



Miljø- og
Fødevareministeriet
Miljøstyrelsen

Luftemissioner fra halmfyr

Miljøprojekt nr. 1958

September 2017

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:
Anne Mette Frey,
Jes Sig Andersen,
Torben Nørgaard Jensen

ISBN: 978-87-93614-24-6

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse

Indholdsfortegnelse

1. Hovedresultater	5
1.1. Screening af eksisterende målinger og projekter	5
1.2. Estimat over emissioner fra halmfyr	6
1.3. Vurdering af reduktionspotentiale	6
1.4. Mulige sekundære virkemidler samt disses effekt på omkostningerne.....	7
1.5. Prisen for varme afhængig af om halmfyr kan opfylde BK krav	7
1.6. Oversigt over konkurrerende fyringsteknologier.....	8
2. Problemstilling	8
3. Baggrund	10
4. Emissionsopgørelse	11
4.1. Opgørelse over støvemission	11
4.2. Antal halmfyr	11
4.3. Aldersfordeling af populationen af halmfyr	13
4.4. Fordeling efter anlægsstørrelse (ydelse) i kW	13
4.5. Forbruget af halm til gårdfyr	15
4.6. Partikelemission fra gårdfyr	16
4.7. Udledning af feltemissionsfaktor for gårdfyr	18
5. Emissionsreduktion.....	20
5.1. Emissioner fra halmkedler	20
5.2. Primære virkemidler	21
5.2.1. Gasemissioner	21
5.2.2. Støvemission	22
5.3. Sekundære virkemidler	22
5.3.1. Gasemissioner	22
5.3.2. Støvemissioner	23
6. Screening.....	28
6.1. Danske erfaringer	28
6.1.1. Måleresultater, Prøvestationen 1996-2006	28
6.1.2. Kalium vs. støvemission, SJF 1988	30
6.1.3. Halmkedelprojekt, Faust/Teknologisk Institut 2016	31
6.1.4. Udvikling af elektrofilter, Reka/Foulum 2017	32
6.1.5. Optimering af CO-emission, Alcon/ AU Foulum.....	33

6.1.6.	Røggasfiltrering med patronfilter, Aagaard	34
6.2.	Udenlandske projekter og lovgivning.....	34
6.2.1.	Lovgivning i andre lande	34
6.2.1.1.	Europa.....	34
6.2.1.2.	USA og Canada	40
6.2.2.	Europæiske projekter	42
6.3.	Sammenfatning af udenlandske forhold	43
7.	Opsamling og anbefalinger ift. emissionsreduktion.....	44
7.1.	Målemetode	44
7.2.	Testbrændsel	45
7.3.	Emissioner	46
7.4.	Øvrige mulige tiltag	47
8.	Varmepriser.....	48
9.	Halmfyr vs. træpille- og flisfyr.....	55
10.	Perspektivering	56
Bilag 1:	Undersøgelse af partikler ved afbrænding af gult halm	57

1. Hovedresultater

1.1. Screening af eksisterende målinger og projekter

Litteraturen, herunder også udenfor Danmark er blevet afsøgt for publikationer over udførte halmfyrsprojekter. Der er inddraget oplysninger fra nylige projekter hos Teknologisk Institut og Århus Universitet, Foulum. Der er inddraget historiske oplysninger dels fra publikationen Halm til energiformål, Videnscenter for Halm- og Flisfyring 1998, dels fra tidligere publikationer fra Dansk Jordbrugsforsknings forsøgscenter (nu AU Foulum) og endelig er der inddraget afprøvningsresultater fra Energistyrelsens Prøvestationen for mindre fastbrændselsanlæg.

I Danmark er der gennemført en lang række målinger i Prøvestations regi. Derudover er der netop afsluttet et projekt omhandlende udvikling af et 400 kW manuelt fyret halmfyr med primær optimering af emissioner samt et projekt omhandlende udvikling af et elektrofilter til mindre automatiske halmfyrede anlæg. I afsnit 6.1 er der en oversigt og en kort beskrivelse af projekterne.

Hovedresultaterne for både Prøvestations- og projektmålingerne viser at det med udelukkende primær teknologi er muligt at komme tæt på eller under klasse 5 grænseværdierne for CO og OGC mens støvemissionen rå fra kedlen, i de bedste tests og gennemført med såkaldt "grå halm", ligger omkring $250-300 \text{ mg/m}_n^3$. Her er grænseværdien i klasse 5 hhv. 60 mg/m_n^3 for manuelle anlæg og 40 mg/m_n^3 for automatiske anlæg.

Projektet, som handler om at udvikle et elektrofilter til automatiske anlæg, viser særdeles lovende resultater og virkningsgrader for støvreduktionen tæt på 100%.

Udenlandsk litteratur, lovgivning og videnskabelige artikler er blevet gennemgået for at finde eventuelle relevante teknologiudviklingsprojekter, der vil kunne nyttiggøres i dansk sammenhæng og for at få et overblik over eventuelle nationale grænseværdier for halmfyrs partikelemission.

I de fleste lande er lovgivningen for biomasse alment set, også gældende for halm. Tyskland skiller sig ud ved specielt strenge regler, 20 mg/m^3 og en udspecifikation med forskelle for forskellige typer biomasse. En række andre lande har forskellige krav, afhængig af kedlens størrelse. Polen er det eneste østeuropæiske land med et lovfæstet krav, nemlig en tilladte grænse for støv 200 mg/m^3 ved 10% O_2 . Værd at bemærke er også forskellen i forskellige lande på ved hvilket iltindhold grænseværdierne angives ved, hvilket forhindrer en direkte umiddelbar sammenligning. En række europæiske projekter arbejder på at reducere emissioner fra halmfyr og skabe bedre forbrænding. Dette tyder på, at der er en vis almen interesse i Europa på at optimere halmafbrænding i mindre anlæg, og derved nyttiggøre lokale forekomster af halm som en fornybar bæredygtig bioressource, til at understøtte den grønne omstilling mod fossilfrie opvarmningsformer.

1.2. Estimat over emissioner fra halmfyr

Der er udviklet en simpel model til estimering af emission fra halmfyr. Der er fokuseret på partikelemission, idet halmfyr er kendt for at afgive relativt høje partikelemissioner og af den grund hidtil har været friholdt for partikelkrav (i landzone) i brændeovnsbekendtgørelsen. Historisk har der ikke været målt OGC på halmfyr, så der er kun begrænsede data til rådighed til opbygning af en model.

Modellen til estimering af halmfyrers partikelemissioner tager udgangspunkt i antal halmfyr i Danmark, forbruget af halm i gårdfyr samt en estimeret gennemsnitlig emissionsfaktor, der dog er udvidet til et interval, for at afspejle de usikkerhedsfaktorer der uundgåeligt knytter sig til sådan en opgørelse.

Ud fra den opstillede model estimeres den årlige udledning af støv fra Danske gårdfyr at udgøre 4.000 – 7.400 T, med 5.200 T som middelværdi. Se endvidere rapportens kapitel 4.

1.3. Vurdering af reduktionspotentiale

Der er udarbejdet en katalog over mulige primære og sekundære virkemidler til reduktion af partikelemission fra halmfyr, her opdelt i emissioner af gasser og emissioner af faststof. Hvert virkemiddel samt dets princip er kort beskrevet.

Med udelukkende primær teknologi vurderes det at både CO og OGC grænseværdierne kan opnås, men for manuelle kedlers vedkommende kun under forudsætning af at der anvendes meget god halm og målemetoden tilpasses. I forhold til støv gælder det for både manuelle og automatiske anlæg at den nuværende grænseværdi ikke kan nås uden sekundær rensning. Frem for fortsat at bakke op om en praksis hvor halmkedler testes på nøje udvalgte halmballer af grå halm, der næppe er repræsentative for hovedparten af den halm, de efterfølgende bliver benyttet med, kunne man opnå samme effekt ved i stedet at tillade korrigerende for den til prøven anvendte halms indhold af kalium, til et reference indhold. Ved korrigerende for halmens kalium indhold, vil den korrigerede støvemission forventeligt kunne bringes på niveau med EN303-5 klasse 3 krav. Se forslag til målemetode og korrektioner i afsnit 7.

I forhold til at overføre rensningsteknologi fra større halmværker anvendes der i lighed med hovedparten af de store anlæg allerede posefiltre på de mindre automatiske anlæg. Derudover er der udvikling i gang på et elektrofilter som viser lovende resultater. Begge teknologier vurderes imidlertid ikke som realistiske muligheder på de manuelle anlæg idet driftsmønstre med mange kolde opstarter og udgifter til etablering og drift vil ødelægge både drift og økonomi i et manuelt fyr.

En rensecyklon vil uden problemer kunne anvendes på både automatiske og manuelle anlæg. Typisk anvendes de allerede på de automatiske anlæg foran posefiltre-

ne. De vil også med stor fordel kunne anvendes på manuelle anlæg idet de driftsteknisk er hårdføre og ikke følsomme overfor den varierende drift fra manuelle anlæg. Dog skal det her understreges at de kun har meget ringe indvirkning på saltpartiklerne som fylder meget i støvemission fra halmfyr. Men de vil kunne tage de større partikler som halmstrå, uforbrændt kulstof og flyveaske. Det vil dog næppe være tilstrækkelig til at klasse 5 grænseværdierne vil kunne overholdes. Som vist nedenfor koster en cyklonløsning omtrent 30-40.000 kr. og kræver meget lidt i forhold til drift.

1.4. Mulige sekundære virkemidler samt disses effekt på omkostningerne

På markedet findes der i dag, til mindre anlæg, cyklon og posefiltersystemer. Derudover er der, som tidligere nævnt, et nyt elektrofilter under udvikling (se afsnit 6.1.4). Alle de tre systemer vil kunne anvendes på automatiske anlæg mens kun cyklonløsningen vil kunne anvendes på manuelt fyrede anlæg.

Til et 1.000 kW anlæg koster en cyklonløsning i størrelsesorden 40.000 kr i etablering og 2000 kr i årlige driftsomkostninger. Et posefiltersystem koster i størrelsesorden 300.000 kr i etablering og 18000 kr i årlige udgifter. Elektrofiltrets pris kendes endnu ikke men det forventes at komme til at ligge mellem cyklon og posefilter, både i etablering og drift.

1.5. Prisen for varme afhængig af om halmfyr kan opfylde BK krav

Der er udviklet en model til beregning af omkostninger ved varmeproduktion på halmfyrede centralvarmeanlæg. Der beregnes henholdsvis den marginale varmepris forudsat fyringsanlægget er betalt og afskrevet, og en pris der indregner tilbagebetaling af investeringer og afskrivning.

De forskellige bud på pris per produceret kWh varierer signifikant, dels for kedler af forskellige størrelser og dels fra tal fra forskellige kilder. Et problem er, at det oftest ikke er beskrevet på hvilket grundlag beregningen/estimatet er lavet. Forskellen på hvor meget dyrere det bliver pr kWh at rense for partikler med cyklon eller andre teknikker er ligeledes voldsomt afhængig af om der f.eks. blot skal ses på prisen af en ny kedel, så den resterende del af installation, hus, skorsten etc kan betragtes som værende afskrevet ved et allerede tidligere anlæg eller om dette skal inkluderes i beregningen. Den billigste og nemmeste implementerbare løsning anses for brug af cyklon, der i runde tal vil forøge prisen pr kWh med blot et par procent, men samtidig må det bemærkes at indkøbspris af anlægget er ca. 10% dyrere hvis en cyklon skal inkluderes.

Det har ikke været muligt at koble varmeprisen til om halmkedlen overholder grænseværdier eller ej, men i det tilfælde, det blev påkrævet at montere eksempelvis et posefilter for at overholde en kommende (lav) grænseværdi, vil investering og afskrivning skulle forøges med ca. 25% hvilket, sammen med den forhøjede løbende driftsomkostning til pasning af posefiltret samt regelmæssig udskiftning af filtermateriale, vil påvirke varmeprisen i opadgående retning.

Det har i øvrigt vist sig at varme fra halmfyr, der leveres til naboejendomme eller udlejningshuse i reglen afregnes til fast pris af ca. DKK 15-17.000 årligt, uafhængigt af forbruget. Den begrænsede mængde ekstra halm der medgår til boligopvarmning, værdi sættes ikke særskilt i forhold til den varmeværdi den præsenterer.

1.6. Oversigt over konkurrerende fyringsteknologier

Det er blevet undersøgt hvilke faktorer der er udslagsgivende for en landmands valg af fyringsteknologi, med flisfyr og pillefyr som mulige alternativer til halmfyr. Formålet er at få klarlagt om fritagelse af halmfyr for partikelkrav, påfører andre fyringsteknologier unfair konkurrence.

Det kan ikke afvises at fyringsteknologierne i et vist omfang kan substituere hinanden, men meget tyder på at valget af fyringsteknologi er dikteret af den type brændsel, den pågældende har gratis adgang til. Heraf følger at en planteavler næppe ville vælge en kedel beregnet til træflis og skovejendom næppe vælge halmfyr, uanset hensyn til overholdelse af emissionsgrænser.

Naturligvis vil det påvirke salget af træpille og flisanlæg hvis antallet af solgte halmkedler begrænses, men det vil meget sandsynligt ikke ske i forholdet 1:1 da et vist antal af de købere af halmfyr der vil falde fra, i stedet vil overveje beholde eller forny eksisterende fossile energikilder som eksempelvis olie- og gasfyr.

Som det antydes ovenfor under virkemidler til reduktion af partikelemissioner, behøver en løsning med eksempelvis en cyklon ikke være ødelæggende for anlægsøkonomien for halmfyr.

2. Problemstilling

I den seneste ændring af brændeovnsbekendtgørelsen, der trådte i kraft i 2015, blev der indført en overgangsbestemmelse for nye halmfyr i landzone. Anlæggene skal først overholde emissionsgrænseværdierne i bilag 2 i bekendtgørelsen (kedelklasse 5) fra 26. januar 2018, dog skal halmfyr under 300 KW i landzone fortsat overholde kedelklasse 3-kravene frem til 2018, fastsat i brændeovnsbekendtgørelsen fra 2007.

Miljøstyrelsens kender enkelte gennemførte projekter, der har haft til formål at udvikle teknologi til at nedbringe luftemissionerne fra halmfyr med henblik på overholdelse af grænseværdierne i bilag 2 i brændeovnsbekendtgørelsen. På nuværende tidspunkt har Miljøstyrelsen ikke det fulde overblik over, hvor mange projekter, der er gennemført, eller resultaterne af dem. Det vides, at der i hvert fald i nogen af projekterne er blevet gennemført målinger af CO, OGC og partikler.

For at få input til en eventuel revision af Brændeovnsbekendtgørelsens regulering af emissionerne fra fyringsanlæg, der anvender halm som brændsel, har Miljøstyrelsen derfor bedt Teknologisk Institut om at gennemføre en undersøgelse om bl.a.:

- Screening af gennemførte målinger af halmfyrs emissioner af partikler, CO og OGC.
- Estimat af den samlede emission af partikler (støv) fra den nuværende population af halmfyr i Danmark.
- Vurdering af status for reduktion af og potentialet for at reducere partikeludledningen til grænseværdiniveau med primære teknologier.
- Hvilke mulige sekundære renseteknologier er der tilgængelige på markedet, og hvad er omkostningerne for de almindeligste løsninger.
- Hvad bliver varmeprisen for varme produceret på halmfyringsanlæg, der overholder grænseværdien sammenlignet med halmfyringsanlæg, der ikke gør.

3. Baggrund

Bekendtgørelse om regulering af luftforurening fra fyringsanlæg til fast brændsel (brændeovnsbekendtgørelsen) trådte i kraft i 2008. Bekendtgørelsen er senere blevet justeret og anvendelsesområdet udvidet, hvor bekendtgørelsen i første omgang kun omfattede fyringsanlæg op til 300 KW, er nu alle anlæg op til 1 MW nominel indfyret effekt omfattet. Bekendtgørelsen regulerer både brændeovne, dvs. rumopvarmere, og centralvarmekedler til opvarmning af brugsvand eller centralvarme. Fast brændsel er træ, plantekerner, træbriketter, træpiller eller andre restprodukter, der er omfattet af bekendtgørelse om biomasseaffald – herunder halm.

Halmfyr i landzone er undtaget krav indtil 2018. Halmfyr i landzone under 300 KW skal dog overholde emissionsgrænseværdierne til kedelklasse 3 for CO og OGC (dvs. ikke partikler) frem til 26. januar 2018, hvorefter de tilsvarende skal overholde kedelklasse 5-kravene.

Brændeovnsbekendtgørelsen regulerer først og fremmest nye anlæg, men også ældre anlæg kan blive omfattet, hvis fyringsanlæggene videresælges eller tilsluttes på ny. Nytilsluttede anlæg skal have en prøvningsattest, der dokumenterer, at anlægget kan opfylde de grænseværdier for støv, CO og OGC, der fremgår af bilag 1 (rumopvarmere) eller bilag 2 (kedler) i bekendtgørelsen. Grænseværdierne er de samme uanset brændsel. I forhold til halmfyr er kun grænseværdierne i bilag 2 relevant.

4. Emissionsopgørelse

4.1. Opgørelse over støvemission

For at kunne opgøre den årlige indenlandske emission af støv fra halmfyr, kræves der kendskab til populationen af halmfyr, forbruget af halm og en emissionsfaktor, hvorefter den årlige udledning kan beregnes.

Beregningen er behæftet med nogen usikkerhed. Af de tre faktorer er antallet lettest at fastsætte med rimelig sikkerhed. Derimod findes der ikke dokumentation over halmforbrug og *real life* emissioner. For at kunne estimere disse to faktorer bedst muligt har vi interviewet fabrikanter af halmfyr, halmleverandører og brugere af halmfyr. Herunder findes en gennemgang af de enkelte faktorer og kapitlet afsluttes med en estimeret årlig udledning af støv fra halmfyr. Selvom oplysningerne ikke indgår i emissionsopgørelsen, indgår der også en kort redegørelse over populations alders- og størrelsesfordeling.

Der er interviewet en halv snes ejere af halmfyr, fortrinsvis udvalgt så de dækker de forskellige anvendelser af halmfyr; Alene opvarmning af beboelse, opvarmning af beboelse og stalde, en af de forannævnte i kombination med korntørrieri, og endelig i endnu en kombination hvor også leverance af varme til naboer eller udlejningshuse indgår.

4.2. Antal halmfyr

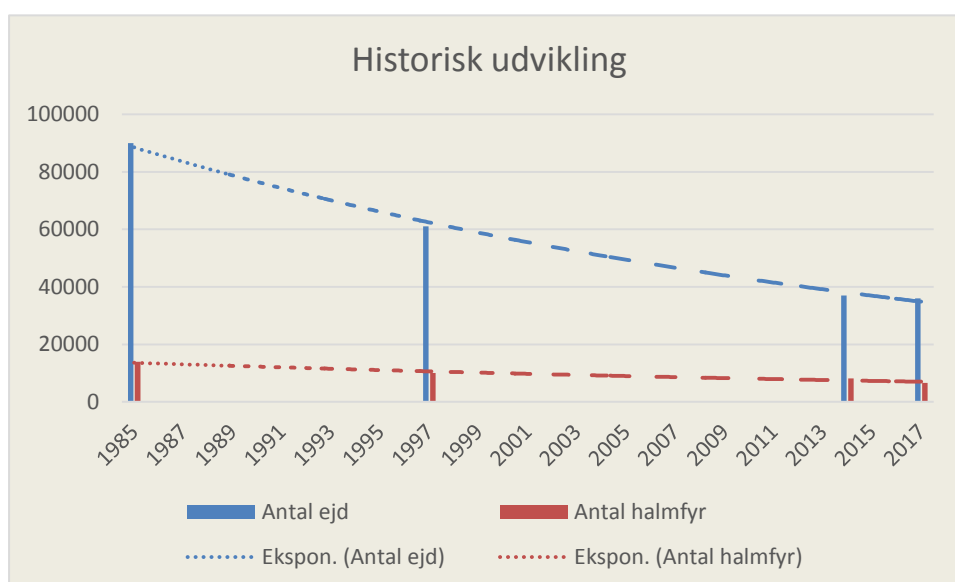
Antallet af landbrugsbedrifter har været støt faldende siden 50'erne hvor antallet var over 200.000.

I 1985 var antallet af landbrugsbedrifter faldet til ca. 90.000, i 1997 ca. 61.000, i 2014 ca. 37.000 og i 2017 ca. 36.000. Af dem var 11.200 registreret som heltidsbrug. (kilde: Danmarks Statistik, statistikbanken)

I samme periode har det dyrkede areal været svagt faldende og er i dag ca.; 2.640.000 Ha, svarende til ca. 62% af Danmarks areal. Ikke så overraskende er brugsstørrelsen været konstant stigende. I 1997 var kun 5% af brugene over 100 Ha. I 2017 er 20% over 100 Ha. Betragtningen om det dyrkede areal er relevant, fordi det gør at Danmark i særklasse har potentiale for brug af halm til opvarmningsformål.

Antallet af halmfyr er faldet siden midten af 80'erne, fra 14.000 i 1985, 10.000 i 1997, 8.167 i 2014 til 6.587 i 2017. Det skal dog bemærkes, at kilderne og metoden til at indsamle tal i de forskellige år, er forskellige, hvilket betyder at der er en vis usikkerhed på især de seneste antaloplysninger. En meget præcis opgørelse foretaget af Skorstensfejerlauget, som ikke er offentliggjort endnu, viser, at der nu er ca. 6.600 halmfyr.

En anden faktor der kan have spillet en rolle i tidligere antalsopgørelserne og forbrugsopgørelser er de inaktive halmfyr. Ved opkøb og sammenlægning af landbrugsejendomme, samles og fortsættes driften typisk på en af ejendommene og bygningerne og en mindre jordparcel fra den anden ejendom sælges fra til hobbybrug. I de tilfælde der har stået et halmfyr af en vis størrelse på begge ejendomme, bortfalder grundlaget gerne for fortsat rationel drift af begge halmfyr, idet der ikke længere er tilstrækkeligt varmebehov på hobbyejendommen. Denne struktur udvikling har over årene ført til at der står ubenyttede halmfyr rundt omkring. Kilder i branchen anslår at op mod ca. 20% af de installerede halmfyr enten ikke benyttes, eller kun benyttes i meget begrænset omfang. Dette fænomen påvirker dog ikke det nyeste tal på 6.587, der alle er aktive halmfyr tilmeldt skorstensfejsning.



Der er så at sige sket en professionalisering af brug af halmfyrene, så de fortrinsvis anvendes der, hvor der er stort varmebehov til drift og beboelse, let adgang til halm, tilstrækkeligt opbevarings og håndteringskapacitet og ikke mindst investeringsmæssig kapacitet. Det forekommer derfor rimeligt at antage at hovedparten af halmfyrene befinder sig på heltidsbrugene, hvoraf der var 11.500 ud af i alt 36.640 landbrug i 2015. Det svarer til at godt halvdelen af heltidsbrugene og en mindre andel af deltids- og hobbybrugene skaffer sig boligopvarmning og procesvarme fra fyring med halm. Ud over opvarmning af stuehuse og evt. andre beboelser, leverer halmfyrene også varme til eksempelvis kyllingehuse, tørrerier samt klimastande til kalve og grise.

Det årlige udbytte af halm svinger mellem 5-5,5 millioner Ton. Som følge af landbrugspakken fra 2016 der tillader øget gødskning, venter halmleverandørerne at udbyttet af halm stiger med 0,5 millioner Ton over en 5 årig periode indtil 2022 pga. den øgede gødskning.

Andelen af halmen der medgår til opvarmningsformål har i flere år ligget stabilt på 1,5-1,8 millioner Ton, svarende til ca. 30% af det årlige udbytte. I opgørelsen af halm til opvarmningsformål indgår både halm til eget forbrug i gårdanlæg og salg af halm til værkerne. Energistatistikken oplyser til sammenligning 1,3-1,4 mill. Ton kornhalm, hvortil kommer mindre mængder af frøgræshalm og rapshalm. Andre ca. 30 % forbliver på markerne, hvor halmen snittes og nedpløjes til opretholdelse af kulstofdepot i jorden og de resterende ca. 40 % medgår til fodring og strøelse i husdyrsbesætninger, og herefter returneres til markerne.

Halmleverandørerne forventer at andelen til opvarmning vil være stigende, primært på grund af konvertering af mindre og større varmekæder fra gas og kul til halm, dels på grund af øget forbrug til bioforgasning og anden bioraffinering. Stigningen forventes primært at ske på et andet segment end det der falder ind under brændeværdibekendtgørelses øvre effektgrænse på 1 MW. (kilde til data i dette afsnit: Årsberetning 2017, Foreningen Danske Halmleverandører)

4.3. Aldersfordeling af populationen af halmfyr

Et halmfyr har efter fabrikanternes oplysninger en gennemsnitslevetid på godt 20 år. Afbrænding af halm giver restprodukter, der er ret aggressive overfor stålet i kedel og skorsten. Det skyldes det høje fugtindhold i kombination med indholdet af salte. Der dannes forbindelse som tærer kedlens svøb, lågen og skorstenen. Det er derfor ikke ualmindeligt at en kedel får skiftet svøb og evt. låge en gang i kedlens levetid, hvorved der godt kan findes eksempler kedler ældre end 20 år, der stadig er i drift.

Formanden for Dansk Agroindustri, Biomassekedelgruppen, chefkonsulent Thomas Holst vurderer at det indenlandske salg af halmfyr udgør 200-250 stk. årligt. Med en population på 6.600 halmfyr og forudsat et årligt salg på ca. 250 kedler, vil det tage ca. 26 år at udskifte populationen af halmfyr. De solgte halmfyr er så godt som alle over 300 kW og langt overvejende at typen manuelt fyrede halmfyr.

4.4. Fordeling efter anlægsstørrelse (ydelse) i kW

Fra begyndelsen havde halmfyrene almindeligvis lavere ydelse end de der sælges i dag. En del fabrikanter byggede og solgte fyr der var beregnet til fyring med småballer. I dag er så godt som alle halmfyr beregnet til fyring med enten rundballer,

bigballer eller varianter af de to hovedformer. Det vil sige, der kræves maskinkraft til indfyring af halmballerne.

Der er stadig en del af disse mindre halmfyr i drift, dvs. fyr under ca. 120 kW, men i takt med at gårdene slås sammen, og der i de fleste tilfælde også kræves varme til at betjene en eller flere driftsgrene, forskydes sammensætningen af bestanden i retning af de større halmfyr.

Der findes ikke en samlet offentlig registrering af halmfyrenes fabrikat, type og anlægsstørrelse, men chefkonsulent Thomas Holst formand for Dansk Agroindustri, Biomassekedelgruppen har i 2015 anslået at ca. 50% af halmfyrene er over 300 kW. Så, over tid, vil ligevægten forskydes, så flertallet af halmfyr er på over 300 kW varmeydelse.

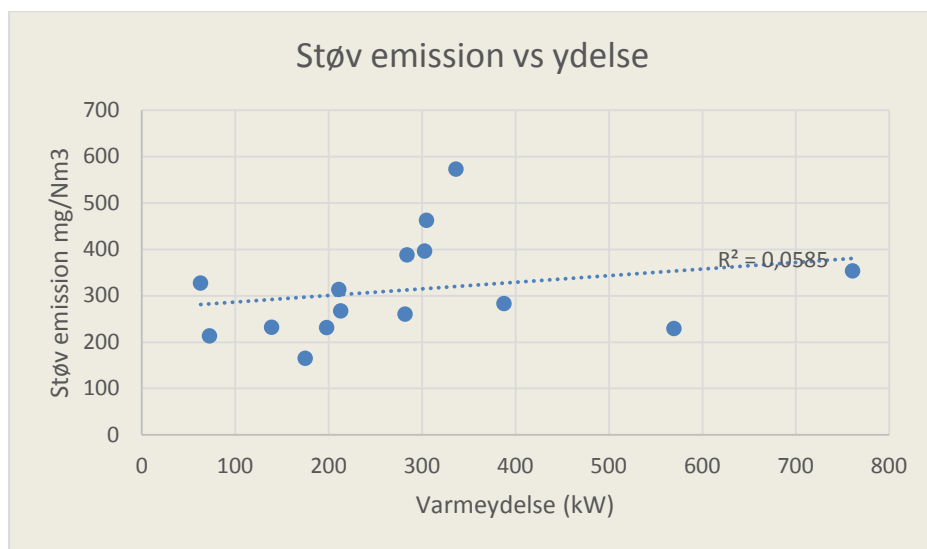
I kraft af Energistyrelsens nyligt afsluttede tilskudsordning VE-proces, der løb fra 2013 til udgangen af 2016, har man dog fået et indblik i fordelingen af nysalget af halmfyr, de seneste år. Under ordningen kunne virksomhedsejere opnå betydelige tilskud til udskiftning af olie- og gasfyr med vedvarende energiformer som eksempelvis halm eller brænde.

Energistyrelsen (ENS) opgør at der i perioden i alt er bevilget 150 tilsagn om tilskud til halmfyr. Der har typisk været tale om fyr beregnet til en eller to storballer med en effekt på 300-600 kW. Der har dog været nogle få (jf. estimat af ENS) halmfyr under 300 kW og nogle på over 600 kW. Ca. 10% af halmfyrene opsat under tilskudsordningen har været automatisk fyrede halmfyr, resten manuelt fyrede. De automatiske halmfyr er forsynet med opriver og halmbane der gør dem mindre arbejdskrævende i drift. De manuelt fyrede halmfyr skal gerne have indfyret halm en gang i døgnet, og i sjældnere tilfælde 2 eller 3 gange i døgnet.

ENS oplyser at de manuelt fyrede halmfyr typisk er dimensioneret til 300-600 fuldlast timer årligt. Et manuelt halmfyr skal jo dimensioneres efter spidslast situationen og hensynet om helst ikke at skulle fyre mere end en gang i døgnet. Til sammenligning kan et automatisk halmfyr dimensioneres lavere, idet det kører kontinuerligt.

På baggrund af ovenstående og interviews med nøglepersoner i branchen er det bedste bud at ca. 3.000 halmfyr er under 300 kW og lidt flere over, og at fordelingen langsomt forskydes i retning af de større halmfyr.

Som det fremgår af figuren herunder, er der ikke en lineær sammenhæng mellem anlægsstørrelse i kW og den ved prøven målte emission. Emissionerne ses at kunne variere en del indenfor samme ydelsesområde, hvilket antyder at emissionen er påvirket af andre faktorer end kedlens størrelse og dens driftsoptimering. Værdierne stammer fra Prøvestationens arkiv over typeprøver af halmfyr, som er gennemført i perioden 1996 til 2006



Nogle kilder angiver lavere grænseværdier til støvemission for de større halmfyr, typisk over 1 MW. Det skyldes en forudsætning om at de større halmfyr i forvejen er så dyre, at krav om posefilter ikke fordyrer projektet afgørende, og de dermed kan leve op til lavere emissionsgrænser.

4.5. Forbruget af halm til gårdfyr

Teknologisk Institut har interviewet ejere af halmfyr, herunder medlemmer af bestyrelsen for leverandørsammenslutningen Halmselskabet Danmark a.m.b.a (tidl. Sydhalm), der nu er medlem i foreningen Danske Halmleverandører.

Teknologisk Institut har talt med ejere der dækker spektret bredt, således nogle der alene anvender varmen til opvarmning af eget stuehus, nogle der også benytter varmen i landbrugsdriften, til eksempelvis korntørreteri, klimastalde til grise og til kyllingehuse. Endelig har vi talt med nogle der i tillæg sælger varme til naboer.

På baggrund af de gennemførte interviews tegner der sig et billede af at ca. 20% af halmfyrsejerne udelukkende benytter halmfyret til opvarmning af beboelse. I de resterende 80 % af tilfældene udgør driften den overvejende del af belastningen. Der benyttes i almindelighed ikke forbrugsmålere, men et estimat på omkring 30% til opvarmning og 70% til driften forekommer rimeligt repræsentativt, selvom fordelingstal 20/80 og 40/60 også er forekommet under interviews. Når andelen til opvarmning trods alt er forholdsvis stort, hænger det sammen med at stuehusene og herregårde, har store opvarmede arealer og er i almindelighed kun i mindre omfang energioptimerede.

Oplysninger om medgået halmforbrug alene til boligopvarmning svinger mellem 20-40 T. Variationen dækker over forskelligt opvarmet boligareal og varierende energi-

optimeringsstandard. Til opgørelsen vælger vi at benytte middelværdien 30 T projiceret op på samtlige 6.600 halmfyr. (Det svarer til ca. 60 bigballer eller ca. 80 rundballer årligt) Det giver et årligt forbrug af halm til boligopvarmning alene på ca. 200.000 T.

Ud fra den ovenfor nævnte fordelingsnøgle mellem boligopvarmning og drift, på 30/70, vil halmforbruget til driftsformål således andrage ca 462.000 T, hvorfra skal fradrages 92.000 Ton svarende til de 20 % af brugene, der udelukkende benytter halmfyret til opvarmning af beboelse, således netto ca. 370.000 Ton til driftsformål. Det samlede årlige estimerede forbrug af halm i gårdfyr, herunder også et mindre antal af institutioner og svømmehaller der har halmfyr, udgør således ca. 570.000 T, svarende til ca. 10% af den halm der avles herhjemme.

Til sammenligning, afspejler Energistyrelsens energistatistik for 2015 et lidt lavere halmforbrug til gårdfyr. Der er oplyst energiforbrug som omregnet med 14,5 GJ/Ton svarer til 135.600 Ton halm til landbrug og 203.400 Ton halm til enfamiliehuse, der her betyder stuehuse. Således i alt 339.000 Ton.

Til beregning af den årlige PM udledning fra halmfyr vælger vi at benytte halmforbruget til gårdfyr opgjort i denne undersøgelse til 570.000 Ton, der som en form for tjeksum beregning, sammenlagt med energistatistikens oplyst 984.300 Ton på værkerne giver en total på 1.554.300 Ton, der er af samme størrelsesorden som det af halmleverandørernes oplyste årlige salg på 1,5 – 1,8 mill Ton til opvarmningsformål.

4.6. Partikelemission fra gårdfyr

DCE miljø benytter en emissionsfaktor på 234 mg/MJ for partikelemission fra privatejede halmfyr og for halmfyr på landbrug, baseret på oplysninger fra Teknologisk Institut fra 2002. Til sammenligning er emissionsfaktoren for halmfyr på fjernvarmeværker (over 1 MW). På 21 mg/MJ, idet der forudsættes en form for røgrensning. Brændeovne, ligeledes fra begyndelsen af 2000-tallet havde til sammenligning en emissionsfaktor for partikelemission (TSP) på 800 mg/MJ og de moderne brændeovn (2008-2015) en emissionsfaktor for partikelemission (TSP) på 556 mg/MJ.

De officielle emissionsfaktorer har normalt indbygget en vis robusthed, eller margin, der tager højde for at ildstederne blandt andet ikke kan forventes betjent lige så optimalt i virkeligheden som ved typeprøverne. Der vil ude hos forbrugerne typisk også være mere varierende brændekvalitet og skorstenstræk, end ved typeprøverne.

Tabellen over prøvningsresultater fra Prøvestationen 1996-2006 på side 30, udviser en middelværdi for partikelemission på 320 mg/Nm³ hvilket svarer til ca. 165 mg/MJ ved referencetilstand 10% O₂

Til forskel fra brændeovne har halmfyr automatisk luftforsyning, styret af en lambdasonde. Derfor kan man påregne omtrent samme drift efterfølgende hos forbrugere, så længe halmfyret er godt vedligeholdt og lambdasonden intakt og vel-fungerende. Derimod kan man godt stille spørgsmålstejn ved, om den til daglig brug anvendte halm er af samme beskaffenhed, som den der blev anvendt ved prøven, og om feltemissionerne derfor er af samme størrelsesorden. Som det er beskrevet i rapportens afsnit 6.1.2 er størrelsen af partikelemissionen mest af alt bestemt af halmens indhold af salte.

Den andel af emissionen der alene kan tilskrives halmfyrets teknologiske stade og dets forbrændingskvalitet er relativt begrænset, og vil ikke kunne bedømmes særskilt uden at isolere bidraget fra saltene i halmen. Observationer fra felten og fra prøver, tyder på at halmfyrs partikelemission godt kunne være grupperet i to fraktioner;

- store og tunge artikler der består af delvis uforbrændte halmstrå og ophvirvlet aske
- fine partikler der består af Kalium og Natrium salte

Der savnes dog mere indgående studier af halmfyrs partikelemission, der kan styrke denne opfattelse.

I publikationen Halm til energiformål (1998), udarbejdet af videnscenter for Halm- og Flisfyring oplyses i en forklarende tekst til tabel 1, at udvaskning med hvad der svarer til 150 mm regn, leder til reduktion af kloridindholdet fra 0,49 til 0,05% og af kalium fra 1,18 til 0,22%. Se uddrag af tabellen gengivet herunder, hvori de typiske værdier er gengivet:

Egenskab	Enhed	Gul halm	Grå halm
Vandindhold	%	10-20	10-20
Flygtige bestanddele	%	>70	>70
Aske	%	4	3
Kulstof	%	42	43
Brint	%	5	5,2
Ilt	%	37	38
Klorider	%	0,75	0,20
Kalium*	%	1,18	0,22
Kvælstof	%	0,35	0,41
Svovl	%	0,16	0,13
Brændværdi, fugt og askefri	MJ/kg	18,2	18,7
Brændværdi, effektiv	MJ/kg	14,4	15
Aske smeltetemperatur	°C	800-1000	950-1100

*K står ikke angivet i den oprindelige tabel, men er angivet i tabellens forklarende tekst i kilden, og er grundet vigtigheden således tilføjet i denne tilpassede tabel

Det ses tydeligt at indholdet af klorider og kalium er den egenskab der ændrer sig mest ved udvaskning af halmen fra gul halm til grå halm. Disse ændringer er særdeles relevante, da frigivelse af kalium i høj grad påvirker støvniveauet og samtidig er det kendt at tilstedeværelse af klorid fremmer frigivelse på en u hensigtsmæssig

måde (<http://www.kemifokus.dk/askekemi-ved-halmforbraending/>). Derfor er det at foretrække at såvel kalium niveau som klorid niveau er så lavt som muligt, i det halm der afbrændes.

4.7. Udledning af feltemissionsfaktor for gårdfyr

Flere kilder, heriblandt Aarhus Universitet, forklarer uafhængigt af hinanden, at saltene er den væsentligste bestanddel af halmfyrers støvemission. Der er naturligvis også et bidrag af delvis uforbrændte halmstrå og ophvirvlet aske, men dels tilskrives disse komponenter ikke afgørende betydning for partikelmassen, dels vil de relativt let kunne fjernes effektivt og billigt, ved hjælp af en cyklon. (Læs nærmere om cykloner og deres virkemåde i afsnit 5.3.2)

Som det er gennemgået ovenfor, er der ikke grundlag for at opskrive støvemissionen på grund af fyrets betjening eller halmens vandindhold. Dårlig forbrænding vil komme til udtryk i form af forhøjede emissioner af CO, men ikke nødvendigvis mere støv, måske ligefrem det modsatte. Det sidste har måske mest teoretisk interesse, idet selv en dårlig forbrænding pga. våd halm let kommer over de ca. 800 grader hvor saltene begynder at gå over på gasform. (Kilde: Potassium release patterns during combustion of solid biomass, Patrick E Mason et al, 1. International Biomass Emission Conference, University of Leeds, September 2015) Men det er et udtryk for at de ubrændbare salte fra halmen uundgåeligt går igen, enten i slaggen eller som partikler i røggassen, i praksis en kombination af begge dele.

I erkendelse af at et halmfyrers støvemission for størstedelens vedkommende er defineret af halmens indhold af salte, er der i nærværende projekt valgt at bygge en feltemissionsfaktor ved at opskalere middelemmissionen fra laboratoriemålingerne med forholdet mellem klorid indhold i den gule og den grå halm. I tillæg til middelværdien medtages også værdier på hver side af middelemmissionen fra laboratoriemålingerne. Idet der er for få data til opstilling af en valid normalfordeling, medtages emissioner ud til midtvejspunkterne på hver side af middelemmissionen, som en form for øvre og nedre kvartil.

Som nedre værdi for den målte emission benyttes 239 mg/Nm³

Som middelværdi for den målte emission benyttes 313 mg/Nm³

Som øvre værdi for den målte emission benyttes 443 mg/Nm³

Opskaleringsfaktor ud fra halmens indhold af klorider, ref. publikationen Halm til Energiformål: $0,75 / 0,20 = 3,75$. Der skal dog tages højde for at ca. 20% af partiklerne er sod der ikke indeholder salte, hvilket der skal tages højde for ved forholdsmæssigt nedslag i opskaleringsfaktoren, dvs. $0,80 * 3,75 = 3$, bliver den korregerede opskaleringsfaktor.

Feltemissionsfaktorer, Støvemission	Målt emission, volumen enhed (mg/Nm ³)	Opskaleret Volumen enhed (mg/Nm ³)	Emissionsfaktor for gul halm (mg/MJ) *
-------------------------------------	--	--	--

Nedre værdi	239	717	376
Middel	313	939	493
Øvre værdi	443	1329	698

*) Omregnet ud fra målt middel CO₂ værdi på 10% og ved referencetilstand for kedler på 10% O₂

Det årlige halmforbrug på 567.600 T multipliceres med emissionsfaktorerne fra tabellen ovenfor.

Ved omregning fra masse til brændværdi er benyttet Energistyrelsens vejledende konverteringsfaktor på 14,5 GJ/T halm.

Ud fra antalsopgørelsen på 6.600 halmfyr og ud fra det estimerede årlige halmforbrug i gårdfyr på de ca. 570.000 Ton kan **den årlige støvudledning fra gårdfyr opgøres som 2.500-4.700 Ton** (middelværdi 3.350 Ton)

Emissionen er beregnet under forudsætning af at der overvejende fyres med den gule halm i gårdfyrene, altså worst case scenariet. I det tænkte eksempel at al halmen var af typen grå halm, kunne emissionen beregnes ud fra den ukorrigerede faktor.

Det kunne også spille ind på den beregnede emission, hvis en væsentlig andel af den anvendte halm stammede fra frøgræsafrøder eller raps, der kan have afvigende indholdsandele af salte. Disse effekter er dog ikke blevet undersøgt, ligesom der ikke er oplysninger om andelen af frøgræshalm der benyttes i gårdfyrene. Brug af frøgræshalm er nok mest afgrænset lokalt fænomen.

Århus Universitet Foulum har en stor mængde data fra målinger med forskellige typer af halm. Hvedehalm, der bruges ret udbredt i halmfyr, oplyses at give støvemissioner i intervallet 400-800 mg/Nm³. Rughalm og rapshalm oplyses at give højere emissioner, men bruges til gengæld ikke i særlig stort omfang. Intervallet på 400-800 mg/Nm³ er på godt halvdelen af de tilsvarende gennemsnitlige opskalerede volumenbaserede emissioner, der ligger til grund for nærværende undersøgelse, uden at der dog er grund til at stille spørgsmålstejn ved oplysningerne fra AU. Målingerne er udført på samme kedel, der holdes i god vedligeholdelsesstand. Der må imidlertid tages højde for at gårdfyr spænder over mindst 10 forskellige fabrikater, og har varierende alder og vedligeholdelsesstand, hvorunder især defekt iltstyring kan have stor indflydelse på forbrændingen som gennemgået andetsteds. Dertil kommer det fast bidrag af salte fra den anvendte halm, der ude i gårdfyrene overvejende må tilskrives at være af typen gul halm.

Vi finder derfor anledning til at fastholde de ovenfor beregnede emissionsfaktorer som et bud på en gennemsnitlig feltemissionsfaktor for danske gårdfyr. Som det også er nævnt i indledningen til dette kapitel, hviler beregningen af årlig støvudledning på flere forudsætninger. Det er sandsynligt, man kan kvalificere beregningen yderligere, ved at forøge antallet af interviews og ved at lade oplysningerne supplere et antal feltmålinger på gårdfyrs emissioner.

5. Emissionsreduktion

Emissionsreduktion kan enten ske i selve brændkammeret eller efter brændkammeret ved hjælp af påmonteret emissionsreducerende udstyr. I brændkammeret sker det ved optimering af forbrændingen mens det med emissionsreducerende udstyr sker når forbrændingen er fuldt gennemført, typisk ved hjælp af filter eller katalysator.

Sker det i brændkammeret under forbrændingen taler man om primær reduktion mens det kaldes sekundær reduktion når det sker efter brændkammeret.

Normalt foretrækker man primær reduktion da det i modsætning til sekundær normalt ikke kræver ekstraudstyr, men blot optimering af det der er der i forvejen, nemlig brændkammer og luftdosering. Primær reduktion af uforbrændte partikler og gasser sikrer at også at den latente energi i gassen eller partiklerne nyttiggøres i kedlen.

I det følgende gennemgås først emissionerne og dernæst de gængse muligheder for at reducere dem med hhv. primær og sekundære virkemidler. I afsnit 7.3 samles der op og gives et bud på hvor langt det er muligt at nå med hhv. primære og sekundære virkemidler.

5.1. Emissioner fra halmkedler

De regulerede emissioner fra mindre biobrændselsanlæg er støvpartikler, uforbrændte gasser i form af CO og OGC (kulbrinter) samt NO_x.

De uforbrændte gasser forekommer hvis forbrændingen ikke er optimal, dvs. hvis der ikke er tilstrækkelig temperatur og/eller ilt til rådighed, hvor forbrændingen foregår.

NO_x dannes dels af kvælstofindholdet i brændslet, som er meget højt i halm i forhold til træbaserede brændsler og dels ved oxidation af det kvælstof der er i forbrændingsluften. NO_x dannelsen øges under optimale forbrændingsforhold og er derfor en svær størrelse at håndtere. Jo bedre forbrænding jo højere NO_x.

Støvemissionen består ved afbrænding af halm af salte, uforbrændte kulstofpartikler, flyveaske samt halmstrå som rives med op gennem skorstenen. Langt den største del, mellem 70 og 90%, består af alkalisalte, primært i form af kaliumklorid, som ikke skyldes kedlen men udelukkende halmens kemiske sammensætning. Saltene dannes og fordamper under forbrændingen og kondenserer og bliver til saltpartikler når temperaturen falder efter brændkammeret.

Halmens forbrændingsmæssige egenskaber varierer kraftigt fra balle til balle, idet både korn/halmsort, jordbunds forhold og vækstbetingelser (gødskning/sol/regn) har betydning for halmens egenskaber som brændsel.

Forøg har vist at den samme kedel, med samme indstilling, vil kunne generere en støvemission varierende mellem 100 og 2.500 mg/m_n³ (se afsnit 6.1.2). Størst betydning for denne forskel har indholdet af kalium i halmen.

5.2. Primære virkemidler

Primær reduktion/optimering opnås enten ved at optimere brændkammerets/luftdoseringens- udformning - eller ved at vælge et bedre brændsel. Som nævnt er der stor forskel på halmens kvalitet, så kedlen skal kunne håndtere halm-baller af meget forskellig beskaffenhed og sikre at både en god og en dårlig balle afbrændes bedst muligt. Det forudsætter at brændkammeret er udformet robust og trimmet til optimal forbrænding under alle forhold.

En af de store udfordringer er imidlertid at opretholde en ordentlig forbrænding i manuelt fyrede halmfyr, når afstanden mellem ballen og luftdyserne bliver længere som ballen brænder væk. Det løses typisk ved at øge luftflowet så luftstrømmen kan "nå" ned til ballen. Som alternativ kunne man overveje at lave brændkammer-rummet variabelt ved at sænke loftet eller hæve bunden eller måske blot ved at sænke sekundærdyserne som forbrændingen skrider frem. Ved automatisk fyrede halmfyr indfyres halmen kontinuert i oprevet stand i et tilpasset brændkammer, så der gælder ikke samme variable forhold.

5.2.1. Gasemissioner

Det handler i forhold til de uforbrændte gasser om at sikre optimale forhold i brændkammeret i så stor en del af tiden som muligt. Temperaturen skal hurtigt være så høj som muligt og luftdoseringen skal være så god som mulig igennem hele afbrændingen af ballen.

Temperaturen optimeres ved at brændkammeret fores med kakler eller anden murværk mens luftdoseringen optimeres ved placere dyserne strategiske steder i brændkammeret samt ved at styre luftmængden optimalt. Det sikrer den bedst mulige afbrænding af ballen. I dag er de fleste halmfyr udstyret med iltstyring og PID regulatorer til styring af de forskellige luftspjæld.

Paradokset er så at disse forhold også virker fremmende på hhv. NO_x og dannelsen af saltandelen af støvemissionen. Begge stiger jo bedre forbrænding og jo højere temperaturen er.

Det vil dog ikke være hensigtsmæssigt at forsøge at begrænse disse ved primær reduktion, da det i så fald skal gøres ved at "ødelægge" forbrændingen og det vil have negativ indflydelse på de øvrige emissioner og samtidig virkningsgraden.

Dog er det i forhold til saltdannelsen teoretisk muligt at lave en to-trins forbrænding hvor halmen kun afgasses i brændkammeret og gasserne efterfølgende afbrændes i et sekundært brændkammer. Det er forsøgt i halmkedel projektet (afsnit

6.1.3), men det lykkedes ikke i det projekt at producere en gas som kunne antændes i sekundærkammeret.

5.2.2. Støvemission

I forhold til støvemissionen er det således kun den del der ikke består af salte som kan reduceres primært. Det vil sige halmstrå, uforbrændt kulstof og flyveaske og det udgør normalt, på en velfungerende kedel, under en femtedel af den samlede støvmængde.

På en velfungerende manuelt fyret kedel vil det være begrænset hvor meget støvemissionen kan reduceres ved primær reduktion. Der vil måske kunne laves noget cyklonvirkning inde i kedlen som kan udfælde nogle af de større partikler, men her vil det formentlig være mere effektivt at montere en gennemtestet og veldokumenteret cyklon efter kedlen.

Er kedlen derimod slem til at hvirvle aske og halm ud gennem skorstenen kan der med fordel optimeres på brændkammer- og dyse design, så der kommer mere ro i brændkammeret.

For en automatisk fyret kedel gælder det ligeledes at det er begrænset, hvor meget støvemissionen kan reduceres ved primære virkemidler. Alene det forhold, at den overskyggende andel af partikelemissionen er defineret ved halmens indhold af ubrændbare salte, udgør en begrænsning for, hvilken grad af reduktion der kan påregnes ved indsats med primære virkemidler.

5.3. Sekundære virkemidler

Ved sekundære virkemidler forstås virkemidler som monteres efter kedlen med henblik på at reducere emissionerne efter forbrændingen er fuldendt. Sekundære virkemidler gør i modsætning til primære virkemidler ikke noget for at optimere på forbrændingen. Her fjernes emissionerne, hvis forbrændingen ikke har været optimal.

Sekundære virkemidler består typisk af en katalysator- eller filterenhed som skal rense røggassen for uønskede gasser og partikler.

Sekundære virkemidler, primært i form af filter, anvendes i stor udstrækning på større anlæg (over 1 MW) som længe har været underlagt krav til emissioner. I det følgende gennemgås de forskellige teknologier og der gives en vurdering af deres relevans i forhold til mindre anlæg.

5.3.1. Gasemissioner

Der findes forskellige former for katalysatorer til reduktion af uforbrændte gasser som CO og OGC men de anvendes sjældent på større biobrændselsanlæg idet emissionerne stort set elimineres vha. primære virkemidler, dvs. optimal forbrænding i brændkammer.

Der findes også NO_x reducerende udstyr, men det er først ved at blive implementeret på de større anlæg. Anlæg som sælges i dag er forberedt til montering af NO_x reducerende udstyr, typisk SCR katalysator, men det er ikke endnu i brug i større skala.

Sådanne systemer vil ikke umiddelbart være særligt egnede på mindre halmfyrede anlæg da de hurtigt vil stoppe til, med mindre de monteres i kombination med et effektivt filter og en sådan kombinationsløsning vil formentlig gøre økonomien vanskelig for et mindre anlæg.

På manuelle anlæg vil der i tillæg være problemer med kold og fugtig røggas som ville stoppe katalysatoren til.

5.3.2. Støvemissioner

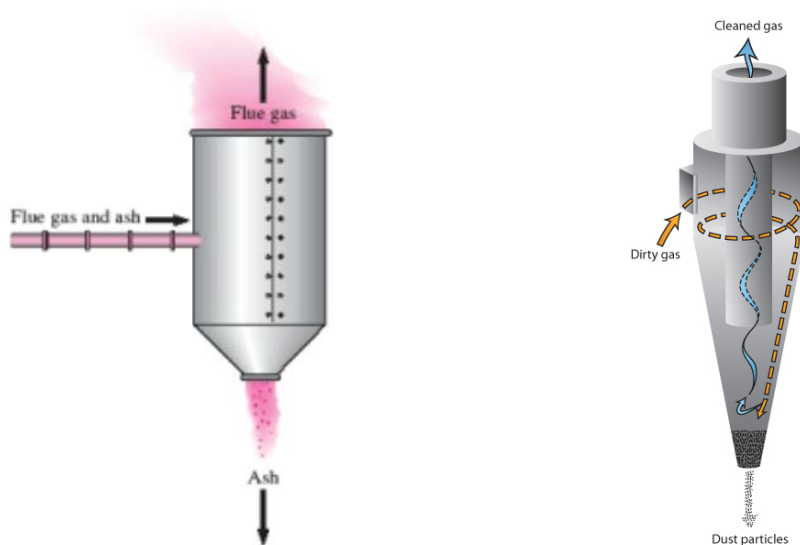
Der findes i grove træk fire forskellige kommercielt tilgængelige teknologier til filtrering af støv fra røggas fra biobrændselskedler. Cyklon, posefilter, elektrofilter og scrubber. De anvendes i varierende grad på større anlæg over 1 MW.

Langt de fleste større anlæg er forsynet med posefiltersystemer i kombination med cykloner mens der findes også et lille antal anlæg med scrubber systemer. Ifølge Dansk Fjernvarme er der pt. tre værker med scrubber i drift.

I det følgende beskrives kort de forskellige teknologier.

Cyklon

På figuren nedenfor er vist et par simple skitser af en cyklon.



En cyklon fungerer ved at røggassen ledes tangentielt ind i et åbent cirkulært kammer. Røggassen slynges herefter rundt i kammeret hvorved de tungeste partikler udfældes og falder ned i bunden.

En cyklon er den klart enkleste metode til filtrering både rent konstruktionsmæssigt og i forhold til drift og vedligehold. Der er ingen bevægelige dele og ingen dele der er særligt følsomme/skrøbelige i forhold til støv, fugt og tæring. Cyklonen er derfor billig i såvel drift som vedligehold.

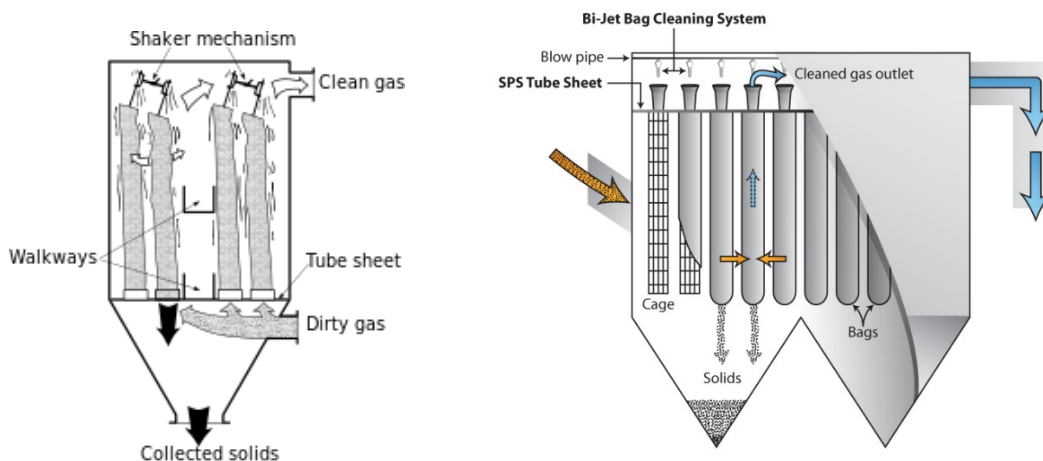
Men det er samtidig den mindst effektive metode til at udskille små partikler ($PM_{2,5}$). Hertil hører saltene som er den primære kilde til støvemission ved halmfyrring.

Rensningsvirkningsgraden i forhold til de største partikler er op mod 80-90% mens den samlede virkningsgrad vil være væsentlig lavere, hvor lav vil afhænge af størrelsesfordelingen af partiklerne.

Hvis en cyklon installeres med automatisk tømning kræver den stort set ikke pasning eller vedligehold. Ofte anvendes en cyklon som "forfilter" til posefilter som beskrives i det følgende.

Posefilter

Et posefilter fungerer i princippet som et stort kaffefilter. Røggassen tvinges igennem et antal poser med så lille maskestørrelse at partiklerne bliver fanget i filtermaterialet, som typisk er lavet af tekstil.



Røggassen ledes ind i et stort kammer hvor poserne hænger. Herfra ledes gassen igennem poserne mens støvet tilbageholdes. Den rensede røggas ledes herefter videre fra filtret mod skorstenen.

Poserne fores med kalk indtil der sætter sig nok partikler til at de kan hjælpe med filtreringen. Når trykfaldet over poserne overskrider en vis størrelse og driftsbetingelserne ellers tillader det, blæses partiklerne af filtret og falder ned i opsamlingsdelen i bunden af filterkassen.

Et posefilter har meget høj virkningsgrad i forhold til alle størrelser af partikler og opsamler også saltene. Problemet med posefiltersystemer er at det er meget store og relativt komplekse konstruktioner da der kræves et stort gennemstrømningsareal i filtrene hvis ikke tryktabet skal blive for voldsomt.

Derudover kan filtrene ikke tåle fugt idet kalk/støv belægningen på filterposerne bliver hård hvis den bliver våd. Det er problematisk i forhold til manuelle anlæg som har daglig opstart med kold og fugtig røggas.

Samtidig er systemet følsom over for høj røggastemperatur og evt. gløder og gni-ster fra forbrændingen, da det kan antænde filterposerne. Et posefilter system er derfor typisk forsynet med cyklon som "forfilter".

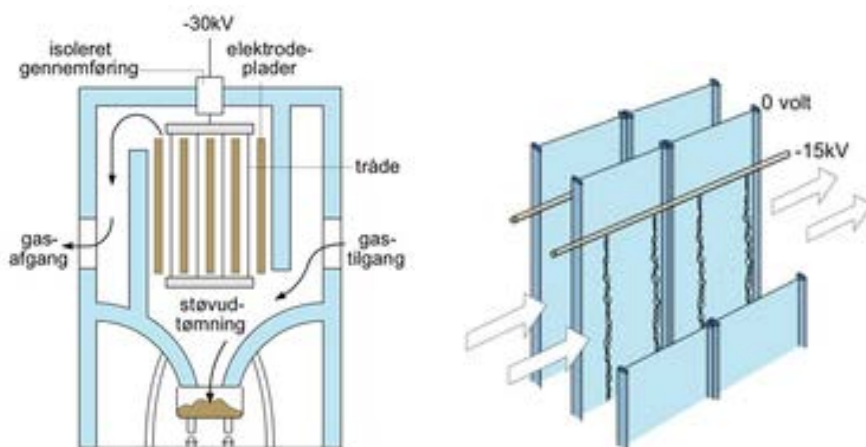
Et posefilter system skal være forsynet med en bypass anordning da der ellers er risiko for et der kan opstå en farlig situation hvis filtret stopper til. En sådan anordning medfører risiko for at det ofte står åbent og at røggassen således ledes ufiltreret til omgivelserne.

Endelig er et posefiltersystem dyrt i både anskaffelse og drift. Anskaffelse fordi det er et stort og komplekst system og drift, primært fordi der jævnligt skal skiftes poser.

Et posefiltersystem til et 400-500 kW anlæg koster i størrelsesorden 200-300.000 og vil være op til 4-5 meter højt.

Elektrofilter

Et elektrofilter fungerer ved at der etableres et højspændingsfelt i luftspalter mellem metalplader, indsat i røggaskanalen. Højspændingsfeltet giver partiklerne en elektrisk ladning som resulterer i at de sætter sig på pladerne.



Gassen ledes ind i kammeret og gennem højspændingsfeltet mellem metalpladerne hvor partiklerne afsættes. Pladerne skrubes, vibreres eller bankes løbende, for at slå partiklerne af. Partiklerne samles op i bunden af filterkassen.

Et elektrofilter har meget høj virkningsgrad også i forhold til de helt fine partikler. Samtidig er der ikke særlig stor risiko for at filtret stopper til, i modsætning til posefilter.

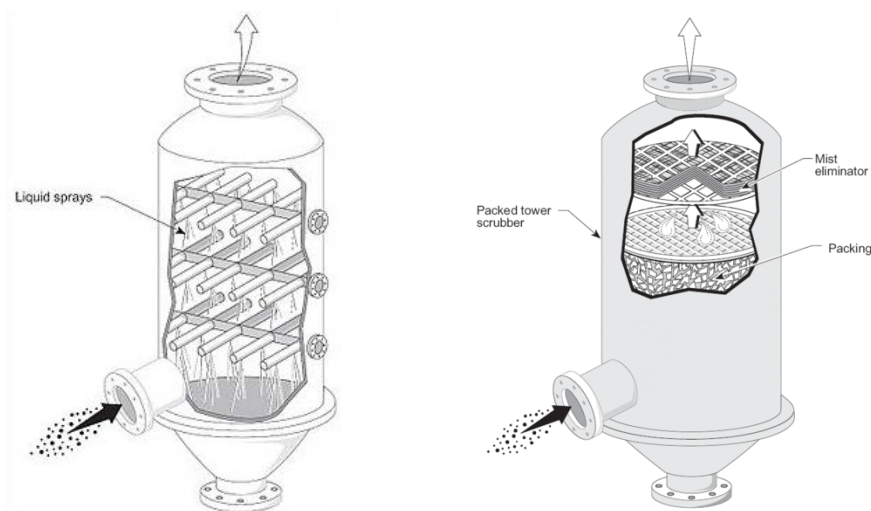
Filteret er ikke egnet til fugtig røggas idet det giver belægninger på både plader og elektroder som er svære at få af.

Generelt er elektrofilter derfor ikke umiddelbart egnet til røggas fra halmfyr og der er ikke fundet eksempler på anvendelse som vil kunne overføres til anlæg af den størrelse der er tale om her. De systemer der findes i dag bruges til flis og træpille-fyrede anlæg.

Dog er der i øjeblikket et dansk udviklingsprojekt i gang, som går ud på at udvikle et elektrofilter netop til halmkedler. Projektet beskrives i afsnit 6.1.4.

Scrubber

Et scrubber system fungerer ved at røggassen ledes igennem vand hvor partiklerne udfældes. Scrubbere kan være udformet på mange måder men principielt kan de opdeles i to hovedgrupper, nemlig "Spraytower" og "Fyldmateriale" scrubber.



Modellen til venstre er af "Spraytower" typen. Her ledes røggassen ind i et kammer og møder en "tåge" af forstøvet vand, doseret vha. dyser. Partiklerne udfældes i vandet. Doseringen kan være udført på forskellige måder, men principielt fungerer det som vist på figuren.

På den anden model, til højre, ledes røggassen ind i en beholder med fyldmateriale, overrislet med vand, og partiklerne udfældes i vandet. Fyldmaterialet kan være granulat, eller andre mindre emner, i ikke korrosivt materiale, eksempelvis plast.

En scrubber har normalt en virkningsgrad mellem 50 og 90%, afhængig af partikelstørrelsen. Den har høj effekt på større partikler - lav effekt på mindre partikler. Fordelen er at det er en relativ kompakt og enkel løsning.

Ulempen er, at røggassen bliver meget korrosiv og ætsende når den bliver opfugtet hvilket stiller høje krav til skorsten. Derudover er der store mængder spildevand og slam fra processen som skal håndteres.

Der er enkelte scrubber systemer i brug på større halmanlæg men de er normalt installeret i kombination med posefilter, og bruges således ikke som filter, men primært som kondenseringsenheder til at trække den sidste energi ud af røggassen.

6. Screening

Der er gennemført en screening af nationale og internationale projekter med halmfyr for at få et overblik over, hvilke problemstillinger der arbejdes med og, hvad best practice er i forhold til emissioner på de bedste anlæg.

Screeningen er gennemført ved internetsøgning, ved kontakt til folk i branchen og ved søgning i Teknologisk Instituts egne databaser.

I det følgende listes de fundne projekter op, først de danske og dernæst de udenlandske.

6.1. Danske erfaringer

Danmark har i mange år været foregangsland i forhold til forskning/udvikling og anvendelse af biobrændsel og i særdeleshed halm, til energiformål. Der er gennem de sidste 20-30 år gennemført et stort antal projekter med biobrændsel på både store og små biobrændselsanlæg hhv. med brændslet og kedlerne i fokus.

På halmfyr blev der især i 90'erne gennemført et stort antal projekter, mens der de senere år har været mere begrænset aktivitet. På det allerseneste er der dog igen kommet lidt gang i det, formentlig tilskyndet af at der nu skal stilles krav til halmfyrenes emissioner og virkningsgrader.

I det følgende gennemgås de væsentligste projekter/undersøgelser gennemført i Danmark.

6.1.1. Måleresultater, Prøvestationen 1996-2006

Der blev mellem 1996 og 2006 gennemført et forholdsvist stort antal målinger på Prøvestationen for mindre biobrændselsanlæg. Prøvestationen blev oprettet af Energistyrelsen i 1996 med henblik på, gennem tests og krav, at understøtte udviklingen af biobrændselsanlæg i Danmark.

Prøvestationen har gennem tiderne testet et stort antal manuelle og automatiske biobrændselsanlæg fra omkring 10 kW til 1 MW.

Der ligger derfor i Prøvestations regi en stor mængde data, fra prøvninger og forsøg med kedler og brændsler, herunder også halm og halmkedler.

Prøvestationsmålinger

Nedenfor er samlet de målinger der er gennemført på halmfyr.

	Mærke	Model	År	Effekt	CO	Støv	Kalium
	-	-	-	kW	mg/m _n ³	mg/m _n ³	%
1	Skeltek	RM 10	1996	63	5000	327	0,6
2	Skeltek	RM 25-2	1999	73	2500	213	0,6
3	Skelhøje	RAU-2-170	1997	139	5750	232	0,6
4	KF	KF 106	2001	175	754	165	0,6
5	KF	KF 106	1996	198	7125	231	0,6
6	Faust	O-160	1999	211	1538	313	0,7
7	KF	KF 107	1999	213	1075	267	0,7
8	Faust	O-210	1996	282	4250	260	0,6
9	Skelhøje	RAU-2-302	1999	284	2888	388	0,7
10	Skelhøje	RAU-2-330	1997	303	2913	396	0,6
11	Faust	O-350	1998	305	1413	462	0,8
12	KF	KF 108	1998	337	1713	573	0,8
13	Faust	O-210	2001	388	1369	283	0,7
14	KF	KF 109	2003	570	651	229	-
15	KF	KF 112	2006	761	1670	353	-
16	Linka	70	1996	69	1000	304	0,7
17	Linka	Multi. 130	1996	129	225	306	0,7
18	Passat	HO 180	2000	187	213	473	0,7

Målingerne er oplistet efter størrelse, med mindste kedel først. 1-15 er manuelt fyrede kedler mens 16-18 er automatiske anlæg.

Målingerne er som nævnt gennemført mellem 1996 og 2006 og har derfor nogle år på bagen. Alligevel er vurderingen at de bedste af målingerne giver en god indikation af niveauet for de bedste anlæg i dag. Da målingerne blev gennemført blev der fintrimmet og justeret efter alle kunstens regler, samtidig med at der blev fundet det bedst mulige halm til hver test.

Som beskrevet i afsnit 5.1 er støvemissionen meget afhængig af halmens indhold af salte, særligt kalium. I tabellen ses også den sammenhæng.

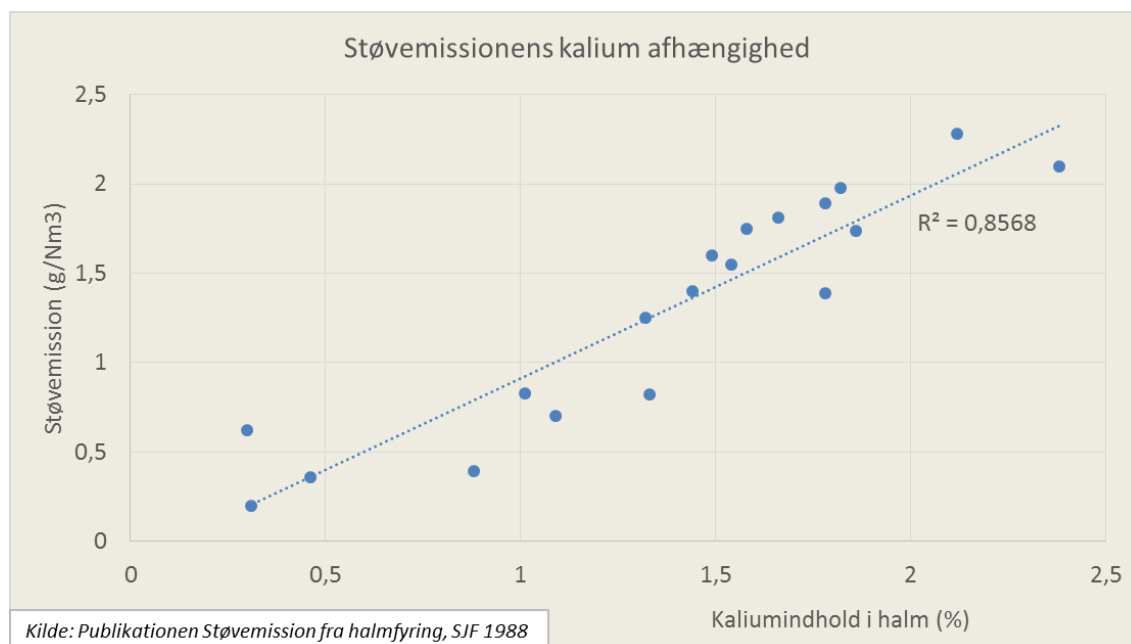
Spredningen på kaliumindholdet er forholdsvis begrænset, alligevel ses der, udover enkelte undtagelser, sammenhæng mellem støvemission og kaliumindhold. De to højeste på støv, nr. 11 og 12 er testet med ballerne med det højeste kaliumindhold mens de kedler der har lavest støvemission, nr. 2-3-4-5 er testet med de baller der har det laveste kaliumindhold.

CO emissionen viser lidt mere varierende resultater. De bedste anlæg ligger helt nede omkring 700 mg/m³. Det svarer til klasse 5 i dag. En så lav emission kræver både en rigtig god kedel, en rigtig god balle og en perfekt afbrænding. Det vil være svært at genskabe, også i dag, men det vurderes at gennemsnittet for de bedste kedler i dag kan bringes væsentligt længere ned end de værdier der blev opnået dengang.

Dels er der kommet nye styringer og dels kunne et skærpet krav medvirke til at fremme udviklingen af bedre luftsystemer, der vil lede til lavere CO emissioner. Grænseværdien var i starten 10.000 mg/m³ så der var ikke grund til at gøre mere for at komme længere ned.

6.1.2. Kalium vs. støvemission, SJF 1988

Nedenfor ses et eksempel på en analyse af sammenhængen mellem støvemission og kaliumindhold fra forskellige afbrændinger foretaget på samme kedel. Forsøget er foretaget i 1988 af SJF (Statens Jordbrugsforskning) og har derfor nogle år på bagen, men vurderingen er at billedet ville være helt det samme i dag med samme brændsler.



Som det ses er der en næsten lineær sammenhæng mellem indholdet af kalium i halmen og støvemissionen. Kedlen har under testen så vidt muligt kørt med samme

indstilling under afbrænding af alle ballerne. Laveste koncentration er 200 og højeste 2.400 mg/m_n³.

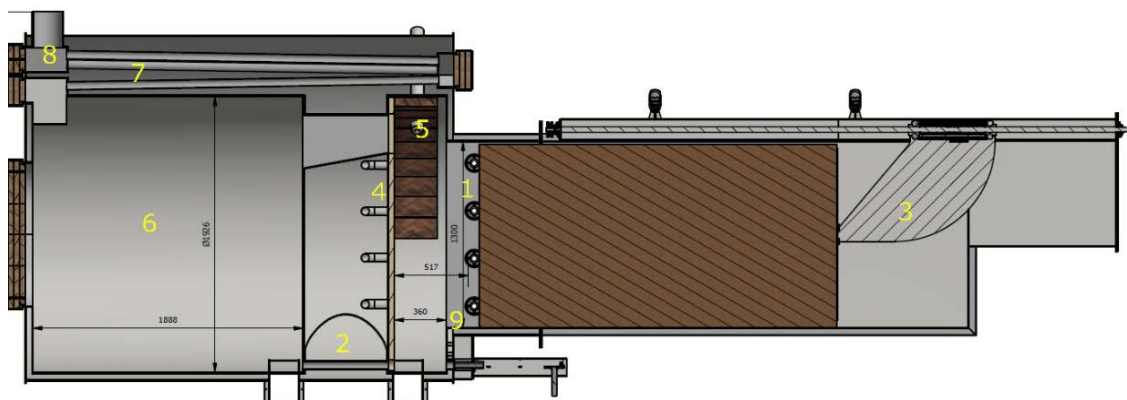
6.1.3. Halmkedelprojekt, Faust/Teknologisk Institut 2016

Projektet er udført for Miljøstyrelsen af Maskinfabrikken Faust ApS og Teknologisk Institut. Projektet er medfinansieret af Miljøstyrelsens "Program for Grøn Teknologi 2013" og er udført i perioden 2014 til 2016.

Projektets formål har været at udvikle en manuel fyret halmkedel på ca. 400 kW med lavere emissioner end de halmkedler der findes på markedet. Særlig fokus har der været på reduktion af CO, OGC, NO_x og støvemissioner.

Grundideen har været at overføre teknologi fra brændekedler som ligesom halmfyr er portionsfyret men udviklet til et noget højere teknologisk niveau. Gode brændefyr er i lang tid blevet bygget som to-kammer kedler hvor brændet ligger på en rist og både luftdosering og røggasafgang sker under risten. Det giver en langt bedre opblanding i forbrændingsfasen og samtidig sikres det at der altid er samme afstand mellem luftdoseringen og brændslet.

Der blev udviklet og testet flere varianter og det endte op i en kedel med en helt ny type brændkammer. I stedet for en vandret rist som i en brændekedel, blev der udviklet et lodretstående ristesystem som ballen ligger an mod og som ved hjælp af roterende opriverrør afriver halmen i kontrolleret mængde, samtidig med at der er fast afstand til ballen. Derudover undgås slaggeproblemer, idet slaggen flyder væk fra risten og ned i et askerum i bunden af brændkammeret.



Principskitse af kedel: 1 = roterende opriverrør, 2 = askesnegl, 3 = elektrisk spindel, 4 = primærluftdyser, 5 = sekundærluftdyser, 6 = sekundær brændkammer

Ballen bliver trykket frem mod de roterende oprivere ved hjælp af den elektriske spindel, i takt med at termostaten kalder på varme. Forbrændingen foregår i kammeret umiddelbart efter ballen.

Det blev i første omgang forsøgt at holde temperaturen nede på ballen så der kun var forgasning og så efterfølgende forbrænding via dyser i tragten mellem de to kamre men det viste sig ikke muligt at holde en ordentlig og stabil forbrænding. I stedet blev forbrændingen flyttet ind på ballen.

Det lykkedes at gennemføre flere fulde afbrændinger uden væsentlige problemer. Mekanikken fungerede og både CO, OGC og NO_x-emissionerne var under eller meget tæt på klasse 5 grænseværdierne. Støvemissionen var imidlertid fortsat relativ høj.

Nedenfor ses resultaterne fra bedste test i projektet.

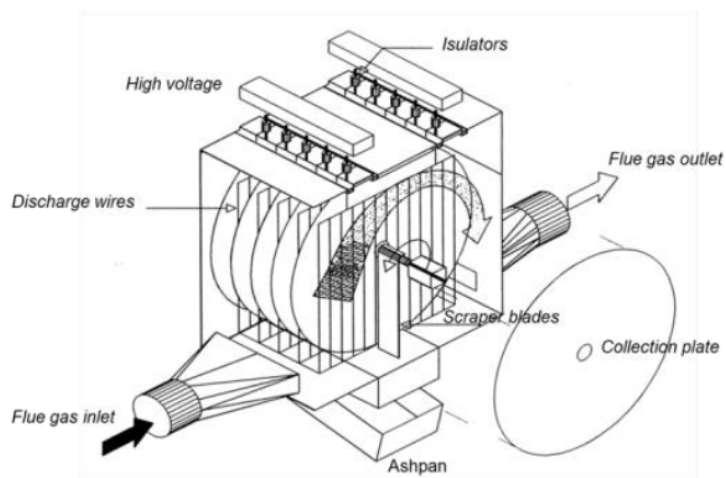
Projekt	År	Effekt	CO	OGC	NO _x	Støv
-		kW	mg/m _n ³	mg/m _n ³	mg/m _n ³	mg/m _n ³
Faust 400 kW kedel	2016	325	770	< 6	360	240

Som det fremgår er emissionerne lave, men ikke lavere end de bedste af prøvestationsmålingerne. Det underbygger indtrykket af at det bedst opnåelige niveau i dag meget ligner det de bedste kedler præsterede i prøvestationsmålingerne op til 2006 (afsnit 6.1.1).

6.1.4. Udvikling af elektrofilter, Reka/Foulum 2017

Århus Universitet i Foulum om at udvikle et elektrofilter til halmfyrede anlæg i samarbejde med Maskinfabrikken Reka. Filtret er en videreudvikling af et filter der blev udviklet i slutningen af 90'erne i samarbejde mellem Danmarks Jordbrugs Forskning (det nuværende Aarhus Universitet, Foulum), Maskinfabrikken REKA A/S og DK-Teknik.

Filteret fungerer ved at der etableres et elektrisk felt i røgkanalen som lader partiklerne når de strømmer igennem. De sætter sig så på nogle roterende plader som så igen, under rotation, skræbes fri for partiklerne.



Filtret viser rigtig fine resultater. Det har haft mange driftstimer og kører stabilt og driftssikkert. Det har vist filtreringsvirkningsgrad over 95%. Det forventes at filtret indenfor overskuelig fremtid er færdigudviklet og vil kunne tilbydes interesserede kedelfabrikanter.

Umiddelbart er sigtet lidt større automatisk fyrede halmkedler. Vurderingen er at prisen vil blive for høj til de små anlæg og samtidig at det ikke umiddelbart vil kunne fungere på manuelt fyrede anlæg. Filterprincippet er, i sin nuværende udformning, følsom over for fugt indtil systemet er fuldt opvarmet og vil derfor ikke kunne anvendes på manuelt fyrede anlæg som hver dag har kold opstart med kold fugtig røggas.

Det primære segment som filtret tænkes anvendt til er derfor automatiske anlæg over 500 kW.

6.1.5. Optimering af CO-emission, Alcon / AU Foulum

Alcon udfører i samarbejde med Århus Universitet Foulum en række forsøg på en manuelt fyret halmkedel, med det formål at optimere på brændkammer og luftdosering for at få bedst mulig forbrænding, dvs. lavest mulig CO.

Fokus er ren og skær på forbrændingskvaliteten og det giver ifølge Alcon lidt forøgede støvemissioner. Når forbrændingen forbedres stiger temperaturen og det giver teoretisk, og tilsyneladende også i praksis, lidt mere fordampning af salte og dermed mere støv. Imidlertid er det at foretrække at forbrændingen bliver så god og ren som muligt overordnet set og ikke at gå på kompromis med OGC, CO etc. for at holde støvet lavt ved at nedsætte temperaturen og derved begrænse at saltene kommer på dampform.

Status er at der er opnået en rigtig god forbrænding med CO under klasse 5 grænseværdierne (700 mg/nm³).

6.1.6. Røggasfiltrering med patronfilter, Aagaard

Ifølge Aagaard er der kørt enkelte forsøg med patronfiltre, men der er ikke opnået brugbare resultater. Projektet er skrinlagt og det forventes ikke at det bliver genoptaget.

6.2. Udenlandske projekter og lovgivning

I det følgende vil lovgivning i diverse lande, hvor data har været tilgængelig blive præsenteret. Fokus vil være på henholdsvis Europa og USA/Canada. Ydermere vil nogle af de europæiske forsknings og udviklingsprojektet relateret til halmkedler bliver præsenteret.

6.2.1. Lovgivning i andre lande

6.2.1.1. Europa

Partikelemissioner fra kedler er for nyligt blevet evalueret i et kritisk review af Villeneuve et al.¹ Det omtales her hvordan det en kendt udfordring, at partikelemissionerne fra halmkedler er større end eksempelvis træpillekedler.

Biomasseafbrænding og enheder til dette er alment set udbredt i Europa og stødt voksende, men især i de skandinaviske lande og de baltiske lande er det meget benyttet. Dette giver følgelig anledning til behov for lovmæssig regulering af de tilladte størrelser af emissioner. I EU er der således opstillet overordnede regler fra 2025 som minimumskrav, men samtidig lagt op til at hvert medlemsland udvikler egne specifikke lovgivningskrav. Således kan det eksempelvis nævnes at de overordnede krav til støv fra små biomasse enheder er 50 mg/m³ i Europa, mens kravene i Tyskland er væsentlig strengere, nemlig 20 mg/m³ og således den laveste grænseværdi fundet i dette arbejde (Villeneuve).

Generelt er der strengere lovgivningsmæssige krav, jo større enheden til afbrænding af biomassen er. I tabel 1 er data for emissioner fra fast biomasse for kedler på 1-50 MW varmeydelse omfattet af MCP Direktivet 20130442 (COD) Direktivet er et rammedirektiv der skal udmøntes ved national lovgivning.

Tabel 1. Grænseværdier, emissioner fra kedler fyret med fast biomasse under MCP Direktivet

Substans	Grænseværdi	Enhed
PM, kedler 1-5 MW	45	mg/Nm ³
PM, kedler 5-50 MW	30	mg/Nm ³
NOx	650	mg/Nm ³
SO ₂	200	mg/Nm ³

I de forskellige Europæiske lande er der store lokale forskelle, som vil blive illustreret i de følgende materiale.

I de forskellige Europæiske lande er der store lokale forskelle, som vil blive illustreret i de følgende materiale.

I Schweiz er emissionsgrænserne differentieret for forskellige typer ovne/kedler og biomasser som det er illustreret i Tabel 2.

Tabel 2 Grænseværdier i Schweiz for støv (Villeneuve ¹)

PM emission limits for small combustion units in Switzerland ≤ 350 kW (adapted from EBS, 2007 and corrected for standard 11% O₂).

Type of installation	European standard	PM limits (mg/m ³)
Log boiler, manual loading	EN 303-5 or EN 12809	63
Densified wood boiler, automatic loading	EN 303-5 or EN 12809	75
Wood pellet boilers, automatic loading	EN 303-5 or EN 12809	50
Space heating with solid fuels	EN 13240	94
Space heating using wood pellet fuels	EN 14785	50
Individual furnace for solid fuels	EN 12815	113
Centralised furnace for solid fuels	EN 12815	150
Chimney insert – open chimney for solid fuels	EN 13229	94

I Holland er emissionsgrænserne for NO_x, SO₂ og støv givet ved værdierne vist i Tabel 3 gældende fra 2015 og yderligere opstramning ventes at indtræde i 2019.

Tabel 3 grænseværdier fra emissioner fra biomasseafbrænding i kedler i Holland²

Tabel 3.1 Emissie-eisen verbranden biomassa per 1 jan 2013

Periode	Nominaal vermogen	Stikstof-oxiden (NO _x) (mg/Nm ³)	Zwavedioxide (SO ₂) (mg/Nm ³)	Totaal stof (mg/Nm ³)
t/m 1 januari 2015	0 kW – 0,5 MW	-	-	150
	500 kW – 1MW	-	-	75
Vanaf 1 januari 2015	0 kW – 1 MW	300	200	40
Vanaf 1 januari 2013	1MW - 5 MW	200	200	20
Vanaf 1 januari 2015	> 5MW	145	200	5

1) Bij zuurstofgehalte van het afgas van 6%.

2) Zwavedioxide hoeft niet gemeten te worden indien de brandstof een zwavelgehalte heeft van 0.1% of minder.

I Tyskland ses ligeledes at der skelnes mellem størrelse af enheden som illustreret i tabel 4.

Tabel 4 Tyske emissionsgrænser for biomasseenheder af forskellig størrelse (Beauchemin)³

fuel type	furnace heating capacity, kW	max. emission, g per m ³ of flue gas	
		particulate matter	CO
straw and alike plant materials	≤ 50 kW	0.15	4.0
	50 – 100 kW	0.15	2.0

Emission Limit Values Germany (TA-Luft)

Vol. % O ₂	Size	PM (mg/m ³)	CO (mg/m ³)	NO _x (mg/m ³)
11%	≥ 5 MW	20	250	250
11%	2,5 - 5 MW	50	250	250
11%	< 2,5 MW	100	250	250

¹ Villeneuve, J., Palacios, J.H., Savoie, P., Godbout, S., A critical review of emission standards and regulations regarding biomass combustion in small scale units (<3 MW), Bioresource Technology 111 (2012)

² http://www.cocos.nl/offline_scans/n120252_handleiding_stoken_op_hout-2.pdf

³ Woodfired combustion equipment' developed for Ministry of Environment, British Columbia by Beauchemin, P and Tampier, M, 2006

Yderligere ses i Tyskland specifikation vedrørende hvilken biomasse der afbrændes og således som illustreret i Tabel 5, er kravene til eksempelvis støv ved halmafbrænding tidligere mere lempelige men ved nyeste regulering fra 2015 sammenligneligt med anden biomasse, idet PM ved halmafbrænding i anlæg fra 100 kW-1 MW < 50 mg/m³ og for anlæg større end 1MW < 20 mg/m^{3,4}.

Tabel 5. Ny regulering for forskellige typer biomasse i Tyskland (Beauchemin)

New German Emission Limits for Biomass Boilers

	Fuel	Size (kW)	Dust (mg/m³)	CO (mg/m³)
Installations starting operations after ordinance comes into force	Coal, char coal	4-500	90	1000
		>500	90	500
	Wood, bark	4-500	100	1000
		>500	100	500
	Pellets	4-500	60	800
		>500	60	500
	Treated wood, presswood	50-100	100	800
		>100-500	100	500
		>500	100	300
	Straw and other solid agricultural fuels	4-100	100	1000
Installations starting operations in 2015 or later	Coal, wood, pellets	>=4	20	400
	Treated wood	50-500	20	400
		>500	20	400
	Agric. fuels	4 < 100	20	400

Source: Novellierung der 1. BImSchV - Heizkessel

For Østrig og Schweiz er grænseværdierne ved biomasseafbrænding udtrykt som givet i tabel 6 og 7, hvor de er beregnet ved 13% ilt således at de to lande kan sammenlignes direkte (i modsætning til f.eks. ved data i Tabel 2 for Schweiz, der er ved 11% ilt). Denne udfordring i form af at forskellige lande beskriver grænseværdier på forskellige måder bør bemærkes, da det betyder at man skal være forsigtig med hvilke data der reelt kan sammenlignes direkte.

Tabel 6 Østrigske emissions grænser for støv, CO og NOx (Beauchemin)

⁴ https://pelletsatlas.info/wp-content/uploads/2015/09/Legal-Framework-For-MBP-Utilisation_MBP.pdf

Emission Limit Values – Austria (LRG-K)

Vol. % O ₂	Size	PM (mg/m ³)	CO (mg/m ³)	NO _x (mg/m ³)
13%	< 2 MW	150	(no limit)	300
13%	2 - 5 MW	120	250	300
13%	> 5 MW	50	250	200-300

Tabel 7 Schweiziske emissions grænser for støv, CO og NO_x (Beauchemin)

Emission Limit Values – Switzerland (LRV)

Vol. % O ₂	Size	PM (mg/m ³)	CO (mg/m ³)	NO _x (mg/m ³)
13%	< 2 MW	150	500-4,000	250
13%	2 - 5 MW	50	250	250
13%	> 5 MW	50	250	250

Forskel på Øst- og Vesteuropa

Ved sammenligning af Øst og Vesteuropa som vist i Tabel 8, ses at størrelsen af emissioner af støv er signifikant forskellige ved afbrænding af biomasse. Det foreslår at kravene og miljøhensynene i Østeuropa er væsentlig lavere hvis overhovedet defineret end for de vestlige europæiske lande.

Tabel 8 Emissionsfaktorer i henholdsvis Øst- og Vesteuropa (Beauchemin)

RAINS is the Regional Air Pollution Information and Simulation module developed by the Austrian International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) [RAINS 2008]. It is used to estimate emission reduction potentials and costs in Europe. The emission factors in the following table therefore represent levels that IIASA considers representative for European applications.

Particulate matter emission factors used in the RAINS model for wood burning

Sector	kg/GJ			mg/m ³
	PM _{2.5}	PM ₁₀	TSP	TSP
Eastern Europe				
Fireplaces, stoves	0.279	0.288	0.3	719
Small domestic boilers	0.093 - 0.230	0.096 - 0.240	0.100 - 0.250	420
Large residential boilers	0.077 - 0.150	0.089 - 0.180	0.100 - 0.200	360
Industry ¹⁾	0.185	0.214	0.24	576
Western Europe				
Fireplaces, stoves	0.067 - 0.186	0.070 - 0.192	0.072 - 0.200	326
Small domestic boilers	0.060 - 0.167	0.062 - 0.172	0.065 - 0.180	294
Large residential boilers ¹⁾	0.050 - 0.120	0.060 - 0.134	0.065 - 0.150	258
Industry ¹⁾	0.185	0.214	0.24	576

I Østeuropa er det overordnet set vanskeligt at finde data fra tilladte grænseværdier fra halmafbrænding. I Polen er tilladte grænse for støv 200 mg/m³ ved 10% O₂.

6.2.1.2. USA og Canada

USA har EPA reguleringer af emissioner, og her sættes grænseværdier for støv ved biomasseafbrænding på 70 mg/m³ for kedler af størrelsen 2.9-8.8 MW og på 30 mg/m³ for kedler større end 8.8 MW. Disse tal er illustreret og sammenlignet med data fra Europa og Canada som vist i Tabel 9 (se næste side)

I Canada kan det nævnes at en fremtidsvision er at få niveauet af PM_{2.5} lavere end 30 microg/m³ over 24 h periode som gennemsnitsbetragtning. Som det ses af Tabel 10. er status i Canada i øjeblikket at den tilladte emission varierer voldsomt fra mellem 35-600 mg/m³ og der således er et kæmpe interval støv fra biomasseenheder skal være inden for, afhængig af området og kedelstørrelsen.

I en omfattende rapport, Emission from Woodfired combustion equipment⁵ udarbejdet for Ministry of Environment, British Colombia sammenlignes støvemissioner ikke blot fra træ men også for andre biomasser i en række lande, og relevante data er sammenfattet her.

Grænseværdierne i Britisk Colombia, der estimeres at være mulige at nå på en økonomisk rentabel måde, er vist i Tabel 10 for forskellige størrelser kedler og med forskellige teknologier benyttet til fjernelse af støv.

Tabel 10 Økonomi rentable partikelemissioner det skønnes muligt at nå i Britisk Colombia med en given størrelse kedel og med den mest optimale teknologi til partikelfjernelse

Table ES 1: Achievable PM Emission Limits by Technology Size (Heat Boilers/Furnaces)

Boilers and Furnaces				
Heat Input	40+ MW _{th}	3-39 MW _{th}	1-3 MW _{th}	<1 MW
A.P. Controls	ESP	ESP/fabric filter	ESP/fabric filter	Cyclone/ uncontrolled
Current Range	3-47 mg/m ³		59-221 mg/m ³	216-5,000 mg/m ³
Economically Achievable Limit	20 mg/m ³	35 mg/m ³	50 mg/m ³	120* mg/m ³
Rationale for E. A. Limit	Large units are less sensitive to higher cleanup costs. Achievable with a 3-4 field ESP.	APC costs as much as boiler at about 5 MW size. Achievable 2-3 field ESP.	Can be achieved with cyclone and 1-2-field ESP, but APC costs may exceed combustor.	Feasible with cyclone or two-stage combustor.
Even lower limits	Technically feasible, but APC cost starts to increase sharply below this limit, especially for higher ash fuels such as hog.	Would require technology demanding constant supervision.	Would require technology demanding constant supervision.	Would discourage use of wood as a fuel. *If gasification technology or pellets are used then 70 mg/m ³ is achievable.

Note: Air pollution controls (APC) such as ESP and baghouses usually include cyclones as precollectors. The higher cost of pellet fuel relative to raw wood, reduces opportunity to fund enhanced APC (e.g., beyond cyclones) out of the fuel cost savings at current natural gas/pellet price differentials.

⁵ 'Woodfired combustion equipment' developed for Ministry of Environment, British Colombia by Beauchemin, P and Tampier, M, 2006

Tabel 9 Sammenligning af støvemissioner i USA, Canada og Europa

Existing air emission legislation for PM with regards to biomass combustion in Canada, USA and Europe.			Total PM, mg/m ³ (dry gas corrected at 11% O ₂ , 25 °C, 101.3 kpa)	
Biomass legislation by State, Province, City, or Country	Capacity of boiler		Boiler (existing)	Boiler (new)
Quebec (Canada)	<3 MW		600	150
Quebec (Canada)	≥ 3 MW and < 10 MW		340	150
Quebec (Canada)	≥ 10 MW		100	70
Quebec (Canada) pulp and paper residue and agriculture biomass	≥ 3 MW		100	70
Vancouver (BC, Canada)	>3 MW		35	
Vancouver (BC, Canada)	≤ 3 MW		50	
EPA (USA, February 2014)	≤ 2.9 MW		Tune up required once every 2 years	
EPA (USA, February 2014)	≥ 2.9 MW ≤ 8.8 MW		70	
EPA (USA, February 2014)	≥ 8.8 MW		30	
Connecticut (USA)	Unit has the potential to emit (PTE) 15 tons per year of any air pollutant		Case-by-case best available control technology (BACT)	
Maine (USA)	2.9 MW (aggregated)		Case-by-case BACT determination	
Massachusetts (USA)	>293 kW		100-200 (mg/m ³)	
New Hampshire (USA)	>586 kW		300 (mg/m ³)	
New Jersey (USA)	>293 kW		Case-by-case BACT determination	
New York (USA)	>293 kW		1800 (mg/m ³)	
Rhode Island (USA)	>293 kW		Case-by-case BACT determination Recent determination 200 (mg/m ³)	
Vermont (USA)	>882 kW		Case-by-case BACT determination Recent determination 200 (mg/m ³)	
Europe	≥ 500 MW		50	
Europe	<500 MW		100	
Europe	50-100 MW			50
Europe	>100 MW			30
Germany, 2014 (Europe)	All sizes		20	20

6.2.2. Europæiske projekter

Mange studier har set på afbrænding af biomasse i mindre enheder <300 kW men på trods af dette rapporteres at der savnes yderligere projektarbejde, her i særdeleshed systematisk studie og viden (Godbout et al⁶). Af projekter der kan nævnes er arbejde med afbrænding af halm af Björn et al⁷ og Splitehof et al⁸ hvor blandt andet alkalisk aske, og partikler er studeret.

Af større internationale projekter kan nævnes Biomass4business, der har til formål at forbinde markedet og politik inden for biomasseafbrænding heriblandt halm. Projektet er beskrevet kort her⁹:

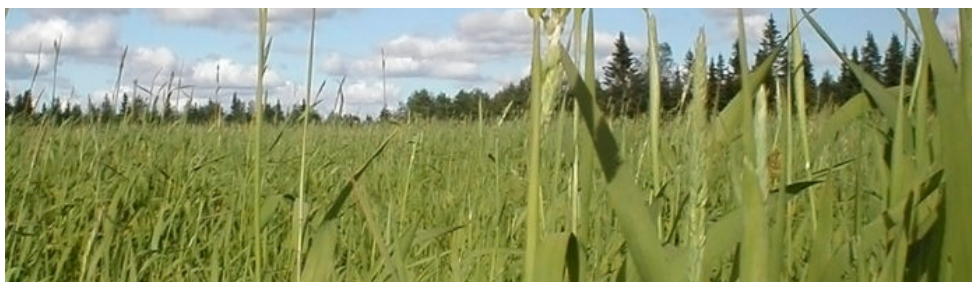
"Biomass for business - et projekt der samler politiske beslutningstagere og markedet!

Biomass for business arbejder på at opbygge et netværk hvor bæredygtig, økonomisk favorabel og høj kvalitet bioenergivarmer kan fremmes. Projektet bidrager til at opnå EU medlems landenes 2020 RES mål og fremme videre positive udvikling inden for feltet efter 2020.

I øjeblikket er europæiske virksomheder afhængig af kul, olie og naturgas der oftest importeres fra politiske ustabile områder. Ud fra dette projekt vil det være muligt at mindske denne afhængighed ved at fremme grøn energi fra biomasse. Projektet er støttet af Horizon 2020.

I Sverige kan projektet BIOFLEX¹⁰ nævnes med en kort introduktion til projektet som udtryk her:

BIOFLEX! – Ren og flexible brug af nye biomasse brændsler til forbrænding i små og medium forbrændingsanlæg.



⁶ Godbout, S., Palacios, J.H., Pelletier, F., Larouche, J.-P., 2010. Combustion de la biomasse agricole: caractérisation des effluents gazeux et particulaires, revue de normes et élaboration d'un protocole de mesure. Rapport final. Research and Development Institute for the Agri-Environment (IRDA). Québec, Canada

⁷ Björn, H., Näslund, N., Marklund, S., 2006. Emission of PCDD/F, PCB and HCB from combustion of firewood and pellets in residential stoves and boilers. Environ.Sci. Technol. 40, 4968–4975.

⁸ Splithoff, H., Scheurer, W., Hein, K.R.G., 2000. Effect of co-combustion of sewage sludge and biomass on mission and heavy metals behaviour. Trans IChemE 78, 33–39.

⁹ <https://www.dti.dk/projects/project-bioenergy4business/37099>

¹⁰ <http://bioflex-eranet.eu/>

Det overordnede formål med BIOFLEX! Er at øge fleksibiliteten af brændsler og innovations potentialer ved brug af mere vanskelige faste biomasser således at der ikke konkurreres med madproduktion til produktion af brændsler til små og mellemstore anlæg i varme og strøm produktion.

Inden for BIOFLEX! Rammer vil der for første gang blive fundet løsninger og teknologier vil blive udviklet, der gør anvendelser af sådanne biomassebrændsler mulige

I Finland finder der ligeledes projekter sted, som udtrykt ved Tissai et al.'s arbejde, med et eksempel på en yderst relevant publikation givet her i Energy and Fuels 2008, 22, 2033-2042.

Ligeledes finder der kontinuerligt forsknings og udviklingsarbejde sted i Tyskland, hvilket kan illustreres dels ved en konference præsentation 2010 baseret på projektarbejde, 'New evaluation strategy relating slag formation, 2014, af TFZ og dels et andet projekt 'Getreidekörner als Brennstoff für Kleinfeuerung' ¹¹

Også i Østeuropa finder der enkelte forsknings og udviklingsprojekter til relateret til halm. Eksempelvis kan det nævnes at der i Polen har der ligeledes fundet et projekt sted fra halmafbrænding i kedler af størrelsen 200 kW-3.5 MW.

6.3. Sammenfatning af udenlandske forhold

I de fleste lande er lovgivningen for biomasse alment set også gældende for halm. Tyskland skiller sig ud ved specielt strenge regler, 20 mg/m³ og en udspecifikation med forskelle for forskellige typer biomasse. En række andre lande har forskellige krav, afhængig af kedlens størrelse. Polen er det eneste østeuropæiske land med et krav, nemlig en tilladte grænse for støv 200 mg/m³ ved 10% O₂. Værd at bemærke er også forskellen i forskellige lande på ved hvilket iltindhold grænseværdierne angives ved, hvilket umuliggør en direkte umiddelbar sammenligning uden omregning. En række europæiske projekter arbejder på at reducere emissioner fra halmfyr og skabe bedre forbrænding. Dette tyder på, at der er en vis almen interesse i Europa på at optimere halmafbrænding i mindre anlæg.

¹¹ http://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/festbrennstoffe/dateien/13_bericht.pdf

7. Opsamling og anbefalinger ift. emissionsreduktion

Screeningen har vist at det er et meget begrænset antal projekter der er gennemført, særligt i de senere år. Screeningen har også vist at halmfyring i høj grad er et dansk fænomen. Kun Sverige, Tyskland og Polen har lidt i gang og har lavet enkelte projekter og målinger på halmfyr.

I de projekter der er fundet arbejdes med optimering af forbrændingen i forhold til CO og OGC og med reduktion af støvemission. Der er fundet 3 nyere projekter som forsøger at adressere det.

Det overordnede formål med nærværende opgave, har været at nå frem til et bud på hvor langt emissionerne kan bringes ned, hhv. med primære og sekundære virkemidler.

Det gives der bud på i det følgende.

7.1. Målemetode

Som udgangspunkt er det målemetoden beskrevet i EN 303-5 standarden der skal anvendes når halmkedler testes.

Manuelle anlæg

Ifølge standarden skal manuelle halmfyr testes som brændekedler. Det kan imidlertid ikke lade sig gøre i praksis. Særligt to problematikker gør sig gældende.

Standarden foreskriver at afprøvning af en manuel kedel skal udføres ved måling på to indfyringer umiddelbart efter hinanden og hvor der ved begge indfyringer startes på et grundglødelag. Det er ikke muligt ved halmfyr. Det er ikke sådan de skal fyres i virkeligheden og hvis det alligevel gøres, vil der være stor risiko for at ballen antænder og at snorene springer, før ballen er helt på plads.

Halmballer skal tændes fra toppen og forbrændingen vil komme helt forkert i gang hvis der startes op på grundglødelag, fra bunden af.

Det andet problem er at virkningsgraden iht. standarden skal måles ved den direkte metode dvs. ved at temperaturen før og efter kedlen samt flowet igennem kedlen måles og bruges som grundlag for beregning af nytteeffekt. På en manuel fyrer kedel med påbygget akkumuleringskøle og stor vandmængde lader det sig ikke gøre.

Standarden er under revision men det har forholdsvis lange udsigter før dette arbejde afsluttes. Teknologisk Institut sidder med i standardiseringsudvalget og har derfor indflydelse på hvordan standarden udformes.

Indtil standarden er revideret er det nødvendigt at finde en dansk løsning i forhold til hvordan der skal testes og hvilke krav der skal stilles. Ideelt set skal de målinger der laves indtil standarden er revideret kunne overholde kravene i den reviderede standard, når den er klar.

Enten kan en test udføres ved at der måles gennem en hel afbrænding. Så både opstart og udbrænding er med. Det er sådan det beskrives i EN standarden at manuelle anlæg skal testes og det er formentlig også sådan det vil blive efter en revision.

Man kan imidlertid argumentere for at det giver et forkert billede i forhold til de automatiske anlæg at opstart og udbrænding skal måles med i det der i disse situationer opleves meget høje emission og lav virkningsgrad.

Alternativt kan man lave et antal målinger mens kedlen er varm og kører stabilt. Det vil tilsvare den måde automatiske anlæg måles på. Her er opstart, udbrænding og pausedrift heller ikke en del af målingen. En sådan målemetode vil give væsentligt lavere emissioner.

De målinger der refereres til i afsnit 6.1 er alle målt tilnærmeth i EN 303-5, blot med den væsentlige afvigelse at der ikke startes op på grundglødelag men på forvarmet tom kedel ved hver indfyring.

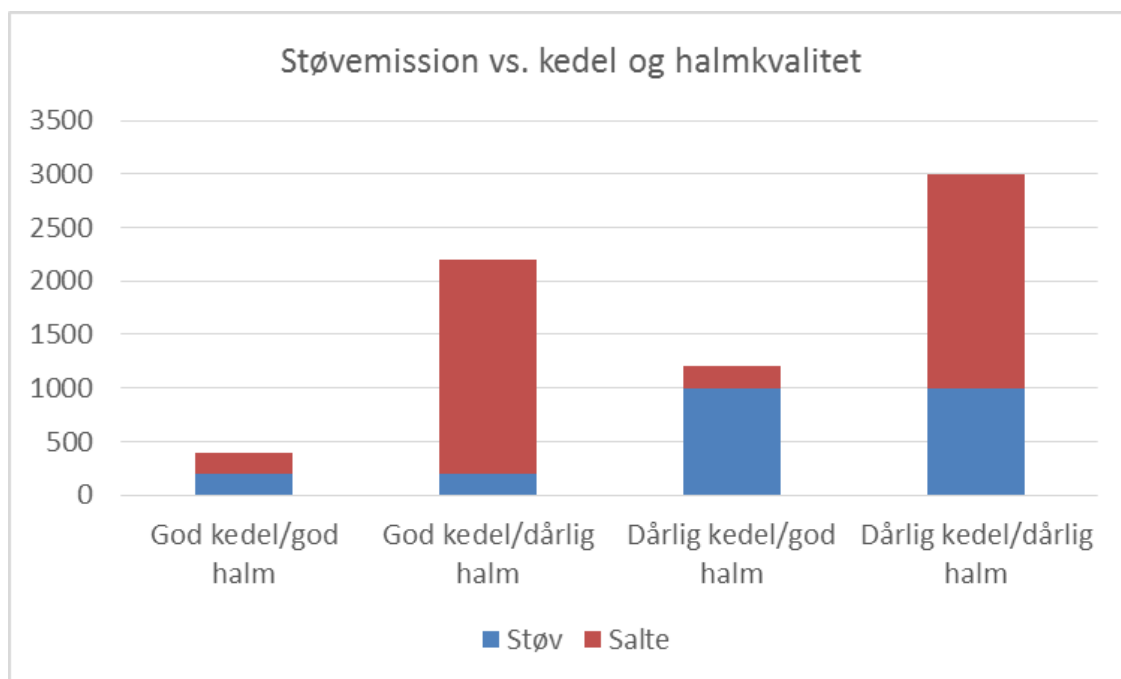
Automatiske anlæg

Automatiske anlæg kan måles helt problemfrit som beskrevet i EN 303-5. Her måles ved fuldlast gennem 6 timer og lavlast, defineret som maks. 30% af fuldlast, ligeledes gennem 6 timer. Begge tests starter og stopper når kedlen kører stabilt ved den givne last.

7.2. Testbrændsel

Som det er vist i afsnit 6.1.2 er der meget stor forskel på halmens kvalitet som brændsel, med særlig henblik på kaliumindhold. Særligt i forhold til mængden af støv der dannes under afbrænding. Kedlens egenskaber har i forhold til variationen på brændslet lille betydning. Fra en god kedel vil støvemissionen kunne variere mellem 200 og 2.000 mg/m_n³ afhængig af brændslet.

Nedenfor er illustreret hvilken betydning hhv. kedel og halm har for den samlede støvemission, rå fra kedlen. Naturligvis vil der være usikkerhed på tallene, men de er valgt så repræsentative som muligt, ud fra de målinger der er tilgængelige.



Hvis ikke der tages hensyn til det i udformning af kravene vil det betyde at der vil blive brugt mange ressourcer på at finde det helt rigtige brændsel til testen. Man vil samtidig risikere at få et misvisende resultat idet det kun sjældent vil ske i praksis at kedlen vil få en så god halm at arbejde med.

Variationen i kvaliteten skyldes dels indholdet af vand, kalium og ballens beskaffenhed, hvor hårdt den er presset mv.

Som alternativ kan man enten henregne til en reference halm (vand, kalium, massefylde) og korrigere resultaterne herefter. Eller man kan udvaske saltene fra støvprøverne og så stille krav til det der er tilbage, nemlig den andel der indeholder flyveaske, uforbrændt kulstof og medrevne halmstrå. Det er det fyret kan gøre noget ved (se eksempelvis udvaskningsforsøg i bilag 1).

7.3. Emissioner

Nedenfor gives bud på hvor langt ned emissionerne kan komme afhængig af hvordan der måles.

Fuld cyklus: Der måles inkl. opstart og udbrænding. Som der gøres på manuelle anlæg iht. EN 303-5 i dag.

Timetest: Der måles et antal timer mens kedlen er varm og kører stabilt. Som det gøres på automatiske anlæg i dag.

Korrektion kan udføres enten ved at analysere brændslet og korrigere til et reference kaliumindhold eller ved at vaske saltene ud af de opsamlende støvprøver og kun lade den del af støvet der ikke er salte, og dermed brændselsafhængigt, tælle.

Det vil tilskynde producenterne til at optimere kedlen i forhold til den del af støve-missionen kedlen er "ansvarlig" for, nemlig uforbrændt kulstof, flyveaske og med-revne halmstrå.

	Forudsætning		CO	OGC	Støv
	-		mg/m _n ³	mg/m _n ³	mg/m _n ³
1	Fuld cyklus uden korr.	man	1.000	30	300
		aut	-	-	-
2	Fuld cyklus med korr.	man	1.000	30	150
		aut	-	-	-
3	Timetest uden korr.	man	700	30	300
		aut	500	20	300
4	Timetest med korr.	man	700	30	60-150
		aut	500	20	40-100

I tabellen er givet et bud på hvor langt emissionerne, rå fra kedlen, kan bringes ned ved de to forskellige testmetoder hhv. med og uden korrektion for kaliumindholdet i halmen.

Buddene er givet under forudsætning af at der findes en god balle til testen – men samtidig behæftet med stor usikkerhed. Primært grundet de beskrevne variationer i ballekvalitet men også grundet variationer i selve afbrændingen, især i manuelle fyr, idet tilfældigheder i forhold til hvordan ballen falder sammen under afbrænding kan have stor betydning for emissionerne.

7.4. Øvrige mulige tiltag

Med henblik på at reducere de gener der kan være i nærmiljøet kan der stilles krav om montering af cyklon, som på en god kedel vil kunne tage mellem 70 og 90% af det støv der ikke er salte.

Der kan også stilles krav om halvårlig eller helårlig service. Erfaringen er at fyrene ofte får lov til at køre i årevis uden tilsyn, indtil et eller andet går galt. Der ses så fejl, som anlæggene har kørt med i årevis. Fejlene vil ofte være skyld i ringere udnyttelse af halmen og forøgede emissioner.

Endelig kunne man overveje at stille krav om at brændslet opbevares tørt. Ikke nødvendigvis under tag, men så under plastik eller presenning. I dag står ballerne ofte på marken i regn og slud hvilket naturligvis ikke er fremmende for brændselskvaliteten.

8. Varmepriser

I det følgende vil det blive søgt undersøgt hvad priserne på varme produceret ved halmfyr af forskellige størrelse estimeres til i henholdsvis litteraturen, af kedelproducenter og ved egen beregning. Prisen pr kWh vil blive sammenlignet for anlæg med og uden rensningsteknologier til at fjerne partikelemission.

I en tekst udarbejdet ved Agrotech af Pedersen¹² er priser pr kWh beregnet for halmanlæg på hhv. 200 og 900 kWh hvor relevante data illustreret i henholdsvis Figur 1 og 2 nedenfor. Heraf ses at prisen for 200 kW anlæg estimeres til 59 øre pr kWh og 34 øre pr kWh for 900 kWh anlægget.

¹² J. Pedersen, Nabovarmeanlæg, AgroTech,
(https://www.landbrugsinfo.dk/Byggeri/Filer/FT_MASK_101_Nabovarme.pdf)

Startår	1999
Kedeltype	200 kW automatisk fyret halmfyr
Kedelfabrikat	Danstoker
Brændselsindføring	Stokerindføring (halm- bane, opriver og halm- indfødning er fra Linka)
Supplerende kedel	Oliefyr
Anlægspris (i 1999)	De to kedler, halmbane, pum- per, diverse rørinstallationer Kedelhus, elarbejde mv. Fjernvarmenet, varmemålere, indføringsskabe I alt ca.
	345.000 kr. 350.000 kr. 220.000 kr. 915.000 kr.
Tilskud	ca. 170.000 kr.
Brændsel	Hvedehalm, rapshalm mv.
Brændselsforbrug	150 tons eller ca. 300 bigballe
Brændselspris	60 øre pr. kg
Kunder	Mindre produktionsvirksomhed Gammel, nedlagt skole Mindre ejendom
Hovedledning	400 meter
Afstand til fjerneste kunde	400 meter
Temperatur i fremløb	80 graders C
Vedligeholdelse	Omkring 5.000 kr. pr. år
Dagligt arbejdsforbrug	Ca. et kvarter
Varmepris	59 øre pr. kWh

Figur 1. Data angående varmepriser for 200 kW automatisk fyret halmfyr fra 'Nabovarmeanlæg',¹³

¹³ J. Pedersen, Nabovarmeanlæg, AgroTech, 2009

Startår		2008
Kedeltype		900 kW automatisk fyret halmfyr med halmbane og opriver
Kedelfabrikat		Linka
Brændselsindføring		Stokerindføring
Supplerende kedel		800 kW oliefyr fra Danstoker
Anlægsbudget	De to kedler, halmbane, pumper, diverse rørinstallationer	1.800.000 kr.
	Kedelhus mv.	1.100.000 kr.
	Fjernvarmenet, varmemålere, indføringsskabe	3.800.000 kr.
	Projektering	500.000 kr.
	Uforudsete udgifter - ca.	750.000 kr.
	Budgetoverskridelse	2.500.000 kr.
	I alt	10.450.000 kr.
Tilskud		750.000 fra EU's Landdistriktsprogram
Brændsel		Hvedehalm
Brændselsforbrug		Anslået ca. 1.400-1.500 tons
Brændselspris		55 øre pr. kg
Antal kunder	Boliger	ca. 150
	Andet	To skoler, en kirke
Hovedledning		3,5 km
Afstand til fjerneste kunde		1,5 km
Temperatur i fremløb		ca. 90 graders C
Vedligeholdelse		Intet endnu
Varmepris	Effektbidrag	4.100 kr. for areal op til 100 m ² 4.800 kr. for areal op til 125 m ² 5.400 kr. for areal op til 150 m ² Areal >150 m ² + 20 kr. pr. m ²
	Administration	1.000 kr. pr. år
	Forbrug	340 kr. pr. MWh

Figur 2. Data til varmepriser for 900 kW automatisk fyret halmfyr fra 'Nabovarmeanlæg'¹⁴

¹⁴ J. Pedersen, Nabovarmeanlæg, AgroTech, 2009

Ved Teknologisk Institut er foretaget beregninger på to anlæg (2017) som illustreret nedenfor. Anlæggenes størrelser er henholdsvis 300 og 1000 kW. Det antages at de kører 8 h i døgnet i gennemsnit og på baggrund af dette er antal kWh der produceres pr år beregnet. I øverste gule dele, er beregnet prisen pr kWh hvis man blot ser på halmpris, i forhold til brændværdi og en virkningsgrad på 85%. I den grønne del af figuren er prisen pr kWh beregnet hvor der tages højde for indkøb af anlæg og forventet afskrivning på 20 år samt installation etc. og vedligeholdelse. I de røde felter er beregnet pris pr kWh hvis der inkluderes henholdsvis en cyklon eller elektrofilter inklusiv vedligeholdelse/udskiftning i løbet af de 20 år anlægget forventes at holde.

Størrelse MW	300	1000
Tid pr dag h	8	8
KWh pr år	876000	2920000
Brændværdi halm kJ/ton	14,5	14,5
Energi kWh ton halm	4028	4028
Virkningsgrad	85	85
Reel energi	3424	3424
Pris halm pr ton i kr	500	500
Pris for årligt forbrug pr halm	127935	426450
Pris pr kWh	0,15	0,15

Pris anlæg, installation, vedligeholdelse	750000	9000000
Forventet levetid 20 år, pris pr år	37500	450000
Pris anlæg og halm pr år	165435	876450
Pris pr kWh	0,19	0,30

Ekstra pris ved rensning cyklon	40000	40000
Pris rensning pr år	2000	2000
Pris anlæg, resning, halm	167435	878450
Pris pr kWh	0,19	0,30

Ekstra pris ved rensning elektrofilter	300000	300000
Pris rensning pr år+ vedligeholdelse	18000	18000
Pris anlæg, resning, halm	183435	894450
Pris pr kWh	0,21	0,31

Umiddelbart forekommer forskellen pr kWh varme ikke så dramatisk øget ved brug af cyklon eller filter. For køberen af anlægget forekommer det oftest som en større post. Hvis et anlæg i sig selv koster ca. 400.000 kr og en cyklon koster ca 40.000 kr forekommer den løsning som en prisforøgelse på 10%. Filterløsningen forekom-

mer langt dyre med en pris på ca. 300.000 kr resulterende i tæt på en fordobling på indkøb af et nyt anlæg. Filterløsningen er i praksis så dyr ved anskaffelse at det er svært at forestille sig den implementeret på mindre anlæg, hvorimod cyklonen er langt mere realistisk.

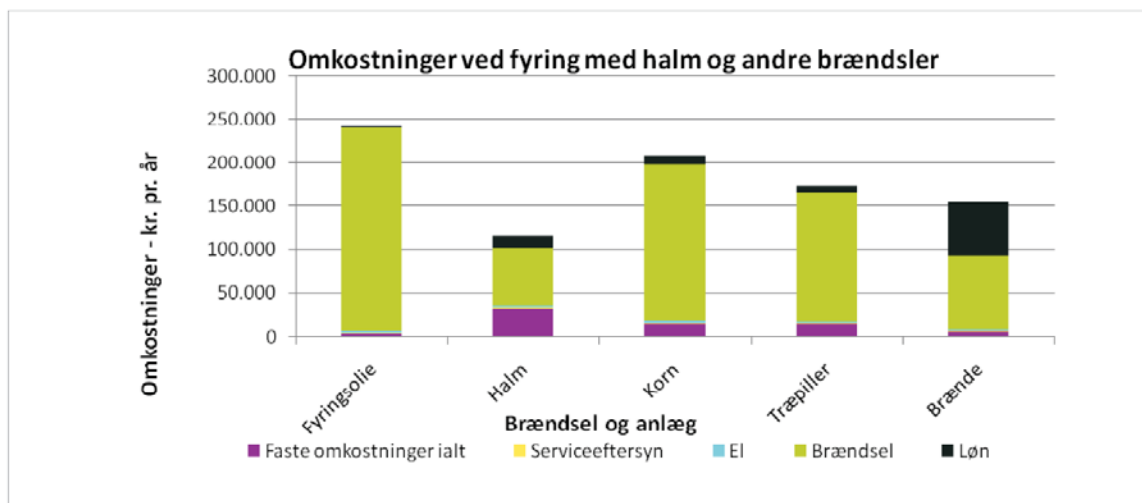
Andre steder har der fundet andre beregninger sted, blandt andet er økonomi i varmepriser ved forskellig fyring til sammenligning er beregnet i en ældre præsentation givet af Teknologisk Institut. Disse er anført nedenfor for små enheder:

- Elvarme (privat): Ca. 157 øre/kWh
- Oliefyr (privat): Ca. 96 øre/kWh
- Træpillefyr (privat): Ca. 52 øre/kWh
- Brændefyr (privat): Ca. 40 øre/kWh
- Kornfyr (privat): Ca. 28 øre/kWh
- Halmfyr (privat): Ca. 18 øre/kWh

Som så mange andre steder i litteraturen, er der ikke beskrivelse af hvorledes priserne er beregnet og de må derfor sammenlignes internt for at se forskelle i forskellige fyringsmetoder, men kan som sådan ikke tages som absolut mål der kan sammenlignes 1:1 med de nye beregninger. Formentlig er beregningen foretaget udelukkende baseret på brændselspris uden højdetagen for virkningsgrader og udgifter for anlæg.

I en anden sammenligning af forskellige brændsler fra 'Halmfyr'¹⁵ udarbejdet ved Agrotech ses tilsvarende en sammenligning af priser for opvarmning med forskellige kilder. Her er taget højde for faste omkostninger, løn, el, brændsel og service men beregningsmetoden er ikke yderligere specificeret.

¹⁵ Halmfyr, faktablad, december 2008, Agrotech
(https://www.landbrugsinfo.dk/Byggeri/Filer/Halmfyr_faktablad.pdf)



Figuren viser de årlige omkostninger og deres fordeling ved fyring med forskellige brændsler. Forbruget af fyringsolie er 35.000 liter (3.000 liter til privat og 32.000 liter til erhvervsmæssigt formål). De anvendte mængder biobrændsler ækvivalerer energiindholdet i den anvendte mængde fyringsolie. Brændselspriserne er følgende: Fyringsolie (10,13 kr. pr. liter (privat), 6,25 kr. pr. liter (erhverv)), Halm (0,55 kr. pr. kg ekskl. moms), Korn (1,60 kr. pr. kg ekskl. moms), Træpiller (1,75 kr. pr. kg ekskl. moms) og Brænde (400 kr. pr. rm ekskl. moms). (Priser oktober 2008). Der indgår ikke skat i ovennævnte beregninger.

Figur 3. Sammenligning af omkostning per år ved fyring i mindre enheder ved brug af forskellige brændsler fra 'Halmfyr'¹⁶

En sammenligning med disse data og data ovenfor viser absolutte forskelle i forholdene mellem priserne fra de enkelte kilder, men stemmer relativt godt overens, betragtes kun udgiften fra selve brændselsdelen. Dette er blot få eksempler, der illustrerer, at det er vanskeligt at skaffe sig absolutte sikre tal, og vanskeligt at sammenligne data i litteraturen. Ligeledes er der stor forskel på typen af kedel, vedligeholdelsesmængde og størrelsen af anlægget.

Fra flere ejere af halmfyr, der sælger varme ved nabosalg er salgsprisen blevet oplyst til ca. 15.000-17.000 kr pr husstand pr år. Dette er fastsat således at det svare til 75% af husejernes tidligere pris på olie/gas til opvarming. Ved omregning til pris pr kWh baseret på et gennemsnitsvarmeforbrug, fås en salgspris på 1,25 kr. Dette kan naturligvis ikke sammenlignes direkte med produktionsprisen, grundet et ønske om en indtjening ved salget fra kedelejerens synspunkt.

Sammenfatning

De forskellige bud på pris per produceret kWh varierer signifikant, dels for kedler af forskellige størrelser og dels fra tal fra forskellige kilder. Et problem er, at det oftest ikke er beskrevet på hvilket grundlag beregningen/estimatet er lavet. Forskellen på hvor meget dyrere det bliver pr kWh at rense for partikler med cyklon eller andre teknikker er ligeledes voldsomt afhængig af om der f.eks. blot skal ses på prisen af

¹⁶ Halmfyr, faktablad, december 2008, AgroTech

en ny kedel, så den resterende del af installation, hus, skorsten etc kan betragtes som værende afskrevet ved et allerede tidligere anlæg eller om dette skal inkluderes i beregningen. Den billigste og nemmeste implementerbare løsning anses for brug af cyklon, der i runde tal vil forøge prisen pr kWh med blot et par procent, men samtidig må det bemærkes at indkøbspris af anlægget er ca. 10% dyrere hvis en cyklon skal inkluderes.

9. Halmfyr vs. træpille- og flisfyr

Som en del af opgaven har MST bedt om en vurdering af om fortsat undtagelse fra miljøkravene vil medføre en unfair konkurrence i forhold til for eksempel flis og pillefyr.

Problemstillingen blev blandt andet forelagt Faust som producerer alle de nævnte former for kedeltyper. Ifølge Faust er det ikke et emne der fylder når de bevæger sig rundt blandt kolleger og kunder. Der er tilsyneladende en accept af at der er forskellige forhold der gør sig gældende og at de tre anlægstyper er så forskellige at de ikke umiddelbart er i konkurrence med hinanden.

Træpille og flisanlæg er typisk kun relevante til gårde uden dyr hhv. gårde med skov. Hvis der er dyr i staldene og halm på marken er et halmfyr som regel klar førsteprioritet. Faust mener at driftssikkerhed er en væsentlig del af bondens prioritet. Et manuelt fyret halmfyr med en stor akkumuleringsstank er det tætteste man kan komme på garanti for varme i stalden. Der skal ikke mangle varme ret længe i en stald før det bliver kritisk for dyrene.

Naturligvis vil det påvirke salget af træpille og flisanlæg hvis antallet af solgte halmkedler begrænses men det vil meget sandsynligt ikke ske i forholdet 1:1 da et vist antal af de købere af halmfyr der vil falde fra, i stedet vil overveje fossile energikilder som eksempelvis olie- og gasfyr.

10. Perspektivering

Undersøgelsen i denne rapport er den første samlede udredning om halmfyr, deres teknologi og emissioner i nyere tid.

I takt med at arbejdet skred frem, er det blevet tydeligt at støvemission er en problematisk parameter som grundlag for regulering af halmfyr. Det skyldes at emissionsniveauet er påvirket af først og fremmest halmens indhold af salte, måske helt op imod 80 %. Resten er sod, aske og delvis forkullet halm, hvor fyrets luftsystem og styring spiller en rolle. Det kunne derfor være mere hensigtsmæssigt at benytte emission af CO evt suppleret med OGC som primær parameter(e), til at karakterisere halmfyrs forbrændingskvalitet, og som grundlag for national regulering.

Det er muligt at fjerne hovedparten af de store partikler ved hjælp af en cyklon, uden at det får afgørende indvirkning på anlægspris og driftsøkonomi. Små partikler forventes stadig at være en udfordring, der må arbejdes mere på begrænsning af.

Endelig gives der i rapporten forslag til at man vil kunne sænke den årlige emission ved krav om tildækket opbevaring af halm og ved krav om regelmæssig tvunget eftersyn af halmfyr. Denne effekt er dog endnu ikke dokumenteret ved forsøg i praksis med tilhørende målinger.

En anden tanke er, om det i fremtiden kunne være muligt at sikre mere brug af grå halm i forhold til gul halm. At omforme halm til piller, er et område der kan foretages yderligere undersøgelse på. Måske vil det ved passende udvaskning af halm inden presning til piller, være muligt at opnå mere ensartet kvalitet af brændslet med lavere tilstedeværelse af salte og derved en mere ensartet forbrænding med piller, med lavere partikelemissioner. Tilsvarende kunne halmbriketter være af relevans at overveje.

På den forbrændingsoptimerende side af problemstillingen, kunne muligt interessant udviklingsarbejde ligge i undersøgelserne af perspektiver for reduktion af emissioner ved at sikre at afbrændingen finder sted i en slags variabelt brændkammer.

Og i et lidt større perspektiv var det interessant med flere undersøgelser af hvordan saltpartikler opfører sig i nærmiljøet, saltpartiklernes levetid i atmosfæren og deres potentiale for fjerntransport.

Bilag 1: Undersøgelse af partikler ved afbrænding af gult halm

Formål

Formålet med det indledende eksperiment var, at afgøre hvor stor del af partiklerne fra halmfyr, der er vandopløselige og dermed relateret til salte.

Hypotese

Det er oplyst, at omkring 80% af partikler fra halmfyr forventes at være vandopløselige.

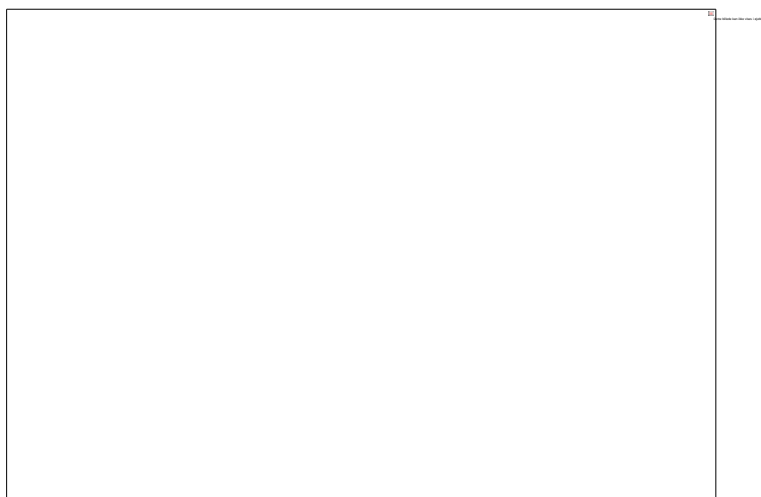
Det forventes at saltene primært er uorganiske og alkaliske.

Forsøgsbeskrivelse

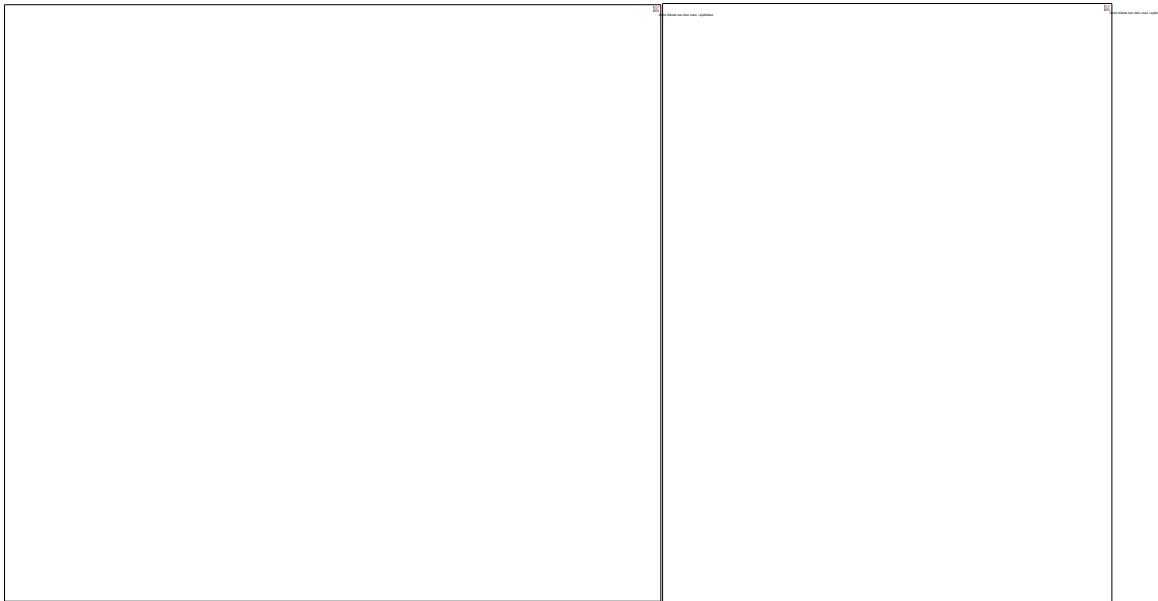
0,9879 g materiale blev afvejet og anbragt i filter, hvor det blev vasket med demineraliseret vand (se Figur 1).

Det blev observeret at filtratet i begyndelsen var kraftigt gult farvet og pH af de første 25 mL var betragtelig høj, nemlig 10. Efter vask med yderligere 50 mL var pH faldet til 8. Den høje pH værdi stemmer overens med en forventning om at der er alkaliske salte tilstede.

Der blev vasket med vand indtil filtratet var farveløst, svarende til et volumen på 125 mL. pH var på dette tidspunkt 7. Da pH værdien af det rene demineraliserede vand blev målt til 6, blev vaskningen fortsat indtil pH af filtratet var tilsvarende. Dette svarede til et totalt volumen på 150 mL vand (se Figur 2) blev brugt til at vaske/opløse (dele af) partiklerne.



Figur 1. Til venstre ses de grå partikler opsamlet på partikelfilter ved halmafbrænding, i midten ses 1 g af materialet under vask med vand

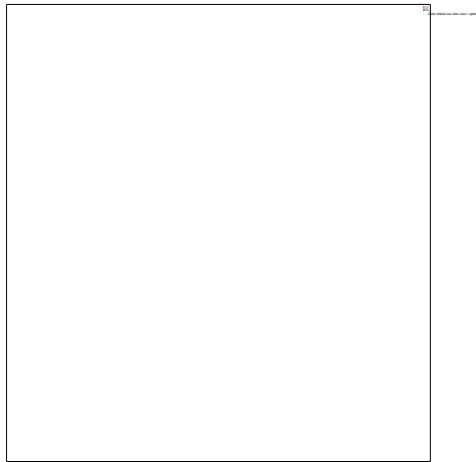


Figur 2. Filtratet var indledningsvist tydeligt gult farvet (venstre), og der observeredes at farven gradvis mindskes. Tilsvarende var pH i starten høj, 10, og aftog indtil den havde samme værdi som det demineraliserede vand, 6.

Et rent filter blev tilsvarende vasket med 150 mL vand, for at sikre at der derved ikke er vægttab fra filteret selv.

Begge filtre, det rene og det med partiklerne på, blev tørret i 50 timer ved stuetemperatur.

Den efterfølgende afvejning viste intet vægttab fra det rene filter. Filteret med partikler blev vejet og der var nu samlet 143,9 mg partikler tilbage (se Figur 3). Dette svarer til at 85% af partikelmassen er vandopløselig og er blevet fjernet ved vaskeproceduren. Samtidig bemærkes, at farven af partiklerne efter vask er mørkere grå, end den lysegrå farve der ses af de rene partikler. Det skyldes formodentlig at resten overvejende er carbon baseret (sod).



Figur 3. Efter vask og tørring er den uopløselige del af partiklerne langt mørkere grå end den lysegrå farve materialet har før vask.

Konklusion

Det målte vægttab på 85% af partikelmassen stemmer overens med de ventede 80%, og forskelle kan forklares ved variation i vaskemetodik. Dette foreslår stor tilstedeværelse af uorganiske salte.

Luftemissioner fra halmfyr

Formålet med projektet er at sammenfatte eksisterende viden om partikelemissioner fra halmfyr under 1 MW og tekniske muligheder for at reducere disse udledninger.

Der er foretaget en screening af tidligere gennemførte målinger på halmfyr, givet et estimat af de samlede emissioner samt givet en status for potentialet for at reducere partikeludledningen fra halmfyr med primære og sekundære renses- teknologier. Endelig gennemgås grænseværdier for halm- eller biomassefyrede anlæg fra udvalgte lande.



Miljøstyrelsen
Strandgade 29
1401 København K

www.mst.dk