

www.sintef.no



**SINTEF Energiforskning AS**

Postadresse: 7465 Trondheim
Resepsjon: Sem Sælands vei 11
Telefon: 73 59 72 00
Telefaks: 73 59 72 50

www.energy.sintef.no

Foretaksregisteret:
NO 939 350 675 MVA

TEKNISK RAPPORT

SAK/OPPGAVE (tittel)

Status på problemer knyttet til bruk av ulike biobrensler

SAKSBEARBEIDER(E)

Judit Sandquist, Øyvind Skreiberg

OPPDRAGSGIVER(E)

KRAV konsortiet

TR NR. TR A6716	DATO 2008-09-15	OPPDRAGSGIVER(E)S REF.	PROSJEKTNR. 16X807
EL. ARKIVKODE 08061010322	RAPPORTTYPE	PROSJEKTANSVARLIG (NAVN, SIGN.) Lars Sørum	GRADERING Åpen
ISBN NR. 978-82-594-3373-2		FORSKNINGSSJEF (NAVN, SIGN.) Inge R. Gran <i>Inge R. Gran</i>	OPPLAG SIDER 27
AVDELING Energiprosesser	BESØKSADRESSE Kolbjørn Hejes vei 1a, 7465 Trondheim	LOKAL TELEFAKS 73592889	

RESULTAT (sammendrag)

Dagens energibehov øker i en slik takt at bruk av alternative biobrensler i biomasse kraft-varme anlegg i økende grad blir nødvendig for å oppnå kostnadseffektivitet. Disse alternative biobrenslene byr ofte på problemer på grunn av deres lavere brenselkvalitet sammenlignet med f.eks. flis. Den lavere brenselkvaliteten er i stor grad knyttet til brenselets kjemiske sammensetning og problemer enkelte forbindelser skaper i et bioenergianlegg. I denne rapporten er egenskapene for de mest vanlige biobrenslene beskrevet. Brenselets egenskaper påvirker hele prosesskjeden. Brenselets fysiske egenskaper, som energitetthet, partikkelstørrelse og -fordeling og form påvirker biomasselagring og -håndtering samt konverteringsprosessen. Brenselets kjemiske egenskaper påvirker både konverteringsprosessen, energiutnyttelsespotensialet, utslippene og driftsikkerheten. En av de største utfordringene er å hindre korrosjon og beleggdannelse.

Det finnes ulike metoder som kan redusere eller eliminere problemene, men per dags dato gjelder disse for større skala anlegg. Hittil har småskala anlegg valgt å fyre med høykvalitets brensler for å unngå de brenselrelaterte utfordringene. Det er derfor viktig å identifisere kostnadseffektive teknologier som kan brukes i småskala (< 10 MW innfyrt) anlegg. For å være kostnadseffektive i det lange løp må også småskala anlegg bruke brensler med lavere og mer ujevn kvalitet. Diverse teknologier er kandidater for småskala kraft-varme anlegg. De ulike teknologiene må vurderes og den eller de beste teknologiene for bruk i Norge må identifiseres. Gassifisering er en aktuell kandidat til å kunne gjøre småskala anlegg kostnadseffektive ved bruk av lavkvalitets brensler, men per i dag dominerer forbrenning.

KRAV prosjektets rolle i dette er å fokusere på småskala kraft-varme anlegg basert på biomasse, inkludert lavkvalitets biomasse, som én sannsynlig betydelig bidragsyter til det norske energisystemet i fremtiden.

STIKKORD

EGENVALGTE	Biomasse	Utslipp
	Kraft-varme	Beleggdannelse og korrosjon

INNHOLDSFORTEGNELSE

	Side
1	INTRODUKSJON..... 3
2	AKTUELLE BRENSLER OG DERES SAMMENSETNING..... 3
3	PROBLEMER..... 5
4	LØSNINGER PÅ PROBLEMER 12
4.1	BIOMASSE FORBEHANDLING 12
4.1.1	Tørking 12
4.1.2	Oppmaling 13
4.1.3	Pelletering og brikettering 13
4.1.4	Ballepressing..... 13
4.1.5	Utvasking..... 13
4.2	TILPASNING AV FORBRENNINGSTEKNOLOGI OG ANLEGG..... 14
4.2.1	Biomasse lagring 14
4.2.2	Tilpasset innmatingsystem 14
4.2.3	Tilpasset forbrenningskammer 16
4.2.4	Gassifisering 19
4.2.5	Lavere temperatur 22
4.2.6	Materialvalg 22
4.2.7	Additiver for å redusere korrosjon og beleggdannelse 22
4.2.8	NO _x reduksjon 23
4.2.9	Renseteknologi 24
5	HVA MÅ DET FORSKES MER PÅ? 25
6	KRAV PROSJEKTETS ROLLE I DETTE 26
7	KONKLUSJONER OG ANBEFALINGER FOR VIDERE ARBEID..... 26

1 INTRODUKSJON

Bortsett fra vannkraft er bioenergi den største fornybare energikilden i verden. Biomasse forbrenning er en vanlig måte å produsere varme på i Norge også. Den største andelen av bioenergi produseres i husholdninger, i vedovner og peiser. Det er mulig å produsere kombinert kraft og varme fra bioenergi også. Siden Norges befolkning er spredt er småskala anlegg anbefalt dersom man vil utnytte varmen fra et slikt anlegg. Dagens småskala anlegg er optimalisert for forbrenning av én type brensel for å unngå brenselrelaterte problemer. Dersom man ønsker å utnytte billig og variert brensel i et anlegg, må man se på de virkningene disse brenslene forårsaker. Billig og variert brensel utnyttes kun i medium- og storskala anlegg i dag fordi den type biomasse krever avansert og sofistikert forbrenningsteknologi, som er for dyr for småskala anlegg. En tommelfingerregel for dagens anlegg er at jo mindre anlegget er desto høyere krav stiller man til biomassen som mates inn. Denne rapporten undersøker egenskapene til de forskjellige brenslene, og deres virkning på forbrenningsprosessen samt drift av anlegg. Rapporten evaluerer brenselrelaterte problemer og mulighetene for å løse disse samt gir anbefalinger med hensyn til fremtidige forskningsoppgaver.

2 AKTUELLE BRENSLER OG DERES SAMMENSETNING

Brenselegenskapene til forskjellige biobrenslar varierer sterkt og er mest avhengig av biomasse typen og forbehandlingen. Forskjellige planter trenger forskjellig næring, og mengden av de uorganiske komponentene er avhengig av jordtypen og gjødslingen. Uorganiske komponenter finnes i forholdsvis lave konsentrasjoner i trevirke mens vanning og gjødsling gjør at disse komponentene finnes i høyere mengder i jordbruksplanter. Inert materiale slik som jordrester øker også askeinnholdet i brenselet. Fysisk form, størrelse og størrelsesfordeling er avhengig av forbehandlings- eller foredlingsmåten, mens kjemiske egenskaper og askeegenskaper er avhengig av biomasse type.

Fuktigheten varierer sterkt, pellets har omtrent 10% fuktighet (våt basis), halm har 15%, mens treflis og sagflis har rundt 50%. For å kunne beregne energimengden i et gitt brensel tar man utgangspunkt i brenselets brennverdi. Brennverdien til et gitt brensel kan uttrykkes på forskjellige måter. Med den effektive brennverdien menes nedre brennverdi redusert med fordampningsvarmen for det vann som brenselet inneholder. Nedre brennverdi er øvre brennverdi minus tapt fordampningsvarme fra vannet som dannes fra hydrogenet under forbrenningen. Nedre brennverdi gjelder tørt brensel. Øvre brennverdi gjelder tørt brensel og samtidig gjør man ingen korreksjoner for fordampning. Øvre brennverdi til biomasse ligger mellom 18 og 21 MJ/kg brensel, hvorav den laveste verdien gjelder halm, gress og jordbruksrester, og den høyeste verdien gjelder trevirke og bark. Forklaringen er at trevirke og bark har relativt sett flere karbonatomer. Oksygeninnhold minker brennverdien. Brennverdien kan relateres til volum istedenfor vekt og da er det følgende uttrykk som blir brukt¹:

¹ Morten Grønli, Biobrenslar, SINTEF Energiforskning AS, Bionett Temabladd
16X807 TR A6716

- Fastkubikk (fastvolum), fm^3 , betyr nettovolum av virke i stabel eller haug uten luftvolum.
- Løskubikk (løsvolum), lm^3 , betyr bruttovolum, dvs. hulrom som har oppstått ved stabling eller lasting er inkludert.
- Fastmasseprosent, FM, betyr forholdet mellom fastvolum og løsvolum.

C, H, O, flyktige bestanddeler og askeinnhold er gitt i Tabell 1.

Tabell 1 Konsentrasjoner av C, H og O samt flyktige bestanddeler og askeinnhold i forskjellige biobrensler². Konsentrasjonen er angitt i vekt% tørr basis.

	Treflis	Bark	Halm
C	47,1-51,6	48,8-52,5	43,2-48,1
H	6,1-6,3	4,6-6,1	5,0-6,0
O	38,0-45,2	38,7-42,4	36,0-48,2
Flyktige bestanddeler	76,0-86,0	69,6-77,2	70,0-81,0
Askeinnhold	0,8-1,4	5,0-8,0	4,0-12,0

Konsentrasjon av mindre elementer er gitt i Tabell 2.

Tabell 2 Konsentrasjoner (tørr basis) av forskjellige mindre elementer i biomassen og i asken².

Element	Treflis	Bark	Halm
N (mg/kg)	900-2000	3000-4500	3000-5000
S (mg/kg)	70-300	350-550	500-1100
Cl (mg/kg)	50-60	150-200	2500-4000
Si (vekt% i aske)	4,0-11,0	7,0-17,0	16,0-30,0
Ca (vekt% i aske)	26,0-38,0	24,0-36,0	4,5-8,0
Mg (vekt% i aske)	2,2-3,6	2,4-5,6	1,1-2,7
K (vekt% i aske)	4,9-6,3	2,4-5,6	1,1-2,7
Na (vekt% i aske)	0,3-0,5	0,5-0,7	0,2-1,0
Zn (mg/kg i aske)	260-500	300-940	60-90
Cd (mg/kg i aske)	3,0-6,6	1,5-6,3	0,1-0,9

Fysiske egenskaper som fuktinnhold, brennverdier og tetthet er gitt i Tabell 3.

Tabell 3 Fysiske egenskaper: Fuktinnhold, brennverdier og tetthet².

	Treflis	Bark	Halm
Fuktinnhold (vekt%, våt basis)	50	50	15
GCV (MJ/kg, tørr basis)	19,8	20,2	18,7
NCV (MJ/kg, våt basis)	8	8,2	14,5
Bulktetthet (kg/m^3 , våt basis)	350-450	320	120
Energitetthet (MJ/m^3)	2800-3600	2620	1740

Askesmelteegenskapene vises i Tabell 4.

² Handbook of biomass combustion and co-firing, (ed.: Sjaak van Loo and Jaap Koppejan), Earthscan, 2008
16X807 TR A6716

Tabell 4 Askesmelteegenskapene².

	Treflis	Bark	Halm
Sintringstemperatur (°C)	1110-1340	1250-1390	800-860
Mykningstemperatur (°C)	1260-1640	1320-1680	860-910
Halvkuletemperatur (°C)	1310-1700	1340-1700	1040-1150
Smeltepunkt (°C)	1340-1700	1410-1700	1080-1290

3 PROBLEMER

Brenselet påvirker hele prosesskjeden i et forbrenningsanlegg. Formen og tettheten påvirker innmatingen. Kjemisk sammensetning, fuktighet og en del fysiske egenskaper påvirker forbrenningen. Hovedårsaken til utslipps-, korrosjons-, beleggdannelses- og askerelaterte problemer finner en i kjemiske brenseleegenskapene. Energitettheten påvirker lagrings- og transportkostnader, og helsefarer påvirker folk som jobber ved anlegget. Tabell 5 viser sammenhengen mellom biobrenselets egenskaper og eventuelle problemer de skaper.

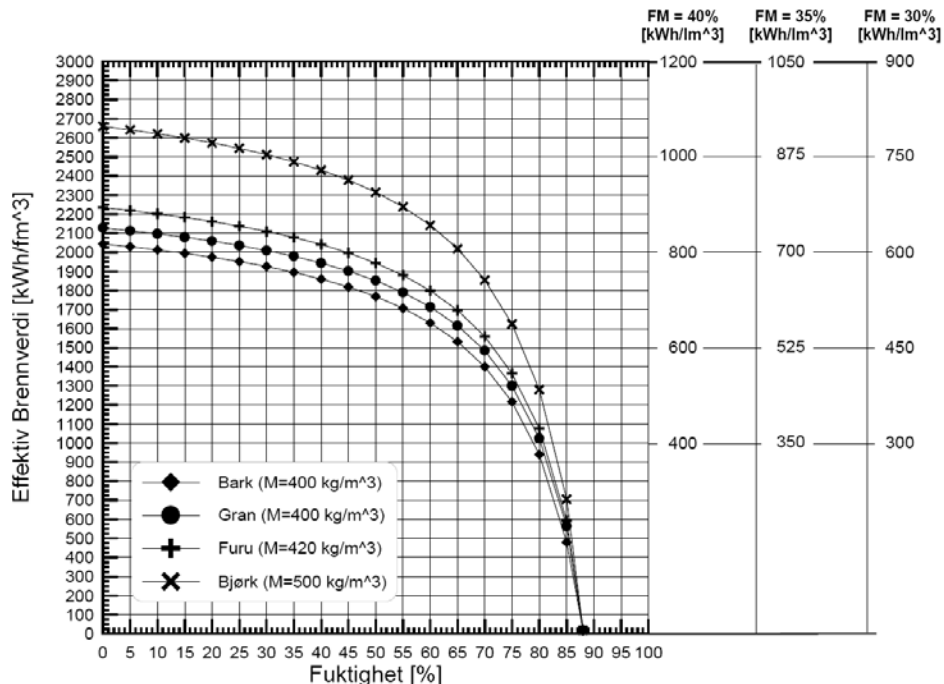
Tabell 5 De viktigste egenskapene til biobrensler og deres påvirkning på prosesser i et forbrenningsanlegg².

Egenskaper	Påvirkning
<i>Fysiske egenskaper</i>	
fuktighet	lagring, brennverdi, selvantenneing, anleggsdesign
brennverdi	brenselutnyttelse, anleggsdesign
flyktige bestanddeler	termisk nedbrytning
askeinnhold	støvutslipp, askehåndtering, askeutnyttelse, forbrenningsteknologi
askesmelte egenskapene	driftsikkerhet, forbrenningsteknologi, prosesstyring
soppdannelse	helsefare
bulkdensitet	logistikk (transport, håndtering, lagring)
partikkeltetthet	termisk konduktivitet, termisk nedbrytning
fysisk dimensjon, form, størrelsesfordeling	brenselhåndtering før innmating (heising, transport osv), innmating, driftsikkerhet, støvdannelse, tørking, forbrenningsteknologi

Tabell 5 forts.

<i>Kjemiske egenskaper</i>	
karbon, hydrogen, oksygen (C, H, O) innhold	brennverdi
klor (Cl)	HCl, dioksin utslipp, korrosjon
nitrogen (N)	NO _x , N ₂ O utslipp
fluor (F)	HF utslipp
kalium (K)	korrosjon, minker askesmeltetemperaturen, aerosoldannelse, askeutnyttelse (plantenæring)
natrium (Na)	korrosjon, minker askesmeltetemperaturen, aerosoldannelse
magnesium (Mg) og kalsium (Ca)	øker askesmeltetemperaturen, askeutnyttelse (plantenæring)
fosfor (P)	askeutnyttelse (plantenæring)
tungmetaller	tungmetall utslipp, askeutnyttelse, aerosoldannelse

Fuktighet påvirker forbrenningsegenskaper, fuktig brensel har lavere effektiv brennverdi (se Figur 1) trenger lengre oppholdstid og dermed større forbrenningskammer. Figur 1 viser også at ved ca 87% fuktighetsinnhold blir den effektive brennverdien tilnærmet null, dvs. det trengs like mye energi å fordampe fuktigheten som brenselet avgir ved forbrenning.



Figur 1 Sammenhengen mellom effektiv brennverdi og fuktighet for diverse tretyper og bark. Figuren viser effektiv brennverdi per fastkubikk (fm³) og per løskubikk (lm³), og i det siste er det antatt en fastmasseprosent (FM) på henholdsvis 40, 35 og 30%.¹

Røykgassvolumet øker også ved fuktig brensel, og effektiviteten til anlegget går ned. Effektiviteten kan også gå ned hvis brenselpartiklene blir for store i forhold til oppholdstiden i brennkammeret, dvs. at andelen uforbrent karbon i bunnasken øker. Da blir ikke alt karbon forbrent³. I tillegg øker CO utslipp sammenliknet med brensler med god karbonkonvertering.

I biomasse forbrenningsanlegg kommer NO_x utslipp fra brenselets nitrogeninnhold. Brensler med høyere nitrogeninnhold (f. eks. gress) slipper ut mer NO_x enn brensler med lavt nitrogeninnhold (f. eks. trevirke)^{3, 4}. NO_x utslipp er en av de viktigste miljøpåvirkningene ved biomasse (og avfall) forbrenning. Trevirke har lavest nitrogeninnhold, bark og halm har noe høyere. Gresstypene har ofte høyest nitrogeninnhold. Dersom brenselets nitrogeninnhold overstiger 0,6 vekt% kan man forvente utslippsrelaterte problemer, hvis det ikke finnes NO_x rensing i anlegget. Dette gjelder halm, korn, gress og fruktrester. Dersom anlegget brenner slike brensler må det ha teknologi for å redusere NO_x utslipp⁴.

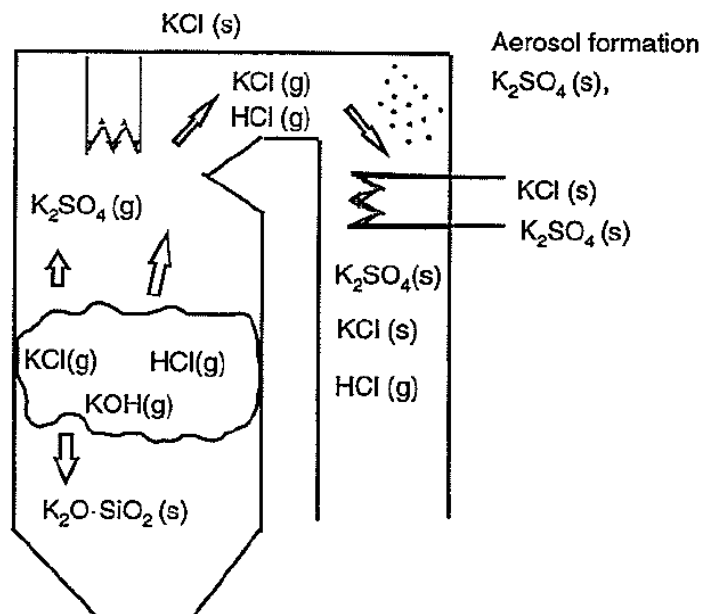
Biomassen i forbrenningskammeret gjennomgår mange reaksjoner. Først fordampes vann så blir de flyktige bestanddeler også fordampet (pyrolyse). Etterpå brennes trekull ut, som er en relativt treg reaksjon i forhold til fordampningen. Cl og S innhold i biomassen er ansvarlig for HCl og dioksin utslipp, SO₂ utslipp, korrosjon og beleggdannelse⁴.

I forbrenningsprosessen dannes alkaliklorider (KCl og NaCl), Cl₂ og HCl av brenselets Cl innhold. Korrosjon og HCl utslipp er forventet hvis Cl innholdet i brenselet overskrider 0,1 vekt%. Dette gjelder halm, korn, gress og fruktrester. Alkalimetaller (K og Na) er spesielt viktig i korrosjons- og beleggdannelsesprosesser siden de reagerer med klor og danner veldig korrosive forbindelser (KCl og NaCl hhv.).

Klor, svovel og kalium frigjøres under forbrenningen og havner i gassfasen (se Figur 2).

³ W. Permchart, V.I. Koupryanov: Emission performance and combustion efficiency of a conical fluidized-bed combustor firing various biomass fuels, *Bioresource Technology* 92 (2004) 83–91

⁴ I. Obernberger et al.: Chemical properties of solid biofuels—significance and impact, *Biomass and Bioenergy* 30 (2006) 973–982

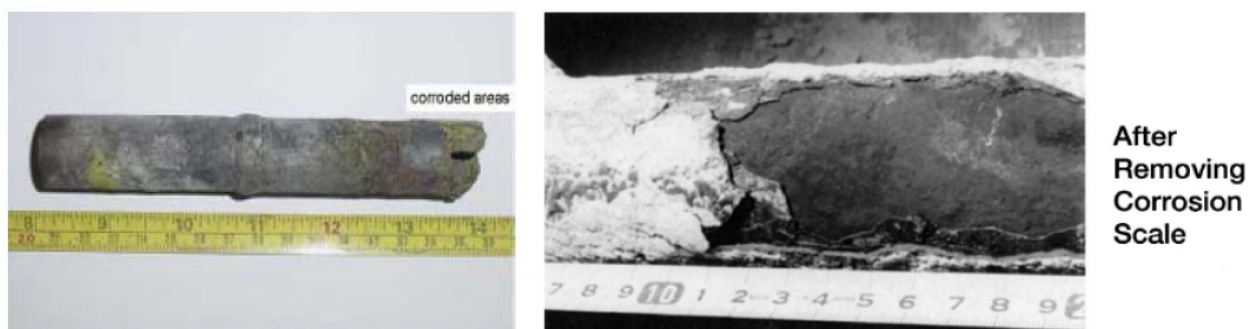


Figur 2 Kaliumforbindelser i forbrenningskammeret⁵.

Kaliumforbindelsene i gassfasen reagerer med askekomponenter og mineraler, eller kan kondensere på små partikler og danne aerosoler. Graden av Cl relaterte problemer korrelerer med brenselets Cl innhold fordi Cl frigjøres under pyrolyseprosessen mens mesteparten av metallene blir igjen i trekullet⁵. Derfor korrelerer ikke graden av alkalimetallrelaterte problemer med brenselets metallinnhold.

Problemer forårsaket av svovel er ikke relevant ved forbrenning av trevirke og bark, siden disse brenslene inneholder forholdsvis små mengder svovel, samt høy Ca i asken som bidrar til binding av mesteparten av svovel i asken. Svovelrelaterte problemer kan oppstå hvis brenselet inneholder mer enn 0,2 vekt% svovel⁴. Dette gjelder halm, korn, gress og fruktrestrester.

Korrosjon (Figur 3) er en kjemisk prosess hvor klor- og svovelholdige forbindelser reagerer med metallet (vanligvis stål) forbrenningskammeret og varmeveksleren er laget av. Dermed oksideres metallet fortere og dette minker levetiden til disse installasjonene.

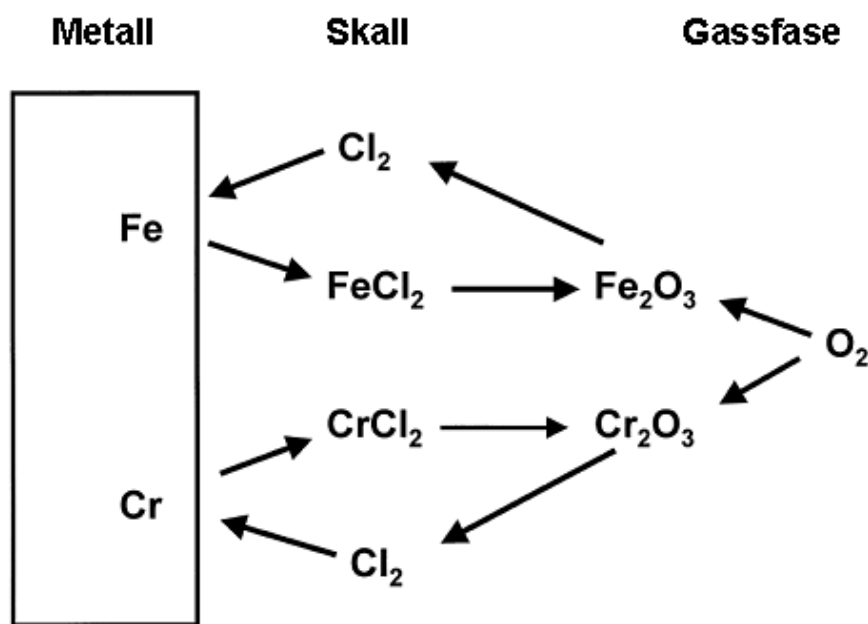


Figur 3 Korrosjon på varmeveksler rørene⁶.

⁵ H. P. Nielsen, Deposition and high-temperature corrosion in biomass fired boilers (PhD avhandling ved DTU, 1998)

⁶ Lee, Presented at NAWTEC 14, Tampa, FL, 02-05-2006

Korrosjonsmekanismer kan deles i to grupper: høytemperatur og lavtemperatur korrosjon. Klor og svovel er ansvarlig for korrosjon i begge gruppene⁷. Ved høye temperaturer angriper gassformige HCl/Cl₂ eller SO₂/SO₃ holdig gass metallet under oksiderende forhold. HCl og Cl₂ korroderer stål direkte ved å akselerere oksidasjonsreaksjonen. Klor har evnen til å penetrere det normalt så beskyttende oksidlaget. Cl₂ diffunderer gjennom oksidlaget, antagelig gjennom porer og sprekker, og reagerer med metallegeringen på metall/skall grenseflaten og danner metallklorider. De flyktige metallkloridene kan diffundere til skalloverflaten. Oksygenkonsentrasjonen øker med økende avstand fra metalloverflaten. Dette leder til oksidasjon av metallklorider til faste metalloksider. Klor frigis og kan diffundere til bulkgasstrømmen eller tilbake til metalloverflaten, og dermed er en syklus dannet (se Figur 4).



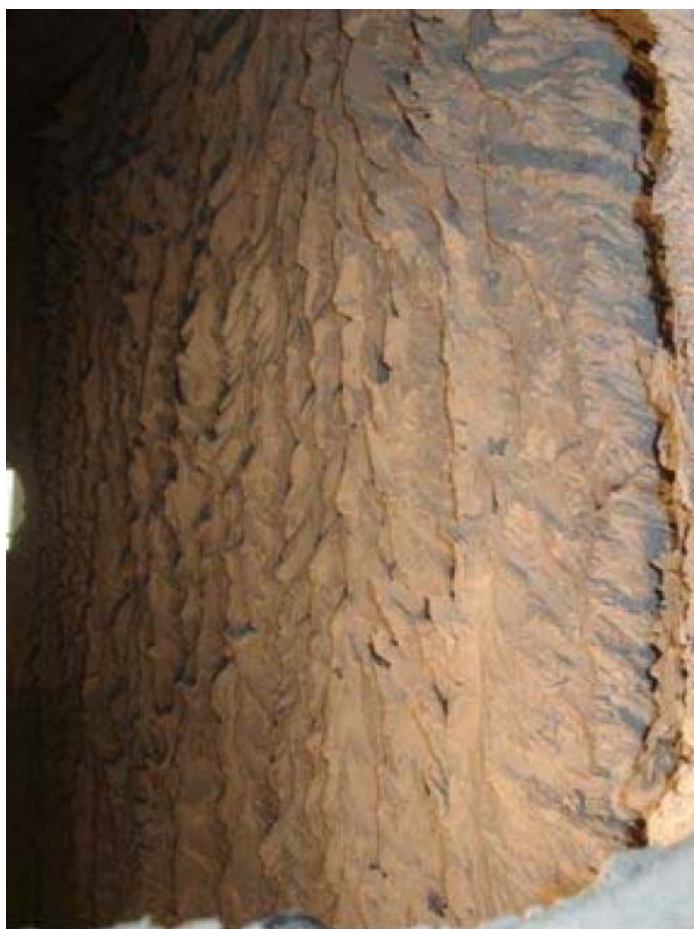
Figur 4 Skjematisk representasjon av korrosjon forårsaket av klor⁸.

Brenselets svovelinnhold konverteres hovedsakelig til SO₂, men kan kondensere på kjøligere vegger (lavtemperatur korrosjon), reagere med flyveaske og bidra til både korrosjon og beleggdannelse. Korrosjon forårsaket av SO₂/SO₃ under oksiderende forhold skjer i form av alkalisulfater og alkalipyrosulfater som danner smeltet belegg på rørene. Ved reduserende atmosfære mangler metallens beskyttende oksidbelegg delvis eller helt, og klor danner flyktige metallklorider og svovel danner sulfater eller pyrosulfater på metalloverflaten. Hastigheten av korrosjon i reduserende atmosfære er sterkt avhengig av temperaturen, da det innebærer frigjøring av metallklorider. I reduserende atmosfære dannes også H₂S som er mer korrosivt enn SO₂ ved oksiderende atmosfære og det er på grunn av høyere hastighet på kation diffusjon i sulfider enn i oksider.

⁷ Wright and Krause, Assessment of factors affecting boiler tube lifetime in waste-fired steam generators, Battelle, 505, King Avenue, Columbus, OH, USA 1994

⁸ H. P. Nielsen, F. J. Frandsen, K. Dam-Johansen, L. L. Baxter, The implications of chlorine-associated corrosion on the operation of biomass-fired boilers, *Progress in Energy and Combustion Science* 26 (2000) 283-298

Beleggdannelse (Figur 5) kan forekomme på kammersiden (slaggdannelse) og varmevekslersiden (groing).

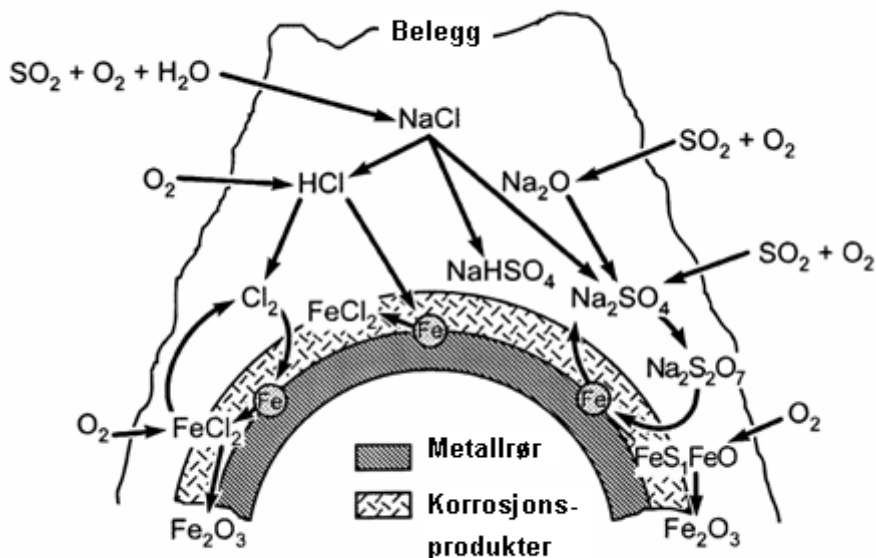


Figur 5 Beleggdannelse på kjelen⁹.

På varmevekslersiden er belegget ansvarlig for tap av effektivitet, blokkering (trykktap), og på kammersiden kan belegget skade risten eller forstyrre forbrenningsprosessen. I tillegg, avhengig av beleggets sammensetning, kan belegget ha korrosive egenskaper. Driften må stoppes for å fjerne belegg fra metalloverflatene. Skjer det altfor ofte, har det effekt på anleggets tilgjengelighet.

Korrosjon kan bli enda kraftigere hvis det er forårsaket av klor i belegget (se Figur 6).

⁹ E.N. Zelikov, E.P. Dik, G.A. Ryabov and A.N. Tugov, Ash properties, deposit formation and corrosion of superheater tubes of municipal solid waste firing in swirl fluidized bed furnaces, presented on CFB9, May, 13 – 16, 2008, Hamburg, Germany

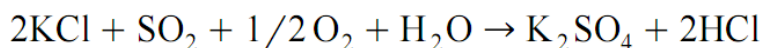


Figur 6 Korrosjonsreaksjoner som finner sted under belegget⁸.

Det er hovedsakelig to måter klorider som er til stede i belegget kan korrodere metallet⁸:

- Klorerte forbindelser med høyt partialtrykk nær metalloverflata angriper metallet på samme måte som beskrevet ved korrosjon i gassfasen.
- Kloridene i belegget kan danne eutektiske salter med lavt smeltepunkt som ødelegger oksidlaget.

Korrosjon er sterkere med noe SO₂ i røykgassen, sammenliknet med ingen SO₂⁸. Når SO₂ eller SO₃ er til stede reagerer kondensert KCl med de ifølge reaksjonen¹⁰:



Produktet er alkalisulfat og Cl₂ hvis ikke vanndamp er tilstede eller HCl hvis vanndamp er tilstede i brenselet. Ved denne reaksjonen blir Cl₂ eller HCl frigjort og forårsaker ytterligere korrosjon på metallet. Hvis reaksjonen skjer nær metalloverflaten i de indre belegglagene kan det forårsake at Cl konsentrasjonene blir veldig høye ved enkelte punkter⁸.

Korrosjon som er forårsaket av smeltet klor- eller svovelholdige salter er raskere enn faststoff korrosjon, på grunn av at kjemisk reaksjonshastighet er større ved væske-væske reaksjons enn faststoff-faststoff reaksjon. På den andre siden danner smeltet salt elektrolytter også, noe som bidrar til effektivt elektrokjemisk angrep, ved å transportere ioner raskt.

Graden av korrosjon og beleggdannelse er avhengig av forbrenningsteknologi, temperatur og brensel (forbindelsene reagerer og påvirker hverandre, og den relative mengden av materialene

¹⁰ L. A. Hansen, H. P. Nielsen, F. J. Frandsen, K. Dam-Johansen, S. Hørlyck, A. Karlsson, Influence of deposit formation on corrosion at a straw-fired boiler, *Fuel Processing Technology* 64 (2000) 189-209
16X807 TR A6716

er viktig). Ved stoker- og ristforbrenning blir mesteparten av asken samlet i bunnaske, grunnet lite medrivning av aske. Ved andre teknologier (pulver forbrenning) medrives mye større andel av asken som havner som flyveaske. Flyveasken transporteres gjennom hele forbrenningssystemet og kan kondenseres på kaldere flater.

Det finnes sporelementer i biomassen, hvorav hovedelementer er Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P, Si og Ti, men også As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Tl, V og Zn kan finnes. Disse elementene sammen med S og Cl danner asken, og deres mengder påvirker askesmelteegenskapene, beleggdannelse, flyveaske og aerosol utslipp, korrosjon samt mulighetene til askeutnyttelse. Ca og Mg øker askesmeltepunktet mens K minker det. Klorider og alkali- og aluminasilikater med lav smeltepunkt minker askesmeltepunktet til biomassen også. Lavt askesmeltepunkt bidrar til slaggdannelse i forbrenningskammeret, som minker tilgjengelighet og levetid på anlegget. I tillegg danner smeltet flyveaske hardt belegg. Halm, korn og gress har vesentlig lavere askesintringspunkt enn trevirke og bark.

4 LØSNINGER PÅ PROBLEMER

Siden det er godt kjent hvilke egenskaper som forårsaker problemer og hvilket problem som er knyttet til en viss egenskap finnes det løsningsmuligheter på problemene. Basert på løsningsvalg man kan enten forbehandle biomassen eller tilpasse forbrenningsteknologien/anlegget.

4.1 BIOMASSE FORBEHANDLING

Biomasse forbehandling fjerner problemkomponentene før biomassen mates inn. Forbehandlingen kan velges hvis en vil minke driftsproblemene og -kostnadene, samt produsere et brensel med jevn kvalitet. Biomasse forbehandling velges også når en vil redusere transport og håndteringskostnadene ved å øke energidensiteten.

4.1.1 Tørking

Tørking av biomasse har en signifikant virkning på brenselkostnadene og bør derfor være enklest og billigst mulig. Den mest effektive metoden er utendørs tørking hvor man legger den ferske biomassen i hauger og lar det tørke utover sommeren. Fuktigheten kan reduseres fra 50 til 30% med denne metoden. Man kan la halmen ligge på jorden noen dager før den balles også. Ulempen med denne metoden er at det er væravhengig, som kan være en utfordring i Norge. En annen ulempe kan være biologisk nedbrytning (biomassen råtner). Biologisk nedbrytning medfører energitap i biomassen men det er ikke bare negativt, det produseres varme og prosessen bidrar dermed til å tørke den innerste delen av haugen². For å unngå at regnvann tilbakefører fuktigheten kan haugen lagres innendørs. I dette tilfellet balanserer tørkingen energitapet ved biologisk nedbrytning og biomassen opprettholder brennverdien.

Innendørs tørking kan støttes med ventilasjon. Den ventilerte luften kan være på romtemperatur eller forvarmet avhengig av tilgjengelighet på effektiv og billig oppvarming (lavverdi prosessvarme). En må både tenke på investerings- og driftskostnadene når det gjelder biomasse tørking, og dette gjelder særlig småskala anlegg.

Hvis en trenger raskere tørking (for eksempel ved pellets- og brikettproduksjon) kan man bruke en kontinuerlig tørkeprosess. Disse kan være beltetørkere, trommeltørker, fluidisert bed tørkere osv. Tørking er raskere ved høyere temperaturer men da taper man energi i form av flyktige organiske forbindelser, samtidig som disse skaper utslippsproblemer.

Om biomasse tørking er lønnsomt eller ikke må vurderes nøye. Det kommer an på biomassen, anleggsutformingen og forbrenningsteknologien, og den valgte tørketeknologien samt skala på anlegget.

4.1.2 Oppmaling

For å redusere partikkelstørrelsen trengs oppmaling. Flishugger kan brukes for trevirke, og bruker en energimengde som tilsvarer 1-3% av energien i biomassen. For å redusere kostnadene kan dette brukes kombinert med innhøstning. Trenger man mindre partikkelstørrelse, kan for eksempel hammermøller brukes.

4.1.3 Pelletering og brikettering

For å øke partikkelstørrelsen og -densiteten kan man pellettere eller brikettere brenselet. Pellets har en diameter på 6-8 mm, mens briketter har en diameter på 30-100 mm. Fordelene med pellets er den enkle håndteringen (pellets kan pumpes for eksempel) og eliminering av støv. For å pellettere må man først tørke og male opp biomassen. Uten tørking brukes det en energimengde som tilsvarer 2% av brenselets energi (basert på sagflis). Etter pelletering må man kjøle av pellettene. I noen tilfeller (halm) må additiver brukes i pelleteringsprosessen også for å binde biomassen. Additivene kan øke sannsynligheten for brenselrelaterte problemer da det tilføres ytterligere stoff til biomassen. I noen land er det derfor forbudt med kjemiske bindemidler². Briketter er brukt mest i husstandene som erstatning for ved.

4.1.4 Ballepressing

Jordbruksrester som for eksempel halm og gress kan presses i baller for å øke energidensiteten og dermed redusere transportkostnadene. Håndteringen blir forenklet også. Rester fra skogbruk kan også presses i baller, for å redusere transportkostnadene. Ballene er like jordbruksballer.

4.1.5 Utvasking

Utvasking med vann fjerner > 80% av natrium- og kaliuminnholdet, > 90% av klorinnholdet og mindre mengder av svovel og fosfor. Dermed øker for eksempel askesmeltetemperaturen av halm med 500 °C¹¹.

Den enkleste og billigste måten å utføre utvasking på er å la biomassen ligge på jordet. I dette tilfellet vasker regn ut de uorganiske næringselementene fra den slådde biomassen. Fordelen med dette er at det er enkelt, billig og næringselementer vaskes tilbake til jordet, slik at det trengs mindre gjødsling etterpå. Ulempen med dette er at det er tidskrevende, og jordet kan ikke brukes mens biomassen ligger der.

Tabell 6 viser kostnader og energibehov av de overnevnte forbehandlingsmåtene.

¹¹ D. C. Dayton, B. M. Jenkins, S. Q. Turn, R. R. Bakker, R. B. Williams, D. Belle-Oudry, L. M. Hill, Release of inorganic constituents from leached biomass during thermal conversion, *Energy & Fuels* 13 (1999) 860-870
16X807 TR A6716

Tabell 6 Kostnader og energibehov for diverse biomasse forbehandlingsprosesser ².

Prosess	Kostnader (US\$/ tonn)	Energibehov (kWh_e/ tonn)
Knusing, flising, opprivning	8	15
Oppmaling	16	25
Pulverisering	40	40
Mekanisk separering (sikting)	12	10
Brikettering, pelletering	10-32	15-80
Mekanisk avvanning	4	1,4
Tørking (50 -> 15%)	9	
Tørking (termisk, 75 -> 15%)	40	3 GJ _{te} /tonn
Foredlet avfallsbrensel	24-44 (avhengig av behov for tørking og/eller pelletering)	15-100 150-700 MJ _{te} /tonn (avhengig av behov for tørking og/eller pelletering)

4.2 TILPASNING AV FORBRENNINGSTEKNOLOGI OG ANLEGG

4.2.1 Biomasse lagring

For å sikre kontinuerlig drift må biomassen lagres over en lengre periode. Dette påvirker anleggets økonomi og sikkerhet. Enkleste måte å lagre biomasse på er å lagre den i hauger. Under lagring kan biomassen tape tørrvekt samtidig som temperaturen i biomassen går opp, som i enkelte tilfeller resulterer i selvantennning. For å unngå temperaturøkning må partikkelstørrelsen være over 20 cm. Bark er mer utsatt for selvantennelse. En måte å unngå det på er å komprimere brenselet med beltetraktor. Lagring og tørking kan samkjøres også (se detaljer i Kap. 4.1.1/Tørking).

Når biomassen tørkes ute udekket, kan regnvann vaske ut mineraler. Dette resulterer i renere brensel men en må samtidig ta i betraktning utslipp til vann. I tillegg må grunnen dekkes slik at man unngår forurensning fra marken til biomassen. Biomasse med liten partikkelstørrelse (for eksempel sagflis) lagres i lukket silo, for å unngå støvutslipp. En må ta hensyn til brodannelse, når man designer silo og utmatingsystem.

4.2.2 Tilpasset innmatingsystem

Når en designer innmatingsystem må en ta hensyn til flere vilkår²:

- brenselkarakteristikk: partikkelstørrelse og -fordeling, fuktighet, form
- avstand
- eventuell høydeforskjell
- støy
- støvekspløsjon, brann
- ønsket kapasitet
- investerings- og driftskostnader
- tilgjengelighet

Innmatingen består av flere segmenter: transport av biomassen fra lagringsplass (langtids forvaring) til umiddelbar nærhet av forbrenningssystem (korttidslagring) og transport av biomassen inn i forbrenningskammeret.

Hjullastere brukes mellom langtids- og korttidslagringen. Disse er enkle og fleksible men de trenger operatør og kan dermed ikke opereres fullautomatisk. Driftskostnadene er også betydelige.

Kran er oftest brukt for å mate brenselet inn i forbrenningskammeret. De er enkle, fleksible og kan driftes fullautomatisk men dersom brenselet har veldig ujevn partikkelstørrelsesfordeling kan det bli problematisk.

Transportbånd kan transportere biomassen over forholdsvis lange avstander. Det er enkelt, billig og fleksibelt. Ulempen er at det passer ikke til store høydeforskjeller og det er dyrt å eliminere støvutslipp. De er også følsomme for eksterne påkjenninger (temperatur, forurensning på rullene). Transportrør laget av gummi eliminerer støvutslipp helt og kan håndtere høydeforskjell og avstand opp til 2000 m. Ulempen er at det er følsomt for skarpe gjenstander, hvis det blir punktert må hele røret byttes.

Kjedetransportbånd kan brukes til sagflis, treflis og bark, og kan håndtere stigning opp til 90 grader. De må kapsles inn hvis en vil unngå støvutslipp. Ulempen er begrenset kapasitet, og høyt kraftbehov.

Skruer transporterer bulk uten støvutslipp på korte avstander. Partikkelstørrelsen bør være under 50 mm, men fordelingen bør være definert. Denne typen transport passer til rene brensler med jevn partikkelstørrelsesfordeling. De er ganske små og relativt billige, ulempen er høyt kraftbehov.

Hydrauliske stempler er brukt i ristkamre, og passer best for baller og bulk med ikke jevn partikkelstørrelsesfordeling.

Koppelevatorer er brukt for transport av biomasse i stigninger. Partikkelstørrelsen og kapasiteten begrenses av koppstørrelsen.

Pneumatisk transportbånd er brukt når transportsystemet er komplekst. Disse brukes mest i støvbrennere.

Egnet transport- og innmatningssystem for de diverse brenslene finnes i Tabell 7.

Tabell 7 Egnet transportsystem og forbrenningsteknologi for diverse biomasse typer og størrelser²
(BFB: boblende fluidisert bed, CFB: sirkulerende fluidisert bed).

Biomasse form	Maksimum partikkelstørrelse	Egnet transportsystem	Egnet forbrenningsteknologi
bulkmateriale	< 5 mm	direkte innsprøyting pneumatisk innmating	direktefyrte kammere syklonbrenner CFB
bulkmateriale	< 50 mm	skruematere	undermatingsstoker ristkammere BFB, CFB
bulkmateriale	< 100 mm	vibrerende transportbånd kjedetransportbånd hydrauliske stempler	ristkammere BFB
bulkmateriale	< 500 mm	rulletransportør kjedetransportbånd	ristkammere BFB
opprevne baller	< 50 mm	pneumatisk innmating skruematere	direktefyrte kammere ristkammere BFB
baller, oppskjærte baller	hele baller	kran hydrauliske stempler	ristkammere sigarbrenner
pellets	< 30 mm	skruematere	undermatingsstoker ristkammere BFB, CFB
briketter	< 120 mm	rulletransportør kjedetransportbånd	ristkammere BFB

4.2.3 Tilpasset forbrenningskammer

I prinsippet finnes det tre typer forbrenningsteknologier: fast bed forbrenning, fluidisert bed forbrenning og pulverforbrenning. Egnet forbrenningsteknologi for diverse brenslere er vist i Tabell 7.

For ristforbrenning ligger teknologiforskjellene i ristutforming og strømming i kammeret. Strømningsmessig finnes det tre varianter: motstrøms, medstrøms og krysstrøms reaktorer. Valg av strømming er først og fremst avhengig av fuktighetsinnhold i brenselet. Motstrøm er best egnet for fuktige brenslere med lav brennverdi, mens medstrøm er valgt når brenselet er tørt (f. eks. halm). Krysstrøms reaktorer er mest brukt i anlegg med vertikalt sekundærkammer. Ristutformingen varierer også. Risten kan være kjølt for å unngå askesmelting (spesielt viktig når brenselet har lavt askesmeltepunkt som halm og gress) og for å forlenge levetiden til risten. Faste rister ble tidligere brukt kun i de minste anleggene men det var umulig å oppnå god kontroll over brenseltransport og brenselfordeling, og disse er ikke i bruk lenger. I dag er ristene bevegelige også i småskala anlegg. Ristene varierer i design og kan være horisontale eller skråstilt.

Det finnes mange typer av ristkammere avhengig av brukt ristteknologi. Fordelene er lave investerings- og driftskostnader og høyere fleksibilitet når det gjelder brensel sammenliknet med

andre teknologier. Ulempen er lavere effektivitet grunnet ikke homogen forbrenning og behov for ytterligere teknologi for NO_x reduksjon². Når det gjelder ristforbrenning er det viktig at en oppnår flertrinnsforbrenning ved å separere primærkammer og sekundærkammer. Dermed unngår en at primær- og sekundærluften blandes og separerer gassifiserings- og forbrenningssonen. Siden det er vanskelig å få god blanding av røykgass og luft i primærkammeret grunnet lav turbulens over risten må en ved hjelp av geometrien sikre nesten perfekt blanding av luft og røykgass i sekundærkammeret. Ved bedre miksing trenger en mindre oksygen for fullstendig utbrenning, og dermed øker effektiviteten. Bra blanding i sekundærkammeret kan oppnås når en sprøyter inn luft via dyser ved høy hastighet. Dysene må være jevnt fordelt i kammeret. Blandingen kan forbedres med små kanaler i sekundærkammeret også eller med vortex eller syklonisk strømning.

Sigarbrennere (Figur 7) en type forbrenningskamre som er utviklet i Danmark for å brenne ballet biomasse. Ballene kan være hele eller oppskjærte og mates inn med hydraulisk stempel i forbrenningskammeret.



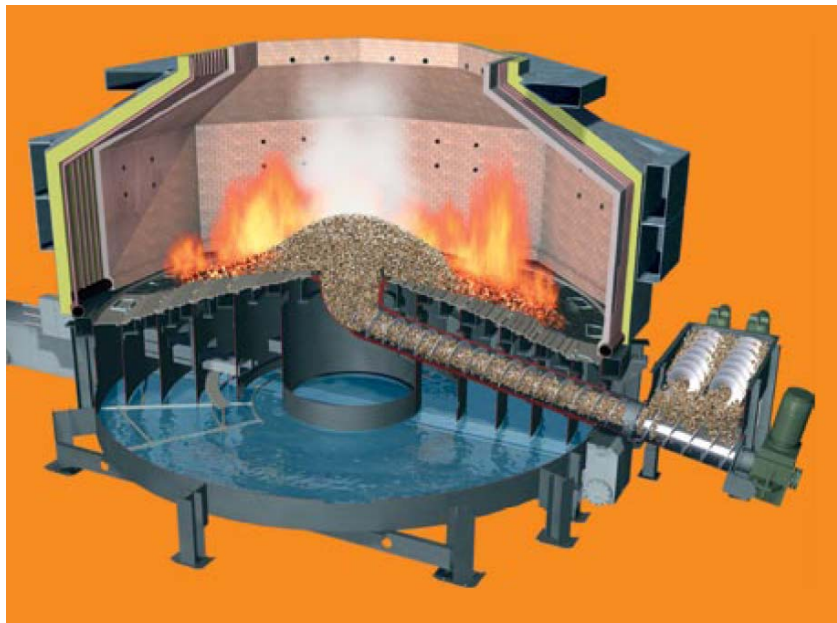
Figur 7 Sigarbrenner¹².

Temperaturen i brennkammeret må holdes under 900°C siden disse biomassetypene har lavt askesmeltepunkt. Dette kan gjøres med røykgassresirkulering eller ved å kjøle veggene ned med vann. Det finnes liknende systemer som kan fyre opprevne baller, forskjellen ligger da i innmatingssystemet. Det er ikke anbefalt å fyre ballene satsvis pga. høye CO verdier når en ny balle begynner å brenne.

Undermatingsstokere er et billig og driftsikkert alternativ for biomasseforbrenning i liten- og medium skala opp til 6 MW innfyrt kapasitet. De kan ta biomasse med lavt askeinnhold og partikkelstørrelse opp til 50 mm. Innmatingen skjer med skrue nedenfra. Primærluften tilsettes gjennom risten, og sekundærluften ved inngangen til sekundærkammeret. Undermatingsstokere er best egnet for trevirke, da de tåler kun brensel med lavt askeinnhold og høyt askesmeltepunkt. De har også lav fleksibilitet når det gjelder partikkelstørrelse (< 50 mm).

¹² http://www.videncenter.dk/gule%20halm%20haefte/Gul_Dansk/halm-DK07.pdf

Ristforbrenning med roterende undermatede rister (Figur 8) er ny finsk teknologi hvor de koniske ristseksjonene roterer i motsatt retning i forhold til hverandre og hvor primærluften kommer nedenfra.



Figur 8 Ristforbrenning med roterende undermatede rister¹³.

Teknologien resulterer i god blanding av våt og brennende biomasse på risten og gjør det mulig å brenne biomasse med høyt fuktighetsinnhold (opp til 65%). Denne forbrenningsteknologien tillater brenselmiks, sambrenning av tørre og fuktige brensel, for eksempel ved og slam. Systemet er datastyrt og fullt automatisert. Biomassen mates inn nedenfra med skruematere, dvs. teknologien har en øvre grense på partikkelstørrelse på 50 mm. Biomassen forflytter seg fra midten av reaktoren til kantene hvor utbrent aske detter ned i vannfylte askebeholdere. Gassene som frigjøres her brennes ut i et separat sekundærkammer som kan være horisontalt eller vertikalt. Den horisontale versjonen passer for biomasse forbrenningsanlegg med en nominell kapasitet mellom 3 og 17 MW innfyrt og den vertikale mellom 7,7 og 13,5 MW innfyrt.

Fluidisert bed forbrenning har vært brukt siden 1960 for avfallsforbrenning. Teknologisk sett skilles det mellom boblende fluidisert bed (BFB) og sirkulerende fluidisert bed (CFB). En fluidisert bed reaktor består av en sylindrisk kjerne med perforert plate som er fylt med inert stoff som kalles bedmateriale. Det inerte stoffet er oftest silika sand eller dolomitt. Bedmaterialet står for 90-98 % av brensel og bedmateriale blanding. Primærluften tilsettes gjennom den perforerte platen, og den fluidiserer innholdet i bedet. Forbrenningstemperaturen må holdes lav (650-900 °C) for å unngå bed agglomerering, spesielt når en fyrer med brensler med lavt askesmeltepunkt. Gasshastigheten i en boblende fluidisert bed ligger mellom 1 og 2 m/s mens i en sirkulerende fluidisert bed ligger den mellom 5 og 10 m/s. Fluidisert bed reaktorer har forholdsvis lang oppstartstid (8-15 timer) og krever hjelpebrenner. Teknologien er karakterisert med god varmeoverføring og god blanding av brensel og luft og dermed lavt NO_x utslipp. Det er kun små

¹³ http://www.wartsila.com/Wartsila/global/docs/en/power/media_publications/brochures/Biopower/Biopower_2007_UK.pdf

mengder av overskuddsluft som trengs, som gjør at røykgassmengden er mindre og effektiviteten er høyere. Fluidisert bed teknologi er mest egnet for større skala enn KRAV prosjektet omfatter. BFB og CFB har lav fleksibilitet for partikkelstørrelse og er best egnet for større skala (> 20 og 30 MW innfyrt hhv.) BFB håndterer større partikler (< 80 mm) enn CFB (< 40 mm).

Pulverforbrenning er egnet til brensler med liten partikkelstørrelse (< 10-20 mm) og lite fuktinnhold (maksimum 20 wt% på våt basis). Brenselet mates inn pneumatisk, og innmatingsluften brukes som primærluft. For oppstart trenger reaktoren en hjelpebrenner. Når forbrenningstemperaturen er nådd sprøytes biomassen inn. Innsprøytingen skal være slik at en oppnår vortex strømming i reaktoren. Røykgassresirkulering kan hjelpe strømmingen ytterligere. Kapasiteten er 2-8 MW innfyrt.

4.2.4 Gassifisering

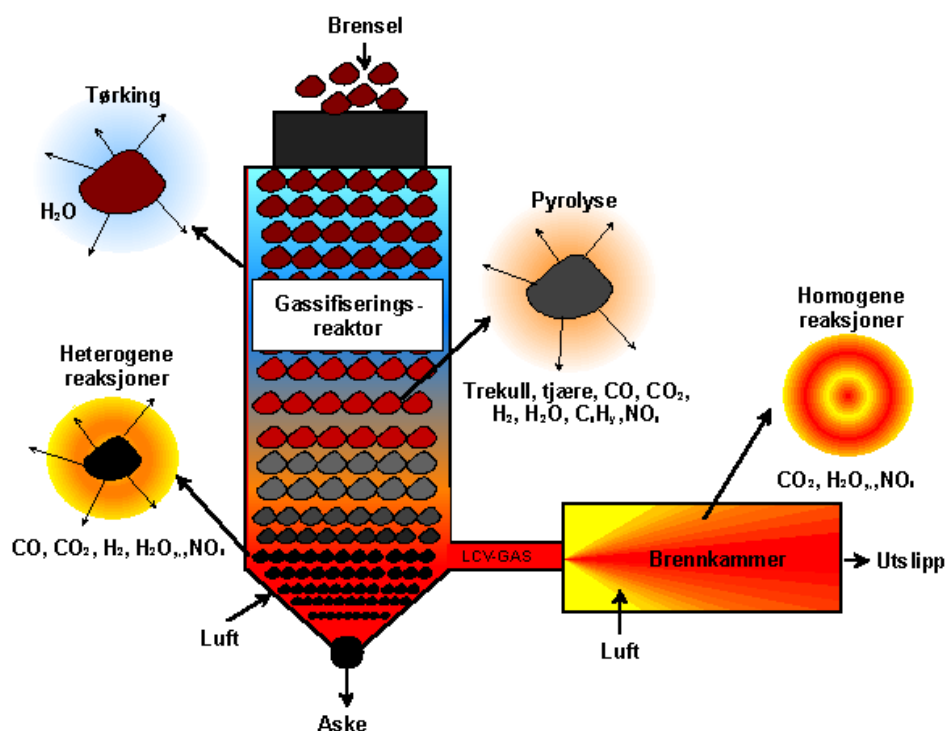
Gassifisering er forventet å løse en del brenselrelaterte problemer¹⁴. Gassifiseringen skjer i de aller fleste teknologier under askesmeltetemperaturen til brenselet, og dermed kan askerelaterte problemer begrenses. Teknologien kan gi besparelser også ved å redusere investerings- og driftkostnader pga. at det produseres mindre gassvolum. Gassifisering kan også eliminere problemer relatert til korrosjon og beleggdannelse¹⁵. Gassifisering av karbonholdige materialer er gammel teknologi. Den første kommersielle forgasseren ble installert i 1839¹⁶. Teknologien ble interessant når oljen var dyr og lite tilgjengelig som under andre verdenskrig og energikrisen på 70 tallet. På begynnelsen av 80 tallet ble mange biomasse forgassere installert men ble forlatt etter at oljen ble billig igjen. Nå er det klimaendringer som driver teknologiutviklingen igjen. I tillegg stilles det strengere krav til utslippssiden. Biomasse gassifisering er ansett som en lovende teknologi for å produsere kraft, varme og/eller biodrivstoff i dag. Dette er pga. høyere effektivitet, lavere utslipp og potensielt lavere kostnader sammenliknet med biomasse forbrenning. Likevel er teknologien for å produsere brennbar gass ennå i en kommersialiseringsfase grunnet noen gjenstående biomasserelaterte utfordringer.

Biomasse gassifisering er en endoterm reaksjon (se Figur 9) hvor biomassen blir konvertert til brennbar gass. Teknologien bruker forholdsvis høye temperaturer (700-1500 °C) og begrenset tilgang til oksideringsmiddel som kan være luft, oksygen eller damp. Gassen har en brennverdi på 4-6 MJ/Nm³ ved de enkleste teknologiene (fastbed gassifisering med luft) og mellom 13-20 MJ/Nm³ ved de mest effektive teknologiene.

¹⁴ Bébar et al. Analysis of using gasification and incineration for thermal processing of wastes, *Applied Thermal Engineering*, 25, 1045-1055 (2005)

¹⁵ Blander, Biomass gasification as a means for avoiding fouling and corrosion during combustion, *Journal of Molecular Liquids*, 83, 323-328 (1999)

¹⁶ Knoef, Overview of small scale biomass gasification in *Pyrolysis and gasification of biomass and waste (ed.: Bridgwater)* 2003



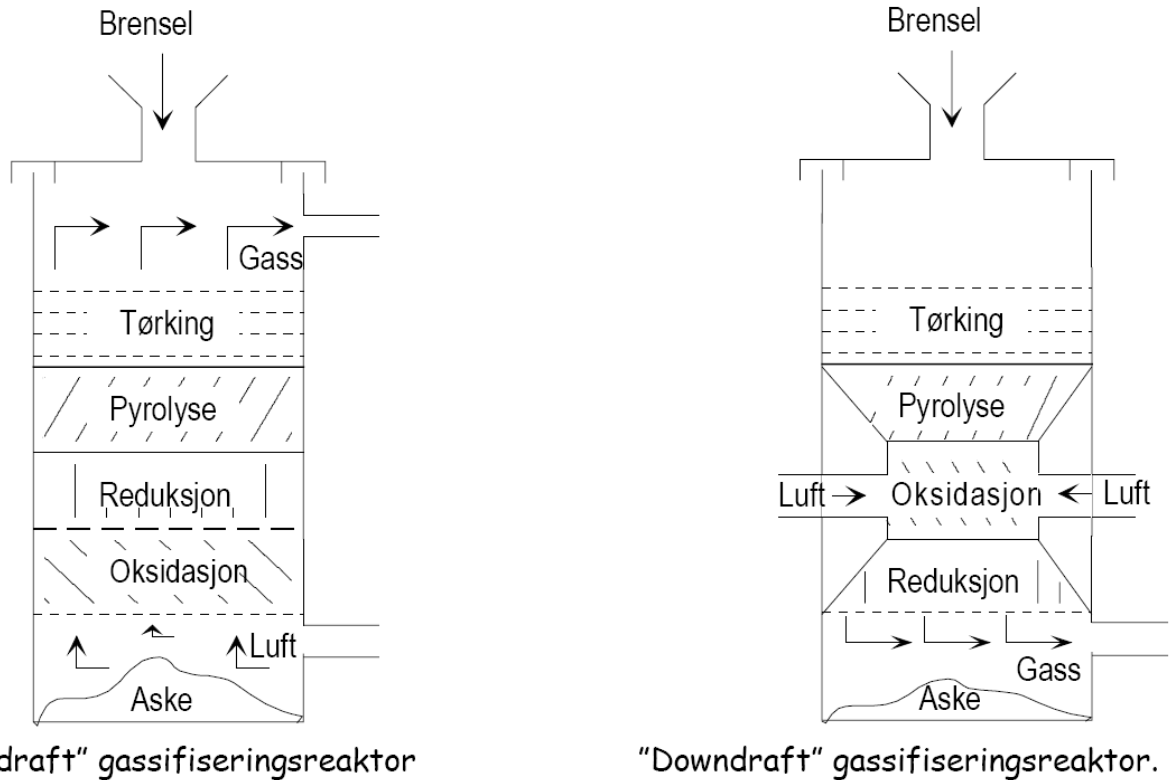
Figur 9 Biomasse gassifiseringsprosess¹⁷.

Det finnes tre konsepter når det gjelder gassifisering: fast bed, fluidisert bed og medrivningsstrøm gassifisering. For liten og medium skala anbefales fast bed teknologien, mens fluidisert bed og entrained flow er beregnet for storskala bruk¹⁸.

Innen fast bed teknologien skilles det mellom oppstrøms og nedstrøms reaktorer. Biomassen tilsettes på toppen av reaktoren og flytter seg nedover ved hjelp av tyngdekraften. Oppholdstiden er lang, og gasshastigheten er liten i disse reaktorene. Biomassen flytter seg gjennom forskjellige reaksjonssoner som illustrert på Figur 10. Forskjellen mellom oppstrøms og nedstrøms forgassere ligger i hvor gassen tilsettes, og rekkefølgen på reaksjonssonene.

¹⁷ <http://www.energy.sintef.no/publ/xergi/2002/1/art-4.htm>

¹⁸ Obernberger and Biedermann, Combustion and gasification of solid biomass for heat and power production in Europe – state-of-the-art and relevant future developments, 2005 (<http://www.bios-bioenergy.at/uploads/media/Paper-Obernberger-CHPOverview-2005-10-11.pdf>)



Figur 10 Oppstrøms og nedstrøms gassifiseringsreaktor¹⁹.

Fordeler med oppstrøms gassifiseringsreaktoren er at den har en veldig effektiv tørkesone, dvs. brensler med høyt fuktighetsinnhold kan gassifiseres. Videre er det en enkel og meget robust konstruksjon og produktgassen har lav temperatur. Karbon omdannes effektivt og denne type gassifisering har høy termisk virkningsgrad. Ulempen er høyt tjære- og oljeinnhold i produktgassen siden konverteringen ikke er fullstendig. Gassen kan brukes til direkte fyring, men en omfattende renseprosess trengs før den føres inn i motorer. I en nedstrøms forgasser bytter oksiderings- og gassifiseringssonen plass i forhold til oppstrøms forgassereren. Dette gjør at produktgassen er betydelig renere og den inneholder veldig lite tjære. Prosessen er enkel og pålitelig. Ulempen er at produktgassen har høy temperatur og må kjøles ned, noe som reduserer effektiviteten. Andre ulemper er høyere partikkel- og askeinnhold i gassen i forhold til oppstrøms, og at reaktoren krever brensler med lav fuktighet.

Fluidisert bed gassifisering er beregnet for noe større skala. Selve fluidiseringen er det samme som diskutert før hos fluidisert forbrenning, men tilgangen til oksideringsmiddelet er begrenset. Det skiller også mellom boblende og sirkulerende fluidisert bed teknologi. Fordelene i forhold til fast bed gassifisering er kortere oppholdstid, bedre blanding, og at det ikke finnes separate reaksjonssoner. Fluidisert bed kan håndtere variasjoner i brenselkvaliteten. Teknologien tillater mange typer brensler, også med lavt askesmeltepunkt, fordi det driftes ved lave temperaturer. Den lave temperaturen er ikke bare fordelaktig. Produktgassen har høyt tjære- og støvinnhold pga. den lave gassifiseringstemperaturen. Andre ulemper er at høyt gassvolum trengs for fluidisering, kompleks drift og ufullstendig karbonkonvertering.

¹⁹ Morten Fossum, Gassifisering av biomasse, SINTEF Energiforskning AS, Bionett Temablad 16X807

Tvilling fluidisert bed reaktorer produserer gass med høyere brennverdi enn enkle fluidisert bed reaktorer¹⁹. Gassifiseringsreaktoren er egentlig en pyrolysereaktor som oppvarmes ved hjelp av varm sand fra en "tvilling" reaktor, reaktor 2. Reaktor 2 blir oppvarmet ved å brenne forkullet masse under tilførsel av luft før resirkulasjon til reaktor 1. Damp tilføres vanligvis også for å fremskynde "water-gas shift"-reaksjonen for å danne hydrogen og for å fremskynde karbondamp reaksjonene. Ulempen er at det er en kompleks og forholdsvis kostbar teknologi.

Medrivningsstrøm gassifisering er egnet til veldig store skalaer (over 100 MW) og krever brensel i pulverform og det blir ikke diskutert videre her. Disse kan også operere over askesmelte-temperaturen, på en kontrollert måte.

For < 1-5 MW_{el} skala er det oppstrøms, nedstrøms, eller BFB gassifisering som best egnet. Elektrisitetsproduksjon skjer da med Otto eller Diesel motorer. Gassturbiner er mer effektive men da må gassen komprimeres og teknologien er kun lønnsomt i større skala.

4.2.5 Lavere temperatur

Ved å minke temperaturen i overheteren minker korrosjon og beleggdannelse. Ulempen er redusert elektrisk virkningsgrad.

4.2.6 Materialvalg

Det er en del forskning på avanserte materialer for overheterer som gjør det mulig å beholde den høye temperaturen og dermed effektiviteten uten at det ødelegges pga korrosjon og belegg-dannelse. Ulempen er økte investeringskostnader.

4.2.7 Additiver for å redusere korrosjon og beleggdannelse

Korrosjon og beleggdannelse er et seriøst problem ved biomasse- og avfallsforbrenning. Erfaring viser at vanlig superheater stål ikke holder lenger enn 20 000 timer, eller fire år, før det må skiftes ut, dersom 100% vedbasert brensel og høyere temperaturer enn 480 °C blir brukt²⁰. Det mest kritiske området er hvor de varme røykgasskomponentene først treffer varmeveksler rørene. Miltner m. fl.²¹ hevder at korrosjonsraten går ned igjen hvis SO₂ konsentrasjonen overstiger en viss grense. Korrosjonen blir mindre hvis S:Cl raten er høyere enn 4. Da reagerer SO₂ med KCl allerede i gassfasen, før KCl kondenserer på metalloverflater, og dermed eliminerer KCl kondensering. Aho og Silvennoinen²² nevner at alkali kan fanges opp i SO₂ og aluminium silikater. De hevder også at belegg er vanskeligere å fjerne fra kjølte prøver enn fra varme. Ifølge Aho²³ minket kaolin kloridets tendens til å binde seg i belegg på varme metalloverflater. Han anbefaler sambrenning med for eksempel jordbruks- eller plastavfall for å holde additiv-kostnadene nede. De fant også at belegg fra kaldere prøver var mer klissete enn fra varme prøver. Belegg fra varme prøver var også lettere å fjerne. Henderson m fl.²⁰ brukte ammoniumsulfat

²⁰ P. Henderson, P. Szakálos, R. Petterson, J. Högberg, Reducing superheater corrosion in wood-fired boilers, *Materials and Corrosion* 57 (2006) 128-134

²¹ A. Miltner, G. Beckman, A. Friedl, Preventing the chlorine-induced high temperature corrosion in power boilers without loss of electrical efficiency in steam cycles, *Applied Thermal Engineering* 26 (2006) 2005-2011

²² Aho, J. Silvennoinen, Preventing chlorine deposition on heat transfer surfaces with aluminium – silicon rich biomass residue and additive, *Fuel* 83 (2004) 1299-1305

²³ M. Aho, Reduction of chlorine deposition in FB boilers with aluminium-containing additives, *Fuel* 80 (2001) 1943-1951

løsning for å konvertere KCl til K_2SO_4 som er mye mindre korrosivt. Forskerne mener at korrosjonsraten minket og beleggroing ble halvert etter ammoniumsulfat tilsetning i vedfyrte kjeler.

Hall and Williams²⁴ brukte kalsium-magnesium-acetat som additiv for å minke NO_x , SO_2 og HCl utslipp fra avfallsforbrenning. Kalsium-magnesium-acetat dekomponerer termisk til karbonater som absorberer forurensninger. Deres resultater viser at effektiviteten påvirkes av oksygen konsentrasjonen, ved økende O_2 konsentrasjon i røykgassen øker effektiviteten av SO_2 innfangning mens HCl og NO_x innfangningen minker.

4.2.8 NO_x reduksjon

Redusert luftoverskudd brukes for å redusere NO_x utslipp. Men, hvis det er veldig lite oksygen i forbrenningskammeret kan forbrenningen bli ufullstendig og CO dannelsen øker. Det er viktig å optimere luftoverskuddet. Rogaume m. fl.²⁵ har sett på hvordan den primære og sekundære lufttilførselen påvirker NO_x og CO utslipp. De mente at det finnes en grense ved et total luftoverskudd på 2,4. Under dette er blandingen mellom sekundærluft og produktene fra primær forbrenning viktig. Hvis man øker den sekundære luftoverskuddet blir blandingen bedre og temperaturen høyere i sekundærsonen. Over 2,4 blir denne blandingen mindre viktig. Hvis man øker den sekundære lufttilførselen blir temperaturen lavere i sekundærsonen. De nevner videre at under deres forsøksforhold blir NO_x kontrollert av oksygenforholdet i sekundærsonen, og at økning i det totale luftoverskuddet resulterer økning i NO_x utslippet.

En annen mulighet å redusere luftoverskuddet på er å resirkulere en del av røykgassen. Denne teknikken gir i tillegg mulighet til å styre temperaturen i forbrennings- eller sekundærkammeret. I dette tilfellet kan røykgassens oksygeninnhold styres med den primære lufttilførselen²⁶. Fordelene er mange: ved røykgassresirkulering minker røykgassmengden og mengden av tilført luft som trengs. Termisk NO_x dannelse minker når røykgassresirkulering blir brukt, pga. eliminering av temperaturtopper i kammeret, i tilfeller hvor temperaturtoppene er høye nok for signifikant termisk NO_x dannelse. Ulempene ved røykgassresirkulering kan være korrosjon forårsaket av store korrosive røykgassmengder som føres tilbake hvis røykgassen tas ut oppstrøms filtreringen. I dette tilfellet trengs det mindre røykgassfiltrering som minsker kostnadene, men en må ta hensyn til materialkrav og eventuell konsentrering av tungmetaller (Hg) må unngås. Hvis røykgassen tas ut nedstrøms filtreringen trengs det like stort filtreringsanlegg og dermed sparer man ikke noe på det, men korrosjonen forårsaket av resirkulering blir begrenset. En annen ulempe kan være kostnaden hvis man velger å oppgradere et eksisterende anlegg. Ved nye anlegg er kostnadene relativt mindre. Scharler m. fl.²⁷ har simulert biomasse forbrenning. De har demonstrert at optimert røykgassresirkulering kan kontrollere både CO utslipp og

²⁴ W. J. Hall, P. T. Williams, A novel additive for the reduction of acid gases and NO_x in municipal waste incinerator flue gas, *Waste Management & Research* 24 (2006) 388-396

²⁵ T. Rogaume, M. Auzanneau, F. Jabouille, J. C. Goudeau, J. L. Torero, The effect of different airflows on the formation of pollutants during waste incineration, *Fuel* 81 (2002) 2277-2288

²⁶ G. Liuzzo, N. Vardone, M. Bravi, The benefits of flue gas recirculation in waste incineration, *Waste Management* 27 (2007) 106-116

²⁷ R. Scharler, I. Obernberger, G. Längle, J. Heinze, CFD analysis of air staging and flue gas recirculation in biomass grate furnaces, *Proceedings of the 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry*, June 2000, Sevilla, Spain

temperaturtopper og dermed redusere termisk NO_x dannelse. Zhou m. fl.²⁸ bekreftet at røykgassresirkulering minker NO_x utslipp ved halmforbrenning. De har regnet ut at opptil 20% av røykgassen kan resirkuleres uten å påvirke forbrenningen.

4.2.9 Renseteknologi

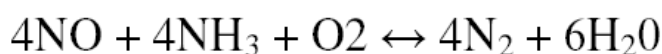
Under forbrenningen er det en del forurensninger som dannes, og en del av dem havner i røykgassen. Enkelte av disse forurensningene finnes i røykgassen fordi de finnes i brenselet også. Forurensninger som kommer fra brenselet er partikler, NO_x, SO_x, osv. Forurensninger kan komme pga. dårlig forbrenning. Disse er sotpartikler, CO, dioksiner, osv. Mesteparten av metallet som finnes i biomassen blir igjen i asken, bortsett fra kvikksølv. Det er viktig å fjerne forurensninger fra røykgassen før den slippes ut til luften, da de kan forårsake skade både på menneskelig helse og i miljøet.

Det finnes hovedsakelig fire metoder for røykgassrensing²⁹:

- Fjerning av partikler og støv
- Fjerning av vannløselige gasser: SO₂, HCl, HF og NH₃
- Fjerning av NO_x, hovedsakelig NO
- Fjerning av veldig giftige komponenter: dioksiner og kvikksølv

Partikler kan deles i to grupper, submikron som har størrelsen under 1 µm og supermikron, som har partikkelstørrelse over dette. Submikronpartikler er veldig helseskadelige og de har kommet i fokus i den siste tiden. Mesteparten av partiklene blir vanligvis fjernet ved hjelp av sykkloner. Resten av partiklene kan fjernes ved hjelp av skrubberer, tørre eller våte elektrofiltre, sandfiltre eller posefiltre. Vannløslige gasser (for eksempel CO og HCl) kan fjernes med skrubberer. Tørre skrubberer trenger mye kjemikalier for å fjerne gassene effektivt mens vann fra våte skrubberer trenger spesialbehandling, før det slippes ut eller resirkuleres.

NO_x består hovedsakelig (95%) av NO. NO fjernes ved hjelp av ammoniakk etter den følgende reaksjonen²⁹:



Reaksjonen kan skje i røykgassen, mellom 850 og 1000°C, og da kalles det selektiv ikke-katalytisk reduksjon (SNCR), eller ved hjelp av en katalysator, mellom 170 og 450°C og da kalles prosessen selektiv katalytisk reduksjon (SCR). SNCR er billigst, men krever stabile forhold, med stabile strømninger og er mindre effektivt enn SCR. Ved SNCR er det ofte ekstra ammoniakk som må brukes for å fjerne tilstrekkelig NO. Det resulterer i høye konsentrasjoner av ammoniakk i røykgassen og det må fjernes. SCR kan derimot fjerne NO i alle installasjoner, og er en velkjent og pålitelig teknologi. Katalysatoren kan plasseres før støvrensningen eller etter støvrensningen. Ulempen med teknologien er kostnaden og katalysator deaktivering, som må tas hensyn til.

²⁸ H. Zhou, A. D. Jensen, P. Glarborg, A. Kavaliauskas, Formation and reduction of nitric oxide in fixed-bed combustion of straw, *Fuel* 85 (2006) 705-716

²⁹ Carlsson, Gas cleaning in flue gas from combustion of biomass, Paper prepared for the EU project ThermalNet in January 2008

Dioksin blir fjernet ofte ved adsorpsjon, da den er tiltrukket i organiske flater. Kvikksølv fjernes ofte ved hjelp av spesialdesignede skrubberer hvis det er gassformig, eller filtre hvis det er partikler.

5 HVA MÅ DET FORSKES MER PÅ?

Det finnes mange områder en bør forske på². Disse er biomasse tilgjengelighet og potensial, forbehandling, forbrenning, kraft og varme systemer, prosesskontroll og gassrensing som gjør det mulig å brenne vanskelige brenslar. I tillegg er det viktig å minke investerings- og driftskostnader ved anlegget.

- For å dekke det økende energibehovet i verden er det ikke bare trevirke som må brukes men mye annet også. Det må utredes hvilke typer biomasse som kan brukes og i hvilken grad disse kan brukes. Verdikjeden må undersøkes fra produksjon av biomassen til distribusjonen av sluttproduktet.
- Utvikling av forbrenningsteknologier pågår fortsatt. Målet er å minke kostnadene og samtidig øke effektiviteten, tilgjengeligheten og driftsikkerheten. Et mer langsiktig mål er å øke temperaturen og trykket i kjelen slik at effektiviteten øker. For medium- og storskala anlegg vil bruk av alternative brenslar (energiplanter, avfallstrevirke og jordbruksrester) komme i fokus. Disse brenslene har ofte forskjellig kjemisk sammensetning, som gjør at forbrenning og gassrensing blir utfordrende.
- Det er et viktig mål for både liten-, medium- og storskala anlegg å redusere utslipp til luft, hovedsakelig NO_x. I tillegg styrer myndighetene grenseverdiene ned hele tiden. Derfor er det viktig å utvikle renere forbrenning og mer effektiv gassrensing. Det er spesielt viktig å utvikle effektive og billige metoder for småskala anlegg da de ikke har like god råd til avansert renseteknologi. En løsning er å forenkle de velkjente og pålitelige teknologiene fra stor- og mediumskala anlegg.
- Korrosjon, beleggdannelse og askerelaterte problemer er også et område med stort FoU behov. Spesielt når brenslar med høy Cl innhold og lavt askesmeltepunkt brukes. Det er også viktig å begrense utslipp av finpartikler. Dannelse og oppførsel av flyveaske og aerosoler er en viktig del av forskningen.
- I den seneste tiden har det blitt interessant å utvikle kraft og varme systemer i mikro-, små- og mediumskala. Nye systemer bruker organisk dampsyklus (ORC), og Stirling teknologi, hvorav Stirling teknologien er fortsatt i en demonstrasjonsfase. ORC er brukt i småskala anlegg mellom 200 og 2000 kW. Teknologien har fortsatt forskningsbehov, det må optimaliseres, kostnadene må reduseres og effektiviteten må forbedres.
- Samforbrenning av biomasse med fossile brenslar er også et område hvor det forskes.
- For å kunne bruke mange typer biobrensel må man oppgradere eller forbehandle enkelte av disse. Forbehandlingsmetodene må være energi- og kostnadseffektive.
- En viktig FoU oppgave er å modellere de termokjemiske prosessene, og CFD er et viktig verktøy for det. Forsøk modellert i CFD er mye billigere enn å kjøre virkelige forsøk i anlegget. CFD modeller må forbedres slik at de beskriver realiteten best mulig.

6 KRAV PROSJEKTETS ROLLE I DETTE

KRAV prosjektet tar sikte på å studere relevante aspekter knyttet til en fremtidig betydelig introduksjon av småskala kraft-varme anlegg i Norge. Norge har internasjonale klimaobligasjoner og nasjonale klima- og bioenergimål. Økt, og mer effektiv, bruk av biomasse ressursene i Norge vil kunne gi et meget betydelig bidrag til det norske energisystemet i nær fremtid. Norges nasjonale bioenergimål er en dobling av bioenergibruken innen år 2020, fra 14 til 28 TWh/år. Dette vil bringe med seg store muligheter for ny og økt industriutvikling i bioenergisektoren, skape arbeidsplasser og gi muligheter for teknologiekspert. Gjennom optimale kostnadseffektive løsninger gjennom hele bioenergikjeden vil Norge kunne oppnå en optimal ressursutnyttelse, som samtidig vil gagne miljøet både globalt, regionalt og lokalt. Men, en slik optimal ressursutnyttelse vil kreve en betydelig FoU innsats. KRAV prosjektets rolle i dette er å fokusere på småskala kraft-varme anlegg basert på biomasse, inkludert lavkvalitets biomasse, som én sannsynlig betydelig bidragsyter til det norske energisystemet i fremtiden.

7 KONKLUSJONER OG ANBEFALINGER FOR VIDERE ARBEID

Dagens energibehov øker i en slik takt at bruk av alternative biobrensler i biomasse kraft-varme anlegg i økende grad blir nødvendig for å oppnå kostnadseffektivitet. Disse alternative biobrenslene byr ofte på problemer på grunn av deres lavere brenselkvalitet sammenlignet med f.eks. flis. Den lavere brenselkvaliteten er i stor grad knyttet til brenselets kjemiske sammensetning og problemer enkelte forbindelser skaper i et bioenergianlegg. I denne rapporten er egenskapene for de mest vanlige biobrenslene beskrevet. Brenselets egenskaper påvirker hele prosesskjeden. Brenselets fysiske egenskaper, som energitetthet, partikkelstørrelse og -fordeling og form påvirker biomasselagring og -håndtering samt konverteringsprosessen. Brenselets kjemiske egenskaper påvirker både konverteringsprosessen, energiutnyttelsespotensialet, utslippene og driftsikkerheten. En av de største utfordringene er å hindre korrosjon og beleggdannelse.

Det finnes ulike metoder som kan redusere eller eliminere problemene, men per dags dato gjelder disse for større skala anlegg. Hittil har småskala anlegg valgt å fyre med høykvalitets brensler for å unngå de brenselrelaterte utfordringene. Det er derfor viktig å identifisere kostnadseffektive teknologier som kan brukes i småskala (< 10 MW innfyrt) anlegg. For å være kostnadseffektive i det lange løp må også småskala anlegg bruke brensler med lavere og mer ujevn kvalitet. Diverse teknologier er kandidater for småskala kraft-varme anlegg. De ulike teknologiene må vurderes og den eller de beste teknologiene for bruk i Norge må identifiseres. Gassifisering er en aktuell kandidat til å kunne gjøre småskala anlegg kostnadseffektive ved bruk av lavkvalitets brensler, men per i dag dominerer forbrenning.

SINTEF Energiforskning AS
Adresse: 7465 Trondheim
Telefon: 73 59 72 00

SINTEF Energy Research
Address: NO 7465 Trondheim
Phone: + 47 73 59 72 00