

# Final report

## 1.1 Project details

<b>Project title</b>	Udvikling af elektrofilter til portionsfyrede halmkedler / Development of electrostatic precipitators for batch-fired straw boilers
<b>Project identification (program abbrev. and file)</b>	EUDP, Journalnr.: 64017-05121
<b>Name of the programme which has funded the project</b>	Energiteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (EUDP)
<b>Project managing company/institution (name and address)</b>	Maskinfabrikken REKA A/S Vestvej 7, 9600 Aars
<b>Project partners</b>	Aarhus Universitet Institut for Ingeniørvidenskab Forskningscenter Foulum Blichers Allé 20, Postboks 50 8830 Tjele  Alcon A/S Ole Rømers Vej 15 8670 Låsby
<b>CVR</b> (central business register)	CVR-nummer: 88113217
<b>Date for submission</b>	20 februar 2020

## 1.2 Short description of project objective and results

The aim was to develop an efficient solution of cleaning of the flue gas from batch-fired straw boilers. Focus have been on development and optimization of an electrostatic precipitator for a 100-200 kW boiler.

In a batch fired straw boilers periodic firing is used. At start-up the filter will be cold, and moist flue gas is lead into the filter. Condensation on the electrical insulators will lead to electrical shorting and disturb efficient operation. In this project a technique and control set-up to ensure that the temperature of the insulators and other sensitive parts of the filter will have a temperature above the dew point of the flue gas have been developed. Thereby steady operation of the filter can be achieved through the entire combustion period.

For a set-up with the 150 kW manual batch fired straw boiler results show a filter efficiency of about 95 percent. The particulate matter (dust) in the cleaned flue gas was in most cases below 10 mg Nm<sup>-3</sup>.

Målet har været at udvikle en effektiv løsning til rensning af røggas fra portionsfyrede halmkedler. Fokus har været på udvikling og optimering af et elektrofilter til 100-200kW halmkedler.

Ved brug af portionsfyrede kedler anvendes periodisk fyring. Ved opstart vil kedlen og filteret være kold, og fugtig røggas ledes ind i filteret. Røggassen vil derfor kondensere på de elektriske isolatorer, hvilket vil medføre elektriske kortslutninger, som vil forhindre effektiv drift af filteret. I projektet er udviklet og dokumenteret en teknik og styringsautomatik som sikrer, at isolatorerne har en temperatur over røggassens dugpunkt, og der opnås en stabil drift af filteret igennem hele forbrændingsperioden.

For en manuelt fyret 150 kW halmkedel viser resultaterne en filtereffektivitet på ca. 95 procent. Partikelemissionen (støv) i den rensede røggas var i de fleste tilfælde under 10 mg pr Nm<sup>3</sup>.

### 1.3 Executive summary

Projektets formål har været at udvikle et prisbilligt og driftssikkert røggasfilter, beregnet for mindre portionsfyrede halmkedler. Ved forbrænding af biomasse og i særlig grad halm emitteres store mængder af meget finkornet støv fra skorstenen. Støvet er så finkornet, at det ikke kan udskilles med en cyklon. Ved store halmfyrede anlæg benyttes traditionelt posefiltre til at rense røgen for støv. Ved mindre halmfyrede kedler er der i Danmark p.t. ingen grænseværdier for støvemission, men det forventes, at grænseværdierne opstillet i den fælles europæiske standard EN 303-5 også skal implementeres for mindre halmfyrede kedler i Danmark. Grænseværdien for støvemission vil herefter være 60 mg støv pr. normal-m<sup>3</sup> røggas for portionsfyrede biomassekedler. Med traditionel fyringsteknologi til fyring med halm kan denne grænseværdi kun overholdes, hvis der benyttes et røggasfilter. I dette projekt er udviklet et røggasfilter til mindre halmkedler, baseret på elektrofilter princippet. Filteret er relativt enkelt opbygget. Det yder et meget lavt tryktab og energiforbruget ved drift af filteret er lavt.

Projektet er et samarbejdsprojekt med deltagelse af Maskinfabrikken REKA A/S, Alcon A/S og Aarhus Universitet, Institut for Ingeniørvidenskab. REKA og Aarhus Universitet har i tidligere samarbejdsprojekter udviklet elektrofiltre til kontinuerligt fyrede biomassekedler, mens Alcon producerer og markedsfører portionsfyrede halmkedler.

Projektet har været faseopdelt og med en række arbejdsopgaver. Projektets første fase, var indledende pilotforsøg, som skulle afklare, om elektrofilter teknologien med udgangspunkt i kendt teknik kunne fungere i forbindelse med rensning af røg fra en portionsfyret halmkedel. Resultaterne opnået i første fase viste, at der kunne sikres en virkningsgrad på over 90%, og at der ikke var problemer med at overholde EN 303-5, klasse 5 grænseværdien på 60 mg støv pr. normal-m<sup>3</sup> røggas for manuelt fyrede biomassekedler. De indledende pilotforsøg viste ligeledes, at det ville være muligt at opnå stabil drift af et elektrofilter i en komplet forbrændingscyklus for den portionsfyrede Alcon halmkedel.

I anden fase er udviklet, optimeret og dokumenteret et elektrofilter til en 150 kW Alcon portionsfyret halmkedel. En væsentlig del i projektet har været at udvikle et system, som sikrer at driftsproblemer under opstart med kold røggas i elektrofilteret undgås. Det udviklede elektrofilter kan nu sikre rensning af røgen i hele forbrændingsperioden, inklusiv opstart. I projektet er udviklet og dokumenteret en teknik og styringsautomatik, som sikrer, at isolatorerne har en temperatur over røggassens dugpunkt, og at der opnås en stabil drift af filteret igennem hele forbrændingsperioden. En isolatortemperatur på 90°C kan sikre, at der ikke opstår driftsproblemer på grund af kondens og elektriske kortslutninger i filteret.

Ved fyring med hvedehalmen kan der opnås en rensningseffektivitet på ca. 95 procent. Partikelemissionen (støv) i den rensede røggas var i de fleste tilfælde under 10 mg støv pr. normal-m<sup>3</sup> røggas. Støvemissionen varierer dog lidt afhængig af halmkvaliteten, men der var i ingen tilfælde problemer med at overholde EN 303-5, klasse 5 grænseværdierne.

Det totale energiforbrug til røggasrensningssprocessen, - opvarmning af isolatorer samt drift af elektrofilter -, udgør kun 0,6 procent af energimængden produceret af halmkedlen.

Sidste del af projektet har omfattet en langtidstest af filteret med henblik på teste og dokumentere anlæggets driftssikkerhed, komponenternes holdbarhed og renseseffekten gennem en længere periode under praksisnære driftsbetingelse. Filtervirkningsgraden har kunne opretholdes, og der blev ikke konstateret problemer med anlæggets driftssikkerhed eller holdbarheden af enkeltkomponenter.

#### **1.4 Project objectives**

Formålet med projektet har været at udvikle en effektiv og økonomisk bærbar løsning til rensning af røggas fra portionsfyrede halmkedler.

I dette projekt er der fokuseret på udvikling og optimering af en elektrofilter løsning, således at der kan tilbydes et pålideligt elektrofilter også til de portionsfyrede halmkedler. Fokus har været på kedler med en effekt på 100-200 kW. Filteret skal sikre, at grænseværdier for støvemission kan overholdes.

I projekts indledende fase var det målet at klarlægge, om det ville være realistisk at anvende elektrofilterteknologien til rensning af røg fra portionsfyrede halmkedler. Dette skulle belyses ved forsøg med en simpel opvarmning af røggassen før opstart af en forbrændingsperiode med henblik på at undgå problemer med fugt i filter og deraf følgende driftsproblemer. De indledende forsøg viste gode resultater, og forløb som forventet, hvorfor projektet i henhold til projektbeskrivelsen blev videreført med udvikling af en elektrofilterløsning specifikt til portionsfyrede halmkedler.

Forskellige opvarmningsmetoder, filterudførelse og styringsmetoder er herefter blevet testet. Det er lykkedes at udvikle et elektrofilter, som kan sikre, at der opnås lav støvemission, og det er muligt at overholde gældende grænseværdier. Afslutningsvis var målet at dokumentere anlæggets funktion og driftssikkerhed ved et halvt års langtidstest. Testen viste stabil drift af anlægget og levede fuldt ud op til forventningerne.

Udviklingen af et effektivt og billigt røggasfilter til små biomassefyrede kedler er afgørende for brugen af disse kedler fremover - både i Danmark og i resten af Europa. Der er et stort overskud af halm i hele Europa. Hvis halmen kan bruges i disse kedler, vil der blive opnået reducerede CO<sub>2</sub>-emissioner, og halmen, - en vedvarende energikilde -, kan erstatte fossile brændstoffer. Projektets mål med at udvikle og dokumentere et røgfilter for disse kedler er nået, og det overordnede mål med projektet, som har været at bidrage til at opfylde det danske politiske mål om 100 procent vedvarende energi inden 2050, er således opfyldt.

Udviklingsarbejdet, konstruktion af anlæg og test var mere tidskrævende end forudset, hvorfor en 6 måneders forlængelse af projektet blev bevilget.

#### **1.5 Project results and dissemination of results**

Projektet har været faseopdelt og med en række arbejdsplaner. Arbejdsplan 1 har omfattet projektledelse og administration mens den tekniske udvikling, test og dokumentation af anlæggets egenskaber har været opdelt i 4 arbejdsplaner. Arbejdsplan 2, svarende til projektets første fase, var indledende pilotforsøg, som skulle afklare, om elektrofilter teknologien med udgangspunkt i kendt teknik udviklet af bl.a. firmaet Reka og AU, Institut for Ingeniørvidenskab vil kunne fungere i forbindelse med rensning af røg fra en portionsfyret halmkedel. Opnåelse af tilfredsstillende resultater i arbejdsplan 2 var en forudsætning for det videre arbejde i arbejdsplaner 3 - 5.

På baggrund af fuldt tilfredsstillende resultaterne i arbejdsplan 2 blev der i arbejdsplan 3 fremstillet et nyt forsøgs-elektrofilter specielt tilpasset en Alcon portionsfyret halmkedel. Arbejdet i denne arbejdsplan har været fokuseret på design og konstruktion af et forsøgsanlæg. Anlægget blev opbygget således, at forskellige metoder og systemer til at sikre stabil drift uden problemer med kondens, elektrisk kortslutning mm. kunne testes.

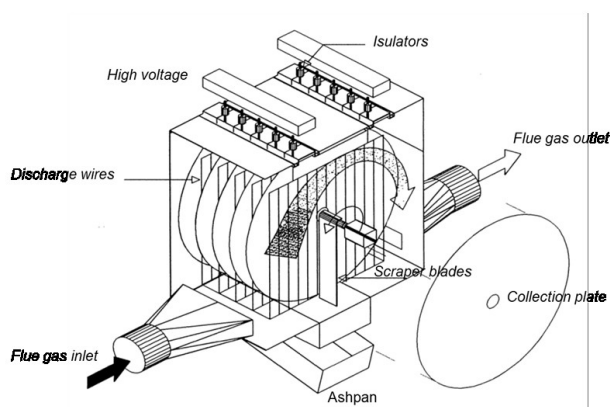
I arbejdsplan 4 er filter og styringsautomatik udviklet, optimeret og testet under forskellige driftsforhold. Forskellige teknikker til opvarmning for at undgå kondens og elektrisk kortslutning ved opstart med koldt filter er testet og evalueret. Herunder metoder med opvarmning

af hele filterhuset samt metoder hvor kun isolatorer for tilslutning af filtrets højspænding holdes varme.

Arbejdspakke 5 har omfattet en langtidstest af det optimerede elektrofilter med tilhørende styringsautomatik. Under denne test er der forsøgt med både daglig fyring i kedlen i den kolde tid og længere stilstandsperioder ved varmere vejrforhold, svarende til hvad der typisk vil ske i praksis. Gennem perioden med langtidstest er jævnlige foretagne målinger af filtervirkningsgraden for at se, om denne eventuelt ville ændre sig over tid.

## Arbejdspakke 2

I tidligere forskningsprojekter med deltagelse af bl.a. Aarhus Universitet, Institut for Ingeniørvidenskab og Maskinfabrikken Reka A/S er der udviklet elektrofiltere til automatisk fyrede halmkedler med kontinuerlig drift. Princippet i disse filtre er specielt set i forhold til andre elektrofiltere, idet filtrene er med cirkulære roterende opsamlingsplader. I stedet for et hammersystem, hvor støvet bankes løs og falder af opsamlingspladerne, fjernes de opsamlede støvpartikler ved hjælp af tynde skraber. Figur 1 viser funktionsprincippet i filteret.



Figur 1: Principskitse som viser den grundlæggende opbygning af elektrofilteret.

I dette projekt er udviklet videre på dette funktionsprincip, specielt med hensyn til styringsautomatik, opvarmning, isolering mm. for at kunne anvende filtret til portionsfyrede halmkedler. Ved disse kedler er der række ekstra udfordringer, herunder varierende belastning, og i særlig grad kold og fugtig røggas i forbindelse med de mange opstarter med kold kedel, som traditionelt forekommer.

I arbejdsopgave 2 byggede REKA et elektrofilter til en kedel på 100-150 kW. Elektrofilteret blev opbygget med 6 stk. Ø 900 mm skiver med en indbyrdes afstand på 120 mm. Dette filter blev benyttet til de indledende målinger svarende til projektets fase 1, hvor det skulle belyses, om det ville være realistisk at få teknologien til at fungere tilfredsstillende til rensning af røg fra portionsfyrede halmkedler.

Alcon stillede en 150 kW portionsfyret halmkedel til rådighed og leverede samtidig et simpelt pladehus til filteret - en container - med tilslutning af skorsten til afgangsrøret fra filteret.



*Figur 2: Container med forsøgsanlæg opstillet ved AU Foulums biomassefyrlaboratorium. Anlægget består af Alcon halmkedel og første udgave af elektrofilteret.*

Som en simpel form for opvarmning af filteret forud for opstart af halmkedel, blev monteret 6 stk. 2000 W varmepistoler på rørstudse på siden af røgrøret fra kedlen ved indgangen til filteret. Ved drift af disse 6 varmepistoler i ca. halv time forud for indfyringen og opstart af halmfyret var det som forventet muligt at opnå en tilstrækkelig temperatur i filteret, således at kondens kunne undgås, også ved opstart når der tændes op i kedlen.

Der blev registreret mindre problemer med at få elektrofilteret til at virke stabilt på grund af varierende/dårlig forbrændingskvalitet, som traditionelt ses ved portionsfyrede kedler i forhold til automatisk kontinuerligt fyrede kedler. Problemerne er løst ved justeringer af anlæggets styringsautomatik, og det var muligt at få filteret til at fungere tilfredsstillende.

De konstaterede tekniske indkøringsproblemer blev således løst på en tilfredsstillende måde. Virkningsgraden blev bestemt ved samtidige målinger af støvemissionen i røggassen før og efter elektrofilteret. Der var i første fase tilstræbt en filtervirkningsgrad på mindst 90 procent, svarende til at anlægget kan overholde græseværdien på 60 pr. normal-m<sup>3</sup> røggas ved et støvindhold på 600 mg pr. normal-m<sup>3</sup> i den ikke rensede røggas fra kedlen.

En forudsætning for at fortsætte udviklingsarbejdet efter projektets første fase var således også, at filteret kunne fungere stabilt, og virkningsgraden i gennemsnit skulle være over 90 procent ved måling i tre på hinanden følgende test ved en normal forbrænding af én halm-balle. Måleresultater fra testene er vist i tabellerne 1-3.

<b>DATO:</b>	25-05-2018	<b>KEDEL:</b>	Alcon										
<b>Barometer:</b>	1028 mbar	<b>BRÆNDSEL:</b>	Grå hvede 2017										
<b>MÅLEVÆRDIER - RÅGAS</b>													
					<b>STØVEMISSION</b>		<b>RENGAS</b>			<b>STØVEMISSION</b>			
<b>Start kl.:</b>	<b>Stop kl.:</b>	<b>Gasmåler</b>	<b>O2 (ABB)</b>	<b>Filter</b>	<b>mg/nm3</b>	<b>mg/nm3</b>	<b>Gasmåler</b>	<b>O2 (Sybron)</b>	<b>Filter</b>	<b>mg/nm3</b>	<b>mg/nm3</b>	<b>Effekt</b>	
		m3	%	mg	(målt)	(10% ilt)	m3	%	mg	(målt)	(10% ilt)	%	
09:18	09:53	0.701	8.4	119.9	178	156	1.157	11.5	20.8	19	22	86.1	
10:39	11:11	0.672	8.2	119.5	185	159	1.047	9.5	47	47	45	71.9	
12:00	12:35	0.632	8.2	124.9	206	177	1.016	9.3	4.2	4	4	97.7	

Tabel 1. Emissionsmålinger ved fyring med hvedehalm fra 2017.

<b>DATO:</b>	28-05-2018	<b>KEDEL:</b>	Alcon										
<b>Barometer:</b>	1025 mbar	<b>BRÆNDSEL:</b>	Lys hvede 2015										
<b>MÅLEVÆRDIER - RÅGAS</b>													
					<b>STØVEMISSION</b>		<b>RENGAS</b>			<b>STØVEMISSION</b>			
<b>Start kl.:</b>	<b>Stop kl.:</b>	<b>Gasmåler</b>	<b>O2 (ABB)</b>	<b>Filter</b>	<b>mg/nm3</b>	<b>mg/nm3</b>	<b>Gasmåler</b>	<b>O2 (Sybron)</b>	<b>Filter</b>	<b>mg/nm3</b>	<b>mg/nm3</b>	<b>Effekt</b>	
		m3	%	mg	(målt)	(10% ilt)	m3	%	mg	(målt)	(10% ilt)	%	
09:46	10:24	0.72	7.7	159.8	232	192	1.257	8.8	12.2	10	9	95.2	
11:03	11:35	0.629	8.2	171.8	285	245	1.022	9.2	5.7	6	5	97.8	
12:27	13:03	0.647	7.3	229.9	371	299	1.072	8.1	46.6	45	39	87.1	

Tabel 2. Emissionsmålinger ved fyring med hvedehalm fra 2015.

Af resultaterne vist i tabel 1 og 2 fremgår det at renseeffektiviteten var noget varierende. Den relative lave renseeffekt ved målingen kl 10:39 i tabel 1 og målingen kl 12:47 i tabel 2, skyldtes, at der kan være problemer med udslip af støv og dermed dårlig renseeffekt når udladertråde og filterhus automatisk renses for støvbelægninger ved hjælp af chock blasterne, hvor der hvirvles en stor mængde støv op, som føres med røggassen ud af filteret. For undgå eller minimere problemet med udslip af støv under den automatiske rensning af udladertråde mm. blev der gennemført forsøg med reduceret tryk til chock blasterne (tryk reduceret fra 6 til 4 bar). Resultater fra disse forsøg fremgår af tabel 3.

<b>DATO:</b>	12-06-2018	<b>KEDEL:</b>	Alcon										
<b>Barometer:</b>	1009 mbar	<b>BRÆNDESEL:</b>	Lys hvede 2015	<b>Bem.:</b>	Røgt. 200 / 160								
<b>MÅLEVÆRDIER - RÅGAS STØVEMISSION RENGAS STØVEMISSION</b>													
<b>Start kl.:</b>	<b>Stop kl.:</b>	<b>Gasmåler</b>	<b>O2 (ABB)</b>	<b>Filter</b>	<b>mg/nm3</b>	<b>mg/nm3</b>	<b>Gasmåler</b>	<b>O2 (Sybron)</b>	<b>Filter</b>	<b>mg/nm3</b>	<b>mg/nm3</b>	<b>Effekt</b>	
		m3	%	mg	(målt)	(10% itt)	m3	%	mg	(målt)	(10% itt)	%	
09:40	10:17	0.653	7.7	149.6	243	202	1.109	8.6	9.1	9	8	96.2	
10:54	11:30	0.631	7.6	202	340	279	1.068	8.8	6	6	5	98.1	
12:44	13:20	0.541	6.7	352.8	692	531	1.033	7.4	31	32	26	95.2	

Tabel 3. Emissionsmålinger ved fyring med hvedehalm fra 2015. Automatisk rensning af udladertråde og filterhus med reduceret lufttryk.

Automatisk rensning af udladertråde og filterhus forekom ved målingen kl 10:54. Det ses, at der generelt kunne opnås en god rensning af røgen også ved automatisk rensning af filter med det lavere lufttryk til chock blasterne. Der blev ikke konstateret problemer med at holde udladertråde og filterhus fri for skadelige støvbelægnings ved det reducerede tryk.

Resultaterne opnået i arbejdsplan 2, projektets fase 1, viste således, at der kunne sikres en virkningsgrad over 90% og at der ikke var problemer med at overholde EN 303-5, klasse 5 grænseværdien på 60 mg støv pr. normal-m<sup>3</sup> røggas for manuelt fyrede biomasse kedler. Der kunne opnås stabil drift af elektrofilteret i en komplet forbrændingscyklus for den portionsfyrede Alcon halmkedel.

### Arbejdsplan 3

Har omhandlet udvikling, konstruktion og optimering af et elektrofilter inklusiv styringsautomatik, tilpasset en portionsfyret Alcon halmkedel. Arbejdet har omfattet udvikling og test af en række forskellige metoder og systemer til at sikre stabil drift af elektrofilteret i hele forbrændingsperioden, herunder opstart med koldt filter.

De første forsøg havde fokus på at opvarme filterhuset ved hjælp af centralvarmevandet - vand fra akkumuleringstank - før opstart af kedel. Det var forventet at man herved kunne undgå kondensproblemer ved opstart. Der blev påbygget vandkappe i bunden af støvtrågen, således at filteret kunne opvarmes med varmt vand. Vandkappen blev forsynet med overtryksventiler, så filteret kunne holde til at blive opvarmet, også hvis der eventuelt skulle blive lukket for vandet. Isolatorer i filteret blev monteret lodrette, og der blev etableret en udvendig højspændingsforbindelse mellem de to halvdele af filteret. Endvidere blev filterhuset ekstra isoleret med 100mm mineraluld.

Forsøgene med opvarmning af filterhusets støvtragt med vand fra centralvarme eller akkumuleringstank viste imidlertid, at det var meget vanskeligt at opnå tilstrækkelig opvarmning af filterhus og isolatorer, således at kondens og elektriske overslag kunne undgås. Der blev ikke opnået tilfredsstillende resultater ved dette system, hvorfor det blev valgt at arbejde videre med andre metoder til opvarmning og sikring af stabil drift.

Driftsforstyrrelser og elektriske overslag ved opstart med koldt anlæg skyldes i langt de fleste tilfælde kondens på isolatorerne, således at højspændingen på udladertrådene ledes via fugt på isolatorerne til filterhuset og de øvrige dele af anlægget. Derfor blev der arbejdet videre med at udvikle et system til særskilt opvarmning af isolatorerne.

Der er herunder gennemført målinger vedrørende varmeledningsevnen i de eksisterende isolatorer, og det viste, at man kan nøjes med at opvarme isolatorerne udvendig fra med et elektrisk varmelegeme.

Forsøg med forskellig temperatur på isolatorerne før opstart af kedel, og inden at røgen ledes gennem filteret, viste, at en isolator temperatur på 78-80°C normalt kan sikre, at der ikke opstår problemer med kondens i filteret. Figur 3 viser isolator med elektrisk varmelegeme.





Figur 3: Elektrisk varmelegeme limet fast på flangen på en isolator. Varmelegemet er placeret på den udvendige del af isolatoren.

Ved opstart med en helt kold kedel og hvor kedlens røgrør er ny-rensede, skal temperaturen dog være lidt højere for at undgå kondens. Ved en isolatortemperatur på 90°C blev der i ingen tilfælde konstateret driftsforstyrrelser. Der er således opnået fuldt tilfredsstillende resultater ved opvarmning af isolatorerne med elektriske varmelegemer, hvorfor dette system blev valgt til den endelige design og konstruktion af elektrofilteret.

Som en yderligere sikkerhed og mulighed for undgå problemer med kold og fugtig røggas i filteret er der designet og konstrueret et bypass system. Der er således monteret et ekstra røgrør forbi filteret, som er forbundet til motorstyrede bypass-spjæld, tilsluttet kedlens røggas afgangsrør. Herved er det muligt at lede røgen uden om filteret. Bypass systemet er vist i figur 4. Via en elektronisk temperaturregulator i en kontrolboks sker betjeningen af bypass-spjældet automatisk. Automatikken er opbygget således, at bypass systemet træder i funktion ved en forudindstillet minimum isolatortemperaturer samt ved stilstand af kedlen. Bypass-spjældene kan desuden styres manuelt.



Figur 4. By-pass rør og spjæld monteret ovenover filteret. På filteret er monteret en styreboks for varmelegemerne på isolatorer samt bypass spjældene.



## Arbejdspakke 4

I arbejdsopgave 4 er filteret videreudviklet og optimeret. Styringsautomatikken til både den portionsfyrede Alcon kedel og elektrofilteret er løbende ændret og optimeret med henblik på at sikre stabil drift af anlægget med maksimal renseseffekt. Der er opnået fuldt tilfredsstillende driftsstabilitet under varierende driftsbetingelser ved fyring med halm af varierende kvalitet.

El-forbruget til opvarmning af isolatorerne er minimalt set i forhold til anlæggets varmeydelse. I alt anvendes 0,5 kWh til en opvarmning af isolatorer forud for en fyringsperiode i kedlen. El-forbruget til elektrofilteret under drift er ligeledes målt, og var i gennemsnit 3,5 kWh per indfyret halmballe. Forbrændingen af en halmballe svarer til en varme energiproduktion på ca. 700 kWh. Det totale energi forbrug til røggrensingsprocessen, - opvarmning af isolatorer samt drift af elektrofilter -, udgør således kun 0,6 procent af kedeffecten.

Renseeffekten med det optimerede anlæg er bestemt ved emissionsmålinger ved fyring med halm af forskellig kvalitet. I tabel 4 er vist resultater fra forsøg med halm fra høsten 2017, mens tabel 5 viser resultater fra forsøg med halm fra høsten 2019.

DATO: 13-09-2019		KEDEL: Alcon - PLC styring										
Barometer: 1026 mbar		BRÆNDSEL: Hvede 2017		Bem.: Skudfrekvens: 30 min; 28-30 kV, 12-16 mA								
MALEVÆRDIER - RAGAS					STØVEMISSION		RENGAS			STØVEMISSION		
Start kl.:	Stop kl.:	Gasmåler	O2 (ABB)	Filter	mg/nm <sup>3</sup>	mg/nm <sup>3</sup>	Gasmåler	O2 (Sybron)	Filter	mg/nm <sup>3</sup>	mg/nm <sup>3</sup>	Effekt
		m <sup>3</sup>	%	mg	(målt)	(10% ilt)	m <sup>3</sup>	%	mg	(målt)	(10% ilt)	%
09:38	10:00	0.329	7.4	50.6	161	130	0.921	9.0	3.1	4	3	97.5
10:22	10:58	0.4	8.0	36.8	96	81	0.996	8.4	3	3	3	96.6
11:06	11:41	0.389	7.5	49	131	107	1.008	8.2	2.9	3	3	97.6
11:49	12:23	0.378	10.0	36.8	102	102	0.982	10.8	1.7	2	2	98.1
12:31	13:07	0.4	7.7	83	217	179	1.044	8.4	5.5	5	5	97.3
13:16	13:46	0.33	8.8	89.4	283	254	0.864	9.3	12.4	15	14	94.5

Tabel 4. Emissionsmålinger i røggas før og efter elektrofilter. Alcon kedel fyret med hvedehalm fra 2017.

DATO: 10-10-2019		KEDEL: Alcon, PLC styring										
Barometer: 1000 mbar		BRÆNDSEL: Lyse hvede 2019		Bem.: Skudfrekvens: 30 min, 30 kV, 8 mA								
MALEVÆRDIER - RAGAS					STØVEMISSION		RENGAS			STØVEMISSION		
Start kl.:	Stop kl.:	Gasmåler	O2 (ABB)	Filter	mg/nm <sup>3</sup>	mg/nm <sup>3</sup>	Gasmåler	O2 (Sybron)	Filter	mg/nm <sup>3</sup>	mg/nm <sup>3</sup>	Effekt
		m <sup>3</sup>	%	mg	(målt)	(10% ilt)	m <sup>3</sup>	%	mg	(målt)	(10% ilt)	%
09:04	09:35	0.309	7.4	63.8	221	179	0.969	8.3	17.8	20	17	90.4
09:43	10:14	0.295	7.2	97.6	354	283	0.967	8.4	10.2	11	10	96.5
10:22	10:54	0.306	7.0	131.3	460	361	1.008	8.2	6.7	7	6	98.3
11:02	11:35	0.319	7.3	157.1	527	424	1.056	8.5	13.7	14	12	97.1
11:42	12:15	0.308	7.5	189.7	660	536	1.011	8.4	22.5	24	21	96.1

Tabel 5. Emissionsmålinger i røggas før og efter elektrofilter. Alcon kedel fyret med hvedehalm fra 2019.

Af tabel 4 fremgår det, at der med 2017 hvedehalmen blev opnået en renseseffekt på i gennemsnit 96,6 procent. Halmen fra 2017 var af relativ god forbrændingskvalitet, og støvemissionen i den ikke rensede røg var således også kun 81 – 254 mg støv pr. normal-m<sup>3</sup> røggas. Resultaterne i tabel 5 fra fyringsforsøg med lys hvedehalm fra høsten 2019 viste en gennemsnitlig renseseffekt på 95,7 procent. For 2019 halmen var støvemissionen i den ikke rensede røg noget højere, idet der her blev målt 179 – 536 mg støv pr. normal-m<sup>3</sup> røggas. Den højeste måleværdi for støv i den rensede røggas var 21 mg støv pr. normal-m<sup>3</sup>. Der kunne således i alle tilfælde opnås tilfredsstillende resultater, og der var ikke problemer med at overholde EN 303-5, klasse 5 grænseværdien på 60 mg støv pr. normal-m<sup>3</sup> røggas for manuelt fyrede biomasse kedler.

## Arbejdspakke 5

Sidste del af projektet har omfattet en langtidstest af filteret med henblik på teste og dokumentere anlæggets driftssikkerhed, komponenternes holdbarhed og renseeffekten gennem en længere periode under praksis nære driftsbetingelse. I denne periode er filterparametrene strøm og spænding registreret. Det er undersøgt om der forekommer tæring i filterhuset eller støvtragten pga. uønsket kondens i stilstandsperioderne. Der er gennem perioden jævnligt gennemført målinger af filtervirkningsgraden for at se, om denne evt. ændrer sig over tid.

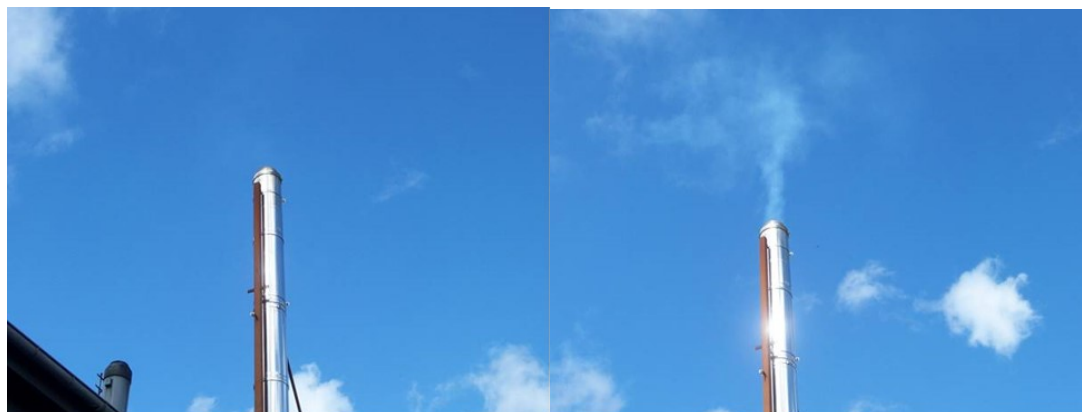
Der har kunnet registreres nogen generel ændring i filtervirkningsgraden over det halvår fra sommeren 2019 til januar 2020 hvor langtidstesten har forløbet. Målingerne har vist lidt forskellige resultater afhængig af halmkvalitet. Et eksempel på måleresultater fra en test ultimo november 2019 er vist i tabel 6.

DATO: 22-11-2019		KEDEL: Alcon - PLC styring		Bem.: Skudfrekvens: 30 min; 30 kV, 7-8 mA								
Barometer: 1009 mbar		BRÆNDSEL: Lys hvede 2019										
MALEVÆRDIER - RAGAS				STØVEMISSION		RENGAS		STØVEMISSION				
Start kl.:	Stop kl.:	Gasmåler	O2 (ABB)	Filter	mg/nm <sup>3</sup>	mg/nm <sup>3</sup>	Gasmåler	O2 (Sybron)	Filter	mg/nm <sup>3</sup>	mg/nm <sup>3</sup>	Effekt
		m <sup>3</sup>	%	mg	(målt)	(10% ilt)	m <sup>3</sup>	%	mg	(målt)	(10% ilt)	%
09:13	09:45	0.386	6.9	81.8	225	175	0.814	8.5	5.2	7	6	96.6
09:53	10:28	0.362	6.8	56.5	166	129	1.082	8.7	6.3	6	6	95.7
10:37	11:18	0.395	6.8	86.3	232	180	1.26	8.5	8.9	7	7	96.3
11:26	11:59	0.336	6.6	123.8	391	300	1.017	8.0	17.6	18	16	94.8
12:06	12:38	0.329	10.4	69.9	225	235	0.972	11.2	13.1	14	16	93.1
12:45	13:16	0.324	12.3	50.1	164	207	0.96	13.1	8.9	10	14	93.4

Tabel 6. Emissionsmålinger i røggas før og efter elektrofilter. Resultaterne er efter ca. et halvt års langtidstest med anlægget anvendt under praksisnære driftsbetingelser.

Det fremgår af tabellen at filtervirkningsgraden har kunnet holdes. Ved fyring med lys hvedehalm fra 2019 blev der opnået en renseeffektivitet på i gennemsnit 95,0 procent. Støvemissionen i den rensede røg var kun 10,8 mg støv pr. normal-m<sup>3</sup> røggas i gennemsnit. Tilsvarende målinger med grå hvedehalm også fra 2019 høsten viste en renseeffektivitet på i gennemsnit 94,2 procent. Støvemissionen med den grå halm er generelt noget lavere end for lys gul halm, og støvemissionen i den rensede røg blev målt til kun 3,3 mg støv pr. normal-m<sup>3</sup> røggas i gennemsnit.

Under langtidstesten blev der ikke konstateret problemer med anlæggets driftssikkerhed eller holdbarheden af enkeltkomponenter. Der er dog konstateret rustdannelse på den udvendige side af filteret og røgrørene, så det anbefales, at filteret fremover installeres i et velisolert hus.



Figur 5. Røg fra anlægget. Foto viser forskellen i synlig røg med filteret tændt eller slukket. Foto til venstre er med filter i drift mens foto til højre er med slukket filter. Der er ca. 1 minut mellem de to fotos.

## 1.6 Utilization of project results

Projektets resultater vil direkte blive anvendt kommercielt, da der markedsføres en teknologisk løsning til rensning af røg fra mindre portionsfyrede biomassekedler. Det udviklede elektrofilter er i stand til at sikre, at et halmfyrianslæg kan leve op til de forventede, skærpede krav til emissioner af partikler. Implementeringen af kravene beskrevet i EN 303-5 er udsøgt, men forventes indført også i Danmark. EN 303-5, klasse 5 grænseværdien er 60 mg støv pr. normal-m<sup>3</sup> røggas for manuelt fyrede biomasse kedler. Et halmfyr uden røgrensningsudstyr kan ikke overholde denne grænseværdi, men ved tilslutning af det udviklede elektrofilter kan støvemissionen reduceres til ca. 10 mg støv pr. normal-m<sup>3</sup> røggas.

Projektdeltager-firmaerne Reka A/S og Alcon A/S har startet kommerciel markedsføring af elektrofiltere. Bl.a. via Reka's hjemmeside tilbydes der røgrensningsløsninger med elektrofiltere. Der arbejdes i øjeblikket på at færdiggøre markedsføringsmateriale til såvel det danske som europæiske marked.

Reka A/S arbejder desuden på at udnytte elektrofilteret til andre luftrensings formål end støvrensning fra biobrændselskedler.

Aarhus Universitet, Institut for Ingeniørvidenskab, vil udnytte den opnåede viden til fortsat udviklings- og forskningsarbejde inden for området.

Der er af firmaet Reka A/S indsendt en patentansøgning over essentielle dele af det udviklede elektrofilter (- både dansk og internationalt patent).

Elektrofilteret er udviklet ved tilslutning af en 150 kW Alcon portionsfyret halmkedel. Det forventes, at det færdigudviklede elektrofilter vil kunne fungere sammen med andre biobrændselskedler på 100 – 400 kW. Ved større kedler kan der evt. benyttes to eller flere filtre. Derved kan støvemissionen fra disse kedler reduceres med 90 % eller mere, hvilket både vil afhjælpe problemer med støvnedfald i nærmiljøet og nedsætte mængden af finkornet støv i den omgivende atmosfære. Hvis røgen fra halmfyr kan renses effektivt for støv, vil halmfyr kunne få en større udbredelse i Danmark og resten af Europa, hvor grænseværdierne for støv hidtil har blokeret for disse kedler. Derved vil fossile brændsler kunne erstattes af biobrændsler, hvilket vil reducere den samlede CO<sub>2</sub>-emission.

Nærværende elektrofilter vil nok være for dyrt for små kedler under ca. 100 kW, men på lidt længere sigt vil det sandsynligvis være muligt nedskalere denne type elektrofilter til også at kunne fungere sammen med pillefyr, brændeovne eller en villakedel. Det vil i så fald være en stor gevinst for luftkvaliteten i villakvartererne.

## 1.7 Project conclusion and perspective

Der er i projektet udviklet et elektrofilter til portionsfyrede halmkedler med en ydelse på 100 - 200kW. Filteret er udviklet og testet, tilsluttet et Alcon halmfyr, men det er konstrueret som en selvstændig enhed, som kan monteres i forbindelse med andre typer og fabrikater af biomassekedler.

Resultater har vist, at filteret er i stand til at rense røg med en renseeffekt på ca. 95% for halmfyring. Elektrofilteret er i stand til at reducere støvemissionen fra portionsfyrede halmkedelanlæg, så grænseværdierne i henhold til klasse 5 krav i EN 303-5 på 60 mg støv pr. normal-m<sup>3</sup> røggas kan overholdes. Disse krav forventes også at blive gældende i Danmark.

Filteret er klar til kommerciel markedsføring, og formålet med projektet, som var at udvikle en effektiv og økonomisk løsning på rensning af røg fra biomassefyrede kedler – primært portionsfyrede halmkedler, er således opfyldt.

Når røgen fra biomassefyr kan renses effektivt for støv, vil halmfyr kunne få en større udbredelse i Danmark og resten af Europa, hvor grænseværdierne for støv hidtil har blokeret for øget anvendelse af disse kedler. Teknologien vil således på længere sigt kunne bidrage til øget anvendelse af biomasse i stedet for fossilt brændsel og dermed reducere CO<sub>2</sub>-udledning.

## **Annex**

Relevant links

[www.alcon.nu](http://www.alcon.nu)

<https://eng.au.dk>

<https://doi.org/10.5071/27thEUBCE2019-2AO.2.3>

Bilag:

Electrostatic Precipitators for Small Straw Boilers. Kristensen, Erik Fløjgaard; Kristensen, Jens Kr; Jerdig, M. F.. ETA-Florence Renewable Energies, 2019. p. 419-425 (European Biomass Conference and Exhibition Proceedings).

