andra bränslen. Mindre anläggningar med enbart cyklonrening är olämpliga på grund av de höga stofthalterna. Rapsmjöl torde vara ett intressant sameldningsbränsle vid roster- och fluidbäddeldning med klor- och kaliumrika skogs- och åkerbränslen då rapsmjöl eventuellt skulle kunna användas som alternativt svaveladditiv för reduktion av klorinducerad korrosion på t ex överhettare. Slagningstendensen torde minska vid inblandning av rapsmjöl i båda dessa bränslekategorier och bäddagglomereringstendensen torde minska vid inblandning av rapsmjöl i åkerbränslen.

Sammanfattning

Bränslesammansättningen och förbränningsegenskaperna för rapsmjöl (återstod då olja extraherats) från produktion av rapsmetylester (RME, biodiesel) har undersökts. Effektivt värmevärdet var $18,2 \pm 0,3$ MJ/kg TS. Askhalten var 7-8 %. Bränslet har högt N- och S-innehåll, och är rikt på K, P, Ca och Mg. Resultaten från termogravimetrisk analys (TGA) av rapsmjölet tyder på att det är minst lika lättantändligt som träpulver.

Pellets av bark med inblandning av 10 resp. 30 procent rapsmjöl såväl som ren barkpellets användes för försöken. Vidare tillverkades pellets av rapsmjöl med 20 % kutterspån (högst 1% av askbildande element från trä), dessutom jämfördes rapsmjöl och träpulver i försök med pulverbrännare.

Resultaten från de olika förbränningsförsöken visar på 2-4 ggr högre NO-emissioner vid förbränning av rapsmjöl än vid nyttjande av typiska träbränslen. Andelen bildat NO kan dock variera mycket beroende på vilken anläggning som används. SO₂-halterna från ren rapsmjölseldning var mycket höga 300-1300 mg/Nm³ vid 10% O₂. Utgående totalstofthalter var också relativt höga, 2-3 ggr högre än vid barkeldning i fluid- och rosterförbränning samt mer än 10 ggr högre än vid ren träpulvereldning. De höga NO- och SO₂- emissionerna från rapsmjölsförbränning innebär att materialet bör nyttjas i storskaliga anläggningar med extern svavel- eller NO-rening, eller i relativt låga inblandningsgrader i andra bränslen. Mindre anläggningar med enbart cyklonrening är olämpliga på grund av de höga stofthalterna.

Bäddagglomereringstendensen hos rapsmjöl är lägre än för många andra studerade biobränslen. Vid inblandning i bark uppvisas en något högre agglomereringstendens än för typiska träbränslen. Bäddagglomereringsmekanismerna skiljer sig även mot tidigare studerade biobränslen. Slaggningsstendensen hos rapsmjöl är relativt moderat i jämförelse med många åkergrödor och vissa (troligen sandkontaminerade) skogsbränslen. Faran för korrosion av exempelvis överhettartytor är sannolikt måttlig vid fluidbädds- och rosterförbränning eftersom de bildade fina partiklarna vid fluidbädds- och rosterförbränning innehåller K₂SO₄. De fina partiklar som bildas vid pulvereldning av rapsmjöl kan dock innehålla lågsmltande kaliumfosfat som kan ge beläggningar. Av denna anledning bör man vara försiktig vid introduktion av rapsmjöl i denna eldningsteknik.

Fosforinnehållet kan vara positivt vid blandning av rapsmjöl med andra bränslen. Den höga affinitet som kalium har till fosfor medför dessutom att bränslets svavel är tillgängligt för sulfatisering av det KCl som bildas vid förbränning av många skogs- och åkerbränslen. Rapsmjöl kan således vara ett alternativ till andra svaveladditiv. Vid rostereldning torde rapsmjölsinblandning i både skogs- och åkerbränslen minska tendensen till slaggnings och vid fluidbäddselldning torde bäddagglomereringstendenserna minskas vid inblandning i åkerbränslen. Fullskaleförsök i fluidbädds- eller rosterpannor med bränsleblandningar av rapsmjöl och problematiska biobränslen (klor och kaliuminnehållande bränslen) föreslås för demonstration av bl a möjligheter till reducering av uppkomsten av askrelaterade driftsproblem.

Executive Summary

When rape oil is chemically extracted, rape seed meal, a solid residue remains. Currently, it is used as animal feed. Several plants for the production of rape methyl ester (RME, biodiesel) are in operation or under construction.

Combustion properties have been studied for rape seed meal produced as a by product to rape-methyl ester (RME, biodiesel). Composition of the material has been measured, using proximate and ultimate analysis. The lower heating value was $18.2 \pm 0,3$ MJ/kg d.w. and the ash content was 7-8 percent d.w. The material is rich in nitrogen and sulphur. Concentrations of K, P, Ca and Mg are high in the fuel.

Rape seed meal was mixed with bark and pelletised. Bark pellets were also used as a reference fuel. Pellets with 10 and 30 percent rape seed meal were produced. Material with 80 percent rape seed meal and 20 percent planer shavings was also pelletised. Wood had to be added to provide enough friction in the pelletising process, with adapted equipment rape seed meal could probably be easily pelletised).

The material was studied using Thermo-Gravimetric Analysis (TGA), and compared with data from tests with wood powder. The pyrolysis of the rape seed meal has a characteristic temperature of 320°C . Devolatilisation starts at 150°C (at a lower temperature than for wood powder), and proceeds within a rather wide temperature range. The probable cause is the difference in organic content, in particular protein content. The result does not suggest that the material will be difficult to ignite.

Experiments in a bench-scale fluidised bed (5 kW) showed that pellets containing only bark, and the mixture rape seed meal/wood had a bed agglomeration temperature well over the normal operational bed temperature. For the fuel mixtures rape seed meal and bark, the agglomeration temperature was slightly over the operational temperature.

Particle emissions from fluidised bed combustion and grate combustion were, the latter simulated using a commercial pellet burner, were roughly doubled with fuels containing rape seed meal compared to bark. In the powder burner tests, particle emissions increased with a factor 17 with rape seed meal compared to wood powder. The emitted particles were mainly found in the fine ($< 1 \mu\text{m}$) mode during grate and powder combustion. During fluidized bed combustion the total particulate matter consisted both of a coarse ($>1 \mu\text{m}$) and a fine mode fraction.

The particles from grate combustion of bark contain mostly K, S, Na and Cl apart from oxygen and carbon. When rape seed meal is present, Cl and Na concentrations decrease considerably and the main contents of the particles are K and S (and O and C). The results from the X-ray Diffraction Spectroscopy (XRD) analyses showed the presence of crystalline K_2SO_4 och KCl . The fine particles ($<1 \mu\text{m}$) from powder combustion contain mainly K, P and S. The only identified crystalline phase was K_2SO_4 , suggesting that most phosphorus was in the amorphous phase, i.d. most probably molten.

The deposit formation on a cooled probe was studied during the fluidized bed and powder combustion experiments. The fine particles deposited during fluidised bed combustion contained K, Cl and S. When bark was combusted in the fluidised bed, the coarse fraction contained Ca and Si, when rape seed meal in different mixes was combusted this changed to P, K, Ca and Mg.

The deposits formed during combustion of rape seed meal in the powder burner were mainly made up of phosphates (Ca-, Mg/K-, Ca/Mg-phosphates) and MgO.

Sintered material (slag) from grate combustion of bark contained mainly Si, Ca, K and Al, probably as silicates. Adding rape seed meal tended to increase P, Ca and Mg while Si and Ca content tended to decrease. Through XRD a number of crystalline phases in the sintered material and the rest of the bottom ashes could be identified.

NO emissions from the combustions tests increased two to four times with rape seed meal compared to typical wood fuels. For the fluidised bed test, SO₂ concentrations were rather high for the rape seed meal pellets (with 20 percent wood), still only about 20 percent of the sulphur in the fuel formed SO₂. For the grate combustion and powder burner combustion, 60 percent and 70 percent of the sulphur respectively formed SO₂. HCl emissions were low for all tests. The rather high emissions of NO_x and SO_x mean that the material should be used in large-scale facilities with external SO_x and NO_x cleaning. In smaller facilities, the material may be used in small amounts mixed with other fuels.

The risk of slagging is not very high, and should not rule out grate combustion of pellets with rape seed meal mixed with other fuels. The risk of corrosion of superheater surfaces during combustion is probably low since the smaller-size particles formed at fluidised bed combustion and grate combustion contain K₂SO₄. However, a large fraction of the particles formed in powder burner combustion probably contains low temperature melting K₂PO₄, making the risk for deposit formation significant. Rape seed meal for powder burner applications should be used with care.

The content of phosphorus in the material may be an advantage when mixes of rape seed meal and other fuels are considered. The high affinity between potassium and phosphorus means that more sulphur in the fuel will be available for sulphatising of any KC. (formed from combustion of many forest and agricultural fuels). Use of rape seed meal as a sulphur containing additive could thus be an option. For grate combustion and fluidised bed combustion, addition of rape seed meal may reduce the risk of slagging and bed agglomeration, respectively.

Full scale tests in fluidised beds or grate combustors with problematic biofuels (containing Cl and K) would be useful to test whether ash-reduced operational problems could be reduced through the addition of rape seed meal.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Beskrivning av forskningsområdet	1
1.3	Forskningsuppgiften och dess roll inom forskningsområdet	2
1.4	Mål och målgrupp	3
2	METOD OCH UTFÖRANDE	4
2.1	Allmän bränslekaraktärisering	4
2.2	Nyttjade bränslen under förbränningsförsöken	4
2.3	Termogravimetrisk analys av bränsleprov	8
2.4	Förbränningsförsök	9
2.4.1	<i>Fluidbäddeldning</i>	9
2.4.2	<i>Rostereldning</i>	11
2.4.3	<i>Pulvereldning</i>	12
2.5	Bädd-, slagg-, ask-, belägningsprovs- och partikelanalyser	15
3	RESULTATREDOVISNING	17
3.1	Allmän bränslekaraktärisering	17
3.2	Termogravimetrisk analys av bränsleprov	24
3.3	Fluidbäddsförsök	26
3.3.1	<i>Bäddagglomereringstendenser</i>	26
3.3.2	<i>Gasemissioner</i>	30
3.3.3	<i>Partikelemissioner</i>	30
3.3.4	<i>Belägningsbildning</i>	35
3.4	Rostereldningsförsök	37
3.4.1	<i>Slaggbildning</i>	37
3.4.2	<i>Gasemissioner</i>	39
3.4.3	<i>Partikelemissioner</i>	40
3.5	Pulvereldningsförsök	43
3.5.1	<i>Gasemissioner</i>	43
3.5.2	<i>Partikelemissioner</i>	43
3.5.3	<i>Belägnings-/askbildning</i>	46
4	DISKUSSION	47
4.1	Bränslekaraktäristik	47
4.2	Emissioner	50
4.3	Askrelaterade driftsproblem	51
4.4	Rekommendationer för kommande fullskaleförsök	53
5	SLUTSATSER	54
6	REKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING	56
7	FÖRSLAG TILL FORTSATT FORSKNINGARBETE	57
8	REFERENSER	58

1 Inledning

1.1 Bakgrund

I den förestående omställningen av Sveriges energisystem mot förnyelsebar energi, kommer bibränslen att få en ökad betydelse. Av dagens totala energiförbrukning om drygt 624 TWh/år är redan idag mer än 103 TWh/år bibränslebaserad. En fördubbling inom en snar framtid har diskuterats då t ex nya tekniker för produktion av bibränslebaserade drivmedel tas i bruk. I Sverige såväl som i Europa är ett framtida scenario med brist på förnyelsebara bränslen tänkbart med radikala prishöjningar som följd. Produktion av etanol från vete sker redan på kommersiell basis i bl a Norrköping och ett flertal mindre gårdsanläggningar för utvinning av rapsolja för senare produktion av rapsmetylester (RME) finns redan idag i Sverige och storskalig produktion finns bland annat i Karlshamn. Tre större pilotanläggningar för drivmedelsframställning baserade på såväl förgasning av biomassa och svartlut som hydrolys av barrved med efterföljande fermentation är i drift eller är på väg att tas i drift.

Rapsolja utvinns genom kall- eller varmpressning av raps med eller utan efterföljande extraktion. Det finns tre olika arter av raps och i Europa odlar man/nyttjar främst vinterraps (*Brasica napus*).¹ Den årliga produktionen av rapsfrö i Sverige ligger på 200 000 ton. I ett kompletterande förädlingssteg kan omförestrad rapsolja, RME, framställas. RME kan användas som bränsle i kompressionsdieselmotorer utan eller med små modifikationer. Omkring 2/3 (på viktbasis) av den ingående rapsen tas ut som en pressåterstod och har hittills framförallt nyttjats till foder. Pressåterstoden erhålls i form av en presskaka (rapskaka) med ett oljeinnehåll på ca 10%. Efter en efterföljande extraktion återfinns pressåterstoden i form av ett mjöl (rapsmjöl) och oljeinnehållet är endast någon %. Ett intressant användningsområde skulle vara att nyttja pressåterstoden som bränsle i olika former; pressad "bränslekaka", torrt pulver eller som delråvara till pellets/briketter.

Att bedöma marknadspotentialen för rapsmjöl som bränsle är svårt då priset på rapsmjöl som foder, vilket legat konstant i flera år, under 2007 stigit från ca 1000 SEK/ton (ca 200 SEK/MWh) till 2000 SEK/ton (ca 400 SEK/MWh). Idag säljs mjölet mer eller mindre uteslutande till idisslare (kor) p g a dess fiberinnehåll. Det finns dock en möjlighet att utöka marknaden till att även innefatta enkelmagade djur (t ex fåglar och svin) genom att ta bort fiberandelen från materialet.

Priset på rapsmjöl hänger samman med priset på spannmål och andra fodergrödor (protein- och oljeråvaror som soja, palmolja, solrosolja), kopplingen finns både via konsumtionen och via konkurrens om arealer. Tidigare har marknaden varit pressad, nu är priserna rörligare och det är inte säkert att rapsmjölspriset sjunker igen till den tidigare nivån, troligen hamnar det 30 till 40 procent högre än de senaste 20 åren.²

1.2 Beskrivning av forskningsområdet

Utifrån en omfattande litteratursökning återfanns ett mycket begränsat antal publikationer som behandlar karaktärisering av rapskaka/-mjöl. Många av dessa beskriver pyrolys av rapskaka^{3,4,5} och innehåller mycket lite värdefull information om

såväl bränsle- som förbränningsegenskaperna hos materialet. I en artikel skriven av Culcuoglu, E et al 2001¹ återfinns dock värdefulla bränsleanalysresultat av rapskaka som framtagits från kallpressad vinterraps med efterföljande extraktion. Bulkdensiteten hos den analyserade rapskakan låg på 557 kg/m³ och kakan hade ett värmevärde på 23,4 MJ/kg. Fukthalten låg på 7,6 viktsprocent, halten flyktiga ämnen på 80 viktsprocent och askhalten på 4,56 viktsprocent. Kakan bestod av partiklar med en kornstorlek på 0,15-0,85 mm med ett medelvärde på ca 0,5 mm. Kvävehalten var relativt hög, ca 4 viktsprocent av TS. Katz 1982⁶ rapporterade ett kalorimetriskt värmevärde på 22,5 MJ/kg TS. I en annan artikel av Peterson et al. 1990⁷ rapporteras en bulkdensitet om 664 kg/m³, askhalter på 7,5 viktsprocent, en fukthalt på 7,6 % och en svavelhalt på 1,18 % hos rapsmjöl. Praks (1993)⁸ redovisar kalorimetriskt värmevärde på 23,74 MJ, en torrhalt på 89,1 %, en flykthalt på 79,4 % av TS och en askhalt på 6,4% av TS hos rapsexpeller. Vidare redovisar Praks höga svavelhalter (0,66% av TS) och kvävehalter (4,8% av TS) samt låga klorhalter (0,04 % av TS) och en initial asksmälttemperatur på 1020 °C. Huvudbeståndsdelarna i rapsmjöl har rapporterats vara protein (45,5%) och kvävefritt extrakt (32,5%).⁹

Tabell 1. Överslagsanalys (rapskaka och rapsmjöl)

Table 1. Proximate analysis (rape cake and rape seed meal)

Fukthalt	7,5-7,6	% TS
Askhalt	4,56-6,4	% TS
Bulkdensitet	557-664	kg/m ³
N	3,8-6,3	% TS
S	0,66	% TS
Cl	0,04	% TS
Andel flyktiga ämnen	80	% TS
Värmevärde, kalorimetriskt	22,5-23,74	MJ/kg TS
Initial asksmälttemperatur	1 020	°C

Även sökningar efter bränsleanalysresultat av rapskaka i bränsledatabasen ”Phyllis”¹⁰ gav få träffar där endast en analys av ”rapeseed extraction material” återfanns. Analyser utförda på uppdrag av Swedish Bioenergy AB under våren 2006 visar också på att återstoden har ett högt energivärde samt en hög ask- och kvävehalt. Bränslet har vidare en relativt låg klorhalt och bränsleaskan har relativt höga fosfor- och alkalihalter. Bränsleaskans sammansättning liknar den för vete- och rågkorn med den skillnad att den innehåller högre halter kalcium. Tidigare arbeten utförda på spannmål innehållande höga halter fosfor har visat att askkemin och därmed såväl beläggnings- som partikelbildning domineras starkt av fosfater.^{11,12} Rapskakan har också visat sig ha goda briketteringsmöjligheter¹³ och därmed förmodligen också goda pelleteringsegenskaper.

1.3 Forskningsuppgiften och dess roll inom forskningsområdet

I bl a Norrköping pågår idag en etablering av en större industri för framtagning av RME av företaget Swedish Bioenergy AB (dotterbolag till Scan Bioenergy AG) och i Karlshamn finns redan en industri som producerar 45 miljoner l/år. Perstorps

biodieseltillverkning i Stenungsund som togs i kommersiell drift i maj i år, kommer att ha en kapacitet på 160 000 ton biodiesel. Start av anläggningen i Norrköping planeras under 2008. Förväntad produktion är 325 000 ton biodiesel och 450 000 ton rapsmjöl/år. Ett flertal anläggningar/anläggningstyper i regionen har visat stort intresse att utföra proveldningar i fullskala (bl a E.ON, och Eskilstuna Energi och Miljö) av detta bränsle men man/de saknar en allmän förbränningskaraktärisering av bränslet för att definitivt kunna avgöra möjligheterna att genomföra prov och att bestämma förutsättningar för dessa fullskalaprov (t ex bränslemix, anläggningstyp mm).

1.4 Mål och målgrupp

Projektets målsättning är att fastställa förbränningsegenskaperna hos rapskaka såväl i mixar som i ren form för att därigenom bana väg för en signifikant ökning av tillgång på förnyelsebara bränslen (initialt 2 TWh).

Detta mål kan brytas ner på nedanstående delsyften:

- Bestämning av sammansättning (C, H, O, N, S, Cl, askbildande huvud- och spårelement, värmevärde, askhalt) och variation i sammansättning hos europeiskt rapsmjöl.
- Bestämning av de bränslespecifika förbränningsegenskaperna hos rapsmjöl i såväl mixar som i ren form m a p emissions- (NO-, SO₂-, HCl-, partikelemissioner; totalmängd och storleksfördelning samt sammansättning) och askrelaterat problemperspektiv (slagning, beläggingsbildning, bäddagglomerering, högtemperaturkorrosion) för nyttjande i roster-, fluidbädd- och pulveranläggningar.
- Utifrån resultaten föreslå intressanta mixar av rapsmjöl i traditionella biobränslen (skogsbränslen) och/eller bränsleadditiv.

2 Metod och utförande

2.1 Allmän bränslekaraktärisering

Ett antal prov på rapsmjöl togs från flertalet olika typiska europeiska storskaliga anläggningar (varmpress med eller utan efterföljande hexan extraktion) för att bestämma såväl variationer som typisk sammansättning för rapsmjöl. Följande analyser utfördes: 0) elementaranalys (C, H, O, N) 1) effektivt värmevärde (enligt SS-ISO 1928); 2) askhalt (enligt SS-18 71 71); 3) fukthalt (enligt SS-18 71 70); 4) svavelhalt (enligt SS-18 71 77); 5) klorhalt (enligt SS-18 71 54). Ovanstående analyser kompletterades dessutom med kemiska analyser på bränsleaskans (hos rapsmjöl) innehåll av huvudkomponenter (bl a Si, K, Na, Ca, Fe, Mg, Al, P, Mn) och spårelement (bl a Cd, Zn, Pb, Hg, Cu mm). Resultaten av analyserna finns i Bilagorna A.1 och A.2.

Dessutom kunde projektet ta del av bränsleanalysresultat från ett flertal prov på rapskaka (ej extraherat material) från ett pågående EU projekt som drivs bl a av TPS dels foderanalysresultat (fukt-, ask-, P-, K-, N-, S-, Ca-, Fe-, Na-, Mg-halt) på flertalet uttagna prov på rapsmjöl från Lantmännens fabrik i Karlshamn. Resultaten av analyserna finns i Bilaga A.1 och A.2.

2.2 Nyttjade bränslen under förbränningsförsöken

Bränsleprov

Utifrån resultaten från ovanstående bränslekaraktärisering valdes ett större prov på typisk rapsmjöl ut från fabriken i Karlshamn. Den raps som nyttjas i anläggningen i Karlshamn kommer till ca 50 % från odlingar i södra Sverige och till ca 50% från centrala Europa (Polen, Tyskland mm). Tre ton bränsle samplades under två veckor under januari 2007 (en storsäck var tredje dag). Det uttagna rapsmjölet blandades till en homogen mix, och säckades på nytt vid pelletsfabriken i Glommersträsk. Även ett bränsleprov om ett ton barkpellets togs ut från pelletsfabriken i Mönsterås (Södra Skogsenergi AB) och som referenspulver vid pulverbrännarförsöken användes ett kommersiellt träpulver. Av tabell 2 framgår de nyttjade bränsleprovernas ask-, torr- och flykthalt (endast rapsmjöl) samt värmevärde (endast rapsmjöl) i levererat tillstånd. Värmevärdet och de analyserade halterna representerar väl typiska värden/halter för tidigare analyserade rapsmjölsprover (se vidare kap 3.1).

Tabell 2. Överslagsanalys

Table 2. Proximate analysis

	Rapsmjöl	Bark	Träpulver
Torrhalt, procent av totalvikt	89,7	89.8	91.2
Flykthalt, procent av TS	74,1	-	-
Askhalt, procent av TS	7,4	3,7	0.30
HHV, MJ/kg TS	19,50	-	-
LHV, MJ/kg TS	18,14	-	-

Av tabell 3 framgår att det nyttjade rapsmjölsprovet har ett högt N- och S-innehåll och att dess bränsleaska är rik på kalium, fosfor, kalcium och magnesium. De analyserade halterna representerar väl typiska värden/halter för tidigare analyserade rapsmjölsprover (se vidare kap 3.1). Den använda barken har rikligt innehåll av kalcium och kisel och representerar en typisk sammansättning hos bark från barrträd.¹⁴

Tabell 3. *Elementaranalys och halter av askbildande huvudelement.*

Table 3. *Ultimate analysis and concentrations of ash-forming elements.*

	Rapsmjöl	Bark(pellets)	Träpulver
C*	46,9	52,5 ^a	51.9
H*	6,3	5,7 ^a	6.0
N*	6,4	0,40 ^a	0.12
O*	32,2	39,3 ^a	41.8
Cl*	0,03	0,02	<0.01
S*	0,91	0,04	0.0049
Si*	0,0925	0,500	0.0115
Al*	0,0125	0,0868	0.0031
Ca*	0,721	0,743	0.084
Fe*	0,0339	0,0424	0.0033
K*	1,32	0,190	0.0269
Mg*	0,535	0,0639	0.0104
Na*	0,013	0,032	0.0012
P*	1,257	0,037	0.0061

*) % av TS

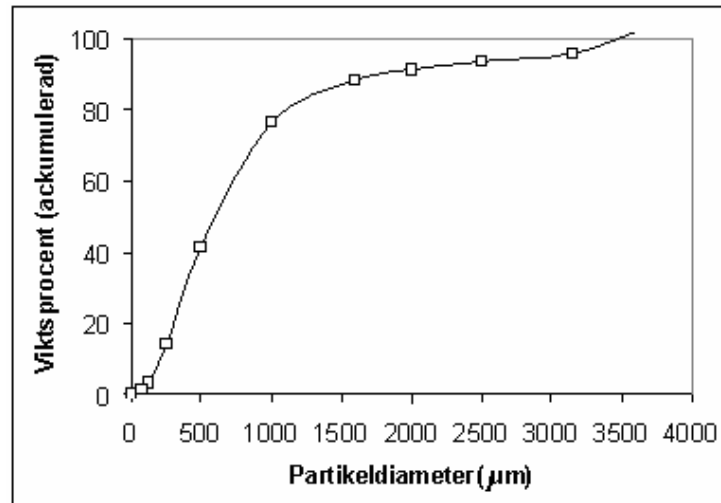
^a) från Nordin, 1992¹⁴

Den initiala smälttemperaturen (IT) enligt SS-ISO 540 hos rapsmjölsaskan (tillverkad vid 550 °C) var 1130 °C och den slutgiltiga fluidtemperaturen (askan helt smält) var 1160 °C.

Partiklarnas storleksfördelning i rapsmjöl

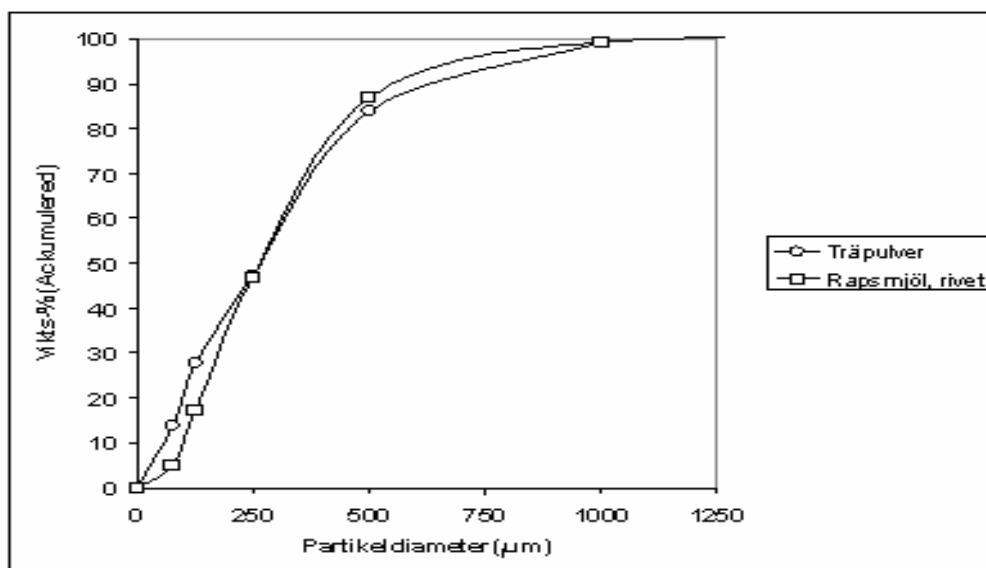
Resultat för siktning av rapsmjöl i leveranstillstånd framgår av figur 1. Huvuddelen av bränslepartiklarna (80 viktsprocent) är mindre än 1 mm.

Innan rapsmjölet användes i pulverbrännarförsöken maldes det i en hammarkvarn, (Bipro 4b) för att sönderdela de största partiklarna. Det kan nämnas att malningen krävde väldigt lite energi. Partikelstorleksfördelningen efter malning med 2 mm såll visas i figur 2. Även partikelstorleksfördelningen hos det nyttjade kommersiella träpulvret framgår av figur 2.



Figur 1. Storleksfördelning hos partiklar i rapsmjöl, i levererat tillstånd.

Figure 1. Size distribution of rape seed particles, as received.



Figur 2. Storleksfördelning hos partiklarna i malt rapsmjöl och nyttjat träpulver.

Figure 2. Particle size distribution in rape seed meal, after milling and used wood powder.

Försök utfördes även för att bestämma rapsmjölets (i leveranstillstånd) egenskaper avseende flyt- och valvbildning. Den metod som nyttjades har tillämpats för att karakterisera träpulver framställda på olika sätt. För en detaljerad beskrivning av metoden, se Paulrud.¹⁵ Två liter av försöksmaterialet hålls i en trutt där utloppshålet har en bestämd diameter. Den minsta håldiameter som materialet passerar utan valvbildning (fem gånger i följd) noteras.

Vid försök med rapsmjöl passerade materialet tratten med minsta tillgängliga håldiameter, 60 mm, utan tendens till valvbildning. Detta kan jämföras med träpulver, där det krävdes en öppning på 108 mm för att materialet skulle falla ned obehindrat fem gånger i följd.

Bränsleberedning och sammansättning hos nyttjade pelleterade bränslen

Pelletpressen som använts i projektet återfinns hos Glommers MiljöEnergi och är märket OGM 1.5 med en kapacitet på ca 800 kg/h när kutterspån används som råvara. Den effektiva presslängden hos den nyttjade matrisen var 60 mm och håldiameter var 8 mm.

Mald barkpellets från Mönsterås bruk blandades med rapsmjölet och pelleterades på nytt. Pellets med inblandningsgrader av rapsmjöl i bark på 10 respektive 30 viktsprocent producerades.

Med den matris som användes gick det inte att få fram pellets av rent rapsmjöl med tillräckligt god kvalitet (hållbarhet/densitet). Viss inblandning av kutterspån krävdes. Att vänta på leverans av en ny matris med presslängd på 80 eller 100 mm (leveranstid minst tre månader) skulle försena projektet alltför mycket.

Genom mätning av askhalten uppskattades inblandning av kutterspån till 20 viktsprocent. Eftersom askhalten hos rapsmjölet och kutterspånet var 7,4 respektive 0,3 procent domineras askkemin helt av rapsmjölet (99 % av askan).

Tidigare erfarenheter i den nyttjade pelletspressen har visat att bra pellets produceras då bränsleinmatningen justerats till dess att strömförbrukningen hos pressen var 100 A. Vid denna strömstyrka blev produktionen av rapsmjöl med 20 viktsprocent inblandning av kutterspån ungefär dubbelt så hög som när rent kutterspån pelleteras i samma anläggning.

Bulkdensiteten för de använda/producerade pelletsvalitéerna samt rapsmjölet framgår av Tabell 4. Elementarsammansättningen såväl som halter av askbildande huvudelement i de producerade pelletsvalitéerna är givna i tabell 5.

Tabell 4. Bulkdensitet för de använda bränslena.

Table 4. Bulk density for the fuels used.

Typ av bränsle	Bulkdensitet, kg/m ³
Barkpellets	645
Pellets, rapsmjöl, 10 %, bark 90 %	640
Pellets, rapsmjöl, 30 %, bark 70 %	710
Pellets, rapsmjöl 80 %, kutterspån 20 %	731
Rapsmjöl (ej pelleterad)	590

Tabell 5. Elementaranalys och halter av askbildande huvudelement hos producerade pelletskvalitéer.

Table 5. Ultimate analysis and concentrations of ash-forming elements of produced pellet assortments.

	Barkpellets	Rapsmjöl, 10 % %, bark 90 % pellets ^b	Rapsmjöl, 30 % %, bark 70 % pellets ^b	Rapsmjöl, 80%, kutterspån 20% pellets ^b
C (% av TS)	52,5 ^a	51,9	50,82	47,9
H (% av TS)	5,7 ^a	5,76	5,88	6,24
N (% av TS)	0,40 ^a	1,0	2,2	5,1
O (% av TS)	39,3 ^a	38,6	37,2	34,1
Cl (% av TS)	0,02	0,021	0,023	0,024
S (% av TS)	0,04	0,13	0,30	0,73
Si (% av TS)	0,50	0,46	0,38	0,076
Al (% av TS)	0,087	0,079	0,065	0,010
Ca (% av TS)	0,74	0,74	0,74	0,59
Fe (% av TS)	0,042	0,042	0,040	0,028
K (% av TS)	0,19	0,30	0,53	1,06
Mg (% av TS)	0,064	0,11	0,21	0,43
Na (% av TS)	0,032	0,030	0,026	0,011
P (% av TS)	0,037	0,16	0,40	1,01

^a) från Nordin, 1992¹⁴

^b) Beräknande utifrån ren sammansättning av respektive råvara (inblandningsgrad kontrollerad genom inaskning)

2.3 Termogravimetrisk analys av bränsleprov

För pulvereldning är förbränningskinetiken och därmed bl a partikelstorleken och bränslets utbränningshastighet viktig för att förbränningen skall bli fullständig. Termisk analys (TGA/DTA) utfördes därför på rapsmjölet. Dessutom gjordes referensförsök med träpulver.

Termogravimetrisk analys används ofta för att fastställa bränslets beteende under pyrolys. Metoden har används länge och mycket är publicerat på området. Det finns dock ingen entydig standard för hur undersökningen skall göras och resultaten tolkas. Det har visat sig att en del av resultaten i viss mån är apparatspecifika och att t.ex. partikelstorleken ibland kan påverka resultatet. Det är därför att rekommendera att metoden används komparativt, dvs. genom att olika bränslets egenskaper jämförs i stället för att sträva efter kvantitativa mått på t.ex. reaktionshastigheter och reaktivitet.

Termogravimetrisk analys tillgår så att provet värms upp, oftast med linjär hastighet och dess vikt registreras kontinuerligt. Provet (typiskt 1 - 20 mg) sätts i en vågskål som placeras i en ugn med väl kontrollerad temperatur och genomströmning av gas.

Upphettningshastighet, gasens genomströmningsflöde samt sammansättning kan varieras och under dessa försök användes upphettningshastigheter om 20 och 200 °C/min samt ett gasflöde om 100 ml/min bestående av ren N₂ och ren CO₂.

2.4 Förbränningsförsök

Kontrollerade förbränningsförsök utfördes i en fluidiserad bädd (5 kW), en undermatad pelletsbrännare (12 kW) samt en pulverbrännare (150 kW).

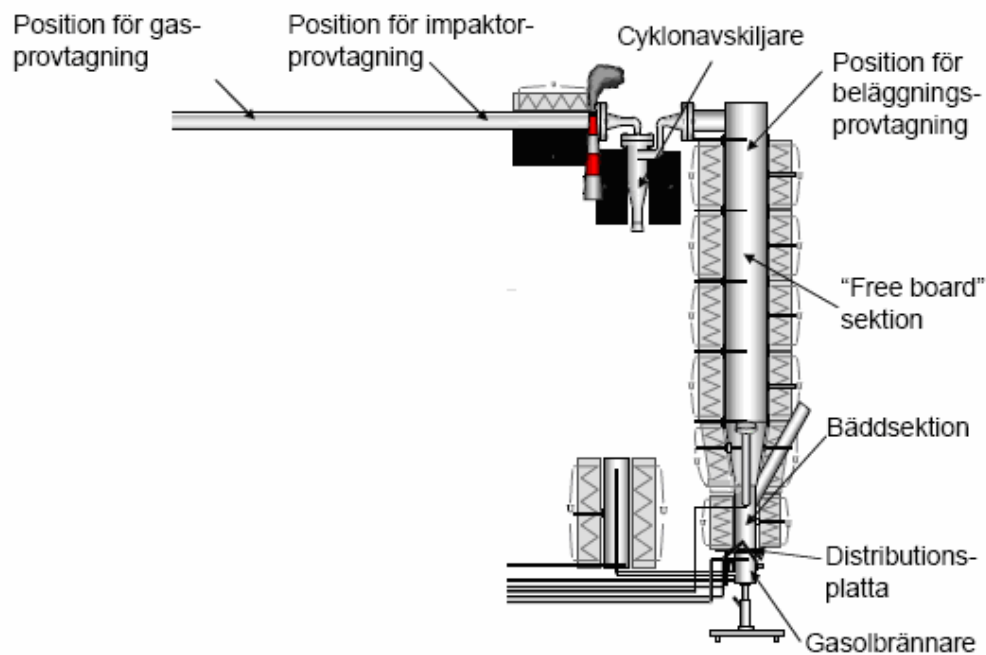
2.4.1 Fluidbäddseldning

Förbränningsförsöken utfördes i en fluidiserad bubblande bädd i bänkskala (5 kW) under liknande förhållanden som i tidigare arbeten.¹⁶ Eldningsförsök genomfördes med de framtagna pelletsvalitéerna d v s ren bark, 10 viktsprocent- respektive 30 viktsprocent rapsmjöl i bark samt rapsmjöl (med 20 % inblandning av kutterspån).

Försöksuppställningen framgår av figur 3. Anläggningen är byggd i rostfritt stål (253 MA), 2 m hög. Diametern i bäddsektionen är 100 mm och vid fribordsektionen 220 mm. En perforerad rostfri platta med 1 % öppen hålarea (90 hål) användes som distributionsplatta. Som bäddmaterial användes kvartssand (> 98 % SiO₂). Partikeldiametern var 200 - 250 µm (övriga partiklar avlägsnades genom siktning). Vid varje försök användes 540 g bäddmaterial.

Samtliga bränslen förbrändes vid en bäddtemperatur på 800 °C under 8 h vilket motsvarade en total eldad bränslemängd på 5 kg/försök. Under hela förbränningsfasen hölls en fluidiseringshastighet på 10 gånger den minimala fluidiseringsflödet (80 Nl primluft/min) vilket motsvarar en hastighet om ca 1 m/s. Den utgående syrgashalten under försöken var i medel 8-10 % t.g. och CO-halterna i de utgående rökgaserna varierade mellan 100 och 200 ppm (medelvärde) mellan de olika försöken. Bäddprover togs ut med en luftkyld cyklonprovtagare efter 8 h och allt bäddmaterial/agglomerat togs dessutom tillvara (se fig. 3) efter varje experiment.

Temperaturen i fribordet var 800 °C, med en standardavvikelse på 15 °C. Temperaturen kontrollerades genom separat reglering av eleffekten till de olika väggvärmarsektionerna.



Figur 3. Schematisk bild över fluidbäddreaktorn samt provtagningspunkter.

Figure 3. Illustration of the bench scale fluidized bed reactor and the different sampling positions.

Bestämning av temperatur för initial defluidisering av bädden

Efter 8 h avbröts bränsletillförseln och bäddtemperaturen höjdes med 3 °C per minut med luftförvärmare och elektriska väggvärmare. Bäddtemperaturer och tryckskillnad över bädden noterades till dess att bäddagglomerering uppnåts¹. En gasolflamma användes för att simulera rätt förbränningsatmosfär.

Vid initial agglomerering minskar tryckskillnaden över bädden hastigt. Bäddtemperaturen mättes med två termoelement, och är därför känd med god noggrannhet under förloppet.

Partikel- och gasemissioner

Rökgaserna analyserades med avseende på O₂, CO, CO₂, NO med ett analysinstrument av märket Testo XL 350 (elektrokemiska celler). O₂-halten registerades även med en lambdasond. Gasprovtagningen utfördes efter reaktorns cyklonavskiljare vid en rökgastemperatur på ca 200 °C (markerad i figur 3).

Halter av SO₂ och HCl mättes genom absorption i en vattenlösning (0.3% väteperoxid) med efterföljande ICP-SFMS- respektive våtkemisk analys. Provtagning för detta skedde liksom övriga gasanalyser efter cyclonen (cut size ca 10 µm).

¹ I försöket med barkpellets upphörde temperaturhöjningen vid 1015 °C, data finns sedan tidigare.

Stoftprov togs isokinetiskt i rökgaskanalen vid 120 °C och i övrigt enligt standardmetod (SS-EN 13284-1) med tillägget att en cyklon med cut-size 8 µm var placerad innan stoftfiltren. För att även bestämma partiklarnas storleksfördelning och kemisk sammansättning för de olika partikelstorlekarna användes en 13-steps lågtrycksimpaktor från Dekati Ltd. Partiklar i intervallet 0,03-10 µm separeras. Provtagningen utfördes efter reaktorns cyklonavskiljare vid en rökgastemperatur på 160 °C, och impaktorn värmdes till ca 120 °C under provtagningen. Aluminiumfolie utan infettning användes som substrat i impaktorn. Provtagningen av partiklar till impaktorn utfördes isokinetiskt för att erhålla ett representativt urval av partiklarna i den varma rökgasen.

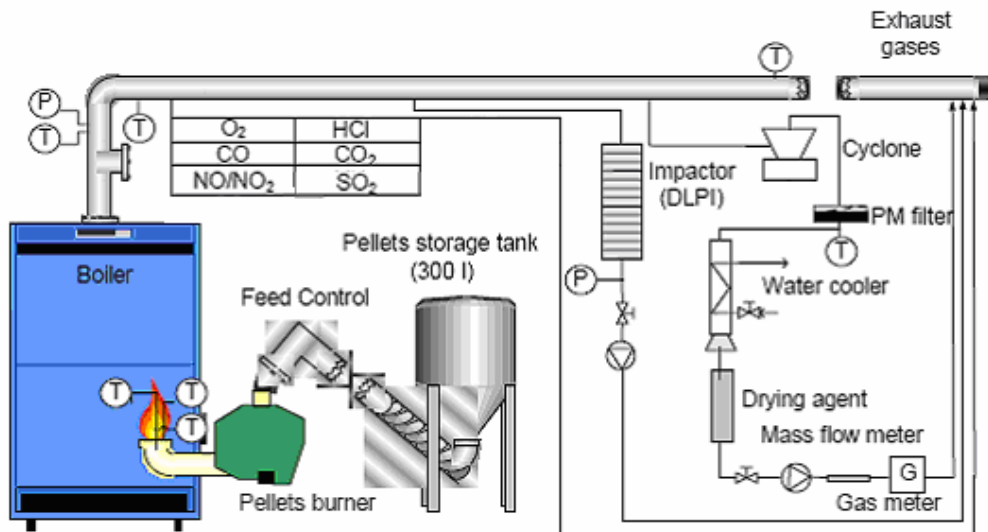
Beläggningsprov på kyld provsond

Under inmatningsfasen (normal förbränning) togs beläggningsprov på en simulerad överhettartub under 6 h med hjälp en luftkyld sond med en löstagbar provring (rostfritt stål, SS 2343). Den kylda provringen var belägen 200 mm från reaktortoppen (figur 3) vilket motsvarar en uppehållstid hos rökgaserna på ca 12 s under rådande förhållanden. Gastemperaturen vid provstället var 800 °C +/- 15 vid samtliga försök. Ytemperaturen på sonden var i medeltal 450 °C under försöken. Provringarna sparades för vidare kemisk analys.

2.4.2 Rostereldning

För att efterlikna förhållandena vid rostereldning utfördes försök i en för teknikområdet representativ och P-märkt undermatad brännare (Eco-Tech A3). Försöksuppställningen visas schematiskt i figur 4. Försöken utfördes under 1 dygn per pelletsvalitet under kontinuerlig drift (ej intermittert) vid en konstant bränsleeffekt på 12 kW. Brännaren var utrustad med temperaturmätning (termoelement typ N) vid tre positioner omkring rostret. De uppmätta maximala temperaturerna i området där eventuell aska avsätts uppskattades därigenom till 1200-1250 °C och visade ej på några signifikanta skillnader mellan de olika pelletsvalitéerna. Brännaren var under försöken dockad till en panna av märket Combifire. Brännaren eldades med ett luftöverskott motsvarande 9-10 % O₂ t.g. (medelvärde under försöksperioden) under samtliga försök.

Gasanalyser och partikelprovtagning skedde på samma sätt som för fluidbädden, beskrivet i avsnitt 2.4.1.



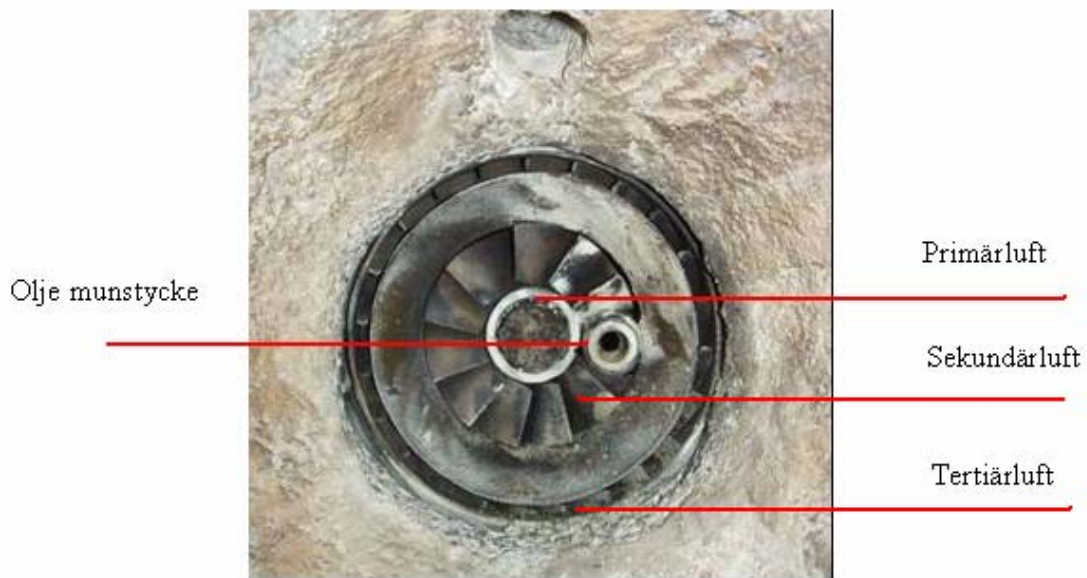
Figur 4. Schematisk bild över nyttjad pelletsbrännaruppställning och rökgasprovtagningsutrustning.

Figure 4. Illustration over the used pellet burner equipment and flue gas sampling set-up.

Efter provperiodens slut inspekterades utrustningen med avseende på beläggingsbildning (slagg). Mängden avsatt slagg (partiklar > 0,3 mm) och aska (bottenaska) bestämdes genom vägning. Slagg- och askprover sparades för analys med avseende på utseende och kemisk sammansättning (kvalitativt och kvantitativt).

2.4.3 Pulvereldning

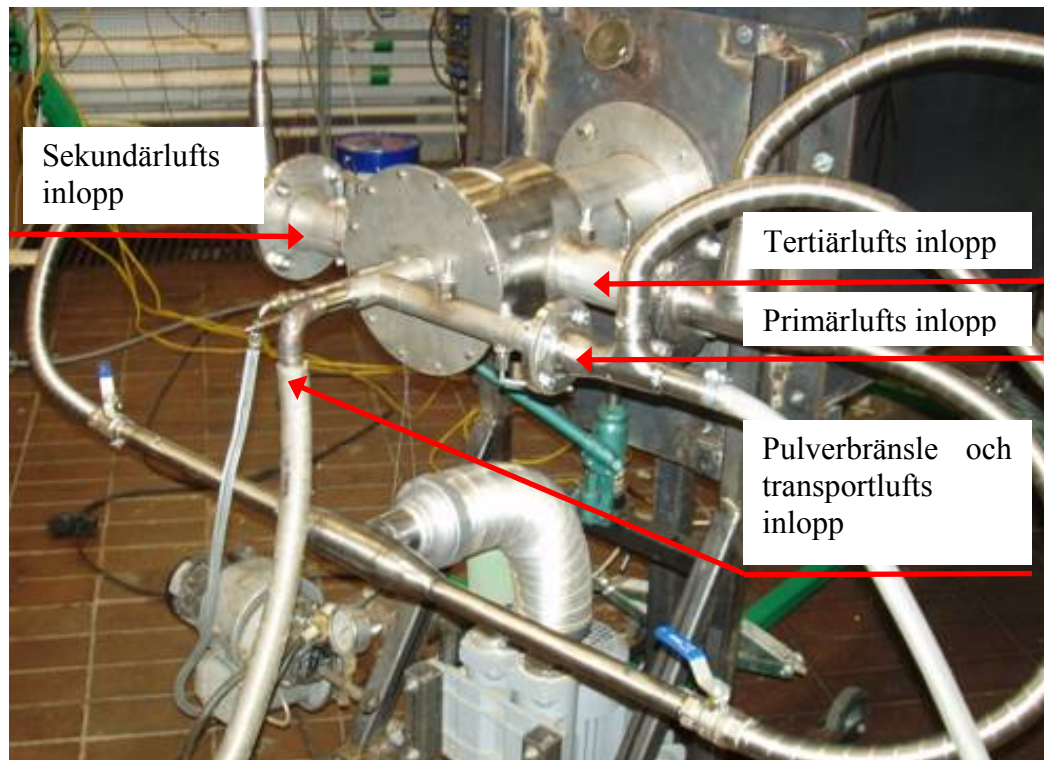
Förbränningsförsök med rapsmjöl utfördes i en 150 kW VTS multifuel pulverbrännare. Ett kontrollförsök utfördes med kommersiellt träpulver. Kvantifiering av beläggningstillväxt och partikelemissioner genomfördes och därefter kemiska analyser av producerade askor, partikel- och beläggingsprover.



Figur 5. Front vy av VTS brännaren.

Figure 5. Frontal view of the VTS burner.

Figur 5 visar en frontvy av det inre brännarhuvudet. Förbränningen sker i sk fri flamma, och en keramisk kona är placerad i brännarhuvudets front. Brännaren är utrustad med tre individuellt styrda luftregister (se Fig 5 och 6.). All lufttillförsel är designad för att ge en rotation av ingående luft och därmed bidra till att generera en swirl vilket ger en bra blandning och mycket stabil flamma. Den yttre diametern på brännaren (tertiärregistret) är 130 mm. Pulverbränslet och transportluften tillförs via ett rör (diameter 19 mm) i mitten av brännaren. I slutet av detta rör återfinns en konisk plugg vars funktion är att ge en jämn distribution/spridning av bränslepartiklarna i hela brännar-tvärsnittet. Figur 6 visar baksidan av brännaren som är fastmonterad i den liggande keramiskt isolerade eldstaden. Bränsletillförseln under försöken låg på 21 kg/h (medel) och syrehalten på 3,5-4 % torr gas. Den utgående CO-halten varierade mellan 30-50 ppm. Luftflödena fördelades mellan transportluft (10 % av totalflödet), primärluft (20 %), sekundärluft (30 %) och tertiärluft (40 %).

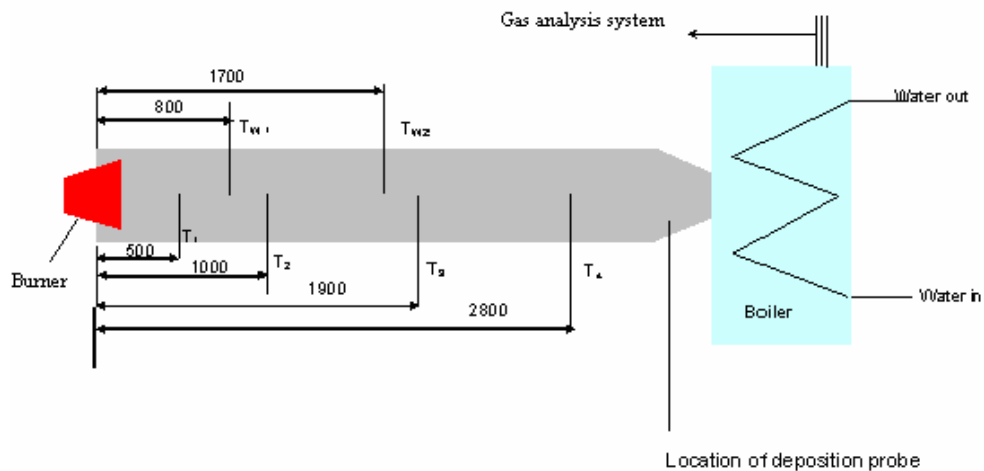


Figur 6. VTS pulverbrännare monterad i ETC:s test eldstad

Figure 6. VTS-multifuel burner mounted in the ETC test furnace

Figur 7 visar hela brännaruppställningen bestående av själva brännaren, efterföljande keramisk eldstad, panna och rökgasrör. Eldstaden har ett inre tvärsnitt på 550*550 mm och är 3100 mm lång. Temperaturen mäts med termoelement (typ K) på sex olika positioner i eldstaden, fyra stycken i förbränningskanalen och två i keramiken. Dessutom mäts rökgastemperaturen efter pannan. Den uppmätta temperaturen i förbränningskanalen var 1 100 °C (T1-T2) och sjönk till 950 °C i slutet av eldstaden (T4). Inledningsvis användes oljeförbränning. Oljetillförseln stängdes av då temperaturen var uppe i 900-1000 °C.

Gasanalyser och partikelprovtagning togs i rökgaserna efter ugn och panna (se figur 7) vid en rökgastemperatur på 150 °C och i övrigt enligt samma metodik som under fluidbäddsförsöken, beskrivet i avsnitt 2.4.1. Under försöken togs även beläggingsprov på en simulerad överhettartub under 6 h med hjälp av en kyld sond bestående av en luftkyld rör med en löstagbar provring (rostfritt stål, SS 2343). Den kylda provringen var belägen efter ugnen före pannan, se figur 7, vilket motsvarar en uppehållstid hos rökgaserna på ca 3 s under rådande förhållanden. Gastemperaturen vid provstället (provringen) var 750±50°C vid samtliga försök. Yttertemperaturen på sonden var i medeltal 450 °C under försöken. Provringarna sparades för vidare kemisk analys. Efter provperiodens slut inspekterades utrustningen med avseende på avsatt aska i brännare/eldstad samt panna. Askprover sparades för analys med avseende på utseende och kemisk sammansättning (både kvalitativt och kvantitativt).



Figur 7. Schematisk bild över nyttjad uppställning vid ETC för kontrollerade pulverbrännarförsök. Mått i mm.

Figure 7. Illustration over the used equipment at ETC for the controlled powder burner combustion trials.

2.5 Bädd-, slagg-, ask-, beläggningsprovs- och partikelanalyser

Bäddprov från fluidbäddsförsöken

Bäddprov och agglomerat analyserades med svepelektronmikroskop (SEM) och energidispersiv röntgenanalys (EDS) för att bestämma elementarsammansättning och morfologi (struktur och form) på eventuella bäddkornbeläggningar och enskilda askkorn. Detta gjordes bl. a. för att fastställa eventuella skillnader i kemisk sammansättning på beläggningarna för de olika studerade bränlemixarna. Inför elementaranalysen och tjockleksbestämningen med SEM-EDS göts proverna in i epoxi, kapades och torrslipades med SiC-papper innan tvärsnitten slutligen analyserades.

Beläggningsprov

Som nämnts tidigare utfördes beläggningsprovtagning under såväl fluidbädd som pulverbrännarförsöken. Beläggningen på provringens ”läsida” analyserades med SEM-EDS genom ett flertal sk areaanalyser (100*100 µm).

Slaggprov från pelletsbrännarförsöken och askprov från pulverbrännarförsöken

Den vid pelletsbrännarförsöken avsatta slaggens kemiska sammansättning analyserades både semi-kvantitativt m h a SEM-EDS och kvalitativt (kristallina faser) m h a pulverröntgendiffraktion (XRD). Även den vid pulverbrännarförsöken uppsamlade pannaskan (bottenaskan) analyserades med XRD. Innan proverna analyserades med SEM-EDS göts de in i epoxi, kapades och slipades med SiC-papper.

Partikelprov

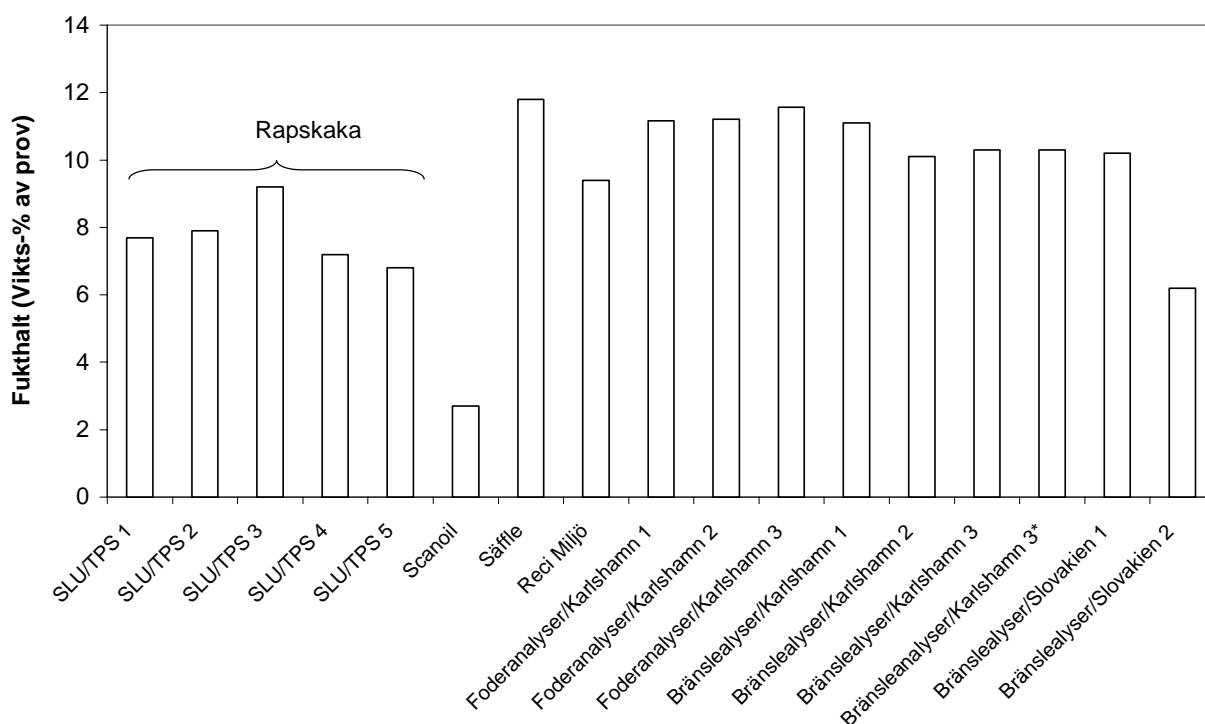
Som nämnts tidigare provtogs partiklar för kemisk analys under försöken i såväl fluidbädd, pelletsbrännare som pulverbrännare. Partiklar som avsatts på impaktorplattorna nr 4, 5 och i vissa fall nr 6 (geometrisk medeldiameter GMD 0,19,

0,32 μm respektive 0,52 μm) samt nr 10 (GMD 3.3 μm) och i vissa fall nr 12 (GMD 8.7 μm) analyserades genom areaanalyser (100*100 μm) av representativa "partikelhögar" på respektive prov. Platta nr 4, 5, 6 utgjorde "peaken" på den s k finmoden av submikrona (< 1 μm) partiklar och platta nr 10 och 12 bestod av partiklar i den s k grovmoden. Förutom areaanalyser för bulksammansättning gjordes även s k EDS-spotanalyser på ett flertal enskilda partiklar i grovmoden.

3 Resultatredovisning

3.1 Allmän bränslekaraktärisering

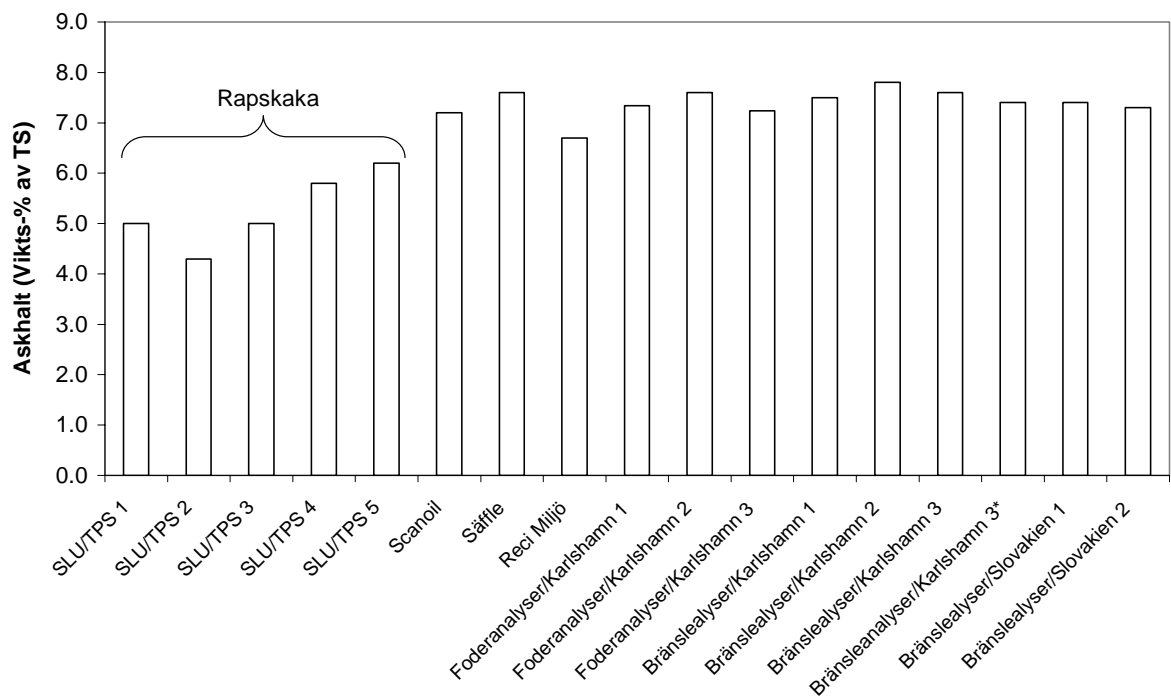
Bilaga A ger rådata från utförda bränsle- och foderanalyser. Scanoil, Säffle och Reci Miljö var befintliga analyser, medan övriga genomfördes inom projektet. Av figur 8 framgår att fukthalten hos analyserade rapsmjölsprover ligger mellan 9-11 viktsprocent för alla prover utom två. De två avvikande fallen kan ej förklaras utifrån processmässiga faktorer. De fem analyserade rapskakeproverna har en något lägre fukthalt (7-9 viktsprocent).



Figur 8. Fukthalt hos analyserade prov.

Figure 8. Moisture content in analysed samples.

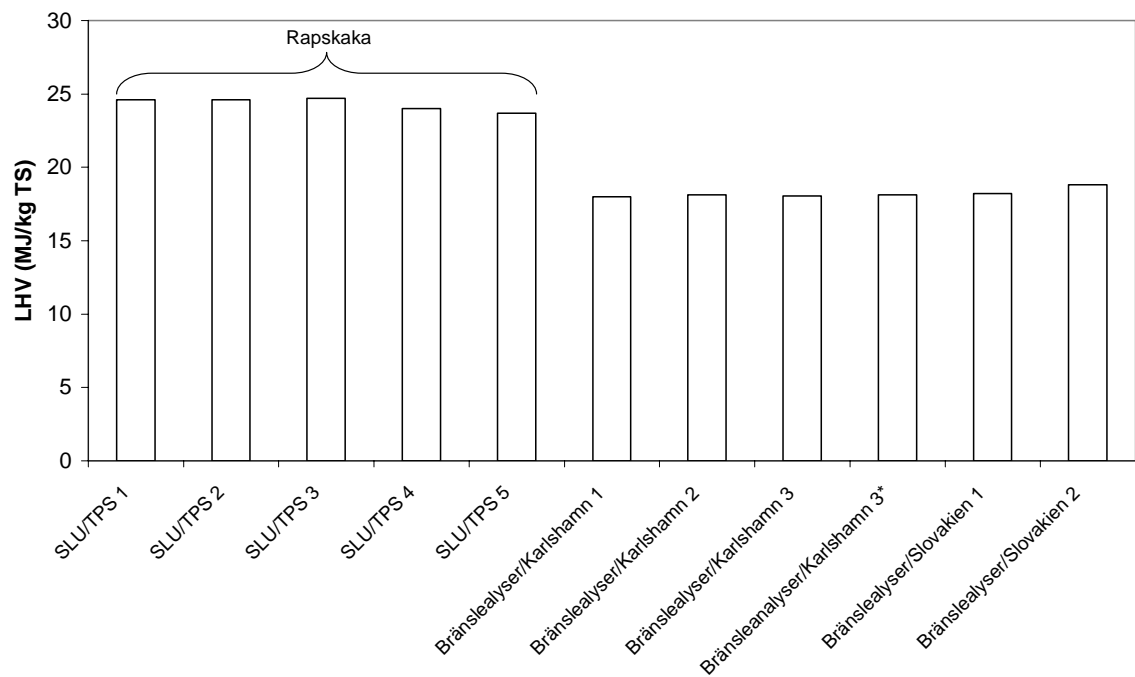
Av figur 9 framgår vidare att askhalten hos rapsmjölet varierar mellan 7 och 8 viktsprocent av TS (medel: 7,4 %). Rapskakeproverna har en lägre och mer varierad askhalt, 4-6 viktsprocent av TS (medel: 5,3 viktsprocent). Rapskakan innehåller betydligt mer olja vilket är en anledning till den lägre askhalten hos bränslet.



Figur 9. Askhalt hos analyserade prov.

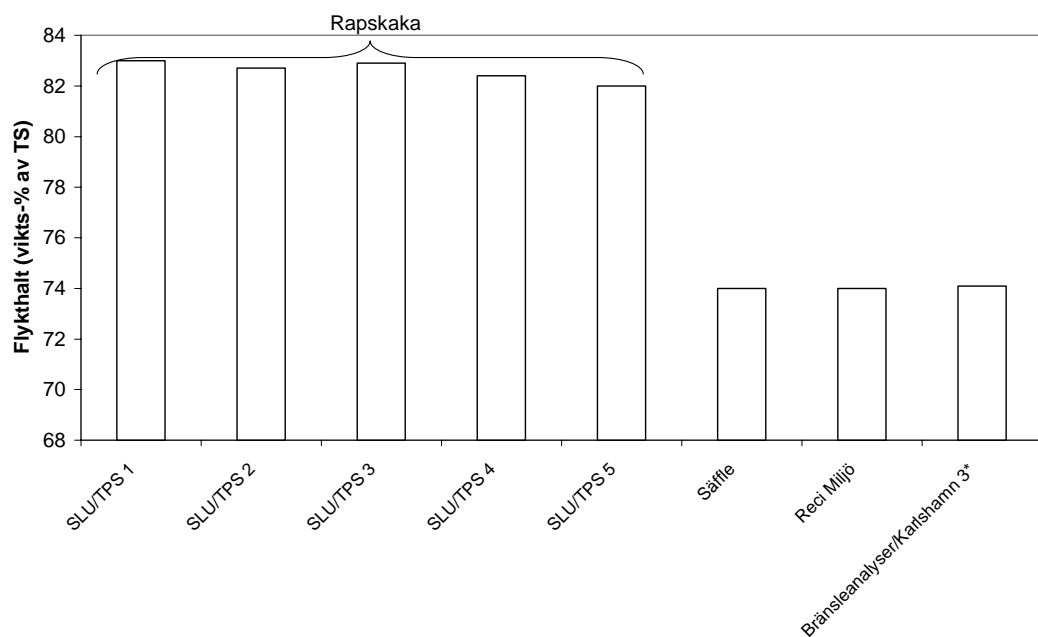
Figure 9. Ash content in analysed samples.

Det effektiva värmevärdet räknat på torr basis (se figur 10) är betydligt högre hos de analyserade rapskakeproverna ($24,3 \pm 0,4$ MJ/kg TS) än hos de analyserade rapsmjölproverna ($18,2 \pm 0,3$ MJ/kg TS) vilket också sannolikt till stor del beror på den lägre halten olja i rapsmjölet. Flykthalten (se figur 11) är även den betydligt högre hos rapskaka ($83 \pm 0,4$ % av TS) än hos rapsmjöl ($74 \pm 0,1$ % av TS). Rapsmjöl har oftast endast någon procent olja kvar emedan rapskakan, som oftast är producerad via kallpressning, har ca 10 viktsprocent olja kvar.¹⁷ Detta överensstämmer väl med ovanstående data då skillnader om ca 9 viktsprocent föreligger i flykthalten mellan rapskaka och rapsmjöl.



Figur 10. Lägre värmevärdet (effektiva) hos analyserade prov (MJ/kg TS)

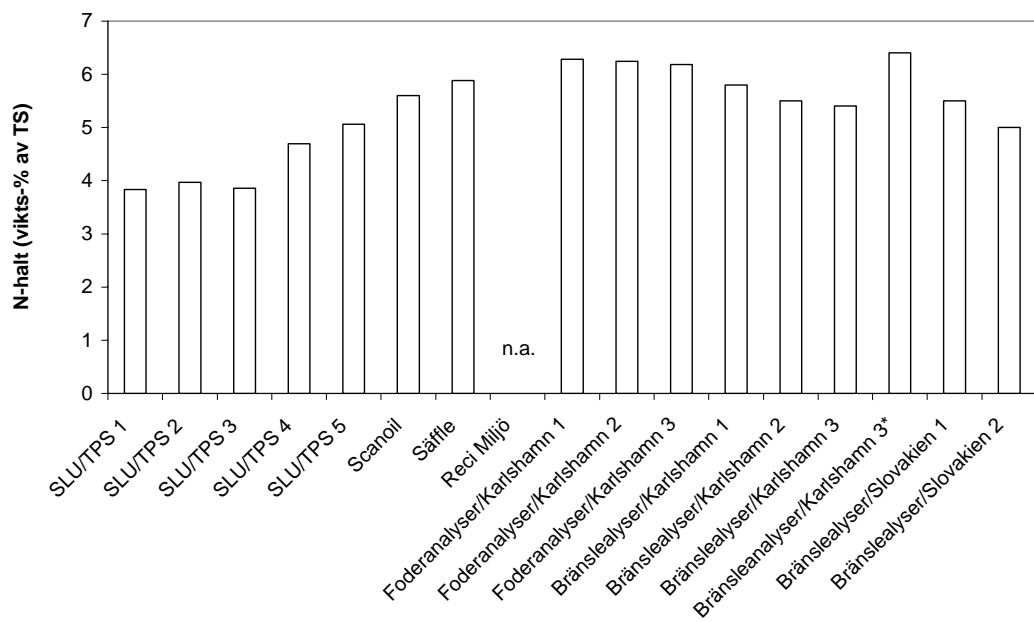
Figure 10. Lower heating (effective) value of analyzed samples (MJ/kg d.s.)



Figur 11. Flykthalt (viktsprocent av TS) hos analyserade prov.

Figure 11. Volatile content (wt-% of d.s.) of analyzed samples.

Kvävehalten i rapskaka och -mjöl är hög (se figur 12) $4,3 \pm 0,6$ respektive $5,8 \pm 0,4$ % av TS.

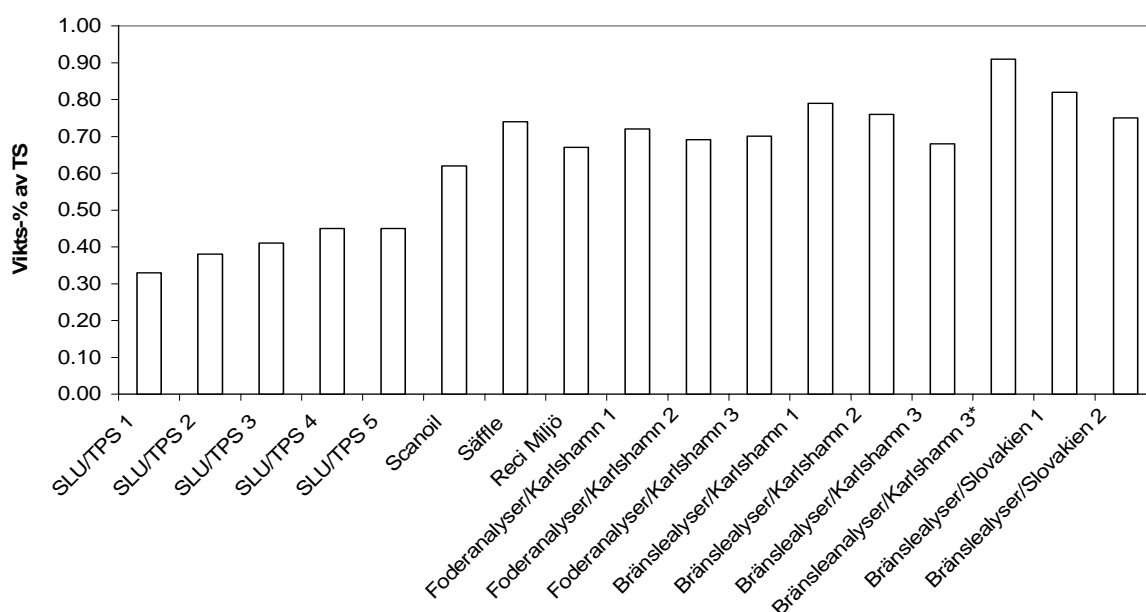


Figur 12. Kvävehalt (viktsprocent av TS) hos analyserade prov.

Figure 12. Nitrogen content (wt-% of d.s.) of analyzed samples.

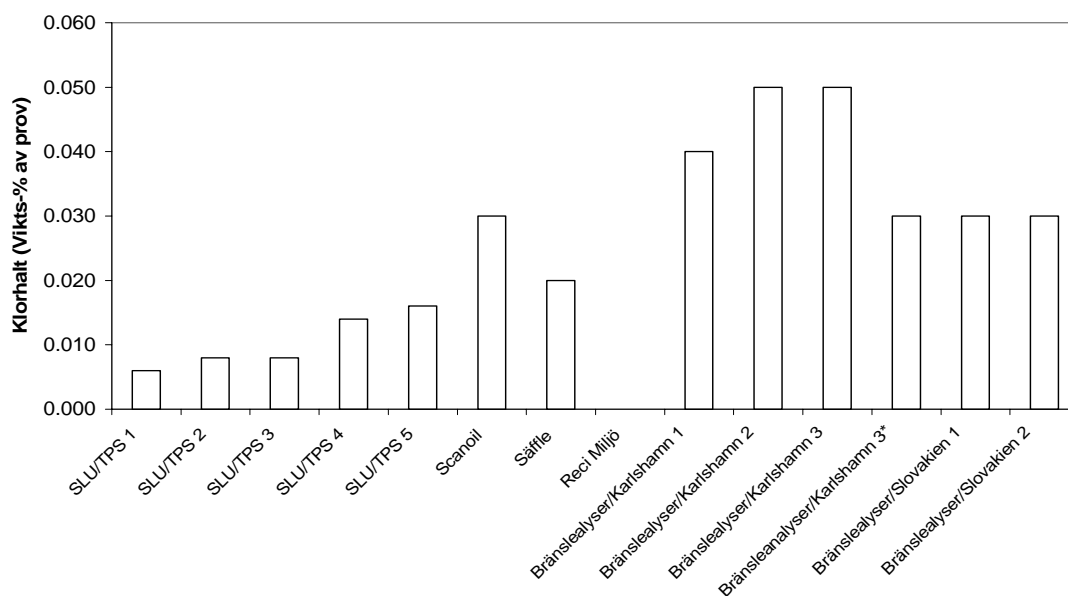
Även svavelhalten är hög i rapskaka ($0,40 \pm 0,05$ % av TS) och i rapsmjöl ($0,74 \pm 0,08$ % av TS) se figur 13. Klorhalten är däremot låg (se figur 14.)

Kolhalten i den analyserade rapskakan är 57 ± 1 % av TS och i rapsmjöl $47 \pm 0,9$ % av TS. Syrehalten är, relativt andra biobränslen, låg i såväl rapskaka ($26 \pm 0,3$ %) som rapsmjöl ($33 \pm 0,8$ %). Vätehalten hos rapskaka är $7,7 \pm 0,1$ och hos rapsmjöl $6,2 \pm 0,2$ viktsprocent av TS.



Figur 13. Svavelhalt (viktsprocent av TS) hos analyserade prov.

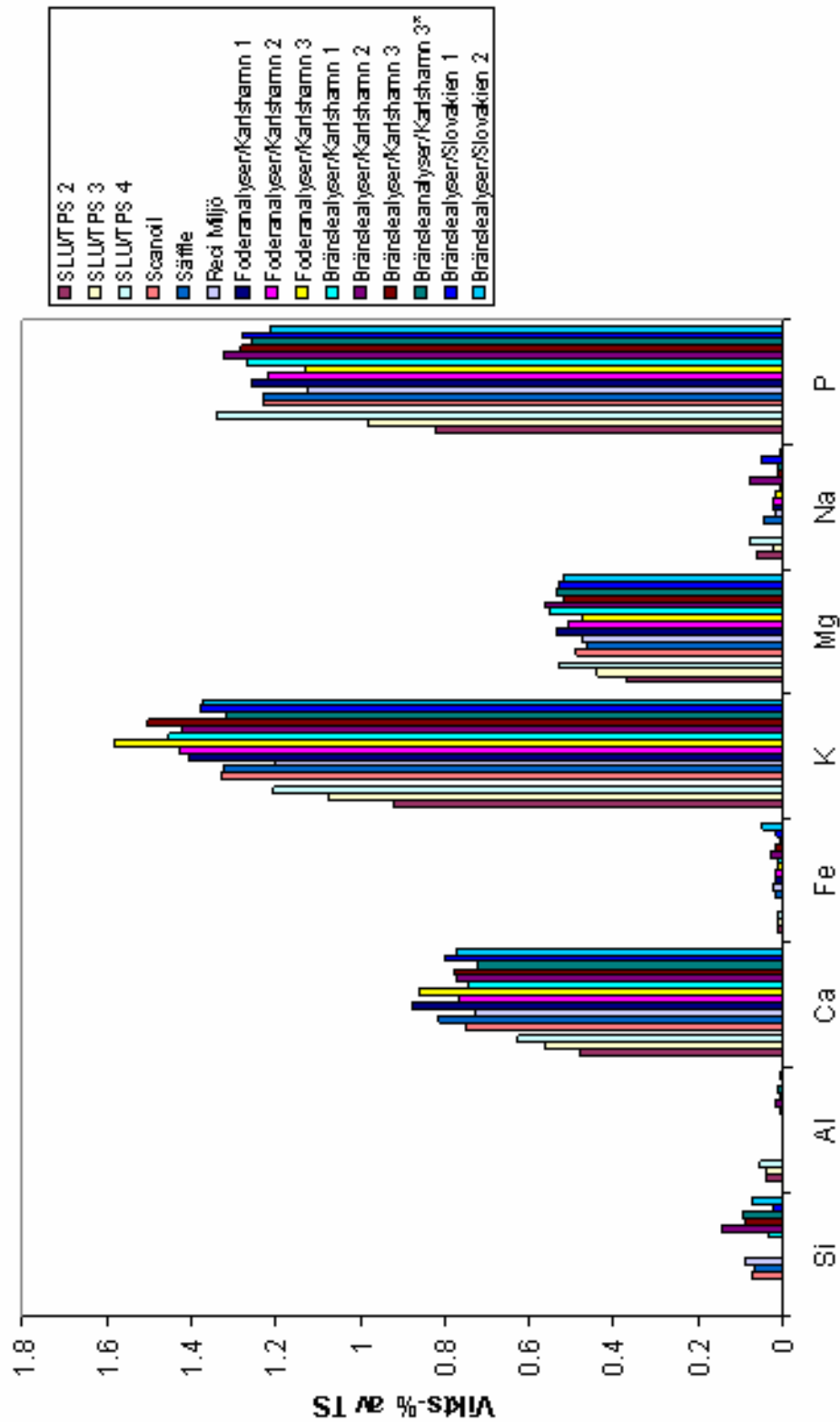
Figure 13. Sulphur content (wt-% of d.s.) of analyzed samples.



Figur 14. Klorhalt (viktsprocent av TS) hos analyserade prov.

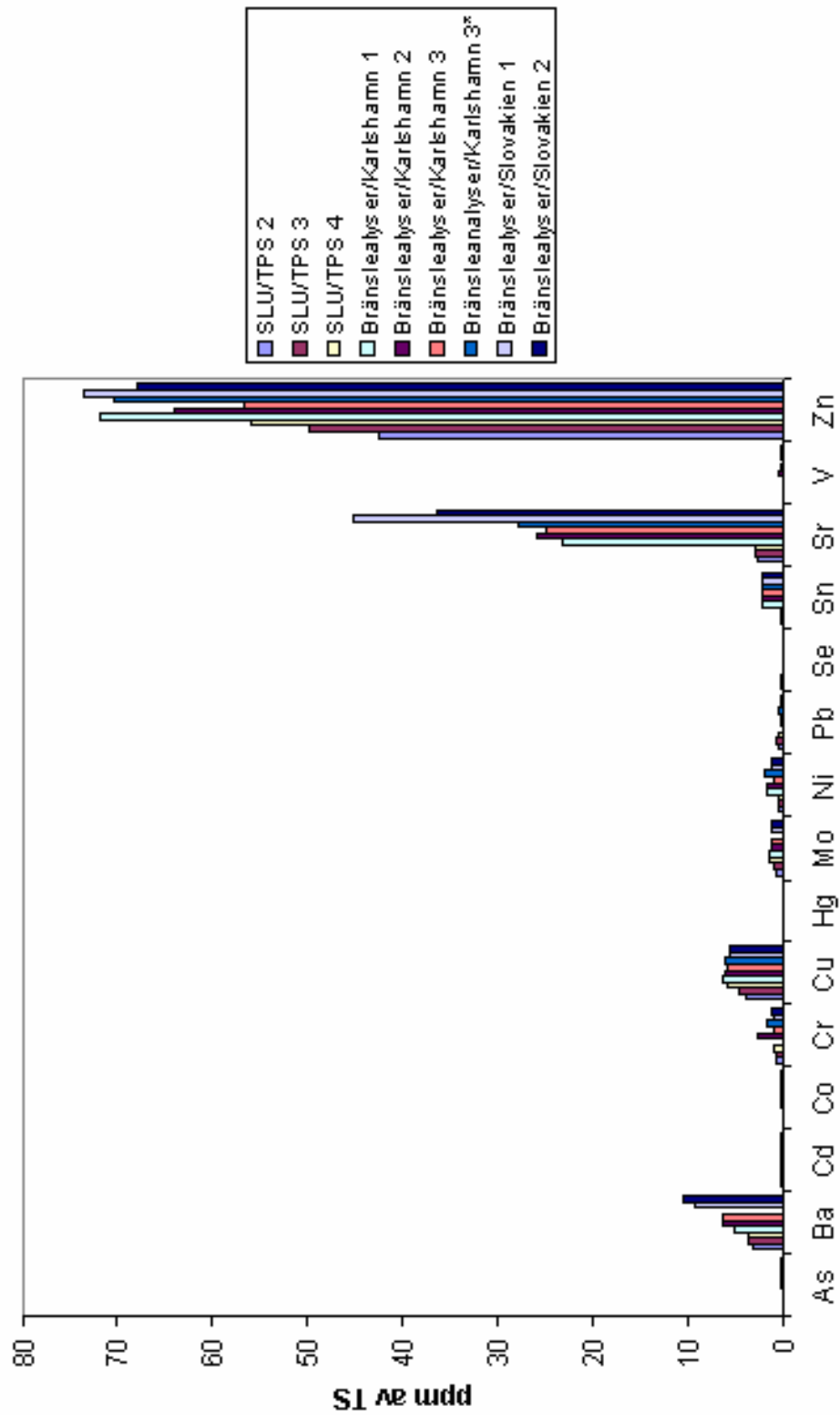
Figure 14. Cl content (wt-% of d.s.) of analyzed samples.

Bränsleaskan domineras av kalium, fosfor, kalcium och magnesium (se figur 15.). Dessa halter varierar (medelvärde respektive standardavvikelse redovisas) lite mellan analyserade rapsmjölsprov; K $1,4 \pm 0,1$, P $1,2 \pm 0,1$, Ca $0,8 \pm 0,05$ och Mg $0,5 \pm 0,1$ % av TS. Spårelementhalterna är överlag låga förutom för Zn och Sr (se figur 16). De senare håller dock liknande nivåer som i typiska skogsbränslen.¹⁸



Figur 15. Distribution av askbildande huvudelement (% av TS) hos analyserade prov.

Figure 15. Distribution of ash forming main elements (% of d.s.) of analyzed samples.

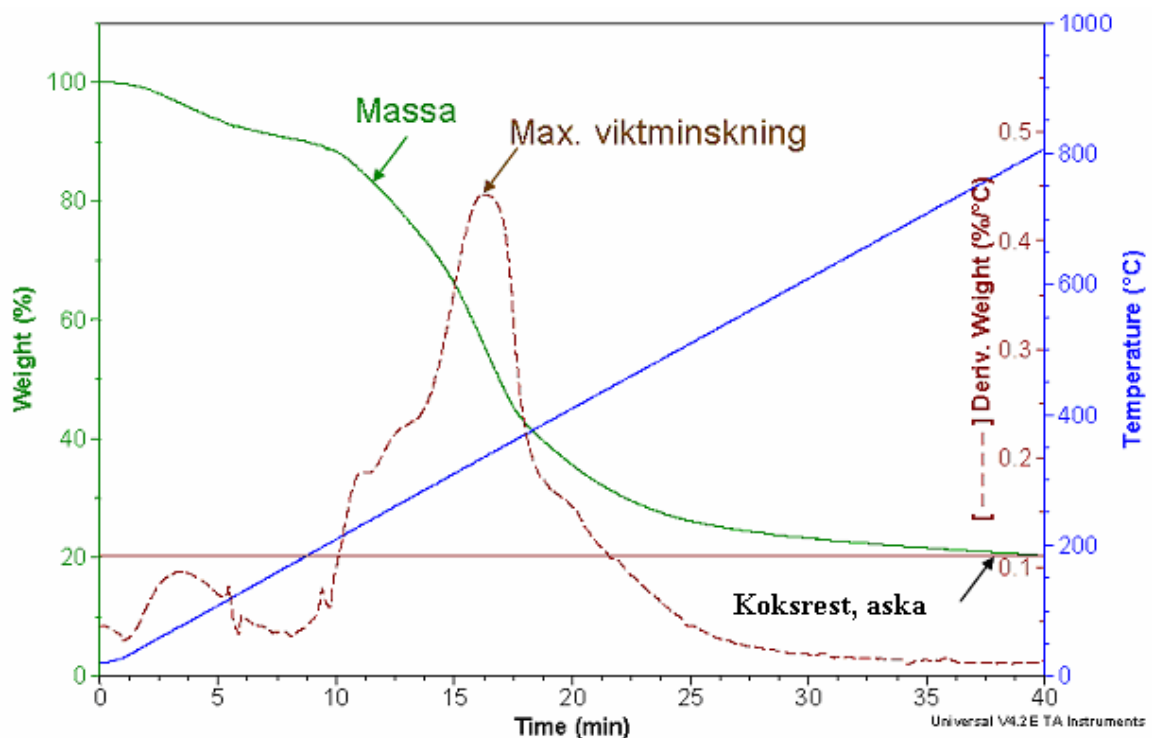


Figur 16. Distribution av spårelement hos analyserade prov.

Figure 16. Distribution of trace elements in analyzed samples.

3.2 Termogravimetrisk analys av bränsleprov

Resultat av en termogravimetrisk analys av rapsmjölsprovet ges i figur 17. Linjär upphettning på 20°C/min används. Heldragen kurva är provets massa (TG) (mass-%) och streckad kurva är derivatan av massan (DTG). Slutvikten är bränslets koks- och askrest (20,5 %). Maximal pyrolyshastighet uppnås vid ca 320°C (topp på DTG-kurvan). Flera toppar och oregelbundenheter på DTG-kurvan indikerar att sönderfallet sker i olika steg inom olika temperaturintervall.



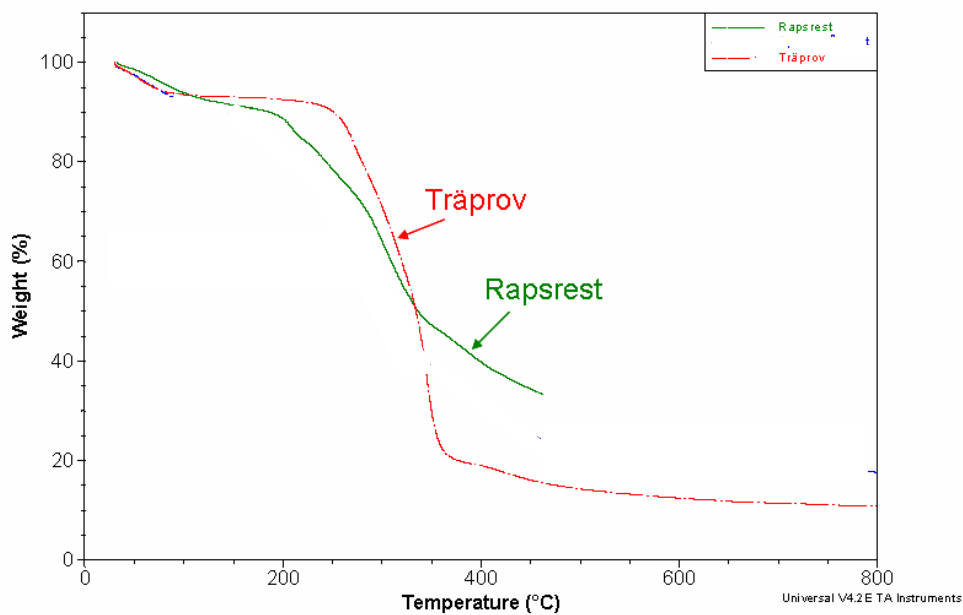
Figur 17. TG- och DTG-kurvor på rapsmjöl som funktion av tiden. Gasflöde: 100 ml/min N₂. Provmängd 3,14 mg. Linjär uppvärmning 20 °C/min.

Figure 17. TG and DTG graphs of rape seed meal as a function of time. Gas flow: 100 ml/min N₂ Sample weight 3.14 mg. Linear heating 20 °C/min.

Upphettningshastigheten påverkar nästan alltid TG-kurvans utseende. Försök gjordes därför med 20°C/min, 200°C/min och sk. Hi-Res, vilket innebär att upphettningshastigheten anpassas till viktsminskningen så att snabbare viktsminskning ger långsammare upphettning. Försök med 20°C/min och Hi-Res ger samma förlopp vilket innebär att 20°C/min är ”tillräckligt långsamt” för att provet skall hinna reagera vid varje temperatur.

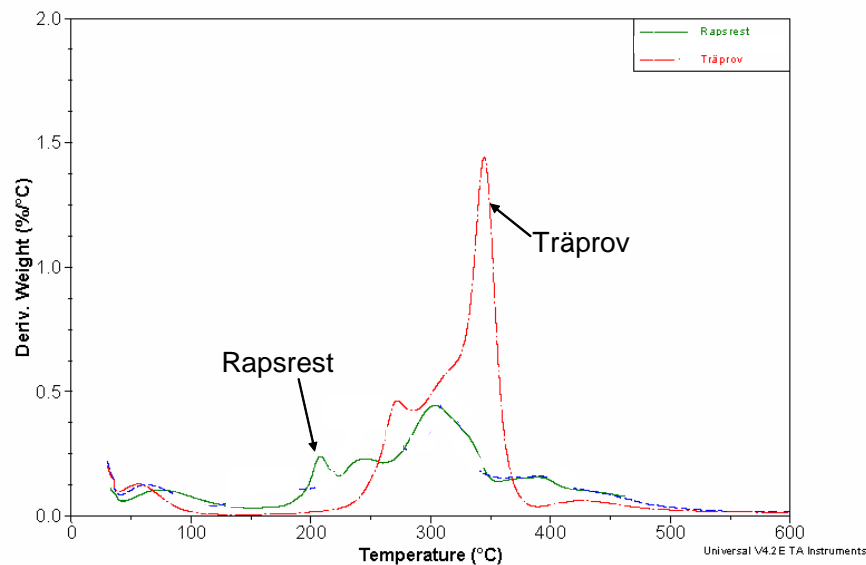
Gasens sammansättning kan påverka TG-kurvan på flera sätt. Görs TG-analysen av ett brännbart prov i luft kommer det att antändas vid en bestämd temperatur, tändpunkten. De avgående gaserna antänds först. I ett senare skede kommer koksresten att börja brinna. Om experimentet görs med syrefri gas sker ingen antändning, utan viktnedgången i början härrör sig helt och hållet från avgasning. Eventuell inverkan av gasen kommer då endast från olikheter i värmeledningsförmåga och strålningsegenskaper. Försök i N_2 - och CO_2 - gas gav nästan identiska kurvor vilket indikerar att gasen inte har någon roll i pyrolysförloppet i någondera fallet.

I figur 18 visas TG-kurvor för rapsmjöl och träprov körda med Hi-Res i kvävgas och figur 19 visar samma analyser som DTG-kurvor som funktion av temperaturen.



Figur 18. TG-kurvor för de två analyserade bränsleproven. Hi-Res. Gasflöde 100 ml/min N_2 .

Figure 18. TG-graphs for the two analyzed fuel samples. Hi-Res. Gas flow 100 ml/min N_2 .



Figur 19. DTG-kurvor för de två analyserade bränsleproven. Hi-Res. Gasflöde 100 ml/min N₂.

Figure 19. DTG-graphs for the two analyzed fuel samples. Hi-Res. Gas flow 100 ml/min N₂.

Sammanfattning av TGA-resultaten

Pyrolysförloppet för det undersökta rapsmjölsprovet har en karaktäristisk temperatur på 320 °C. Avgasningen startar vid 150 °C vilket är lägre än för träpulvret och sker i ett bredare temperaturintervall. Det undersökta träprovet uppvisade en karaktäristisk pyrolystemperatur på 350 °C och ett pyrolysisintervall mellan 250 och 370 °C. Träprovets karaktäristiska temperatur är signifikant högre än rapsresten (-mjölet). Skillnaderna i organiskt innehåll, framförallt protein hos rapsmjölet och cellulosafibermaterial och lignin hos träet är orsaken till skillnader i avgasningstemperaturen.

3.3 Fluidbäddsförsök

3.3.1 Bäddagglomereringstendenser

Initial defluidiseringstemperaturer

Resultaten från bestämningen av de initiala defluidiseringstemperaturerna från de olika försöken framgår av tabell 6. Tidigare undersökningar med metoden har visat att agglomereringstemperaturen kan bestämmas med en precision av ± 5 °C (standardavvikelse).¹⁹ Bark- och rapsmjölsbränslet resulterade i agglomereringstemperaturer klart över normala eldstadstemperaturer i fluidiserade bäddar emedan bränsleblandningarna resulterade i agglomereringstemperaturer något över de eldstadstemperaturer som råder i fluidiserade bäddar.

Tabell 6. *Erhållna initiala defluidiseringstemperaturer för de olika studerade bränslena/bränsleblandningarna*

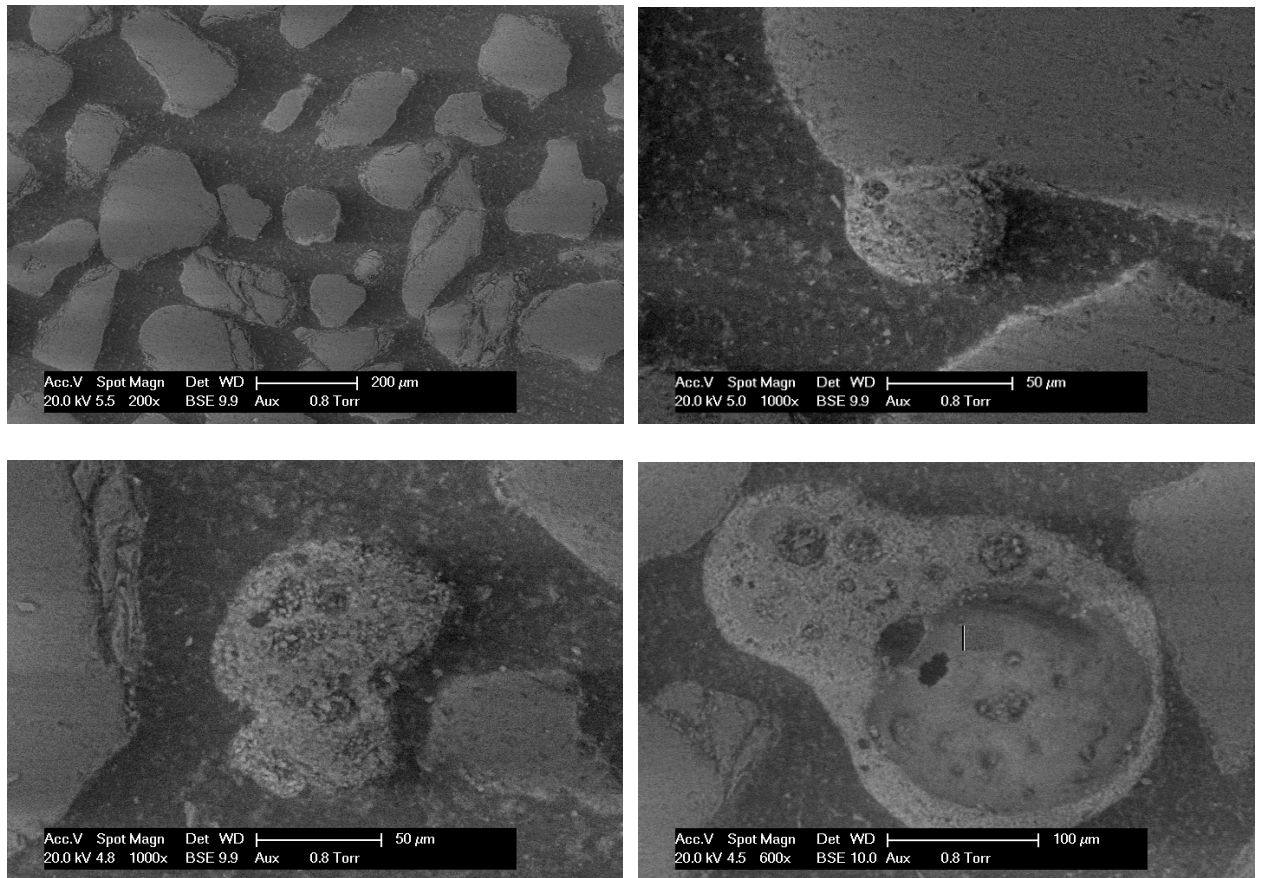
Table 6. *Resulting initial de-fluidization temperatures for the different fuels/fuel mixtures.*

Försök	Initial defluidiseringstemperatur (°C)
Bark	> 1015
Rapsmjöl, 10 %, bark 90 %	965
Rapsmjöl, 30 %, bark 70 %	930
Rapsmjöl, 80 %, kutterspån 20%	1020

SEM/EDS-analyser på bäddmaterial och agglomerat

Figur 20 (ovan till vänster) visar ett antal typiska bäddkorn (kvarts) efter 8 timmars förbränning av rent rapsmjöl. Generellt sett är bäddkornslagren mycket tunna och icke sammanhängande. På ett fåtal korn förekommer dock lite tjockare men ej sammanhängande bäddkornslager. Ett exempel på ett sådant korn kan ses i centrum på figur 20 ovan till vänster. Ett genomsnitt av sex punktanalyser (SEM/EDS) på denna beläggning/lager ges i tabell 7. Lagren består av Si, Ca, P, K och Mg.

Ett annat exempel visas i figur 20 ovan till höger där en rund askpartikel har fastnat på ett bäddkorn. Sammansättningen på denna askpartikel ges i tabell 7. Förutom bäddkorn av kvarts återfinns ett mindre antal partiklar (uppskattningsvis 1 - 5%) av askursprung. Två typiska exempel visas i figur 20. Ett aggregat av ursprungligen delvis smälta askpartiklar (figur 20 nedan till vänster, tabell 7) och en till stora delar smält askpartikel (figur 20 nedan till höger, tabell 7). De enskilda askpartiklarna består av fosfor, kalium, kisel, magnesium och kalcium (se tabell 7).



Figur 20. Typiska skikt på bäddkorn (ovan) och enskilda askpartiklar (nedan) återfunna i bädden vid förbränning av rapsmjöl (med 20 % kutterspån)

Figure 20. Typical bed particle layers (upper) and individual ash particles found in the bed (lower) during combustion of rape seed meal.

Tabell 7. Elementarsammansättning (syre- och kolfri bas) hos typiska bäddkornslager och enskilda askpartiklar återfunna i bädden vid förbränning av 80 % rapsmjöl, 20 % kutterspån.

Table 7. Elemental composition (oxygen- and carbon free basis) of typical bed particle layer and individual ash particles found in the bed during combustion of rape seed meal.

Element	Bäddkornslager ¹ (mol-%)	"Rund" askpartikel på bäddkornslager ² (mol-%)	Enskild askpartikel i bädd ³ (mol-%)	Delvis smält askpartikel ⁴ (mol-%)
Mg	9	16	13	16
Si	48	20	20	20
P	16	28	27	25
S	1	1	2	3
Cl	0	0	0	0
K	7	26	27	27
Ca	19	9	11	9

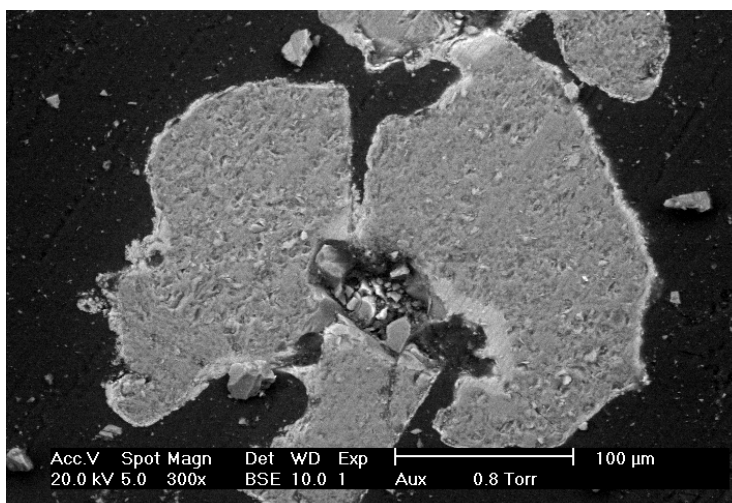
¹⁾ Ett genomsnitt av sex punktanalyser av beläggningen på det kvartskorn som är beläget i centrum på figur 17 ovan till vänster.

²⁾ Areaanalys på en "rund" askpartikel återfunnen i bäddkornslager. Se figur 17 ovan till höger.

³⁾ Areaanalys på enskilt askkorn i bädd, se figur 17 nedan till vänster

⁴⁾ Ett genomsnitt av 5 punktanalyser på en delvis smält askpartikel. Se figur 17 nedan till höger. I en punkt var Si-halten ca tre gånger högre än de andra, vilket innebär att de senare endast innehöll 10-14 % Si.

Omfattande tidigare SEM/EDS-analyser på bäddkorn producerade under försök med bark med liknande sammansättning och enligt samma metodik visar att sammanhängande bäddkornslager bestående av ett yttre lager som efterliknar bränsleaskans sammansättning och ett inre som dominerar det inre lagret av elementen Si, Ca och K bildas vid barkförbränning (se figur 21).²⁰



Figur 21. Typiska begagnade bäddkorn vid förbränning av bark efter en dags eldning.²⁰

Figure 21. Typical used bed particles after one days combustion of bark.²⁰

3.3.2 Gasemissioner

Utgående NO-emissioner (medelvärde över försöksperioden) vid förbränning av de olika bränsle/bränslekombinationerna framgår av tabell 8. En fördubbling av NO-halten erhöles vid förbränning av rapsmjöl i jämförelse med bark. Här bör nämnas att andelen bildat NO kan variera mycket beroende på vilken anläggning som används.

Tabell 8. NO-emissioner från fluidbäddsförsök.

Table 8. NO emissions from fluidised bed combustion experiments.

Försök	NO (mg/Nm ³ vid 10 % O ₂ t.g.)
Bark	250
Rapsmjöl 10 %, bark 90 %	360
Rapsmjöl 30 %, bark 70 %	330
Rapsmjöl 80 %, kutterspån 20 %	520

Utgående SO₂- och HCl-emissioner (medelvärde över försöksperioden) för de olika studerade bränslena framgår av tabell 9. Låga HCl-halter erhöles för samtliga bränslen/bränslekombinationer. Relativt höga SO₂-emissioner erhöles vid förbränning av rapsmjöl även om dock endast ca 20% av det svavel som fanns i bränslet bildade SO₂ (g).

Tabell 9. SO₂- och HCl-koncentration i rökgaserna vid fluidbäddsförsök.

Table 9. SO₂- and HCl concentrations in flue gas from fluidised bed combustion.

Typ av bränsle	HCl (mg/Nm ³ vid 10 % O ₂ t.g.)	SO ₂ (mg/Nm ³ vid 10 % O ₂ t.g.)
Bark	3	4
Rapsmjöl 10 %, bark 90 %	< 1	1
Rapsmjöl 30 %, bark 70 %	< 1	38
Rapsmjöl 80 %, kutterspån 20 %	1	270

3.3.3 Partikelemissioner

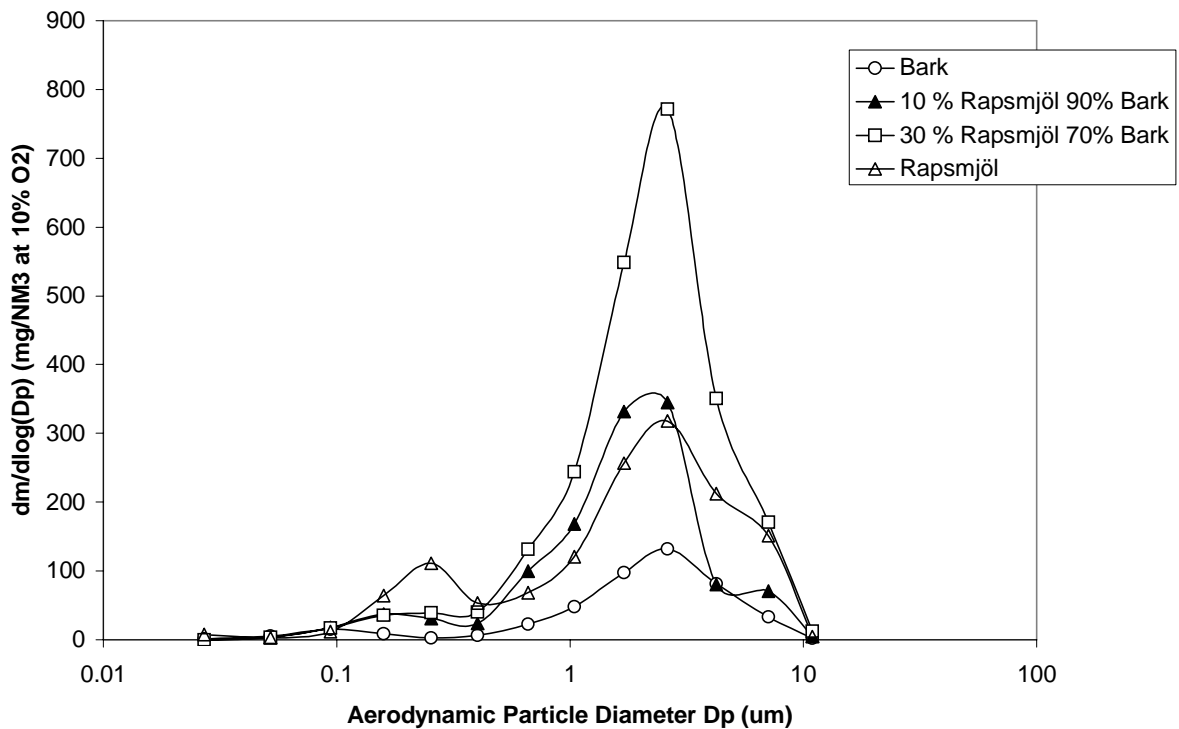
En fördubbling av den totala partikelmängden räknat på massbasis erhöles vid förbränning av rapsmjöl (med inblandning av 20 % kutterspån) i jämförelse med bark (se tabell 10).

Tabell 10. Totalstofthalt vid fluidbäddsförsök.

Table 10. Total particle mass concentration in flue gas from fluidised bed combustion

	Totalstofthalt (mg/Nm ³ vid 10% O ₂ t.g.)
Bark	780
Rapsmjöl 10 %, bark 90 %	610
Rapsmjöl 30 %, bark 70 %	1210
Rapsmjöl 80 %, kutterspån 20 %	1410

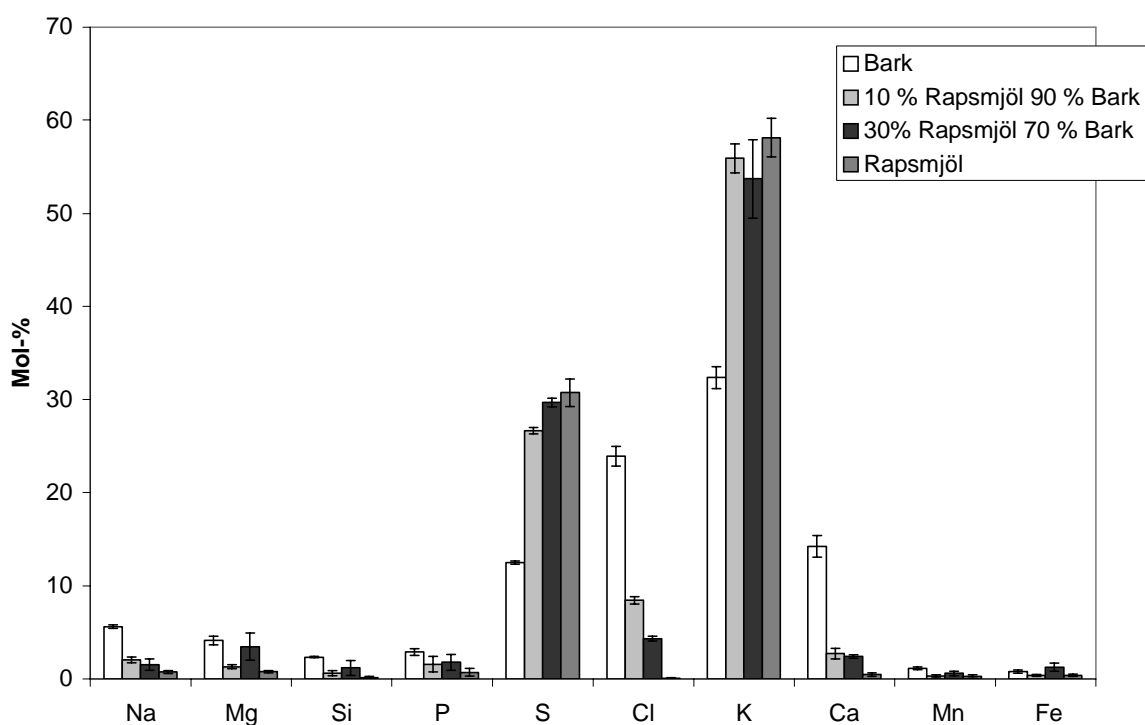
Resultaten från försöken i fluidbäddsreaktorn visar på en tydlig bimodal (mass)storleksfördelning med en mod av fina (<1 µm) partiklar och en mod med grova (>1 µm) partiklar (se figur 22). Detta är en typisk fördelning av partiklar i rökgaser från förbränning av fasta bränslen där de fina partiklarna bildats av askämnen som förångats från bränslet och kondenserar då rökgaserna kyls av eller produkter från ofullständig förbränning (sot och kolväten). De grövre partiklarna består i huvudsak av fast eller smält material som följer med rökgaserna direkt från bränslet, t ex mineralkorn och bildade smälta droppar. Det kan även förekomma oförbrända bränslerester i denna fraktion. Resultaten visar på en tydlig ökning i såväl mängden (massan) fina som grova partiklar vid inblandning och/eller förbränning av pellets med 80 % rapsmjöl, 20 % kutterspån.



Figur 22. Partikel (mass)storleksfördelningar i rökgaserna från försöken med förbränning av: 1) barkpellets; 2) pellets med 10 % rapsmjöl 90 % bark; 3) pellets med 30 % rapsmjöl 70 % bark och 4) pellets med 80 % rapsmjöl, 20 % kutterspån i en BFB (pilotreaktor).

Figure 22. Particle mass size distributions in the flue gases during combustion of bark, 10 % rape seed meal 90 % bark, 30 % rape seed meal 70 % bark and rape seed meal in a pilot BFB.

De fina partiklarna ($< 1 \mu\text{m}$) innehåller framförallt kalium, klor, svavel, kalcium vid förbränning av bark (se figur 23) Normalt förekommer kalcium ej i finmoden. Syre förekommer även i relativt höga halter och kol återfinns i mindre mängder. Detta framgår ej av figur 23 då halterna anges på syre- och kolfri basis. Vid inblandning av rapsmjöl i bark såväl som vid förbränning av rapsmjöl (med inblandning av 20 % kutterspån) reduceras klorinnehållet i de fina partiklarna kraftigt och partiklarna innehåller framförallt kalium, svavel, syre och kol (se figur 23). Av tabell 11 framgår också att de bildade partiklarna består av kaliumklorid och -sulfater.



Figur 23. Elementarsammansättning på Al-, C- och O-fri bas (mol-%) för fina partiklar (impaktorsteg nr 4, GMD 0.19 μm , eller nr 5, GMD 0.32 μm) vid förbränning av 1) barkpellets; 2) pellets med 10 % rapsmjöl 90 % bark; 3) pellets med 30 % rapsmjöl 70 % bark och 4) pellets med 80 % rapsmjöl, 20 % kutterspån % i en BFB (pilotreaktor vid i en BFB (pilotreaktor).

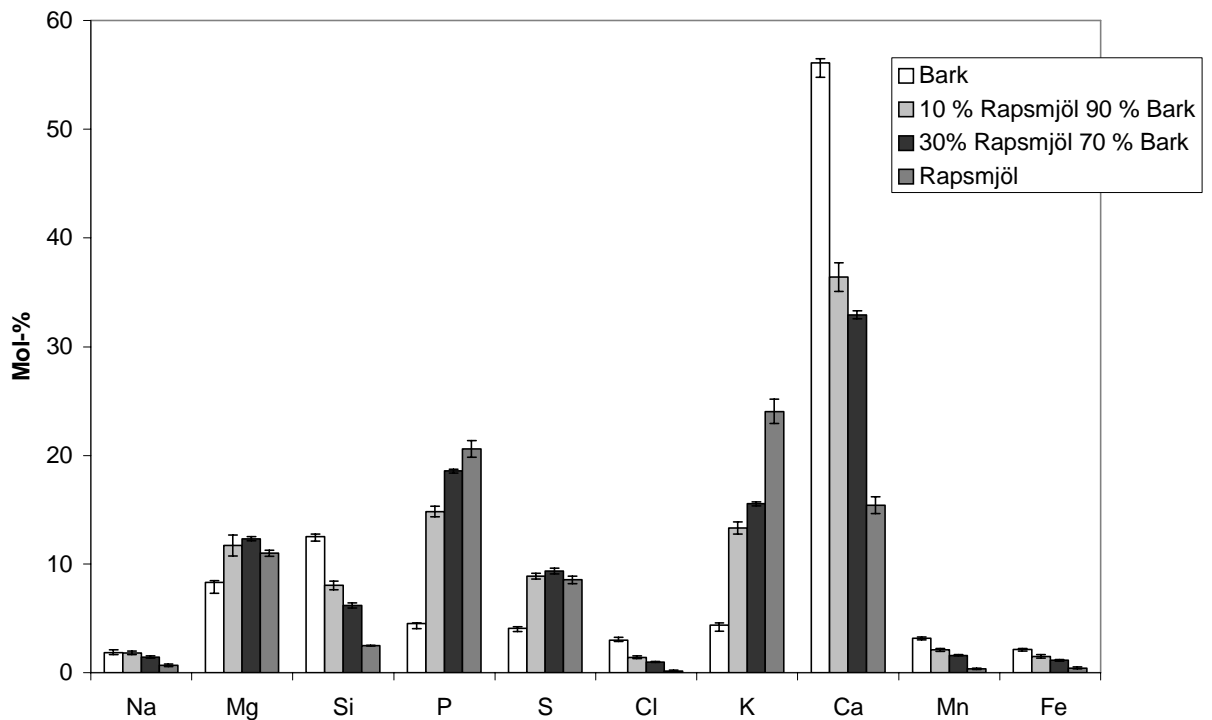
Figure 23. Elemental distribution on Al-, C- and O-free basis (mole-%) of the fine mode particles (e.g. impactor stage 4, GMD 0.19 μm , or stage 5, GMD 0.32 μm) sampled during combustion of bark, 10% Rape seed meal 90% Bark, 30% Rape seed meal 70% Bark and Rape seed meal 80 %, in a pilot BFB.

Tabell 11. Faser identifierade med XRD hos fina partiklar (impaktorsteg nr 4, GMD 0,19 μm , eller nr 5, GMD 0,32 μm) vid förbränning av 1) bark, 2) 10 % rapsmjöl 90 % bark, 3) 30 % rapsmjöl 70 % bark och 4) 80 % rapsmjöl, 20 % kutterspån i en BFB (pilotreaktor) .

Table 11. Phases identified with XRD of the fine mode particles (impactor stage nr 4, GMD 0.19 μm , or nr 5, GMD 0.32 μm) sampled during combustion of bark, 10 % rape seed meal 90 % bark, 30 % rape seed meal 70 % bark and rape seed meal in a pilot BFB reactor

Bark	10% Rapsmjöl 90% Bark	30 % Rapsmjöl 70% Bark	Rapsmjöl
för lite prov	K ₂ SO ₄ (Arcanite) KCl (sylvite) (lite prov)	för lite prov	K ₂ SO ₄ (Arcanite)

Elementarsammansättningen hos den grova partikelfractionen (se figur 24) domineras av kalcium, kisel, magnesium, syre och kol vid förbränning av bark. Vid inblandning av rapsmjöl och vid ren rapsmjölseldning domineras partiklarna av kalium, fosfor, kalcium, magnesium, syre och kol. Identifierade (kristallina) faser vid barkförbränning är framförallt CaSO_4 och CaCO_3 till skillnad mot vid inblandning av rapsmjöl och vid ren rapsmjölseldning då framförallt Ca-K-fosfater och Ca-Mg-K-fosfater identifierats (se tabell 12).



Figur 24. Elementarsammansättning på Al-, C- och O –fri bas (mol-%) för grova partiklar (impaktorsteg nr 10, GMD $3.3 \mu\text{m}$) vid förbränning av 1) barkpellets; 2) pellets med 10 % rapsmjöl 90 % bark; 3) pellets med 30 % rapsmjöl 70 % bark och 4) pellets med 80 % rapsmjöl, 20 % kutterspån i en BFB (pilotreaktor vid i en BFB (pilotreaktor).

Figure 24. Elemental distribution on Al-, C- och O –fri bas (mole-%) of the coarse mode particles (e.g. impactor stage 10, GMD $3.3 \mu\text{m}$) sampled during combustion of bark, 10% Rape seed meal 90% Bark, 30% Rape seed meal 70% Bark and Rape seed meal in a pilot BFB.

Tabell 12. Faser identifierade med XRD hos grova partiklar (impaktorsteg nr 10, GMD 3,3 μm , vid förbränning av 1) bark, 2) 10 % rapsmjöl 90 % bark, 3) 30 % rapsmjöl 70 % bark och 4) 80 % rapsmjöl, 20 % kutterspån i en BFB (pilotreaktor) .

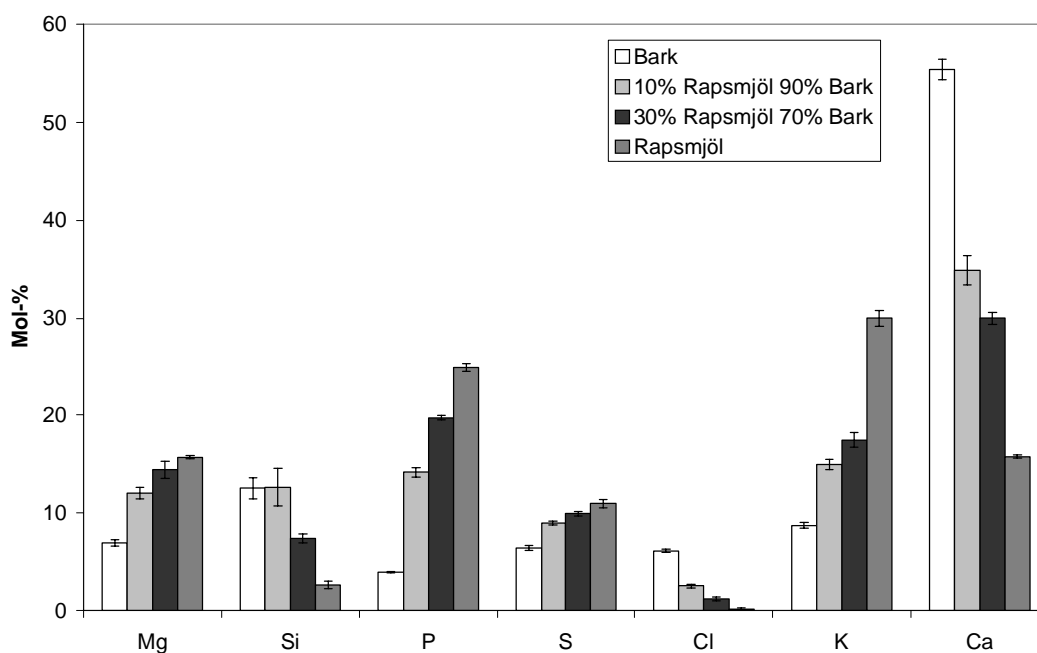
Table 12. Phases identified with XRD of the coarse mode particles (impactor stage nr 10, GMD 3.3 μm) sampled during combustion of 1) bark, 2) 10 % rape seed meal 90 % bark, 3) 30 % rape seed meal 70 % bark and 4) 80 % rape seed meal and 20 % cutter shavings in a pilot BFB reactor

Prov	Bark	10% Rapsmjöl 90% Bark	30 % Rapsmjöl 70% Bark	Rapsmjöl
Identifierade faser	CaSO ₄ (anhydrite) CaCO ₃ (Calcit) (lite prov)	för lite prov	Ca ₂ KP ₃ O ₁₀ Ca ₉ MgK(PO ₄) ₇ K ₂ SO ₄ (Arcanite) CaSO ₄ (anhydrite)	Ca ₂ KP ₃ O ₁₀ Ca ₉ MgK(PO ₄) ₇ K ₂ SO ₄ (Arcanite) CaSO ₄ (anhydrite)

3.3.4 Beläggningssbildning

För samtliga bränslmixar bestod beläggningarna på den kylda sondens läsida både av finpartikulärt som grovt material. Finfraktionen utgjordes av kalium-, kort- och svavelhaltigt material (se figur 25). Grovfraktionen från bark innehöll kalcium och kisel. Finfraktionen från pelletar med rapsinblandning och från mixen 80 % rapsmjöl/20 % kutterspån innehöll högre koncentrationer av svavel, medan klorinnehållet minskade jämfört med grovfraktionen från bark.

Eftersom tidigare arbeten kring beläggningssbildning och högttemperaturkorrosion har fokuserats på de beläggningar som uppkommer på panntubers läsida har så även i detta arbete analyser endast utförts på sondringarnas läsida och ej på dess vindsida. På beläggningssproben avsattes grov- och finfraktionen något blandade. För kvantitativa analyser är därför impaktorproven mer värdefulla. Ur korrosionssynpunkt är finfraktionen mest intressant. Identifierade faser framgår av tabell 13.



Figur 25. Elementarsammansättning på O- och C-fri bas hos beläggningar avsatt på sondens läsida vid förbränning av 1) barkpellets; 2) pellets med 10 % rapsmjöl 90 % bark; 3) pellets med 30 % rapsmjöl 70 % bark och 4) pellets med 80 % rapsmjöl, 20 % kutterspån i en BFB (pilotreaktor).

Figure 25. Elemental composition of lee-side deposits on O- and C-free basis at combustion of bark, 10% Rape seed meal 90% Bark, 30% Rape seed meal 70% Bark and Rape seed meal in a pilot BFB.

Tabell 13. Faser identifierade med XRD i beläggningsprovet tagna vid förbränning av 1) bark, 2) 10 % rapsmjöl 90 % bark, 3) 30 % rapsmjöl 70 % bark och 4) 80 % rapsmjöl, 20 % kutterspån i en BFB (pilotreaktor).

Table 13. Phases identified with XRD in deposits sampled during combustion of 1) bark 2) 10 % rape seed meal 90 % bark 3) 30 % rape seed meal 70 % bark and 4) 80 % rape seed meal 20 % cutter shavings in a pilot BFB reactor.

Prov	Bark	10% Rapsmjöl 90% Bark	30% Rapsmjöl 70% Bark	Rapsmjöl
Identifierade faser	CaCO ₃ (Calcit) CaSO ₄ (anhydrite) KCl (sylvite)	CaCO ₃ (Calcit) K ₂ SO ₄ (Arcanite) KCl (sylvite) Ca ₉ MgK(PO ₄) ₇ CaMgPO ₄ SiO ₂ (kvarts)	Ca ₉ MgK(PO ₄) ₇ CaMgPO ₄ CaSO ₄ (anhydrite) K ₂ SO ₄ (Arcanite) KCl (sylvite) CaCO ₃ (Calcit) MgO (periclase)	K ₂ SO ₄ (Arcanite) CaMgPO ₄ CaK ₂ P ₂ O ₇ Ca ₉ MgK(PO ₄) ₇ CaSO ₄ (anhydrite)

3.4 Rostereldningsförsök

3.4.1 Slaggbildning

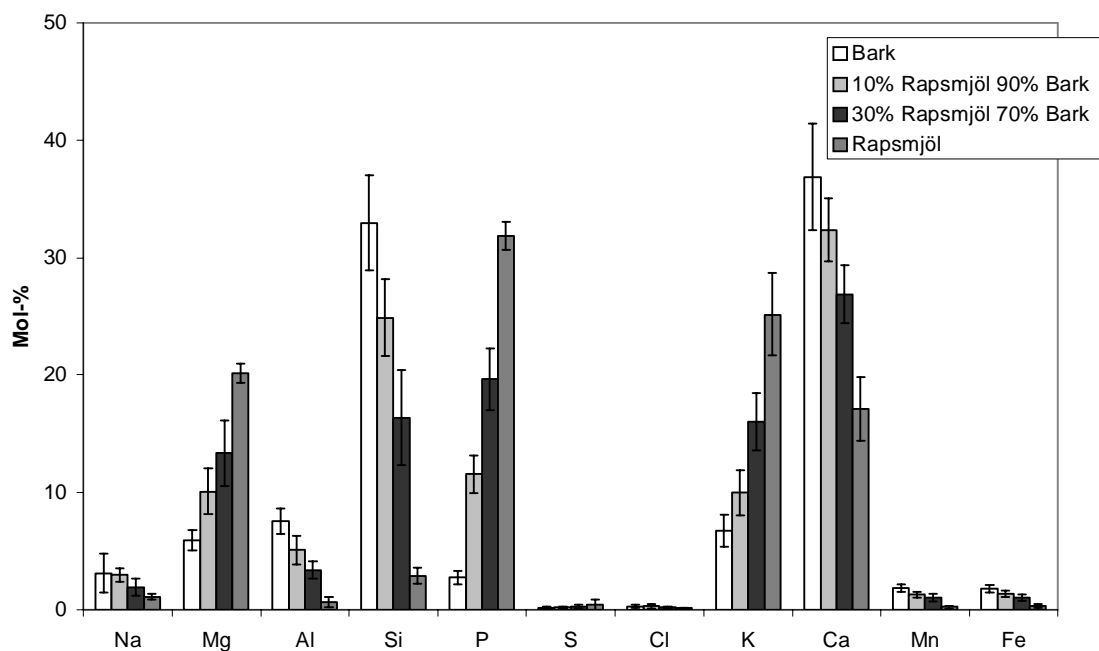
Alla försök resulterade i bildning av beläggningar i form av slagg, framförallt ovanpå brännarens primärluftsring (rostret). Dessa beläggningar bestod av oorganiskt material (aska) som till stor del var smält. Kvar i brännkoppen återfanns också oförbränt material. Av tabell 14 framgår att barkbränslet har en relativt hög slaggningsstendens dvs hög andel bildad slagg av ingående mängd bränsleaska till förbränningsanläggningen. Vid inblandning av rapsmjöl i bark och vid förbränning av rapsmjöl (med 20 % kutterspån) reducerades slaggningsstendensen till mer moderata nivåer. Tidigare undersökningar med metoden har visat på låga variationer i slaggningsstendens (1-4%) mellan utförda försöksreplikater med ett flertal bränsletyper.¹⁵

Tabell 14. Andel bildad slagg i eldningsutrustningen uttryckt i vikt-% av ingående mängd bränsleaska vid förbränning av 1) barkpellets; 2) pellets med 10 % rapsmjöl 90 % bark; 3) pellets med 30 % rapsmjöl 70 % bark och 4) pellets med 80 % rapsmjöl, 20 % kutterspån i en pelletsbrännare (roster)..

Table 14. Fraction of fuel ash that form slag (wt-%) during combustion of bark, 10% Rape seed meal 90% Bark, 30% Rape seed meal 70% Bark and Rape seed meal in a pellet burner (grate).

Försök	Andel bildad slagg (Viktsprocent av ingående mängd bränsleaska)
Bark	47
10 % rapsmjöl, 90 % bark	21
30 % rapsmjöl, 70 % bark	31
Rapsmjöl, 80 %, kutterspån 20 %	22

Resultaten från SEM/EDS-areaanalyserna visar att den bildade slaggen (se figur 26) vid barkförbränning framförallt innehöll kisel, kalcium, kalium och aluminium, troligen i form av olika silikater. Vid inblandning av rapsmjöl i bark ökar fosfor, kalium och magnesium innehållet emedan kisel och kalcium innehållet minskar. Slaggen som bildas vid rapsmjölsförbränning innehåller framförallt fosfor, kalium, magnesium och kalcium, troligen olika fosfater.



Figur 26. Elementarsammansättning hos den bildade slaggen presenterad på syre- och kolfri basis vid förbränning av 1) barkpellets; 2) pellets med 10 % rapsmjöl 90 % bark; 3) pellets med 30 % rapsmjöl 70 % bark och 4) pellets med 80 % rapsmjöl, 20 % kutterspån i en pelletsbrännare (roster).

Figure 26. Elemental composition (on oxygen and carbon free basis) of the produced slags during combustion of Bark, 10% Rape seed meal 90 % Bark, 30% Rape seed meal 70% Bark and Rape seed meal in a pellets burner (grate).

De uttagna slagproverna analyserades även med XRD för att bestämma de bildade faserna vid förbränning. Påpekas bör att man med XRD endast kan identifiera kristallina föreningar i provet, däremot inte föreningar som föreligger i amorf (icke-kristallin) form. I det här fallet utgörs den amorfa delen av slaggen framförallt av smält material som ej kristalliserats när provet kylts ner efter förbränningsförsöket. I tabell 15 redovisas vilka kristallina föreningar som identifierats i de olika proven. Vid barkförbränning återfinns olika Ca-Mg-silikater samt K-Al-silikater. Vid inblandning av rapsmjöl i bark och vid förbränning av 80 % rapsmjöl, 20 % kutterspån (askmässigt "rent" rapsmjöl) återfinns framförallt olika Ca-Mg-K-fosfater.

Aluminiumhalterna i barken är ovanligt höga, vilket möjligen orsakas av att sand följt med in i pelleteringen.

Tabell 15. Faser identifierade med XRD i bildad slag vid förbränning av 1) bark, 2) 10 % rapsmjöl 90 % bark, 3) 30 % rapsmjöl 70 % bark och 4) 80 % rapsmjöl, 20 % kutterspån i en pelletsbrännare (roster).

Table 15. Phases identified with XRD in slag formed during combustion of 1) bark 2) 10 % rape seed meal 90 % bark 3) 30 % rape seed meal 70 % bark and 4) 80 % rape seed meal 20 % cutter shavings in a pellet burner (grate) pilot.

Prov	Bark	10% Rapsmjöl 90% Bark	30 % Rapsmjöl 70% Bark	Rapsmjöl
Identifierade faser	Ca ₂ MgSi ₂ O ₇ (Åkermanit) Ca ₂ SiO ₄ KAISiO ₄	Ca ₂ MgSi ₂ O ₇ (Åkermanit) Ca ₉ MgK(PO ₄) ₇ Ca ₂ SiO ₄ KAISiO ₄ CaMgSiO ₄ (Montecellit)	CaKPO ₄ Ca ₂ MgSi ₂ O ₇ (Åkermanit) Ca ₉ MgK(PO ₄) ₇ KAISiO ₄	Ca ₉ MgK(PO ₄) ₇ CaMgPO ₄ Ca ₂ SiO ₄

Av tabell 16 framgår även identifierade faser i den avsatta botten(pann)askan.

Tabell 16. Faser identifierade med XRD i bildad pann(botten)aska vid förbränning av 1) bark, 2) 10 % rapsmjöl 90 % bark, 3) 30 % rapsmjöl 70 % bark och 4) 80 % rapsmjöl, 20 % kutterspån i en pelletsbrännare (roster).

Table 16. Phases identified with XRD in formed boiler (bottom) ash during combustion of 1) bark 2) 10 % rape seed meal 90 % bark 3) 30 % rape seed meal 70 % bark and 4) 80 % rape seed meal 20 % cutter shavings in a pellet burner (grate) pilot.

Prov	Bark	10% Rapsmjöl 90% Bark	30 % Rapsmjöl 70% Bark	Rapsmjöl
Identifierade faser		Ca ₂ MgSi ₂ O ₇ (Åkermanit) CaKPO ₄ Ca ₂ SiO ₄ KAISiO ₄ CaMgSiO ₄ (Montecellit)	SiO ₂ Ca ₃ Mg(SiO ₄) ₂ (merwinite) Ca ₂ MgSi ₂ O ₇ (Åkermanit) KAISiO ₄ CaO (Lime)	Ca ₉ MgK(PO ₄) ₇ CaMgPO ₄ Ca ₂ SiO ₄

3.4.2 Gasemissioner

Utgående NO-emissioner (medelvärde över försöksperioden) vid förbränning av de olika bränsle/bränslekombinationerna framgår av tabell 17. En 200%-ig ökning av NO-halten erhöles vid förbränning av pellets med 80% rapsmjöl, 20 % i jämförelse med barkpellets.

Tabell 17. NO-emissioner från pelletsbrännarförsök (rosterförsök)

Table 17. NO emissions from combustion in pellet burner (grate)

Försök	NO (mg/Nm ³ vid 10 % O ₂ t.g.)
Bark	250
10 % rapsmjöl, 90 % bark	230
30 % rapsmjöl, 70 % bark	400
80 % rapsmjöl, 20 % kutterspån	720

Utgående SO₂- och HCl-emissioner (medelvärde över försöksperioden) för de olika studerade bränslena framgår av tabell 18. Låga HCl-halter erhöles för samtliga bränslen/-bränslekombinationer. Höga SO₂-emissioner erhöles vid förbränning av rapsmjöl (med inblandning av 20 % kutterspån) då ungefär 60% av det svavel som fanns i bränslet bildade SO₂ (g).

Tabell 18. SO₂- och HCl-koncentrationer i rökgaserna vid pelletsbrännarförsök (rosterförsök).

Table 18. SO₂ and HCl concentrations in flue gas from pellet burner (grate) combustion

Typ av bränsle	HCl (mg/Nm ³ vid 10% O ₂ t.g.)	SO ₂ (mg/Nm ³ vid 10% O ₂ t.g.)
Bark	< 1	4
10 % rapsmjöl, 90 % bark	< 1	120
30 % rapsmjöl, 70 % bark	< 1	220
80 % rapsmjöl, 20 % kutterspån	2	930

3.4.3 Partikelemissioner

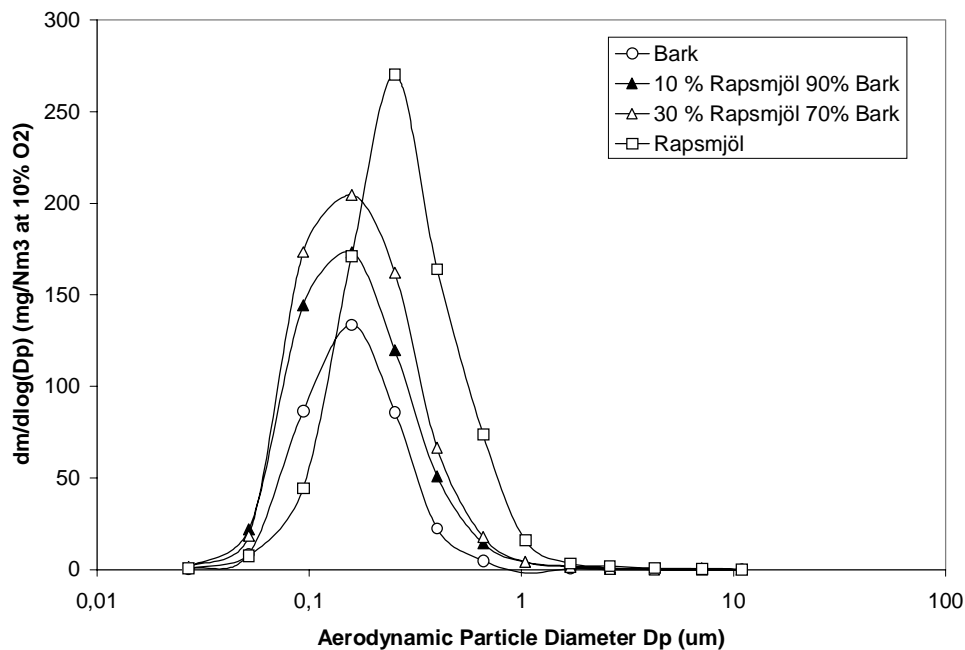
En fördubbling av den totala partikelmängden räknat på massbasis erhöles vid förbränning av rapsmjöl i jämförelse med bark (se tabell 19).

Tabell 19. Totalstofthalt vid pelletsbrännarförsök

Table 19. Total particle mass concentration in flue gas from pellet burner combustion

	Totalstofthalt (mg/Nm ³ vid 10% O ₂ t.g.)
Bark	170
10 % rapsmjöl, 90 % bark	210
30 % rapsmjöl, 70 % bark	250
80 % rapsmjöl, 20 % kutterspån	330

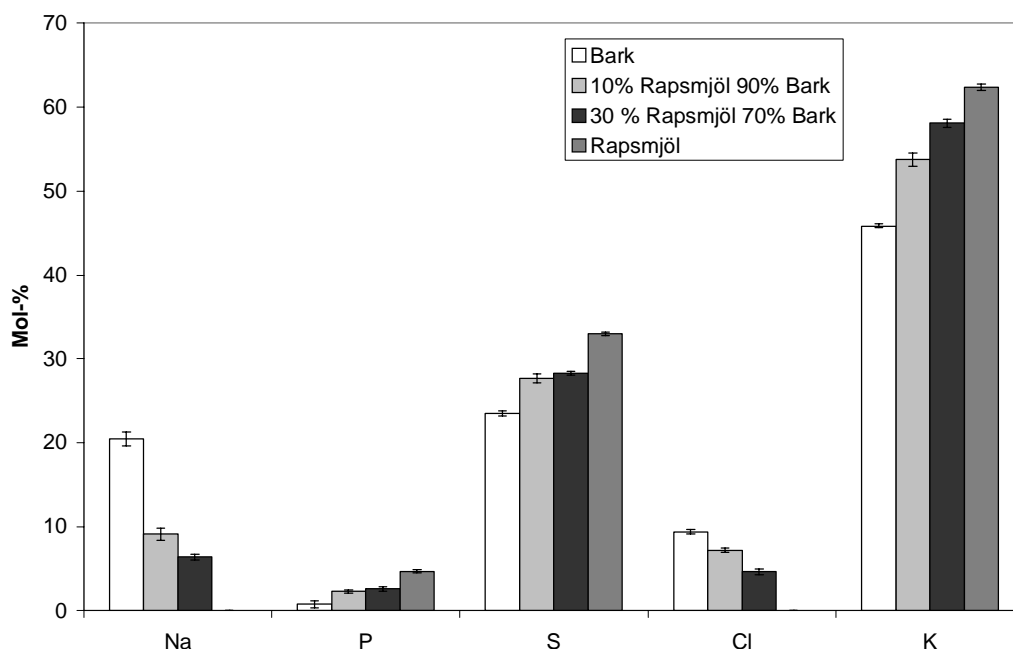
Resultaten från försöken i pelletsbrännaren visade på en tydlig monomodal (mass)storleksfördelning med endast en mod av fina (<1 µm) partiklar (se figur 27). Resultaten visar även att mängden fina partiklar i stort sett fördubblas vid förbränning av rapsmjöl (med 20 % kutterspån), jämfört med barkpellets. Skillnader i kaliumhalten mellan bark- och det eldade rapsmjölsbränslet är dock ca 5 gånger.



Figur 27. Partikel (mass)storleksfördelningar i rökgaserna från försöken med förbränning av 1) barkpellets; 2) pellets med 10 % rapsmjöl 90 % bark; 3) pellets med 30 % rapsmjöl 70 % bark och 4) pellets med 80 % rapsmjöl, 20 % kutterspån i en pelletsbrännare (roster).

Figure 27. Particle mass size distributions in the flue gases during combustion of bark, 10% Rape seed meal 90% Bark, 30% Rape seed meal 70% Bark and Rape seed meal in a pellets burner (grate).

Förutom kol och syre innehåller de fina partiklarna ($< 1 \mu\text{m}$) från förbränning av bark framförallt kalium, svavel, natrium och klor (se figur 28). Vid förbränning av rapsmjöl i bark såväl som för rapsmjöl (med 20 % kutterspån) reduceras klorinnehållet i de fina partiklarna kraftigt och partiklarna innehåller framförallt kalium och svavel (se figur 28). Av tabell 20 framgår också att de bildade partiklarna består av bl a kaliumsulfat och -klorid.



Figur 28. Elementarsammansättning på Al-, C- och O-fri bas (mol-%) för fina partiklar (impaktorsteg nr 4, GMD 0.19 μm , eller nr 5, GMD 0.32 μm) vid förbränning av 1) barkpellets; 2) pellets med 10 % rapsmjöl 90 % bark; 3) pellets med 30 % rapsmjöl 70 % bark och 4) pellets med 80 % rapsmjöl, 20 % kutterspån i en pelletsbrännare (roster).

Figure 28. Elemental distribution on Al-, C- och O free basis (mole-%) of the fine mode particles (e.g. impactor stage 4, GMD 0.19 μm , or stage 5, GMD 0.32 μm) sampled during combustion of bark, 10 % Rape seed meal 90% Bark, 30 % Rape seed meal 70 % Bark and Rape seed meal in a pellets burner (grate).

Tabell 20. Faser identifierade med XRD i impaktorsteg nr 4, GMD 0,19 μm , eller nr 5, 0,32 μm , vid förbränning av 1) bark, 2) 10 % rapsmjöl 90 % bark, 3) 30 % rapsmjöl 70 % bark och 4) 80 % rapsmjöl, 20 % kutterspån i en BFB (pilotreaktor) .

Table 20. Phases identified with XRD in of the fine mode particles (e.g. impactor stage nr 4, GMD 0.19 μm , or nr 5, GMD 0.32 μm) during combustion of 1) bark 2) 10 % rape seed meal 90 % bark 3) 30 % rape seed meal 70 % bark and 4) 80 % rape seed meal 20 % cutter shavings in a pilot BFB reactor

Prov	Bark	10% Rapsmjöl 90% Bark	30 % Rapsmjöl 70% Bark	Rapsmjöl
Identifierade faser	K ₂ SO ₄ (Arcanite) KCl (sylvite)	K ₂ SO ₄ (Arcanite) KCl (sylvite)	K ₂ SO ₄ (Arcanite) KCl (sylvite)	K ₂ SO ₄ (Arcanite) KCl (sylvite)

3.5 Pulvereldningsförsök

3.5.1 Gasemissioner

Utgående NO-emissioner (medelvärde över försöksperioden) vid förbränning av de olika bränsle/bränslekombinationerna framgår av tabell 21. En nära 300%-ig ökning av NO-halten erhöles vid förbränning av rapsmjöl i jämförelse med traditionellt träpulver.

Tabell 21. NO-emissioner från pulverbrännarförsök.

Table 21. NO_x emissions from combustion in powder burner

Försök	NO (mg/Nm ³ vid 10 % O ₂ t.g.)
Träpulver	60
Rapsmjöl	220

Utgående SO₂- och HCl- emissioner (medelvärde över försöksperioden) för de olika studerade bränslena framgår av tabell 22. Låga HCl-halter erhöles för samtliga bränslen. Höga SO₂-emissioner erhöles vid förbränning av rapsmjöl då ca 70 % av det svavel som fanns i bränslet bildade SO₂ (g).

Tabell 22. SO₂- och HCl-koncentrationer i rökgaserna vid pulverbrännarförsök

Table 22. SO₂ and HCl concentrations in flue gas from powder burner combustion

Försök	HCl (mg/Nm ³ vid 10% O ₂ t.g.)	SO ₂ (mg/Nm ³ vid 10% O ₂ t.g.)
Träpulver	<1	<2
Rapsmjöl	<1	1290

3.5.2 Partikelemissioner

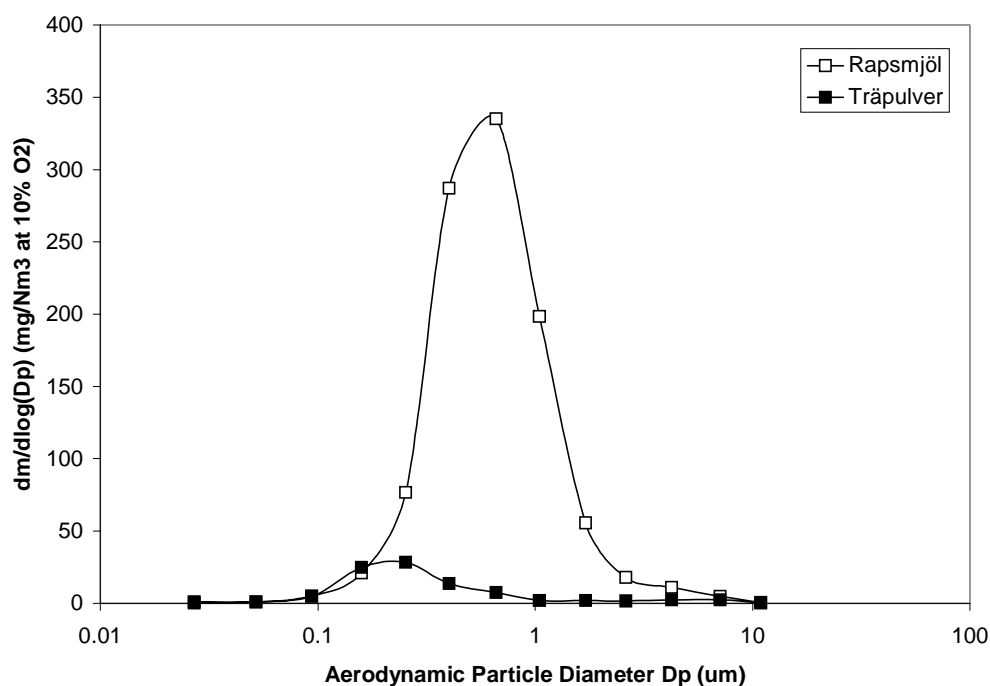
Resultaten från pulverbrännarförsöken visar på relativt höga utgående totalstoffhalter vid förbränning av rapsmjölet (se tabell 23).

Tabell 23. Totalstofthalt vid pulverbrännarförsök

Table 23. Total particle mass concentration in flue gas from powder burner combustion

	Totalstofthalt (mg/Nm ³ vid 10% O ₂ t.g.)
Träpulver	20
Rapsmjöl	350

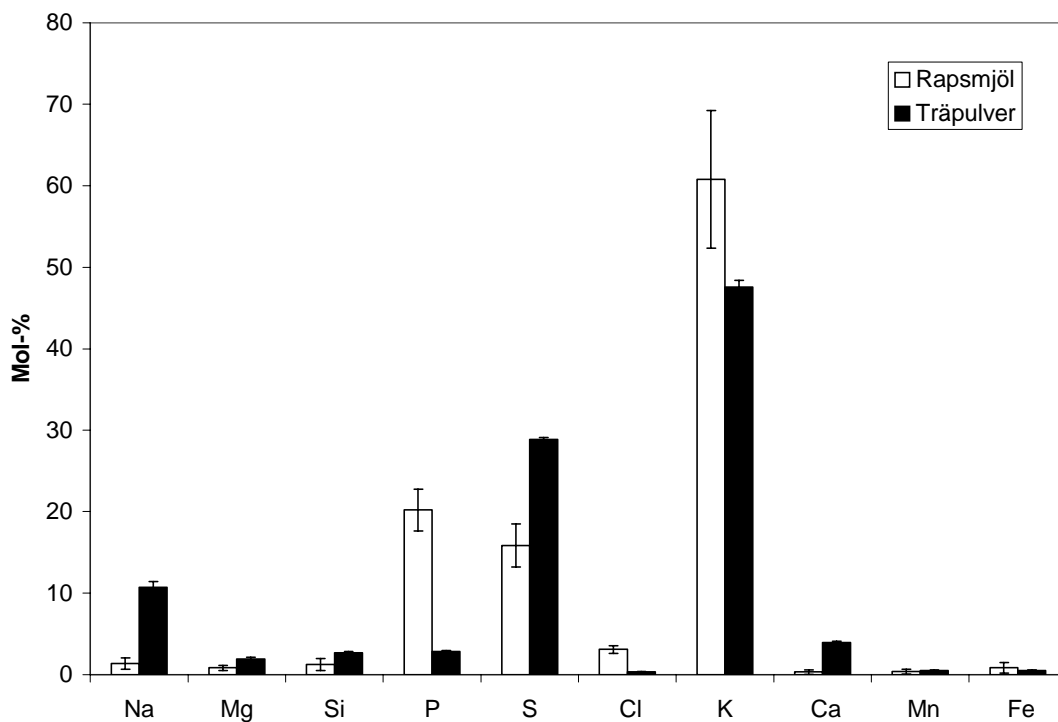
Resultaten från försöken i pulverbrännaren visade på en tydlig monomodal (mass)storleksfördelning med endast en mod av fina (<1 µm) partiklar (se figur 29). Peaken på finmoden är kraftigt förskjutet mot större partikelstorlekar (GMD 0.83 µm) vid förbränning av rapsmjöl.



Figur 29. Partikel (mass)storleksfördelningar i rökgaserna från försöken med förbränning av rapsmjöl och träpulver i en pulverbrännare.

Figure 29. Particle mass size distributions in the flue gases during combustion of rapeseed meal and sawdust in a powder burner.

De fina partiklarna (< 1 µm) innehåller framförallt kalium, svavel, natrium och syre vid förbränning av träpulver (se figur 30). Vid förbränning av rapsmjöl innehåller partiklarna främst kalium, fosfor och svavel. Identifierade faser vid rapsmjölseldningen (tabell 24) är dock bara K₂SO₄ vilket indikerar att fosfor föreligger i amorf form (förmodligen smält). Identifierad fas vid träpulvereldning är K₃Na(SO₄)₂ (Apthitalite).



Figur 30. Elementarsammansättning på Al-, C- och O -fri bas (mol-%) för fina partiklar (impaktorsteg nr 4, GMD $0.19 \mu\text{m}$, eller nr 6, GMD $0.52 \mu\text{m}$) vid förbränning av rapsmjöl och träpulver i en pulverbrännare.

Figure 30. Elemental distribution on Al-, C- och O -free bas (mole-%) of the fine mode particles (e.g. impactor stage 4, GMD $0.19 \mu\text{m}$, or stage 6, GMD $0.52 \mu\text{m}$) sampled during combustion of Rape seed meal and wood powder in a powder burner).

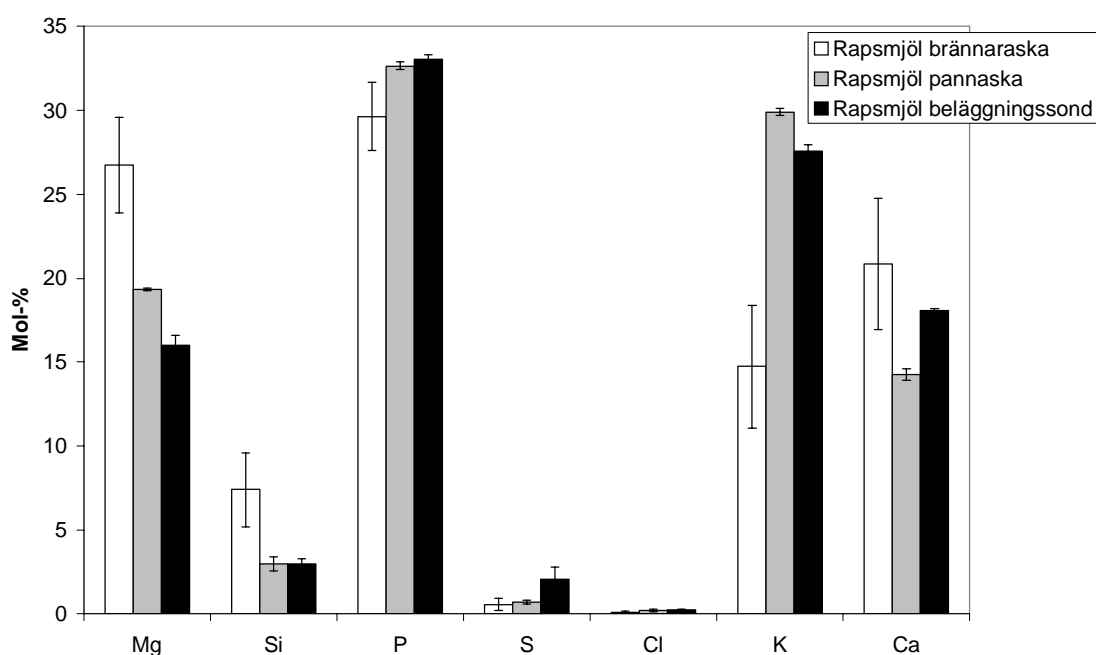
Tabell 24. Faser identifierade med XRD hos fina partiklar (impaktorsteg nr 4, GMD 0,19 μm , eller nr 6, 0,52 μm), vid förbränning av 1) bark, 2) 10 % rapsmjöl 90 % bark, 3) 30 % rapsmjöl 70 % bark och 4) 80 % rapsmjöl, 20 % kutterspån i en pulverbrännare.

Table 24. Phases identified with XRD in of the fine mode particles (e.g. impactor stage nr 4, GMD 0.19 μm , or nr 6, GMD 0.52 μm) during combustion of 1) bark 2) 10 % rape seed meal 90 % bark 3) 30 % rape seed meal 70 % bark and 4) 80 % rape seed meal 20 % cutter shavings in a powder burner

Prov	Träpulver	Rapsmjöl
Identifierade faser	K ₃ Na(SO ₄) ₂ (Aphtitalite)	K ₂ SO ₄ (Arcanite)

3.5.3 Beläggings-/askbildning

Elementarsammansättningen på de bildade beläggningarna på den kylda sondens läsida utgjordes vid rapsmjölseldning av framförallt fosfor, kalium, kalcium och magnesium (se figur 31). Avsatt relativt porös pann- och brännaraska innehöll även dessa framförallt fosfor, kalium, kalcium och magnesium.



Figur 31. Elementarsammansättning på O- och C-fri hos avsatt/bildad brännaraska, pannaska och beläggningar på sondens läsida vid förbränning av rapsmjöl och träpulver vid förbränning i en pulverbrännare.

Figure 31. Elemental composition of deposited/formed burner ash, boiler ash and lee-side deposits on O- and C-free basis at combustion of Rape seed meal and Wood powder in a powder burner.

4 Diskussion

4.1 Bränslekaraktäristik

Rapsmjöl har en låg fukthalt (9-11 viktsprocent) och uppvisar goda pelleteringsegenskaper. Det krävs ingen förbehandling t ex i form av malning eller torkning. Ungefär 80 vikt-% av materialet har en partikelstorlek mindre än 1 mm. Storleksfördelningen under 1 mm är relativt jämt fördelad mellan 0.075 och 1 mm. Bulkdensiteten är hög jämfört med traditionella skogs- och åkerbränslen (se tabell 25) och är nästan i paritet med träpellets.

Rapsmjölet uppvisar goda flytegenskaper och låga tendenser för valvbildning. Eftersom rapsmjöl innehåller en stor mängd fint material riskerar man att detta material rycks med och brinner högt upp i roster- och fluidbäddspannor.

Flykthalten hos rapsmjöl är 74 % av TS eller 82 % räknat på torrt och askfritt prov. Flykthalten är därmed väldigt lik traditionell stamflis/-pellets 83 vikts % av TS.²¹ Då 20 viktsprocent av rapsmjölet innehåller partiklar över 1 mm kan eventuellt materialet behöva malas/sällas vid nyttjande i pulvereldningsapplikationer. Resultaten från TGA-analyserna tyder inte på att det skulle vara några problem att antända rapsresten.

Askhalten hos rapsmjöl (7-8 viktsprocent) är betydligt högre än träbränslen och högre än för de flesta åkerbränslena (se tabell 25). Klorhalten är låg och jämförbar med flesta träbränslen och betydligt lägre än för de flesta åkerbränslena. Svavelhalten är mycket hög i jämförelse med flesta andra biobränslen. Detta är i sig inte konstigt då materialet till största delen består av protein. Protein innehåller dessutom relativt höga halter kväve och materialets kvävehalter om ca 6 viktsprocent av TS är ca 10-20 gånger högre än skogsbränslen, ca 60 ggr högre än träflis och ca 5-10 gånger högre än många åkerbränslen (gräs). Endast vissa slam (tex kommunalt avfallsslam) och kött- och benmjöl och har liknande kvävehalter.

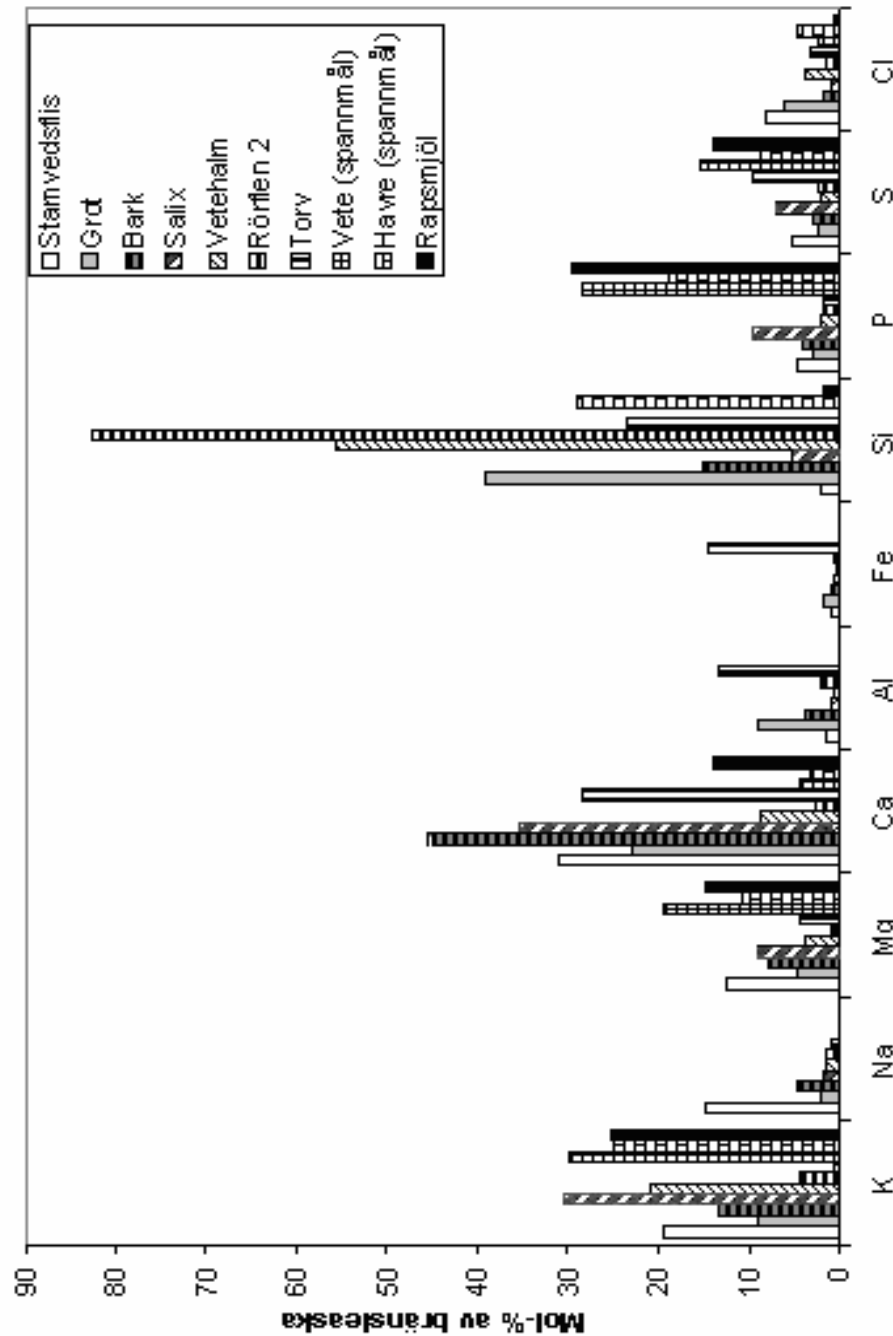
Till skillnad mot flesta andra bränslen förutom vissa spannmål och kött- och benmjöl är den dominerande anjonbildande elementet i bränsleaskan hos rapsmjöl fosfor i jämförelse med de flesta andra fall för biobränslen där kisel förekommer i rikliga mängder (se figur 32). Som tidigare också nämnts är rapsmjöl även rikt på svavel. Man kan därför förutsätta helt andra askkemiska processer vid förbränning av rapsmjöl i jämförelse med andra biobränslen. De dominerande baskatjonbildande elementen hos rapsmjöl är kalium, magnesium och kalcium. Kaliumhalten om 1.4 % av TS är t o m högre än den normala hos vetehalm (ca 1 % av TS).

Tabell 25. Jämförelse mellan bränslen som ingår i Bränslehandboken²² och rapsmjöl för några viktiga bränsleparametrar och -egenskaper (tabellen är ett faxsimilutdrag ur Bränslehandboken, uppmätta parametrar för rapsmjöl har lagts till)

Table 25. Comparison between fuels included in the fuel handbook²² and rape seed meal regarding some important fuel parameters and properties.

Kapitel	Bränsle	Fukt vikt-%	Aska vikt-% TS	Svavel vikt-% TS	Klor vikt-% TS	Heat MJ/kg (torrt, askfritt)	Bulkdensitet Kg ts/m ³
Trädbränslen							
3.1	Trä (spån, flis, pulver)	8-60	0,4-0,6	0-0,3	0-0,05	16-18	200-350
3.1	Trä (pellets, briketter)	9-10	0,4-0,8	0-0,3	0-0,05	19-21	550-700
3.2	GROT	35-55	1-5	0,02-0,05	0,02-0,05	19-21	200-350
3.3	Returträ	3-50	3-16	0,04-0,3	0,04-0,2	20-24	200-350
3.4	Salix	25-50	1-5	0,005-0,03	0,01-0,1	18-20	200-350
3.5	Bark	21-65	2-6	0-0,1	0-0,02	20-25	300-550
3.6	Lövträd	20-40	0,3-1,7	0,01-0,04	0,005-0,06	19-21	440-580
Jordbruksbränslen							
3.7	Halm	10-20	4-10	0,05-0,2	0,05-1,5	18-20	Låg
3.8	Rörflen	10-15	3-7	0,05-0,2	0,1-0,2	17-20	200-300
3.9	Hampa	15-75	1,6-6,3	0,03-0,07	0,04-0,1	19	låg
3.10	Spannmål	14	2-4	0-0,5	0,02-2,3	17-22	250-390
3.11	Spannmålsavrens	12	10	0,2	0,2	20	Hög
3.12	Olivavfall	0-21	0,4-16	0,01-0,3	0-0,4	19-25	hög
3.13	Kakaoböner	7	5	0,3	0,02	30	495
3.14	Citrusavfall	8-10	4-7	0,2	0,02	21	600
3.15	Sheanötter	3,3-7,6	6-7	0,3	0,1	23	700
Avfallsbränslen							
3.16	Röt slam	53-77	35-50	0,2-5	0,05-1,5	15-24	låg
3.17	Skogsindustriella slam	41-84	2-60	0,1-2,4	0,01-0,3	17-23	låg
3.18	Gödsel	4-92	15-42	0,3-1,1	0,6-2,4	19-21	
3.19	PTP	10-55	5-13	0,07-0,5	0,01-1,5	18-31	låg
3.20	Gummidäck	0,6-4,3	5-26	1,3-3,3	0,06-0,9	36-43	Hög
3.21	Läderspill	54	2,5	2,6	1,2	19	
3.22	Mjölkkartongrejekt	42-64	10-27	0,03-0,2	0,07-0,6	12-20	Låg
Animaliska bränslen							
3.23	Kött-och benmjöl	7	30	0,7	0,5	23	Hög
3.24	Animaliskt fett	0,1-0,6	0,1	0,02	0	39	
Övriga bränslen							
3.24	Vegetabiliskt fett	0-1,2	0-0,1	0	0	39	
3.25	Tallbecksolja	0,1-0,3	0,2-0,4	0,2-0,3	0	40	
3.26	Torv	38-58	2-9	0,1-0,5	0-0,1	19-27	300
3.26	Torv (briketter/pellets)	10-15	2-8	0,25		20-27	
	Rapsmjöl*	9-11	7-8	0,7-0,9	0,03-0,05	21-22	530

*) Analysresultat från denna studie.



Figur 32. Bränsleaskans sammansättning hos olika biobränslen.

Figure 32. The fuel ash composition of different biomass fuels.

Spårelementhalterna är i överlag låga hos rapsmjöl. Zink- och strontiumhalterna är jämförbara med t ex bark.

4.2 Emissioner

Gasemissioner

Resultaten från de olika förbränningsförsöken visar på 2-4 ggr högre NO-emissioner vid förbränning av rapsmjöl än vid nyttjande av typiska träbränslen. SO₂-halterna från ren rapsmjölseldning var mycket höga, 300-1300 mg/Nm³ vid 10 % O₂. I och med de höga NO_x- och SO_x halterna bör rapsmjöl i första hand nyttjas i storskaliga anläggningar med extern svavel- eller NO-rening alternativt i relativt låga inblandningsgrader i andra bränslen. HCl-halterna är däremot väldigt låga. Även om molförhållandet (2K+Ca)/S var ca ett i rapsmjölsbränslet erhöles höga utgående SO₂-halter i samtliga förbränningstekniker. Detta beror på bränslets höga halter av fosfor som visade sig ha hög affinitet till både kalium och kalcium, se vidare diskussioner under kap 4.3.

Partikelemissioner

Utgående totalstofthalter var också relativt höga, 2-3 ggr högre än vid barkeldning i fluid- och rosterförbränning samt mer än 10 ggr högre än ren träpulvereldning. Då skillnaderna i emissionerna av fina partiklar mellan rapsmjöl och träbränslena var i samma storleksordning som ovan innebär detta att en inblandning av rapsmjöl till typiska träbränslen kommer att öka belastningen på anläggningarnas stofffilter. Idag är utsläppskraven av partiklar (stof) för anläggningar mellan 0.5-3 MW inom tätort i Sverige normalt sett 100-150 mg/Nm³ (vid 13 % CO₂), men kommer sannolikt att skärpas och harmoniseras inom EU. Därmed krävs extern rening av fina partiklar redan vid låga inblandningsgrader av rapsmjöl. Detta medför att mindre anläggningar som endast har cyklonrening ej är aktuella för detta bränsle.

Partikelbildning

Till skillnad mot försöken i fluidbädden bildades ej några grövre partiklar (>1 µm) i någon större utsträckning vid förbränningsförsöken i pelletsbrännaren. Detta kan bero på att temperaturen i brännaren är ca 300 °C varmare än i fluidbädden och såväl strömnings- som ”char”fragmenteringsförhållanden sannolikt skiljer sig mellan de olika anläggningarna. Vid utförbränningen av de enskilda rapsmjölspelletsarna i fluidbädden bildas förmodligen fragment av restaska rik på kalium, fosfor, kalcium och magnesium i form av sfäriska sintrade partiklar som följer med gasströmmen ut från eldstaden. Vid förbränning i brännaren däremot stannar förmodligen dessa askpartiklar kvar i brännaren under bildandet av större (aggregat) slaggpartiklar (se vidare kap 4.3) som antingen deponeras på brännarrostret eller matas ut som bottenaska.

En intressant skillnad i såväl sammansättningen som storleksfördelning föreligger mellan de fina partiklar som bildats vid rapsmjölsförbränning i pulverbrännare och fluidbädd gentemot de som bildats i rosteranläggningen. I pulveranläggningen ingår även fosfor i den bildade finpartikulära moden. Dessutom är de fina partiklarna något grövre ifrån pulveranläggningen. En förklaring till skillnaderna kan vara att fosfor och kalium ”ryker av” från de smälta droppar av kaliumfosfat som bildats vid utbränningen av bränslepartikeln. Kaliumfosfat har en låg smälttemperatur (ca 700 °C) och partikeltemperaturen för den brinnande bränslepartikeln är förmodligen klart högre än

de 1250 °C som uppmäts i pulverflamman varvid ångtrycket över smältan förmodligen kan vara ganska hög.

4.3 Askrelaterade driftsproblem

Bäddagglomereringstendenser/bäddmaterialdeponering

Bäddagglomereringstendensen hos rapsmjöl är lägre än för de flesta andra biobränslen som studerats med samma metodik (se tabell 26). Vid inblandning i bark uppvisas en agglomereringstendens liknande den hos grotbränslen.

Tabell 26. Erhållna initiala defluidiseringstemperatur för olika studerade bränslen vid förbränning i kvartsbädd under liknande förhållanden/metodik

Table 26. Resulting initial de-fluidization temperatures for different fuels in quartz bed combustion at similar conditions

Typ av bränsle	Initial defluidiseringstemperatur (°C)
Bark	> 1015 ¹
Rapsmjöl, 10 %, bark 90 %	965 ¹
Rapsmjöl, 30 %, bark 70 %	930 ¹
Rapsmjöl 80%, kutterspån 20%	1020 ¹
Vetehalm	750 ²
Salix	900 ²
Grot	960 ²
Rörflen	920-970 ³
Olivkross	930 ³
Torv	>1020 ³
RDF	990 ³
Sockerrörsavfall	995 ³
Lucerne	670 ³

¹)Denna studie

²)Öhman et al 2006¹⁶

³)Skrifvars BJ et al 1999²³

Beläggningens bildningen på bäddmaterialet och därmed troligen bäddagglomereringsmekanismerna vid eldning av rapsmjöl skiljer sig markant åt ifrån exempelvis situationen vid eldning av trädbränslen. I det senare fallet uppkommer undantagslöst en beläggning runt kvartskornen som initialt är K-rik, men som med tiden kommer att innehålla alltmer Ca. En tolkning av detta skeende är att K i bränslet förångas i stor utsträckning redan i bränslepartikeln och reagerar med bränsle-Si till en smälta som "kladdar" fast på bäddkornen. Dessutom "räcker" förmodligen K-ången till för att angripa bäddkornen av kvarts och även där bilda en smält beläggning. Efter hand kommer även mer refraktära oxider, främst CaO, att reagera med denna smälta och bidra till att höja smälttemperaturen.

I det aktuella fallet (rapsmjölseldning) domineras askan av fosfat till skillnad från vad som är fallet för trädbränslen där den domineras av silikat. Anmärkningsvärt är frånvaron av beläggningar på bäddkornen. Vår tolkning är att K, P och Si i rapsmjölet

(K och P finns i förhållandevis hög halt) reagerar initialt under utbränningen av den enskilda bränslepartikeln och bildar kaliumfosfatrika partiklar, troligen i smält tillstånd. Dessa reagerar sedan vidare med CaO och MgO (löses in i kaliumfosfatsmältan) under bränslepartikelns fortsatta utbränning med en höjning av smälttemperaturen som följd. Uppenbarligen är denna K-uppbinding så effektiv att det inte blir mycket K-ånga "över" som kan reagera med kvartsbäddkornen. Avgörande för detta förlopp är nog den höga affinitet för K som fosfat har. Denna beskrivning är givetvis en långt driven förenkling men återger de troliga huvudmekanismerna. De kalium-, fosfor- och delvis kalcium- och magnesiumrika enskilda partiklarna som troligtvis är partiellt smälta fastnar på bäddkornen och reagerar i jämförelse liten utsträckning, då dess smältandel är låg, med kvartspartikeln och ett icke sammanhängande beläggningsslagert runt kvartskornet bildas. I sammanhanget kan nämnas att bildningsenergin (ΔfG^0) för KPO_3 vid $1000\text{ }^\circ\text{C}$ (-1484 kJ) är avsevärt lägre än den för såväl KCl (-406 kJ), $K(SO_4)_{0.5}$ (-891 kJ) och $K(SiO_3)_{0.5}$ (-903 kJ). Detta innebär att i blandning av K, P, S och Cl, och med antagandet att kemisk jämvikt uppnås/råder, kommer fosfor att i första hand "knycka" kalium och därefter, om ett överskott av K finns, så kommer S och Si ta hand om kaliumet och därefter Cl. Föreningarna är normaliserade till att innehålla en mol K för att medge direkta jämförelser.

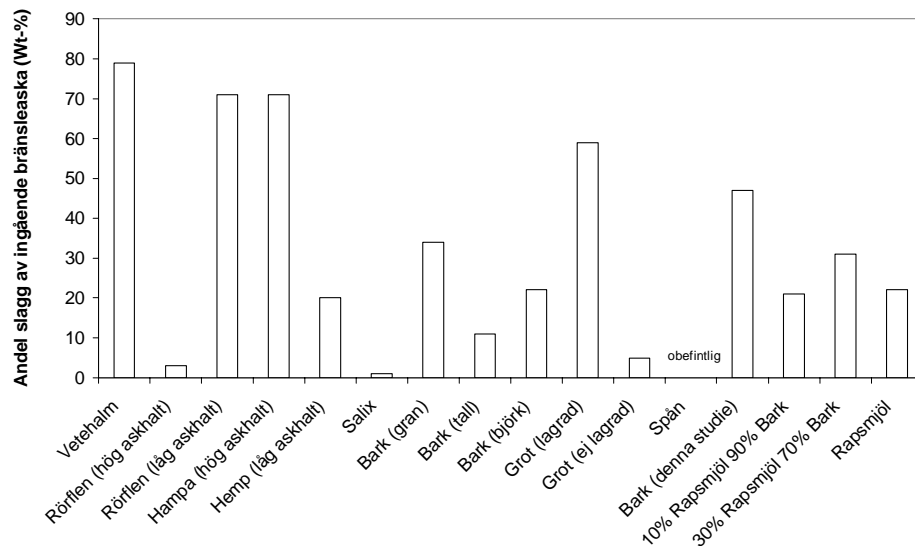
Slaggningsstendenser

Slaggningsstendensen hos den studerade rapsmjölspelletsen är relativt moderat i jämförelse med många pelleterade åkergrödor och för vissa (troligen sandkontaminerade) pelleterade skogsbränslen. De resultat som redovisas i figur 33 är producerade under liknande förhållanden (samma anläggning, bränsleeffekt, syreöverskott, temperaturer mm).²⁴ Rapsmjölsslaggens sammansättning (kalium-kalcium-magnesium-fosfat) har en initial smälttemperaturer väl över $1000\text{ }^\circ\text{C}$.¹⁰ Slaggningsproblematiken bör därför ej vara ett stort bekymmer vid nyttjande av traditionell rosterteknik. I likhet med diskussionerna gällande bäddagglomereringsmekanismerna reagerar sannolikt K i bränslet (vars halt i rapsmjöl är förhållandevis hög) initialt med P och bildare en smälta. Under bränslepartikelns koksförbränningssteg löser denna smälta sedan säkerligen in (reagerar med) CaO och MgO med en höjning av smälttemperaturen som följd d v s kalium-kalcium-magnesium fosfater med höga smälttemperaturer bildas.

Beläggningstendenser/högtemperaturkorrosion

Då de bildade fina partiklarna vid fluidbädds- och rostereldning av rapsmjöl/rapsmjölblandningarna främst innehåller kaliumsulfat torde beläggningstendenserna vid rapsmjölseldning vara relativt låga, och det samma gäller tendenserna för klorinducerad korrosion på t ex överhettare. Då den stora mängd fosfor som finns i rapsmjöl har hög affinitet till kalium bidrar detta till att en stor del av den stora svavelmängd som finns i bränslet blir tillgänglig för eventuell sulfatisering av den kaliumklorid som bildas vid förbränning av många andra biobränslen (t ex många skogs- och åkerbränslen). Detta framgår av resultaten från detta arbete då klorhalten både hos de bildade fina partiklarna och beläggningarna på den kylda sonden markant reducerats vid inblandning av rapsmjöl. Det senare har sannolikt en stor betydelse för mängden bildat smält material. Flertalet tidigare utförda arbeten har visat att beläggningstillväxten påverkas av mängden smält material som återfinns i den finpartikulära fraktionen. Om denna smälta dessutom innehåller klor har tidigare

arbeten visat/varnat för uppkomsten av klorinducerad korrosion. Tidigare arbeten har också visat att svaveladditiv till bibränslen effektivt reducerar uppkomsten av beläggningar och korrosion i pannor.²⁵ Rapsmjöl torde därför kunna vara ett alternativ till andra svaveladditiv och kan därför vara ett intressant sameldningsbränsle vid roster och fluidbäddeldning då även slaggnings- respektive bäddagglomereringstendensen torde minska vid inblandning av rapsmjöl i dessa bränslen.



Figur 33. Slaggnings-tendens hos tidigare,²⁴ och i detta arbete, studerade pelletsvalitörer

Figure 33. Slagging tendencies for earlier²⁴, and in this project, studied pellet assortments.

En stor del av de fina partiklar som bildas vid pulvereldning av rapsmjöl innehåller troligen lågsmältande kaliumfosfat varvid beläggningstendenserna kan vara relativt höga i denna eldningsteknik. Av denna anledning bör man vara försiktig vid introduktion av rapsmjöl i denna eldningsteknik.

4.4 Rekommendationer för kommande fullskaleförsök

I och med de höga NO- och SO₂-emissionerna vid förbränning av rapsmjöl bör materialet i första hand nyttjas i storskaliga anläggningar med extern svavel- eller NO-rening alternativt i relativt låga inblandningsgrader i andra bränslen. Redan vid låga inblandningsgrader, kräver rapsmjölseldning extern rening av fina partiklar varvid mindre anläggningar med endast cyklonrening ej är aktuella för detta bränsle. En stor del av de fina partiklar som bildas vid pulvereldning av rapsmjöl innehåller troligen lågsmältande kaliumfosfat varvid beläggningstendenserna kan vara relativt höga i denna eldningsteknik. Av denna anledning bör man vara försiktig vid introduktion av rapsmjöl i pulvereldning. Redan låga inblandningsgrader (10%) av rapsmjöl i typiskt träbränsle (bark) visade sig markant reducera klorhalten i såväl de bildade fina partiklarna vid fluidbädds- och rostereldning som hos bildade beläggningar på kyld provsond (fluidbäddseldning). Då låginblandningen inte visade sig medföra kraftigt ökande NO-, SO₂-emissioner, slaggnings- eller agglomereringstendenser torde en rekommendation till intressant fullskaleförsök vara att utföra försök i skogsbränsleeldat kraftvärmeverk av fluidbädd- eller rostertyp med 10-20%-ig inblandning av rapsmjöl.

5 Slutsatser

Rapsmjöl har en låg fukthalt (9-11 viktsprocent) och uppvisar goda pelleteringsegenskaper. Partiklar mindre än 1 mm utgör ungefär 80 viktsprocent av materialet. Storleksfördelningen under 1 mm är relativt jämt fördelad mellan 0,075 och 1 mm. Bulkdensiteten är hög jämfört med traditionella skogs- och åkerbränslen, nästan lika hög som träpellets. Rapsmjölet uppvisar goda flytegenskaper och låga tendenser för valvbildning.

Flykthalten hos rapsmjöl, räknat på torrt och askfritt prov, är jämförbar med traditionell stamflis. Resultaten från TGA-analyserna tyder inte på några svårigheter att antända rapsmjöl då det uppvisar lägre avgasningstemperatur i ren N₂ än träpulver. Den högre askhalten måste dock beaktas i en totalbedömning av materialets utbränningshastighet.

Askhalten hos rapsmjöl (7-8 viktsprocent) är betydligt högre än träbränslen och högre än för de flesta åkerbränslena. Klorhalten ($0,04 \pm 0,1$ % av TS) är låg och jämförbar med flesta träbränslen men betydligt lägre än de flesta åkerbränslena. Svavelhalten ($0,7 \pm 0,1$ % av TS) är mycket hög i jämförelse med flesta andra biobränslen. Kvävehalten ($5,8 \pm 0,4$ % av TS) är även den mycket hög och endast vissa slam (t ex kommunalt avfallsslam) och kött- och benmjöl och har liknande kvävehalter.

Till skillnad mot flesta andra biobränslen, förutom vissa spannmål och kött- och benmjöl, är den dominerande anjonbildande elementet i bränsleaskan i rapsmjöl fosfor ($1,2 \pm 0,1$ % av TS) till skillnad från de flesta andra biobränslen där ofta kisel förekommer i rikliga mängder. Rapsmjöl är också rik på kalium ($1,4 \pm 0,1$ % av TS), kalcium ($0,8 \pm 0,04$ % av TS) och magnesium ($0,5 \pm 0,03$ % av TS).

Resultaten från de olika förbränningsförsöken visar på 2-4 ggr högre NO-emissioner vid förbränning av rapsmjöl än vid nyttjande av typiska träbränslen. Andelen bildat NO kan dock variera mycket beroende på vilken anläggning som används. SO₂-halterna från ren rapsmjölseldning var mycket höga 300-1300 mg/Nm³ vid 10% O₂. Utgående totalstofthalter var också relativt höga, 2-3 ggr högre än vid barkeldning i fluid- och rosterförbränning samt mer än 10 ggr högre än vid ren träpulvereldning.

Bäddagglomereringstendensen hos rapsmjöl är lägre än för många andra studerade biobränslen. Vid inblandning i bark uppvisas en något högre agglomereringstendens än för typiska träbränslen. Bäddagglomereringsmekanismerna skiljer sig även mot tidigare studerade biobränslen. Slaggningsstendensen hos rapsmjöl är relativt moderat i jämförelse med många åkergrödor och vissa (troligen sandkontaminerade) skogsbränslen.

Då de bildade fina partiklarna vid fluidbädds- och rostereldning innehåller kaliumsulfat torde beläggningstendenserna vid rapsmjölseldning vara relativt låga, det samma gäller tendenserna för klorinducerad korrosion på t ex överhettare. Då den stora mängd fosfor som finns i rapsmjöl har hög affinitet till kalium bidrar detta till att en stor del av den stora svavelmängd som finns i bränslet blir tillgänglig för eventuell sulfatisering av den kaliumklorid som bildas vid förbränning av många andra biobränslen (t ex många

skogs- och åkerbränslen). Rapsmjöl torde därför kunna vara ett alternativt svaveladditiv och kan därför vara ett intressant sameldningsbränsle vid roster- och fluidbäddeldning då även slaggnings- respektive bäddagglomereringstendensen torde minska vid inblandning av rapsmjöl i många bränslen, framförallt åkerbränslen.

En stor del av de fina partiklar som bildas vid pulvereldning av rapsmjöl innehåller troligen lågsmältande kaliumfosfat varvid beläggningstendenserna kan vara relativt höga i denna eldningsteknik. Av denna anledning bör man vara försiktig vid introduktion av rapsmjöl i pulvereldning.

6 Rekommendationer och användning

I och med de höga NO- och SO₂-emissionerna vid förbränning av rapsmjöl bör materialet i första hand nyttjas i storskaliga anläggningar med extern svavel- eller NO-rening alternativt i relativt låga inblandningsgrader i andra bränslen. Redan vid låga inblandningsgrader, kräver rapsmjölseldning extern rening av fina partiklar varvid mindre anläggningar med endast cyklonrening ej är aktuella för detta bränsle. Rapsmjöl torde därför kunna vara ett intressant sameldningsbränsle vid roster- och fluidbäddeldning med klor- och kaliumrika skogs- och åkerbränslen då rapsmjöl eventuellt skulle kunna användas som alternativt svaveladditiv för reduktion av klorinducerad korrosion på t ex överhettare. Även slaggningstendensen torde minska vid inblandning av rapsmjöl i båda dessa bränslekategorier och bäddagglomereringstendensen torde minska vid inblandning av rapsmjöl i åkerbränslen.

En stor del av de fina partiklar som bildas vid pulvereldning av rapsmjöl innehåller troligen lågsmältande kaliumfosfat varvid beläggningstendenserna kan vara relativt höga i denna eldningsteknik. Av denna anledning bör man vara försiktig vid introduktion av rapsmjöl i pulvereldning.

7 Förslag till fortsatt forskningsarbete

Fullskaleförsök i fluidbädds- eller rosterpannor med bränsleblandningar av rapsmjöl och problematiska bibränslen (klor och kaliuminnehållande bränslen) föreslås för demonstration av bl a möjligheter till reducering av uppkomsten av askrelaterade driftsproblem.

8 Referenser

- 1) Culcuoglu, E et al. Rapeseed Cake as a Biomass Source, *Energy Sources*, 24, 329-336, 2002
- 2) Mikael Jeppsson, Lantmännen, pers. komm.
- 3) Sensoz, S. et al., Fixed bed pyrolysis of the rapeseed cake, *Energy Sources*, 23, 873-876, 2001
- 4) Özcimen, D., Production and characterization of bio-oil and biochar from rapeseed cake, *Renewable energy*, 29, 779-787, 2004
- 5) Sensoz, D et al Influence of particle size on the pyrolysis of rapeseed: fuel properties of bio-oil, *Biomass Bioenergy*, 19, 271-279, 2000
- 6) Katz, R.J. University of Idaho, Moskva
- 7) Peterson, C.L., Thompson, J., Feldman, M.E., Vander Griend L. Combustion of winter rape products in a residential stove, *Applied Engineering in Agriculture*, 6 (4) 1990
- 8) Olev Praks, Eldningsförsök med rapsexpeller, 1993, Lund, Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för lantbrukets byggnadsteknik, ISSN 1101-5845
- 9) Sousulski, F.W., Bakal, A. Isolated proteins from rapeseed flax and sunflower meals. *Can Inst Food Technology Journal* 2(1): 28-32.
- 10) Phyllis, Bränsledatabas, ECN, Holland, www.ecn.nl/phyllis
- 11) Sandström M., Structural and solid state EMF studies of phases in the CaO-K₂O-P₂O₅ system with relevance for biomass combustion, *Doktorsavhandling, Energiteknik och Termisk Processkemi Umeå Universitet*, 2007
- 12) Lindström, E., Sandström, M., Boström, D., Öhman, M., Slagging characteristics during combustion of cereal grains rich in phosphorous. *Energy & Fuels* 21,710-717, 2007
- 13) Karaosmanoglu, F. Biobriquetting of rapeseed cake, *Energy Sources*, 22, 257-267, 2000
- 14) Nordin, A., *Biomass&Bioenergy*, 6 (5), 339-347, 1994
- 15) Paulrud, Susanne et al: Particle and handling characteristics of wood fuel powder: effects of different mills, *Fuel Processing Technology*, 76, 23-39, 2002

- 16) Öhman, M., Boman, C., Erhardsson, T., Gilbe, C., Pommer, L., Boström, D., Nordin, A., Samuelsson, R., Burvall, J. Minskade askrelaterade driftsproblem (beläggning, slagging, högtemperatur-korrosion, bäddagglomerering) genom inblandning av torv i biobränslen. (2006), Slutrapport till Värmeforskningsprojektet A5-514
- 17) Poijes S. Muntlig kommunikation 2007.
- 18) Boman, C., Öhman, M., Nordin, A. Trace element enrichment and behaviour in wood pellet production and combustion processes. *Energy&Fuels* , 20, 993-1000, 2006
- 19) Öhman, M. and Nordin, A.
A new method for quantification of agglomeration tendencies - a sensitivity study. *Energy & Fuels*, 12, 90-94, 1998.
- 20) De Geyter, S., Eriksson, M., Öhman, M., Nordin, A., Boström, D., Berg, M. Skillnader i bädd-agglomereringstendens mellan alternativa bäddmaterial och olika mineraler i natursand. (2005), SVF-920
- 21) Öhman, M., Boman, C., Hedman, H., Eklund, R.
Residential combustion performance of pelletized hydrolysis residue from lignocellulosic ethanol production. *Energy&Fuels*, 20, 1298-1304, 2006
- 22) Strömberg, B., Bränslehandboken, SVF 911, 2005
- 23) Skrifvars, B-J., Öhman, M., Nordin, A., Hupa, M.
Predicting bed agglomeration tendencies for biomass fuels fired in FBC boilers a comparison of three different methods. *Energy & Fuels*, 13, 2, 359-363, 1999.
- 24) Öhman, M., Gilbe, R., Lindström, E., Boström, D., Samuelsson, R., Burvall, J. Slagging characteristics during residential combustion of biomass pellets. Conference paper selected for publication in *Biomass&Bioenergy*, special conference issue, following Pellets 2006-2nd World Conference on Pellets, 1-2 June Jönköping, Sweden
- 25) Henderson, P., Andersson, C., Kassman, H., The use of fuel additives in wood and waste wood-fired boilers to reduce corrosion and fouling problems, *VGB PowerTech*, 2004, 6, 58-62.

Bilagor

Bränslekaraktäristik-Rådata

A.1 Rapskaka

Provdatum		051201	051202-08:00	051202-12:15	051215	051216
Process		Kallpress	Kallpress	Kallpress	Kallpress	Kallpress
Analysdatum		060124	060124	060124	060124	060124
Ursprung		SLU/TPS	SLU/TPS	SLU/TPS	SLU/TPS	SLU/TPS
Provbeteckning		SLU/TPS 1	SLU/TPS 2	SLU/TPS 3	SLU/TPS 4	SLU/TPS 5
Antal prov/analyser		1	1	1	1	1
Överslagsanalys						
Fukthalt	vikts-% av TS	7,7	7,9	9,2	7,2	6,8
Flykthalt	vikts-% av TS	83,0	82,7	82,9	82,4	82,0
Askhalt	vikts-% av TS	5,0	4,3	5,0	5,8	6,2
HHV	MJ/kg d.b.	26,3	26,3	26,4	25,7	25,3
LHV	MJ/kg d.b.	24,6	24,6	24,7	24,0	23,7
LHV	MJ/kg tot	22,5	22,5	22,2	22,1	21,9
Elementanalys						
C	vikts-% av TS	57,2	57,2	57,4	55,8	55,1
H	vikts-% av TS	7,7	7,7	7,8	7,6	7,5
N	vikts-% av TS	3,83	3,97	3,86	4,69	5,06
O	vikts-% av TS	26,3	26,8	25,9	26,1	26,1
Cl	vikts-% av TS	0,006	0,008	0,008	0,014	0,016
S	vikts-% av TS	0,33	0,38	0,41	0,45	0,45
Askbildande huvudelement						
Si	vikts-% av TS		0,001	0,001	0,001	
Al	vikts-% av TS		0,039	0,040	0,053	
Ca	vikts-% av TS		0,477	0,562	0,626	
Fe	vikts-% av TS		0,013	0,012	0,012	
K	vikts-% av TS		0,920	1,078	1,206	
Mg	vikts-% av TS		0,370	0,440	0,528	
Na	vikts-% av TS		0,062	0,023	0,077	
P	vikts-% av TS		0,822	0,981	1,341	
Spårelement						
As	ppm wt.		<0,03	<0,035	<0,058	
Ba	ppm wt.		3,0	3,5	3,5	
Cd	ppm wt.		0,1	0,2	0,1	
Co	ppm wt.		<0,25	<0,27	<0,174	
Cr	ppm wt.		0,6	0,7	0,9	
Cu	ppm wt.		3,8	4,4	5,7	
Hg	ppm wt.		<0,052	<0,06	<0,12	
Mo	ppm wt.		0,7	0,8	1,3	
Ni	ppm wt.		0,3	0,4	0,5	
Pb	ppm wt.		0,4	0,6	0,3	
Se	ppm wt.		0,0	0,0	<0,06	
Sn	ppm wt.		0,04	0,05	0,2	
Sr	ppm wt.		2,5	2,9	2,7	
V	ppm wt.		<0,52	<0,6	<0,87	
Zn	ppm wt.		42,6	49,9	56,0	

A.2 Rapsmjöl

Provdatum		Rapsmjöl	Rapsmjöl	Rapsmjöl	Rapsmjöl 2004/2005	
Process: Press+extrakt. (hexan)						
Analysdatum		060323	060704	060614	2004-2005	
Ursprung		Shanny Scanoil	Säffle Scanoil	Reci Miljö	Foderanalyser/Karlsh.	
Provbeteckning		Scanoil	Säffle	Reci Miljö	Foderanalys/Karlsh. 1	
Antal prov/analyser		1	1	1	6 st månadsprov	
Foderanalyser					medel	stdev
Råprotein	vikts-% TS				39,28	0,82
Approx N-halt (Rå Prot./6.25)	vikts-% TS				6,28	
Råfett	vikts-% TS, EG-metod				4,77	0,47
Aska, saltsyraolöslig	(%)				0,21	0,04
Överslagsanalys						
Fukthalt	vikts-% TS	2,7	11,8	9,4	11,16	0,30
Flykthalt	vikts-% TS		74,0	74,0		
Askhalt	vikts-% TS	7,2	7,6	6,7	7,34	0,12
HHV	MJ/kg d.b.					
LHV	MJ/kg d.b.					
LHV	MJ/kg tot	19,2	18,8	18,9		
Asksmåltförlopp (DT alt IT Temp)	° C	1110,0	1190 (red.)			
Elementanalys						
C	vikts-% TS	48,9	47			
H	vikts-% TS	6,5	6,1	5,9		
N	vikts-% TS	5,6	5,88		6,28	
O	vikts-% TS	31,2				
Cl	vikts-% TS	0,030	0,020	<0,10		
S	vikts-% TS	0,62	0,74	0,67	0,72	0,09
Askbildande huvudelement						
Si	vikts-% TS	0,07	0,06	0,09		
Al	vikts-% TS	0,00	0,00			
Ca	vikts-% TS	0,75	0,81	0,73	0,88	0,04
Fe	vikts-% TS	0,00	0,02	0,02	0,02	0,00
K	vikts-% TS	1,33	1,32	1,20	1,41	0,06
Mg	vikts-% TS	0,49	0,46	0,48	0,54	0,02
Na	vikts-% TS	0,00	0,04	0,01	0,02	0,01
P	vikts-% TS	1,23	1,23	1,12	1,26	0,04
Spårelement						
As	ppm wt.					
Ba	ppm wt.					
Cd	ppm wt.					
Co	ppm wt.					
Cr	ppm wt.					
Cu	ppm wt.					
Hg	ppm wt.					
Mo	ppm wt.					
Ni	ppm wt.					
Pb	ppm wt.					
Se	ppm wt.					
Sn	ppm wt.					
Sr	ppm wt.					
V	ppm wt.					
Zn	ppm wt.					

Provdatum		Rapsmjöl 2005/2006		Rapsmjöl 2006	
Process		Press+extraktion (hexan)		Press+extraktion (hexan)	
Analysdatum		2005-2006			
Ursprung		Foderanalyser/Karlshamn		Foderanalyser/Karlshamn	
Provbeteckning		Foderanalyser/Karlshamn 2		Foderanalyser/Karlshamn 3	
Antal prov/analyser		6 st månadsprov		Ett antal månadsprov	
Foderanalyser		medel	st.avv.	medel	st.avv.
Råprotein	vikts-% av TS	39,02	0,65	38,67	1,31
Approx N-halt (Rå Prot./6.25)	vikts-% av TS	6,24		6,19	
Råfett	vikts-% av TS, EG-metod	4,66	0,60	4,71	0,23
Aska, saltsyraolöslig	(%)	0,20	0,08	0,13	
Överslagsanalys					
Fukthalt	vikts-% av TS	11,22	0,30	11,57	0,06
Flykthalt	vikts-% av TS				
Askhalt	vikts-% av TS	7,60	0,46	7,24	0,19
HHV	MJ/kg d.b.				
LHV	MJ/kg d.b.				
LHV	MJ/kg tot				
Asksmältförlopp (DT alt IT Temp)	° C				
Elementanalys					
C	vikts-% av TS				
H	vikts-% av TS				
N	vikts-% av TS	6,24		6,19	
O	vikts-% av TS				
Cl	vikts-% av TS				
S	vikts-% av TS	0,69	0,09	0,70	
Askbildande huvudelement					
Si	vikts-% av TS				
Al	vikts-% av TS				
Ca	vikts-% av TS	0,77	0,13	0,86	
Fe	vikts-% av TS	0,02	0,00	0,01	
K	vikts-% av TS	1,43	0,09	1,58	
Mg	vikts-% av TS	0,51	0,04	0,47	
Na	vikts-% av TS	0,02	0,01	0,02	
P	vikts-% av TS	1,22	0,08	1,13	
Spårelement					
As	ppm wt.				
Ba	ppm wt.				
Cd	ppm wt.				
Co	ppm wt.				
Cr	ppm wt.				
Cu	ppm wt.				
Hg	ppm wt.				
Mo	ppm wt.				
Ni	ppm wt.				
Pb	ppm wt.				
Se	ppm wt.				
Sn	ppm wt.				
Sr	ppm wt.				
V	ppm wt.				
Zn	ppm wt.				

Provdatum		Rapsmjöl 2007	Rapsmjöl 2007	Rapsmjöl 2007
Process		Press+extraktion (hexan)	Press+extraktion (hexan)	Press+extraktion (hexan)
Analysdatum				
Ursprung		Bränsleanalyser/Karlshamn	Bränsleanalyser/Karlshamn	Bränsleanalyser/Karlshamn
Provbeteckning		Bränsleanalyser/Karlshamn 1	Bränsleanalyser/Karlshamn 2	Bränsleanalyser/Karlshamn 3
Antal prov/analyser (ej foderanalys)		1	1	1
Överslagsanalys				
Fukthalt	vikts-% av TS	11,1	10,1	10,3
Flykthalt	vikts-% av TS			
Askhalt	vikts-% av TS	7,5	7,8	7,6
HHV	MJ/kg d.b.	19,3	19,5	19,4
LHV	MJ/kg d.b.	18,0	18,1	18,1
LHV	MJ/kg tot	15,8	16,0	15,9
Asksmältförlopp (DT alt IT Temp)	° C			
Elementanalys				
C	vikts-% av TS	46,2	46,4	46,6
H	vikts-% av TS	6,2	6,2	6,2
N	vikts-% av TS	5,8	5,5	5,4
O	vikts-% av TS	33,5	33,3	33,5
Cl	vikts-% av TS	0,04	0,05	0,05
S	vikts-% av TS	0,79	0,76	0,68
Askbildande huvudelement				
Si	vikts-% av TS	0,0322	0,143	0,0866
Al	vikts-% av TS	0,00646	0,0173	0,00778
Ca	vikts-% av TS	0,743	0,772	0,779
Fe	vikts-% av TS	0,0134	0,0285	0,0150
K	vikts-% av TS	1,453	1,420	1,503
Mg	vikts-% av TS	0,55	0,56	0,52
Na	vikts-% av TS	0,00578	0,0794	0,0105
P	vikts-% av TS	1,266	1,323	1,284
Spårelement				
As	ppm wt.	<0,1	<0,1	<0,1
Ba	ppm wt.	5,01	6,24	6,32
Cd	ppm wt.	0,0805	0,0702	0,0766
Co	ppm wt.	0,0592	0,116	0,0388
Cr	ppm wt.	<0,9	2,59	<0,9
Cu	ppm wt.	6,34	5,92	5,7
Hg	ppm wt.	<0,01	<0,02	<0,02
Mo	ppm wt.	1,33	0,993	1,15
Ni	ppm wt.	1,65	1,63	0,818
Pb	ppm wt.	<0,06	<0,06	<0,06
Se	ppm wt.			
Sn	ppm wt.	<2	<2	<2
Sr	ppm wt.	23,2	25,8	24,9
V	ppm wt.	<0,2	0,314	<0,2
Zn	ppm wt.	71,8	64	56,6

Provdatum		Rapsmjöl 2007	Rapsmjöl 2007	Rapsmjöl 2007
Process		Press+extrakt. (hexan)	Press+extrakt. (hexan)	Press+extrakt. (hexan)
Analysdatum				
Ursprung		Bränsleanalyser/Slovakien	Bränsleanalyser/Slovakien	Bränsleanalyser/Karlshamn
Provbeteckning		Bränsleanalyser/Slovakien 1	Bränsleanalyser/Slovakien 2	Bränsleanalyser/Karlshamn 3*
Antal prov/analyser		1	1	1
Överslagsanalys				
Fukthalt	vikts-% TS	10,2	6,2	10,3
Flykthalt	vikts-% TS			74,1
Askhalt	vikts-% TS	7,4	7,3	7,4
HHV	MJ/kg d.b.	19,553	20,157	19,495
LHV	MJ/kg d.b.	18,209	18,797	18,14
LHV	MJ/kg tot	16,103	17,481	16,02
Asksmältförlopp (DT alt IT Temp)	° C			1130
Elementanalys				
C	vikts-% TS	46,7	47,6	46,9
H	vikts-% TS	6,2	6,3	6,3
N	vikts-% TS	5,5	5	6,4
O	vikts-% TS	33,36	32,95	32,2
Cl	vikts-% TS	0,03	0,03	0,03
S	vikts-% TS	0,82	0,75	0,91
Askbildande huvudelement				
Si	vikts-% TS	0,021461897	0,072332779	0,09295
Al	vikts-% TS	0,002805882	0,005188235	0,01249
Ca	vikts-% TS	0,80057041	0,77197861	0,721
Fe	vikts-% TS	0,01483204	0,047084731	0,003396
K	vikts-% TS	1,378046709	1,369745223	1,32
Mg	vikts-% TS	0,53	0,52	0,535
Na	vikts-% TS	0,051045161	0,006677419	0,013
P	vikts-% TS	1,279295775	1,213802817	1,257
Spårelement				
As	ppm wt.	<0.1	<0.1	0,171
Ba	ppm wt.	9,24	10,3	5,82
Cd	ppm wt.	0,0682	0,073	0,0721
Co	ppm wt.	0,0652	0,0921	0,117
Cr	ppm wt.	<0.9	1,04	1,59
Cu	ppm wt.	5,54	5,52	6,14
Hg	ppm wt.	<0.01	<0.02	<0,008
Mo	ppm wt.	1,07	1,07	<0,4
Ni	ppm wt.	1,03	1,16	1,78
Pb	ppm wt.	0,117	0,161	0,326
Se	ppm wt.			
Sn	ppm wt.	<2	<2	<2
Sr	ppm wt.	45,2	36,4	27,7
V	ppm wt.	0,198	0,253	<0,2
Zn	ppm wt.	73,5	67,9	70,4

Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeteknisk forskning och utveckling. Forskningsprogrammet är tillämpningsinriktat och fokuseras på energi- och processindustriernas behov och problem.

Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Svenska Fjärrvärmeföreningen
- Skogsindustrin
- Övrig industri

VÄRMEFORSK SAMARBETAR MED
STATENS ENERGI MYNDIGHET

VÄRMEFORSK SERVICE AB

101 53 Stockholm

Tel 08-677 25 80

Fax 08-677 25 35

www.varmeforsk.se

Beställning av trycksaker

Fax 08-677 25 35