

CO2-neutrale brændslers anvendelighed i kraftværkskedler

PSO-projekt nr. 5075

December 2005

Vedvarende Energi og Transport

CO2-neutrale brændslers anvendelighed i kraftværkskedler

PSO-projekt nr. 5075

December 2005

Projektmedarbejdere:

Lars Nikolaisen, Teknologisk Institut

Jørgen Busk, Teknologisk Institut

Klaus Hjuler, FORCE Technology

Peter Arendt Jensen, DTU, Institut for Kemiteknik

Torben Kvist Jensen, Energi E2

Lars Bloch, Sprout Matador

*Teknologisk Institut
Vedvarende Energi og Transport
Kongsvang Allé 29
8000 Århus C
Tlf.: 7220 1000
CVR 56976116*

INDHOLDSFORTEGNELSE

1. Resume af projektet.....	1
1.1 Projektets formål.....	1
1.2 Sammendrag	1
1.3 Konklusioner.....	5
1.4 The aim of the project.....	7
1.5 Summary	8
1.6 Conclusions.....	12
2. Råvarestudier og indkøb af råvarer.....	14
3. Analyser af råvarer.....	16
4. Opstilling af recepter og fremstilling af blandinger	18
4.1 Receptberegning.....	18
4.2 Strategi for sammensætning af blandinger.....	20
4.3 Fremstilling af blandinger i Sdr. Stenderup.....	24
4.4 Håndtering i forhold til træ, kul og halm	25
5. Laboratorieforsøg og analyse	26
5.1 MAF askesmelteforløb.....	26
5.2 MAF, konklusion	29
5.3 Discussion of fuels based on fuel analysis.....	30
5.4 Equilibrium Calculations	31
5.5 STA Measurements.....	34
5.6 Entrained Flow Reactor Experiments	37
5.7 Comparison of the Fuels	40
5.8 Valg af de 5 bedste recepter til pelletering	44
6. Pelletering af de 5 bedste recepter.....	44
6.1 Metodik for fremstilling af blandinger.....	47
6.2 Kommentarer til de 5 blandinger	48
7. Økonomikalkulation.....	53

Bilag 1, 2 og 3

1. Resume af projektet

1.1 Projektets formål

Projektets overordnede formål er at udbygge vores viden om bioblandingers brændselskvalitet samt at demonstrere, at det er muligt at fremstille en blandingspille af høj kvalitet til en konkurrencedygtig pris som alternativ til træ- og halmpiller. De mange biomasseprodukter med forskellig fyringskvalitet og råvarepriser gør det vigtigt at få undersøgt omkostningsstrukturen ved forskellige produkter. Der er i de senere år oparbejdet en betydelig viden om forskellige biobrændsleres egenskaber, som har givet en ny og (internationalt set) unik viden om forbrændingsegenskaberne ved biomasse afbrændt som rene råvarer uden antislaggemidler. Videnniveauet om brændsleres egenskaber gør det muligt at beskrive recepter for biobrændselspiller med varierende indhold af forskellige biomasser samt bindemidler og antislaggemidler. I de kommende år vil der komme en øget efterspørgsel på biobrændselspiller, såvel indenlandsk producerede som importerede. Derfor er det relevant at undersøge brændselskvaliteten af de piller, det vil være muligt at fremstille til brug i kraftværker, og der lægges vægt på at undersøge muligheder for at anvende brændslerne i suspensionsfyrede kedler.

For at sikre et stort råvareudbud af biomasse ses der på anvendeligheden af CO₂-neutrale brændsler til sammenblanding med eller som erstatning for halm og træ, såsom kornafrens og affald fra shea, solsikke, oliven, raps, pektin, kaffe samt andre industrielle restprodukter. Med de store råvare-mængder som kraftværkssektoren fremover skal bruge til halm- og træpilleproduktion for tilsatsfyring, vil det være en fordel at have alternativer (dvs. udvidet brændselsbånd), hvis de traditionelle råvarer bliver meget dyre eller ikke kan skaffes. Tidligere forsøg har vist, at tilsætning af additiver kan have en gunstig virkning på korrosionsbegrænsning og reduceret slaggedannelse (se bl.a. Energistyrelses- og PSO-rapporten "Quality Characteristics of Biofuel Pellets", september 2002).

1.2 Sammendrag

Det danske marked for biomasserestprodukter er blevet undersøgt gennem forespørgsler til danske industrivirksomheder, der forarbejder biomasse af dansk eller udenlandsk oprindelse. Den skønnede årlige tonnage i Danmark af biomasserestprodukter udgør ca. 400.000 tons tørstof. På baggrund af tilgængelige analyser samt erfaringer med restprodukter som brændsel blev 13 råvarer samt 2 additiver anskaffet (M for materiale/råvare og A for additiv):

M1: Pektinaffald	M2: Kornafrens	M3: Mask
M4: EFB*)	M5: Sheaskrå	M6: Carragenanaffald**)
M7: Sort oliven	M8: Cigaraffald	M9: Cigaretaffald
M10: Kaffeaffald	M11: Kornafrens/kaffe	M12: Kariten
M13: Bark	A4: Kaolin	A5: CaCO ₃ (foderkridt)

*) Empty Fruit Bunch (oliepalmeaffald fra Asien)

***) Carragenanaffald kaldes ofte tangaffald

Såvel de enkelte brændsler som brændselsblandinger blev testet ved forskellige metoder med henblik på at undersøge fyringsegenskaberne i kraftværkskedler. Der blev formuleret 3 muligheder for, hvorledes råvarerne kunne blandes:

1: Råvarer med meget højt askeindhold (f.eks. tobak) kan fortyndes med træ.

2: P- eller S-holdige råvarer kan anvendes som brændbart additiv for at minimere indholdet af klor i belægninger og flyveaske.

3: Ubrændbare additiver (f.eks. kaolin) kan potentielt forøge askesmeltetemperaturen og minimere indholdet af klor i belægninger og flyveaske.

Udgangspunktet for overhovedet at interessere sig for brændselsblandinger (eng.: fuel blends) er, at nogle brændsler potentielt kan have bedre askeegenskaber ved sammenblanding med et andet brændsel. Strategien for valg af blandingsforhold var at opnå specielle værdier af molforholdene $Ca/(K+Na)$, $Si/(K+Na)$, $S/(K+Na)$ og $P/(K+Na)$, idet askeindholdene i blandingerne samtidig holdtes under ca. 10% w/w på tør basis. Endvidere indgik indholdene af P, S og Cl i overvejelserne.

På baggrund af de gennemførte brændsels- og askeanalyser af M1 til M13 blev følgende blandinger valgt:

- M14: 75M3M5 (Mask/Sheaskrå)
- M15: 75M6M5 (Carragenanaffald/Sheaskrå)
- M16: 50M3M5 (Mask/Sheaskrå)
- M17: 25M4M13 (EFB/Bark)
- M18: 25M2M13 (Kornafrens/Bark)
- M19: 95M4A4 (EFB/Kaolin)
- M20: 95M5A5 (Sheaskrå/ $CaCO_3$)
- M21: 96M10A4 (Kaffeaffald/Kaolin)
- M22: 15M8M10 (Cigaraffald/Kaffeaffald)
- M23: 75M1M7 (Pektinaffald/Sort oliven)

Nomenklaturen skal forstås sådan, at fx 75M3M5 er 75 % M3 og 25 % M5.

Brændselsblandingerne blev fremstillet ud fra følgende strategier:

Ved M14 og M16 blev et kaliumrigt brændsel opblandet med et fosforrigt brændsel for at teste muligheden for formindsket klor i belægningen. Ved M15 og M23 anvendes opblanding af alkalirige brændsler (M5 og M7) med svovlrige brændsler (M15 og M23). Ved M17 og M18 blandes brændsler med en halmagtig askesammensætning (M2 og M4) med bark (M13). Ved M19 og M21 tilsættes kaolin for at forbedre askeegenskaberne, og ved M20 tilsættes kalk. M22 er en blanding af to alkalirige brændsler.

Ud af de 23 recepter er der udvalgt 6 råvarer og 2 blandinger til forsøg på fastbrændselsflowreaktoren på CHEC hos DTU. Årsagen til at der udvælges 6 råvarer er, at der ikke er noget kendskab fra tidligere projekter til de 6 råvarers adfærd i fastbrændselsflowreaktoren:

- M1: Pektinaffald
- M3: Mask, tørret
- M4: EFB
- M5: Sheaskrå
- M6: Carragenanaffald
- M7: Sort oliven
- M14: 75M3M5
- M15: 75M6M5

Brændslerne blev formalet hos Teknologisk Institut på forsøgsanlægget i Sdr. Stenderup til en partikelstørrelse, hvor 100 % er mindre end 700 μm og 60 % er mindre 300 μm . Til finmaling er anvendt en stiftmølle (Alpine 160Z kolloplex) ved 18900 rpm.

FORCE har bestemt kontinuerligt smelteforløb (MAF = Melt Area Fraction) for laboratoriefremstillede asker af alle undersøgte brændsler. Af råvarerne er det kun kariten (M12), der er på niveau med eller værre end stærkt slaggedannende halm. Dette skyldes et meget højt indhold af Na_2CO_3 . De øvrige råvarer bedømmes som på niveau med eller mindre slaggende end moderat halm. Analysen af oliven (M7) var problematisk pga. en kraftig afsætning af kondensat (normalt salte) på mikroskopvarmebordets dækglas. Der dannedes også betydelige mængder kondensat ved M4, M5, M10 og M11. Cigar (M8) har en (for biomasse) ekstremt lidt smeltende aske. Dette skyldes sandsynligvis det relativt høje indhold af Al. Blandingerne falder generelt ikke bedre ud end råvarerne. Et ekstremt eksempel er 15M8M10 (M22), hvor M8 er god og M10 (kaffe) rimelig. Blandingen har væsentligt dårligere egenskaber end råvarerne mht. tidlig smeltedannelse. Der er dog ikke observeret kraftig afsætning af kondensat med blandingsaskerne. Tilsats af 4% kaolin har markant effekt med M10, hvorimod effekten ikke er signifikant sammen med M4 (EFB). Tilsats af 5% foderkridt har nogen effekt på M5 (sheaskrå).

Ved termodynamisk ligevægtsberegninger kan beregnes fordelingen af stabile kemiske stoffer og deres fysiske faser som funktion af temperatur, tryk og en specificeret elementær sammensætning. Rainer Backmann (Umeå Universitet) foretog beregninger i temperaturområdet fra 500 til 1600 $^{\circ}\text{C}$ på brændslerne M1, M3-M7, M14 og M15 ved 1 bar. De mest alvorlige problemer med belægningsdannelse og korrosion ses typisk i sammenhæng med asker, som forekommer i gasfasen og i den flydende fase ved relativt lave temperaturer. Det blev observeret, at M3 og M14 var de brændsler, der havde den laveste smeltedannelse, mens den største smeltedannelse forekom hos M4 og M15.

STA-analyse (Simultaneous Thermal Analysis) blev foretaget hos DTU på laboratorieaskeprøver fra alle brændslerne fra M1 til M23, undtagen M13. STA-analysen kan give viden om askernes smeltning- og fordampningsegenskaber. Bemærkelsesværdige lavtemperatursmeltespidser blev påvist for biomasserne M4, M7, M9, M10, M12 og M22. Med få undtagelser fremkommer der generelt større lavtemperatursmeltespidser for biomasser med et højt klorindhold. Lavtemperatursmelting ved temperaturer mellem 620 og 660 $^{\circ}\text{C}$ skyldes saltblandinger med et højt indhold af KCl og kaliumsulfat. Ud over at give viden om askesmelting, giver STA-målingerne også indsigt i askers fordampning. Aske i gasfasen kan kondensere på kedeloverflader og dermed bidrage til belægningsdannelse i kedler.

For at simulere suspensionsfyring af biomasser i en kraftværkskedel blev der foretaget forbrændingsforsøg med udvalgte brændsler (M1, M3-M7, M14 og M15). Forsøg med suspensionsfyring blev foretaget på DTU's fastbrændselsflowreaktor og giver information om brændsleres forbrændingsegenskaber, hvad angår emission af SO_2 og NO, udbrænding og askedannelse. Fastbrændselsflowreaktoren er designet til at simulere tilstanden i termiske højtemperaturreaktorer såsom suspensionsfyrede kedler eller fribordet ved ristefyrede kedler. Askebelægninger blev opsamlet på en luftkølet sonde, der simulerer overhederrør. Sondens ydre metalrør kan fjernes, således at asken kan blive vejjet og opbevaret intakt for senere analyse. Sonden afkøles af forvarmet luft, således at den opnår en overfladetemperatur på ca. 550 $^{\circ}\text{C}$, hvilket er en passende temperatur for overhederrør. Specielt mængden af klor i belægningen har stor indflydelse på askens korrosionsegenskaber.

Hovedresultaterne vedrørende egenskaber for askebelægningerne for brændsler testet på fastbrændselsflowreaktoren, bliver kort skitseret her. Hverken i M14 eller i M3 blev der observeret klor i belægningerne. M3 og M14 er de brændsler, som har det højeste indhold af fosfor. KCl reagerer med fosfor, og HCl bliver frigjort til gasfasen. Brændsler såsom M1, M6 og M15 med en relativt stor mængde aske og et højt svovlindhold giver en belægning med et mindre klorindhold sammenlignet med de alkalirige brændsler M5 og M7. For M5 og M7's vedkommende vil en stor mængde KOH forefindes i den varme røggas, der kan reagere med HCl og fiksere klor i belægningen som KCl. Selv i tilfælde med Si- og S-holdige brændsler er der dog en betydelig mængde klor til stede i asken.

STA-analyse, ligevægtsberegninger og fastbrændselsflowreaktoren gav i de 8 tilfælde en nogenlunde ens vurdering af brændslernes askeegenskaber.

Vurderingen af hvilke 5 recepter der skulle pelleteres, blev lavet ud fra en samlet vurdering af alle projektets undersøgelser, hvor det enkelte bidrag gives en karakter fra 1 til 3, hvor 3 angav et brændsel med en håndterbar aske og 1 en relativt besværlig aske. Der foretages ligeledes en vægtning af det enkelte bidrag, hvor laboratorieforsøg og askeanalyser blev vægtet højest:

MAF smeltanalyse: Faktor 2

Askeanalyse: Faktor 2

Ligevægtsberegninger: Faktor 2

Entrained Flow Reactor: Faktor 3

STA-analyser: Faktor 2

Pris for råvare: Faktor 1

Tilgængelig tonnage: Faktor 1

Våd eller tør råvare: Faktor 1

Ud fra en bedømmelse af brændslernes askeegenskaber og mulighederne for at tilvejebringe større mængder af brændslerne blev følgende 5 recepter valgt:

M14:75M3M5

M21:96M10A4

M15:75M6M5

M18:25M2M13

M22:15M8M10

For at undersøge pelleteringsegenskaberne af disse blandinger blev der udført pelleteringsforsøg på Teknologisk Instituts forsøgsanlæg i Sdr. Stenderup, hvor blandingerne i en mængde på ca. 1000 kg pr. blanding formales, blandes og pelleteres. Resultatet af forsøgene var følgende:

Forsøg med 75M3M5 (75 % tørret mask og 25 % sheaskrå): For høj smulddannelse og for lav pillestyrke. Matrice med et større forhold mellem pillediameter og pressekanalens længde vil forbedre kvaliteten.

Forsøg med 96M10A4 (96 % kaffeaffald (skaller) og 4 % kaolin): Kaffeskaller er særdeles velegnede til pelletering. Damp har en positiv indflydelse og reducerer elforbruget på pillepressen i forhold til kapaciteten, og sammen med den valgte matrice sikrer dampen en særdeles god pillekvalitet.

Forsøg nr. 75M6M5 (75 % carragenanaffald og 25 % sheaskrå): Pillerne blev meget ensartede, lange og glatte. Blandingen er velegnet til pelletering, og den valgte matrice har de rigtige dimensioner. Det passende vandindhold og en høj meltemperatur giver basis for en høj kapacitet og en særdeles god pillekvalitet.

Forsøg nr. 25M2M13 (75 % bark og 25 % kornafrens): Denne type blanding kan pelleteres uden problemer, når råvarerne er tørre og formales relativt fint, og når maksimale mængder damp tilsæt-

tes. Matricen skal dog have en længere pressekanal end i den valgte Ø8 x 90 p50, hvor forholdet mellem pillediameter og pressekanal er 1:6,3.

Forsøg nr. 15M8M10 (15 % tobaksaffald og 85 % kaffeskaller): Pillerne blev lange og hårde og dannede ingen smuld. Analyserne viste, at der kun var 0,1 % smuld i varen og 1,5 % smulddannelse samt en hårdhed på 31 kg.

Der er lavet en økonomikalkulation, som giver en skønnet pris på de undersøgte brændselsblandinger. Kalkulationen er udført som en samlet prissætning af kapitalomkostninger og variable omkostninger for en fabrik med en produktionslinje, der producerer 60.000 tons piller pr. år. Der er fastsat priser for råvarer inklusive eventuel tørring, der er priser for anlægsinvestering i maskiner og bygninger, afskrivningsperioder samt renteudgifter. Variable omkostninger inkluderer vedligehold, løn, vand, el, damp, administration, overskud, transport og forsikring.

Totale omkostninger	Kr./tons	GJ/tons	Kr./GJ
M14	997	18,05	55,24
M15	922	15,60	59,08
M16	1041	17,62	59,07
M17	859	17,17	50,04
M18	897	16,87	53,16
M19	784	15,76	49,74
M20	1116	15,92	70,08
M21	976	16,91	57,72
M22	883	16,66	52,99
M23	902	16,93	53,26
<i>Træpiller</i>	<i>1028</i>	<i>17,28</i>	<i>59,49</i>
<i>Træpille – markedspris, kraftværk</i>	<i>780</i>	<i>17,28</i>	<i>45,14</i>
<i>Træpille – markedspris, private</i>	<i>1200</i>	<i>17,28</i>	<i>69,44</i>

Tabel 1: Den kalkulerede pillepris for M14 til M23. Der er sammenlignet med produktionsprisen og markedsprisen for træpiller til brug i kraftværker og til brug hos private. Den kalkulerede pris kan konkurrere med produktionsprisen men ikke med markedsprisen for træpiller til kraftværksformål.

1.3 Konklusioner

Det har været muligt at fremskaffe biomasserestprodukter med meget varieret askeindhold og -sammensætning, hvormed det har været muligt at fremstille forskellige blandinger. Specielt de nye biomasserestprodukters askeegenskaber er blevet grundigt undersøgt. Der er fremskaffet 13 alternative biomasser, og der er lavet 10 blandinger. Blandingerne er binære brændselsblandinger eller brændsler tilsat et additiv. Alle brændsler er undersøgt ved standard brændsels- og askeanalyser, og der er udført kontinuerligt askesmelteforløb (MAF) samt Simultan Termisk Analyse (STA) af laboratoriefremstillede brændselsasker. Desuden er der fremstillet laboratorieasker af de 10 blandinger, som alle er undersøgt ved MAF og STA. Endelig er der gennemført forbrændingsforsøg i fastbrændselsreaktoren af 6 af brændslerne og 2 af blandingerne, og der er udført ligevægtsberegninger på disse ud fra askesammensætningerne. STA har tilvejebragt information om askernes lavtemperatur-smelteforhold og om afgivelse til flygtige komponenter fra askerne. Forsøg med fastbrændsels-

flowreaktoren har givet information om belægningsdannelsens egenskaber, udbrænding og emissioner fra brændslerne ved suspensionsfyrringsforhold.

Ved MAF-undersøgelserne fremtræder blandingerne relativt ensartede. Askesmelteegenskaberne afviger ikke betydeligt fra de rene råvarer med undtagelse af en væsentligt ringere blanding med 15M8M10 (tobak/kaffe) samt med 96M10A4 (kaffe/kaolin), som er betydeligt bedre (dvs. har en relativt lav smelteandel). Denne blanding får også topkarakter ved STA. De øvrige blandinger falder i samme gruppe med egenskaber, der modsvarer halm med mindre eller moderat tilbøjelighed til slaggedannelse.

Generelt kunne de rå brændsler på basis af brændselsanalyserne inddeles i fire grupper: 1) Halmlignende brændsler med et højt indhold af kalium og silicium samt noget klor (M2 kornafrens, M4 EFB, M8 cigaraffald, M9 cigaretaffald). 2) Trælignende brændsler med højt Ca-indhold og i dette tilfælde også en stor mængde svovl (M1 pektinaffald, M6 carragenanaffald). 3) Brændsler med et højt alkaliindhold og et moderat indhold af kalcium og silicium (M5 sheaskrå, M7 sort oliven, M10 kaffeaffald M11 kornafrens/kaffe, M12 kariten). 4) Endelig var der et enkelt brændsel, M3 mask, med et højt fosfor- og siliciumindhold.

Brændslerne bedømmes generelt som værende mindre besværlige med hensyn til belægningsdannelse og korrosion end halm, men mere problematiske end træ. Brændsler med en meget høj askeandel som M2, M6, M8, og M9 vil dog nok give meget store mængder af askebelægninger. Som en simpel regel kan man sige, at brændselsasker med højt alkali- og klorindhold er de mest problematiske med hensyn til askebelægningsdannelse. Der er dog kun begrænset viden om, hvordan brændslerne med meget højt alkaliindhold og lavt indhold af Si og Ca vil agere i kraftværkskedler. Forsøgene i fastbrændselsflowreaktoren indikerer dog, at brændslerne vil være i klasse med rimelig halm.

Brændselskvaliteten med hensyn til belægningsdannelse blev vurderet på askeanalyse, ligevægtsberegning, MAF- og STA-målinger samt på fastbrændselsflowreaktoren. Tilbøjeligheden til brændslernes belægningsdannelse får en karakter fra 1 (brændsler som kan give belægninger, der kan udvikle sig hurtigt, være vanskelig at fjerne og være meget korrosive) til 3 (en rimelig biomassebrændsel mht. belægningsdannelse). Det er forfatterens indtryk, at et typisk halmbrændsel vil få karakteren 1, et træbrændsel karakteren 3, og at bituminære kul (disse indgår ikke i denne rapport) skulle få en karakter, som ligger over 3. Resultaterne af denne vurdering, både hvad angår belægningsdannelse og øvrige brændselsegenskaber, er vist i Tabel 2.

Forklaring på betegnelserne M1, M2 osv. er anført i Afsnit 1.2.

Nedenstående tabel viser den karaktergivning og vægtning, der har ført frem til udvælgelse af de 5 recepter på hvilke, der er udført pelleteringsforsøg. Nr. 17 og 19 er fravalgt, da det ikke har været muligt at fremskaffe EFB i den nødvendige mængde. M20 er fravalgt til fordel for M15, da sidstnævnte er ukendt pelleteringsteknisk. M16 er fravalgt til fordel for M22, idet M8 ikke optræder i andre recepter, og desuden vurderes M16 pelleteringsteknisk at ligge tæt op ad M14.

	Faktor	2	2	2	3	2	1	1	1		
Nr.	Navn	MAF	Ana- Lyse	Lige- vægt	Flow React.	STA	Pris	Tons marked	Våd/ tør	Samlet værdi	Valgt
M14	75M3M5	1,5	2	3	2,5	3	2	3	2	2,39	X
M21	96M10A4	3	1			3	2	2	3	2,33	X
M17	25M4M13	1	2			3	2	2	1,5	1,94	
M18	25M2M13	1	2			2	3	3	1,5	1,94	X
M20	95M5A5	3	1			1	1,5	3	3	1,94	
M15	75M6M5	2	2	1	1,5	3	2,5	2	1,5	1,89	X
M16	50M3M5	1	1			3	2	3	2	1,89	
M19	96M4A4	2	1			2	2	1	3	1,78	
M22	15M8M10	2	1			1	3	1,8	3	1,75	X
M23	75M1M7	2	1			2	2	2,3	1,5	1,75	

Tabel 2: Karaktergivningen der har ført frem til pelletering af M14, M15, M18, M21 og M22

Kvaliteten af de 5 pelleterede blandinger blev vurderet som følgende:

M14: 75M3M5 - For høj smulddannelse og for lav pillestyrke

M21: 96M10A4 - God pillekvalitet og lavt elforbrug

M15: 75M6M5 - Særdeles god pillekvalitet og høj pressekapacitet

M18: 25M2M13 - Rimelig pillekvalitet og lavt elforbrug. Høj smuldandel og lav pillestyrke.

M22: 15M8M10 - God pillekvalitet og lav smuldandel.

Der blev ved pelleteringsforsøgene valgt en matrice med målene Ø8 x 90 p50, som har vist sig særdeles velegnet til disse blandinger.

Der er kalkuleret en produktionspris for pillerne af fabrik, og træpiller er brugt som reference. Den kalkulerede pris på 50 - 60 kr/GJ kan konkurrere med produktionsprisen på træpiller, men ikke med markedsprisen for træpiller anvendt i kraftværker.

1.4 The aim of the project

The main purpose of this project is to increase our knowledge of bio mixtures' fuel quality and to demonstrate the possibility of producing a mixed pellet of high quality at a competitive price as an alternative to wood and straw pellets. The many biomass products with different combustion qualities and raw material prices make it important to have the cost structure of different products examined. During recent years a considerable knowledge has been developed regarding the different bio-fuel properties, which has provided a new and (in an international aspect) unique knowledge of the combustion properties of biomass burnt as pure raw material without anti-slagging additive. The knowledge level of biofuel properties makes it possible to describe recipes for biofuel pellets with a variable content of different biomasses as well as binding agents and anti-slagging additive. In the next few years we will experience a growing demand for biofuel pellets, both for domestic products and for imported products. Therefore it seems relevant to examine the fuel quality of the pellets which it will be possible to produce for application in power plants with focus on suspension fired boilers.

To ensure a great raw material supply of biomasses it is important to have a look at the utility of CO₂ neutral fuels for mixture with or as a substitute for straw and wood, such as grain screening and waste from shea, sunflower, olive, rape, pectin, coffee and other industrial waste products. With the great amount of raw material which the power plant sector will have to use for the future energy production of biomasses, it is of great importance to have alternatives (i.e. increased fuel bands), if the traditional raw material will get very expensive or impossible to procure. Previous experiments have shown that the admixture of additives can have a favourable effect on limitation of corrosion and reduction of slagging (see e.g. the PSO and Danish Energy Agency report "Quality Characteristics of Biofuel Pellets", September 2002).

1.5 Summary

The Danish market for biomass waste products has been examined via requests to Danish industrial companies manufacturing biomasses of Danish or foreign origin. The estimated annual tonnage in Denmark of biomass waste products constitutes approximately 400.000 tons of dry matter. On the basis of available analyses and experiences with waste products such as fuel, 13 raw materials and 2 additives were procured (M for Material/raw material and A for Additive):

M1: Pectin waste	M2: Grain screening	M3: Mash
M4: EFB*)	M5: Shea nut shell	M6: Carrageenan **)
M7: Black olive	M8: Cigar waste	M9: Cigarette waste
M10: Coffee waste	M11: Grain screening/coffee	M12: Karitene
M13: Bark	A4: Kaolin	A5: CaCO ₃

*) Empty Fruit Bunch (oil palm waste from Asia)

***) Carrageenan is often called sea weed waste

Both the individual fuels and the fuel blends were tested using different methods with the purpose of examining the combustion properties in power plant boilers. 3 possibilities of how to mix the raw materials were formulated:

- 1: Raw materials with very high ash content (e.g. tobacco) can be attenuated with wood.
- 2: P- and S-containing raw materials can be used as combustible additive to minimize the content of chlorine in deposits and fly ashes.
- 3: Incombustible additives (e.g. kaolin) can potentially increase the ash melting temperature and minimize the content of chlorine in deposits and fly ashes.

The basis for being interested in fuel blends indeed is that some blends potentially can have better ash properties when they are being mixed with another fuel. The strategy for the selection of blending proportion was to obtain special values of the mol relations for Ca/(K+Na), Si/(K+Na), S/(K+Na) og P/(K+Na), since the ash contents in the blends at the same time were kept below approximately 10% w/w on dry basis. Moreover, the content of P, S and Cl was considered.

On the basis of the accomplished fuel and ash analyses of M1 to M13 the following blends were selected:

M14: 75M3M5 (Mash/Shea nut shell)
M15: 75M6M5 (Carrageenan waste/Shea nut shell)
M16: 50M3M5 (Mash/Shea nut shell)
M17: 25M4M13 (EFB/Bark)
M18: 25M2M13 (Grain screening/Bark)
M19: 95M5A4 (EFB/Kaolin)
M20: 95M5A5 (Shea nut shell/CaCO₃)
M21: 96M10A4 (Coffee waste/Kaolin)
M22: 15M8M10 (Cigar waste/Coffee waste)
M23: 75M1M7 (Pectin waste/Black olive)

The nomenclature should be understood the following way: E.g. 75M3M5 consists of 75 % of M3 and 25 % of M5.

The fuel blends were made on the basis of the following strategies:

M14 and M16: A fuel rich in potassium was mixed with a fuel rich in phosphor to test the possibility for reduced chlorine in the fouling. M15 and M23: A blend of fuels rich in alkali (M5 and M7) were used with fuels rich in sulphur (M15 and M23). M17 and M18: fuels were mixed with a straw-like ash composition (M2 and M4) with bark (M13). M19 and M21: Kaolin was added to improve the ash properties, and at M20 limestone was added. M22 is a blend of two fuels rich in alkali.

From the 23 recipes, 6 raw materials and 2 blends have been selected for experiments on the Entrained Flow Reactor at the DTU. The reason for selecting 6 raw materials is the lack of knowledge from previous projects of the 6 raw materials' behavior in the Entrained Flow Reactor:

M1 Pectin waste
M3 Mash, dried
M4 EFB
M5 Shea nut shell
M6 Carrageenan waste
M7 Black olive
M14: 75M3M5
M15: 75M6M5

The fuels were ground at the Danish Technological Institute's test facilities in Sdr. Stenderup to a particle size where 100 % is minor than 700 µm and 60 % is minor than 300 µm. For fine grinding, a pin mill was applied (Alpine 160Z kolloplex) at 18900 rpm.

FORCE has determined the ash melting behaviour by continuous method (MAF = Melt Area Fraction) for ashes produced in laboratories of all examined fuels. Karitene (M12) is the only raw material on level with or worse than strongly slag-generating straw. This is due to a very high content of Na₂CO₃. The other raw materials are evaluated to be on level with or less slag-generating than moderate straw. The analysis of olive (M7) was problematic owing to a strong depositing of condensate (normally salts) on the cover slip of the microscope's hot plate. Considerable amounts for condensate were also generated for M4, M5, M10 and M11. Cigar (M8) has a (for biomasses) extremely little melting ash. This is probably due to the relatively high content of Al. Generally, the blends do not turn better out than the raw materials. An extreme example is 15M8M10 (M22), where M8 is fine and M10 (coffee) reasonable. The blend has considerable worse properties than

the raw materials as regards early melt formation. However, there has not been observed any strong depositing of condensate with the ash blends. Admixture of 4% of kaolin has a remarkable effect with M10, whereas the effect when mixing with M4 (EFB) is not significant. Admixture of 5% of calcium carbonate has some effect on M5 (shea nut shell).

By the equilibrium calculation the stable chemical species and physical phases of the elements included are determined as a function of the temperature, pressure and total composition of the system considered. Calculations by Rainer Backmann (Umeå University) were performed in the temperature range from 500 to 1600 °C on the fuels M1, M3-M7, M14 and M15 at 1 bar. As a simple rule the most severe problems with deposit formation and corrosion appear with ashes which are present in the gas and liquid phase at relatively low temperature. It is seen that M3 and M14 were the fuels with the lowest melt formation prediction, and the largest amount of melt formation appeared for M4 and M15.

STA analysis (Simultaneous Thermal Analysis) was performed at the DTU on laboratory ash samples from all the fuels from M1 to M23, except for M13. The STA analysis can procure information on the melting and evaporation properties of the ashes. Significant low-temperature melt peaks were detected for the biomasses M4, M7, M9, M10, M12 and M22. Generally, the larger low-temperature peaks appear within a few exceptions for biomasses with high chlorine content. The low-temperature melting at 620 to 660 °C is caused by salt mixtures rich in potassium chloride and potassium sulphate. Besides providing information of ash melting, the STA measurements also procure information of ash volatilization. Gas phase ash species may condensate on boiler surfaces and thereby contribute to boiler deposit formation.

To simulate the suspension firing of the biomasses in a boiler laboratory, combustion experiments with selected fuels (M1, M3-M7, M14 and M15) were performed. The suspension firing experiments were performed on DTU CHEC's Entrained Flow Reactor and procure information of the combustion characteristics of the fuels with respect to emission of SO₂ and NO, burn out and ash deposit formation. The Entrained Flow Reactor is designed to simulate the environment of high-temperature thermal reactors such as suspension-fired boilers, entrained flow gasifiers or the free-board of grate-fired boilers. Deposit samples were collected on the preheated probe which simulates super-heater coils. The outer metal tube of the probe can be removed so the deposit can be weighed and stored intact for later analysis. The probe is cooled by preheated air to obtain surface temperatures of approximately 550 °C, which is a relevant temperature for super-heater coils. Especially the amount of chlorine in a deposit has a large influence on the deposit corrosion properties.

The main results concerning the ash properties in those fuels which have been tested on the Entrained Flow Reactor are shortly described here. Both in M14 and M3 no chlorine was observed in the deposit. M3 and M14 are the fuels with the highest content of phosphorous, potassium chloride has reacted phosphor and HCL is released to the gas phase. Fuels such as M1, M6 and M15 with a relatively great amount of ash and sulphur result in a deposit with a minor content of chlorine compared to the fuels rich in alkali (M5 and M7). In the case of M5 and M7 a large amount of KOH will properly be present in the hot flue gas that can react with HCl and fix the chlorine in the deposit as KCl. However, even in the cases of the fuels rich in Si and S, a significant amount of chlorine is present in the deposits.

In the 8 cases, the STA analyses, equilibrium calculations and the Entrained Flow Reactor resulted in a fairly equal evaluation of the fuels' ash properties.

The consideration of which of the 5 recipes should be pelletized was made from an overall evaluation of all the project's examinations, where each contribution was given a mark from 1 to 3. An emphasis on each contribution was also carried out, where most importance was attached to laboratory experiments and ash analyses:

MAF melting analysis: Factor 2
Equilibrium calculation: Factor 2
STA analyser: Factor 2
Available tonnage: Factor 1

Ash analysis: Factor 2
Entrained Flow Reactor: Factor 3
Price for raw material: Factor 1
Wet or dry raw material: Factor 1

This forms the basis of which the following 5 recipes were selected:

M14:75M3M5 M21:96M10A4 M15:75M6M5 M18:25M2M13 M22:15M8M10

To examine the pelletizing properties of these blends, pelletizing experiments were carried out on the Danish Technological Institute's test facilities in Sdr. Stenderup, where the blends were ground, blended and pelletized in an amount of approximately 1,000 kg per blend.

Experiment with 75M3M5 (75 % of dried mash and 25 % of shea nut shell): Too much screening formation and too little pellet strength. Die with a bigger relation between pellet diameter and the length of the press channel would improve the quality.

Experiment with 96M10A4 (96 % of coffee waste (shells) and 4 % of kaolin): Coffee shells are extremely suitable for pelletizing. Steam has a positive influence and reduces the electricity consumption on the pellet press in relation to the capacity, and together with the selected die, the steam ensures a most excellent pellet quality.

Experiment no. 75M6M5 (75 % of carrageenan waste and 25 % of shea nut shell): The pellet became very uniform, long and smooth. The blend is suitable for pelletizing, and the selected die has the right dimensions. The appropriate water content and a high flour temperature form the basis for a high capacity and a most excellent pellet quality.

Experiment no. 25M2M13 (75 % of bark and 25 % of grain screening). This type of blend can be pelletized without any problems, when the raw materials are dry and ground relatively finely, and when maximum amounts of steam are added. However, the die should have a longer press channel than in the selected Ø8 x 90p 50 mm, where the relation between the pellet diameter and the press channel is 1:6.3.

Experiment no. 15M8M10 (15 % of tobacco waste and 85 % of coffee shells): The pellets became long and hard and did not form any screening. The analyses showed that the material only contained 0.1 % screening and 1.5 % dust formation and a hardness of 31 kg.

An economy calculation has been made of an estimated price of the examined fuel blends. The economy calculation has been carried out as a total pricing of capital expenses and variable expenses for a factory with a production line which manufactures 60,000 tons of pellets annually. Prices have been fixed for raw materials inclusive an eventual drying; and prices also include investment in plant, machines and buildings, periods of depreciation and interest expenditures. Variable expenses include maintenance, salary, water, electricity, steam, administration, balance, transport and assurance.

Total expenses	DKK/tons	GJ/tons	DKK/GJ
M14	997	18.05	55.24
M15	922	15.60	59.08
M16	1041	17.62	59.07
M17	859	17.17	50.04
M18	897	16.87	53.16
M19	784	15.76	49.74
M20	1116	15.92	70.08
M21	976	16.91	57.72
M22	883	16.66	52.99
M23	902	16.93	53.26
<i>Wood pellets</i>	<i>1028</i>	<i>17.28</i>	<i>59.49</i>
<i>Wood pellet – market price, power plant</i>	<i>780</i>	<i>17.28</i>	<i>45.14</i>
<i>Wood pellet – market price, private</i>	<i>1200</i>	<i>17.28</i>	<i>69.44</i>

Table 1: The calculated pellet price for M14 to M23. A comparison has been made of the product price and the market price for wood pellets for the use in power plant and for private use. The calculated price is competitive with the production price, but not with the market price of wood pellets for the use in power plants.

1.6 Conclusions

It has been possible to procure biomass waste products with very variable ash content and composition, and therefore it was possible to compound different blends. Especially the ash properties in the new biomass waste products have been examined thoroughly. 13 alternative biomasses have been procured, and 10 blends have been made. The blends are binary fuel blends or fuels mixed with an additive. All fuels have been examined using standard fuel and ash analyses, and a continuous Melt Area Fraction (MAF) and Simultaneous Thermal Analysis (STA) of the ashes produced in laboratory have been carried out. Moreover, laboratory ashes have been made of the 10 blends which all have been examined by MAF and STA. Finally, combustion experiments have been carried through in the Entrained Flow Reactor on 6 fuels and 2 blends, and equilibrium calculations were carried out on the basis of the ash compounds. STA has procured information about the ashes' low-temperature melting relations and about liberation to volatile components from the ashes. Experiments with the Entrained Flow Reactor has procured information about deposit formation properties, burn out and emissions from the fuels at suspension firing relations.

In the MAF examinations the blends appear relatively uniform. The ash melting properties do not deviate much from the pure raw materials except for 15M8M10 (tobacco/coffee), which is considerably inferior, and 96M10A4 (coffee/kaolin), which is considerably superior (i.e. it has a relatively low melting part). This blend also obtains super marks at STA. The other blends all fall into the same group with properties corresponding to straw with less or moderate tendency of generating slag.

Generally, on the basis of the fuel analyses, the raw fuels could be divided into four groups: 1) Straw-like fuels with a high content of potassium and silicon and some chlorine (M2 grain screen-

ing, M4 EFB, M8 cigar waste, M9 cigarette waste. 2) Wood-like fuels with a high content of Ca, and in this case also with a great amount of sulphur (M1 pectin waste, M6 carrageenan waste). 3) Fuels with high alkali content and a moderate calcium and silicon content (M5 shea nut shells, M7 black olive, M10 coffee waste, M11 grain screening/coffee, M12 karitene). 4) Finally there was a single fuel, M3 mash, with a high phosphor and silicon content. Generally the fuels are evaluated as being less problematic as regards deposit formation and corrosion than straw, but more problematic than wood. However, fuels with a very high ash part such as M2, M6, M8 and M9 will probably give very huge amounts of ash deposits. As a simple rule it can be said that ashes rich in alkali and chlorine are the most problematic as regards deposit formation of ashes. However, there exists only limited knowledge of how fuels very rich in alkali and poor in Si and Ca will act in power plant boilers. However, the experiments in the Entrained Flow Reactor indicate that the fuels will be in the same group as reasonable straw.

The quality of the fuels with respect to deposit formation was evaluated using fuel analysis, equilibrium calculations, the MAF and STA measurements and on Entrained Flow Reactor experiments. The fuels' tendency of generating deposit obtains a mark from 1 (which includes fuels that can make fast developing foulings, that can be difficult to clean and that can be very corrosive) to 3 (which includes a reasonable biomass fuel as regards deposit formation). It is the author's impression that a typical straw fuel will get the mark 1, wood fuel the mark 3 and bituminous coal (these are not included in this report) should have a mark above 3. The results of this evaluation both as regards deposit formation and other fuel properties are shown in Table 2.

An explanation of M1, M2 etc. is stated in Section 1.2.

Below is shown the awarding of marks and the emphasis which have led to the selection of the 5 recipes on which the pelletizing has been carried out. M17 and M19 have not been selected due to the fact that it has not been possible to procure EFB in the requisite amount. M20 was deselected in favour of M15 since the last-mentioned is unknown as regards pelletizing technique. M16 was deselected in favour of M22, since M8 is not included in other recipes, and as for pelletizing technique, M16 is considered to lie close to M14.

No.	Factor	2	2	2	3	2	1	1	1		
No.	Name	MAF	Ana-lysis	Equi-librium	Flow react.	STA	Price	Tons market	Wet/dry	Total value	Selected
M14	75M3M5	1.5	2	3	2.5	3	2	3	2	2.39	X
M21	96M10A4	3	1			3	2	2	3	2.33	X
M17	25M4M13	1	2			3	2	2	1.5	1.94	
M18	25M2M13	1	2			2	3	3	1.5	1.94	X
M20	95M5A5	3	1			1	1.5	3	3	1.94	
M15	75M6M5	2	2	1	1.5	3	2.5	2	1.5	1.89	X
M16	50M3M5	1	1			3	2	3	2	1.89	
M19	96M4A4	2	1			2	2	1	3	1.78	
M22	15M8M10	2	1			1	3	1.8	3	1.75	X
M23	75M1M7	2	1			2	2	2.3	1.5	1.75	

Table 2: Given marks which have led to the pelletizing of M14, M15, M18, M21 and M22.

The quality of the 5 selected blends for pelletizing was evaluated as follows:

M14: 75M3M5: Too much screening formation and too little pellet strength
M21: 96M10A4: High pellet quality and low electricity consumption
M15: 75M6M5: Extremely high pellet quality and high press capacity
M18: 25M2M13: Reasonable pellet quality and low electricity consumption. High content of screening and low pellet strength.
M22: 15M8M10: High pellet quality and low content of screening.

The selected die with the dimensions $\varnothing 8 \times 90 \times 50$ has proved to be extremely suitable for these blends.

A calculated production price for the pellets ex works and wood pellets has been applied as reference. The calculated price of 50-60 DKK/GJ is competitive with the production price of wood pellets, but not with the market price for wood pellets used in power plants.

2. Råvarestudier og indkøb af råvarer

Det danske marked for biomasserestprodukter er blevet undersøgt gennem forespørgsler til danske industrivirksomheder, der forarbejder biomasse af dansk eller udenlandsk oprindelse. Det generelle indtryk efter drøftelserne med virksomhederne er, at restproduktet i nogle få tilfælde afsættes til videre forarbejdning, og at det kun i få tilfælde anvendes som brændsel i fjernvarmeværker. I nogle tilfælde er der afsætning til biogasanlæg eller en sæsonbetinget afsætning til dyrefoder, men afsætningen kan også være geografisk betinget, idet der nemt bliver for langt til aftageren på grund af restproduktets lave pris. Enkelte restprodukter er så proteinrige (f.eks. raps presserest) eller fiberholdige (roepulp), at de benyttes i foderproduktionen. Nogle restprodukter er tørre, men en del er meget våde (op til 80 % vand), og det betyder, at de ikke er lagerstabile, og at de eventuelt skal tørres før anvendelsen. Nogle restprodukter er blevet spredt på landbrugsjord, men ligger i flere tilfælde over grænsen for tungmetalindhold (cadmium). Der er i få tilfælde eksport som brændsel til udenlandske kraftværker. I de tilfælde hvor der ikke kan findes anden anvendelse, betaler virksomhederne affaldsforbrændings- eller deponiafgift.

Den samlede årlige tonnage i Danmark af biomasserestprodukter udgør ca. 400.000 tons tørstof (TS), som er spredt på mange virksomheder. Der er nogle få store samlede tonnager, f.eks. korn- og frøafrens. De restprodukter der er blevet undersøgt, omfatter: frø- og kornafrens, sheaskrå, kaffeaffald, solsikke-skaller, ærteskaller, tobaksaffald, raps presserest, kakaoaffald, olivenstenaffald, mask fra bryggerier, kariten (naturgummi fra shea), roepulp, tangaffald (carragenanaffald), pektinaffald og kartoffelaffald. Et enkelt produkt der normalt ikke findes i Danmark, er også blevet undersøgt, nemlig Empty Fruit Bunch (EFB), der er frøstanden fra oliepalmen. EFB er et meget stort affaldsproblem i Sydøstasien. Følgende virksomheder er blevet forespurgt og/eller har leveret råvarer til projektet:

Aarhus Karlshamn (sheaskrå og kariten)
Cargill og Scanola (rapsaffald, soja- og solsikke-skaller)
CP Kelco (pektin- og tangaffald (carragenanaffald))
Danisco (roepulp)
Kartoffelmelscentralen (kartoffelpulp)
House of Prince (cigaretaffald)

Skandinavisk Tobakskompagni (cigaraffald)
Carlsberg/Tuborg/Ceres (mask)
DLG, DLF Trifolium (kornafrens og frøafrens)
NLM Combineering (kaffe, kakaoaffald)
Merrild (kaffeaffald)
DanÆrt (ærteaffald)

På baggrund af drøftelserne med virksomhederne, tilgængelige analyser samt erfaringer med restprodukterne som brændsel blev 13 råvarer anskaffet i en mængde på ca. 200 kg pr. råvare. Dog kunne kariten og EFB kun fremskaffes i væsentligt mindre mængde. De 200 kg var rigeligt til at lave analyser samt forsøg med fastbrændselsflowreaktor på DTU. Til de afsluttende pelleteringsforsøg blev der anskaffet nye råvarer, idet mængder og råvaretyper først blev besluttet sent i projektet. Følgende blev anskaffet (M for materiale/råvare og A for additiv):

M1: Pektinaffald	M2: Kornafrens	M3: Mask
M4: EFB	M5: Sheaskrå	M6: Carragenanaffald
M7: Sort oliven	M8: Cigaraffald	M9: Cigarettaffald
M10: Kaffeaffald	M11: Kornafrens/kaffe	M12: Kariten
M13: Bark	A4: Kaolin	A5: CaCO ₃

Der blev formuleret 3 muligheder for, hvorledes råvarerne kunne blandes:

- 1: Råvarer med meget højt askeindhold (f.eks. tobak) kan fortyndes med træ.
- 2: P- og S-holdige råvarer kan bruges som brændbart additiv, som minimerer klorindholdet i belægninger og flyveaske.
- 3: Ubrændbare additiver (f.eks. kaolin) kan potentielt forøge askesmeltetemperaturen og minimere indholdet af klor i belægninger og flyveaske.

Bekendtgørelse nr. 638:

Naturligt nok er det gennem projektforsøget blevet diskuteret, om de anvendte råvarer og additiver kan komme under Bekendtgørelse nr. 638 som biomasseaffald. Charlotte Frische Münter i Miljøstyrelsen er derfor blevet spurgt, om man kan tilsætte bindemidler og additiver og stadig have et brændsel, der er fritaget for afgift. Svaret er gengivet nedenfor i kursiv:

Tak for din henvendelse om biomasseaffaldsbekendtgørelsen. Jeg kan oplyse, at der ikke er planer om at ændre bekendtgørelsen, og at det bilag der findes i bekendtgørelsen, er udtømmende. Udgangspunktet for bekendtgørelsen er, hvornår en given affaldsfraktion betragtes som "rent træ og halm" og dermed, at der ikke skal svares affaldsavgift, når det forbrændes. Et grundprincip i affaldsreglerne er, at der ikke skal ske fortynding eller opblanding (princip om kildeseparering så vidt muligt), og derfor er det min vurdering, at tilsætning af additiver ikke er omfattet eller nævnt i bekendtgørelsen, det afhænger af en konkret vurdering og af, hvorvidt det som tilsættes, er klassificeret som affald eller ikke. Jeg kan ikke se, at der er en konkret formulering, der problematiserer dette, men på den anden side kan jeg heller ikke se en formulering, der gør det muligt. Dette skal ses i relation til, at bekendtgørelsen opfattes som udtømmende og i den udstrækning der tilsættes f.eks. affald, der ikke er omfattet af bilaget, vil betyde, at den samlede affaldsmængde ikke vil blive omfattet af bekendtgørelsen.

Samtidig henvises til en sag i Landsskatteretten fra 2003 (J. nr. 2-6-1631-0035) om brug af kariten

som brændsel på Øster Hornum Fjernvarmeværk. Konklusionen på sagen er, at kariten er biomasseaffald, der kan afbrændes uden kommunal anvisning, og det er dermed fritaget for afgift.

3. Analyser af råvarer

Prøver på 2-3 kg af hver råvare blev udtaget repræsentativt af Teknologisk Institut. Prøverne blev sendt i lukkede plastposer til FORCE Technology, Brøndby.

Hos FORCE blev hver prøve formålet til analysefinhed (< 1 mm), dog ikke kariten (M12), som er en planteolie med flydepunkt omkring 85 °C.

Der blev bl.a. modtaget 4 prøver af tobak, betegnet "tobaksstilke", "støv fra cigarviklemaskine", "støv fra cigaretmaskine" og "støv fra bladrensning". De to førstnævnte var fra cigarproduktion og sidstnævnte fra cigaretproduktion. Af disse blev der fremstillet to prøver til analyse ved blanding af hhv. cigar- og cigaretfraktionerne. Således er den ene prøve (betegnet "cigar" M8) blandet af 80 % w/w (som modtaget) tobaksstilke og 20 % w/w (som modtaget) støv fra cigarviklemaskine. Den anden prøve (betegnet "cigaret" M9) består af 20 % w/w støv fra cigaretmaskine og 80 % w/w støv fra bladrensning. Disse blandingsforhold afspejler ifølge Teknologisk Institut omtrentligt de relevante mængdeforhold i produktionerne.

På de formalede prøver har FORCE bestemt indhold af vand (dk-TEKNIK/PVA), aske (ISO 1171, mod. 550 °C), C, H, N, S (alle ISO/TS 12902), O (beregnet som differens), Cl (PVA 411.2) samt brændværdi (ISO 1928).

Af hver prøve er der desuden fremstillet laboratorieaske ved 550 °C, dels til bestemmelse af askesmelteforløb (ved kontinuerlig metode, MAF) og dels til bestemmelse af askens hovedbestanddele ved totaloplukning/ICP. ICP blev udført af eksternt laboratorium. Asker af blandinger (recepter) er fremstillet ved afvejning af beregnede mængder formålet prøve (råvarer), som derefter er sammenblandet og forasket sammen ved 550 °C.

Askerne blev desuden analyseret ved hjælp af STA hos Kemiteknik, DTU. Resultatet af disse analyser er gengivet i afsnit 5.5.

Analyseresultaterne er samlet i Tabel 2 og 3 med undtagelse af askesmelteforløb, som nærmere omtales i afsnit 5.1. Hver biomasseråvare har fået en betegnelse Mx, hvor x er tallene 1 til 13. Eksempelvis er "Empty Fruit Bunches" (EFB) betegnet M4.

FORCE's laboratorium har noteret, at mange af askeprøverne brusede ved syretilsætning, hvilket normalt er tegn på tilstedeværelse af karbonater. Kun ved kornafrens (M2), mask (M3) og EFB (M4) er der ikke konstateret brus.

Ved beregning af recepter for blandinger er det nødvendigt, at askebestanddelene summerer til 100%. I de tilfælde hvor der ikke er konstateret brus ved syretilsætning, sættes "CO₂" (karbonater) lig med 0 og "andet" beregnes som differensen (100% - summen af øvrige bestanddele). I de tilfælde hvor der faktisk er konstateret brus, sættes "andet" = 0, og "CO₂" beregnes som differens. En yderligere diskussion af biomasserne på grundlag af brændselsanalyserne er givet i afsnit 4.1, 4.2 og 5.3.

Askeanalyse (% w/w af asketørstof)	Materiale												
	Pektin (M1) 406358	Kornafrens (M2) 406411	Mask (M3) 406412	EFB (M4) 406413	Sheaskrå (M5) 406414	Carragenan (M6) 406415	Oliven (M7) 406416	Cigar (M8) 406443	Cigaret (M9) 406444	Kaffe (M10) 6495	Mix (M11) 6496	Kariten (M12) 6508	
SiO2	25.0	62.0	38.0	30.0	11.0	13.0	17	40.0	31.0	21.0	15.0	1.7	
Al2O3	1.7	1.5	0.2	1.9	1.5	2.4	2.5	8.5	4.9	3.1	4.5	0.0	
Fe2O3	3.1	0.8	0.7	2.3	0.9	1.2	2.2	3.8	2.0	3.0	4.0	0.6	
CaO	32.0	7.8	8.6	8.3	4.7	31.0	11	17.0	16.0	8.8	13.0	0.3	
MgO	1.3	2.6	8.8	3.4	5.9	7.4	7.1	4.9	5.4	6.0	6.3	0.1	
Na2O	6.9	0.9	0.6	2.8	0.3	5.1	0.55	1.0	0.7	0.7	0.2	61.0	
K2O	5.1	18.0	1.8	31.0	51.0	6.3	36	11.0	23.0	33.0	34.0	0.3	
SO3	5.2	2.3	0.1	3.7	7.6	18.0	2.9	2.8	3.5	4.2	4.5	0.3	
P2O5	10.0	5.8	33.0	8.8	7.7	1.4	4.9	2.3	3.0	7.3	3.2	0.9	
CO2	9.6	0.0	0.0	0.0	9.3	14.1	15.7	8.2	10.1	12.5	14.8	34.7	
TiO2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.1	0.6	0.4	0.4	0.5	0.0	
Andet	0.0	-1.8	8.2	7.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Sum	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
Brændselsanalyse (% w/w som modtaget)													
Fugt	12.0	10.3	11.4	7.0	13.0	12.5	15.5	10.4	9.1	11.3	14.2	0.4	
Aske v. 550 gr.C	1.2	9.0	3.3	4.6	4.8	8.6	8.1	32.1	20.6	5.7	7.0	0.6	
C	42.3	39.9	44.5	43.8	43.3	39.2	42.9	29.5	34.6	43.7	40.8	83.9	
H	5.5	5.2	6.0	5.7	4.6	5.0	4.8	3.6	4.3	5.7	5.2	11.9	
O	38.0	34.1	31.6	37.2	31.6	33.6	27.3	20.7	27.8	30.9	30.4	3.0	
N	0.9	1.1	2.9	1.3	2.3	0.3	1.1	2.4	2.3	2.2	2.2	0.1	
Cl	0.03	0.25	0.01	0.35	0.07	0.26	0.24	0.90	1.00	0.39	0.04	0.05	
S	0.09	0.15	0.22	0.13	0.24	0.69	0.13	0.39	0.30	0.14	0.19	0.04	
Sum	100.0	100.0	99.9	100.1	99.9	100.1	100.1	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
Øvre BV, s.m. (MJ/kg)	17.24	16.00	19.24	18.01	17.05	15.68	17.79	11.83	13.81	18.46	16.83	41.42	
Nedre BV, s.m. (MJ/kg)	15.77	14.65	17.68	16.64	15.75	14.32	16.40	10.81	12.67	16.97	15.39	38.88	
Cl i vandfri prøve (%)	0.04	0.28	0.01	0.38	0.08	0.30	0.28	1.00	1.10	0.44	0.04	0.05	
S i vandfri prøve (%)	0.10	0.17	0.25	0.14	0.28	0.79	0.15	0.44	0.33	0.16	0.23	0.04	
Aske i vandfri prøve (%)	1.4	10.1	3.7	4.9	5.5	9.8	9.6	35.9	22.6	6.4	8.2	0.6	

Tabel 3: Analyser af projektets 12 råvarer. Bemærk kommentarerne vedrørende CO₂ og "andet" i afsnit 3.

Askeanalyse (% w/w af asketørstof)	Bark (M13)	Kaolin (A4)	CaCO ₃ (A5)
	404829		
SiO ₂	33.0	45.7	
Al ₂ O ₃	6.6	34.8	
Fe ₂ O ₃	3.4	0.0	
CaO	22.0	0.1	56.0
MgO	3.0	0.2	
Na ₂ O	1.1	0.1	
K ₂ O	6.3	1.3	
SO ₃	1.0	0.0	
P ₂ O ₅	1.7	0.1	
CO ₂	21.5	13.1	44.0
TiO ₂			
Andet	0.4	4.6	
Sum	100.0	100.0	100
Brændselsanalyse (% w/w som modtaget)			
Fugt	5.7	1.5	5.0
Aske v. 550 gr.C	2.8	98.5	95.0
C	47.8		
H	5.9		
O	37.6		
N	0.2		
Cl	0.0		
S	0.0		
Sum	100.0	100.0	100.0
Øvre BV, s.m. (MJ/kg)	19.27	0	0
Nedre BV, s.m. (MJ/kg)	17.88	0	0
Cl i vandfri prøve (%)	0.02		
S i vandfri prøve (%)	0.03		
Aske i vandfri prøve (%)	2.9		

Tabel 4: Analyse af bark (råvare M13) samt estimeret sammensætning af additiverne kaolin og kalksten (foderkridt)

4. Opstilling af recepter og fremstilling af blandinger

4.1 Receptberegning

Råvarernes askesammensætning

Af Tabel 3 og 4 fremgår det, at de 13 råvarer – som forventet – er meget forskellige med hensyn til askeindhold og -sammensætning.

Askeindholdet i prøverne varierer fra 0,6 % i kariten (M12) til 32 % (på modtaget basis) i tobaksblandingen fra cigarproduktion (M8). Tobaksblandingen fra cigaretproduktion indeholder 21 % aske. Vandindholdene var relativt ensartede fra 7-16 %, bortset fra kariten med 0,4 %.

Generelt udgør oxider af grundstofferne Si, Ca, Mg, Na eller K hovedparten af askerne – på konventionel oxidbasis omkring 70 % w/w. Da Ca antageligt foreligger som CaCO_3 , udgør disse snare omkring 80 % w/w.

Askerne af pektin (M1) og carragenan (M6) udskiller sig ved et relativt højt indhold af Ca (hhv. 32 og 31 % som CaO) og Na (hhv. 6,9 og 5,1 % som NaO). Til gengæld er indholdet af K moderat. Carragenasken har desuden et meget højt indhold af S (18 % som SO_3). Asken af mask (M3) indeholder usædvanligt meget P (33 % som P_2O_5). På basis af brændselsanalyserne bedømmes mask (M3) og carragenan (M6) som værende rimelige i forhold til halm, set fra et belægningssynspunkt. Askesammensætningen af mask er relativt sjælden, og umiddelbart er belægningsegenskaberne svære at bedømme.

Askerne af kornafrens (M2), EFB (M4), cigar (M8) og cigaret (M9) er rige på Si, K og Cl og vurderes at give problematiske belægnings på niveau med halm. Askerne fra biomasserne M5, M7, M10, M11 og M12 er meget rige på alkalimetall og har relativt lave koncentrationer af de øvrige askedannende elementer. Højdespringeren mht. K er aske af sheaskrå, som indeholder 42 % K (51 % som K_2O). Asken af kornafrens har et højt indhold af Si (62 % som SiO_2).

Bemærkelsesværdige tal i øvrigt er indholdet af Al i aske af tobaksstilke/støv (M8) fra cigarviklemaskine (8,5 % som Al_2O_3) samt kariten (M12) med 45 % Na i asken (61 % som Na_2O). Da karitenasken brusede ved syretilsætning, består denne antageligt af natriumkarbonat.

Valg af blandinger

Udgangspunktet for overhovedet at interessere sig for brændselsblandinger er, at disse potentielt kan have bedre askeegenskaber end brændslerne hver for sig. Det kan fx være mht. dannelse af belægnings/fouling, emissioner (fx af partikler) og/eller muligheder for genanvendelse af asken. Mulige eksempler på fordelagtige brændselsblandinger eller additivtilsætninger kan være følgende:

- at et højjaskebrændsel blandes med et lavaskebrændsel, så et brændsel med acceptabelt askeindhold opnås
- at et brændsel rigt på kalium og klor tilsættes et additiv, der kan sikre, at kalium bindes i stoffer med et højt smeltepunkt, der giver relativt små problemer med belægningdannelse, og at klor afgives til gasfasen, hvorved korrosionsproblemer minimeres
- at det brændsel rigt på kalium og klor blandes med et brændsel, der kan fungere som et additiv.

I nærværende projekt er der 23 recepter, heraf 10 blandinger af 2 komponenter, dvs. binære blandinger. En blanding af et brændsel og et additiv opfattes her også som en binær blanding.

Det blev besluttet at forsøge at forbedre hhv. M4 og M10 ved tilsætning af 4% w/w kaolin samt M5 ved tilsætning af 5% foderkridt, i alt 3 blandinger.

Endvidere blev det besluttet at forsøge at forbedre M5 med hhv. M3 (2 blandingsforhold) og M6 (1 blanding), M7 med M1 (1 blanding), samt M10 med M8 (1 blanding). Endelig besluttedes det at forsøge at forbedre hhv. M2 og M4 med M13, i alt 2 blandinger.

4.2 Strategi for sammensætning af blandinger

Sammensætningen af blandingerne er vist i Tabel 5 og er beregnet ud fra de kemiske analyser af råvarerne og de ønskede blandingsforhold (recepter). Som nævnt er blandingerne binære, selvom der i praksis ikke var noget i vejen for at producere blandinger af flere råvarer. Binære blandinger blev valgt for overskuelighedens skyld og af hensyn til tolkningen af resultaterne.

Strategien for valg af blandingsforhold var at øge molforholdene Ca/K, Si/K og Al/K (sidstnævnte med tilsats af kaolin), idet askeindholdene i blandingerne samtidig holdtes under ca. 10% w/w, tør basis. Endvidere indgik indholdene af P, S og Cl i overvejelserne.

De valgte recepter fremgår af Tabel 5. Nomenklaturen skal forstås sådan, at fx 75M3M5 er 75 % w/w M3 og resten M5.

Tabel 6 viser den beregnede sammensætning af blandingerne.

Tabel 7 viser de beregnede molforhold for råvarer og blandinger. Desuden vises askeindhold på tør basis og forholdene: S i brændsel (%)/askeindhold (%) samt Cl i brændsel (%)/askeindhold (%).

Visualisering af askernes sammensætning

Figur 1 og Figur 2 illustrerer sammensætningerne af hhv. råvareasker og blandingsasker ved hjælp af trekantsdiagrammet ($\text{CaO} + \text{MgO}$, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$, SiO_2). Disse oxider udgør i de fleste tilfælde 60-70% w/w af askernes masse, når Ca regnes som CaO. I brændslet (og i laboratorieasken) foreligger Ca primært som CaCO_3 , som kalcinerer (danner CaO) i forbrændingsprocessen. Ved afbildning i trekantsdiagrammet er normeret til 100%.

Trekantsdiagrammet har tidligere vist sig at være anvendeligt ved vurdering af bioaskers tendens til slaggedannelse (ref.: Quality Characteristics of Biofuel Pellets, PSO 1996, 2002). Eksempelvis vises i Figur 3 placeringen af aske af forskellige brændselspiller i det tilsvarende trekantsdiagram ($\text{CaO} + \text{MgO}$, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$, SiO_2). ”Rørgræs 1” gav gode resultater ved fyringsforsøg i 30 kW riste-fyret Reka-kedel, mens ”Rørgræs 2” gav store problemer med slaggedannelse. Tilsvarende gav R1-R3 store problemer med slaggedannelse, mens forbrænding af pillerne R6-R8 resulterede i en løs, uproblematisk aske. Litteraturdata for systemet (CaO , K_2O , SiO_2) underbygger konklusionen om, at det er i området omkring R1, R2, R5 og Arun 2, at de lavest smeltende eutektika findes. Det skal dog bemærkes, at disse overvejelser hovedsageligt er relevante for bundasker i risteforbrændingsanlæg.

Ved at sammenholde Figur 1 og Figur 3 antydes det, at råvarerne M2 (kornafrens), M4 (EFB), M8¹ (cigartobak) og M9¹ (cigarettobak) kan være problematiske. Dette gælder kun risikoen for slaggedannelse, idet tilbøjelighed til fouling ikke kan vurderes på denne måde. Sammenholdes tilsvarende Figur 2 og Figur 3 ses det, at visse af blandingerne også kan vise sig at være problematiske.

¹ De to tobaksprøver har et ret højt indhold af Al, som modvirker nævnte eutektika. På grund af tobaksprøvernes høje askeindhold er det ikke realistisk at anvende disse ublandet. Trekanstadiagrammet ($\text{CaO} + \text{MgO}$, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$, SiO_2) kan ikke anvendes ved højere koncentrationer af Al end ”normalt” for biomasse (dermed heller ikke ved additivering med fx kaolin).

Nr.	Recept	Materiale (% w/w som modtaget)													
		Pektin (M1) 406358	Kornaf- rens (M2) 406411	Mask (M3) 404612	EFB (M4) 406413	Sheaskrå (M5) 406414	Carrage- nan (M6) 406415	Oliven (M7) 406416	Cigar (M8) 406443	Cigaret (M9) 406444	Kaffe (M10) 6495	Kariten (M12) 6508	Bark (M13) 404829	Kaolin (A4)	CaCO ₃ (A5)
M14	75M3M5			75,0		25,0									
M15	75M6M5					25,0	75,0								
M16	50M3M5			50,0		25,0									
M17	25M4M13				25,0							75,0			
M18	25M2M13		25,0									75,0			
M19	96M4A4				96,0								4,0		
M20	95M5A5					95,0									5,0
M21	96M10A4													4,0	
M22	15M8M10							15,0							
M23	75M1M7	75,0							25,0						

Tabel 5. Valgte recepter for blandinger og additiver

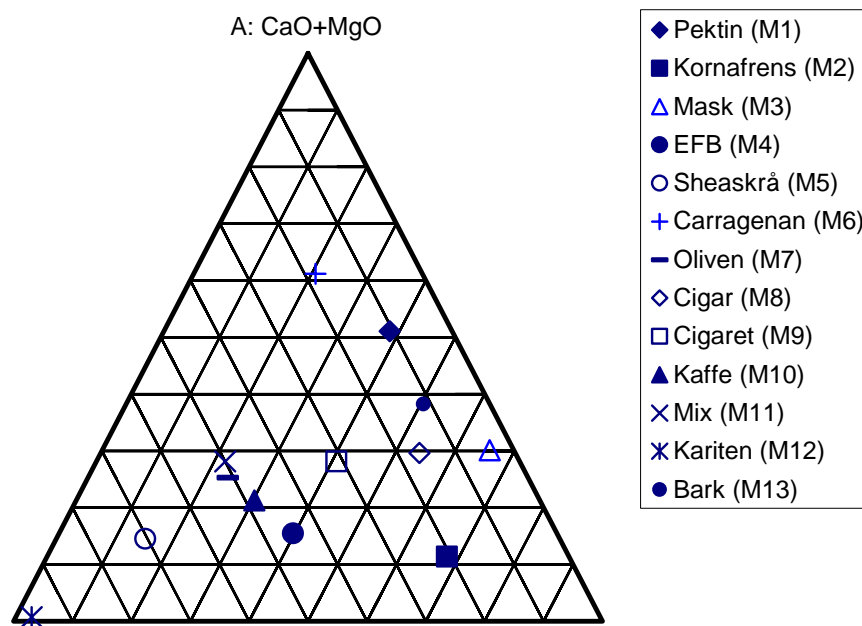
Askesammensætning	Blanding (% w/w af asketørstof)									
	75M3M5	75M6M5	50M3M5	25M4M13	25M2M13	96M4Kao	95M5Ca	96M10Kao	15M8M10	75M1M7
SiO2	29.2	12.7	22.0	31.9	48.0	37.4	5.4	31.3	30.5	19.5
Al2O3	0.6	2.3	1.0	4.9	4.0	17.4	0.7	16.4	5.8	2.3
Fe2O3	0.8	1.1	0.8	3.0	2.1	1.2	0.4	1.7	3.4	2.5
CaO	7.3	26.9	6.3	17.2	14.7	4.4	30.9	5.2	12.9	17.5
MgO	7.9	7.2	7.1	3.1	2.8	1.9	2.9	3.6	5.5	5.3
Na2O	0.5	4.3	0.4	1.7	1.0	1.5	0.1	0.4	0.8	2.5
K2O	17.9	13.3	31.0	15.0	12.4	17.0	25.0	19.7	22.0	26.5
SO3	2.5	16.4	4.5	2.0	1.7	2.0	3.7	2.4	3.5	3.6
P2O5	24.7	2.4	18.0	4.2	3.8	4.7	3.8	4.3	4.8	6.5
CO2	3.0	13.3	5.5	13.9	10.4	6.2	27.0	12.8	10.3	13.8
TiO2	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.5	0.1
Andet	5.5	0.0	3.4	3.0	-0.8	6.2	0.0	1.9	0.0	0.0
Sum	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Brændselsanalyse	Blanding (% w/w som modtaget)									
	75M3M5	75M6M5	50M3M5	25M4M13	25M2M13	96M4Kao	95M5Ca	96M10Kao	15M8M10	75M1M7
Fugt	11.8	12.6	12.2	6.0	6.9	6.8	12.6	10.9	11.2	12.9
Aske v. 550 gr.C	3.7	7.7	4.1	3.3	4.4	8.4	9.3	9.4	9.7	2.9
C	44.2	40.2	43.9	46.8	45.8	42.0	41.1	42.0	41.6	42.5
H	5.7	4.9	5.3	5.9	5.7	5.5	4.4	5.5	5.4	5.3
O	31.6	33.1	31.6	37.5	36.7	35.7	30.0	29.7	29.4	35.3
N	2.8	0.8	2.6	0.5	0.4	1.2	2.2	2.1	2.2	0.9
Cl	0.03	0.21	0.04	0.10	0.08	0.34	0.06	0.37	0.47	0.09
S	0.23	0.58	0.23	0.05	0.06	0.12	0.13	0.13	0.18	0.10
Sum	99.7	99.3	99.7	99.9	99.9	99.6	99.6	99.5	99.4	100
HHV, a.r. (MJ/kg)	18.7	16.0	18.1	19.0	18.5	17.3	16.2	17.7	17.5	17.4
LHV, a.r. (MJ/kg)	17.2	14.7	16.7	17.6	17.1	16.0	15.0	16.3	16.0	15.9
Estimated HHV, a.r. (MJ/kg)	18.7	16.3	18.2	19.3	18.9	17.2	16.2	17.8	17.6	17.4

Tabel 6. Askesammensætning og brændselsanalyse

	Molforhold i asketørstof											
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
S/K	0.60	0.08	0.03	0.07	0.09	1.68	0.05	0.15	0.09	0.07	0.08	0.55
P/K	1.30	0.21	12.17	0.19	0.10	0.15	0.09	0.14	0.09	0.15	0.06	2.11
Si/K	3.84	2.70	16.55	0.76	0.17	1.62	0.37	2.85	1.06	0.50	0.35	4.60
S/(Na+K)	0.20	0.07	0.02	0.06	0.09	0.75	0.05	0.13	0.09	0.07	0.08	0.00
P/(Na+K)	0.43	0.20	8.21	0.17	0.10	0.07	0.09	0.12	0.08	0.14	0.06	0.01
Si/(Na+K)	1.26	2.51	11.17	0.67	0.17	0.73	0.36	2.50	1.01	0.48	0.34	0.01
Cl i brændsel/(Na+K)	0.24	0.19	0.18	0.29	0.04	0.29	0.11	0.30	0.27	0.27	0.02	0.11
S i brændsel/(Na+K)	0.71	0.13	3.67	0.12	0.14	0.84	0.06	0.11	0.09	0.11	0.12	0.11
Al/K	0.31	0.08	0.08	0.06	0.03	0.35	0.06	0.71	0.20	0.09	0.12	0.14
Ca/K	5.27	0.36	4.01	0.22	0.08	4.13	0.26	1.30	0.58	0.22	0.32	0.93
Aske (% , tør)	1.36	10.03	3.72	4.95	5.52	9.83	9.59	35.83	22.66	6.43	8.16	0.60
Cl i brændsel/Aske*100	2.83	2.78	0.36	7.61	1.40	3.02	2.96	2.80	4.85	6.84	0.50	7.83
S i brændsel/Aske*100	7.58	1.67	6.67	2.83	5.00	8.02	1.60	0.93	1.46	2.46	2.71	6.67

	Molforhold i asketørstof										
	M13	75M3M5	75M6M5	50M3M5	25M4M13	25M2M13	96M4Kao	95M5Ca	96M10Kao	15M8M10	75M1M7
S/K	0.09	0.08	0.72	0.09	0.08	0.08	0.07	0.09	0.07	0.09	0.08
P/K	0.18	0.92	0.12	0.39	0.19	0.21	0.18	0.10	0.14	0.14	0.16
Si/K	4.11	1.28	0.75	0.56	1.66	3.05	1.72	0.17	1.24	1.08	0.58
S/(Na+K)	0.07	0.08	0.48	0.08	0.07	0.07	0.06	0.09	0.07	0.09	0.07
P/(Na+K)	0.14	0.88	0.08	0.38	0.16	0.18	0.16	0.10	0.14	0.14	0.14
Si/(Na+K)	3.25	1.23	0.50	0.55	1.42	2.71	1.52	0.17	1.20	1.02	0.50
Cl i brændsel/(Na+K)	0.12	0.05	0.18	0.04	0.24	0.17	0.28	0.04	0.26	0.28	0.13
S i brændsel/(Na+K)	0.16	0.48	0.56	0.26	0.13	0.14	0.11	0.08	0.10	0.12	0.17
Al/K	0.97	0.03	0.16	0.03	0.30	0.30	0.95	0.03	0.77	0.24	0.08
Ca/K	2.93	0.34	1.70	0.17	0.96	1.00	0.22	1.04	0.22	0.49	0.55
Aske (% , tør)	2.97	4.17	8.76	4.61	3.46	4.67	8.96	10.65	10.56	10.87	3.36
Cl i brændsel/Aske*100	0.71	0.70	2.77	0.98	3.15	1.78	4.02	0.68	3.98	4.83	2.92
S i brændsel/Aske*100	0.86	6.12	7.55	5.68	1.55	1.28	1.49	1.44	1.43	1.84	3.44

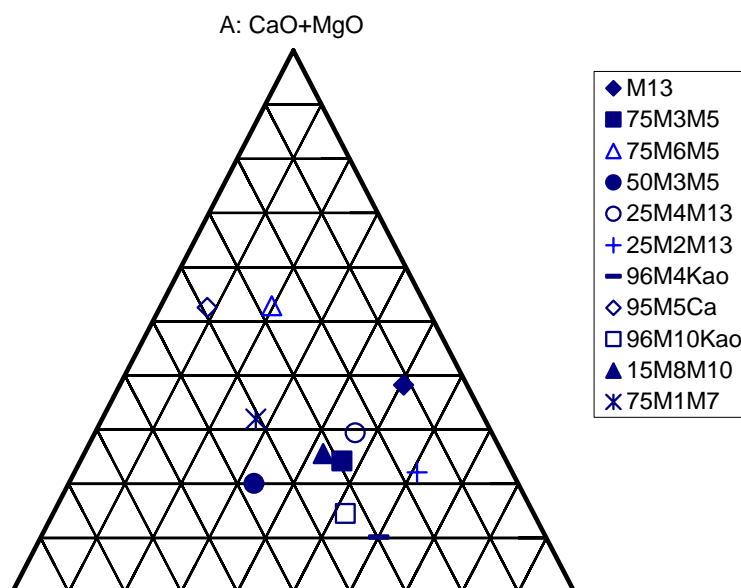
Tabel 7. Molforhold i asketørstof



B: Na₂O + K₂O

C: SiO₂

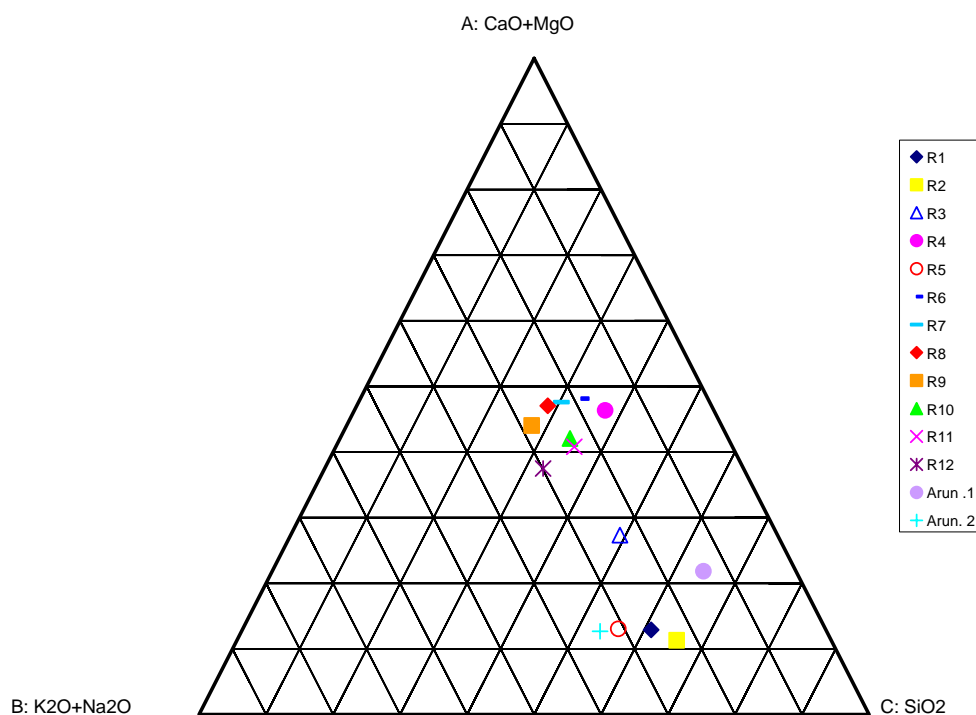
Figur 1: Visualisering af råvarers askesammensætning af betydning for slaggedannelse.



B: Na₂O + K₂O

C: SiO₂

Figur 2: Visualisering af blandingers askesammensætning af betydning for slaggedannelse.



Figur 3: Visualisering af "receptasker" R1-R12 fra projektet "Quality Characteristics of Biofuel Pellets" (2002) samt rørgræs (*Arundinacea*) 1 og 2 fra "Energiafgrødeprogrammet 1997-2000".

4.3 Fremstilling af blandinger i Sdr. Stenderup

Ud af 23 recepter er der udvalgt 6 råvarer og 2 blandinger til forsøg på Fastbrændselsflowreaktoren på CHEC hos DTU. Årsagen til at der udvælges 6 råvarer er, at der ikke er noget kendskab fra tidligere projekter til de 6 råvarers adfærd i fastbrændselsflowreaktoren. For at kunne vurdere blandinger er det nødvendigt med et basalt kendskab til råvarer.

Brændslerne er 6 ublandede:

- M1 Pektinaffald
- M3 Mask, tørret
- M4 Palmeaffald (EFB)
- M5 Sheaskrå
- M6 Carragenanaffald
- M7 Olivensten, sort

Blandede brændsler:

- 75M6M5 (75 % carragenanaffald + 25 % sheaskrå)
- 75M3M5 (75 % mask, tørret + 25 % sheaskrå)

For at brændslerne kunne anvendes på fastbrændselsflowreaktoren skulle følgende kvalitetskrav overholdes:

Vandindhold: maks. 10 %

Partikelstørrelse: 100 % mindre end 700 µm og 60 % mindre 300 µm.

Der er fremstillet minimum 20 kg af hver råvare/blanding. De udvalgte råvarer er formålet på forsøgsanlægget i Sdr. Stenderup.

Til 1. formaling er anvendt en Champion slaglemølle (37 kW motor, 2950 rpm, periferihastighed 110 m/sek.). Der var monteret et Ø1,0 mm sold med underliggende Ø12 mm støttesold.

Til finmaling er anvendt en stiftmølle (Alpine 160Z kolloplex) ved 18900 rpm.

Der er stor forskel på, hvor lette de enkelte råvarer er at formale ned til det ønskede niveau. Det var kun sheaskrå i melform, der var egnet til direkte formaling i stiftmøllen. For de øvrige råvarer var det nødvendigt først at formale på slaglemøllen dels for at få varen ind i stiftmøllen og dels for at opnå den ønskede partikelstørrelse. Kommentarer fremgår af oversigten for den enkelte råvare (se Bilag 1).

4.4 Håndtering i forhold til træ, kul og halm

Vurdering i forhold til kul, træ og halm

Når et kommercielt kraftværkselskab vurderer potentialer i nye brændsler, er der en række størrelser, som må indgå i en samlet vurdering. Som eksempler kan nævnes tilgængelige mængder, pris, håndtering, forbrændingsegenskaber, belægninger og korrosion samt restproduktsegenskaber.

I biomasseaffaldsbekendtgørelsen er der listet 16 typer af biomasseaffald. Det er disse og kun disse, der kan anvendes som brændsel i energiproducerende anlæg, som ikke er klassificerede som affaldsforbrændingsanlæg. En del af de kraftværksejede anlæg kan eller vil let kunne bringes til opfyldelse af de tekniske krav fx med hensyn til temperatur og opholdstid. Ud over tekniske krav er der også et krav om, at værk der afbrænder affald, skal udskilles i selskab, som skal hvile i sig selv.

Brændselsprisen kan ikke betragtes alene men må ses i sammenhæng med omkostninger til transport, håndtering og evt. forbehandling samt udgifter i forbindelse med bortskaffelse af restprodukter. De meget høje askeandele der er i de to tobaksaffald, som er analyseret i dette projekt, vil måske kunne bevirke udgifterne til deponi, hvilket kan betyde, at disse to brændsler er økonomisk uinteressante. Den direkte brændselspris er forbundet med en stor usikkerhed og svinger ofte en del. Desuden varierer den tilgængelige mængde af specielt biomassebaserede brændsler meget fra år til år. For biomasseaffald som stammer fra en eller ganske få leverandører, er prisen særdeles usikker pga. muligheden for alternative anvendelsesmuligheder.

Så længe et anlæg ikke skal ombygges eller kraftigt omreguleres for at kunne anvende et givet brændsel, er mængden af pågældende brændsel ikke så afgørende. Hvis man ved en prøvfyning har konstateret, at brændslet er velegnet, kan det efterfølgende anvendes enten som tilsatsfyning eller kampagnefyning, når prisen er gunstig. Dette skal dog koordineres med eventuelle langtidskontrakter for andre brændsler.

Forskellige brændsler stiller forskellige krav til lagring. Ikke alle biomassebrændsler er egnede til at blive lagret udendørs. Det vil sige, at der skal være udsigt til et tilsvarende økonomisk potentiale i et nyt brændsel, hvis det kræver, at der opføres nye lagringsfaciliteter. Desuden kan der være arbejds-

miljøforhold som f.eks. støv og skimmelsvampe, som der skal tages højde for, hvis der anvendes et nyt brændsel.

Anvendelse af nye brændsler er forbundet med forskellige risici som korrosion, belægningsdannelse, deaktivering af katalysator samt forurening af restprodukter ved samfyring af et andet brændsel. Disse risici kan til dels vurderes ud fra det pågældende brændsels askeandel og sammensætningen af asken. Prøvefyringer vurderes dog at være nødvendige, før et nyt brændsel kan anvendes i større mængder. Eventuelle uheldige egenskaber vil i nogle tilfælde kunne reduceres ved at samfyre med et andet brændsel som træ, halm eller evt. kul.

Korrosions- og belægningsproblemer vil kunne elimineres ved at sænke damptemperaturen. Det har selvfølgelig den betydning, at det samtidigt reducerer elvirkningsgraden for anlægget. Men det er en mulighed, som kan overvejes, hvis et besværligt brændsel er tilstrækkeligt billigt eller evt. har en negativ pris. Det vil dog kræve, at der kan forventes en stabil leverance af det pågældende brændsel.

5. Laboratorieforsøg og analyse

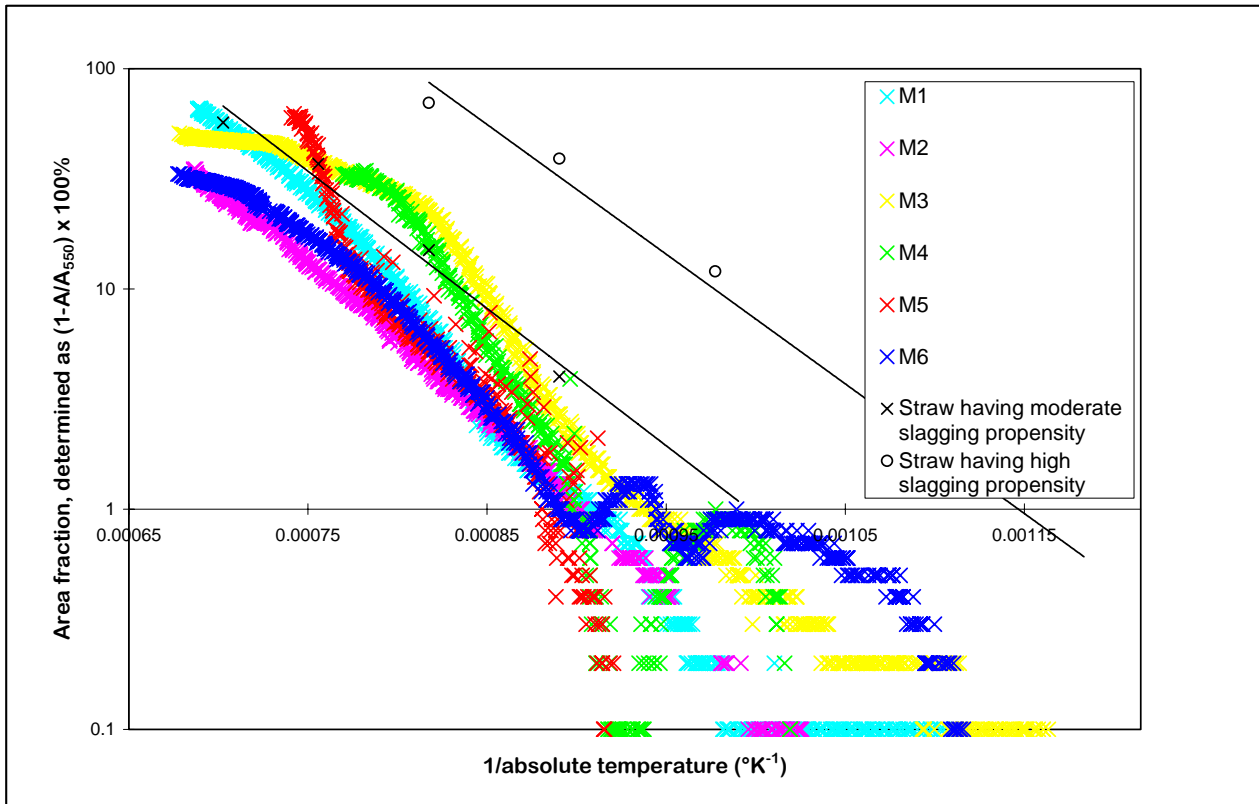
5.1 MAF askesmelteforløb

FORCE Technology har udviklet en metode til bestemmelse af askesmelteforløb, som benævnes "Melt Area Fraction" (MAF). Metoden er specielt egnet til bioasker, der typisk udviser begyndende smeltning ved relativt lave temperaturer. Ved MAF-metoden anvendes et stereomikroskop (ca. 100X forstørrelse), som er udstyret med varmebord (max. 1200 gr.C) og digitalt kamera. Under opvarmningen af prøven (10 gr.C/min), typisk i nitrogenatmosfære, tages et billede hvert 5 sekund. Under smelteprocessen konverteres fast stof til transparent smelte og arealet A af den resterende prøves "silhuet" beregnes ved hjælp af billedbehandling. Resultatet er en kontinuerlig kurve, hvor arealandelen $(1-A/A_{550}) \times 100 \%$ angives som funktion af temperaturen. A_{550} er arealet ved begyndelsestemperaturen 550 gr.C. En reduktion af prøvearealet A er dog ikke altid ensbetydende med smeltesdannelse. Typisk forekommer i den begyndende fase en vis "skrumpning" af askeprøven, svarende til en MAF-værdi på 5-10%. Som resultat fås, udover MAF-kurven og muligheden for digital animering af smelteforløbet, en kvalitativ vurdering af askens indhold af flygtigt salt, som kondenserer på varmebordets dækglas. I ekstreme tilfælde kan analysen kun gennemføres uden dækglas, da kondensatet begrænser lysgennemgangen.

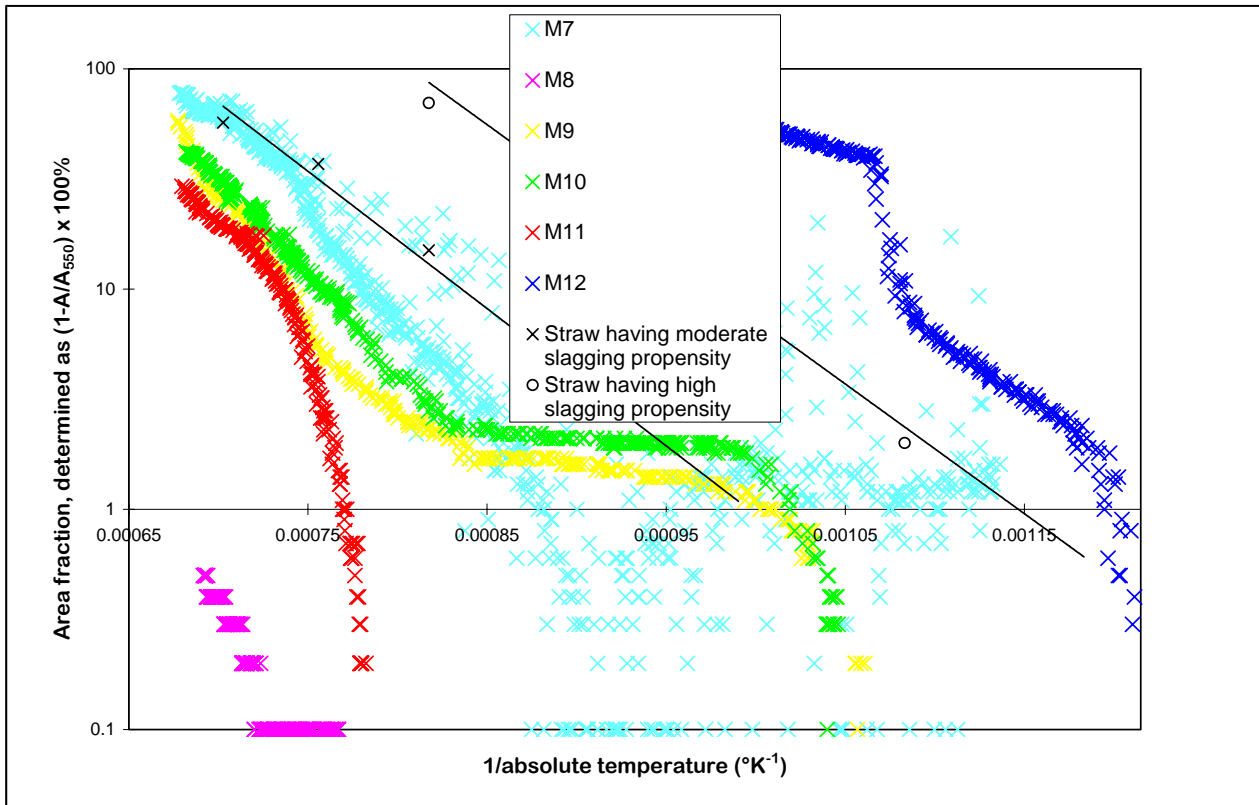
Der er bestemt askesmelteforløb ved kontinuerlig metode (MAF) på alle laboratorieasker. Resultaterne er samlet på Figur 4 og 5 (råvarer) samt Figur 6 og 7 (blandinger). På figurerne er indlagt to linjer til angivelse af områder, hvor der for halmasker erfaringsmæssigt optræder hhv. moderat og stærk slaggedannelse.

Af råvarerne er det kun kariten (M12), der er på niveau med eller værre end stærkt slaggedannende halm. Som tidligere nævnt skyldes dette det høje indhold af Na_2CO_3 . De øvrige råvarer bedømmes som på niveau med eller mindre slaggende end moderat halm. Analysen af oliven (M7) var problematisk pga. en kraftig afsætning af kondensat (normalt salte) på mikroskopvarmebordets dækglas. Dette gjaldt i øvrigt også M4, M5, M10 og M11. Cigar (M8) har en (for biomasse) ekstremt lidt smeltende aske. Dette skyldes sandsynligvis det relativt høje indhold af Al.

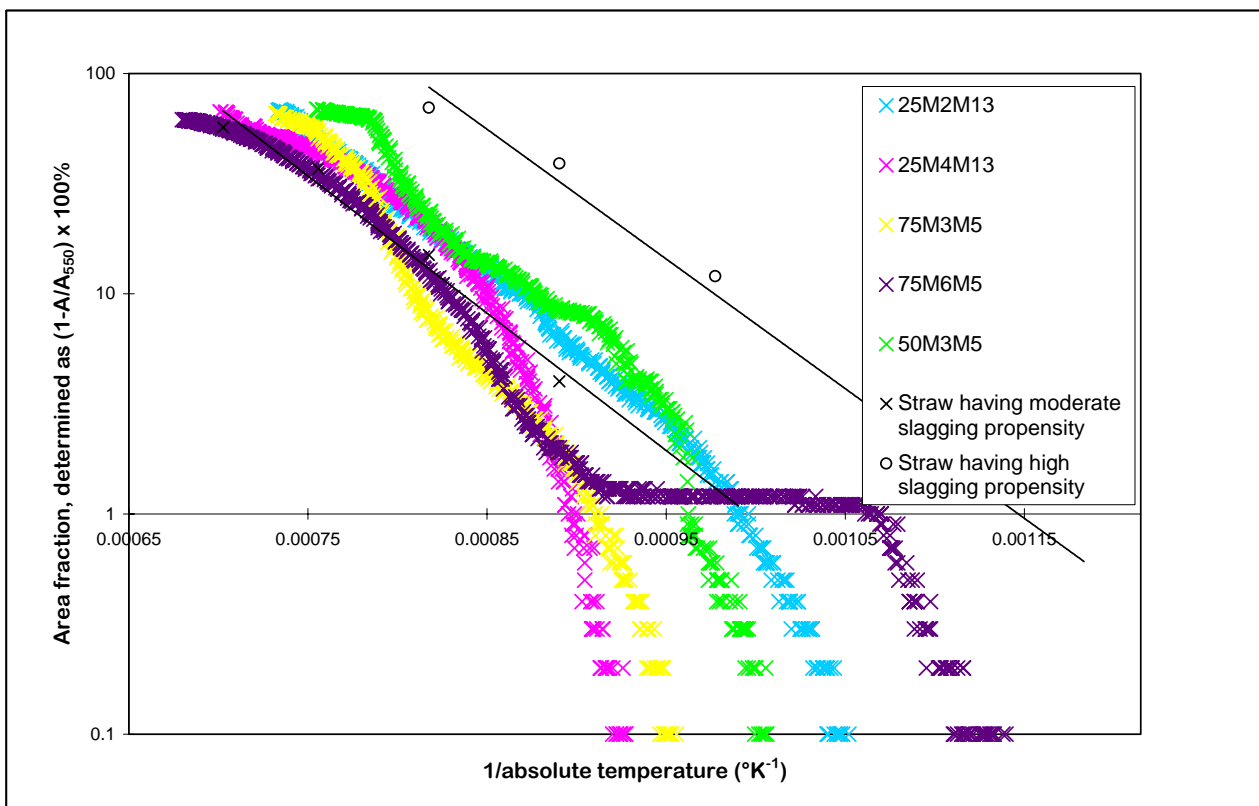
Blandingerne falder generelt ikke bedre ud end råvarerne. Et ekstremt eksempel er 15M8M10, hvor M8 som nævnt er super og M10 (kaffe) rimelig. Blandingen har væsentligt dårligere egenskaber end råvarerne mht. tidlig smeltedannelse. Der er dog ikke observeret kraftig afsætning af kondensat med blandingsaskerne. Tilsats af 4% kaolin har markant effekt med M10, hvorimod effekten ikke er signifikant sammen med M4 (EFB). Tilsats af 5% foderkridt har nogen effekt på M5 (sheaskrå).



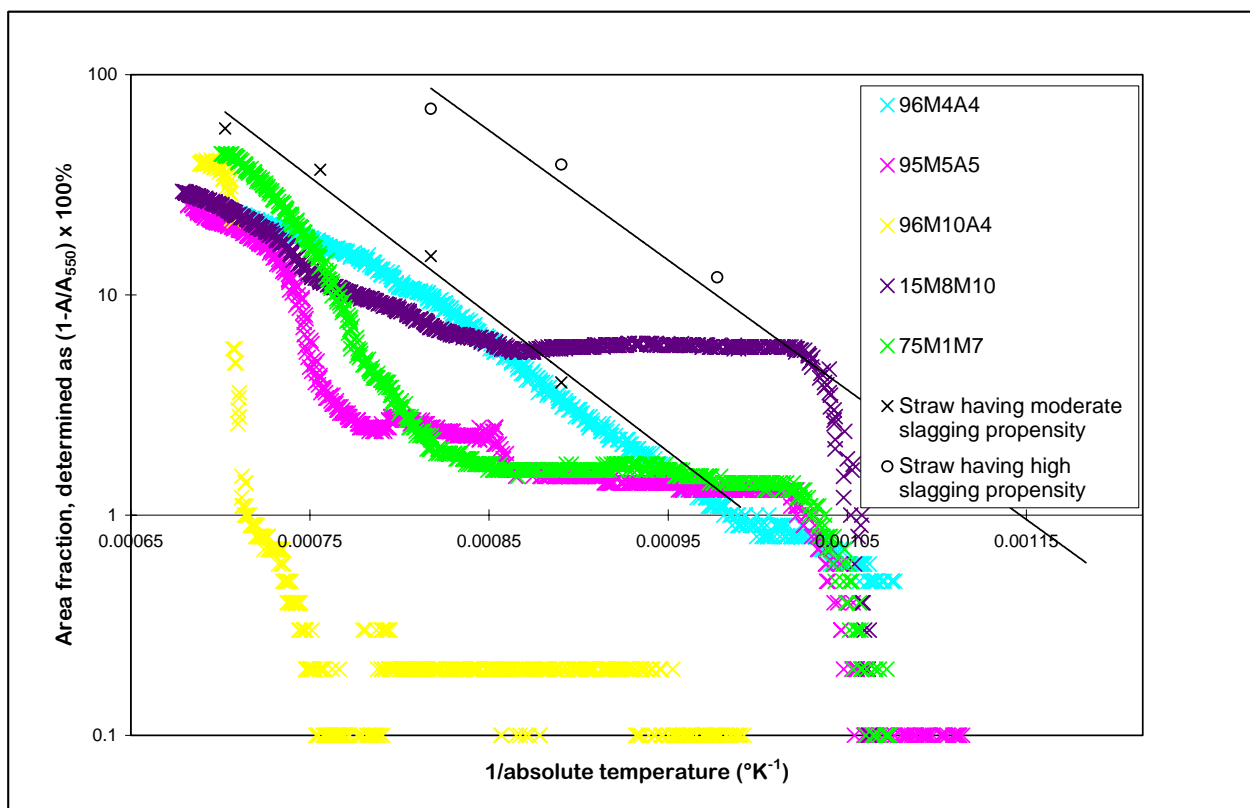
Figur 4: MAF smelteforløb for aske af råvarerne M1-M6.



Figur 5: MAF smelteforløb for asker af råvarerne M7-M12.



Figur 6: MAF smelteforløb for 5 af blandingerne.



Figur 7: MAF smelteforløb for de øvrige 5 blandinger.

5.2 MAF, konklusion

Generelt er råvarerne relativt ensartede mht. askesmelteforløb (MAF). Askesmelteegenskaberne er på niveau med moderat slaggende halm med undtagelse af kariten (M12) og cigar (M8). Kariten er meget dårlig på grund af det høje indhold af Na_2CO_3 , og cigar er meget god på grund af sit høje indhold af Al.

Blandingerne fremtræder ligeledes relativt ensartede. Askesmelteegenskaberne afviger ikke meget fra de rene råvarer med undtagelse af en betydeligt ringere 15M8M10 samt 96M10A4, som er betydeligt bedre. Effekten af kaolin er velkendt, men blandingen 4% kaolin tilsat EFB indikerer, at kaolin måske ikke altid er effektiv.

Prøverne er forsøgt rangordnet efter MAF-resultaterne. Rangordningen er foretaget ud fra en kvalitativ vurdering af arealet under kurven samt kurvernes indbyrdes beliggenhed. Bemærk at der i de med * markerede prøver er observeret en kraftig dannelse af kondensat på mikroskopvarmebordets dækglass. Dette skyldes normalt et højt indhold af flygtigt K/Na og Cl i prøven.

Rangordningen er som følger med den bedste nævnt først og den dårligste sidst:

M8 – 96M10A4 – 95M5A5 – M11* - M9 – M10* - M2 – M6 – 75M1M7 – 96M4A4 – 15M8M10 – M1 – M7* - 75M6M5 – M5* - 75M3M5 – 25M4M13 – 25M2M13 – M4* - M3 – 50M3M5 – M12

5.3 Discussion of fuels based on fuel analysis

The fuel ash compositions have a large influence on boiler ash deposit formations, boiler tube corrosion and ash utilization. To clarify the discussion of the ash composition types DTU has tried to put the fuels into four distinct groups:

A. Fuels with a straw type ash composition

The fuels have an ash with a high K and Si content and also with some Cl in fuel. In this group are included M2 grain screen, M4 EFB, M8 cigar waste, and M9 cigarette waste. This group of fuels have the following range of molar ratios $Si/(K + Na) = 0.7-2.5$, $Cl/(Na + K) = 0.2-0.3$, $Ca/K = 0.2-1.3$. Generally the fuels are supposed to give severe straw like deposit problems, and the fuels with the largest chlorine content probably are the most troublesome.

B. Fuels with wood type ash composition

These are fuels with an ash containing a huge amount of Ca and some K and Si. M1 Pectin waste and M6 carrageenan waste are included in this group. However, the fuels have a very high ash content compared to wood. This group of fuels have the following range of molar ratios $Si/(K + Na) = 0.7-1.3$, $Cl/(Na + K) = 0.2-0.3$, $Ca/K = 4.1-5.3$. Both fuels do also have a relatively high sulfur content compared to wood, so that the molar ratio $S/(Na + K) = 0.7$ to 0.8 .

C. High alkali fuels

The fuels have an ash with a high content of K or Na and low content of Si and Ca. This is the case for M5 shea waste, M7 olive waste, M10 coffee, M11 Mix coffee/grain screen and M12 kariten. This group of fuels has the following range of molar ratios $Si/(K + Na) = 0.0-0.5$, $Cl/(Na + K) = 0.03-0.3$ and $Ca/K = 0.1-0.3$.

D. High phosphorous fuel

The only fuel with high phosphorous content is M3 mash: M3 has a high content of Si (18 wt %) and P (14 wt %).

The grouping of the fuels is in agreement with the visualization shown in Figure 1. Group A are fuels in the lower left corner, Group B are fuels in the top of the figure, and Group C fuels are placed in the lower right corner.

As seen above, many of the fuels do have high alkali and chlorine contents which often give problems with deposit formation and corrosion. It is known that application of additives which are rich in Si and Al, Ca and P, S or Ca in some cases can reduce problems of deposit formation and corrosion. To test the possibilities with the purpose of improving some of the new biomass fuels, in some cases the fuels were mixed, in other cases the new fuels was mixed with different additives. The fuel mixtures were then tested in STA and in two cases (the fuels M14 and M15) a test was also performed in the entrained flow reactor. An additive that could remedy problems with deposit formation and corrosion in biomass fired suspension boilers will ideally fix all potassium in species with relatively high melting temperatures (to minimize formation of strongly sintered deposits that is difficult to remove) and release the chlorine to the gas phase (to minimize corrosion). However, mixing of a troublesome fuel with an inert additive or a less troublesome fuel may also reduce ash related problems by simple dilution of the troublesome elements.

As additives, a wood bark fuel (M13) and kaolin and limestone were applied. The bark ash mainly contains Si and Ca, and the kaolin is rich in Si and Al. A total of 10 fuel mixtures were tested in the STA equipment (M14-M23). Here the tested fuel blending and fuel additive mixtures are described.

- M14: 75%M3+25%M5: Potassium which is very rich in M5 is mixed with the M3 which is rich in Si and P, whereby a fuel with the following molar ratios is obtained $P/(Na + K) = 0.88$ and $Si/(Na + K) = 1.2$.
- M15: 75%M6+25%M5: The potassium which is very rich in M5 is mixed with the M6 which is rich in Ca and S, whereby a fuel with the following molar ratios is obtained $Ca/K = 1.7$ and $S/(Na + K) = 0.6$.
- M16: 50%M3+50%M5: Similar to M14 just as a 50%/50% mix with molar ratios of $P/(Na + K) = 0.38$ and $Si/(Na + K) = 0.55$.
- M17: 25%M4+75%M13: This is an improvement of the M4 fuel rich in K and Cl with the M13 bark rich in Si and Ca. Molar ratios of $Si/(Na + K) = 1.42$ and $Ca/K = 0.96$ are obtained.
- M18: 25%M2+75%M13: The high ash, M2 rich in Si and K is mixed with the M13 bark rich in Si and Ca. Molar ratios of $Si/(Na + K) = 2.71$ and $Ca/K = 1$ are obtained.
- M19: 96%M4+4%Kao: This is an improvement of the M4 fuel, which is rich in K and Cl, by adding kaolin. A Molar ratio of $Si/(Na + K) = 1.52$ is obtained.
- M20: 95%M5+5%CaCO₃: The M5 which is very rich in potassium is mixed with limestone to obtain a molar ratio of $Ca/K = 1.04$.
- M21: 96%M10+4%Kao: The M10 which is very rich in potassium is mixed with kaolin to obtain a molar ratio of $Si/(Na + K) = 1.20$.
- M22: 15%M8+85%M10: The high ash, M8 rich in Si and Ca is mixed with the M10 rich in K to obtain molar ratios of $Si/(Na + K) = 1.02$ and $Ca/K = 0.49$.
- M23: 75%M1+25%M7: The M7 rich in K is mixed with the low ash M1 rich in Si and Ca to obtain molar ratios of $Si/(Na + K) = 0.50$ and $Ca/K = 0.55$.

5.4 Equilibrium Calculations

By the equilibrium calculation the stable chemical species and physical phases of the elements included are determined as a function of the temperature, pressure and total composition of the system considered. The calculations are performed by minimization of the total Gibbs free energy for the system under a mass balance constraint. This type of calculation has some important limitations. Equilibrium calculations are based on the assumption that all elements are available for reaction (perfect mixing) and kinetic limitations are ignored, also the gas phase is considered ideal. There were performed calculations by Rainer Backmann (Umeå University) in the temperature range from 500 to 1600 °C on the fuels M1, M3-M7, M14 and M15 at 1 bar. A detailed documentation of the results of the calculations can be seen in Reference 1². For most fuels, the distribution of potassium, sodium, calcium, sulfur and chlorine was calculated. As an example of the results Figure 8 shows the distribution of potassium from 500 to 1600 °C in the case of M1 pectin waste.

² Reference 1: Fuels for CO₂ reduction in power plants, CHEC Research Centre 2005.

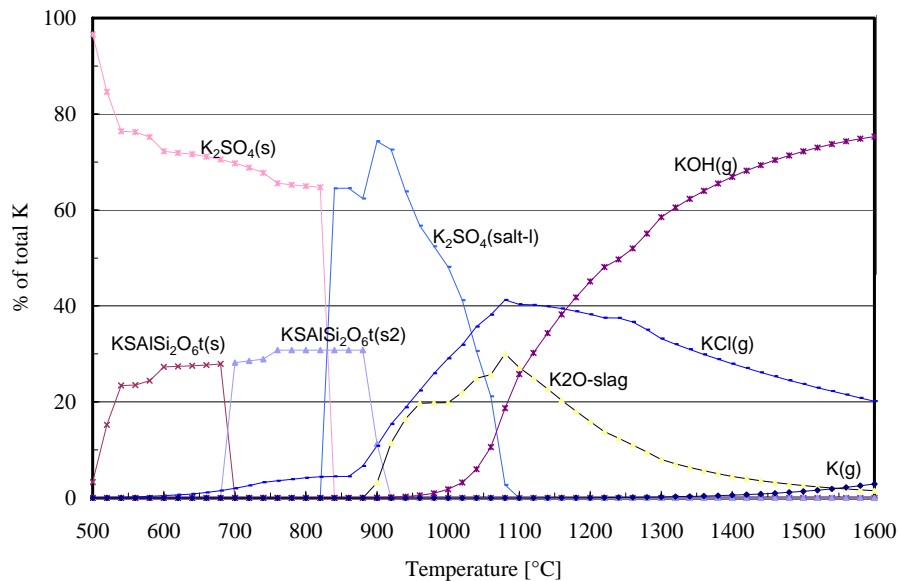


Figure 8: The distribution of potassium as a function of temperature for M1 pectin waste.

The M1 fuel ash has a high content of Ca (22 wt %), Si (12 wt %) and S (7wt %), but only a moderate content of K (4 wt %). Figure 8 shows that potassium mainly appears as solid sulfate and silicate below 820 °C. Between 820 and 1000°C most potassium appears as melted potassium sulfate and as K_2O in slag. Above 1000 °C significant amounts of KOH and KCl gas appears and some K_2O in slag is present.

In Table 8 the main results are summarized regarding the speciation of potassium. As a simple rule the most severe problems with deposit formation and corrosion appear with ashes which to a high degree are present in the gas and liquid phase at relatively low temperature. Table 8 shows therefore the amount of potassium present in gas, liquid and solid phase at 700 and 1000 °C, as well as the distribution of potassium between different species for all the biomasses where equilibrium calculations were performed. The temperatures 700 and 1000 °C were chosen to represent typical flue gas temperatures in the first part of the convective heat transfer section of biomass boilers. It is seen that M3 and M14 were the fuels with the lowest melt formation prediction and the largest amount of melt appeared for M4 and M15.

Biomass	K ₂ O in ash %	Temp °C	K Phase Distribution			Rela. melt. in ash %	Speciation of potassium
			Gas %	Liquid %	Solid %		
A:M4	31	700	5	35	60	12,4	42%K-slag(s), 18%K ₂ SO ₄ (l), 15%K ₃ PO ₄ (s), 15%KCl(l), 5%KCl(g), 5%K ₂ SO ₄ (s) 45%K-slag(s), 18%K ₂ SO ₄ (l), 25%KCl(g), 12%K ₃ PO ₄ (s)
		1000	25	18	57	13,3	
B:M1	5,1	700	2	0	98	0,1	70%K ₂ SO ₄ (s), 28%KAISi ₂ O ₆ (s2), 2%KCl(g) 50%K ₂ SO ₄ (l), 20%K-slag(s), 28%KCl(g), 2%KOH(g)
		1000	30	50	20	4,1	
B:M6	6,3	700	5	95	0	6,3	70%K ₂ SO ₄ (l), 25%KCl(l), 5%KCl(g) 62%K ₂ SO ₄ (l), 36%KCl(g), 2%KOH(g)
		1000	38	62	0	6,3	
C:M5	51	700	3	0	97	1,5	30%K ₃ PO ₄ (s), 29%K ₂ SO ₄ (s), 26%K-slag(s), 12%K ₂ CO ₃ (s), 3%KCl(g) 30%K ₃ PO ₄ (s), 29%K ₂ SO ₄ (s), 26%K-slag(s), 10%KOH(g), 5%KCl(g)
		1000	15	0	85	7,7	
C:M7	36	700	3	17	80	7,2	45%K-slag(s), 27%K ₃ PO ₄ (s), 8%K ₂ SO ₄ (s), 8%KCl(l), 6%KCl(g)+... 43%K-slag(s), 27%K ₃ PO ₄ (s), 13%K ₂ SO ₄ (s), 10%KCl(g), 7%KOH(g)
		1000	17	0	83	6,1	
D:M3	1,8	700	0	0	100	0,0	50%K ₂ SO ₄ (s), 50%KPO ₃ (s) 100%KPO ₃ (s)
		1000	1	0	99	0,0	
Mix:M14 75% M3 25% M5	17,9	700	0	0	100	0,0	70%K ₂ SO ₄ (s), 30%KPO ₃ (s) 41%K ₄ P ₂ O ₇ (s), 34%K ₃ PO ₄ , 23%K-slag(s), 2%KCl(g)
		1000	2	0	98	0,4	
Mix:M15 75% M6 25% M5	13,3	700	3	26	71	3,9	71%K ₂ SO ₄ (s), 16%K ₂ SO ₄ (l), 10%KCl(l), 3%KCl(g) 78%K ₂ SO ₄ (l), 17%KCl(g), 5%K ₂ Ca ₂ (SO ₄) ₃ (s)
		1000	17	78	5	12,6	

Note 1: Relative melt in ash is calculated by: (melt + gas at 1000 °C) * K₂O in ash

Table 8 Summary of important results of the conducted equilibrium calculations

The calculations predicted the following general species distribution.

- A. (M4) A straw like biomass with high chlorine and potassium content forms a large amount of melt and gas phase alkali components at relatively low temperatures.
- B. (M1, M6) The B type biomasses resemble wood biomass rich in Ca, except that the fuels have high sulphur and ash contents. In those biomasses a reasonable high amount of alkali metal is melted, but because the fuels have a low alkali content the total amount of melt in the ash is limited. Increased Si content in this biomass class decreases the melt fraction of the ash.
- C. (M5, M7) Type C Ash is defined as having a high K or Na content and a low Si and Ca content. In some cases also with low chlorine content (M5 and M7) most alkali are predicted to be present in solid species up to 1000 °C.
- D. (M3) In an ash rich in phosphate, very stable solid species containing both K and P are predicted to be formed.
 - (M14) Combining a fuel (M5) rich in potassium with a fuel (M3) rich in phosphorous procures a fuel with less melt formation.
 - (M15) Combining a fuel (M5) rich in potassium with a fuel with a significant amount of sulphur and chlorine (M6) the formation of gas and liquid phase alkali species increases.

5.5 STA Measurements

An STA analysis (Simultaneous Thermal Analysis) was performed on laboratory ash samples from all the fuels (M1 to M23, except for M13). The applied experimental procedure was developed in a previous project, and more documentation of the experimental method can be seen in Reference 1. The STA analysis can provide information on the melting and evaporation properties of the ashes.

Before the analysis was performed the fuels were combusted at 550 °C to prepare the low-temperature laboratory ash. During the STA analysis a small ash sample was heated in a controlled atmosphere; meanwhile the weight changes and heat uptakes to the sample were measured. 20 mg of ash was heated in N₂ gas at a heating rate of 10 °C/min. up to 1500 °C. On Figure 9 the results of the STA analysis of M4 Empty Fruit Bunch are shown.

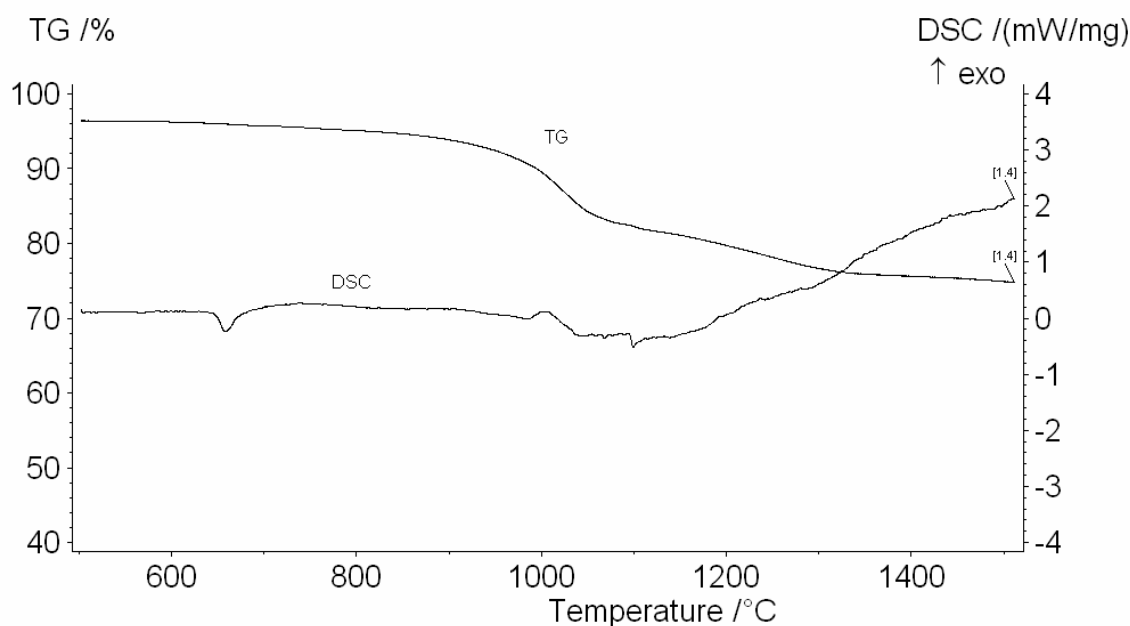


Figure 9: Plot of the result of STA measurements on M4.

On Figure 9 the TG signal shows the relative weight loss of the sample, and that the DSC signal procures information on the nominal energy uptake. Positive DSC peaks show an exothermic reaction and negative peaks show an endothermic process, such as a partial melting of the sample. Especially for the DSC signal above 1000 °C, an interpretation is difficult. The zero line may move around and silicates do gradually melt and procure only a weak DSC signal. The known features of the M4 ash STA data shown on Figure 9 complies a low-temperature melting at 660 °C, observed as the negative DSC bump, and an evaporation of KCl at approximately 1000 °C, observed as reduced sample weight measured by the TG signal.

The results of all STA measurements are shown in Reference 1. As seen with the M4, biomass partially melting of the ash at a low temperature (bellow 700 °C) can be detected with the STA measurements. Significantly low-temperature melt peaks were detected for the biomasses M4, M7, M9, M10, M12 and M22. The low-temperature melt peaks were observed for the type A straw, like fuels M4 and M9 and the type C fuels M7, M10 and M12 which are very rich in alkali. Generally, the larger low-temperature peaks appear within a few exceptions for biomasses with high chlorine content. The melting at 620 to 660 °C is caused by salt mixtures rich in potassium chloride and potassium sulphate.

Besides providing information of ash melting, the STA measurements also provide information of ash volatilization. Gas phase ash species may condensate on boiler surfaces and thereby contribute to boiler deposit formation. The interpretation of the TG mass loss curves is not easy since the applied STA set up, with the fuel ash sample placed in a crucible with a lid on it, makes the release of some species happen at relatively high temperatures. A previous investigation determined the processes that caused large mass losses in different temperature segments. When a large mass loss is observed during the STA test of biomass ashes (from straw type biomasses) the following processes may be the most likely reasons:

In the temperature window 400 to 850 °C:

- Release of CO₂ from CaCO₃

In the temperature window 850 to 1150 °C:

- Evaporation of KCl
- Release of CO₂, when SiO₂ and K₂CO₃ react

In the temperature window 1150 to 1450 °C:

- Decomposition of sulphates, decomposition of the K₂CO₃ (Low Si Ashes), or release of minor amounts of potassium from potassium silicates (High Si Ashes).

We believe that the release between 850 and 1150 °C best indicates when a large concentration of gas phase alkali may be present. On Figure 10 is shown the release in the temperature segment 850 to 1150 °C which is supposed to be caused by mainly KCl evaporation and release of CO₂ when potassium carbonates react with silica. The following biomass ash samples showed a weight loss significantly above the calculated value in the 850 to 1150 °C segment:

- M3 is the only biomass which is very rich in phosphorous and a phosphor release probably takes place at this temperature. This is not in accordance with the equilibrium calculations that first predicted gas phase phosphor above 1200 °C.
- M12 has a high sodium content which has not been taken care of in the theoretical calculation. The high weight loss is probably caused the CO₂ release from sodium carbonate.

The biomass ash samples M5, M16 and M21 showed a very small mass loss compared to the calculation:

- M5 has very high potassium content and moderate silica content. Potassium carbonate can be stable at high temperatures if only limited silica is present. There is probably released less CO₂ than what is calculated.
- M16 is made of 50% M3 (rich in P) + 50% M5 (rich in K) which gives a fuel with molar ratios of $P/(Na + K) = 0.38$ and $Si/(Na + K) = 0.55$. The observed low mass loss could indicate the formation of stable potassium phosphate species.
- M21 is made of 96% M10 + 4% Kao: The M10 which is very rich in potassium is mixed with kaolin to obtain a molar ratio of $Si/(Na + K) = 1.20$. The low release could indicate that potassium already is bound to the kaolin at a low temperature. Conversely with M19 which is M4 mixed with kaolin; in that case the calculated and measured release does not lie on the same level. It is not possible to explain the difference, since the M4 and M10 fuels have a very similar ash composition.

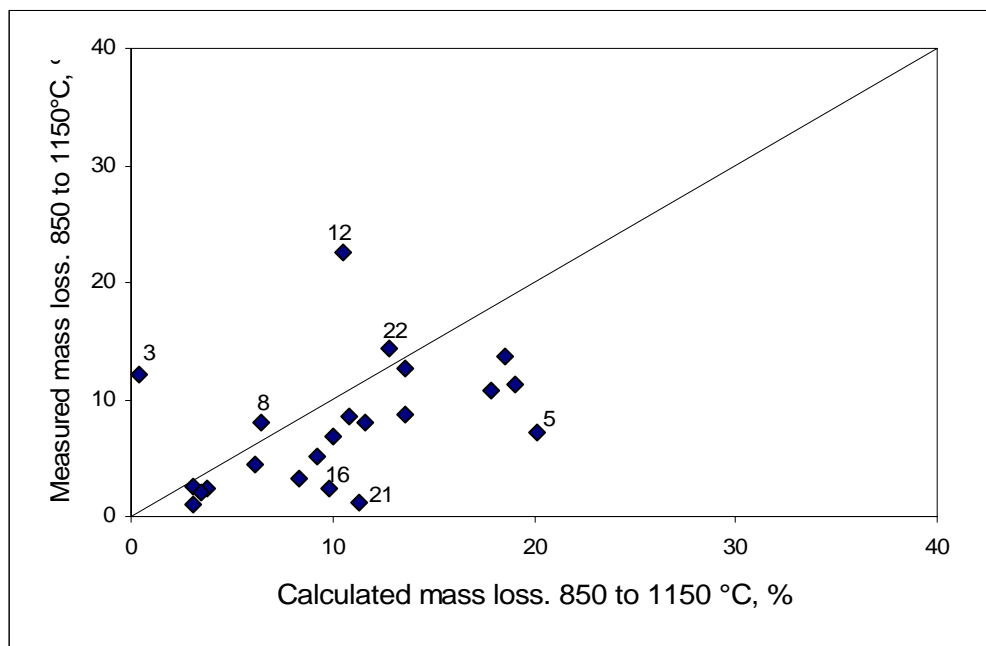


Figure 10: Comparison of calculated and measured mass loss from the STA samples between 850 and 1150 °C.

5.6 Entrained Flow Reactor Experiments

To simulate the suspension firing of the biomasses in a boiler laboratory, combustion experiments with selected fuels (M1, M3-M7, M14 and M15) were performed. The suspension firing experiments were performed on CHEC's Entrained Flow Reactor and provide information of the combustion characteristics of the fuels with respect to emission of SO₂ and NO, burn out and ash deposit formation.

The Entrained Flow Reactor is designed to simulate the environment of high-temperature thermal reactors such as suspension-fired boilers, entrained flow gasifiers or the freeboard of grate-fired boilers. The reactor has an internal length of 2 m and an internal diameter of 8 cm and can be electrically heated to a maximum temperature of 1500 °C. A nominal input of 5 kW of pulverized solid fuel is normally fed to the reactor during experiments.

The flow reactor facility was mounted with equipment so ash sampling and deposit probe measurements can be performed. A refractory lined bottom chamber was placed at the reactor tube exit. The bottom chamber turns the flue gas 90° and directs it onto an air cooled vertical deposit tube probe with an outer diameter of 10 mm. The exit slit from the bottom chamber has a size of 4 x 8 cm. A hot water cooled extraction probe is mounted in the bottom chamber whereby a representative sample of the flue gas and fly ash particles can be extracted. Large ash particles are separated from the gas in a cyclone with a cut size diameter of 2.5 µm. A heated paper filter is used to collect particles that pass the cyclone (the filter collects all ash particles above 0.2 µm). The flue gas is analysed so the concentration of CO, CO₂, O₂, NO and SO₂ can be determined. A cup placed in the bottom chamber is used to collect the ash that is separated from the flue gas in the 90° bend. To prevent the flue gas temperature to decrease too much at the distance between the reactor exit and the deposit

probe, a small propane burner can be used to heat the gas in the bottom chamber. The burner was used during the experiments to ensure a flue gas temperature of approximately 800 °C near the deposit probe.

Deposit samples are collected on the deposit probe. The outer metal tube of the probe can be removed so the deposit can be weighed and stored intact for later analysis. The probe is cooled by preheated air to obtain surface temperatures of approximately 550 °C, which is a relevant temperature for super-heater coils. The deposit probe is equipped with thermocouples so the metal temperature can be measured. The diagnostics of the single experiment included the following measurements:

- A. Total mass of deposit and collection of deposit for later analysis.
- B. Pictures of the deposit.
- C. Total collected amount of large fly ash fraction (cyclone ash, above 2.5 μm), aerosols (below 2.5 μm) and bottom ash.
- D. Determination of the ash composition of the deposit.
- E. Determination of the water soluble K, Cl and S content of deposit, aerosols (filter ash) and fly ash (cyclone ash).
- F. Online gas concentration measurements of SO_2 , O_2 , CO , NO and CO_2 .

During the experiments 770 g fuel per hour was fed to the reactor. The deposit probe was in most experiments inserted into the hot flue gas for one and a half hour. Generally, stable operation conditions were obtained during the experiments. An exit flue gas oxygen content of 6 to 8 vol. %, a flue gas temperature of approximately 800 °C and a deposit probe temperature of approximately 550 °C were obtained.

A carbon burnout of above 99% was obtained for all the tested fuels. In two cases (M5 and M7) high CO emissions (1160 and 1460 ppm) were observed, which we believe was caused by unstable fuel feeding. It was observed that those fuels had also the largest water content (9.5 and 8.8%), which may have caused the feeding problems.

An increased NO emission with increased fuel nitrogen content was observed. But it was also observed that the relative conversion of fuel nitrogen to NO decreases when increasing the fuel nitrogen content.

In Figure 11 is shown the SO_2 emission as a function of fuel sulphur content. Here is also shown an increased SO_2 emission with increased fuel sulphur content, but in this case with much more scattering in the data. Of the tested fuels, the fuels M1, M3, and M6 are relatively rich in sulphur compared to the alkali metal content ($\text{S}/(\text{Na} + \text{K})$ from 0.7 to 3.7). This could explain the relatively high SO_2 emission by a limited amount of available alkali metal to bind the sulphur in the ash. In case of M14, which is rich in phosphor, the phosphor probably binds to the alkali metals, and the sulphur is emitted. In the case of M7 and M5 a lot of reactive potassium is present, which can bind sulphur in the ash. In the case of M7 and M5 the content of chlorine, silica and phosphor are so low that the potassium mainly binds to sulphur.

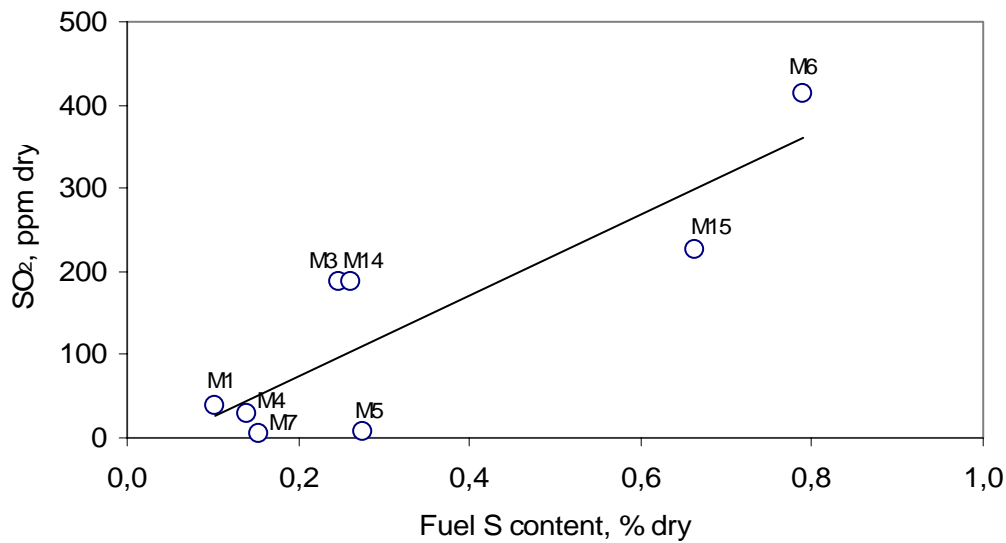


Figure 11: Measured SO₂ emission as a function of fuel sulphur content.

In Figure 12 is shown the deposit probe flux as a function of fuel ash content. As expected, an increased deposit flux with increased ash content is seen, but some scattering appears. The data from this investigation is compared with some wood and straw data from a previous investigation (from Reference 5). BDF 13, BDF 5 and BDF 1 are wood fuels, ADF 3 is a straw rich in chlorine and potassium, and BDF 9 is a straw rich in silica and poor in potassium. M6 is seen to have the highest deposit flux. M6 is characterized by being a fuel with high ash content and a high content of Ca and sulphur in the ash. The deposit contains potassium chloride and calcium sulphate which seems to induce a high deposit flux.

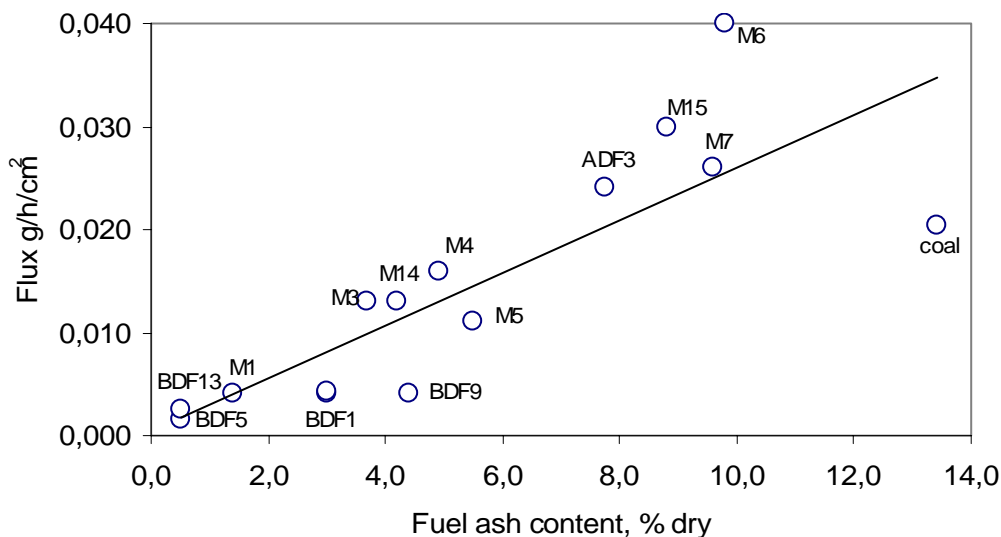


Figure 12: Deposit flux as a function of fuel ash content (BDF 1 is M13)

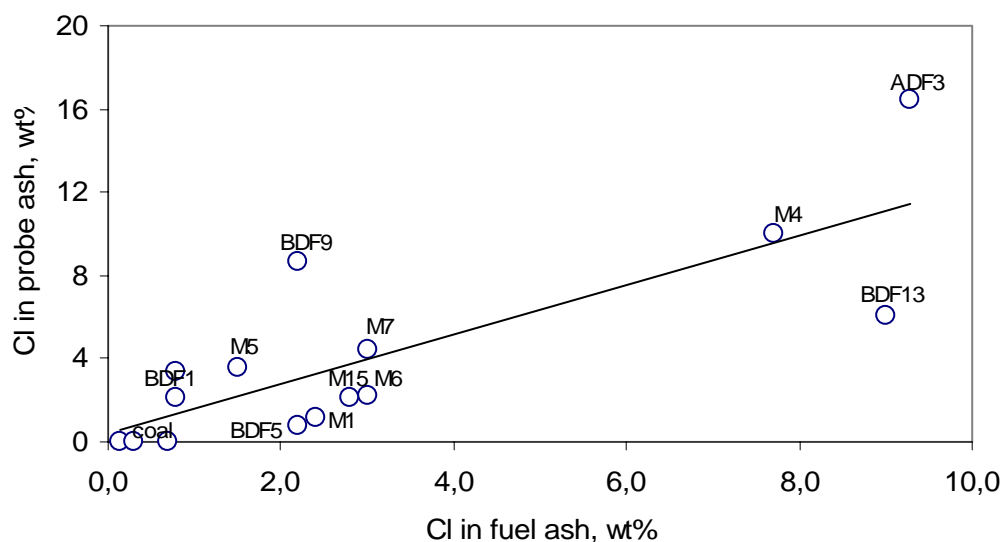


Figure 13: Deposit chlorine content as a function of fuel chlorine content

The amount of chlorine in a deposit has a large influence on the deposit corrosion properties. In Figure 13 is shown the deposit chlorine content as a function of fuel chlorine content. Again some scattering can be observed and we will try to explain the deviations based on the fuel compositions. Both in M14 and M3 no chlorine was observed in the deposit and the measuring points can be seen in the bottom of the left side on Figure 13. M3 and M14 are the fuels with the highest content of phosphorous, potassium chloride has reacted phosphor and HCl is released to the gas phase. Fuels such as M1, M6 and M15 with a relatively high fuel ash $\text{Si}/(\text{K} + \text{Na}) = 0.5$ to 1.3 and $\text{S}/(\text{Na} + \text{K}) = 0.6$ to 0.8 ratios seem to contain relatively smaller amounts of chlorine in the deposit, compared to fuels as M5 and M7 that has molar ratios of $\text{Si}/(\text{K} + \text{Na}) = 0.2$ to 0.4 and a $\text{S}/(\text{Na} + \text{K}) = 0.1$. In the case of M5 and M7 a large amount of KOH will properly be present in the hot flue gas that can react with HCl and contain the chlorine in the deposit as KCl. However, even in the cases of the fuels rich in Si and S, a significant amount of chlorine is present in the deposits.

5.7 Comparison of the Fuels

The quality of the fuels with respect to deposit formation could be evaluated both based on the fuel analysis, the equilibrium calculations, the STA measurements and the entrained flow reactor experiments. Based on the criteria listed bellow, the fuels' troubles are given a mark from 1 (fuels that give deposits that may grow fast, be difficult to remove and be very corrosive) to 3 (a manageable biomass fuel with respect to deposit formation). It is the author's impression that a typical straw fuel will get the mark 1, a wood fuel the mark 3 and bituminous coal should have a mark above 3.

Fuel number	Fuel analysis	EQ calc.	Entrained flow reactor		STA		Total Mean
			Deposit flux	Depo Cl,K	Mass loss	Melting	
1-B	2	2	3	2	3	-	2,4
2-A	2	-	-	-	2	-	2,0
3-D	3	3	2	3	1	-	2,4
4-A	1	1	2	1	1	1	1,2
5-C	1	2	2	1	2	-	1,6
6-B	2	2	1	2	3	-	2,0
7-C	1	2	1	1	1	1	1,2
8-A	2	-	-	-	1	-	1,5
9-A	1	-	-	-	1	1	1,0
10-C	1	-	-	-	1	1	1,0
11-C	1	-	-	-	1	-	1,0
12-C	1	-	-	-	1	1	1,0
14: 75%M3+25%M5	2	3	2	3	3	-	2,6
15: 75%M6+25%M5	2	1	1	2	3	-	1,8
16: 50%M3+50%M5	1	-	-	-	3	-	2,0
17: 25%M4+75%M13	2	-	-	-	3	-	2,5
18: 25%M2+75%M13	2	-	-	-	2	-	2,0
19: M4+4%kaolin	1	-	-	-	2	-	1,5
20: M5+5%CaCO3	1	-	-	-	1	-	1,0
21: M10+4%kaolin	1	-	-	-	3	-	2,0
22: 15%M8+85%M10	1	-	-	-	1* ¹	1	1,0
23: 75%M1+25%M7	1	-	-	-	2	-	1,5

Table 9: Evaluation of the fuel quality with respect to deposit formation based on the different investigations

The applied evaluation criteria:

Fuel analysis, content of Cl and alkali metals

Bad 1: Fuel ash (wt%): Cl > 4% or K + Na > 20%

Medium 2: Fuel ash (wt %): Cl =1.5-4% or K + Na = 5 - 20%

Fine 3: Fuel ash (wt %): Cl < 1.5% and K + Na < 5%

Equilibrium calculation, content of melt at 1000 °C.

Bad 1: Above 8 wt%

Medium 2: From 4.1 to 8 wt%

Fine 3: Less than 4 wt%

Entrained flow reactor tests, amount of deposit flux

Bad 1: above 0.020 g/h/cm²

Medium 2: from 0.005 to 0.020 g/h/cm²

Fine 3: Less than 0.005 g/h/cm²

Entrained flow reactor tests, amount of water soluble Cl and K in deposit (wt %)

Bad 1: Cl above 4% or K above 10%

Medium 2: Cl from 1.5 to 4% and K from 5 to 9.9%

Fine 3: Cl less than 1.5% and K less than 5%

STA, release in the temperature interval 850 to 1150 °C.

Bad 1: Above 8 wt%

Medium 2: From 4.1 to 8 wt%

Fine 3: Less than 4 wt%

STA, detection of low temperature peak

If a significant low-temperature peak is detected, the fuel gets a 1 rating.

Based on all the different kind of investigations the following conclusions regarding the fuel ash properties can be procured. The clean fuels are discussed by using the fuel classes A to D defined in section 5.3, and fuel and additive mixtures are grouped according to the applied mixing strategy.

The A group fuels have an ash with composition that resembles straw ash with a high K and Si content and also with some Cl in fuel. In this group are included M2 grain screen, M4 EFB, M8 Cigar waste, and M9 Cigarette waste. Significant low temperature melting (STA detection) are observed for the two fuels with the largest fuel ash chlorine content M4 and M9. Three of the fuels have a very high ash content M2 (9 wt %), M8 (32 wt %) and M9 (21 wt %). The combination of a straw like fuel ash and large ash content do not make them a primary choice for suspensions combustion. The only fuel in this group that was tested by equilibrium calculation and entrained flow reactor experiment was M4 with 4.6 wt% ash. Both the tests indicated that M4 will give problems with respect to deposits formation and boiler tube corrosion as a typical straw fuel.

The group B Fuels has a wood type ash composition with a high content of Ca and some K and Si. M1 Pectin waste, and M6 Carrageenan waste are included in this group. However, compared to wood M6 has a very high ash content of 8.6 wt%. Both fuels do also compared to wood have a relatively high sulfur content so that the molar ratio in the ash are $S/(Na+K) = 0.7$ to 0.8 . On both fuels was performed equilibrium calculation and entrained flow reactor experiments. Both fuels were judge to be medium troublesome, however with respect to deposit flux formation M6 gave the largest deposit flux (0.04 g/h/cm^2) of all fuels tested on the entrained flow reactor. The deposit is rich in calcium sulfate and alkali sulfate. M1 Have compared to M6 an ash with a lower Cl content and a higher P and Si content.

The Class C fuels have an ash with high K or Na content and low Si and Ca content. This includes the biomasses M5 Shea waste, M7 Olive waste, M10 Coffee, M11 Mix and M12 Kariten. The fuels have an ash content of 4 to 8 wt% except M12 that only contain 0.6 wt% ash. The three of the fuels (M7, M10 and M12) with the largest molar ratio $Cl/(K+Na)$ do also show low temperature melting (STA detection). All the fuels except M5 showed a high release to gas phase of ash species (STA detection). The low release from M5 is probably because that K appears as K_2CO_3 that is relatively stable when only low amounts of Cl and Si is present in the ash. On the fuels M5 and M7 were performed equilibrium calculation and entrained flow reactor experiments. Both fuels demonstrated a capacity to enrich the deposit with chlorine compared to the fuel ash chlorine content. Probably do all very alkali rich fuels have a large capacity to fix chlorine in the deposits and thereby a relatively high corrosion of boiler tubes may take place.

The Class D fuel is defined as high phosphorous fuel. The only fuel with high phosphorous content is M3 Mash. The M3 ash has a high Si (18wt %) and P content (14 wt %). The entrained flow reactor tests showed no serious deposit problems. Some ash volatilization was observed (STA detection), probably the release of phosphor to gas phase in the form of PO_2 or $(P_2O_5)_2$.

There was made 10 fuel and fuel additive mixes. On only two of the fuels (M14 and M15) were performed equilibrium calculation and entrained flow reactor experiments. The rest of the fuels mixtures were only tested with MAF and STA.

M14 and M16 were made to test if a phosphor rich fuel could be used to make an alkali rich fuel less troublesome. The phosphor should react with alkali to make an alkali phosphate with a high melting point and chlorine is released to gas phase.

M14: 75%M3+25%M5: The very potassium rich M5 is mixed with the Si and P rich M3 whereby a fuel with the following molar ratios are obtained $P/(Na+K) = 0.88$ and $Si/(Na+K) = 1.2$.

M16: 50%M3+50%M5: Similar to M14 just as a 50%/50% mix with molar ratios of $P/(Na+K) = 0.38$ and $Si/(Na+K) = 0.55$.

The Entrained Flow Reactor tests, the equilibrium calculations and the STA tests indicated that the volatility of potassium is reduced and the chlorine in deposits can be removed if sufficient phosphor is added.

By mixing a sulphur rich fuel it may be possible to make a boiler ash rich in potassium sulphate and with a lower content of potassium chloride.

M15: 75%M6+25%M5: The very potassium rich M5 is mixed with the Ca and S rich M6 whereby a fuel with the following molar ratios are obtained $Ca/K = 1.7$ and $S/(Na+K) = 0.6$.

M23: 75%M1+25%M7: The K rich M7 is mixed with the low ash Ca, Si and S rich M1 to obtain molar ratios of $Si/(Na+K) = 0.50$, $Ca/K = 0.55$ and $S/(Na+K) = 0.17$

The entrained flow reactor experiment with M15 showed a deposit with a significant amount of chlorine. The sulfation of KCl is not complete. And the ash containing alkali chlorine, alkali sulfate and calcium sulfate seems to give a high deposit formation flux.

The straw like M2 and M4 are mixed with the M13 wood fuel.

M17: 25%M4+75%M13: This is an improvement of the K and Cl rich M4 fuel with the M13 bark rich in Si and Ca. Molar ratios of $Si/(Na+K) = 1.42$ and $Ca/K = 0.96$ are obtained.

M18: 25%M2+75%M13: The high ash, Si and K rich M2 is mixed with the M13 bark rich in Si and Ca. Molar ratios of $Si/(Na+K) = 2.71$ and $Ca/K = 1$ are obtained.

The resulting fuels have lower K and Cl contents than the original M2 and M4 fuels. It is difficult based on the STA tests to judge if there is any effect of the wood addition besides the simple dilution of the ash

By addition of kaolin potassium from the biomass may be fixed in alumina silicate while chlorine is released to gas phase.

M19: 96%M4+4%Kao: This an improvement of the K and Cl rich M4 fuel by adding kaolin. A molar ratio of $Si/(Na+K) = 1.52$ is obtained.

M21: 96%M10+4%Kao: The very potassium rich M10 is mixed with kaolin to obtain a molar ratio of $Si/(Na+K) = 1.20$

In both cases are observed a large decrease in the amount of ash volatilization measured by STA.

M20: 95%M5+5%CaCO₃: The very potassium rich M5 is mixed with limestone to obtain a molar ratio of $Ca/K = 1.04$.

In this case is actually measured an increased ash volatilization by STA.

M22: 15%M8+85%M10: The high ash, Si and Ca rich M8 is mixed with the K rich M10 to obtain molar ratios of $Si/(Na+K) = 1.02$ and $Ca/K = 0.49$

This fuel blend do still has a high ash, K and Cl contents.

5.8 Valg af de 5 bedste recepter til pelletering

Vurderingen af hvilke 5 recepter der skulle pelleteres, blev lavet ud fra en samlet vurdering af alle projektets undersøgelser, hvor det enkelte bidrag gives en karakter fra 1 til 3. Der foretages ligeledes en vurdering af det enkelte bidrag, hvor laboratorieforsøg og askeanalyser blev vægtet højest:

MAF smeltanalyse, vægtet med faktor 2

Askeanalyse, vægtet med faktor 2

Ligevægtsberegninger, vægtet med faktor 2

Entrained Flow Reactor, vægtet med en faktor 3

STA-analyser, vægtet med en faktor 2

Pris for råvare, vægtet med en faktor 1

Tilgængelig tonnage på markedet, vægtet med en faktor 1

Våd eller tør råvare ab virksomhed, vægtet med en faktor 1

Karakterer gives som:

1: Dårlig

2: Mellem

3: God

	Faktor	2	2	2	3	2	1	1	1		
Nr.	Navn	MAF	Analyse	Ligevægt	Flow React.	STA	Pris	Tons marked	Våd/tør	Samlet værdi	Valgt
M14	75M3M5	1,5	2	3	2,5	3	2	3	2	2,39	X
M21	96M10A4	3	1			3	2	2	3	2,33	X
M17	25M4M13	1	2			3	2	2	1,5	1,94	
M18	25M2M13	1	2			2	3	3	1,5	1,94	X
M20	95M5A5	3	1			1	1,5	3	3	1,94	
M15	75M6M5	2	2	1	1,5	3	2,5	2	1,5	1,89	X
M16	50M3M5	1	1			3	2	3	2	1,89	
M19	96M4A4	2	1			2	2	1	3	1,78	
M22	15M8M10	2	1			1	3	1,8	3	1,75	X
M23	75M1M7	2	1			2	2	2,3	1,5	1,75	

Tabel 10: Karaktergivning og vægtning der har ført frem til udvælgelse af de 5 bedste recepter, der pelleteres. Når M17 og M19 ikke er valgt, selvom de står godt i karaktergivningen, er det fordi, det ikke har været muligt at fremskaffe EFB i den nødvendige mængde. M20 er fravalgt til fordel for M15 da sidstnævnte er ukendt pelleteringsteknisk. M16 er fravalgt til fordel for M22, idet M8 ikke optræder i andre recepter, og pelleteringsteknisk vurderes M16 at ligge tæt op ad M14.

6. Pelletering af de 5 bedste recepter

Fremstilling af 5 biobrændselsblandinger er udført hos Teknologisk Instituts forsøgsanlæg i Sdr. Stenderup. Råvarer til blandinger er udvalgte på grundlag af analyser af råvarer og asker udført hos Force Technology samt måling af askesmeltefraktion og suspensions-fyring i fastbrændselsreaktoren på DTU, Kemiteknik.

Ud fra de gennemførte analyser er der valgt 5 velegnede blandinger, der i en mængde på ca. 1000

kg pr. blanding formales, blandes og pelleteres. Formålet er at undersøge blandingerne pelletteringsgenskaber under kommercielle driftsbetingelser og at måle energiforbrug, pillernes fysiske styrke samt at vurdere matricens egnethed.

Råvarer

De anvendte råvarer der blev indkøbt til forsøgene, havde følgende fysiske form:

M13: bark

M10: Kaffeskaller, skaller og fint mel/støv

M8: Cigaraffald

M6: Carragenanaffald, piller

M5: Sheaskrå, mel

M3: Mask, tørret

M2: Kornafrensning, avner, skaller og støv

A4: Kaolin, additiv

Som pelletteringshjælpemidler blev der kun anvendt vand og damp.

Pelletteringsanlæg

Til fremstilling af biobrændselspiller er der anvendt et foderstofanlæg, som fremgår af funktionsdiagrammet.

Slaglemølle

Møllen er en Champion, som er monteret en 37 kW-motor. Møllen kan køre med 2 hastigheder på 2950 og 1450 omdr./min. Slaglernes periferihastighed er ved høj hastighed 110 m/sek. og ved lav hastighed ca. 55 m/sek. Møllen er monteret et 340 sold. Arealet er 0,43 m².

Horisontalblander

Fra slaglemøllen føres det formalede produkt pneumatisk til blanderen, hvis effektive rumfang er 2500 L. Blanderrotorens diameter er 1000 mm, og den kører med 27 omdr./min.

Kaskadeblander (M6K)

Kaskadeblanderen (7,5 kW-motor), type Sprout-Matador, har følgende dimensioner: diameter 400 mm, afstand mellem indløb og udløb 1600 mm. Kaskadeblanderen kører 200 omdr./min. og er monteret 36 paletter. På siden er monteret en manifold med vandudlader og 5 ventiler, hvorfra damp tilsættes melet. I udløbet måles meltemperaturen med en Pt. 100 føler.

Damp

Damp fremstilles i en højtrykskedel, type Dan Stoker, med en maksimal ydelse på 400 kg/h. Kedlen kører med 4-5 bars tryk og reduceres ned til 2 bar ved kaskadeblanderen.

Pillepresse, Sprout-Matador M12

Pillepressen, type Sprout-Matador M12, er monteret en 90 kW motor og har en roterende lodret ringmatrice og 3 presseruller.

Båndkøler

BEMA båndkøler, 1 lag, længde 550 cm og bredde 150 cm. Køleren er med variabel hastighedsre-

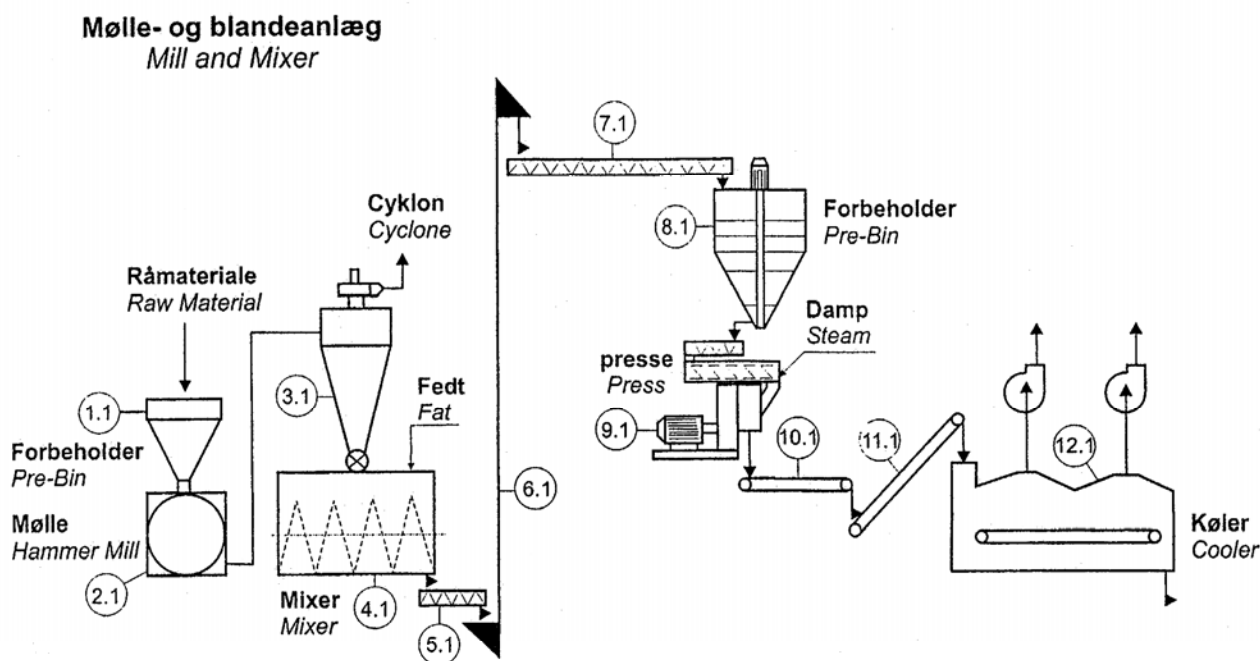
guling med en maksimal opholdstid på 20 minutter. Til køleluft har køleren 2 ventilatorer, der har en maksimal ydelse på 13.000 m³/h.

Opsækning

Efter køleren kører pillerne med elevator op til en vibrationssigte og sigtes på et sold med en passende hulstørrelse i forhold til pillernes størrelse, hvor smuld sigtes fra, og de rene piller opsækkes i storsække.

Foderstofanlæg

Feed Milling Plant



- 1.1 Forbeholder, Pre-Bin
- 2.1 Mølle, Hammer Mill
- 3.1 Cyklon, Cyclone
- 4.1 Horisontal mixer, Horizontal Mixer
- 5.1 Snegl, Screw
- 6.1 Kopelevator, Bucket Elevator
- 7.1 Snegl, Screw
- 8.1 Forbeholder med mixer, Pre-Bin with Mixer
- 9.1 Presse Press
- 10.1 Transportbånd, Belt Conveyor
- 11.1 Transportbånd, Belt Conveyor
- 12.1 Køler, Cooler

Figur 14: Pelleteringsanlægget i Sdr. Stenderup

6.1 Metodik for fremstilling af blandinger

Alle råvarer blev vejede enkeltvis før formaling og blanding. Til formaling blev anvendt et Ø4,0 mm sold i slaglemøllen. Møllen kørte 1450 rpm med en periferihastighed på 55 m/sek. Med dette sold og denne hastighed på møllen bliver de enkelte råvarer ensartede og passende formalet med en god struktur og uden større mængder fint støv.

Af 8 råvarer blev tobaksstilk, carragenanaffald, barkflis og kornafrensning formalet. De øvrige 4 råvarer som var kaffeskaller, tobaksstøv, sheaskrå og tørret mask, havde en passende struktur og partikelstørrelse og kunne blandes uden formaling.

Blanding og dosering

Fra slaglemøllen føres de formalede råvarer pneumatisk over i horisontalblanderen. Råvarer der ikke er formalet, tilsættes direkte i blanderen. I blandinger der består af meget tørre råvarer og opfugtet med vand, er dette tilsat melet i blanderen. Blandetiden var i alle forsøg 10 minutter. Til dosering og styring af kapaciteten under pelletering er dels anvendt udtræksnegl med et cartergear fra blanderen og dels volumedosering mellem forbeholder og kaskadeblander.

Tilsætning af damp

Damp tilsættes melet i kaskadeblanderen (M6K). Dampen føres ind i en manifold og doseres gennem ventiler ind i melet. Ved udløbet af kaskadeblanderen måles meltemperaturen med en Pt. 100 føler. Melets holdetid i kaskadeblanderen er 25-30 sekunder.

Pelletering og matrice

Som nævnt er der anvendt en M12 pillepresse. Den anvendte matrice er valgt i samarbejde med Sprout-Matador. Matricen er en Ø8 x 90 p50 mm og har følgende mål: indre diameter 490 mm og effektiv bredde 150 mm. Huldiameter Ø8,0 mm. Tykkelse 90 mm. Matricen er bagboret med 40 mm, så den effektive pressekanal er 50 mm. Den har et forhold mellem huldiameter og matricetykkelse på 1:6,25, hvilket er lidt mindre, end der normalt bruges til pelletering af træpiller, hvor forholdet typisk er 1:7,5.

Køling

Pillerne blev kølet i båndkøleren ved en holdetid på 15 minutter. I alle forsøg blev pillerne nedkølet til ca. 5 °C over luftens temperatur. Efter køling sigtes pillerne i en vibrationssigte på 5 x 5 mm sold og opsækkes i storsække. Til måling af smuld i varen udtages prøver af de varme piller efter pillepressen, der nedkøles i specielle kølekasser.

Prøveudtagning

Til vandbestemmelse er der udtaget prøver af alle råvarer. Prøver af melblandinger er udtaget ved tømning af horisontalblanderen. Efter pillepressen tages der prøver til bestemmelse af smuld i varen. Efter køleren udtages der prøver til vandbestemmelse, smuldtest og pillehårdhed samt rumvægt.

Registreringer og analyser

Under pelletering opsamles data dels på en computer og dels ved manuelle registreringer. Elforbruget på pillepressen er registreret ved aflæsning af ampereforbrug samtidig med prøveudtagning til måling af kapaciteten. Ud fra det aflæste elforbrug i ampere kan energiforbruget i kWh/ton beregnes, idet

$$\text{Effekt P (i kW)} = \frac{\sqrt{3} * V * A * \cos \varphi}{1000}$$

Energiforbrug i kWh/ton er P/Kapacitet

V = strømstyrke (380 volt)

A = ampere

Cos φ = 0,87

Kapacitet i ton piller/time

Ved beregning af kWh/ton er der regnet med både pressens totale strømforbrug og netto-forbrug til pelletering. Ved nettoforbrug er tomgangsstrøm fratrukket. For M12-pressen udgør det 55 A.

Meltemperatur, °C, er dels målt på koldt mel ved starten af en forsøgskørsel og dels efter tilsætning af damp i kaskadeblanderen. Forskellen bruges til beregning af damp i %, idet der er kalkuleret med, at 1 % damp svarer til en stigning i temperaturen på 14 °C.

Pillemperatur, °C, i de varme piller er målt i prøver udtaget umiddelbart efter pillepressen. Prøven opbevares i en termokande og måles med et kalibreret digitaltermometer. Smuld i varen, %, er fra prøve udtaget efter pressen og nedkølet i kølekassen. Analysen er bestemt ved at udtage en neddelt prøve på 500 g og sigte den på et Ø6 mm sold (pillerne er Ø8 mm). Den frasigtede mængde smuld svarer til det returløb, der føres fra sigten efter køleren tilbage til pillepressens forbeholder med mel.

Smulddannelse, %, er bestemt i henhold til ASAE Standard 269 – 1 (Agricultural Engineers Yearbook). Smulddannelse måles ved at sigte en repræsentativ prøve på et sold, hvis huller er lidt mindre end pillernes diameter. Til Ø8 mm piller er anvendt et Ø6 mm sold. 500 g sigtede piller anbringes i en kasse, der måler 300 x 300 x 130 mm. Kassen roterer med 50 omdr./min. i 10 minutter. Herefter frasigtes den dannede mængde smuld, og smulddannelsen beregnes som frasigtet smuld i % af smuldfri totalprøve.

Hårdhedstest, kg, er målt med en Kahl hårdhedsmåler og er et udtryk for, hvor meget en pille kan udsættes for uden at revne eller springe fra hinanden. Pillen sættes mellem 2 kæber og med en fjederbelastet klemskrue. Trykket i kg angives på en skala fra 0 til 100 kg.

Vand, %, i råvarer og brændselspiller måles i et varmeskab ved 105 °C i minimum 4 timer.

Rumvægt, kg/m³, måles i en 25 L spand. Indholdet i kg ganges med 40 for at opnå den specifikke vægt i kg pr. m³.

6.2 Kommentarer til de 5 blandinger

Forsøgsproduktionen omfatter 5 blandinger sammensat af meget forskellige råvarer. Til hver recept blev der kalkuleret med 800-1000 kg pr. blanding, og formålet med forsøgene var at undersøge den enkelte blandings pelleteringsgenskaber under kommercielle driftsbetingelser.

Da der kun var et enkelt forsøg for hver blanding, var der således begrænsede muligheder for at fastlægge optimale driftsbetingelser for hver enkelt recept, og det er derfor muligt, at enkelte blandinger kunne have været fremstillet på en mere optimal måde. Sammensætning og additiver kan have stor betydning for en blandings pelleteringsegenskaber.

I alle forsøg er der tilsat damp i en kaskadeblander. En kraftig opvarmning af melet er nødvendig for at aktivere råvarerne. Damp virker både som smøre- og bindemiddel og har stor indflydelse på kapacitet og elforbrug på pillepressen samt på pillekvaliteten. I blandinger bestående af meget tørre råvarer kan vand have positiv indflydelse på både kapacitet og pillekvalitet. I modsætning til damp kan vand ikke fjernes ved nedkøling af varme piller, hvilket også er med til at sætte en begrænsning for anvendelse af vand som pelleteringshjælpemiddel.

Sammensætning og tekniske data fremgår af oversigten over forsøgene og registrerings-skemaer for hvert enkelt forsøg.

Forsøg nr. 15M8M10

Denne blanding består af 15 % tobaksaffald og 85 % kaffeskaller. Tobaksaffaldet består af 7,5 % støv og 7,5 % stilke.

I denne blandingen er det kun stilkene fra tobak, der blev formalet i slaglemøllen på Ø4,0 mm sold. Selvom der var 16,7 % vand i stilkene, var de nemme at formale, og formalingsgraden og dermed partikelstørrelsen var passende til pelletering. På grund af de små mængder der var til rådighed, er elforbruget på møllen ikke registreret.

Tobaksstøvet er et produkt af fine partikler, der støver meget. Det samme gør kaffeskaller, der består af skaller og støv. Kaffeskaller har en vægtfylde på ca. 100 kg/m³ og er lidt vanskelige at håndtere. De fylder meget, og ved lidt luft flyver de rundt overalt. Ved blanding af kaffeskaller og tobaksaffald i horisontalblander (2500 L) var denne fuld med en batchstørrelse på 350 kg.

Kaffeskaller er normalt meget tørre og indeholder typisk 5-6 % vand. Da de i blandingen udgjorde 85 %, fandt vi, at det kunne være en fordel at tilsætte ca. 3 % vand til melet i horisontalblander, så der samlet var 8,5 % vand i melblandingen.

Da både kaffeskaller og tobaksaffald har gode pelleteringsegenskaber, var blandingen særdeles velegnet til pelletering. Med en vægtfylde på 180 kg/m³ fylder blandingen meget i kaskadeblander og pillepresse, hvilket ikke var noget problem ved en kapacitet på op til 1100 kg/h. Over 1100 kg/h kom der lidt mel ud ved fødekonus.

Der blev tilsat 5,5 % damp, og meltemperaturen var 96-99 °C. Med den valgte matrice Ø8 x 90 p50 mm var der en stabil drift af anlægget. Matricen havde de rigtige dimensioner og var velegnet til denne blanding. Elforbruget på pillepressen var 43 kWh/ton og korrigeret for strøm til tomgang kun 14 kWh/ton.

Pillerne blev lange og hårde og dannede ingen smuld. Analyserne viste, at der kun var 0,1 % smuld i varen og 1,5 % smulddannelse samt en hårdhed på 31 kg. Vægtfylde i kølede piller blev 700 kg/m³ med et vandindhold på 9,4 %.

Det kan konkluderes, at denne blanding var særdeles egnet til pelletering. Matricen havde de rigtige dimensioner, pillekvaliteten var særdeles god og med et passende vandindhold, der sikrer en lagerstabil vare.

Forsøg nr. 96M10A4

Denne blanding består af 96 % kaffeskaller og 4 % kaolin.

Da kaffeskaller består af mindre skaller og støv, skal de ikke formales før pelletering. Kaolin anvendes som additiv og er et hvidt pulver, der består af aluminiumsilikat. For at dæmpe støvgenerne lidt og øge indholdet af vand og vægtfylde blev der tilsat 3 % vand til blandingen af kaffeskaller og kaolin, så der samlet var 8,1 % vand i melet med en vægtfylde på 160 kg/m³. Med den lave vægtfylde fylder blandingen meget, særligt i pillepressen, hvilket ikke var noget problem op til 1100 kg/h. Over 1100 kg/h var der en tendens til udslip af mel ved fødekonus.

I kaskadeblanderen blev melet opvarmet med 5,5 % damp til 98 °C, og med den valgte matrice Ø8 x 90 p50 mm kørte anlægget meget stabilt med et elforbrug på 77-78 ampere på pillepressen, svarende til 41 kWh/ton (korrigeret for tomgang kun 12 kWh/ton).

Matricen var velegnet til pelletering af denne blanding med et passende fugtindhold før pelletering, hvor dampen havde positiv indflydelse på processen og medvirkede til, at der ingen negative virkninger opstod ved tilsætning af kaolin. Tværtimod blev pillerne mere ensartede end blandingen med tobak (15M8M10), og pillekvaliteten var god med lange, hårde piller med en vægtfylde på 720 kg/m³. Analyserne viste, at der kun var 0,5 % smuld i varen og 1,7 % smulddannelse med en hårdhed på 34 kg samt 8,4 % vand i kølede piller.

Det kan konkluderes, at kaffeskaller ikke skal formales og er særdeles velegnede til pelletering, og at der ved tilsætning af kaolin som additiv ikke opstår negative forhold under pelleteringen. Damp har en positiv indflydelse og reducerer elforbruget på pillepressen i forhold til kapaciteten, og sammen med den valgte matrice sikrer dampen en særdeles god pillekvalitet.

Forsøg nr. 75M6M5

Denne blanding består af 75 % carragenanaffald og 25 % sheaskrå.

Carragenanaffald er et tørret restprodukt fra udvinding af carragenan fra tang, og sheaskrå er et restprodukt fra sheanødder, hvorfra der udvindes kakao og olie.

Carragenanaffald med 11,7 % vand var i pilleform og er derfor formålet i slaglemøllen på Ø4 mm sold ved 1450 rpm. Kapaciteten var 2500 kg/h og elforbruget på 34 ampere, svarende til 8,5 kWh/ton (korrigeret for tomgang på 2-3 kWh/ton). Ved denne formaling får produktet en passende struktur, som er velegnet til transport i snegle og elevatorer.

Sheaskrå med 12,5 % vand var i melform med en høj vægtfylde og skal ikke formales. De 2 produkter er velegnede til at blande sammen. Carragenanaffald har en relativ lav vægtfylde, og blandet sammen med det tunge sheaskrå er blandingens vægtfylde 400 kg/m³.

Blandingens gode vægtfylde og pelleteringsegenskaber gav basis for en høj kapacitet og en god pillekvalitet. Melet blev tilsat 5,5 % damp, og meltemperaturen var 98 °C. Med den valgte matrice

Ø8 x 90 p50 mm kørte anlæg og presse meget stabilt med en kapacitet på 2300 kg/h. Elforbruget på pressen var 85 ampere, og totalt brugte pressen 21 kWh/ton (korrigeret for tomgang 7,5 kWh/ton).

Pillerne blev meget ensartede, lange og glatte og af særdeles god kvalitet. Analyserne viste, at pillerne med 12,1 % vand havde en vægtfylde på 780 kg/m³. Der var 1,4 % smuld i varen og en smulddannelse på 1,1 % samt en høj hårdhed på 38 kg. Det kan konkluderes, at denne blanding er velegnet til pelletering, samt at den valgte matrice har de rigtige dimensioner. Det passende vandindhold og en høj meltemperatur giver basis for en høj kapacitet og en særdeles god pillekvalitet.

Forsøg nr. 75M3M5

Denne blanding består af 75 % tørret mask og 25 % sheaskrå.

Mask er restprodukt fra ølproduktion og består primært af skaller fra byg. Frisk mask indeholder ca. 80 % vand og anvendes primært som kvægfoder. Vandet kan fjernes dels ved en skruepresning, hvor et stor mængde vand kan fjernes, og dels ved tørring i tromle-tørringsanlæg. Mask skal tørres ned til ca. 12-14 % vand for at være lagerstabil.

I dette forsøg blev tørret mask med 12,1 % vand ikke formalet. Produktet har en lidt grov struktur, der blandet med 25 % sheaskrå gav en god blanding med en relativ stor overflade til absorption af damp. Blandingen indeholdt 12,0 % vand og havde en vægtfylde på 400 kg/m³.

Før pelletering blev melblandingen tilsat 5,2 % damp, således at der var 90-93 °C og 17,2 % vand i melet før pelletering. Blandingen blev pelleteret med en kapacitet på 1600 kg/h med matrice Ø8 x 90 p50 mm i pressen. Elforbruget på pressen var 67-69 ampere eller totalt 25 kWh/ton (korrigeret for tomgang kun 5 kWh/ton). Pillekvaliteten var relativt god, men manglede hårdhed.

Analyserne viste, at de kølede piller indeholdt 12,3 % vand og havde en vægtfylde på 540 kg/m³. Der var 2,0 % smuld i varen og 8,0 % smulddannelse i pillerne, der havde en hårdhed på 9 kg.

Det er tydeligvis tørret mask, hvor stivelsen er fjernet, der mangler positive pelleteringsegenskaber.

Selvom sheaskrå har gode pelleteringsegenskaber, er 25 % i blandingen ikke nok til at sikre en god pillekvalitet. I indledende forsøg med denne blanding blev der anvendt mask med 15-16 % vand sammen med samme type sheaskrå. Dette forsøg viste, at pillekvaliteten forringes med højere vandindhold i melet.

Det kan konkluderes, at pillekvaliteten med denne blandingssammensætning kan forbedres, når melet maksimalt indeholder 10-12 % vand, og matricen får et større forhold mellem pillediameter og pressekanalens længde. Måske bør matricen være Ø8 x 90 p70 mm eller endnu kraftigere for at fremstille en vare, hvor smulddannelsen i færdigvaren kommer under 3-4 %, og hårdheden øges til 15-20 kg.

Forsøg nr. 25M2M13

Denne blanding består af 75 % barkflis og 25 % kornafrensning.

Den anvendte barkflis var en blanding af bark og træflis, som indeholdt 11,9 % vand. Kornafrensning består af skaller, avner og underudviklede kornkerner og er et produkt af varierende kvalitet, hvor der kan være en del aske. Den anvendte parti var pænt og indeholdt 11,9 % vand.

Både barkflis og kornafrensning blev formalet enkeltvis i slaglemøllen på Ø4,0 mm sold ved 1450 rpm. Kapaciteten var for begge produkter 1400 kg/h, og elforbruget var kun 30-34 ampere, svarende til 12-14 kWh/ton (korrigeret for tomgangsforbrug 3-4 kWh/ton).

Ved denne formaling blev begge produkter tilpas fint formalet, og på trods af forskelligheden var de velegnede til at blande sammen. Det er vigtigt med en relativ fin formaling og dermed en stor overflade. Dette sikrer, at damp tilsat i kaskadeblanderens lettere absorberes af de hårde partikler fra både barkflis og kornafrensning, hvilket yderligere sikrer, at blandingen bliver nemmere at pelletere.

Der blev tilsat 5,5 % damp i kaskadeblanderens, og melet var 98 °C . For at kunne pelletere varen og fremstille acceptable piller, var det nødvendigt at skabe et rimeligt højt modtryk i matricen (Ø8 x 90 p50 mm). Det var nødvendigt at køre 2000 kg/h for at opnå en passende temperatur og fyldning i matricen, til at pillekvaliteten blev rimeligt tilfredsstillende. Det var tydeligt, at ved relativt høj kapacitet blev pillerne stadigt bedre, fordi det kræver tid at få temperaturen i matricen op på det rigtige niveau. Ved pelletering af træpiller skal matricetemperaturen være min. 120 °C.

Elforbruget på pressen var 32 kWh/ton (efter korrektion for tomgang 16 kWh/ton). Dette er kun 1/3 af elforbruget til almindelig træpelletering, hvor normtallet er 50 kWh/ton (korrigeret for tomgang). Pillekvaliteten blev rimelig god, men manglede hårdhed.

Analyserne viste, at der i de kølede piller var 12,5 % vand, og vægtfylden var 780 kg/m³. Der var 10-12 % smuld i varen og 8,5 % smulddannelse. Denne mængde smuld i varen er for stor til at sende tilbage til genpelletering. Smulddannelse er et udtryk for, hvor meget smuld/støv, der dannes fra producent til forbruger, og dette er ligeledes i overkant. Pillernes hårdhed var 14 kg og for lav til dette produkt. Til sammenligning er træpillers hårdhed typisk 45- 50 kg og har en analyse for smulddannelse på 1-2 %.

Det må konkluderes, at denne type blanding kan pelleteres uden problemer, når råvarerne er tørre og formales relativt fint, når maksimale mængder damp tilsættes, og når matricen har en længere pressekanal end i den valgte Ø8 x 90p 50 mm, hvor forholdet mellem pillediameter og pressekanal er 1:6,3. En matrice med 10-20 mm længere pressekanal vil antageligt sammen med de nævnte forhold og højst mulig kapacitet kunne sikre en tilfredsstillende pillekvalitet.

Oversigt over pelleteringsforsøg med 5 udvalgte blandinger

Forsøg nr.	15M8M10	96M10A4	75M6M5	75M3M5	25M2M13
<u>Brændsler</u>					
Kaffeskaller, %	85,0	96	-	-	-
Tobak, støv, %	7,5	-	-	-	-
Tobak, stilk, %	7,5	-	-	-	-
Carragenanaffald, %	-	-	75	-	-
Sheaskrå, %	-	-	25	25	-
Mask, tørret, %	-	-	-	75	-
Barkflis, %	-	-	-	-	75
Kornafrensning, %	-	-	-	-	25
<u>Additiver</u>					
Kaolin, %	-	4,0	-	-	-
Vand tilsat i blander, %	3,0	2,9	-	-	-
Formaling ,sold, mm, %	4,0	-	4,0	-	4,0
Pillepresse, type	M12	M12	M12	M12	M12
Matrice, type, ØxD,mm	8x90p50	8x90p50	8x90p50	8x90p50	8x90p50
Meltemperatur, °c	99	98	98	93	98
Pilleteperatur, °c	98	97	98	94	98
Kapacitet, kg/h	1100	1100	2300	1600	2000
Pillepresse, A	83	78	85	69	110
Pillepresse, kwh/ton, total	43	41	21	25	32
Pillepresse, kwh/ton (korr. for tomg)	14	12	7,5	5	16
<u>Analyser</u>					
Smuld i varen, %	0,1	0,5	1,4	2,0	10
Smulddannelse,%	1,5	1,7	1,1	8,0	8,5
Hårdhed, kg	31	34	38	9	14
Rumvægt, kg/m ³	700	720	780	540	780
Vand i mel, %	8,5	8,1	12,2	12,0	11,9
Vand i kølede piller, %	9,4	8,4	12,1	12,3	12,5

Tabel 11: Oversigt over pelleteringsforsøg med 5 udvalgte blandinger

7. Økonomikalkulation

Indkøb af råvarer

Prisen på råvarer afhænger af markedets efterspørgsel. For nogle råvarer er prisen 0 kr./ton eller endda negativ. De priser der er brugt i kalkulationen er de aktuelle markedspriser af producent som har kunnet indsamles i virksomhederne. Nogle råvarer er våde med et vandindhold op til 80%, og der er i disse tilfælde tillagt et tillæg for tørring på 225 kr./ton færdigvare. Der kalkuleres med årlig pille produktion på 60.000 tons.

Råvarer	Pris i kr./ton	Tørringstillæg, kr./ton
Carragenanaffald	0	225
Pektinaffald	0-50	225
Sheaskrå	400-600	0
Mask	50-150	225
Kornafrens	100	0
Bark	50-100	225
EFB	100	0
Kaffeaffald	300-350	0
Sort oliven	300-350	0
Cigaraffald	0	0
Savsmuld	350-450	0

Tabel 12: Prisområde for råvarer brugt i recepterne. Priserne dækker store årlig indkøb, er af virksomhed og kan svinge en del afhængig af sæson og efterspørgsel. Som reference er brugt prisen på tør savsmuld til træpiller.

Indkøb af additiver

Der er brugt to additiver dels baseret på aluminium og dels på calcium. Der er ikke brugt bindemiddel men damp i pelleteringsprocessen.

Additiv	Pris i kr./ton
Kaolin	1500
CaCO ₃	250

Tabel 13: Additiver brugt i recepterne. Prisen er for indkøb af større partier inklusive transport over mindre distance (op til 150 km).

Råvareomkostninger for de 10 recepter

Recept	Pris i kr./ton	Recept	Pris i kr./ton
M14	344	M19	156
M15	269	M20	393
M16	363	M21	348
M17	231	M22	255
M18	269	M23	299

Tabel 14: Pris for råvarer til de 10 recepter. Alle råvarer er i tør tilstand med 6-15% vand og foreligger som mel eller granulater klar til pelletering (se detaljer i Bilag 3).

Investeringsbehov for en pilleproduktionslinje

Investeringsbudgettet er udregnet for en produktionslinje med en enkelt pillepresser, der har en kapacitet på 10 tons/time i 6000 timer/år. Den årlige produktion er 60.000 tons/år.

Investering i 1.000 kr.	Maskiner og bygninger
Hammermølle	3.000
Pillepresse	7.000
Kølesektion	1.600
Brandsikring	700
Stålkonstruktion	2.500
Montage	3.500
El	3.000
Bånd, sigter, osv.	5.000
Bygninger	22.000
Total investering	48.300

Tabel 15: Budget for investering i en pilleproduktionslinje med bygninger og lagerfaciliteter.

Kapitalomkostninger og variable omkostninger

Kapitalomkostninger er afskrevet over en periode på 7 år med en rente på 7% p.a. for maskiner og over en periode på 15 år for bygninger. Variable omkostninger inkluderer vedligehold, løn, el, vand, damp, administration, overskud, transport, forsikring m.m.

Moms er ikke indregnet.

Kapitalomkostninger	Kr./ton
Afskrivning, maskiner	63
Afskrivning, bygninger	24
Rente (gennemsnit)	31
Total kapitalomkostning	118
Variable omkostninger	
Løn	55
Reserveedele	30
El	70
Transport til pillefabrik	150
Forsikring, vand m.v.	10
Administration & overskud	150
Transport til slutbruger	0
Brændsel til damp	20
Rente af pillelager	25
Total variabel omkostning	510

Tabel 16: Budget for de samlede omkostninger ved drift af en pilleproduktionslinje. Råvarepris er ikke indregnet. Pris af fabrik. Se Bilag 3 for detaljer.

Pillepriser for 10 recepter.

Totale omkostninger	Kr./tons	GJ/tons	Kr./GJ
M14	997	18,05	55,24
M15	922	15,60	59,08
M16	1041	17,62	59,07
M17	859	17,17	50,04
M18	897	16,87	53,16
M19	784	15,76	49,74
M20	1116	15,92	70,08
M21	976	16,91	57,72
M22	883	16,66	52,99
M23	902	16,93	53,26
<i>Træpiller</i>	<i>1028</i>	<i>17,28</i>	<i>59,49</i>
<i>Træpille – markedspris, kraftværk</i>	<i>780</i>	<i>17,28</i>	<i>45,14</i>
<i>Træpille – markedspris, private</i>	<i>1200</i>	<i>17,28</i>	<i>69,44</i>

Tabel 17: Produktionspris for 10 recepter af pillefabrik. Brændværdien er angivet ved 8 % vand. Til sammenligning er anført produktionspris og den aktuelle markedspris for træpiller til kraftværker og til private forbrugere af fabrik. Alle beløb er eksklusiv moms.

Bilag 1

Formaling og analyser af råvarer sendt til analyse hos DTU

Blanding af: M3 Mask og M5 sheaskrå (75 % M3 + 25 % M5)

Vandindhold, %: 7,8

Vægtfylde, g/l : 420

Formaling, krav til partikelstørrelse: 100 % mindre end 700 µm og 60 % mindre end 300µm.

Blandingen er fremstillet af de formalede råvarer.

Sigteanalyse (rotationssigte):

Sold, µm	%
>710	0,4
<710>500	0,8
<500>425	2,6
<425>315	4,3
<315>212	12,1
<212>125	18,3
<125	61,5

91,9 % er mindre end 300µm og 0,4 % større end 700 µm.

Prøvestørrelse: 22 kg.

Formaling og analyser af råvarer sendt til analyse hos DTU

Blanding af: M6 carragenanaffald og M5 sheaskrå (75 % M6 + 25 % M5)

Vandindhold, %: 5,3

Vægtfylde, g/l : 275

Formaling, krav til partikelstørrelse: 100 % mindre end 700 µm og 60 % mindre end 300µm.

Blandingen er fremstillet af de formalede råvarer.

Sigteanalyse (rotationssigte):

Sold, µm	%
>710	0,4
<710>500	1,1
<500>425	1,1
<425>315	2,9
<315>212	9,9
<212>125	25,9
<125	58,7

94,5 % er mindre end 300µm og 0,4 % større end 700 µm.

Prøvestørrelse: 24 kg.

Formaling og analyser af råvarer sendt til analyse hos DTU

Råvare: M1 Pektin

Vandindhold, %: 6,9

Vægtfylde, g/l : 220

Formaling, krav til partikelstørrelse: 100 % mindre end 700 µm og 60 % mindre end 300µm.

Pektin er et langfibret og sejt produkt, der skal formales flere gange for at opfylde kravet til partikelstørrelse.

Formalet på Champion slaglemøllen (Ø 1,0 mm sold) + formalet 2 gange i Alpine 160Z stiftmølle ved 18900 rpm.

Sigteanalyse (rotationssigte):

Sold, µm	%
>710	0,5
<710>500	2,5
<500>425	2,8
<425>315	7,2
<315>212	15,6
<212>125	26,8
<125	44,6

87,0 % er mindre end 300µm og 0,5 % større end 700 µm.

Prøvestørrelse: 25 kg.

Formaling og analyser af råvarer sendt til analyse hos DTU

Råvare: M3 Mask, tørret

Vandindhold, %: 7,4

Vægtfylde, g/l : 390

Formaling, krav til partikelstørrelse: 100 % mindre end 700 µm og 60 % mindre end 300 µm.

Mask er et sejt og langfibret produkt, der skal formales flere gange for at opfylde kravet til partikelstørrelse.

Formalet på Champion slaglemøllen (Ø1,0 mm sold) + formalet 2 gange i Alpine 160Z stiftmølle (18900 rpm)

Sigteanalyse (rotationssigte):

Sold, my	%
>710	0,4
<710>500	1,0
<500>425	4,5
<425>315	6,1
<315>212	16,5
<212>125	23,0
<125	48,5

88 % er mindre end 300 µm og 0,4 % er større end 700µm.

Prøvestørrelse: 30 kg.

Formaling og analyser af råvarer sendt til analyse hos DTU

Råvare: M4 Palmeaffald (EFB)

Vandindhold, %: 8,0

Vægtfylde, g/l : 410

Formaling, krav til partikelstørrelse: 100 % mindre end 700 µm og 60 % mindre end 300µm.

EFB er et restprodukt fra palmetræer, hvor frøene er høstet fra. Det består primært af store klaser, og er et langfibret og sejt produkt, der skal formales flere gange for at opfylde kravet til partikelstørrelse.

Dette produkt er først nedtørret til 10 % vand, formalet i en Champion slaglemøllen (Ø3,0 mm sold) og dernæst pelleteret i 5 mm piller.

Pillerne er formalet på Champion slaglemøllen (Ø 1,0 mm sold) + formalet 1 gang i Alpine 160Z stiftmølle ved 18900 rpm.

Et meget energikrævende produkt at neddele.

Sigteanalyse (rotationssigte):

Sold, µm	%
>710	0,3
<710>500	0,6
<500>425	1,4
<425>315	8,7
<315>212	19,4
<212>125	19,1
<125	50,5

89,0 % er mindre end 300µm og 0,3 % større end 700 µm.

Prøvestørrelse: 20 kg.

Formaling og analyser af råvarer sendt til analyse hos DTU

Råvare: M5 sheaskrå

Vandindhold, %: 9,5

Vægtfylde, g/l: 500

Formaling, krav til partikelstørrelse: 100 % mindre end 700 µm og 60 % mindre end 300µm.

Sheaskrå er nemt at formale. Produktet er formalet 1 gang på Alpine 160Z stiftmølle ved 18900 rpm.

Sigteanalyse (rotationssigte):

Sold, µm	%
>710	0,0
<710>500	0,4
<500>425	1,2
<425>315	1,1
<315>212	4,8
<212>125	12,2
<125	80,3

97,3 % er mindre end 300µm og 0,0 % større end 700 µm.

Prøvestørrelse: 30 kg.

Formaling og analyser af råvarer sendt til analyse hos DTU

Råvare: M6 Carragenan, affald

Vandindhold, %: 3,9

Vægtfylde, g/l : 175

Formaling, krav til partikelstørrelse: 100 % mindre end 700 µm og 60 % mindre end 300µm.

Carragenanaffald er et fiberrigt produkt, hvor fibre kommer til at fylde meget efter formaling.

Det var nødvendigt at nedtørre produktet til 4 % vand for at opnå en tilfredsstillende formaling. Formalet 3 gange på Alpine 160Z stiftmølle ved 18900 rpm.

Sigteanalyse (rotationssigte):

Sold, µm	%
>710	0,3
<710>500	0,9
<500>425	1,3
<425>315	4,1
<315>212	10,9
<212>125	29,0
<125	53,5

93,4 % er mindre end 300µm og 0,3 % større end 700 µm.

Prøvestørrelse: 30 kg.

Formaling og analyser af råvarer sendt til analyse hos DTU

Råvare: M7 Olivensten, sort

Vandindhold, %: 8,8

Vægtfylde, g/l : 500

Formaling, krav til partikelstørrelse: 100 % mindre end 700 µm og 60 % mindre end 300µm.

Sort oliven er nemt at formale ned de ønskede krav. Produktet er formalet en gang på stiftmølle Alpine 160Z ved 18900 rpm.

Sigteanalyse (rotationssigte):

Sold, µm	%
>710	0,8
<710>500	2,6
<500>425	2,5
<425>315	5,0
<315>212	11,2
<212>125	16,4
<125	61,5

89,1 % er mindre end 300µm og 0,8 % større end 700 µm.

Prøvestørrelse: 25 kg.

Bilag 2

Teknologisk Institut, Forsøgsanlæg

Forsøg nr. 15M8M10	2005-1	
Dato, blande: 6/9-05	Dato, pelletere: 8/9-05	
Recept:	I alt, kg	
Råvare 1: 7,5 % M8: tobak, støv	74,5	
Råvare 1: 7,5 % M8: tobak, stilk	74,5	
Råvare 2: 85,0 % M10: kaffeskaller	850	
Total, kg	999	
Formaling i Champion slaglemølle (1450 rpm), sold, Ø4,0 mm: tobaksstilk (øvrige ikke formalet)		
Vand tilsat i blander, kg 30	ca. 3,0 %	
Blandetid i horisontalblender,	min: 10 min.	
Meltemperatur i kold mel, °C	20	
Pelletering, M12 presse	Matrice:	Ø8 x 90 P50 mm
Kapacitet, kg/h.	1100	
Meltemperatur i kaskadebl., °C	96-99	Damp 5,5 %
Pilletemperatur, °C	96-98	
Elforbrug, presse, amp kWh	82-83	kWh/ton: total 43 kWh. Korr. for tomgang 14 kWh
Opholdstid i båndkøler, min.	15	
Vibrationssigte, sold, mm	5 x 5	
Analyser:		
Smuld i varen: Prøve udtages før køler og nedkøles i kølekasser.		
Smulddannelse og hårdhed: Prøve udtages af sigtede piller efter køler.		
Smuld i varen, %	0,1	
Smulddannelse, %	1,5	
Kahl hårdhedstest, kg	31 (25-36)	
Vand i råvare 1: Tobak, støv	9,6 %, tobak, stilk 16,7 %	
Vand i råvare 2: Kaffeskaller	6,3 %	
Vand i melblanding, kold,	8,5 %	
Vand i kølede piller, %	9,4 %	
Rumvægt, kg/m ³	Mel: 180 kg Piller: 700 kg	

Bemærkninger: God og stabil drift med stor fyldning i anlægget, pga. melets lave vægtfylde. Matricen er velegnet til pelletering af denne blanding bestående af råvarer med gode pelleteringsegenskaber. Pillerne bliver lange og hårde og danner ingen smuld ved håndtering. Et passende vandindhold i pillerne sikrer en lagerstabil vare.

Teknologisk Institut, Forsøgsanlæg

Forsøg nr. 25M2M13	2005-5	
Dato, blande: 7/9-05	Dato, pelletere: 9/9-05	
Recept:	I alt, kg	
Råvare 1: 75 % M13: Barkflis	354	
Råvare 2: 25 % M2: Kornafrensning	120	
Total, kg 472		
Formaling i Champion slaglemølle (1450 rpm), sold, Ø4,0 mm: begge råvarer er formalet ved 1400 kg/h (elforbrug 30-34 A = Nettoforbrug for barkflis og kornafrensning hhv. 4 og 3 kWh/ton)		
Vand tilsat i blander, kg	0	
Blandetid i horisontalblander, min:	10 min.	
Meltemperatur i kold mel, °C	20	
Pelletering , M12 presse	Matrice:	Ø8 x 90 P50 mm
Kapacitet, kg/h	2000	
Meltemperatur i kaskadebl., °C	Damp	5,5 %
Pilletemperatur, °C	98	
Elforbrug, presse, amp. kWh/ton	110	Total 32 kWh/ton. Korr. for tomgang 16 kWh/ton
Opholdstid i båndkøler, min.	15	
Vibrationssigte, sold, mm	5 x 5	
Analyser:		
Smuld i varen: Prøve udtages før køler og nedkøles i kølekasser.		
Smulddannelse og hårdhed: Prøve udtages af sigtede piller efter køler.		
Smuld i varen, %	10-12	
Smulddannelse,%	8,5	
Kahl hårdhedstest, kg	14 (8-17)	
Vand i råvare 1: Barkflis 11,9 %.		
Vand i råvare 2: Kornafrensning 11,9 %		
Vand i melblanding, kold 11,9 %		
Vand i kølede piller, % 12,5 %		
Rumvægt, kg/m ³	Mel: 400 kg	Piller: 780 kg

Bemærkninger: Denne blanding er lidt vanskelig at pelletere. Det kræver højt modtryk og dermed høj matricetemperatur for at få piller af god kvalitet. Det er derfor nødvendigt med højest mulig meltemperatur – maks. damp og høj kapacitet, samt en matrice med måske 10-15 mm længere effektiv pressekanal.

Teknologisk Institut, Forsøgsanlæg

Forsøg nr. 75M3M5	2005-4	
Dato, blande: 5/9-05	Dato, pelletere: 9/9-05	
Recept:	I alt, kg	
Råvare 1: 75 % M3: Mask, tørret	850	
Additiv: 25 % M5: Sheaskrå	283	
<hr/>		
Total, kg	1133	
Formaling i Champion slaglemølle (1450 rpm), sold, Ø4,0 mm: Ingen formaling		
Vand tilsat i blander, kg 0	ca. 0 %	
Blandetid i horisontalblender, min:	10 min.	
Meltemperatur i kold mel, °C	20	
Pelletering , M12 presse	Matrice: Ø8 x 90 P50 mm	
Kapacitet, kg/h	1600	
Meltemperatur i kaskadebl., °C	90-93 Damp 5,2 %	
Pilletemperatur, °C	92-94	
Elforbrug, presse, amp	67-69 Total 25 kWh/ton. Korr. for tomgang 5kWh/ton	
Opholdstid i båndkøler, min.	15	
Vibrationssigte, sold, mm	5 x 5	
Analyser:		
Smuld i varen: Prøve udtages før køler og nedkøles i kølekasser.		
Smulddannelse og hårdhed: Prøve udtages af sigtede piller efter køler.		
Smuld i varen, %	2,0	
Smulddannelse, %	8,0	
Kahl hårdhedstest, kg	9 (6-13)	
<hr/>		
Vand i råvare 1: mask, tørret	12,1 %	
Vand i råvare 2: sheaskrå	12,5 %	
Vand i melblanding, kold,	12,0 %	
Vand i kølede piller, %	12,3 %	
Rumvægt, kg/m ³	Mel: 400 kg Piller: 540 kg	

Bemærkninger: God og stabil drift med lavt elforbrug. Pillekvaliteten er relativ god men mangler hårdhed. Det tørrede mask har relativt dårlige pelleteringsegenskaber og kan ikke alene opveje sheaskråens gode pelleteringsegenskaber. Pillekvaliteten kan forbedres med en matrice med et større forhold mellem pillediameter og pressekanalens længde. 10-12 % vand i melblandingen er maksimum og er også passende, når varen skal være lagerstabil.

Teknologisk Institut, Forsøgsanlæg

Forsøg nr. 75M6M5	2005-3	
Dato, blande: 5/9-05	Dato, pelletere: 8/9-05	
Recept:	I alt, kg	
Råvare 1: 75 % M6: Carragenanaffald	580	
Råvare 2: 25 % M5: Sheaskrå	193	
Total, kg	773	
Formaling i Champion slaglemølle (1450 rpm), sold, Ø4,0 mm: Carragenanaffald er formalet ved 2500 kg/h (elforbrug 33-34 A = Nettoforbrug på 2 kWh/ton). Sheaskrå er ikke formalet.		
Vand tilsat i blander, kg	0	
Blandetid i horisontalblander, min:	10 min.	
Meltemperatur i kold mel, °C	20	
Pelletering , M12 presse	Matrice:	Ø8 x 90 P50 mm
Kapacitet, kg/h.	2300	
Meltemperatur i kaskadebl., °C	98	Damp 5,5 %
Pilletemperatur, °C	98	
Elforbrug, presse, amp kWh/ton	85	Total 21 kWh/ton. Korr. for tomgang 7,5
Opholdstid i båndkøler, min.	15	
Vibrationssigte, sold, mm	5 x 5	
Analyser:		
Smuld i varen: Prøve udtages før køler og nedkøles i kølekasser.		
Smulddannelse og hårdhed: Prøve udtages af sigtede piller efter køler.		
Smuld i varen, %	1,4	
Smulddannelse,%	1,1	
Kahl hårdhedstest, kg	38 (32-46)	
Vand i råvare 1: Carragenanaffald	11,7 %	
Vand i råvare 2: Sheaskrå	12,5 %	
Vand i melblanding, kold,	12,2 %	
Vand i kølede piller, %	12,1 %	
Rumvægt, kg/m ³	Mel: 400 kg	Piller: 780 kg

Bemærkninger: Blandingens gode vægtfylde og råvarernes gode pelleteringsegenskaber giver basis for en høj kapacitet og god pillekvalitet. Den valgte matrice har de rigtige dimensioner. Det passende vandindhold og en høj meltemperatur i melblandingen sikrer en høj pillekvalitet og et relativt lavt elforbrug. Bemærk, at carragenanaffald er let og billig at formale.

Teknologisk Institut, Forsøgsanlæg

Forsøg nr. 96M10A4	2005-2	
Dato, blande: 5/9-05	Dato, pelletere: 8/9-05	
Recept:	I alt, kg	
Råvare 1: 96 % M6: Kaffeskaller	830	
Additiv: 4 % A4: Kaolin	34,5	
<hr/>		
Total, kg	864,5	
Formaling i Champion slaglemølle (1450 rpm), sold, Ø4,0 mm: Ingen formaling		
Vand tilsat i blander, kg 26	ca. 2,9 %	
Blandetid i horisontalblender, min:	10 min.	
Meltemperatur i kold mel, °C	20	
Pelletering , M12 presse	Matrice:	Ø8 x 90 P50 mm
Kapacitet, kg/h	1100	
Meltemperatur i kaskadebl., °C	96-98	Damp 5,5 %
Pilletemperatur, °C	96-97	
Elforbrug, presse, amp.	77-78	Total 41 kWh/ton. Korr. for tomgang 12 kWh/ton
Opholdstid i båndkøler, min.	15	
Vibrationssigte, sold, mm	5 x 5	
Analyser:		
Smuld i varen: Prøve udtages før køler og nedkøles i kølekasser.		
Smulddannelse og hårdhed: Prøve udtages af sigtede piller efter køler.		
Smuld i varen, %	0,5	
Smulddannelse, %	1,7	
Kahl hårdhedstest, kg	34 (30-40)	
<hr/>		
Vand i råvare 1: Kaffeskaller	6,3 %	
Vand i melblanding, kold:	8,1 %	
Vand i kølede piller, %	8,4 %	
Rumvægt, kg/m ³	Mel: 160 kg	Piller: 720 kg

Bemærkninger: God og stabil drift med stor fyldning i anlægget pga. meleets lave vægtfylde. Matrizen er velegnet til pelletering af denne blanding bestående af kaffeskaller og kaolin. Kaffeskaller har gode pelleteringsegenskaber, og kaolin havde ingen negativ indflydelse på drifts- og pillekvaliteten, der er ensartet (lange og hårde med høj vægtfylde). Danner ingen smuld ved håndtering. Et passende vandindhold i pillerne sikrer en lagerstabil vare.

Bilag 3

