

Udvikling af standardanlæg for røggaskondensering ved mindre flisfyrede kedelanlæg 200-1.000 KW. Fase 1

Dansk Fjernvarmes F&U-Konto
F&U rapport nr. 2017-04

Den 15. februar 2018



Gjøl Private Kraftvarmeværk A.m.b.A.



NORDJYLLAND

Jyllandsgade 1
DK-9520 Skørping
Tel. +45 9682 0400
Fax +45 9839 2498

MIDTJYLLAND

Vestergade 48 H, 2. sal
DK-8000 Århus C
Tel. +45 9682 0400
Fax +45 8613 6306

SJÆLLAND

A.C. Meyers Vænge 15
DK-2450 København SV

Besøgsadresse:
Frederikskaj 10 A, 1. sal
DK-2450 København SV
Tel: +45 25 17 04 00

www.planenergi.dk
planenergi@planenergi.dk
CVR: 7403 8212

Indholdsfortegnelse

Indholdsfortegnelse	2
1 Indledning	3
1.1 Resume	3
1.2 Perspektiv	5
1.3 Projektdeltagere	6
1.4 Baggrund og projektbeskrivelse	6
2 Kondensering ved træ og halm som brændsel	8
3 Flisfyret anlæg i Gjøl	11
3.1 Krav til spildevand	13
3.2 Kan posefilteret undværes ?	13
3.3 Vaarst-Fjellerad Kraftvarmeværk	14
3.4 Østerlars halmvarmeværk	15
4 Føns Nærværme	16
5 Forrensning af røggas	18
5.1 Cykloner	19
5.2 Tekstilfiltre	20
5.3 Vådscrubbere	21
5.4 Elektrofiltre	22
6 Kondenseringsmetoder	23
6.1 Spraykondensering	23
6.2 Kondensering på fyldlegemer	23
7 Varmepumper	25
7.1 Absorptionsvarmepumpe	25
7.2 Kompressor varmepumper	26
8 Semesterprojekt, markedsundersøgelse	28
8.1 Potentiale for røggaskondensering på minde anlæg ...	28
8.2 Virkningsgrader	30
8.3 Lovgivning mv.	30
8.4 Brændeovnsbekendtgørelsen	31
8.5 Luftvejledningen	31
8.6 Bygningsreglementet	32
9 Semesterprojekt, design af mindre scrubber	33
9.1 Forslag til anlæg i Føns	33
9.2 Designforslag 1 – Reduktion af eksisterende scrubber	34
9.3 Designforslag 2 – Quench-scrubber	35
9.4 Designforslag 3 – Partikelmåling	36
9.5 Designforslag 3.1 – Scrubber i kasse	37
9.6 Designforslag 3.2 – Rundede plader og røgdiffusere ...	37
9.7 Designforslag 3.3 – Cylinderformet scrubber	38
Bilag, semestergrupperne	39

Rekvirent:

Dansk Fjernvarmes F&U konto

Kontaktperson:

Kate Wieck-Hansen Teknisk konsulent, Dansk Fjernvarme.
Mail: kwh@danskfjernvarme.dk
Projektleder:
Erik Olsen, Føns Nærværme
Mail: erik.bitsch@live.dk

Rapport udarbejdet af PlanEnergi, Midtjylland

Jakob Worm
Tlf.: 2972 6845
e-mail: jw@planenergi.dk

Kvalitetssikret af

Tina H. Nielsen
Tlf.: 2222 5196
e-mail: thn@planenergi.dk
og
Jens Birch Jensen
Tlf.: 2066 0815
e-mail: bj@planenergi.dk

Projekt ref.
8167

1 Indledning

De fleste større (over 3 MW) flisfyrede fjernvarmecentraler er forsynet med røggaskondenserings-anlæg. Men meget få mindre anlæg udnytter denne teknologi.

En kendt måde at tilstræbe en optimal udnyttelse af forbrændingsenergien er at afkøle røggassen til under kondenseringspunktet, så fordampningsenergien genvindes. Dette er ikke tilfældet for anlæg under 2-3 MW. Her er markedets standardkomponenter så dyre, at etablering hidtil ikke har været økonomisk bæredygtigt.

Politikere, myndigheder og varmeværker arbejder alle ihærdigt på at udnytte energiressourcer så effektivt som muligt - både af økonomiske og af miljømæssige grunde.

Formålet med dette udviklingsprojektet er at afsøge muligheder for at udvikle anlæg af standardkomponenter, som er økonomisk bæredygtige for anlæg i området 200 – 1.000 kW eller at finde en nedre grænse for udnyttelsen af røggaskondensering for flisfyrede anlæg.

De fundne løsninger for flis vurderes i relation til halmfyrede anlæg. Her kan et scrubberanlæg nedsætte forureningen med SO₂. Det er en fordel for miljøet og kan eliminere udgiften til svovl-afgiften. Røggas fra halmfyring er dog ekstra korrosiv og kræver særlig opmærksomhed.

Dette projekt er udført af de to fjernvarmeværker i Føns og Gjøl, samt PlanEnergi som rådgiver og Aarhus Maskinmesterskole (AAMS).

Studerende fra AAMS har hjulpet med teknisk beskrivelse og markedsundersøgelse mv. Samarbejdet har været til stor gavn for både projektet og de studerende. I første semester 2017 har 2 grupper studerende fra Aarhus Maskinmesterskole gennemført et projekt med hovedvægten på en markedsanalyse for scrubber anlæg. I andet semester 2017 har to grupper udarbejdet teoretiske tekniske projekter vedrørende udformning af en røggaskondensator.

1.1 Resume

På Gjøl Private Kraftvarmeværk har man et flisfyr (ca. 1,5 MW) med en hjemmebygget scrubber. Dette anlæg har en virkningsgrad på 103%. Scrubberen har hævet virkningsgraden med 14%. Med inspiration i dette anlæg er det undersøgt om der kan laves scrubbere til mindre kedler.

I projektet har der også været andre overvejelser om mulig forenkling af røggrensningen før scrubberen. Der er blevet foretaget målinger på røggassen på anlægget i Gjøl i samarbejde med KSM-stoker. Formålet med målingerne var bl.a. at vise om posefilteret kunne undværes.

Måling	1	2	3
Posefilter	Ja	Nej	Nej
Ekstra dyser	Nej	Nej	Ja
Partikler (mg/m ³)	10	42	37

Tabel 1. Måleværdier for partikler (Gruppe E, 2. semester 2017)

I måling 1 har røggassen været igennem både posefilter og scrubber, dog med to lukkede dyser i scrubberen. Dette afspejler normaldriften på anlægget i Gjøl. Ved måling 2 blev røgen ført udenom posefilteret, og de to dyser i scrubberen er stadig lukkede. I den 3. måling blev de to sidste dyser åbnet, og røgen blev stadig ført udenom posefilteret.

Som det ses, har posefilteret en anseelig betydning for partikelkoncentrationen i den udledte røggas. Samtidig viser resultaterne, at kedlen kan overholde de nye emissionskrav (Eur-lex. Europa.eu, 2017; 50 mg støv / Nm³). Ved tilkobling af dyserne i måling 3, blev der opnået en reduktion på ca. 12% i forhold til måling 2. Der er selvfølgelig en usikkerhed ved at overføre disse resultater til andre anlæg.

Målingerne er for så vidt positive i forhold til at undgå et posefilter ved flisfyrede anlæg. Alligevel vil man i Gjøll (GPKV) ikke sløjfe det posefilter, man har i dag. Erfaringen viser at der sætter sig meget støv og aske i forskellige dele af scrubberen i Gjøll, så den kræver ekstraordinær rensning. Ved udvikling af en ny scrubber vurderes det at være muligt at designe den således, at scrubberen kan holde sig selv ren. Dog vil mængderne i bundkar og filter blive større, hvis partikler ikke renses fra inden scrubberen.

Til Føns Nærværme, har projektgruppen ideer til en scrubber-løsning. Hvis scrubberen kunne blive en del af skorstenen, kunne det være en interessant løsning, da det vil minimere føringen af røgrør. Frimaet Ammongas har vurderet en scrubber til 400 kW kedeffect til 400-500 mm cirkulær rør og ca. 6 m høj. Med udstyr vil prisen blive omkring 300.000 kr.

I Føns Nærværme har man en årlig udgift til flis på ca. 250.000 kr./år. Hvis virkningsgraden på systemet forbedres med 14%, giver det en årlig besparelse på 35.000 kr. Det svarer til en simpel tilbagebetalingstid på 9 år ved en investering på 300.000 kr. Da der vil være en smule øgede udgifter til pasning mv. anses de 300.000 kr. for at være et loft for investeringen.

Projektet har vist, at der er muligheder for at kunne designe en enkel og driftssikker scrubber løsning, som kan passe til mindre kedler. Der er dog stadig en række udfordringer, der skal løses. For de flisfyrede anlæg er der mulighed for at kombinere et alternativ til posefilteret med en scrubber. Det er givetvis nødvendigt stadig at have en rimelig effektiv partikelrensning inden scrubberen, og det kan ske med en mere avanceret cyklon-rensning eller med elektrofilter. Dette vil give en minimeret afsætning af partikler i scrubberen og et samlet system, som kan være mere enkelt og driftssikkert end løsningen med posefilter. Samtidig fås fordelene med en mere effektiv røggasrensning – både energi- og miljømæssigt.

For de halmfyrede kedler er det sandsynligvis ikke muligt at erstatte posefilteret inden scrubberen, men det kræver flere undersøgelser. Der er dog positive muligheder at anvende komposit materialer eller plast for at undgå korrosion. Det kræver dog en løsning med et by-pass spjæld, hvis quench-dysen i røggaskanalen inden scrubberen skulle svigte.

I projektbeskrivelsen blev der bl.a. stillet 3 spørgsmål:

1. Muligheden for at udvikle "små" anlæg af standardkomponenter, som er økonomisk bæredygtige?

Løsningen ligge i anvendelse af komponenter fra andre scrubber typer. Dette kan blive konkretiseret i en fase 2 i dette projekt.

2. Er der en nedre grænse for udnyttelsen af røggaskondensering for flisfyrede anlæg?

Det virker umiddelbart sandsynligt at kunne udvikle en økonomisk løsning for anlægget i Føns på 400 kW. Det er dog usikkert om der vil være økonomi i at tilbygge scrubbere til eksisterende mindre kedler end 400 kW. Ved nye kedler er der en udvikling i gang i mere eller mindre integrerede kedler med kondensering. For kedler større end 400 kW ser det ud til at kunne være god økonomi i scrubberløsninger.

3. Kan løsningerne for flisfyrede anlæg bruges ved halmfyrede anlæg?

Ja til en vis grad. Umiddelbart kan posefilterne ikke undværes ved de halmfyrede anlæg. Hvis løsningen blive anlæg med mange plastdele som estimeret af Ammongas vil der kunne være en del synergi mellem de to anlægstyper.

For at undersøge det mulige marked udsendte AAMS gruppe C i foråret 2017 et spørgeskema og fik 17 besvarelser retur fra mindre fjernvarmeværker. 15 ud af de 17 værker svarede positive på: "I hvor høj grad kunne I være interesseret i et røggaskondenseringsanlæg, hvis hele anlæggets virkningsgrad herved kunne forøges væsentligt?" 5 af dem svarede endda "Helt sikkert".

Ud af de 17 værker var 65% med kedler fra 0,5 MW til 1 MW. 44 % af de 17 værker fyrede med halm. 33% med flis og 22% med træpiller.

Det kan således konstateres at der er en tydelig interesse for scrubber anlæg blandt værker med halm- eller flis kedler. Der er en række værker med kedler lige under 1 MW som har naturgas k/v, og som nu har fået lov til at installere en træ- eller halm kedel. Disse værker vil bestemt have en interesse i en højere virkningsgrad, da det giver mulighed for at fortrænge dyr naturgas med et lidt mindre forbrug af halm/flis.

For de halmfyrede værker kan der måske blive en mulighed for reduceret betaling af svovl-afgift hvis skatteministeriet godkender reduktionen af svovl i en scrubber uden den løbende måling af svovl i røgen, som der kræves i dag.

1.2 Perspektiv

Under rimelige forudsætninger om årsproduktioner og flispriser giver scrubberløsningen de årlige besparelser for anlæg med effekter: 200 - 1000 kW på ca. 20 - 100.000 kr. ekskl. moms. Anvendelse af kondenseringsanlæg vil desuden give mulighed for at anvende mere fugtige brændsler, som også er billigere. Hvis mindre flisfyrede anlæg kan anvende disse brændsler, kan der opnås en driftsbesparelse, og der kan måske blive mulighed for at anvende mere lokale træbrændsler, som ikke tidligere har været tænkt anvendt til energiformål. Hvis der ønskes at anvende flis med noget over 40% fugt kan der være en udfordring med udformning af brændkammeret i kedlen. Kedlen skal derfor afprøves eller der skal kontrolleres hos kedel-leverandøren, hvor fugtigt træ den pågældende kedel kan afbrænde.

Ved flisfyrede anlæg kan der være mulighed for en god for-rensning for partikler med et elektro filter. I fase 2 i dette projekt er det påtænkt at undersøge andre løsninger med partikel rensning med for eks. cykloner og/eller venturi-dyse/scrubber. Med en efterfølgende scrubber vil et sådant system givetvis medfører en rigtig god røgrensning for partikler. Den efterfølgende rensning af perkolatet kan renses enkelt i billige kar som i Gjøl. Eller der kan anvendes nyere og mere industrielle filtre. På fjernvarmeværker, hvor der er et spædevandsforbrug af en vis størrelse, kan det overvejes at anvende det rensede perkolat.

Eksisterende anlæg har foruden en energieffektiviserende effekt også oplevet andre miljømæssige fordele. I Gjøl løste røggaskondenseringsanlægget et akut støjproblem fra skorstensemissionerne. Desuden vil anlæggene reducere forurenende emissioner.

For halmfyrede anlæg er erfaringen fra bl.a. værket i Østerlars, at der kan spares 10% på brændslet ved kondensering. Desuden er der en besparelse på svovlafgiften for et typisk halmfyret værk på 2 MW på omkring 50.000 kr./år. Nettoafgifter er p.t. på 17,7 kr./ton halm.

1.3 Projektdeltagere

Projektgruppen består af 4 parter:

FØNS NÆRVARME er et landsbyfjernvarmeanlæg med p.t. 46 forbrugere, som forsynes af en varmecentral med 2 x 200 kW bio-kedler. Anlægget startede i 2015 og leverer ca. 1000 MWh om året. Selskabet arbejder løbende med at effektivisere forsyningen, og anvendelsen af VE-kilder vurderes løbende. Selskabet er potentiel aftager af et passende røggaskondenseringsanlæg, hvis det er økonomisk bæredygtigt. Selskabet er parat til at fungere som testanlæg ved udvikling af mindre røggaskondenseringsanlæg.

Selskabet er projektansvarlig for denne opgave, og projektledelsen varetages af Erik Bitsch Olsen, som er formand for Føns Nærvarme og pensioneret rådgivende ingeniør med mange års erfaring som bygherrerådgiver og projektleder ved større bygge- og anlægsanlæg.

GJØL PRIVATE KRAFTVARMEVÆRK er drevet af driftsleder Arne Nielsen, Gjøl Marinecenter igennem 15 år. Varmeværket er udstyret med 2 Jenbacher motorer, en gaskedel og en fliskedel på 1,5 MWh samt en flisforgasser, som ikke er i drift.

Fliskedlen er driftet siden 2004 med en del løbende ombygninger. Blandt andet er i 2012 installeret en delvis selvbygget scrubber for røggaskondensering. Prisen for denne scrubber, som fungerer udmærket og opfylder myndighedskrav, er væsentlig lavere end standardanlæg. Den viden, vi har med denne løsning, vil delvist danne grundlag for den videreudvikling og nedskalering, så den kan bruges til mindre anlæg, som tilstræbes i dette projekt.

PLANENERGI har siden 1983 arbejdet med vedvarende energianlæg og effektiv energiudnyttelse. Der er i dag 35 ansatte hvoraf de 22 arbejder indenfor fjernvarmeområdet. Arbejdsopgaverne er plan-opgaver for kommuner og værker samt bygherrerådgivning med projektering, udbud, myndighedsbehandling og tilsyn mv.

AARHUS MASKINMESTERSKOLE (AAMS) vil være førende i udviklingen af fremtidens internationale tekniske ledere. Missionen er at uddanne maskinmestre i et dynamisk og udviklende studiemiljø med fokus på, at de studerende opnår efterspurgte og tidssvarende kompetencer. Det vil vi gøre bl. a. ved at være tæt på videngrundlaget og have en stor kontaktflade til aftagermarkedet og praksisorienteret undervisning. Nærværende projekt støtter fuldt op om dette. AAMS kan bidrage med motiverede studerende, der bakkes op af faglige kompetente undervisere, inden for alle områder af professionen.

1.4 Baggrund og projektbeskrivelse

Røggaskondensering er en teknik, som både renser røgen for partikler og samtidig øger det samlede anlægs virkningsgrad. Røggas fra afbrænding af træ - f.eks. flis - indeholder en betragtelig mængde vanddamp dels fra fordampet fugt i træet, dels fra afbrænding af brint i brændslet, hvorved der dannes vanddamp. Dvs. at der dels hentes energi ud af røggassen ved af afkøle den, dels ved at køle den så meget, at vanddampen kondenserer og afleverer sin fordampningsvarme.

Afkølingen sker i kendte anlæg ved, at røggassen med en ventilator trækkes gennem en beholder, hvor røggassen oversprinkles med væske (kondensat), som samtidig opvarmes. Oversprinklingen sker ofte i flere trin. I kendte systemer sker det i høje vasketårne. Kondensatet ledes gennem en varmeveksler, hvor den tilførte energi overføres til fjernvarmesystemets returvand.

Kondensatet indeholder støvpartikler og organiske forbindelser samt en mindre mængde mineral- og tungmetallforbindelser. Til gengæld er disse forureninger fjernet fra den udsendte røg, som kan opfylde strenge emissionskrav.

Kondensatet vil ofte være aggressivt (pH kan afvige mærkbart fra 7). Systemet for kondensatet skal opbygges af materialer, som kan modstå væskens aggressivitet. Kondensatet skal efter veksleren filtreres for partikler og renses, inden det recirkuleres til vasketårnet. Ved større anlæg opbygges anlægget af fabriksfremstillede standardkomponenter og med automatisk styring af energiudveksling og af kondensrensning. Der findes dog også delvist hjemmelavede anlæg - bl.a. i Gjøl Private Kraftvarme (GPKV), hvor kondenseringen og rensningen styres manuelt med et udmærket resultat.

For halmfyrede anlæg ligger der en lidt mindre brændselsbesparelse end for flisanlæggene. Dog kan der supplerende spares på svovlafgiften. Den reducerede udledning af SO₂ skal måles og dokumenteres i forhold til Skat og dette udstyr har tidligere været dyrt, men der sker meget på sensor-området i disse år og projektet skal undersøge dette forhold. Desuden er røggassen korrosiv og kan neutraliseres med lud. Et posefilter vil dog fjerne partikler samt kaliumklorid og cadmium, og korrosionsproblemet kan blandt andet elimineres ved anvendelse af plastrør og vekslere af titanium i stedet for rustfrit stål. Der skal hentes erfaringer fra bl.a. Østerlars og Øster Toreby i forhold til korrosion og emissioner på deres kondenseringsanlæg.

Hele projektet gennemføres i 2 faser / etaper:

1. En udredningsfase. Som denne rapport er afslutningen på.
2. En udviklingsfase, som igangsættes, hvis fase 1 giver positive resultater. Her vil gruppen i samarbejde med interesserede komponent-/systemleverandører omsætte den indhentede viden til udvikling og afprøvning af egnede komponenter/systemer.

Da fase 1 har givet positive resultater i kedelområdet 400 – 1.000 kW, er der kontakter med producent-/komponentleverandører for at designe og pilotfremstille en scrubber som en fase 2.

Giver også fase 2 positive resultater, søges initieret en produktion af komponenter og komplette anlæg.

2 Kondensering ved træ og halm som brændsel

Træ og halm er i dag kendte brændsler i Danmark og der er biomassekedler på en række fjernvarmeværker (typisk fra 1 MW og større, dog enkelte ned til ca. 400 kW), samt mindre kedler på landbrug og institutioner (typisk fra 100 kW til 1 MW). Her ud over er der villa anlæg (15-50 kW, typisk træpiller). I dette projekt er træpiller ikke interessant, da de stort set ikke indeholder vand, som ville kunne kondenseres efter kedlen. Derfor er der primært fokus på flis som brændsel, hvor vandindholdet kan ligge fra 25% op til 50%. Desuden har halm vist sig interessant, selv om vandindholdet her er noget lavere end for flis. (10-20%).

	Gul halm	Grå halm	Træflis
Vandindhold	10-20%	10-20%	40-50%
Aske	4%	3%	1%
Kulstof	42%	43%	50%
Brint	5%	5%	6%
Ilt	37%	38%	38%
Klorid	0,75%	0,20%	0,02%
Kvælstof	0,35%	0,41%	0,30%
Svovl	0,16%	0,13%	0,05%
Brændværdi	14,4 MJ/kg	15,0 MJ/kg	10,4 MJ/kg

Tabel 2. Data for halm og flis. Kilde: INBIOM ¹

Det ses i tabellen at koncentrationen af klorid, kvælstof og svovl er langt større i halm end i træ. Tilstedeværelsen af klor og alkali i røggassen ved forbrænding af halm kan være et problem, da stofferne bliver til natriumklorid og kaliumklorid, der er stærkt aggressive og forårsager tæring i kedler og rør – særligt ved høje temperaturer i kraftværker. Det gælder altså om at bruge halm med et lavt indhold af skadelige stoffer, og her spiller vejret en væsentlig rolle. Halm, som efter modning og især efter høst har fået meget regn og er blevet gråt, er langt mindre aggressivt end gul halm, som kun har fået begrænsede mængder regn.

Selv om halm kan være et vanskeligt brændsel, også i forhold til røggaskondensering, er det alligevel interessant. Dels kan der spares brændsel, hvis en del af den fordampede fugt kan genvindes, og dels kan et scrubberanlæg nedsætte forureningen med SO₂. Dette er en fordel for miljøet og kan være mulighed for at nedsætte udgiften til svovlafgiften. Her er lovgivningen dog ikke helt på plads endnu.

Et væsentligt element ved de større røggaskondenseringsanlæg er den efterfølgende behandling af kondensatet. Denne vandbehandling udgør ved de større anlæg dels pH-regulering og partikelfiltre - ofte også med ion-bytter og aktivt kulfilter. Udgiften til denne type vandbehandlingsanlæg kan godt løbe op i 1 mio.kr. plus d&v.

¹ Kilde: http://inbiom.dk/Files//Files/Publikationer/halmpjecedk_2011_web.pdf

De fleste røggaskondenseringsanlæg er udført som et kombineret røggaskøling- og røggasrensings-anlæg. Selvom der er monteret en multicyklon inden scrubberanlægget vil en del af flyveasken blive udskilt med kondensatet. Da flyveasken vil indeholde en del tungmetaller, herunder specielt cadmium, skal den filtreres fra inden udledning til rensningsanlæg. Dette medfører, at der også må etableres et kondensatbehandlingsanlæg. Kondensatbehandling sker ofte med et båndfilter eller et spånfilter samt et bundfældningsanlæg med tilsætning af flocculeringsmiddel mv. Til justering af pH-værdien kan der være en omkostning til NaOH-forbrug.

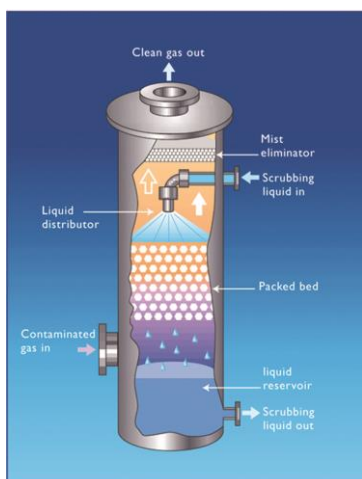
Ved installation af et effektivt røggasfilter kan langt størsteparten af flyveasken udskilles inden kondenseringsanlægget. Så bør kondenseringsanlæg og kondensatbehandlingsanlæg kunne laves meget enklere og billigere.

I Gjøl har man vist, at behandlingen af kondensatet kan udføres simpelt og billigt. At pH værdien i kondensatet i Gjøl er tæt på neutral kan skyldes, at posefilteret og cyklonen fanger langt hovedparten af partiklerne, og at de syredannende salte sætter sig på disse partikler og derfor ikke kommer med over i scrubberen. Det største problem er måske tungmetallerne og specielt cadmium, idet de er svære at filtrere fra. Arne Nielsen fra Gjøl mener dog, at hans erfaringer er, at anvendelse af posefilter ikke har væsentlig indflydelse på kondensatet.

En risiko ved at udelade posefilteret kan blive problemer med tilsmudsning af fyldlegemer og varmeveksler, pumper mv. Det kan betyde større udgifter til drift og vedligehold (D&V). Det bør dog sammenholdes med de udgifter, der er til køb og D&V af et posefilter.

En væsentlig opgave i projektet er således at designe et system med røggaskondensering, som kan håndtere mulig syredannelse i scrubberen eller standse partiklerne med de syredannende salte, inden de når væsken i scrubberen. For at holde prisen nede på både investering og drift vil det være et mål at kunne undgå, dels den dyre kondensat behandling, og dels også posefilteret, hvis det kan lade sig gøre.

Problematikkerne vil være forskellige for flisanlæg og anlæg med halm, så løsninger vil sikkert ikke blive helt ens for de to typer brændsler.



Figur 1. Principskitse for en røggasvasker / scrubber. Kilde:²

Teknologien er mest velegnet ved våde brændsler som flis, hvor vandindholdet kan ligge fra ca. 25% op til 50%. Ved flisfyring er der også den fordel, at røggasserne er mindre korrosive.

² <http://www.crcleanair.com/uncategorized/the-importance-of-selecting-wet-scrubber-materials/>

En ulempe kan være at røgen bliver tung, så den kan falde ned ved de nærmeste naboer. Dette fænomen er konstateret i flere anlæg.

I et indlæg på Dansk Fjernvarmes temadag i november 2017 om røggaskondensering konkluderer Viktor Jensen fra DFP: (Kilde: ³)

- Elektrofiltre fungerer ikke på halmanlæg, da halmflyveaske klæber til elektroderne.
- Posefiltre er problematiske til fyring med fugtigt flis p.g.a. risiko for kondens –alternativt skal anvendes høj afgangstemperatur og ikke brændbare poser i filteret mellem kedel og røggaskondenseringen.
- Store elektrofiltre er billigere end store posefiltre og vurderes til at være billigere i drift- og vedligeholdelsesudgifter.

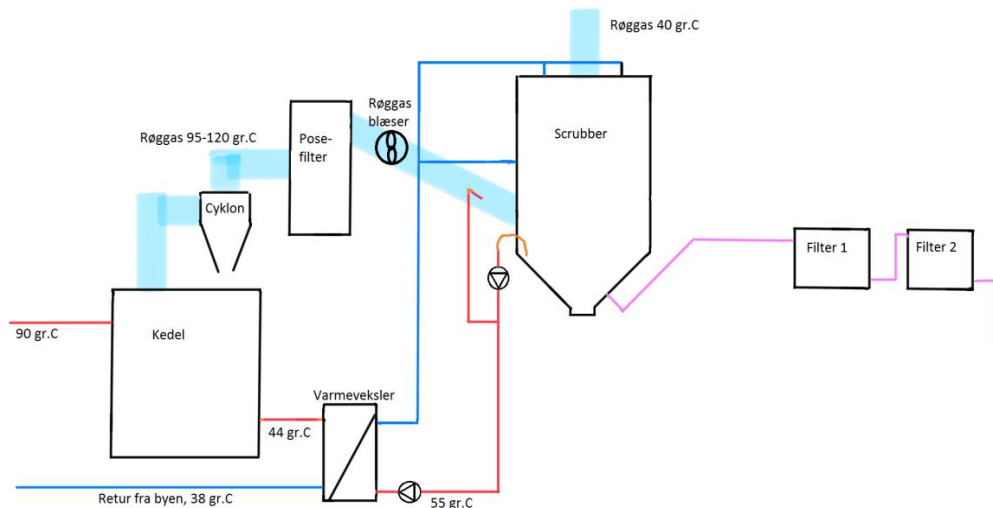
Valg af filtre til små anlæg < 1 MW

- Posefiltre er det billigste men ikke nødvendigvis i længden
- Alle oplever filterbrände på grund af gnister eller skader p.g.a. for høj røggastemperatur.
- Risiko for tilstopning af posefiltre ved kondens som følge af fugtigt brændsel eller start/stop drift på anlægget.
- DFP's valg er elektrofiltre til træfyrede anlæg og posefiltre med ikke brændbare poser til de halmfyrede anlæg.
- Begge dele er dyrere end et standard posefilter, men meget billigere i drift og med mindre tilsynsbehov.
- Set over tid vil investeringen i det driftssikre filter kunne betale sig.

³ <http://www.danskfjernvarme.dk/-/media/danskfjernvarme/kurser-moder/modematerialer/erfamoeder/2016-maj-faellesmoede-for-halm-og-flisgruppen/el-og-posefiltre-set-i-lyset-af-de-nye-emissionskrav.pdf>

3 Flisfyret anlæg i Gjør

På varmecentralen i Gjør har man en ældre kedel på 1,5 MW. I løbet af de sidste 5 år er røggasveksleren blevet etableret og ombygget i flere omgange. Den fungerer nu tilfredsstillende og der er et relativt beskedent vedligehold på anlægget. Efter scrubberen er virkningsgraden 103 %. Virkningsgraden er således hævet med 14 % point.



Figur 2. Skitse af princip i anlægget i Gjør

Kedlen er af fabrikat Hollesen med en trapperist. Effekten er på 1,5 til 2 MW afhængig af vandindhold i flisen. Efter kedlen er anlægget monteret med en cyklon og et posefilter. Denne røggrensning filtrerer partikler og de salte der sidder på partiklerne fra. Der er dog stadig en del fint støv i røgen og den bliver vasket ud i scrubberen. Der er indsat en røggasblæser før scrubberen, så den sidder i den varme og "tørre" del af røggassystemet.

I Gjør har man forsøgt af anvende meget våd flis, men det har dog ikke været uden problemer. Der er ikke plads til al dampen i brændkammeret i kedlen, og temperaturen falder i kedlen. Kedlen går ned i last, og selv om man får nogle kW igen i scrubberen, kommer man ikke op på fuld ydelse. Virkningsgraden kan være ok, og da de får den meget fugtige flis billigere, kan de hente en del gratis varme. Det kan dog ikke benyttes de koldeste vinterdage, hvor der er brug for fuld ydelse, så der må anvendes tørrere flis. Små kedler vil generelt ikke have så stort spillerum som store kedler, der bedre kan brænde fugtig flis.



Billeder fra Gjøl. Tv. er det kedlen med varmeveksleren foran. Th. ses scrubberen, som er placeret bagved kedlen. Den måler ca 60 x 120 cm og den er ca. 6 m høj.

Bundkarret på scrubberen rummer 5-600 l kondensat. Der udtømmes slam fra en studs i bunden. Det sker manuelt ca. 1 gang pr. dag. Tæt ved bunden er der et udløb til filteret. Det fungerer som et overløb til de to filterkasser. pH i bundkarret er ca. 10.



Billeder fra Gjøl. De to filtre er bygget op med en filterdug, et lag savsmuld og en filterdug ovenover.

Når filtrene er tilpas stoppede kan savsmulden afbrændes i kedlen med flisen. Mængden af kondensat til afløbet er ca. 2 l/min. pH i kondensatet ligger stabilt på 8,2.

Slam fra bundkaret bortskaffes til deponi.

Skorstenen er forsynet med en glasfiber-kerne for at modstå korrosion.



Billerer fra Gjøl. Tv. ses bundkar på scrubberen og en spand nedenunder hvor slam opsamles. Th. ses en trillebør med slam fra ca. en uge.

Scrubberen i Gjøl har kostet ca. 300.000 kr. Med montage og savsmuldsfiltrene mv. har anlægget kostet ca 0,5 mio.kr.

3.1 Krav til spildevand

Parameter	Grænseværdi	Analyse den 8/3 2017
Temperatur	50 °C	36-40 °C
pH	6,5-9,0 *	8
Suspenderet stof	500 mg/l	3 mg/l
Klorid, Cl	1000 mg/l	192 mg/l
Sulfat, SO ₄	500 mg/l	688 mg/l
Cadmium	3 µg/l	3,5 µg/l
PAH'er	-	
Nitrifikationshæmning (ved 200 ml/l)	< 50** < 20 %	19 %
Nitrifikationsrate		1.9 mg N/(g·h)

* Spidsværdier til pH 4 og pH 10 kan accepteres i 10% af tiden i løbet af en time.

** Hæmningen under 20% accepteres. Hvis den ligger mellem 20 og 50% skal der laves en handlingsplan for nedbringelse af hæmningen.

Gjøl Varmeværk har, efter at analysen er indsendt til Kommunen, fået at vide fra Kommunen, at analysen er ok, og at de små overskridelser på Sulfat og Cadmium ligger inden for måleusikkerheden. Det er også taget i betragtning af spildevandsmængderne er meget små.

3.2 Kan posefilteret undværes ?

Arne Nielsen: Hvis posefilteret skal undværes i Gjøl, så vil anlægget blive mere beskidt. Vi har ved driftsstop på posefilteret oplevet at der har sat sig skidt tre steder: i røgrøret ved quench dysen, på fyldlegemerne og i skorstenen. Hvis en ny scrubber skal erstatte et posefilter skal man således være opmærksom på at forbedre designet på disse steder eller have en helt anden udformning.

I Gjøl har man besluttet, efter sagen i Fjerritslev⁴, at afløbs filteret skal udvides, så der indsættes to ekstra pallerammer til bundfældning og opsamling af slam:

- Tank 1: Fortank med bundfældning
- Tank 2: Ny tank med kuvertfilter. Dette filter fungerer ligesom et kaffefilter. Det deles i to så den ene halvdel af filteret kan tømmes for slam mens det andet er i brug.
- Tank 3 er med bundfældning og herfra returledning til scrubberen
- Tank 4 er med savsmulfilter og afløb.

Der er ingen planer i Gjøl om at sløjfe posefilteret mellem cyklonen og scrubberen. Vurderingen fra Arne er, at det vil give alt for meget støv og slam, der kan sætte sig i både røggassystemet og i vandsystemets pumper og veksler. Det vil betyde ekstra drift og vedligehold på de dele, Anlægsomkostningerne ved udvidelsen af bundfældningssystemet er meget lave og daglig drift omkring tømning bliver nemmere.

3.3 Vaarst-Fjellerad Kraftvarmeværk

I 2016 har Vaarst-Fjellerad Kraftvarmeværk installeret et 1 MW flisfyret anlæg. På røggassiden er anlægget udstyret med både cyklon, posefilter samt en røggasvasker. Vaskeren er udført i korrosionsfast materialer (plader AISI 304/316 og rør SAF 2205).

Den består af 4 trin:

Trin 1 Består af et spray-kammer hvor røggassen nedkøles til dugpunktet ved tilsætning af vaskevand. Vaskevandet optager støvpartiklerne og røggassen er klar til rensning og yderligere nedkøling.

Trin 2. Den vandmættede røggas ledes til vaskerens vandkølede centerrør ved høj hastighed. Centerrøret tjener som cyklon og udskiller grovpartiklerne. Ved bunden af det 4 m høje center-rør, ledes røggassen via en røgkanal til vendekammeret på toppen af vaskertårnet.



Trin 3. I topvendekammeret tilsættes der igen vaskevand til røggassen for at binde de resterende støvpartikler. Efter vandtilsætningen ledes røggassen gennem et lodretstående vandkølet rørbundt. Under passagen ned gennem rørbundtet sker der på samme tid en støvudskilning og vanddampkondenseringen. Køling af rørbundtet sker med fjernvarmenet-tets returvand. Den enkle varmetransmissionsform sikrer en minimal temperaturdifferens mellem røggas og fjernvarmevand.

Trin 4. Fra bunden af vasketårnet ledes rengassen til en dråbeudskiller bestående af 5 prel-plader. Øverste vandlag i bundkarret anvendes som vaskevand, som via en pumpe sendes til spray-dyserne.

Billede fra Lin-ka af vasketårnet i Vaarst-Fjellerad Højde 6.850 mm, Diameter 2.385 mm

⁴ https://www.energy-supply.dk/article/view/480154/fjerritslev_fjernvarme_taber_sag_i_hojsteret

Under vasketårnet er der placeret et bundkar, som er en integreret del af vasketårnet. Bundkarret tjener som beholder for kondensat og vaskevand samt som bundfældningstank af de udvaskede støvpartikler. Fra bunden af karret pumpes de udfældede partikler og kondensat til spånfilter bestående af 2 kar fyldt med træspåner. Inden udledning til kloak filtreres kondensatet i et kulfilter og pH-værdien justeres med tilsætning af lud.

Der vil fremover blive gennemført forsøg med at reducere nogle af trinene i kondensatfilteranlægget.

3.4 Østerlars halmvarmeværk

Anlægget er forsynet med en 4 MW halmkedel. Med røggaskondenseringen bliver ydelsen på 4,4 MW. For halmfyrede anlæg er erfaringen fra bl.a. værket i Østerlars, at der kan spares 10 % på brændslet ved kondensering. Desuden er der en besparelse på svovlafgiften for et typisk halmfyret værk på 2 MW på omkring 50.000 kr/år. Nettoafgifter er p.t. på 17,7 kr./ton halm.

Baseret på erfaringer fra halmvarmeværkerne i Øster-Toreby og Høng har man beholdt posefilteret, som fanger kaliumklorid og cadmium. Det minimerer risikoen for tæring, og kondensatet fra røggasveksleren er så rent, at det kan hældes i kloakken. For at undgå korrosion anvender man plastrør og vekslere af titanium i stedet for rustfrit stål. Det minimerer risikoen for tæring og reducerer udgifterne til vedligeholdelse.

På anlægget i Øster-Toreby er der med støtte fra Dansk Fjernvarme og EFP-programmet gennemført et måleprogram, som dokumenterer, at det lever op til forventningerne: Røgen renses effektivt for partikler, saltsyre og svovlsyre, og kondensatet er rent. Som en tillægsgevinst tilbageholder anlægget 90 procent af svovldioxiden, hvis pH-værdien holdes på et bestemt niveau. Der opnås en næsten komplet svovlrensning, og når der på et tidspunkt kommer skærpede krav om reduktion af kvælstofoxider, vil anlægget ligeledes være nyttigt idet der kan tilbageholdes overskydende ammoniak, som blæses ind i kedlen for at reducere mængden af kvælstofoxid.

I dag kan varmeværkerne dog ikke slippe for at betale svovlafgift, selv om de ikke udleder svovl til omgivelserne. Myndighederne stiller krav om, at der installeres måleudstyr, som dokumenterer effekten på det enkelte anlæg, og det udstyr er så kostbart, at det er billigere at betale afgiften.

Man forventer at reglerne vedr. svovlsafgiften bliver ændret til gavn for mindre halmvarmeværker med røggaskondensering.

I år med meget regn i sæsonen hvor halmen bjærges, kan der være problemer med at få halm nok med max 15 % fugtindhold. Det nye varmeværk i Østerlars er derfor udformet, så det kan brænde halm med et vandindhold på op til 30 %. Der er valgt en særlig udformning af kedlen, så halmen ikke klumper sammen, selv om den har fået for meget vand. Med røggaskondensering har det ikke nogen betydning for energiudbyttet, så Bornholms Forsyning har været indstillet på at betale lidt ekstra for at få en kedel, der er mere fleksibel, hvad angår fugtindhold.

Kilde:⁵

⁵ www.biopress.dk/PDF/FiB_40-2012_01.pdf/at_download/file

4 Føns Nærværme

Varmecentralen er indbygget i en staldbygning med 2 x 200 kW flis-kedler. Anlægget startede i 2015 og leverer ca. 1000 MWh. Kedlerne var oprindeligt indstillet til afbrænding af flis med ca. 30% vand. Der er nu ændret i styringen så anlægget kan brænde flis med over 40% vand. Kedlen kan holde en rimelig virkningsgrad, men med mindre ydelse, når vandandelen i flisen stiger.

Da kedelcentralen er bygget ind i en eksisterende bygning med normal loftshøjde, ønsker Føns Nærværme en løsning med et kondenseringsaggregat i centralens rum, som er så lav som muligt - helst under 2,3 m.

Den ene af semestergrupperne fra AAMS er kommet med et forslag til en scrubber til Føns (se afsnit 7.1). Projektgruppen er kommet frem til en lidt anden løsning end de studerende. Hvis scrubberen kunne blive en del af skorstenen, kunne det være en interessant løsning, da det vil minimere føringen af røgrør. En ny skorsten i rustfrit eller syrefast stål er nok stadig billigere hvis man kan indbygge en scrubber i den. Der er i dag separate skorstensrør til hver kedel med en indvendig diameter på 300 mm. Selve skorstenen er 8,5 m høj, og bunden er ca. 2 m over gulv.

Der har bl.a. været kontakt til firmaet Ammongas,⁶ der har udviklet scrubbere til forskellige former for rensning af luft, men Ammongas har ikke før lavet scrubbere til biomassekedler. Det hænger sammen med røgens beskaffenhed med mange partikler, som kan tilsvine fyldlegemerne. Desuden, er drifttemperaturerne på biomassekedler kritisk høje, hvis der skal anvendes en plast-scrubber.

Ammongas foreslår en scrubber til ca. 1.000 m³/h ved 150 grader vil have en diameter på 400-500 mm. Hvis der med plast forstås en polyolefin, vil den kunne gøres billigere end RS stål, hvorimod en glasfiberarmeret type vil blive dyrere.

Alle typer plast er for så vidt gode til det kemiske miljø, men hvis der bare er et lille område, der ikke får vand, vil det ikke kunne klare 150 grader, så det bliver nødt til at være RS 316L.

Foruden selve svøbet med flanger og skueglas m.v. skal der bruges:

- en rist,
- væskefordeler / dyse, pakning,
- Cirkulationssystem med armaturer og pumpe
- + evt kemikalie dosering.

Hertil kommer engineering, montage, tilslutninger og opstart + indkøring. Fyldlegemerne er det, der kaldes pakning. Som højde foreslår Ammongas en paknhøjde på ca. 4 m. Hvilket i praksis betyder, at selve scrubberen bliver ca. 6 m høj. I den forbindelse betyder det noget for funktionen, om der skal være en demister i, og hvilken type. Samt om afgangsen skal være ud på siden eller i toppen, evt. i forbindelse med en kegle.

Ren indkøb vil udgøre ca. 150.000,- og salgsprisen ca. 300.000,-. Hertil kommer så evt. særlige anordninger p.g.a. tjære m.v. Ammongas kan også udføre scrubbere i rustfast stål, men det bliver dyrere.

⁶ <http://www.ammongas.dk/skrubbere/>

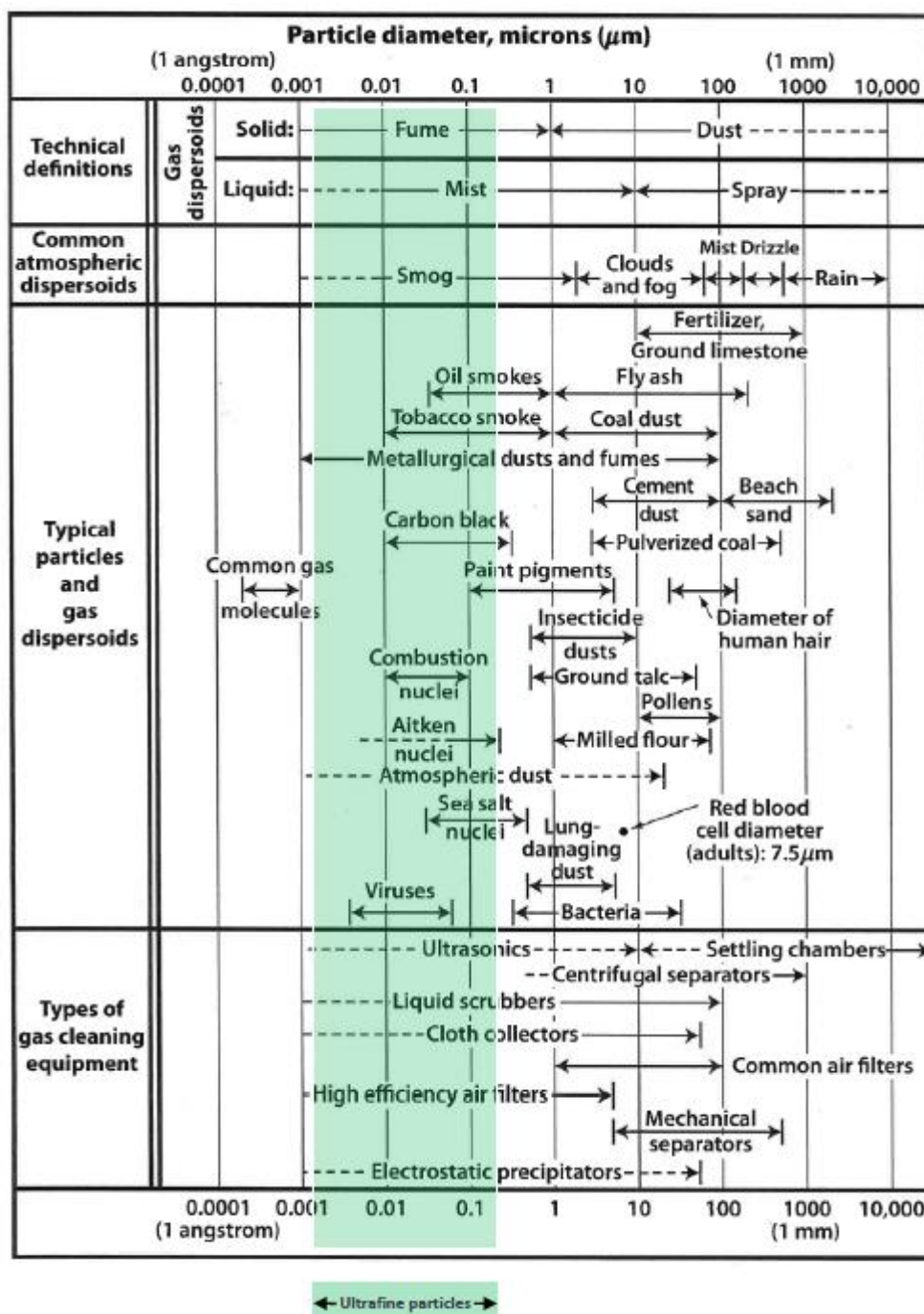
Med dette input fra Ammongas vil projektgruppe foreslå, at der arbejdes videre med en løsning for Føns anlægget, hvor skorstenen bygges om, så den nederste del af skorstenen er scrubberen, og at røggassen går direkte op i skorstenen derefter. Der skal laves et lidt større hul i loftet i kedelrummet, så scrubberen kan gå op igennem loftet. Det skal overvejes, om skorstenen skal hvile på scrubberen, der i så fald skal udføres i stål. Eller om skorstenen kan bæres i loftskonstruktionen, hvis det vil være en fordel at udføre scrubberen i plast.

I projektforløbet har der også været dialog med KSM-stoker, som også anser det for realistisk at designe og fabrikere en scrubber til Føns indenfor et beløb på 300.000 kr.

I Føns Nærværme har de en årlig udgift til flis på 250.000 kr./år. Hvis virkningsgraden på systemet forbedres med 14% giver det en årlig besparelse på 35.000 kr. Det svarer til en simpel tilbagebetalingstid på 9 år ved en investering på 300.000 kr. Da der vil være en smule øgede udgifter til pasning mv. anses de 300.000 kr. for at være et absolut loft for investeringen.

5 Forrensning af røggas

Dette afsnit bygger på tekst og figurer fra projektet: "INDUSTRIELLE PARTIKELFILTRES EFFEKTIVITET OVER ULTRAFINE PARTIKLER" kilde ⁷



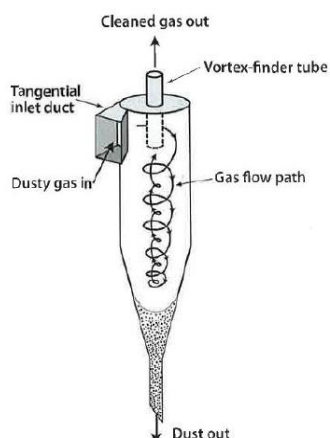
Figur 3. Typiske størrelsesintervaller for forskellige partikeltyper. Den nederste del af figuren viser hvilke størrelser, der typisk fjernes af almindelige separationsteknikker.

⁷ Kilde: <https://inno-mt.dk/projects/industrielle-partikelfiltres-effektivitet-over-ultrafine-partikler/>

En given rensningsteknologis evne til at fjerne partikler afhænger af en lang række faktorer. Ud over det specifikke design af teknologien afhænger rensningseffektiviteten af partiklernes størrelse, sammensætning og egenskaber. Desuden vil den matrix, partiklerne forekommer i, ofte spille en afgørende rolle i valget af en egnet teknologi – dvs. om der f.eks. er tale om partikler i varm og vandholdig røggas, eller om der er tale om partikler i en procesluft ved lavere temperaturer og med et vandindhold under dugpunktet. Det er derfor ikke altid muligt at give nogen alment gældende angivelse af, hvorvidt en bestemt rensningsteknologi er egnet eller uegnet til fjernelse af ultrafine partikler. Som hovedregel vil det dog kunne forudsiges, om en given separationsteknik vil være egnet til at fjerne ultrafine partikler fra en given matrix.

5.1 Cykloner

En udbredt teknik til reduktion af partikelemissioner er cykloner, hvor den partikelholdige røggas tangentielt ledes til en cylinder eller et konisk kammer. Figur 4 viser cyklonens virkemåde. Den rensede røggas ledes ud via et center placeret i toppen af cyklonen. Partikler med tilstrækkelig stor inertie – dvs. med tilstrækkelig stor diameter og densitet – blive ledt til ydersiden af svøbet og accelereret, samlet og til sidst falde ned i en opsamlingsbeholder i bunden af cyklonen. Man kan som tommelfingerregel sige, at cyklonen virker bedre desto højere flowhastighed, der er i cyklonen og desto større (og tungere), partiklerne er.



Figur 4. Skematisk visning af cyklonens virkemåde.

Cykloner benyttes primært til partikelseparation i tør form, røggas eller produktionsafkast med et stort indhold af store partikler. Der kan være tale om foderstof, cement, jordrensningsanlæg, shredder-anlæg og tilsvarende, men cykloner anvendes også til reduktion af væsker (dampfæner). Ofte benyttes cykloner i kombination med andre rensningsteknikker, idet cykloner indsættes som det første rensningstrin af flere.

Cykloner bruges typisk til at fjerne partikler, der er større end 50-100 μm . I visse tilfælde benyttes industrielle cykloner, som kan fjerne partikler ned til 10 μm , men dette kræver at cyklonens størrelse reduceres, og dermed cyklonens "cut size", som er defineret som den partikelstørrelse, hvor cyklonen har en effektivitet på 50%. Man kan imidlertid ikke gøre en cyklon vilkårligt lille, idet det da vil kræve et stort energiforbrug at suge eller presse luften igennem den. For på én gang at have lille diameter og et ikke for stort trykfald, kan man fordele røggassen ud på et stort antal små cykloner, såkaldte multicyclonanlæg der er sammenbyggede enheder med tangentielt eller aksialt indløb. Sådanne multicyclonanlæg fås som færdigmonterede enheder, men

deres effektivitet som eneste støvudskiller er for ringe efter nutidens krav, idet de sjældent kan præstere lavere støvkonzentrationer end ned til nogle hundrede mg/Nm³ tør røggas.

Cykloner er et af de "billigste" systemer til reduktion af store partikler, både investeringsmæssigt og driftsøkonomisk. Cykloner fjerner ikke ultrafine partikler, men kan bruges til at udskille større partikler i kombination med andre reduktionssystemer.

Eksempel på leverandører: <http://www.rr-beth.com/en/cyclones.html> og <http://www.acsystems.pt/technologies/hurricane>

5.2 Tekstilfiltre

Tekstilfiltre i industrien er hyppigt udformet som posefiltre eller konvolutfiltre. Sidstnævnte benyttes primært ved komfort-ventilation, men også med visse begrænsninger i industrien, hvor de ofte dækker behovet for partikelfiltrering. I de tilfælde, hvor der ønskes en meget effektiv tilbageholdelse af alle partikelstørrelser, anvendes absolutfiltre (HEPA, High Efficiency Particulate Air Filter). Absolutfiltre er designet til at fjerne alle partikelstørrelser og anvendes hyppigt i for eksempel medicinalindustrien i forbindelse med indblæsning af ventilationsluft til renrum, og kun i sjældne tilfælde til reduktion af procesluft til atmosfæren. I det følgende gives en kort beskrivelse af posefiltre, som er den mest udbredte form for tekstilfilter til fjernelse af partikler i industrielle emissioner.

Industrielle tekstilfiltre produceres blandt andet af Simatek A/S, Nederman A/S, og Donaldson A/S. Tekstilfilteret vil altid blive designet til den enkelte applikation, afhængig af temperatur, flow, trykforhold, vandindhold samt af type, koncentration og størrelsesfordeling af partiklerne.

Partikler opsamles i tekstilfiltre ved overflade- eller dybdefiltrering. Ved overfladefiltrering bygges en filterkage op på ydersiden af filtermaterialet, hvor partiklerne virker som filtermateriale. Filterkagen øger effektiviteten, ikke mindst over for UFP, idet der opnås større mulighed for afsætning ved diffusion og interception af de mindste partikler, når de skal passere igennem en kage af tæt pakke partikler. Når filtrene renses, ønskes der at reducere filterkagens tykkelse for at mindske tryktabet over filteret. Der vil oftest ses en lavere effektivitet umiddelbart efter rensning end ved filtre, der har været i drift over et stykke tid, og derved har opbygget en filterkage. Dette gælder især over for UFP.

Eksempel på en leverandør : <http://filtersupport.dk/da/roeggas-filtrering/>

Viktor Jensen fra DFP har følgende anbefalinger ved valg af posefiltre: (Kilde ⁸)

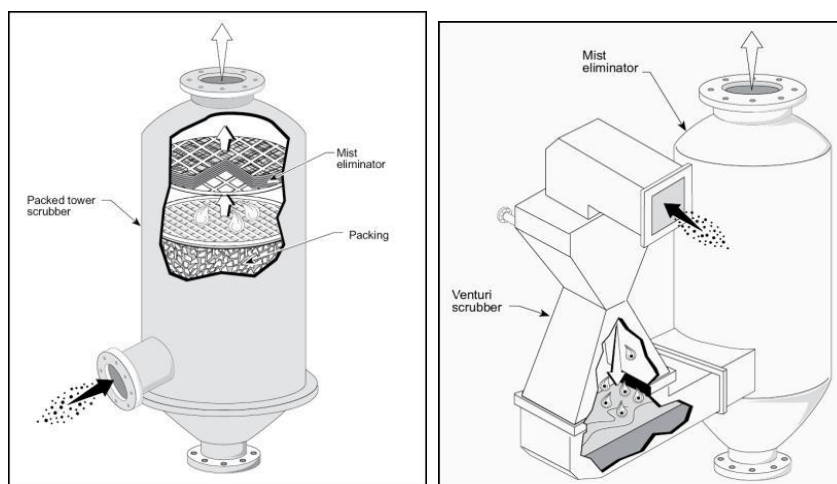
- Posefiltre er det billigste - men ikke nødvendigvis i længden
- Alle oplever filterbrande på grund af gnister eller skader p.g.a. for høj røggastemperatur.
- Risiko for tilstopning af posefiltre ved kondens som følge af fugtigt brændsel eller start/stop drift på anlægget.
- Vores valg er elektrofiltre til træfyrede anlæg og posefiltre med ikke brændbare poser til de halmfyrede anlæg.

⁸ <http://www.danskfjernvarme.dk/-/media/danskfjernvarme/kurser-moder/modematerialer/erfamoeder/2016-maj-faellesmoede-for-halm-og-flisgruppen/el-og-posefiltre-set-i-lyset-af-de-nye-emissionskrav.pdf>

- Begge dele er dyrere end et standard posefilter, men meget billigere i drift og med mindre tilsynsbehov.
- Set over tid vil investeringen i det driftssikre filter kunne betale sig.

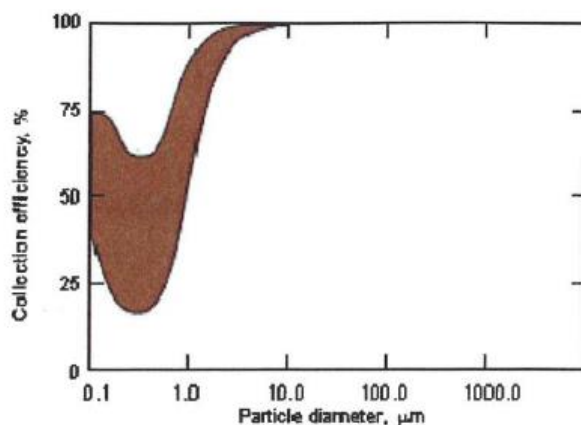
5.3 Vådscrubbere

Der findes mange typer af vådsrubbere, men de bruger alle det samme princip for partikeladskillelse: Vanddråber introduceres til den partikelholdige gas, og partiklerne adskilles primært ved impaktion. Dette er ensbetydende med, at scrubbere ofte har en god effektivitet over for partikler $> 1 \mu\text{m}$, hvor impaktion er effektivt på grund af partiklernes inertie, men at det samtidigt kan være vanskeligt at fjerne de ultrafine partikler, som følger gasstrømmens bevægelser og derfor vil "sno sig" uden om vanddråberne.



Figur 5. Eksempler på vådsrubbere: traditionel vådsruber med fyldlegemer (tv.) og vådsruber med venturidyse til øget fjernelse af små partikler (th.).

Generelt vurderes effektiviteten for fjernelse af partikler $< 1 \mu\text{m}$ at være lav for vådsrubbere. For partikler $< 300 \text{ nm}$ vil interception og diffusion medføre en vis afsætning af partikler til dråberne i scrubberen. Opsamlingseffektiviteten som funktion af partikelstørrelsen illustreres af Figur 6.



Figur 6. Typiske opsamlingseffekter (efter masse) som funktion af partikelstørrelse, angivet for vådsrubbere.

En forbedret fjernelse af partikler $< 1 \mu\text{m}$ kan opnås ved at øge hastigheden af den partikelholdige gas i en venturidyse, der placeres før scrubberen, jf. figur 5. Hvorvidt diffusion påvirker partiklerne, vil afhænge af, om der kan skabes en koncentrationsgradient for ultrafine partikler i den partikelholdige gas. Med andre ord skal dråberne virke som en "absorbent" for de ultrafine partikler, sådan at koncentrationen lige over overfladen af dråberne bliver meget lille. Dette vil især kunne skabes for partikler bestående af hydrofile stoffer (f.eks. NaCl eller svovlsyredråber), og/eller ved introduktion af dråber med lav temperatur i en varm røggas. I sidstnævnte tilfælde vil thermoforese kunne medføre en øget afsætning af de ultrafine partikler på dråbernes overflade, og dermed en forbedret effektivitet for ultrafine partikler.

Eksempel på en leverandør: <https://www.purenviro.com/en/products/scrubber>

5.4 Elektrofiltre

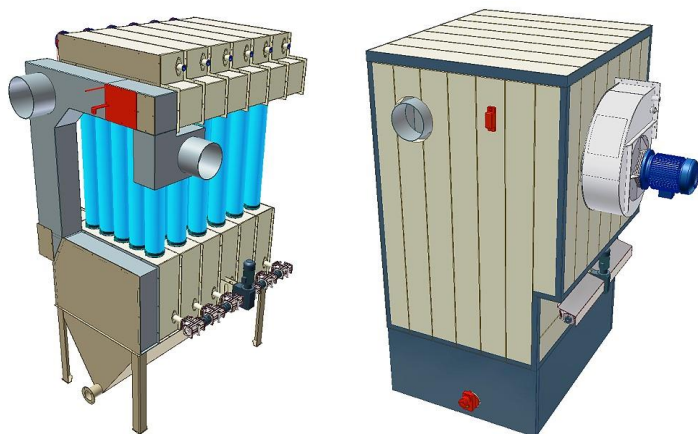
I et elektrofilter lades partiklerne i et kraftigt elektrisk felt. Feltet er dannet mellem den negative elektrode med en højspænding på 20 kV til 80 kV og en udfældningselektrode.

Opladningen af en støvpartikel begynder med indgangen i rummet af en såkaldt sprayelektrode, som er ladet meget stærk negativ. Elektroner støder på gasatomer, som de ioniserer. Der ved opstår der negative elektroner og positive ioner mellem elektroderne. Under feltopladning rammer gasionerne støvpartiklerne og oplader dem indtil mætning opstår. For meget små partikler ($d < 0,1 \mu\text{m}$) forsvinder indflydelsen af feltladning.

De ladede støvpartikler bevæger sig gennem den påførte elektriske kraft til opsamlingselektroden, hvor de frigiver deres ladninger. Da drivhastigheden til opsamlingselektroden er forholdsvis lav, skal filteret have en vis længde og må kun gennemstrømmes langsomt af den gas, der skal rengøres.

Efter at støvpartiklerne har frigivet deres opladning, er de bundet af klæbende kræfter, som i det væsentlige bestemmes af den elektriske feltstyrke inden for det klæbende støvlag.

Støvlaget, der dannes på opsamlingselektroden, skal rengøres med jævne mellemrum. Dette sker i de fleste tilfælde ved at banke med en hammermekanisme. Støvet opløses og falder ind i en samlingsbunker. En vis procentdel af støvpartiklerne medføres imidlertid igen af gasflowet, og skal oplades og adskilles. Kilde: ⁹



Billeder fra Meister Filter. Det mindste af deres filtre passer til en røggas mængde på 320-460 m³/h ved 200°C med et elforbrug på 120 W.

⁹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrofilter> og <http://www.meisterfilter.ch/elektrofilter/roehren-elektrofilter/>

6 Kondenseringsmetoder

Det er helt normalt at der sker kondensering når en fugtig røggas kommer i kontakt med en kold flade. Hvis temperaturen på fladen falder til under mætningspunktet for fugte vil der ske en kondensering af fugten. Når der er tale om korrosive gasser som i f.eks. røggas fra biomas-seanlæg kan dette kan give anledning til korrosion for visse materialer og bør derfor ske under kontrollerede forhold.

6.1 Spraykondensering

I scrubberen køles røgen med vand og fugten kondenseres på vandpartiklerne og falder ned i bunden af scrubberen. Dette princip kaldes dysse eller spray kondensering. Her sprays vand ud over røgen i meget fine vanddråber. Kunsten er, at holde vandpartiklerne svævende i luftstrømmen så de får tid til at interagere med røgen. Vandpartiklerne må dog ikke blive revet med luftstrømme op i scrupperen, men skal falde ned i bunden.

I scrubberen i Gjøel er første del af processen en spraykondensering i den røgkanal der leder til scrubberen (Quench). Inde i scrubberen fanges vandet dog af fyldlegemer.

Principielt kan der godt designes en scrubber uden fyldlegemer, men det vil kræve fuld kontrol over røggasstrømmen og den udsprayedede væske. Fordelen vil være, at der ikke vil ske en tilsvining af fyldlegemerne.

6.2 Kondensering på fyldlegemer



Figur 7. Eksempel på fyldlegemer fra Christian Berner A/S¹⁰

Hvis der anvendes fyldlegemer skal der være en række overvejelser: ¹¹

1. De må have en stor overflade, som dækkes af væsken og skaber en god kontakt med gasfasen.
2. De må danne passende mellemrum, så begge strømme kan passere uden for store tryktab.
3. De må være kemisk og mekanisk modstandsdygtige.
4. De må kunne fås til en rimelig pris.

Der findes formler og vejledninger i hvordan befugtningen opnås mest effektivt. Det afhænger af fyldlegemernes udformning, væskestrøm og tårnets tværsnitsareal mv. Ved høje tårne kan

¹⁰ Kilde: <http://www.christianberner.dk/brancher/energiteknik/fyldlegemer-for-kolonner-plast>

¹¹ Kilde: L. Alfred Hansen og P. Søltoft: "Kemiske enhedsoperationer" Akademisk Forlag 1980. Side 324.

det være nødvendigt at opdele fyldningen i sektioner, f.eks. af 3-4 m højde, og foretage en ny fordeling af væsken over hver sektion. Ved design af scrubberen til de nævnte biomassekedler er det dog ikke sikkert at det bliver nødvendigt med mere end et lag.

Strømmen af røggas gennem tårnet må også have en passende størrelse, som navnlig afhænger af arten af fyldlegemerne og af væskestrømmens størrelse og i mindre grad af væskens viskositet. Hvis man tilfører en stadig stigende gasstrøm til et tårn, der berisles med en konstant mængde væske, vil tryktabet variere. Ved lave gashastigheder vil gassen passere igennem en del af hulrummene, der ikke er optaget af væske. Strømningen vil være turbulent, og der må derfor forventes, at tryktabet vil være tilnærmelsesvis proportionalt med anden potens af hastigheden. Ved det såkaldte belastningspunkt (loading point), er gashastigheden blevet så stor, at den begynder at hindre væskens nedadgående strømning. Væsken holdes delvist tilbage, og pladsen til gasstrømmen bliver mindre. Trykket stiger derfor hurtigere. Ved det såkaldte gurlepunkt (flooding point) holdes væsken så stærkt tilbage, at den opsamles som et sammenhængende væskelag i fyldningen. Trykket må stige brat for at presse gasstrømmen i form af bobler igennem dette lag.

Hvis væskestrømmen forøges vil gurlepunktet indtræffe ved en lavere gashastighed. Derfor er forholdet mellem væskestrøm og gasstrøm af betydning. (se mere i ¹² eller tilsvarende litteratur).

¹² Kilde: L. Alfred Hansen og P. Søltoft: "Kemiske enhedsoperationer" Akademisk Forlag 1980. Side 329.

7 Varmepumper

7.1 Absorptionsvarmepumpe

En absorptionsvarmepumpe bruger i fjernvarmesammenhæng hedt vand til at flytte den ikke brugbare energi op til et højere temperaturniveau.

En absorptionsvarmepumpe er ikke specielt afhængig af COP, idet denne i fjernvarmesammenhæng normalt ligger mellem 1,65 og 1,75 – typisk 1,7.

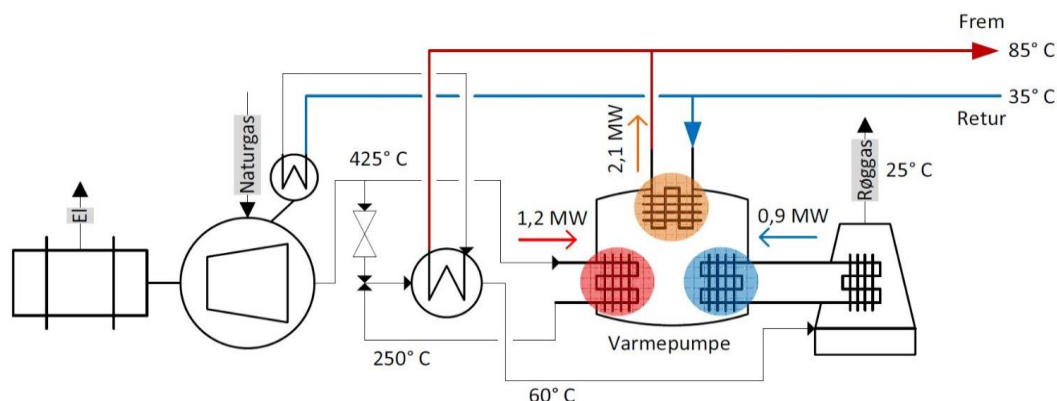
Det er vigtigt for en absorptionsvarmepumpe, at drivenergien (hedt vand) har så høj en temperatur som muligt, dog max. ca. 170 °C.

Jo højere drivenergi temperatur (hedt vand), jo højere COP.

Jo højere drivenergi temperatur, jo højere fjernvarme fremløbstemperatur.

Jo højere drivenergi temperatur, jo mere kan man udnytte af den ikke brugbare energi.

En absorptionsvarmepumpe kan ikke udnytte varmekilder med en temperatur under 4 °C, ligesom en absorptionsvarmepumpe ikke kan få en fremløbstemperatur over 70 °C eller over varmekildetemperaturen plus 50 °C. Kilde: Tjæreborg Industri ¹³

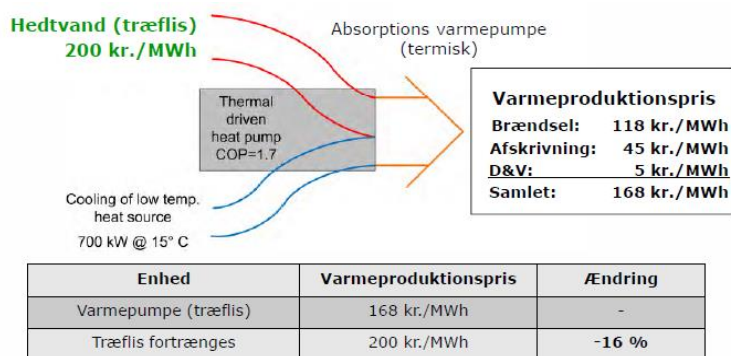


Figur 8. Principskitse over absorptionsvarmepumpe til røggaskondensering på motoranlæg. Kilde Teknologisk Institut og Energistyrelsen ¹⁴

Figuren er fra en præsentation som Energistyrelsen holdt på et kursus hos Dansk Fjernvarme. I samme præsentation er der en liste over de varmegværker der i 2013 havde fået installeret en absorptionsvarmepumpe. Der var 6 værker som fyrer med flis eller træpiller hvor varmekilden var røggas. Drivtemperaturen ligger mellem 100 og 150 °C på de værker.

¹³ Kilde: <https://www.tji.dk/index.php/energi-fjernvarme/varmepumpe/>

¹⁴ Kilde: <https://ens.dk/sites/ens.dk/files/varme/inspirationskatalog.pdf>

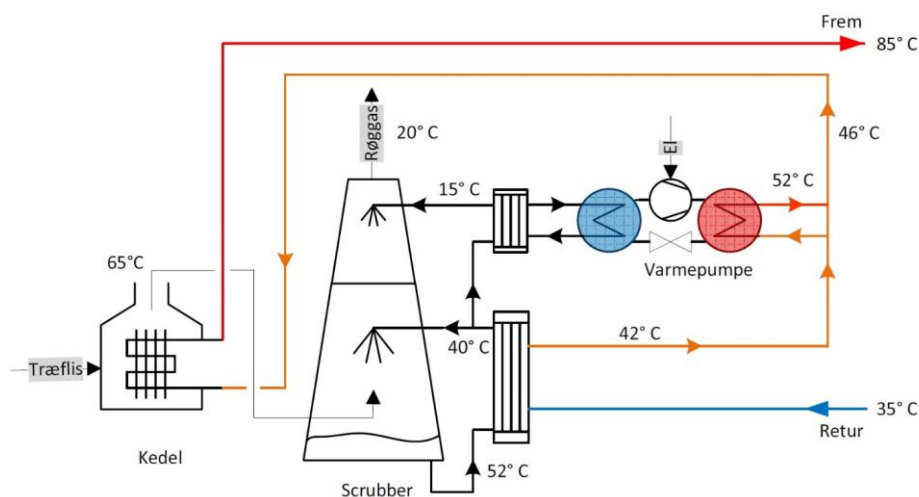


Figur 9. Økonomiberegning ved absorptionsvarmepumpe på fliskedel. Kilde: Energistyrelsen ¹⁵

Energistyrelsen konkluderer i præsentationen, at absorptionsvarmepumper på biokedler er en god ide på større værker, men kun "måske" en god ide på mindre værker.

7.2 Kompressor varmepumper

På Vejen Varmeværk har man to varmepumper der køler på røggasserne fra to fliskedler. Begge varmepumper er 40 bars ammoniakvarmepumper, som typisk har en maksimal fremløbstemperatur på ca. 70° C. Typen er derfor bedst egnet til fjernvarmesystemer med lav fremløbstemperatur eller i kombination med øvrige enheder, hvor varmepumpen ikke leverer direkte til fremløb. I Vejen er varmepumperne altid i drift med de tilhørende fliskedler, og varmepumperne forvarmer derfor kun fjernvarmevandet inden det ledes til kedlerne. Inden fjernvarmereturen ledes til varmepumperne, har vandet allerede været igennem varmeveksleren til scrubbervandet, så dette har så lav en temperatur som muligt, og effekten af scrubberen ikke reduceres. Varmepumpernes kolde sider er koblet til et sekundært trin på scrubbervandet så kun en delstrøm afkøles. Havde varmepumperne kølet hele mængden af returvand, skulle køleeffekten være langt større og den bortkølede energi vil ikke blive indvundet i scrubbertårnet.



Figur 10. Principskitse af eldrevet varmepumpe koblet til scrubbestårn på fliskedel. Kilde Teknologisk Institut.

¹⁵ Kilde: <http://www.danskfjernvarme.dk/-/media/danskfjernvarme/kurser-moder/modematerialer/erfamoeder/2015-10-nov-faellesmoede-for-halm-og-flisgruppen/varmepumper-ifm-biomassekedler--bjørke-paaske-energistyrelsen.pdf>

Fjernvarmereturen ledes først igennem en pladevarmeveksler, hvor varme fra scrubbevandet overføres til fjernvarmevandet. Scrubbevandet afkøles herved fra 52° C til 40° C, imens fjernvarmevandet opvarmes fra 35° C til 42° C. Efter pladevarmeveksleren deles scrubbevandet, så en delstrøm ledes til scrubberen, mens en anden delstrøm ledes gennem endnu en pladevarmeveksler og afkøles til ca. 15° C af varmepumpen. Herefter indsprøjtes det kolde scrubbevand øverst i tårnet. Scrubberen er inddelt i to temperaturtrin som passer til røggassens aftagende temperatur. Varmepumpen afgiver varmen til en delstrøm af det forvarmede vand, som opvarmes fra 42-52° C. Herefter samles hovedstrømmen igen og temperaturen øges til ca. 46° C. Årsagen til, at det kun er en delstrøm som opvarmes er, at varmepumpens varmevekslere ikke er dimensioneret til hele flowmængden.

De to varmepumper har en COP på omkring 5,2. Vedligehold af varmepumperne andrager 15 kr./MWh-varme. Investeringen for de to varmepumper var 3,5 mio.kr. Der er en simpel tilbagebetalingstid på 6,5 år. Kilde¹⁶

Varmepumper på fliskedler - 1.100 kW		
Investering	3.500.000	kr.
Årligt antal driftstimer	5.500	timer
Årlig varmeproduktion	6.050	MWh
Driftsbesparselse pr. MWh	20	kr./MWh
Driftsbesparselse med halm marginal	121.000	kr./år
Årligt antal driftstimer m. gas marginal	1.000	timer
Årlig varmeproduktion	1.100	MWh
Driftsbesparselse pr. MWh	380	kr./MWh
Driftsbesparselse med gas marginal	418.000	kr./år
Samlet årlig driftsbesparselse	539.000	kr./år
Simple tilbagebetalingstid	6,5	år
Intern rente over 15 år	13	%

Tabel 3. Økonomi for varmepumper på Vejen Varmeværk

¹⁶ <https://ens.dk/sites/ens.dk/files/varme/inspirationskatalog.pdf> side 12

8 Semesterprojekt, markedsundersøgelse

I første semester 2017 har 2 grupper studerende fra Aarhus Maskinmesterskole gennemført et projekt med hovedvægten på en markedsanalyse for scrubber anlæg. I det følgende er der henvist til rapporter fra gruppe C og D.

8.1 Potentiale for røggaskondensering på mindre anlæg

Dansk Fjernvarmes statistik for 2015:	
Halmfyr < 1 MW	9 værker
Halmfyr 1-2 MW	4 værker
Flisfyrede < 1 MW	5 værker
Flisfyrede 1-2 MW	12 værker

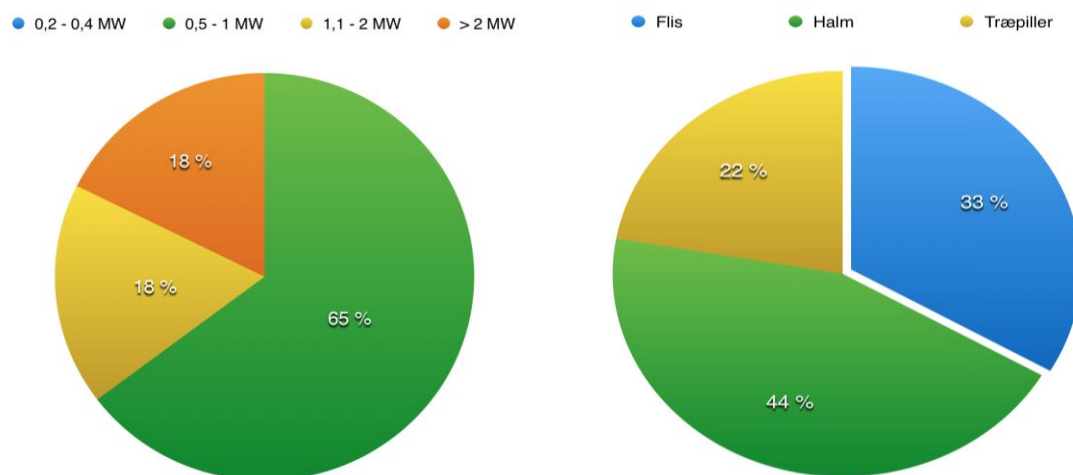
Tabel 4. Mail fra Kate Weick-Hansen fra Dansk Fjernvarme vedr. status for mindre biomasse anlæg på fjernvarmeværker.

Disse tal er fra Dansk Fjernvarme. Der vil være en række kedler på institutioner og andre større forbrugere, som ikke indgår i ovennævnte data.

Antallet af mindre biomasse anlæg på fjernvarmeværker er måske ikke så højt, men der er i fjernvarmebranchen traditionelt en rimelig høj fokus på effektivitet og derfor må det forventes at mange af disse værker må være interesserede i scrubberanlæg, der kan øge virkningsgraden med 10-14 %, hvis investeringen er rimelig.

I de seneste år har 85 små naturgasfyrede kraftvarmeanlæg fået tilladelse til at opføre supplerende forsyningsanlæg med biomasse. Disse anlæg er på 1-2 MW (max 8.000 MWh/år), og de kunne være relevante med supplerende røggaskondensering, da det ville kunne hæve deres ydelse med de 10-14% og dermed fortrænge mere naturgas. Det er således ikke relevant at hæve deres ydelse, når de kun må producere 8.000 MWh om året – men det vil klart være relevant at hæve deres virkningsgrad, så de ikke skal bruge så meget brændsel på at producere de 8.000 MWh.

Maskinmesterskolens gruppe C havde udsendt et spørgeskema og fået 17 besvarelser retur fra mindre fjernvarmeværker.



Figur 11. Fra gruppe C's spørgeskemaundersøgelse. Fordelingen af værker på indfyret effekt, t.v. og fordelingen af brændsel på værkerne, t.h..

I hvor høj grad kunne I være interesserede i et røggaskondenseringsanlæg, hvis hele anlæggets virkningsgrad herved kunne forøges væsentligt?

	Slet ikke	Overvejende Nej	Sansynligt	Overvejende Ja	Helt sikkert	I alt	Vægtet gennemsnit
★	11,76% 2	0,00% 0	17,65% 3	29,41% 5	41,18% 7	17	3,88

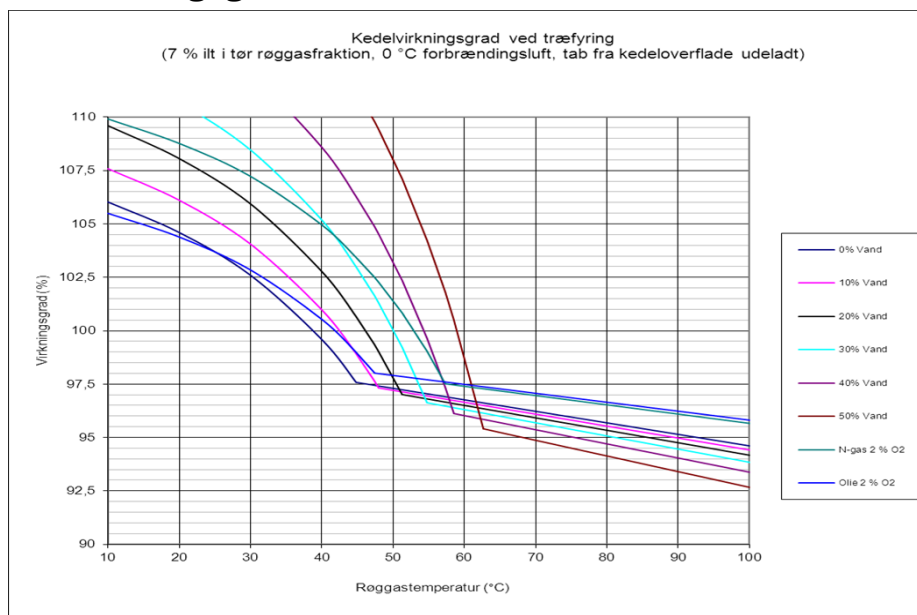
Tabel 5. Fra gruppe C's spørgeskemaundersøgelse.

Resultatet af gruppe C's spørgeskemaundersøgelse viser at der ser ud til at være et potentiale og interesse blandt de mindre værker. Der ses både et antal værker under 1 MW og fordelingen af brændsel viser at der er en næste ligelig fordeling mellem værker der fyrer med halm og flis. Denne fordeling passer med statistikken fra Dansk Fjernvarme i tabel 4.

Maskinmesterskolens gruppe D havde i deres markedsundersøgelse kontaktet en række organisationer, fabrikanten og skoler for at få et overblik over hvor mange kedler der kunne være i den pågældende størrelse. Af de kontaktede er der i alt opgivet 94 anlæg under 2 MW. Af disse 94 anlæg har den danske virksomhed Linka oplyst 40 flisfyrede anlæg, dog placeret rundt i Europa. Derudover har Dansk Fjernvarme oplyst 23 flisfyrede anlæg samt 22 halmfyrede anlæg. Af de adspurgte efterskoler og højskoler er der fundet frem til 9 anlæg, hvoraf 5 er flisfyrede og 4 er med halm.

Det er således kun en producent der har svaret de studerende og da der er flere betydende producenter i Danmark vil antallet af anlæg sandsynligvis være større.

8.2 Virkningsgrader



Figur 12. Virkningsgrader ved flisfyring ved forskellige røggastemperaturer og fugtindhold.

Det ses af tabellen at hvis man f.eks. har flis med 40% fugt og i dag køler røggassen til 100°C vil virkningsgraden teoretisk ligge på 93,5%. Hvis røggastemperaturen køles ned til 40° i en scrubber vil virkningsgraden komme op på 108,5%. Altså en stigning på 15%-point.

8.3 Lovgivning mv.

Maskinmesterskolens gruppe D har beskrevet forhold som har betydning for etablering af scrupperanlæg.

”En af fordelene ved røggaskondenseringsanlægget er, at det vand som sprøjtes ned over røgen, optager en del af de for miljøet skadelige stoffer. Disse stoffer som separeres i systemets scrubber, skal deporteres et sted, da de ikke længere findes på gasform, men nu på fast form i stedet. Dette kaldes biomasseaske, og Biomassebekendtgørelsen definerer, at der findes et marked for salg af asken. Der vil typisk være en kontakt mellem kraftværk og et landbrug eller skovbrug. Herved findes altså for kraftværket en ”skjult indtægt” ved installation og brug af anlægget, i og med at asken kan sælges og bruges som gødning jf. Bioaskebekendtgørelsen kapitel 1 § 2. (Miljøstyrelsen, 2004)

Prisen på biomasseaske er fastlagt af Miljøstyrelsen, hvilket kan aflæses og beregnes i Miljøministeriets ”separation og genanvendelse af aske fra biobrændselsanlæg” fra 2004. Yderligere fremgår det også hos Miljøstyrelsen, at det forventes at der i fremtiden skal udarbejdes et projekt i samarbejde med Elsam i forbindelse med rensning af og vask af biomasseaske. (Miljøstyrelsen, 2004) (Retsinformation, 2008)

Når det kommer til den generelle lovgivning af mindre biomassefyrede kedler er der ifølge Teknologisk Institut typisk tale om tre sæt regler, som skal overholdes. Disse tre lovgivninger og bekendtgørelser er som følger:

8.4 Brændeovnsbekendtgørelsen

Bekendtgørelse om regulering af luftforurening fra fyringsanlæg til fast brændsels under 1 MW' fra Retsinformation omhandler de generelle miljøkrav, der stilles til de i markedsanalysen undersøgte anlæg.

Nedenstående udsnit viser grænseværdierne / emissionskravene opstillet for centralvarmekedler med effekt 0 - 1 MW. (Retsinformation, 2015)

Skulle mindre værker have problemer med at overholde disse værdier kunne en af løsningerne være at installere et røggaskondenseringsanlæg for at imødekomme de på nuværende tidspunkt stillede krav.

Det er miljøstyrelsen, der i henhold til kapitel 6 § 14 står for at føre tilsyn med at reglerne i §§ 3-6 og 8-10 overholdes. Mere enkelt oversat betyder dette at miljøstyrelsen har beføjelser til at sætte et værk ud af drift hvis ikke de miljømæssige krav i Bilag 2 er overholdt. Denne bekendtgørelse siger yderligere ifølge § 5, at de centralvarmekedler som ikke er masseproducerede eller som har installeret rensningsteknologi som ikke er serieproduceret, ofte vil kræve at skulle dokumenteres ved afprøvning i samarbejde med miljøstyrelsen. Her kan der som eksempel være tale om det rensningsanlæg, som er installeret på Gjøl Kraftvarmeværk, idet der fra værkets personale er lagt mange timer i at tilpasse produktet, således det ikke længere stemmer overens med det originale godkendte produkt.

8.5 Luftvejledningen

Luftvejledningen er udstedt af Miljøstyrelsen i 2001 og er nr. 2 af dets udgave. Den bygger på nogle grundlæggende principper om begrænsning af luftforurening.

Heri indgår blandt andet målinger af luftforurening, spildevand og støj. I og med at det fra besøget på Gjøl Kraftvarmeværk vides, at røggaskondenseringsanlægget nedsætter det samlede værks støjniveau for omgivelserne, kan det på dette punkt antages at miljøbeskyttelsesloven taler for en installation af røggaskondenseringsanlæg. (Nielsen, 2017)

På værket i Gjøl havde driftslederen endvidere ofte problemer med naboer, som klagede over larmen fra værket før installation af anlægget. Herved kan også opstå problemer med miljøstyrelsen, hvis folk eller virksomheder sender klager dertil, og som det blev beskrevet i tidligere afsnit, kan styrelsen lukke et værk ned, hvis de finder det nødvendigt grundet overtrædelse af lovgivningen.

Luftvejledningen introducerer derudover et begreb kaldet BAT, hvilket betyder Best Available Technique. Dette sætter et krav til en virksomhed om, at de skal gøre deres bedste for at undgå miljøskadelig udledning til omgivelserne omkring, og at en virksomhed har et ansvar for at fremme forebyggende foranstaltninger i henhold til både luft, lyd og vand. Et af punkterne i BAT-princippet omhandler "genanvendelse og genvinding", hvilket er hovedprincippet i røggaskondensering - nemlig genvinding af energi i røg, som normalt går til spilde. Et andet punkt i BAT er energiprincip, som også relaterer sig hertil. (Miljøstyrelsen, 2001)

Emissionsgrænseværdier for små anlæg < 1,0 MW					
	Træ og biomasse		Al fast brændsel		
	Undtagen halm				
			Nye krav		
	Hidtidige krav		år 2017	år 2018	
	10 % O ₂	13 % O ₂	13 % O ₂	13 % O ₂	
Partikler	300	218	40	30	mg/Nm ₃
SO ₂	-				mg/Nm ₃
NO _x	-				mg/Nm ₃
CO	500	364			mg/Nm ₃
OGC	-		150	120	mg C/Nm ₃

Emissionsgrænseværdier for mindre anlæg 1 - 5 MW					
	Træ og biomasse		Al fast brændsel		
	samt halm				
			Nye krav		
	Hidtidige krav		Træ	Halm	
	10 % O ₂	6 % O ₂	6 % O ₂	6 % O ₂	
Partikler	40/100	55/136	50	50	mg/Nm ₃
SO ₂	-		-	200	mg/Nm ₃
NO _x	-		500	500	mg/Nm ₃
CO	625	852	-	-	mg/Nm ₃
OGC	-				mg C/Nm ₃

Tabel 6. Emissions krav. Kilde: ¹⁷

8.6 Bygningsreglementet

Bygningsreglementet tager udgangspunkt i de særlige fysiske forhold, som er fastlagt for at de sikkerhedsmæssige foranstaltninger, der skal foretages for at et biomasse-fyringsanlæg kan tages i brug. Desuden stiller BR15 krav til installation og virkningsgrad, hvilket kommer på tale ved røggaskondenseringsanlægget. Når der er tale om biobrændselskedler, der mindst opfylder kedelklasse 3 i DS/EN 303-5, hvilket svarer til en kedel over 300 kW, er der særlige krav til virkningsgrad.

Disse virkningsgrader findes blandt andet hos energitjenesten, der fastsætter en værdi på mindst 85 % virkningsgrad, hvis den omtalte kedel har en effekt på 300 kW eller derover. (Bygningsreglementet, 2016)''

Støjgrænser er meget forskellige og fastsættes af kommunerne. I Gjørl er grænsen i erhvervsområdet 60 dB.

¹⁷ <http://www.danskfjernvarme.dk/-/media/danskfjernvarme/kurser-moder/modematerialer/erfamoeder/2016-maj-faellesmoede-for-halm-og-flisgruppen/el-og-posefiltre-set-i-lyset-af-de-nye-emissionskrav.pdf>

9 Semesterprojekt, design af mindre scrubbere

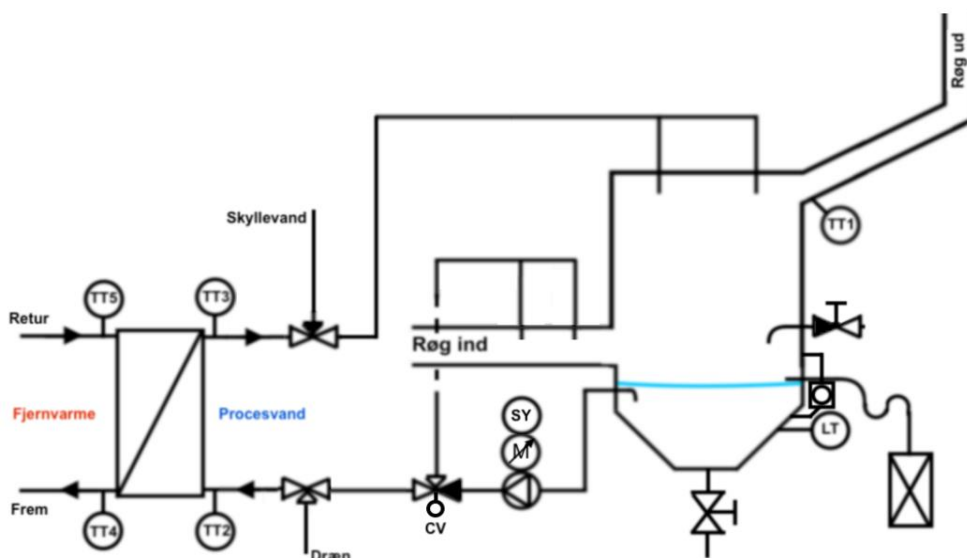
I andet semester 2017 har 2 grupper studerende fra Aarhus Maskinmesterskole gennemført et projekt med udformning af en røggaskondensator. I det følgende er der henvist til rapporter fra gruppe C og E.

Gruppe C har taget udgangspunkt i anlægget i Føns, hvor de er kommet med et konkret forslag til design og etablering af en røggaskondensator. Anlægget er tilpasset de lokale forhold på varmecentralen hos Føns Nærværme. Desuden har de omtalt lovgivning på området og forhold vedrørende dokumentation og test. Derudover har de tænkt over mulige alternative udformninger af en kondensator og placering i kedelrummet.

Gruppe E har taget udgangspunkt i den eksisterende røggaskondensator i Gjørl. Her har man diskuteret problematikkerne med Arne Nielsen. Anlægget med kedel, cyklon, posefilter og kondensator mv. er beskrevet. De er kommet med forslag til forenklinger af kondensatoren så den kan nedskalleres til mindre anlæg. Desuden har de beskrevet en simpel Quench-skrubber samt en scrubber opbygget i en kasse med indskudte plader i forskellige udformninger. Gruppen har også fået foretaget en test af partikler ved forskellige driftsformer.

9.1 Forslag til anlæg i Føns

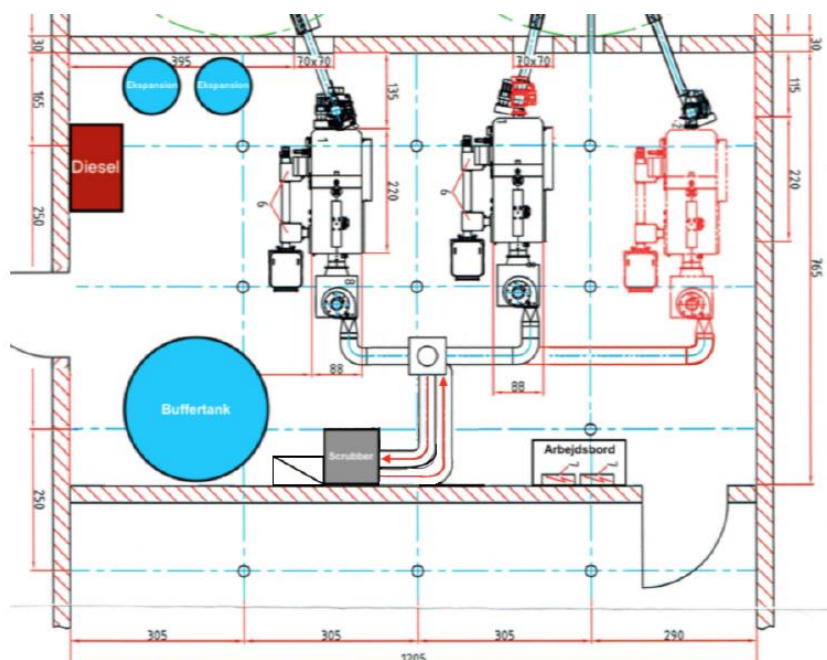
I rapporten fra gruppe C har man vurderet, at volumen på en scrubber til Føns til ca. $2,5 \text{ m}^3$ plus et bundkar på ca. 250 l. I det område af varmecentralen, hvor det er planlagt at placere scrubberen, er der i dag 2,3 m loftshøjde. Det er muligt at hæve loftet således at der er plads til en scrubber på 3,4 m.



Figur 12. PI-diagram for nyt anlæg, gruppe C.

Gruppen foreslå at scrubberen udføres som en kasse i syrefast stål med målene BxDxH 120x85x250 cm. På bunden monteres en tragtformet bundkar. Rør til overskydende kondensat monteres i en sådan højde, at vandspejlet står lige ved denne samling. Pladevarmeveksleren udføres i titanium så den er modstandsdygtig overfor korrosive elementer fra røggassen. Der

foreslås monteret en PLC-styringen som er forbundet til den nuværende styring således at stop/start signaler udveksles med denne.



Figur 13. Forslag til opstilling af scrubber ved væg ved siden af buffertank

Erik Olsen fra Føns Nærværme har følgende kommentarer til gruppe E's forslag: Reduktionsforslaget er meget nyttigt. Det var dog ønskeligt, om gruppen også havde overvejet påvirkningen af dimensionerne, hvis effekten blev reduceret fra Gjøls 1,5 MW til f.eks. 0,5 MW. Har det nogen indflydelse på den nødvendige højde? Eller kun på fladedimensionerne?

Der er brug for en simplere løsning end gruppe C behandler. Der kan hentes inspiration hos ideerne i gruppe E.

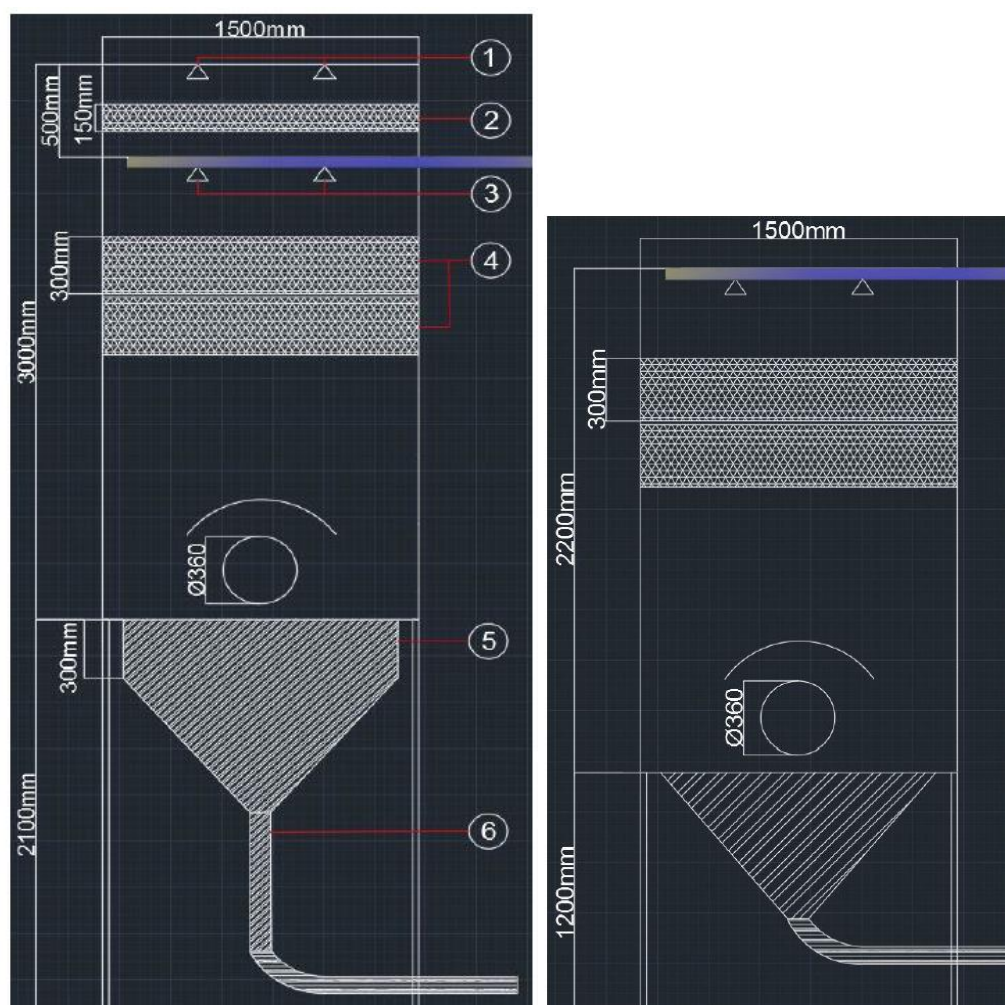
Arne Nielsen fra Gjølv PKV tror ikke på løsningen med Quench i Føns. Demisteren vil blive tilstoppet hvis ikke den overrisles.

Erik Olsen fra Føns: Hvis scrubberen kunne blive en del af skorstenen, kunne det være en interessant løsning, da det vil gøre os fri for at trække rørgrør hen til placeringen ved væggen. Hvis vi skal bruge en skorsten i rustfrit eller syrefast stål er det nok stadig billigere med ny skorsten, hvis vi kunne indbygge en scrubber i den. Der er i dag separate skorstensrør til hver kedel med en indvendig diameter på 300 mm. Selve skorstenen er 8,5 m høj, og bunden er ca. 2 m over gulv.

9.2 Designforslag 1 – Reduktion af eksisterende scrubber

Gruppe E har i deres rapport kommet med forslag til flere forskellige typer af kondenseringsanlæg.

Forslag 1 går ud på at fjerne topdyser samt øverste dråbefang. Desuden gøres sumpen mindre og afgangsrøret drejes.



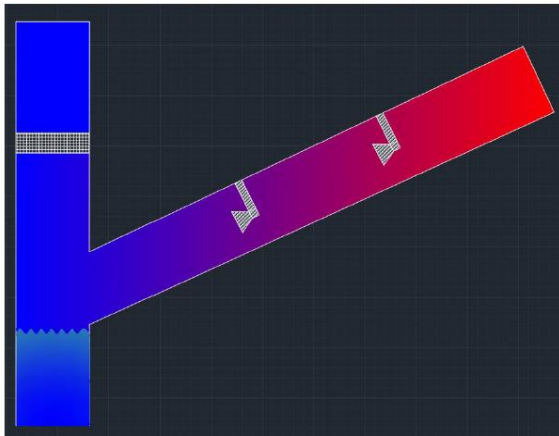
Figur 14. Tegning tv. Af den nuværende scrubber i Gjøl og th. forslag til reduceret scrubber. (gruppe E) 1: Topdyser, 2: Dråbefang, 3: Vaskevandsdyser, 4: Fyldlegemer, 5: Sumpen og 6: Afgangsrør.

Med de forskellige ændringer mindskes højden fra de nuværende ca. 5,1 m til ca. 3,4 m.

Den nuværende dyse i indgangs-røgrøret bibeholdes, da den største del af temperaturfaldet sker her. En mulig ulempe ved den lavere scrubber er, at røggassen vil opholde sig kortere tid i den, og derved blive mindre rensat. Der kan også være en problematik, at spredning af vaskevandet fra dyserne ikke bliver stor nok til at kunne dække hele arealet af fyldlegemet. Man kunne installere flere dyser eller en anden type med en bedre spredning,

9.3 Designforslag 2 – Quench-scrubber

Denne løsning har fokus på en simpel og prisbillig løsning med røggaskondensering, men meget lidt rensning.



Figur 15. Skitse af quench-scrubber.(Gruppe E)

Røggassen vil som det første i røret komme i kontakt med vaskevandet, som er ca. 45 gr. varmt. Dette vaskevand kommer fra stikledningen før varmeveksleren. Dette vil sænke røggastemperaturen til ca. 50 gr. Herefter kommer røggassen i kontakt med vaskevandet fra spiraldyse nr. to, som er 37 gr. varmt. Vaskevandet her kommer fra afgangens på varmeveksleren. I afgangsrøret kan der implementeres demister.

Det kan være en problematik i løsningen, at der ikke er fyldlegemer til at sikre god kontakt mellem vaskevand og røggas. Man kan risikere at noget af fugten ikke når at kondensere og frigive sin varmeenergi.

En anden problematik er, at den fugtige og nedkølede røggas kan være tungere, og det kan kræve en kraftigere røggassuger.

9.4 Designforslag 3 – Partikelmåling

Der er i denne løsning både fokus på rensning af røggassen og kondensering. Der er set på muligheden for at undgå posefiltre for at minimere omkostninger til drift og vedligehold. Posefiltre har desuden den ulempe at de fylder meget.

Der er blevet foretaget målinger på røggassen på anlægget i Gjøl i samarbejde med KSM-stoker.

	Måling 1 + Posefilter ÷ Ekstra dyser	Måling 2 ÷ Posefilter ÷ Ekstra dyser	Måling 3 ÷ Posefilter ÷ Ekstra dyser
Volumen [L]	66,9	66,8	66,8
Varighed [s]	900	900	900
mStU [mg/m ³]	10	42	37

Tabel 7 Måleværdier for partikler (Gruppe E)

I måling 1 har røggassen været igennem både posefilteret og scrubber, dog med to lukkede dyser i scrubberen. Dette afspejler normaldriften på anlægget i Gjøl.

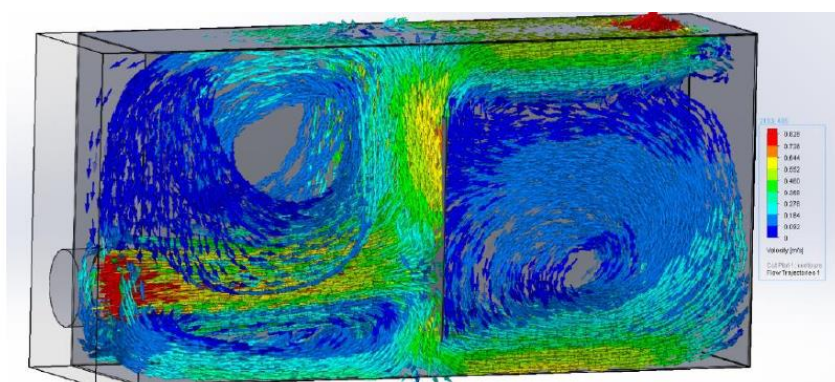
Ved måling 2 blev røgen ført udenom posefilteret, og de to dyser i scrubberen er stadig lukkede.

I den 3. måling blev de to sidste dyser åbnet, og røgen blev stadig ført udenom posefilteret.

Som det ses, har posefilteret en anseelig betydning for partikelkoncentrationen i den udledte røggas. Samtidig viser resultaterne, at kedlen kan overholde de nye emissionskrav (Eur-lex. Europa.eu, 2017; 50 mg støv / Nm³). Ved tilkobling af dyserne i måling 3, blev der opnået en reduktion på ca. 12% i forhold til måling 2. Der er selvfølgelig en usikkerhed ved at overføre disse resultater til andre anlæg.

9.5 Designforslag 3.1 – Scrubber i kasse

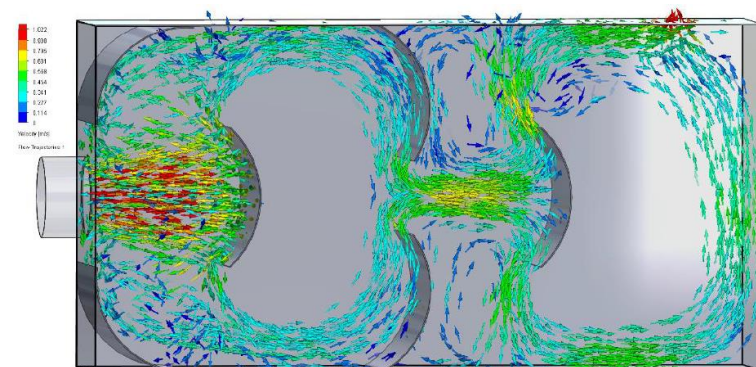
I gruppe E's arbejde med design har man taget udgangspunkt i det samme rumfang, men kammeret er delt i to, som er sat ved siden af hinanden. Sumpen er ikke med på tegningen, men bunden af kassen er vandoverfladen i sumpen.



Figur 16. Designforslag 3.1 konstrueret i SOLIDWORKS og med simulering af strømninger. (Gruppe E)

I denne model er der en problematik med "dødezoner" hvor røgen begynder at recirkulere. Det betyder at noget af røgen vil bevæge sig hurtigt gennem scrubberen og det giver dårlig rensning og afkøling.

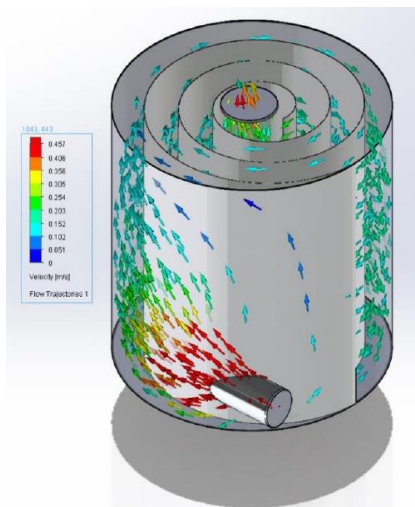
9.6 Designforslag 3.2 – Rundede plader og røgdiffusere



Figur 17. Designforslag 3.2. Simulering af strømninger i scrubber med rundede plader. (Gruppe E)

I denne model er der en god kontakt med røggasdiffuserne og dette kan skabe grundlag for en god rensning og kondensering af røggassen gennem hele scrubberen.

9.7 Designforslag 3.3 – Cylinderformet scrubber



Figur 18. Flowsimulering af designforslag 3.3, cylinderformet scrubber. (Gruppe E)

Tanken bag denne udformning er at skabe et stort areal, som røggassen kan bevæge sig igennem, samtidig med at den er i kontakt med afkølede flader og vaskevand. Af simuleringen ses, at der ikke er recirkulation og at røggassen fordeler sig langs hele højden af cylinderen. En anden vigtig faktor er centrifugalkraften, som kan bidrage til yderligere separering af partikler. Derudover kan der opstå en diffusiv afsætning af ultrafine partikler. For eksempel vil en kold overflade i en varm luftstrøm i særlig grad vedhæfte de helt små partikler. I forhold til flowsimuleringen så tager den ikke højde for faseskifte i røggassen.

Gruppe E angiver at designforslag 3.2 og 3.3 bygger på konklusionen om at posefilteret kan udelades, ud fra målingerne af røggassen i Gjøl. Ved udeladelse af posefilteret vil dette bevirke store besparelser til drift og vedligehold da halvdelen af poserne skal skiftes en gang pr. år.

Der kunne være mulighed for at supplere anlægget med en varmepumpe. Det kan givetvis blive økonomisk attraktivt med den kommende omlægning af elafgiften.

Bilag, semestergrupperne

Semesteropgaver, som er udført på Aarhus Maskinmesterskole på 6. semester 2017 (februar – juni).

Projekterne blev udført af;

Gruppe C

- Mads Lægaard Hansen
- Benjamin Hauge Laursen
- Kristian Schlosser
- Morten Hvas Stokholm
- Jonas Vesterholm
- Thomas Smed Nielsen

Gruppe D

- Mathias Ruby Mortensen
- Martin Johansen
- Christian Wølsted
- Jonas Lund Rasmussen
- Jonas Lundsgaard Valeur
- Frederik Holm

I andet semester 2017 har 2 grupper studerende fra Aarhus Maskinmesterskole gennemført et projekt med udformning af en røggaskondensator.

Gruppe C bestod af:

- Mads Lægaard Hansen,
- Benjamin Hauge Laursen,
- Kristian Schlosser,
- Morten Hvas Stokholm,
- Thomas Smed Nielsen og
- Jonas Vesterholm.

Gruppe E bestod af:

- Andreas Bøgh,
- Andreas Landsfeldt,
- Phillip Buch,
- Rasmus Munksgaard og
- Simon Opstrup.