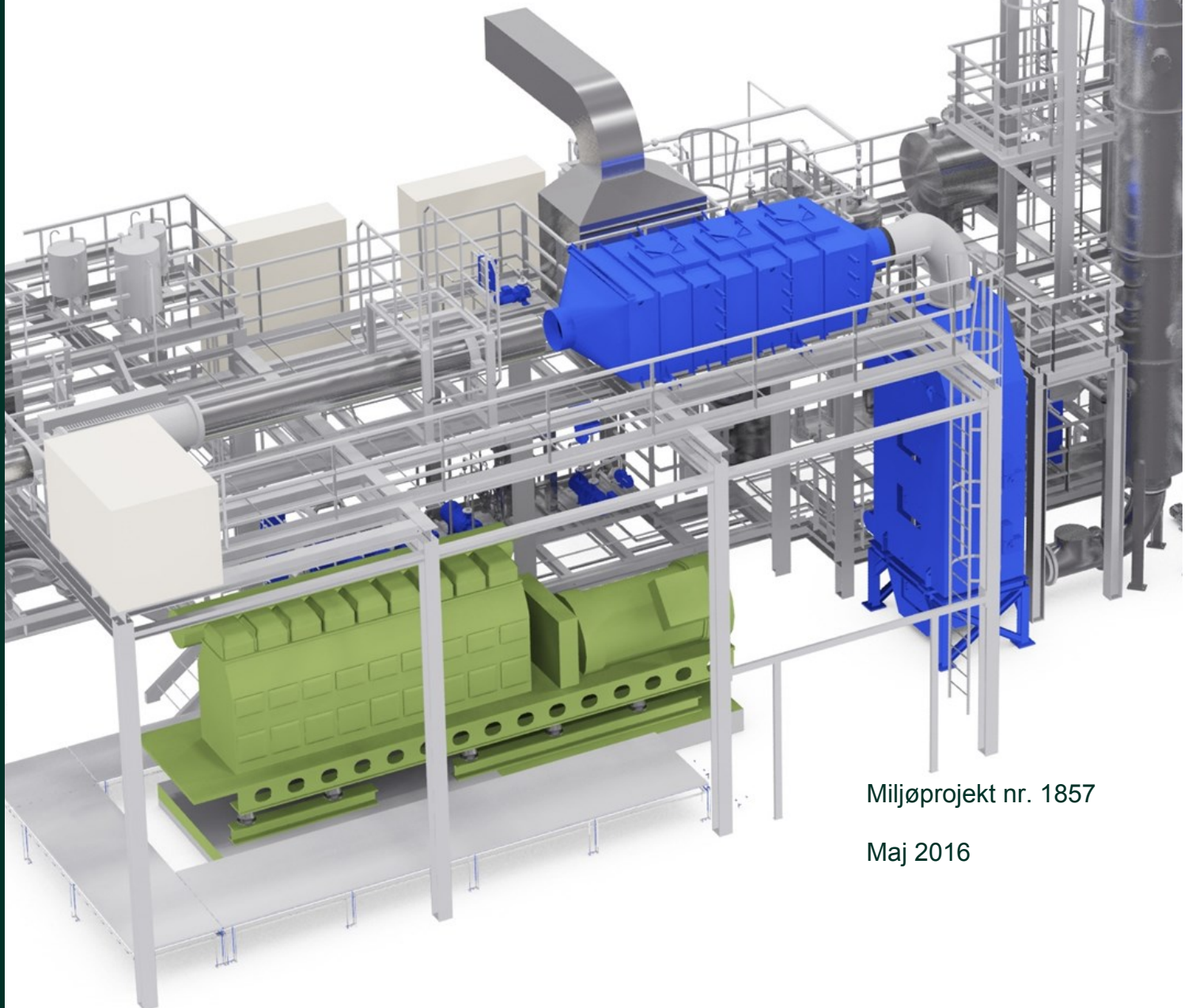




Miljø- og
Fødevarerministeriet
Miljøstyrelsen

Komplet efterbehandlings- system til skibe



Miljøprojekt nr. 1857

Maj 2016

Redaktion: Miljøstyrelsen

Tekst:

Jens Peter Hansen, Alfa Laval A/S

Henrik Trolle Jacobsen, Haldor Topsøe A/S

ISBN: 978-87-93435-71-1

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

Må citeres med kildeangivelse

Indhold

1.	Abstract	4
2.	Baggrund	5
2.1	Lovgivning	5
2.2	Økonomiske og lovgivningsmæssige udfordringer	5
2.3	Tekniske udfordringer	6
3.	Formål	8
4.	Beskrivelse af teknologier	9
4.1	Selective Catalytic Reduction (SCR)	9
4.1.1	Historie	9
4.2	Driftsomkostninger	10
4.2.1	Udstødningskedler	12
4.2.2	Røgrørskedler	12
4.2.3	Vandrørskedler	13
4.3	Exhaust Gas Scrubbers	13
4.3.1	Havvandsscrubbere	14
4.3.2	Ferskvands scrubber	14
4.4	Lyddæmpning	16
4.4.1	Motorstøj	16
4.4.2	Teori	18
4.4.3	Definitioner for lyddæmpning	19
4.4.4	Program til simulering af lyddæmpningen	20
5.	Alfa Laval Test Center	22
5.1	Motor og generator	22
5.2	Tilkobling til fjernvarmenettet	23
5.3	Olieforsyningen til motoren	24
5.4	Mulighed for ekstra opvarmning af udstødningsgassen	24
5.5	SCR anlægget	24
5.6	Udstødningskedel	25
5.7	In-line Scrubber	26
5.8	Forsøgsplan	28
5.9	NO _x reduktion	29
5.10	Belægningsdannelser på udstødningskedlen	30
5.11	SO ₂ reduktion	31
5.12	Reduktion af sod (PM)	32
5.13	Lyddæmpning	35
5.14	Optimalt systemdesign	37
6.	Konklusion og videre arbejde	40
7.	Referencer	42

1. Abstract

New and stricter legislation from the Maritime International Organization (IMO) has enforced ships sailing in Emission Controlled Areas (ECA) to reduce their emissions significantly. In 2010, NO_x limits were set for new buildings, and in 2011 and 2016 these limits were tightened by approximately 20% and 80% respectively. However, the new limits (TIER III) are still only effective for new buildings sailing in the US ECA. It is expected that a North European ECA will be established as well, but the implementation date for this has not yet been agreed upon between all the countries involved. The average global sulphur content in marine fuel is about 2.8 % (w/w) but since 2015 only 0.10 % has been allowed for ships sailing within the North European and US ECA. Global sulphur limits on max 0.5 % are expected from 2020. Stricter legislation for emissions of PM is also expected in the future due to its negative impact on health as well as its contribution to the accelerated melting of the Arctic.

To test, develop, and optimize a complete exhaust cleaning system a test facility consisting of a 2 MW 4-stroke engine + SCR reactor for NO_x reduction + exhaust gas boiler for waste heat recover + exhaust gas scrubber has been erected as part of this project.

Today, more than 500 operating hours using high sulphur HFO as fuel have been completed successfully. Possibilities for avoiding traditional problems with sticky deposits of ammonium bisulphate (ABS) in the exhaust gas boiler by controlling the slip of ammonia from the SCR have been demonstrated. A more light grey dust was formed compared to black dust as normally found without SCR. It is easy to remove this dust by increasing the engine load, washing with water, or by installing soot blowers. Chemical and Thermo Gravimetric Analysis reveals that this dust consists of approximately 80% ABS and 20% soot.

A new type of exhaust gas scrubber has also been developed. This scrubber is a straight vertical cylindrical pipe (in-line) which is often easier to fit into a funnel than a conventional (U-formed) scrubber. A new water system, in which the water for scrubbing the gas is divided into two separate loops, has also been implemented. Test results confirm that the soot content in the first water loop is approximately 10 times higher than in the second loop. This principle (REFLUX) makes it easier to keep the water clean which will reduce the risk of dirty water droplets escaping the scrubber, facilitate cleaner discharge water, and/or to reduce the water cleaning capacity.

This report describes the result of testing and optimizing the complete train of components: SCR, Waste Heat Recovery and scrubber. It further proves that a silencer can be avoided in the train and includes description of a simulation tool to design the SCR and scrubber so that they can attenuate the noise frequencies from a specific engine, whereas a conventional silencer can be eliminated.

Henrik Trolle Jacobsen

Jens Peter Hansen

Aalborg, April 2016

2. Baggrund

2.1 Lovgivning

Skibstrafikken er i dag reguleret med hensyn til deres luftbårne emissioner efter IMO's (Internationale Maritime Organisation) resolution anført i MARPOL Annex VI, hvor der er defineret nogle klare grænser for svovl- og kvælstofemissionerne (SO_x og NO_x).

Svovl er reguleret på brændstoffet. Der er sat en grænse for, hvor meget svovl skibsbrændstoffet må indeholde, hvilket bevirker, at alle skibe skal overholde kravet, såvel eksisterende som nybygninger. Rederne må dog benytte sig af en ækvivalent teknologi for at opnå samme reduktioner. Ækvivalent teknologi kan være en SO_x skrubber.

På NO_x-området er det motorens alder og dermed skibets køllægningstidspunkt, der sætter en begrænsning på, hvor meget den må udlede. En ny motor må således udlede mindre NO_x end en ældre. For at opnå de krav en årgang 2016 motor sættes overfor i ECA (Emission Control Area), er det nødvendigt for motorproducenterne at koble motoren med yderlige NO_x reducerende teknologi såsom EGR (Exhaust Gas Recirculation) eller SCR (Selective Catalytic Reduction).

Der er endnu ikke defineret klare regler for udledningen af sodpartikler fra skibe. Dette skyldes dels at der ikke findes nogen metoder til at måle dette pålideligt og kontinuerligt ombord på et skib, og dels at mange ukendte faktorer spiller ind på partikeludledningen og på, hvor farlige disse partikler er rent helbreds- og miljømæssigt.

Støj fra skibe får stigende fokus fra en lang række myndigheder i Europa. I mange lande sker der en høj grad af udbygning og etablering af boligområder omkring havne på grund af den attraktive beliggenhed tæt ved vandet. Dette medfører flere og flere konflikter mellem beboerne og skibstrafikken på grund af støj. Reglerne omkring ekstern støj fra skibstrafikken har ikke været specielt klare, men der eksisterer flere gennemførte og igangværende EU-finansierede projekter med fokus på støj fra skibe og i havne, for eksempel BESST (Breakthrough in European Ship and Shipbuilding Technologies) og NoMEPorts (Noise Management in European Ports). Det forventes derfor, at der vil blive stillet flere støjkrav til skibe i fremtiden. Udstødningssystemet er oftest den dominerende eksterne støjkilde på skibe, og det er derfor afgørende, at fremtidens udstødningssystemer indeholder tekniske løsninger til dæmpning af støjen.

2.2 Økonomiske og lovgivningsmæssige udfordringer

Udover de rent lovgivningsmæssige incitamenter er der også økonomiske incitamenter forbundet med renere skibsfart.

Siden 1. januar 2015 har alle skibe, der sejler i SO_x ECA'er, skullet bruge et brændstof med et svovlindhold på under 0,10 %. Det betyder, at det ikke er muligt at benytte den billigere traditionelle HFO (Heavy Fuel Oil), men at skibe skal sejle på dyrt destillatolie, samme type brændstof som vej- og togtransport benytter sig af (dog har vejtrafikken strengere krav mht. svovlindholdet). Det vil derfor i mange tilfælde kunne betale sig at installere en SO_x skrubber, uanset om det er et nybyggeri eller et eksisterende skib.

Trods det dramatiske fald i oliepriserne i 2015 er mange redere stadig bekymrede over de væsentligt forøgede driftsomkostninger som følge af svovlkravene, idet dette kan bevirke, at kunderne finder det billigere at benytte lastbiltransport, og at andre snyder med brændstoffet

og dermed opnår væsentlige konkurrencefordele. Lastbiltransport er overordnet set uhen-sigtsmæssigt, når man betragter distancen, en mængde gods pr. forbrugt energienhed kan transporteres, idet skibsfart i de fleste tilfælde er langt mere energieffektivt.

Brugen af lavsvovlholdigt brændstof er ikke uden konsekvenser ud fra et miljøperspektiv, da raffinering af tung olie til lettere produkter er særdeles energikrævende. En rapport, udført af Energy research Centre of the Netherlands, medfinansieret af de hollandske myndigheder, konkluderer, at en yderligere raffinering af 350 Mton HFO til et 0,50 % svovlholdigt brændstof vil resultere i en øget CO₂ emissionen på ca. 175Mton^{1,*}. Regnes der med et karbonindhold på 83% (w/w) i HFO, kan dette omregnes til, at 16% af brændstoffet vil gå tabt. Dette kan direkte omsættes til 16% forøgelse i CO₂ emissionen fra skibsfarten. Der kan argumenteres for, at rederne vil spare på olien for eksempel ved at sænke farten og optimere skrog, propeller og installere WHR som en konsekvens af de strengere svovlkrav og dyrere olie. Den samme effekt kunne dog også opnås ved eksempelvis afgifter på olien og tilskud til energioptimerede skibe, hvilket samlet set vil give både den brændstofbesparende effekt og effekten ved ikke at skulle bruge energi på at raffinere den tunge HFO.

Det er velkendt, at brugen af høj svovlholdig olie også giver anledning til en øget partikeludledning. Den laveste partikelemission (målt i gram per kilowatt-time) opnås ved at benytte de rene destillatprodukter uden svovl². Dette er dog næppe det, skibene vil benytte, da en ny lavsvovlholdig HFO med max 0,5% svovl forventes at blive introduceret, når den globale svovlgrænse sættes i kraft i 2020 eller 2025³. Da skibene og hele brændstofsyste-met i forvejen er lavet til HFO, som er mere viskøs end destillatolie, og da denne HFO kan forventes at blive lidt billigere end destillatolie, er det mest realistiske, at dette bliver et foretrukket brændstof.

Et nyligt og større studie viser, at sodpartikler, der kommer i forbindelse med forbrænding af destillatolie i marinemotorer, influerer metabolismen kraftigere i menneskelige lungeceller i forhold til sodpartikler, der kommer fra forbrænding af HFO i marinemotorer⁴. Dette, kombineret med målinger der viser, at vådskrubbere udover at reducere svovlen også reducerer udledningen af sodpartikler (black carbon, PM) med mellem 50 – 80% (w/w)⁵, gør at det på nuværende tidspunkt ikke er muligt at konkludere, hvad der er værst. På den ene side vil høj svovlholdigt olie give en øget partikeludledning, men på den anden side tyder det på, at disse partikler ikke er så farlige for mennesker og mere effektivt kan fanges i en vådscribber i forhold til partikler fra forbrænding af destillatolie eller HFO'en indeholdende 0,5% svovl.

I Sverige har man både på landanlæg og skibsfart indført en NOx-afgift, i Norge har man en NOx-fond og i andre lande lignende lokale regler. I disse tilfælde kan der være et økonomisk incitament i at efterinstallere udstyr til fjernelse af NOx, hvilket ikke er krævet i henhold til IMO's regler på nuværende tidspunkt.

Et kompakt og komplet rensningssystem kan være nøglen til, at rederne kan fortsætte deres drift på HFO og dermed stadig være konkurrencedygtige i forhold til lastbiltransporten.

2.3 Tekniske udfordringer

Når vi taler om efterinstallationer af rensningssystemer, er det imidlertid ikke kun teknologien og økonomien, der er den eneste vej til succes. Særligt dimensioner og vægt af udstyret er også vigtige faktorer, idet pladsforholdene som regel er meget begrænsede om bord. Det er ikke realistisk, hverken økonomisk eller i praksis, at udskifte en eksisterende motor med en "renere".

¹ 350 Mton HFO * 0,83 = 291 Mton karbon

175 Mton CO₂ = 48 Mton karbon

48/291 = 16%

Disse forhold gør det nødvendigt at introducere kompakte systemer, hvor SCR (Selective Catalytic Reduction (NOx)) indgår. Ud fra ovenstående miljøbetragtning er det netop vigtig at få så mange skibe som muligt udstyret med et rensningssystem.

Et komplet efterbehandlingssystem, som det vi ønsker at udvikle, består af en SOx skrubber og SCR med indbygget støjdemping i flere led. Det er endnu ikke påvist, at det er muligt at bruge SCR i kombination med højsvovlholdigt olie og en skrubber, idet svovlen gør, at SCR'en skal operere ved en højere temperatur for at undgå deaktivering. Hvis skrubberen placeres før SCR'en, vil skrubberen fjerne svovlen men sænke temperaturen til under katalysatorens virkningstemperatur. Omvendt, hvis skrubberen placeres efter SCR'en, kan der – idet der skal tilsættes urea eller ammoniak i forbindelse med SCR processen – dannes små aerosolpartikler af ammoniumsulfat, der kan sætte sig på hedepladen af en eventuel udstødningskedel eller slippe igennem udstødningskedlen og skrubberen.

3. Formål

Projektet har til formål at finde de forhold, der gør, at et komplet efterbehandlingssystem kan blive så kompakt som muligt, således at væsentligt flere efterinstallationer er mulige.

Dels skal projektet belyse, hvordan de enkelte delelementer af systemet og skibets eksisterende komponenter skal placeres i forhold til hinanden for at opnå den kompakthed, vi ønsker, men også således, at de teknisk set opererer til fordel for hinanden. Et vigtigt element i dette er at eftervise, at det er muligt at koble SCR med en kedel og en vådscriber.

Dels vil vi i projektet optimere de enkelte delelementer med hensyn til deres størrelse f.eks. vurdere og efterprøve, om det er muligt at gøre scriberen mere kompakt, analysere og afprøve om det er muligt at integrere lydæmpningen i de enkelte delelementer, således at en eksisterende lydæmper kan fjernes og dermed skabe plads til hele efterinstallationen.

Mere specifikt er der defineret følgende leverancer i projektet (jvf. afsnit 3.6.3 i ansøgningen)

- A. Viden om hvordan et komplet system skal designes, herunder
 - Hvilke modifikationer af motoren der måtte være hensigtsmæssige
 - Hvilke modifikationer af en udstødningskedel der måtte være hensigtsmæssige

- B. Et komplet rensningssystem der overholder alle gældende emissionskrav, herunder
 - Støjdæmpning integreret i designet
 - Rensningsanlæg for scrubbervand inkluderet i designet
 - Styresystem for hele anlægget

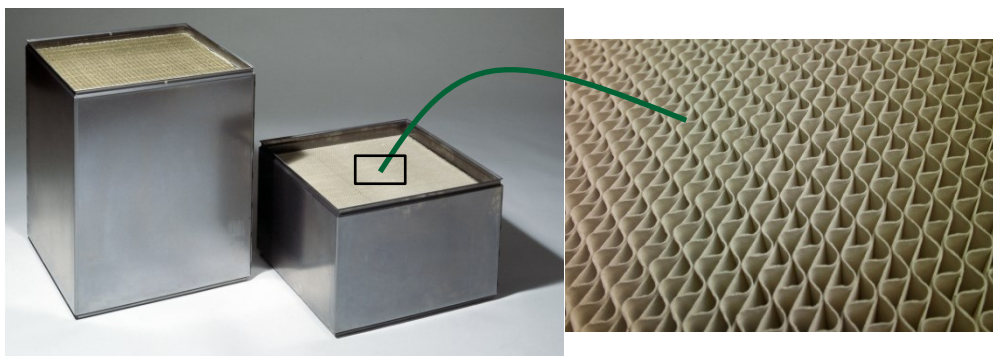
I projektet bliver den forståelse og mangeårige erfaring, de involverede virksomheder i samarbejdet allerede har, bragt i samspil for at opnå denne viden og til at opbygge et testanlæg til demonstration og udvikling af et komplet anlæg.

4. Beskrivelse af teknologier

4.1 Selective Catalytic Reduction (SCR)

4.1.1 Historie

SCR katalysatoren (figur 1) blev udviklet tilbage i 1970'erne til reduktion af NO_x emissioner fra kulfyrede kraftværker, hvor niveauet af smog havde oversteget acceptable grænser i større byer. Siden da er teknologien blevet spredt til resten af verden, så SCR i dag er den mest anvendte metode til fjernelse af NO_x . Ikke blot i kraftværksindustrien, men også i en lang række andre landbaserede industrier. Endvidere har SCR fundet anvendelse i både lastbiler, busser, toge og skibe.



Figur 1: højre: SCR elementer fra Haldor Topsøe A/S Elementer består af en glasfiber forstærket titanium dioxid bærer der er belagt med katalytisk aktive materialer (bl.a. vanandium, titanium og wolfram). Venstre: nærbillede af honeycomb strukturen. Typisk anvendes en hydraulisk diameter på 5 mm efter marinemotorer.

Udbredelsen af SCR teknologien har dog ikke været så markant i marinebranchen som inden for de landbaserede industrier. Årsagen hertil skal først og fremmest findes i, at der lovgivningsmæssigt ikke har været de samme krav til skibene, men også i de tekniske udfordringer, der har været i at få tilpasset teknologien, så den kan modstå de forhold, der hersker efter større marinemotorer. Særligt er vibrationerne, svovlkoncentrationerne og sodbelastningerne udfordrende.

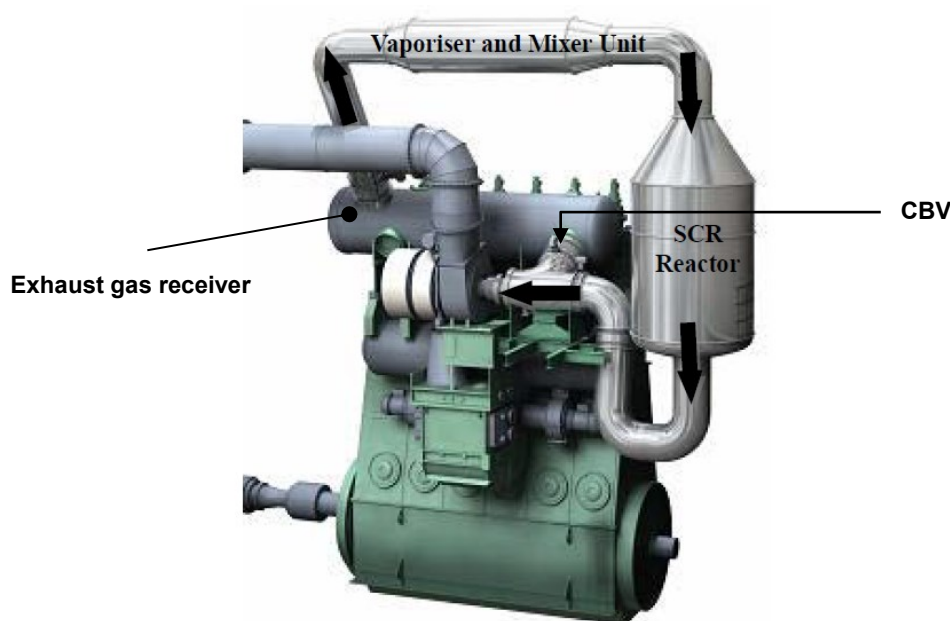
SCR fungerer bedst over 330°C , især når der anvendes høj svovlholdigt olie. Dette for at sikre en aktiv katalysator og for at undgå belægninger af såkaldt ammoniumsulfat (AS) og ammonium-bisulfat (ABS) – mere herom i afsnit 5.10. For de fleste 4-takts motorer er temperaturen efter turboladeren mere end 330°C , hvilket vil være tilstrækkeligt. For 2-taktsmotorer er det oplagt at sætte SCR'en ind på højtrykssiden af turboladeren, da disse motorer anvender et højere luftoverskudstal, som bevirker, at det er vanskeligt at opnå mere end 330°C på lavtrykssiden af turboladeren.

Allerede i 1985 testede Haldor Topsøe i samarbejde med MAN B&W som de første i verden SCR teknologien efter en marinemotor. Her blev der kørt ca. 4.000 timer med en testmotor og på HFO indeholdende 2,5% svovl. I 1989 fortsatte dette samarbejde og udvikling med installation af et SCR anlæg på skibet M/V Pacific Success. SCR'en blev her installeret på højtrykssiden af turboladeren på en 7.9 MW 2-taktsmotor. I de efterfølgende år blev også søsterskibene Pittsburg, Delta Pride og New Horizon udstyret med SCR⁶.

Adskillige referencer findes for 4-takts motorer. De fleste er for lav svovlholdigt dieselolie – særligt for tog og lastbiler, hvor der har været andre landbaserede regler for både svovl og

NO_x. De teknisk set mest interessante installationer er dog dem, hvor der er blevet kørt med høj svovlholdigt olie. Disse findes særligt omkring Sverige, Norge og Danmark, idet der her har været og stadig er lokale initiativer til at nedbringe NO_x emissionerne – og hvor det indtil 1. januar 2015 i nogen grad har været tilladt at anvende svovl i brændstoffet. Stena Jutlandica var eksempelvis den første færge i verden, der blev udstyret med SCR fra Haldor Topsøe A/S. I 1994 fulgte færgerne Silja Symphony og Silja Serenade med installationer af SCR. Alle disse er referencer på 4-takts motorer drevet med høj svovlholdigt olie.

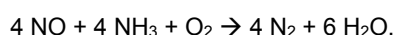
Efter vedtagelsen af de skærpede TIER III krav til NO_x emissioner gældende i NO_x ECA områder fra 2016 demonstrerede MAN Diesel & Turbo den første motor og SCR installation, som kunne overholde disse krav. Først på en testmotor i april 2011 og senere samme år på lastskibet Santa Vista med en 2-taktsmotor drevet på høj svovlholdigt olie. Trods SCR'en er installeret på højtrykssiden af turboladeren, er temperaturen stadig ikke optimal – særligt ikke ved lav motorlast og under opstart fra kold tilstand. For at afhjælpe dette anvendes et setup (figur 2), hvor en del af ladeluften kan ledes uden om motoren, således at motoren får mindre overskuds-luft. Herved stiger både temperaturen og opholdstiden i SCR'en. Driftsomkostningerne er et svagt øget brændstofforbrug på ca. 2-3 g/KWh svarende til ca. 1,5%⁷.



Figur 2: SCR installeret på højtrykssiden af en turbolader og med en cylinder bypass ventil (CBV). Ref: M/V Santa Vista, 2-takts motor af typen 6S46MC-C.

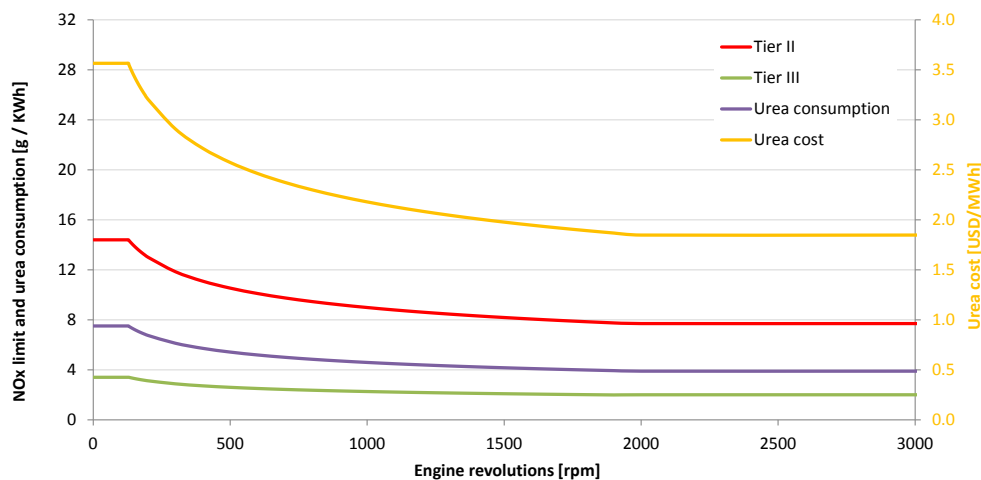
4.2 Driftsomkostninger

Den største driftsomkostning i forbindelse med SCR er forbruget af ammoniak eller urea. Da der stort set ikke er noget NO₂ i udstødningsgassen, kan der overordnet set regnes med et reaktionsforhold på 1 mol NH₃ per mol NO, der ønskes reduceret, jævnført følgende reaktions-skema:

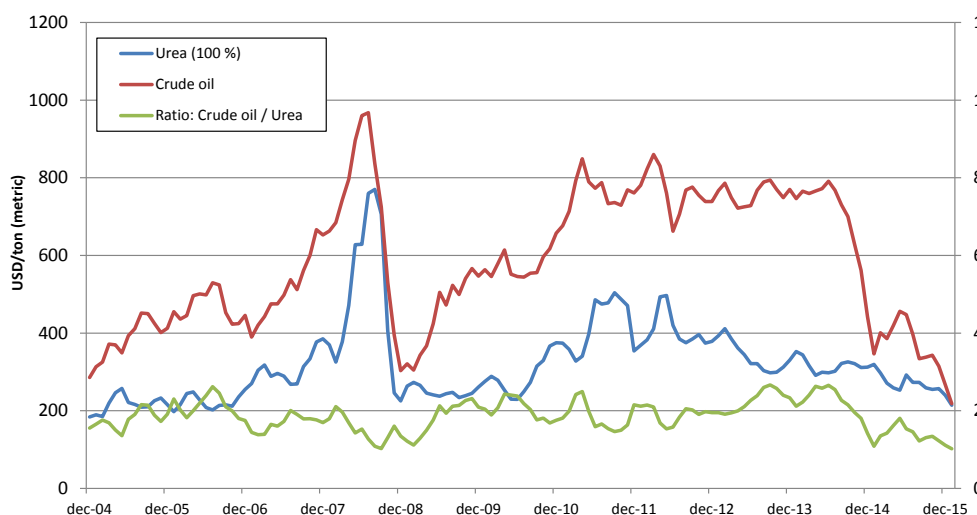


I de fleste installationer anvendes der typisk en vandig opløsning af urea i stedet for ammoniak. Rent kemisk spiller dette dog ikke nogen rolle, da urea'en alligevel dekomponerer til ammoniak straks efter indsprøjtningen i den varme gas. Forbruget af urea er vist i figur 3 under antagelse

af, at typiske motorer, der i dag overholder TIER II kravene, skal ned på TIER III kravene. For de store 2-taktsmotorer med lavt omdrejningstal skal der bruges op til 8 g urea/ KWh, mens der for 4-taktsmotorer med højere omdrejningstal kun skal bruges omkring 4 g urea / KWh.



Figur 3: Driftsomkostninger på forbruget af urea ved brug af SCR. Der er regnet med en urea pris på 470 USD/ton inkl. transport og håndtering (100% opløsning)



Figur 4: Priser på urea (100 %) og råolie⁸ samt forholdet mellem disse på venstre akse.

I Figur 4 ses den 12-årige udvikling i markedsprisen på urea. Gennemsnitsprisen for perioden er 320 USD/ton. Hertil skal lægges omkostninger for transport og håndtering (opblanding med vand). Prisen for transport og håndtering vil afhænge meget af, hvor i verden skibet skal bunke urea og af hvor store mængder, skibet har plads til. I de fleste tilfælde vil det være fordelagtigt at have plads til minimum 50 m³ svarende til størrelsen på en normal tank-lastbil, således at denne kan køre helt fyldt ud og helt tom hjem igen. I figur 3 er der regnet med en ekstra omkostning på 150 USD/ton for transport og håndtering af urea, hvorved driftsomkostningen for urea (orange linie) havner på 1,8 til 3,6 USD/MWh. Regnes der med en gennemsnitlig omkostning for høj svovlholdig olie på 500 USD/ton for den tiårige periode og et gennemsnitligt olieforbrug på 200 kg/MWh, bliver de gennemsnitlige brændstofomkostninger på 100 USD/MWh. Driftsomkostningen for urea bliver så ca. 1,8 til 3,6% af omkostningen af HFO (høj svovl). Da prisen på urea nogenlunde følger prisen på olie vil disse 1,8 til 3,6% også være

nogenlunde rigtige, selvom oliepriserne ændrer sig. Som et alternativ til urea kan der også anvendes en vandig opløsning af ammoniak. Denne kræver lidt højere sikkerhedskrav at håndtere, men er ofte billigere end urea'en. Da urea netop fremstilles ved brug af ammoniak, giver det mening, at ammoniak er billigere end urea. Ligeledes giver det mening, at prisindekset for urea eller ammoniak nogenlunde følger prisindekset for olie, da fremstillingen af ammoniak er meget energikrævende.

I den samlede vurdering af omkostningerne ved anvendelse af SCR er det dog vigtigt at tage med i betragtning, at motorproducenterne har mulighed for at optimere brændstofforbruget i forhold til NOx udledningen. Når en motor justeres for mindst muligt brændstofforbrug, øges dannelsen af NOx i motoren, men anvendelsen af SCR muliggør efterfølgende reduktion, hvilket medfører en væsentlig reduktion af udgifterne til SCR og CO₂ udledning.

4.2.1 Udstødningskedler

Alfa Laval Aalborg har lavet skibskedler helt tilbage fra 1919⁹. Et skib har typisk en oliefyret kedel og en kedel drevet af varm udstødningsgas fra skibets hovedmotor koblet til samme dampsystem. I havn kører hovedmotoren typisk ikke, og det er derfor nødvendigt at brænde olie af for at lave damp. Så snart motoren tændes, kan denne olie spares ved at lave damp på udstødningskedlen i stedet for på den oliefyrede kedel. Udstødningskedler fås som røgrørskedler eller som vandrørskedler. Begge disse kedeltyper er blevet testet i dette projekt og beskrives derfor nærmere nedenfor.

4.2.2 Røgrørskedler

I en røgrørskedel føres udstødningsgassen via en manifold ind på indersiden af et større antal kedelrør (figur 5). Antallet af kedelrør og tværsnitsarealet er nogenlunde proportionalt med gasmængden og dermed motorstørrelsen. Denne kedeltype er karakteriseret ved at være let at holde ren, idet sod ikke kan bygges op til over en vis tykkelse, før udstødningsgassen vil blæse det af. Der opnås således – typisk efter 100-200 timers kørsel - et stationært tyndt sodlag. Kun hvis der over længere tid køres ved meget lav motorlast, vil tykkelsen på sodlaget øges, men dette vil igen blive blæst ud, så snart motorlasten øges.

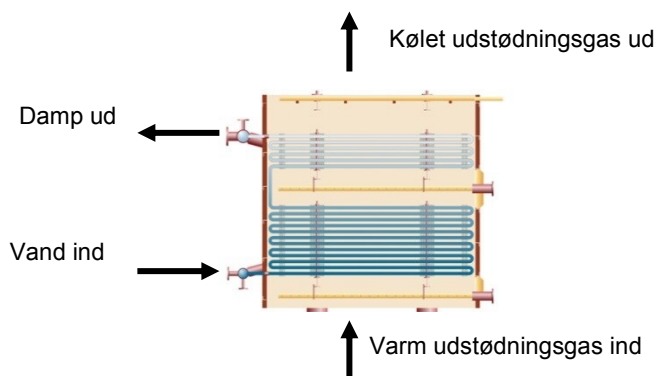
Det er vigtigt at bemærke, at temperaturen af kedelrørene vil være meget tæt på vandtemperaturen og næsten uafhængig af gastemperaturen grundet forskellene i varmeovergangstallene for de to medier. Da vandtemperaturen er nogenlunde lig med damptemperaturen, kan kedelbladens temperatur fuldstændig kontrolleres ud fra damptrykket. Typisk anvendes et damptryk på 7 til 9 bar, hvilket svarer til en temperatur på 165°C henholdsvis 175°C. Dette er væsentligt under det tidligere antaget dugpunkt for ABS på omkring 280°C. Er der således ABS tilstede, er der derfor risiko for, at dette kan opbygges på kedelrørene.



Figur 5: Røgrørskedel af typen XS (Exhaust Smoke tube).

4.2.3 Vandrørskedler

Særligt for de større motorer benyttes vandrørskedler. Her ledes det kondenserede kedelvand ind på indvendig side af rørene via en nedre manifold, hvorefter det gradvist fordamper op gennem kedlen for til sidst at blive opsamlet som damp via en øvre manifold. Disse kedler fås både med helt glatte rør (sjældent anvendt) eller som glatte rør med ekstra påsvejste stålplader på ydersiden for at øge varmeovergangen. Grundet den rektangulære ydre form og grundet eventuelle påsvejste stålplader opbygger sod sig lettere i denne kedeltype i forhold til udstødningskedler. Dette øger risikoen for, at der kan opstå sodbrænde og i værste tilfælde en sodekspllosion. For at minimere denne risiko er det nødvendigt at sodblæse eller vandvaske denne kedel regelmæssigt. Temperaturen af kedelrørene vil her kun være lig med damptemperaturen i bunden af kedlen og et sted mellem damptemperaturen og udstødningstemperaturen ud af kedlen i toppen.



Figur 6: Røgrørskedel af typen XW (Exhaust Water Tube)

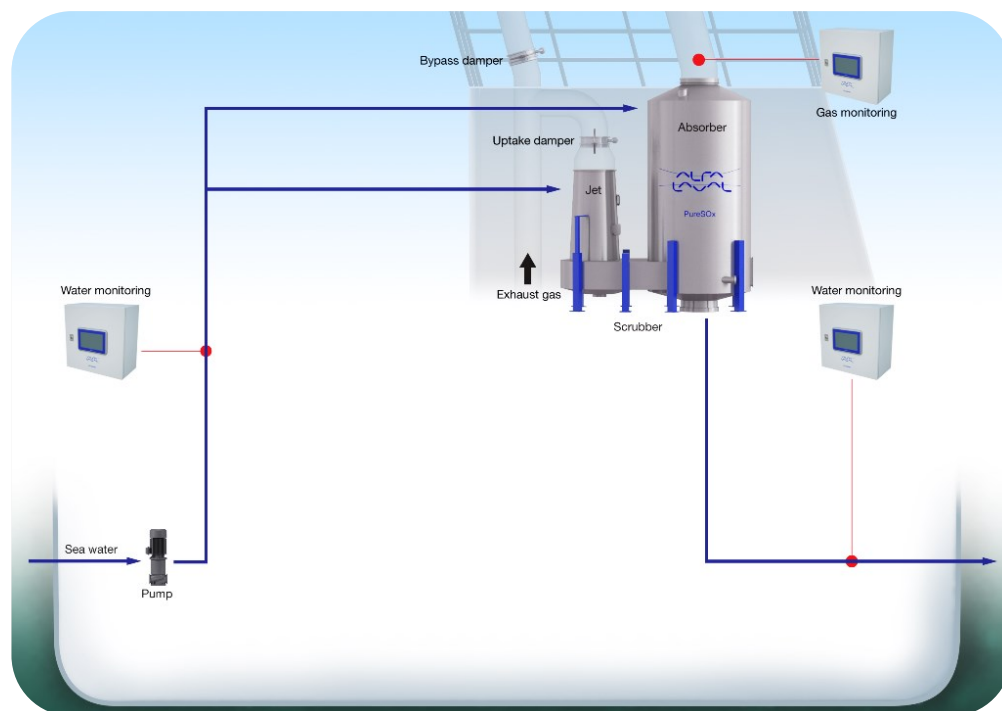
4.3 Exhaust Gas Scrubbers

Alfa Laval påbegyndte udviklingen af scrubbere til marinemotorer tilbage i 2008, hvor de første test blev kørt i samarbejde med MAN Diesel og Turbo i Holeby-DK. Der blev her kørt forsøg efter en 1 MW 4-taktsmotor og med høj svovlholdigt olie. Erfaringerne fra dette arbejde blev i

2009 videreført til en pilot-installation ombord på DFDS skibet Ficara Seaways. Det var på det tidspunkt den største marine scrubber installeret i verden og den eneste installation efter en 2-taktsmotor. En væsentlig konklusion fra forsøgene var, at det er muligt at overholde 0,1% svovlækvivalenskravene i både ferskvandsdrift og havvandsdrift med scrubberen og efter både 4-takts- og 2-taktsmotorer. Det kræver alt andet lige en større scrubber (mere kontaktoverflade) at overholde kravene efter 2-taktsmotorer, da disse kører med et højere luftoverskud end 4-taktsmotorerne. Forsøgene og resultaterne fra både Holeby og Ficara er beskrevet i to rapporter offentliggjort på Miljøministeriets hjemmeside^{10,11}. Endvidere blev installationen på Ficara brugt til en undersøgelse af de miljømæssige konsekvenser af at udlede scrubbevand til havet. Resultaterne af disse undersøgelser er ligeledes publiceret på Miljøministeriets hjemmeside¹².

4.3.1 Havvandsscrubbere

Tidligere Krystallon var de første til at installere havvandsscrubbere ombord på skibene "Pride of Kent"¹³ og "Zanadam" i 2007^{14,15}. Et foreslået flowsheet over en af Alfa Laval's havvands-scrubbere er vist i figur 7. I denne proces pumpes havvand fra skibets søvandskasser og grov-filtre til skrubberen, som består af en jet og en absorber-sektion. I jet-sektion sker den første køling af udstødningsgassen, som typisk er omkring 220°C efter udstødningskedlen, ved indsprøjtning af havvand gennem nogle forstøvningsdyser. På grund af kølingen reduceres gasvolumenet inden den næste absorber-sektion, hvor svovloxiden absorberes henover nogle fyld-elementer, der giver den nødvendige kontakt mellem gassen og havvandet, der sprøjtes ind i toppen af absorberen. Skrubberen kan være udstyret med et bypass arrangement, hvilket kan være åbent uden for ECA eller i tilfælde af vedligeholdelse på skrubberen, hvor skibet så må sejle på lavsvovlholdigt olie.

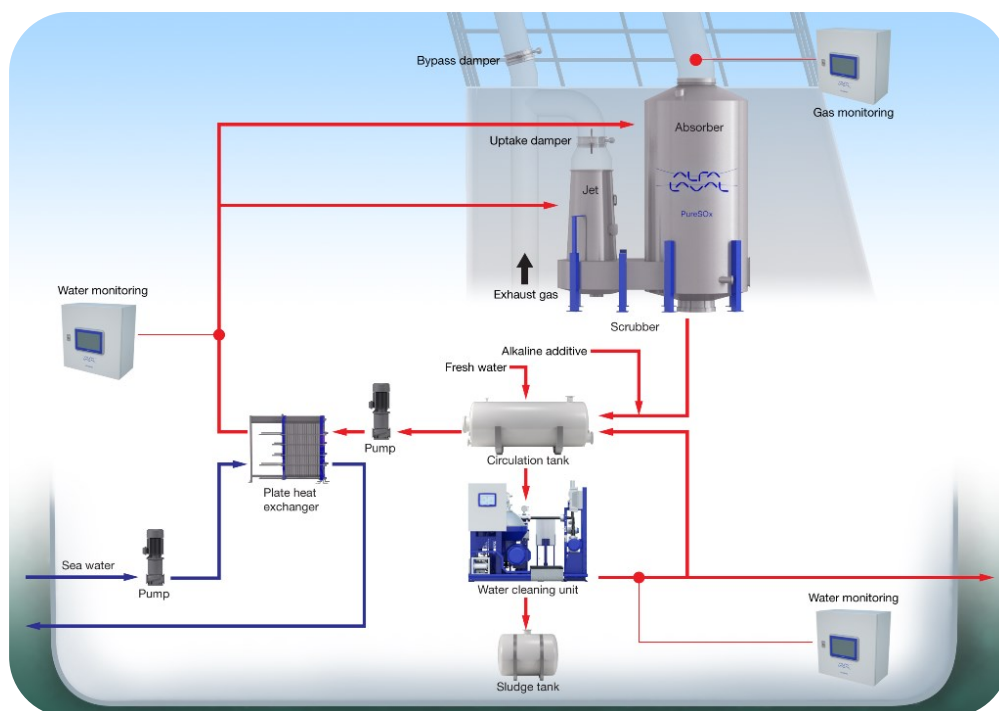


Figur 7: Scrubber havvandsmode (SW mode)

4.3.2 Ferskvands scrubber

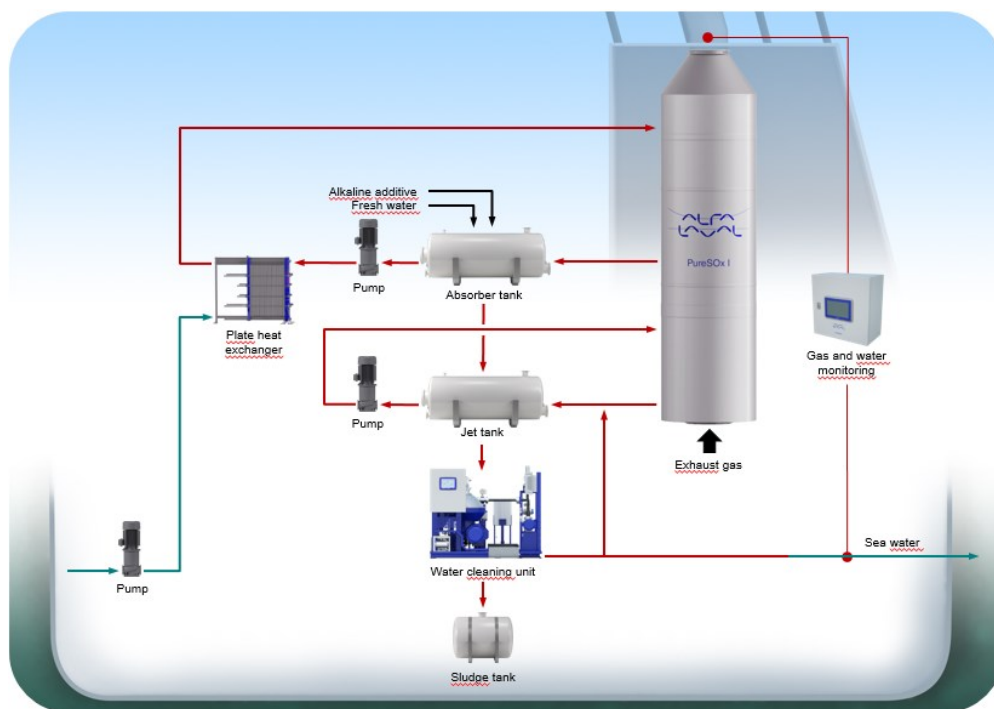
Driftsprincippet i en ferskvands-scrubber er vist i figur 8. I denne cirkuleres der en konstant vandstrøm til scrubberen, og denne benævnes derfor ofte som en "closed loop" scrubber. Dette er bogstavelig talt dog kun tilfældet, når vandrensingsanlægget ikke leder noget vand overbord. Ordet "ferskvands scrubber" er også misvisende, da vandet, som cirkuleres, indeholder store mængder natriumsulfat, der i sidste ende udledes til havet. Natriumsulfat er meget oplø-

seligt i vand, og dette fjernes derfor ved at lede en lille koncentreret delstrøm overbord. Denne delstrøm må renses for olie og sodpartikler, da dette – i modsætning til natriumsulfaten – ikke er en naturlig bestanddel i havvand. Set i forhold til havvandsscrubberen er det kun en meget lille strøm, som skal udledes fra ferskvandsscrubberen (ca. 250 gange så lidt), hvilket muliggør en effektiv rensning af vandet.



Figur 8: Scrubber ferskvandsmode (FW mode)

Som en del af dette projekt er ferskvandsscrubberen blevet videreudviklet for at minimere risikoen for, at sorte vanddråber kan flyve med gassen ovenud af scrubberen og for at optimere vandrensningen i scrubberen. Idéen er at opdele scrubberen i to sektioner, som vist i figur 9. I den nederste sektion cirkuleres en vandmængde via jet-tanken. Da gassen kommer ind, varm fordampes der store mængder vand, mens gassen køles til ca. 55°C. Kun rent vand uden sod og salte vil fordampe fra jet-sektionen, samtidig med at største del af soden fra motoren vil absorberes i vandet i jet-sektionen. Dette gør, at soden koncentrerer sig i denne sektion. I den efterfølgende absorber-sektion køles gassen yderligere fra de ca. 55°C til ca. 30°C ved at sprøjte koldt vand ind. Vandet cirkuleres her via absorber-tanken og køles ved hjælp af en pladeveksler. På grund af kølingen kondenseres vandet, som fordampede i jet-sektionen, igen. Da dette er rent vand, og da størstedelen af soden allerede er absorberet i jet-sektionen, vil vandet i absorber-sektionen være langt renere end vandet i jet-sektionen. For at udligne det vand, som fordampes i jet-sektionen, med det vand som kondenserer i absorber-sektionen, tilføres der konstant et lille flow fra absorber-tanken til jet-tanken. Dette kaldes for REFLUX flowet. En fordel ved REFLUX princippet, er at udstødningsgassen er i kontakt med det rene absorber-vand, umiddelbart inden gassen forlader scrubberen. På denne måde opnås der en mere effektiv vandrensning, en mindre pladeveksler og mindre risici for sodpletter på dækket sammenlignet med det traditionelle ferskvandssystem¹⁶.



Figur 9: Scrubber REFLUX principle

4.4 Lyddæmpning

4.4.1 Motorstøj

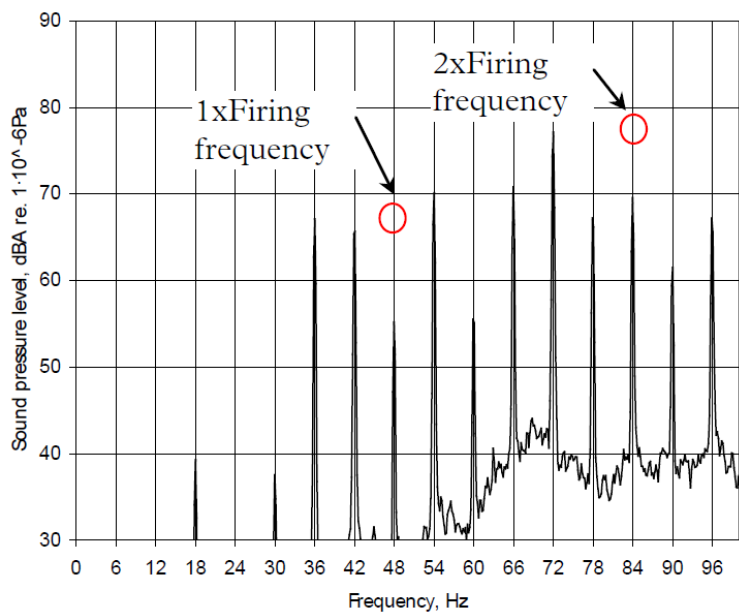
Normalt installeres der en større lyddæmper i udstødningssystemet fra motoren. Hvis motoren er udstyret med en udstødningsskedel, placeres lyddæmperen typisk over denne grundet vægtforholdene, og da lyddæmperen typisk er mere effektiv ved den lavere gastemperatur efter kedlen. Efter lyddæmperen føres gassen normalt blot ud til atmosfæren via et stålør.

Støjen fra marinemotorer – og særligt fra 2-taktsmotorer med lang slaglængde - er karakteriseret ved at være dominerende ved lave frekvenser. Den mest dominerende frekvens er typisk tændfrekvensen, der kan beregnes af følgende simple formel:

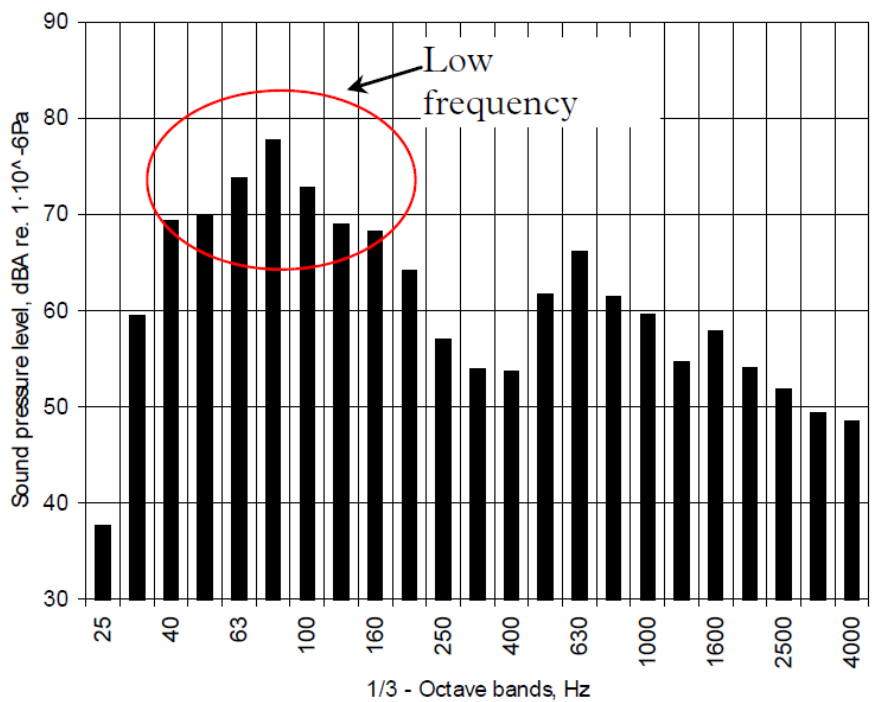
$$f = p \cdot \frac{z \cdot n}{a}$$

Hvor z er antallet af cylindre, n er omdrejningshastigheden (s-1), a er antallet af tændinger pr. aksel omdrejning (1 for 2-taktsmotorer og 2 for 4-taktsmotorer). Tallet p er lig 1 for netop tændfrekvensen, men der optræder også 2. og 3. ordens støjtoppe.

Et eksempel på virkelige målinger i lavfrekvensområdet efter en 6 cylindret 4-takts Wärtsilä motor er gengivet i Figur 10¹⁷. Tændfrekvensen (p=1) for denne motor er $6 \times 720 / 60 / 2 = 36$ Hz og en støjtop ved denne frekvens fremgår tydeligt. Der ses dog også tydelige toppe ved $p = \frac{1}{2}$ og $p = 1 + 36/6 \cdot q$ (q = 1,2,3,4 etc. Endvidere ses et mere grundlæggende og bredt støjspektrum startende fra omkring 60 Hz og op til de 100 Hz, som målingerne strækker sig til i figur 10. Dette grundlæggende støjspektrum ses af figur 11 at toppe omkring 100 Hz, men også at fortsætte over i den højfrekvente støj hele vejen op gennem det målte spektrum.



Figur 10: Lydtryk (narrow band) målt efter en Wärtsila 4-taktsmotor af typen W6L32, 720 rpm¹⁶.



Figur 11: Lydtryk (1/3 octave band) målt efter en Wärtsila 4-taktsmotor af typen W6L32, 720 rpm¹⁶.

Tabel 1: Tændfrekvenser beregnet ved hjælp af ovenstående formel for MAN 2-taktsmotorer af typen G40ME-B9.

		1. orden	2. orden	3. orden
Cyl.	RPM	Hz	Hz	Hz
5	125	10.4	20.8	31.3
6	125	12.5	25.0	37.5
7	125	14.6	29.2	43.8
8	125	16.7	33.3	50.0
5	106	8.8	17.7	26.5
6	106	10.6	21.2	31.8
7	106	12.4	24.7	37.1
8	97	12.9	25.9	38.8

Tabel 2: Tændfrekvenser beregnet ved hjælp af ovenstående formel for MAN 4-taktsmotorer af typen L28/32. Data fra testmotoren (afsnit 5.1) er markeret med fed i nederste linje.

		1. orden	2. orden	3. orden
Cyl.	RPM	Hz	Hz	Hz
8	501	33.4	66.8	100.2
5	720	30.0	60.0	90.0
6	720	36.0	72.0	108.0
7	720	42.0	84.0	126.0
8	720	48.0	96.0	144.0
9	720	54.0	108.0	162.0
5	750	31.3	62.5	93.8
6	750	37.5	75.0	112.5
7	750	43.8	87.5	131.3
8	750	50.0	100.0	150.0
9	750	56.3	112.5	168.8

4.4.2 Teori

Der skelnes mellem reaktive lyddæmpere til dæmpning af lavere frekvenser (> ca 100 Hz) og absorptionslyddæmpere til dæmpning af de højere frekvenser.

De højere frekvenser kan typisk dæmpes ved hjælp af for eksempel uld eller andre lydabsorbende materialer. I praksis og stærkt relevant for dette projekt sker dette i større eller mindre grad over SCR elementerne, kedelrørene og fyldelementerne i scrubberen.

De lavere frekvenser er mere udfordrende, da disse kræver store "død-volumener" for at absorbere de lange bølgelængder. En karakteristisk længde af et kammer i en reaktiv lyddæmper kan beregnes ud fra følgende grundlæggende formel:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Hvor λ er bølgelængden (m), f er frekvensen (s⁻¹) og c er lydets hastighed (m/s), der kan beregnes ud fra det absolutte gstryk P_s (Pa), og gassens densitet ρ (kg/m³) ifølge nedenstående formel¹⁸:

$$c = \sqrt{\frac{1.4P_s}{\rho}}$$

Da gassens densitet ifølge idealgasloven er omvendt proportional med temperaturen, ses det, at længden af en reaktiv lydæmper kan mindskes ved at køle udstødningsgassen. Det er derfor optimalt at placere en lydæmper efter en scrubber og/eller integrere lydæmpningen i selve scrubberen, hvor gassen typisk køles helt ned til mellem 0 og 35°C.

4.4.3 Definitioner for lydæmpning

Lyddæmpningen (NR = noise reduction) defineres ved lydniveauet (målt i Pascal) før og efter en lydæmper. Ses der på figur 12, er dette L3-L1. Typisk kvantificeres lydæmpningen dog ved indsatstabet (IL = insertion loss) eller transmissionstabet (TL = transmission loss). Disse termer er i praksis ofte sammenlignelige, da de overordnet set beskriver det samme blot under forskellige antagelser.

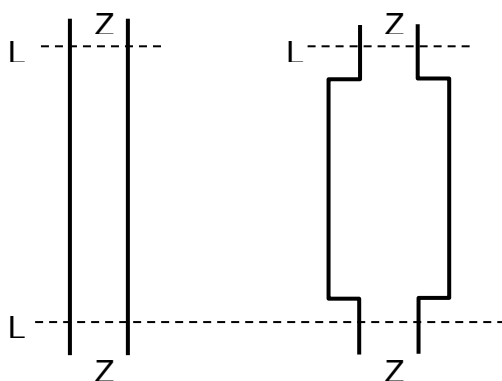
NR beskriver lydniveauet før og efter en lydæmper, dvs. L3-L1.

IL beskriver lydniveauet før og efter indsættelse af en lydæmper, dvs. IL = L3-L2.

TL beskriver ligeledes lydniveauet før og efter indsættelse af en lydæmper dog med den antagelse i forhold til IL, at lyden kan strømme ud uden refleksion (ingen ekko), og at systemets såkaldte indgående impedans (Z_s) og udgående impedans (Z_t) er identiske.

IL anvendes typisk til at karakterisere et systems lydæmpende effekt i forbindelse med praktiske målinger, mens TL benyttes i forbindelse med teoretiske beregninger, idet der sjældent er kendskab til systemets impedans samt muligheder for ekko. I dette projekt er der foretaget lydmålinger med minering af ekko og impedans ved hjælp af lange indløbs- og udløbsrør + kasser (afsnit 5.13). Måleresultaterne kan derved præsenteres direkte som TL og sammenlignes med beregningerne, som gennemgås nedenfor.

Det ses også, at NR = IL hvis der ikke er nogen lydabsorption i udstødningsrøret for det ikke-lyddæmpede system, det vil sige hvis L2 = L1. Dette er ofte en rimelig antagelse.

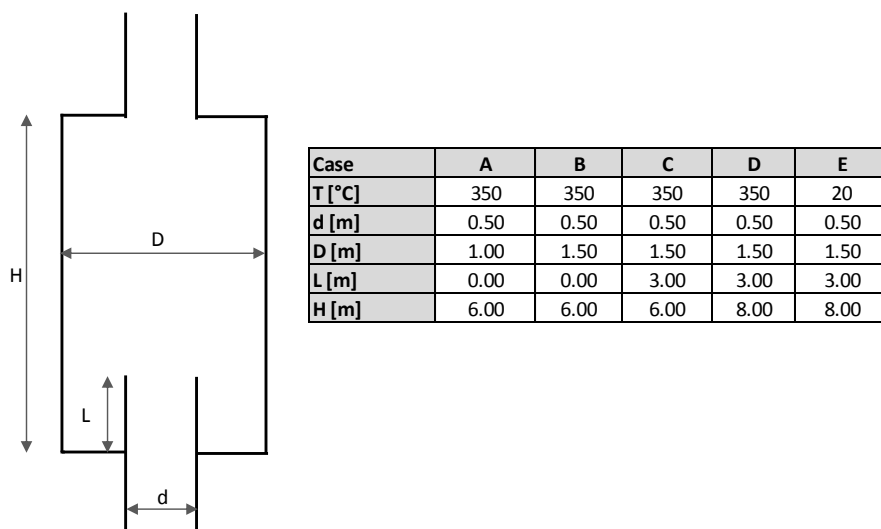


Figur 12: Udstødningssystem uden lydæmpning (venstre) og med lydæmpning (højre)

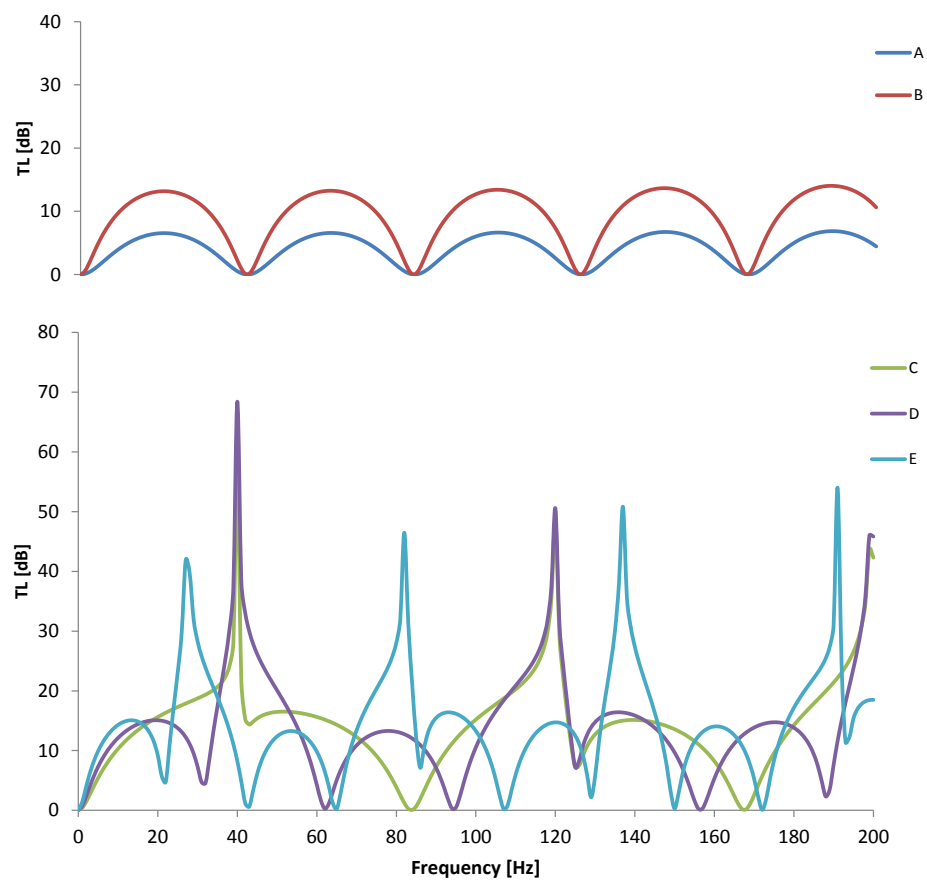
4.4.4 Program til simulering af lyddæmpningen

For at designe et kompakt integreret udstødningssystem er der i dette projekt opstillet en simuleringssmodel til at beregne lydabsorptionen i det lavfrekvente område. Modellen er simplificeret ved en antagelse om, at lydbølgerne er plane. Dette er en rimelig antagelse i det lavfrekvente område (< ca. 200 Hz) men ikke ved højere frekvenser. Denne model kan i første omgang benyttes til at opnå en mere grundlæggende forståelse af hvilke dimensioner og parametre, der er vigtige for at dæmpe lyden i udstødningssystemet ved at regne på nogle forskellige simplificerede designs.

Som et eksempel betragtes et ekspansionskammer som dimensioneret i Figur 13. Som reference (Case A) er valgt et simpelt ekspansionskammer uden indstikning af udstødningsrør ($L=0$). Endvidere er valgt en diameter af udstødningsrøret på 500 mm, da dette nogenlunde svarer til den testmotor, der er blevet installeret i testcentret. Disse forhold resulterer i et TL på omkring 6 dB ved henholdsvis 21, 63, 105, 147 og 189 Hz (figur 13). Dette vil i sig selv kun give en forholdsvis begrænset lyddæmpning, idet lydtrykket fra en motor typisk vil være over 30 dB ved frekvenser over 50 Hz (figur 10). En måde at forbedre lyddæmpningen på er ved at øge diameteren D . I case B forsøges denne øget fra 1,0 til 1,5 meter. Dette svarer til en forøgelse af tværsnitsarealet med en faktor 2,25, hvilket svarer til forøgelsen i TL henover hele spektret. En anden velkendt måde at forbedre lyddæmpningen på er ved at lade udstødningsrøret gå ind i ekspansionskammeret. Dette forsøges i Case C, hvor kammeret pludselig ses at blive særdeles velegnet til at absorbere frekvenser omkring 41, 120 og 200 Hz; frekvenser hvor der i case B ikke var nogen absorption. Det bemærkes at dette var helt uden at øge de ydre dimensioner. Der er dog tale om et forholdsvis nært frekvensbånd, hvorved der er stor risiko for, at lyddæmpningen i praksis vil ramme ved siden af den aktuelle motor. For at gøre lyddæmpningen mere bredbåndet er det nødvendigt at øge højden H af hele kammeret. I case D øges højden fra 6,0 til 8,0 meter. I sidste case E reduceres gastemperaturen fra 350°C til 20°C. Dette er interessant for en scrubber og rykker som forventet ud fra ovenstående teori alle absorptionstoppe mod de lavere frekvenser, hvor det ellers er vanskeligt at opnå en effektiv lyddæmpning.



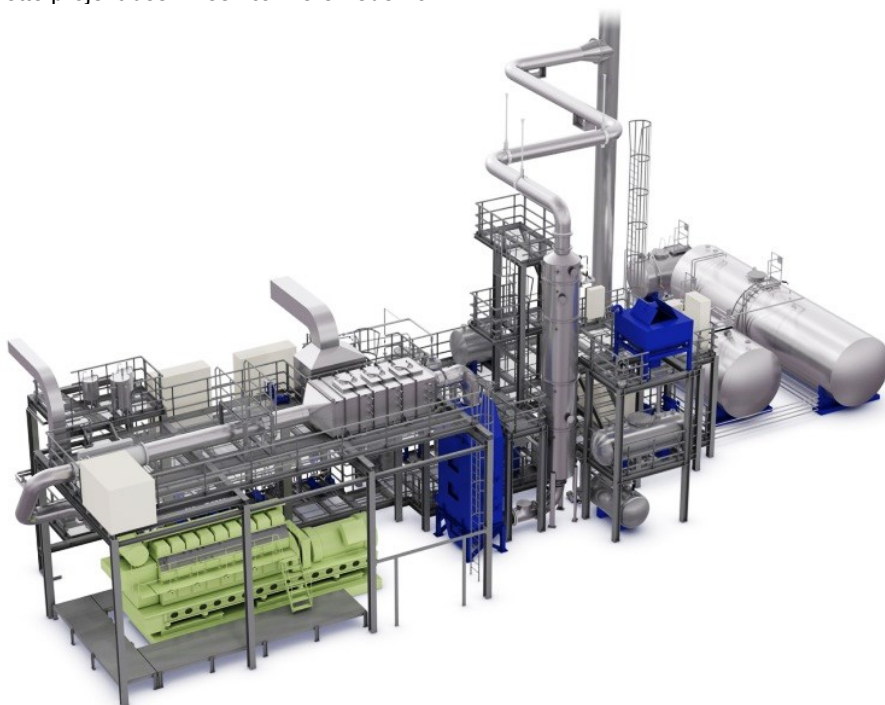
Figur 13: Idealiseret ekspansionskammer til lyddæmpning og valg af parametre for beregning af lyddæmpningseffekten (TL)



Figur 14: Beregnet TL for et ekspansionskammer med dimensioner og gastemperaturer som specificeret i figur 13.

5. Alfa Laval Test Center

På baggrund af tilskuddet fra Ecolnnovation besluttede Alfa Laval i 2012 at opføre et nyt testcenter bestående af en større marinemotor til generering af "beskidt" udstødningsgas, som herefter renses for NOx ved hjælp af en SCR, køles gennem en udstødningskedel og til sidst renses for svovl og partikler ved hjælp af en scrubber. Testcentret, som vist i figur 15, blev designet i løbet af 2012, opført 2013 og officielt indviet i starten af 2014. Testcentret er opført i en fabrikshal i Aalborg, hvor der også er produktion af kedler og scrubbere. Denne hal udmærker sig ved at have en loftshøjde på hele 18 meter, hvilket betyder, at kedlen kunne opføres i ét stræk (uden knæk), så gassen strømmer fra loft til gulv. Ligeledes kunne en ny type in-line scrubber opføres i ét stræk, hvor gassen strømmer fra gulv til loft. Dette gør, at forholdene (særligt gasopholdstiderne) svarer til forholdene ombord på et skib, hvor der netop er god højde fra motoren nederst i skibet og ret op til afkastet i toppen af skorstenen. En tanke under designet af testcentret har været at opbygge et komplet maskinrum på land. De vigtigste komponenter for dette projekt beskrives nærmere nedenfor.



Figur 15: Udstødningssystem bestående af en SCR enhed, udstødningskedel, og en in-line scrubber installeret efter en 1980 kW 4-taktsmotor (MAN 9L28/32)

5.1 Motor og generator

Motoren er leveret komplet med en 10 kV generator fra MAN Diesel & Turbo og er forbundet direkte til det elektriske højspændingsnet. Motoren er en 4-takts med en samlet akseffekt på 1980 kW fordelt over 9 cylindre, hver med en boring på 28 cm og en slaglængde på 32 cm og in-line (L, not V shape) – heraf betegnelsen 9L28/32. Da generatoren skal levere 50 Hz til nettet, er motoren begrænset til at køre med et fast omdrejningstal på 750 rpm i alle lastpunkter. Generatoren har ifølge specifikationen en virkningsgrad på 96,3 % ved fuld last, hvilket betyder, at den samlede effekt til elnettet er på 1907 kW. I praksis kan vi dog levere 2000 kW til elnettet.

Den øgede effekt skyldes primært mere optimal køling og koldere indsugningsluft til motoren i forhold til standardspecifikationerne (ISO betingelser).

Motoren er opført på et selvstændigt 50 ton tungt betonfundament og indbygget i et lydisolerende hus for at mindske støj og vibrationer. Dette betyder, at der stadig kan arbejdes uden høreværn i den fabriksal, hvori dette lydisolerede hus er placeret, og at motoren stort set er fuldstændig lydløs uden for hallen.

Motorens olie filtreres kontinuerligt ved hjælp af en kombineret filter og disk stack separator enhed (Elminiator GCU). Gassen fra krumpaphuset ventileres endvidere ved hjælp af en nyudviklet elektrisk drevet disk stack separator (PureVent), hvorved oliedråber separeres ud og returneres som smøreolie til motoren. På motorer uden PureVent ventileres disse oliedråber/tåger typisk blot ud i atmosfæren.

5.2 Tilkobling til fjernvarmenettet

Motoren var oprindeligt leveret med to kølevandskredse: en højtemperatur (HT) til køling af cylindrene og en lavtemperatur (LT) til køling af smøreolien og ladeluftskøleren. For at udnytte mest muligt af spildvarmen blev LT kredsen delt i to. I den ene kreds bruges kølevandet fra smøreolien (LT1) til at forvarme fjernvarme til ca. 47°C over en pladeveksler. I den anden kreds bruges HT vandet til at sikre, at fjernvarmen kommer helt op på ca. 82°C. Lavtemperaturkredsen (LT2) er for kold til, at energien heri kan udnyttes. Det er derfor nødvendigt at afkøle dette kølevand med søvand fra Limfjorden over en tredje pladeveksler som – i modsætning til de to andre – er lavet i langt dyrere søvandsbestandigt titanium. Ved fuld motorlast overføres der ca. 172 kW fra LT1 kredsen, 476 kW fra HT kredsen, og der mistes ca. 658 kW fra LT2 kredsen til Limfjorden. Varmevekslere er vist under deres installation i figur 16.

Endvidere benyttes dampen fra kedlen til fjernvarme. Dette gøres ved hjælp af en dampkondensator som vist i figur 17.



Figur 16: Pladevekslere til køling af motoren og opvarmning af fjernvarme.



Figur 17: Kondensator til generering af fjernvarme ved hjælp af damp fra udstødningskedlen.

5.3 Olieforsyningen til motoren

Uden for hallen er der installeret en 50 m³ tank til Heavy Fuel Olie (HFO) samt en 5 m³ tank til Diesel Olie (DO). Normalt kører motoren på HFO, og et typisk brændstofforbrug kan være 250 L/h, hvilket betyder at der er til ca. 200 timers drift i tanken. Diesellole forbruges typisk kun under opstart og nedlukning af anlægget, dog har der også været anvendt noget til referencemålinger på SCR'en samt til indkøring af et brændstofdoseringsmodel (FCM). Alfa Laval har i mange år lavet disse moduler, der ved hjælp af elektriske pumper og varmelementer øger trykket og temperaturen på olien op til ca. 130°C og 20 bar, hvilket er et krav for, at det kan sprøjtes ind i en motor. FC modulet er blevet videreudviklet til ikke blot at kunne skifte mellem HFO og DO, men også at kunne blande de to olier i forskellige forhold. Dette er blevet testet og indkørt i testcentret, således at det nu er muligt at køre test med forskellige svovlkoncentrationer. En analyse af HFO'en (udtaget 16/4-2014) viste 1,9% (w/w) svovl.

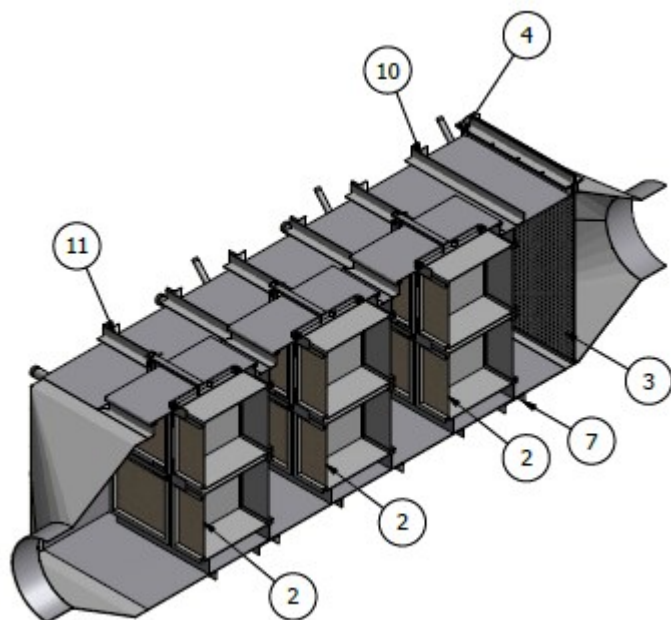
5.4 Mulighed for ekstra opvarmning af udstødningsgassen

Da temperaturen er en vigtig parameter for virkningen af SCR'en, er der blevet installeret 6 elektriske varmelementer på hver 50 kW i udstødningskanalen lige før SCR'en. I en virkelig installation vil det ikke give mening at bruge elektricitet til at opvarme udstødningsgassen, da der vil være bedre driftsøkonomi i at justere på andre parametre for at få temperaturen på gassen op. Dette vil typisk være overskudsluften til motoren, matche turboladeren, ændre modtrykket eller installere en hjælpebrænder. Alternativt placeres SCR'en før turboladeren, hvilket forventes at blive fremtidens. Varmelementerne i testopstillingen kan kobles til og fra uafhængigt af hinanden. Ved fuld motorlast kan alle 6 varmelementer opvarme udstødningsgassen med max. 70°C, ved halv motorlast kan de opvarme med ca. 140°C. Varmelementerne er ideelle for de planlagte test, idet det ved hjælp af disse er muligt at variere temperaturen uden at ændre på sammensætningen af gassen. Herved kan sammenhængen mellem temperatur og DeNOx grad bedre undersøges.

5.5 SCR anlægget

En vandig opløsning af urea (40 w/w %) sprøjtes ind som en fin spray inden SCR'en. Vandet fordamper, og urea'en omdannes til ammoniak (NH₃) næsten momentant. En ensartet opblanding af NH₃ og NOx er essentiel for at undgå overdosering af urea, slip af NH₃ samt belægninger i SCR'en og kedlen.

For netop at fremme denne opblanding er der installeret en mixer før SCR'en. Selve SCR'en er vist i figur 18. Gassen strømmer ind via en hulplade (3) og derefter igennem katalysatorlagene. Der er gjort plads til et 3. lag, men testene har vist, at 2 lag er nok til at overholde TIER III kravene. For hvert katalysatorlag er der monteret sodblæsere, som via et styresystem kan sættes til at rense efter et bestemt mønster og frekvens. Reaktoren er isoleret og har en adgangsløkke, så det er let at udskifte hulpladen (4) og en anden adgangsløkke, så det er let at skifte kassetterne eller sætte flere kassetter i, hvis der ønskes bedre NO_x omsætning.



Figur 18: Snittegning af SCR reaktoren med plads til 6 kassetter med katalysatorer i hvert af de 3 lag.

5.6 Udstødningskedel

Under forsøgene har der været installeret flere forskellige udstødningskedler. Den første var en såkaldt vandørskedel (AV8-N) med et designtryk på 19 bar. Denne kan se som den blå firkantede enhed til venstre i figur 19. Efter SCR'en strømmer gassen ind i toppen og varmeveksler på ydersiden af de glatte vandør. Fordelen ved denne kedel er – rent forsøgsmæssigt – at vandørstemperaturen er meget veldefineret ud fra damptrykket (7 bar). Herved kan det konkluderes mere præcist, hvorvidt der vil dannes belægninger på kedelrør med denne temperatur. Som et eksempel vil gassen typisk køles fra 330°C i toppen til ca. 200°C i bunden af kedlen ved en motorlast på 1.2 MW og uden nogen varmeelementer tilkoblet. Vandet tilføres via en manifold i bunden af kedlen og forlader toppen af kedlen som mættet damp til en damptromle. Trykket i damptromlen reguleres ved hjælp af en ventil, som tillader mere eller mindre damp til kondensatoren, som beskrevet i afsnit 5.2. Kondensatet returneres til bunden af kedlen via damptromlen.

Efter ca. 150 timers drift blev vandørskedlen udskiftet med en røgrørskedel. Her strømmer gassen inden i rørene. Denne kedeltype er mere almindelig og lettere at holde ren end vandørskedlen. Kedlen er speciallavet til forsøgene ved, at den er delt i tre sektioner, hvor hver sektion har hver sin rørtype, der ønskes testet. To af sektionerne kan så blændes helt af for gas, når der ikke køres forsøg med disse rørtyper. For at undgå belægninger på røgrørskedlen under andre forsøg med SCR'en og motoren er der endvidere installeret en såkaldt mikrokedel. Der køres således kun meget kontrollerede langtidforsøg på ovennævnte røgrørskedel. Under mindre veldefinerede motorbelastninger og forhold ledes gassen i en separat rørføring

og ved hjælp af blændplader gennem mikrokedlen, der er en nyudviklet udstødningskedel til fortrinsvis at blive monteret efter en mindre hjælpemotor.

5.7 In-line Scrubber

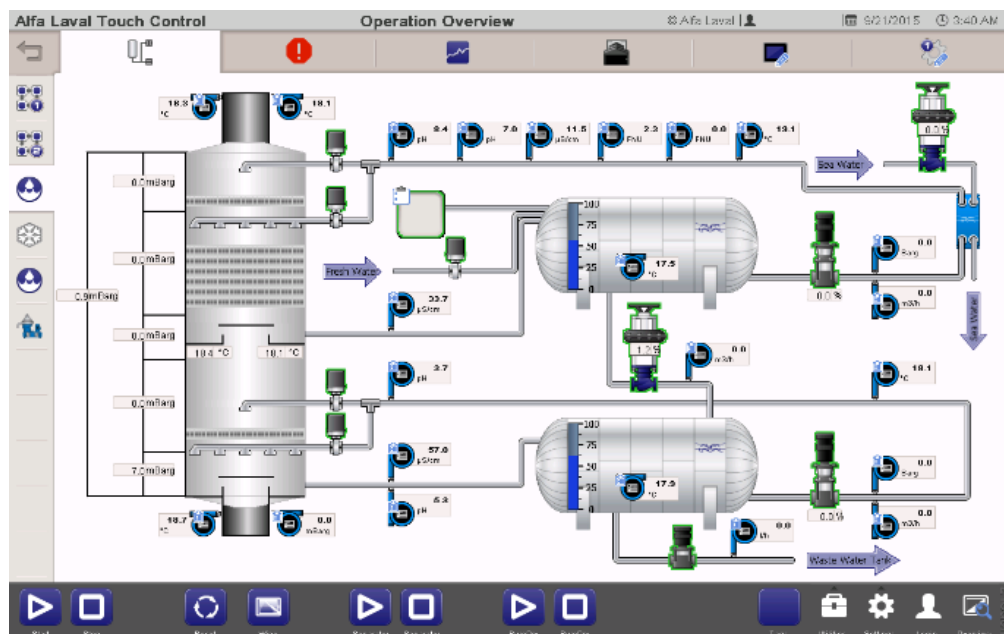
En ny såkaldt in-line scrubber monteret efter kedlen ses af figur 19. Scrubberen kan ses i forhold til Alfa Laval's U-formede scrubber¹⁹, hvor gassen skal op at vende for efterfølgende at strømme nedad i en såkaldt jet-sektion for derefter atter at vende og strømme nedad i en absorber-sektion. Dette U-design har sin store fordel i, at der er indbygget en meget effektiv vandlås, som sikrer, at vandet ikke kan løbe baglæns ned gennem udstødningsrøret og forårsage skade på motor og turbolader. U-designet har dog sin ulempe, da den er meget pladskrævende, idet den kræver 3 rørpassager ved siden af hinanden set ovenfra. I in-line scrubberen strømmer gassen i ét stræk fra neden og opad. Scrubberen består stadig af en første jet-sektion, hvor gassen køles fra ca. 220°C ud af kedlen til ca. 55°C ind til absorber-sektionen. I absorber-sektionen køles gassen herefter helt ned til ca. 30°C. I projektet har der været stor fokus på kontakten mellem udstødningsgas og vand for at sikre den nødvendige absorption. Der har også været stor fokus på at sikre vandlåsen under alle lastforhold på motoren, og at denne ikke brister under de termiske belastninger, som scrubberen udsættes for.



Figur 19: In-line scrubber med REFLEX princip designet og testet som en del af dette projekt.

Af billedet (figur 19) ses nederst til venstre for scrubberen jet-tank og over denne absorbertanken. Begge tanke er fremstillet i gasfiber armeret epoxy (GRE), der uden problemer kan klare lavere eller højere pH værdier og temperaturer, hvis for eksempel pladeveksleren eller alkali-doseringen svigter. Over de to tanke ses en blå silo, der indeholder natriumkarbonat (Na_2CO_3) til neutralisering af vandet i absorbertanken.

Hele anlægget styres ved hjælp af en PLC og en touch-screen som vist i figur 20. Anlægget kan også fjernstyres ved hjælp af en internetopkobling.



Figur 20: PLC skærm for kontrol af scrubberen.

Resultater og diskussion

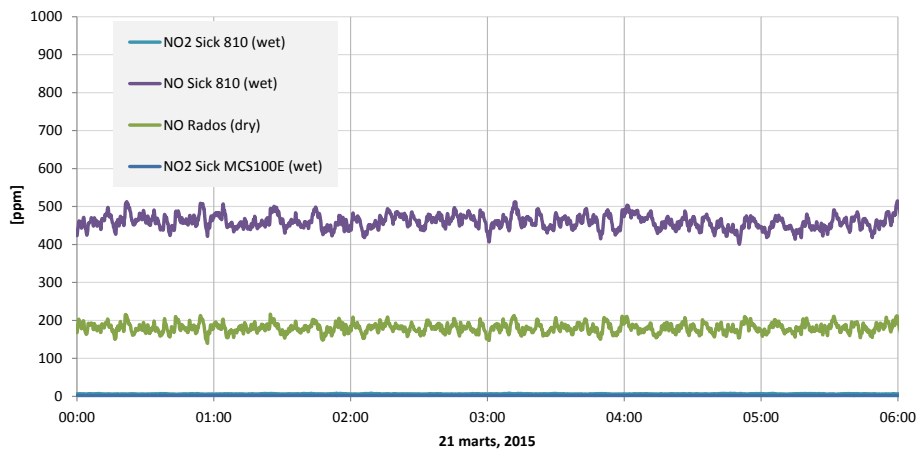
5.8 Forsøgsplan

Udvalgte forsøg og milepæle i testcentret er vist i tabellen nedenfor fra perioden efter den officielle åbning i januar 2014 og til afslutningen af dette projekt.

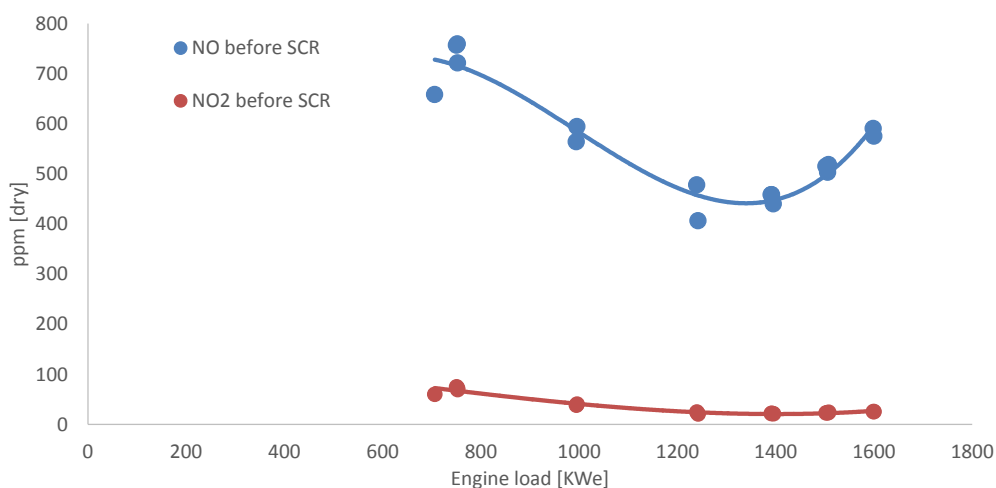
Dato	Forsøg / milepæl	Brændstof
30/01/2014 - 06/02/2014	Indkøring af motor	DO
12/02/2014 – 13/02/2014	Indkøring af urea dosering / dyse	DO
20/02/2014	Kalibrering af gasanalytatorer	DO
25/02/2014 – 26/02/2014	Indkøring af SCR	HFO
04/03/2014	Indkøring af faststoffdosering til scrubber	HFO
18/03/2014 – 20/03/2014	Måling af NH ₃ slip efter SCR sammen med Topsøe	DO & HFO
1/04/2014 – 09/04/2014	Dagskørsler med SCR + kedel + scrubber	HFO
	Ny mixer installeret før SCR Dekanter installeret til vandrensning på scrubber	
27/05/2014 – 04/06/2014	Dagskørsler med SCR + røgrørskedel + scrubber	DO & HFO
16/06/2014	Udskiftning af røgrørskedel til mikrokedel	HFO
17/06/2014 – 08/07/2014	Dagskørsler med SCR + kedel + scrubber	HFO
05/08/2014	Scrubber opgraderet	
12/08/2014 – 14/08/2014	SCR NO _x mapping (måling af NO i forskellige positioner efter SCR'en)	DO & HFO
15/08/2014 – 16/08/2014	Dagskørsler med SCR + mikrokedel + scrubber	HFO
19/08/2014	Mikrokedel inspektion + sod til analyse hos HT +rensning	
20/08/2014 – 02/09/2014	Dagskørsler med SCR + mikrokedel + scrubber	DO & HFO
03/10/2014	Tjek af motor efter 200 timer – brændstoffdyser skiftet Styresystem for SCR, kedel og EGC opgraderet til samme programmeringsstandard	
20/11/2014 – 09/12/2014	Dagskørsler med SCR + mikrokedel + scrubber	HFO
24/02/2015	NO _x check uden urea	HFO
20/03/2015 – 22/02/2015	Langtidstest af SCR + kedel (50 timer)	HFO
13/11/2015	Lydmålinger henover scrubber	HFO
17/12/2015	Test med kold probe efter SCR	HFO
29/01-2016 – 04/02/2016	Langtidstest af SCR + kedel (150 timer)	HFO

5.9 NO_x reduktion

NO_x niveauerne før og efter SCR er vist i figur 21 for en stabil periode. Lige efter motoren og før SCR'en måles ca. 450 ppm NO (på våd basis) og stort set ingen NO₂. Efter SCR'en (og kedel og scrubber) måles der ca. 180 ppm NO, hvilket svarer til TIER III kravet for den pågældende motor med et omdrejningstal på 750 rpm (2,39 g NO_x/kWh). NO₂'en er lavere end detektionsgrænsen efter SCR'en. Årsagen, til at vi præcist rammer TIER III niveauet, skyldes, at ureadoseringen justeres til at nå dette sætpunkt ved hjælp af en PID regulator i kontrolsystemet udviklet som en del af dette projekt. NO_x niveauet kan sagtens komme længere ned, men så stiger risikoen for NH₃ slip og følgende konsekvenser med risiko for dannelse af ABS belægninger på kedlen. Der var ikke noget målebart NH₃ slip under forsøgene, dog kan der have været risiko for, at NH₃ har reageret med SO₂ og dermed udkondenseret som ABS i varmeslangen til analysatoren (160°C).



Figur 21: NO målinger før og efter SCR. Gasanalytoren SICK 810 måler lige efter motoren og før SCR'en, mens SICK MCS100E sidder lige efter kedlen og Rados'en sidder efter scrubberen. Motorlasten var konstant på ca. 1.350 kW (1234 kWe) under hele forsøgsperioden 20-22/3, 2015.



Figur 22: NO og NO₂ lige efter motoren som funktion af motorlasten. Sick 810, 1-2. Sep. 2014

5.10 Belægningsdannelser på udstødningskedlen

En af de største udfordringer er at koble SCR med kedlen, idet et evt. ammoniakslip kan reagere med svovlen under dannelse af ammonium bisulfat (ABS) eller ammonium sulfat (AS). De overordnede reaktionsmekanismer for dannelsen af ABS og AS er som følger:

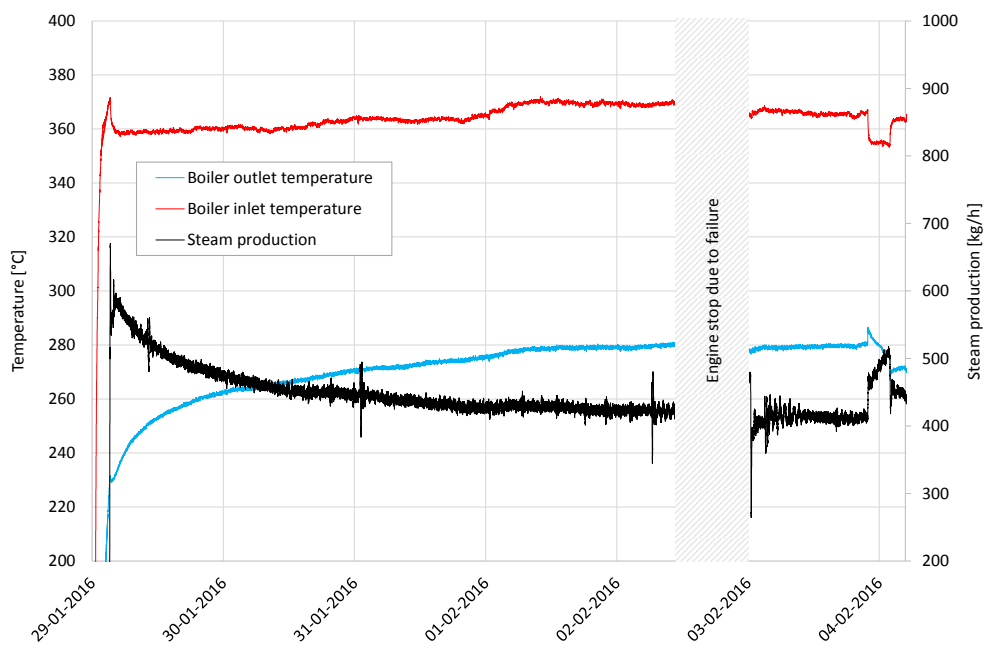


Dannelsen af AS er termodynamisk mere stabilt end ABS, men undersøgelser foretaget af Haldor Topsøe viser, at AS kun dannes i begrænsede mængder i forhold til ABS for de anvendte katalysatorelementer²⁰. Det bekræftes, som nævnt nedenfor, også i nærværende forsøg.

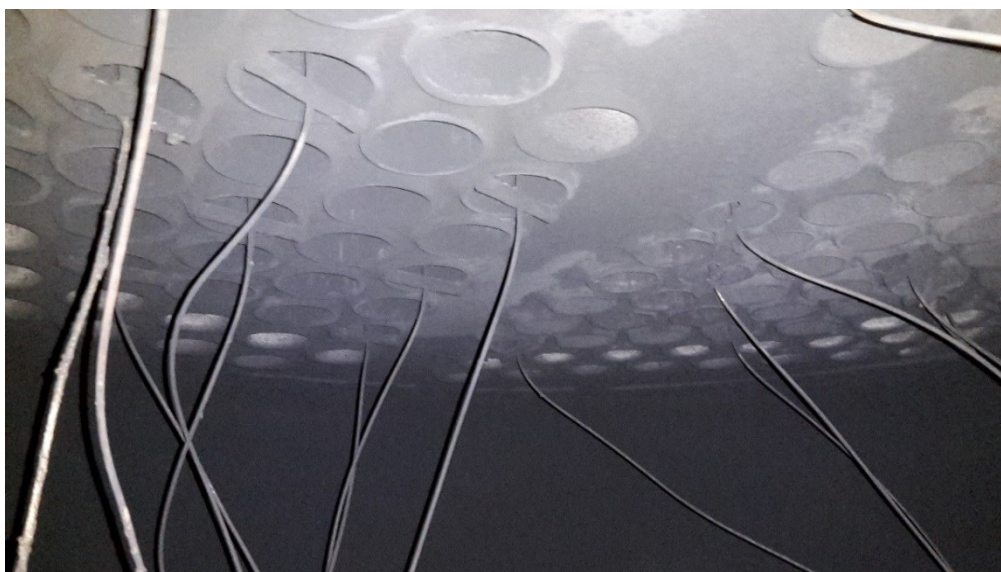
Der er risiko for, at disse komponenter vil sætte sig i kedlen, hvilket i første omgang vil forringe varmeoverførslen men på sigt også forårsage højere tryktab henover kedlen og i værste tilfælde, at kedlen og motoren må lukkes helt ned. Den forringede varmeoverførsel vil typisk medføre, at der skal laves mere damp på en oliefyret kedel eller en lavere ydelse på en eventuel dampturbine. Både dette og et større modtryk på motoren vil medføre et øget CO₂ udslip.

Som afsluttende forsøg i dette projekt blev der kørt 150 timer (6 døgn) kontinuerligt med motoren på høj svovlholdig olie og med SCR og scrubberen i drift. Alt forsøgtes at holdes så stabilt som muligt i disse 6 døgn for at følge opbygningen af sod i kedlen. Som det ses af figur 23, lykkedes det efter ca. 3 døgn at stabilisere belægningen af sod i kedlen. I starten falder temperaturen, hvilket er helt naturligt for en ren og nyvasket kedel, indtil et stationært lag af sod er opbygget. I slutningen af perioden øges motorlasten fra 1,2 MW til 2,0 MW for så at sætte motorlasten tilbage til 1,2 MW. Som det klart fremgår, giver dette en bedre varmeovergang, idet soden blæses væk ved den højere motorlast. Som nævnt i indledningen har et af de store spørgsmål netop været, om det ammoniumsulfat / ammoniumbisulfat, som uundgåeligt vil dannes i større eller mindre mængder, vil sætte sig som hårde belægnings eller som støv på de kolde kedelrør. Det er særdeles positivt og et meget vigtigt resultat, at det tydeligvis er løst støv, som på normal vis sætter sig indtil en vis lagtykkelse, og som kan blæses af igen udelukkende ved at øge motorlasten (gas flowet) og helt uden brug af sodlæsningsudstyr. At der er tale om løst støv og ikke hårde sammensmeltede belægnings, fremgår også af billeder og prøver der, blev udtaget, efter at kedlen var kølet ned og kunne åbnes for inspektion (figur 24). Analyser, af støv der kunne skræbes af i bunden af kedelrørene, viser, at støvet består af 65% (w/w) ABS, 5% (w/w) AS og 20% (w/w) karbon. Det resterende 10% antages overvejende at være brint, ilt og spormetaller.

Det skal dog fremhæves, at konklusionen kun er for kombinationen af den valgte katalysator og kedeltype, hvor opblandingen og oxidationen af urea gennem dette projekt er blevet optimeret og testet. Den valgte katalysator er netop kendetegnet ved at have en minimal oxidation af SO₂ til SO₃, hvilket minimerer dannelsen af ABS i henhold til ovenstående reaktionsskemaer. Andre katalysatorer vil have en anden kemisk sammensætning og overfladeegenskaber, som typisk vil medføre, at ABS vil have en tendens til at danne hårdere belægnings og dermed umuliggøre videre drift. Andre kedeltyper vil have anderledes strømningsforhold og temperaturer, hvorved ABS muligvis også kan ophobes og risikere at danne hårdere belægnings.



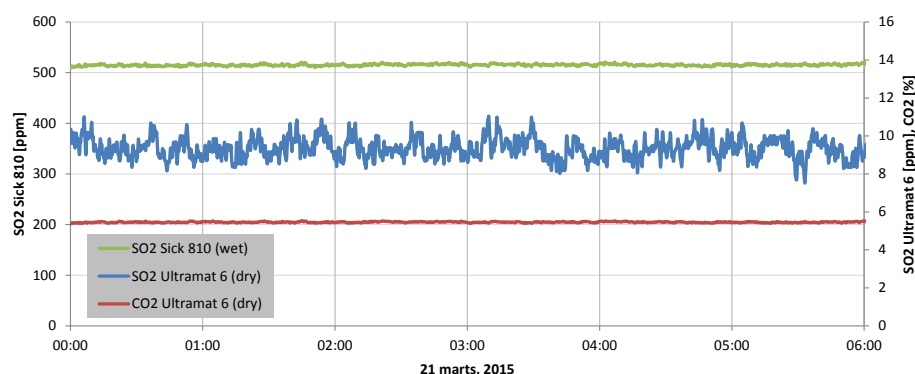
Figur 23: Indløbs af afgangstemperatur for udstødningskedlen under 150 timers testkampagne.



Figur 24: Udstødningskedel set fra bunden og op efter 150 timers drift på høj svovl HFO og med SCR i drift. Termoelementer monteret for at måle temperaturen ud af forskellige rørtyper som blev testet.

5.11 SO₂ reduktion

SO₂ niveauet før og efter scrubberen er vist i figur 25 sammen med en CO₂ måling. Efter scrubberen er SO₂'en under 10 ppm og CO₂'en på ca. 5,5%, hvilket svarer til et svovlindhold i brændstoffet på kun 0,04%. Scrubberen reducerer altså svovlen med 60% ekstra i forhold til 0,1% svovlkravet. Scrubberen regulerer ikke doseringen af natriumkarbonat eller vandflowet efter gasmålingen, så også en opskaleret ferskvandsskrubber i virkelig drift vil reducere svovlindholdet til dette lave niveau.



Figur 25: SO₂ målinger før og efter scrubber samt CO₂ måling. Motorlast konstant 1.350 kW (1234 kWe) i perioden.

5.12 Reduktion af sod (PM)

Alle forsøgene er blevet kørt i et helt lukket ferskvandssystem efter REFLUX konceptet. Det mest beskidte vand fra jet-tanken renses ved hjælp af en højhastighedsseparator (figur 25), som danner en koncentreret flydende olieslam (indeholdende ca. 10% w/w faststof). Dette slam opsamles i en tank og koncentrerer yderligere ved hjælp af en lille dekanter, så det får en fedtet og tjæreagtig konsistens (figur 26). Under testene blev denne sod opsamlet, og som det fremgår af figur 27, lykkedes det at stabilisere vandrensningen og dermed produktionen af sod-slam til 1,8 kg/h eller 1,5 kg/MWh. En kemisk analyse (tabel 4) viser, at dette sodslam indeholder ca. 32% tørstof, hvoraf størstedelen er natriumsulfat og olierester (hydrokarbon, asfaltener, m.v.), men hvor der også findes spormetaller af særligt vanadium og nikkel. Dette er i god overensstemmelse med tidligere undersøgelser¹². Det skal bemærkes, at det ikke var umiddelbart muligt at udtage en repræsentativ prøve af den faste sludge, som blev opsamlet fra PureDry, hvorfor tallene, med hensyn til hvor meget der opfanges i sludgen, er behæftet med stor usikkerhed, ligesom både svovl og metaller er opbygget i SCR-reaktoren og kedlen undervejs i forsøgene.

Tabel 4: Sammensætning og massebalance for svovl og tungmetaller i HFO, sludge og bleed-off vand under 150 timers testene ved 1.2 MW.

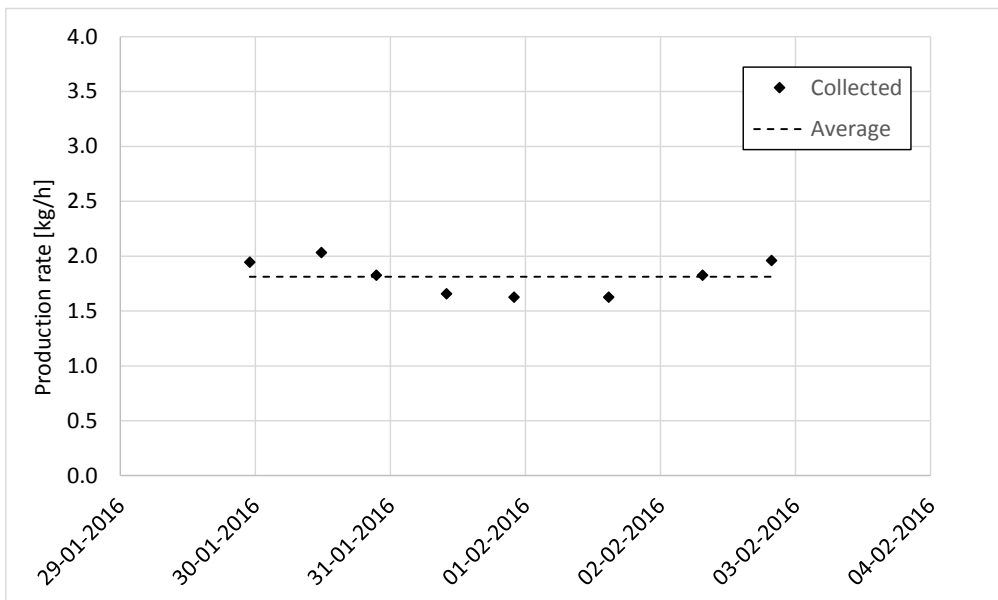
		HFO	Sludge	Water bleed-off
Flow	kg/h	287	1.8	231
Svovl (S)	mg/kg	27094	31942	29740
Nikkel (Ni)	mg/kg	53	745	11
Vanadium (V)	mg/kg	221	2740	46
Jern (Fe)	mg/kg	39	1462	10
Svovl (S)	mg/MWh	6480	48	5725
Nikkel (Ni)	mg/MWh	13	1	2
Vanadium (V)	mg/MWh	53	4	9
Jern (Fe)	mg/MWh	9	2	2



Figur 26: Højhastigheds separator (SWPX 407) for rensning af scrubbervand. Sod slam indeholdende ca. 10% (w/w) vand skydes fra separatoren og ned i en tank placeret under denne.

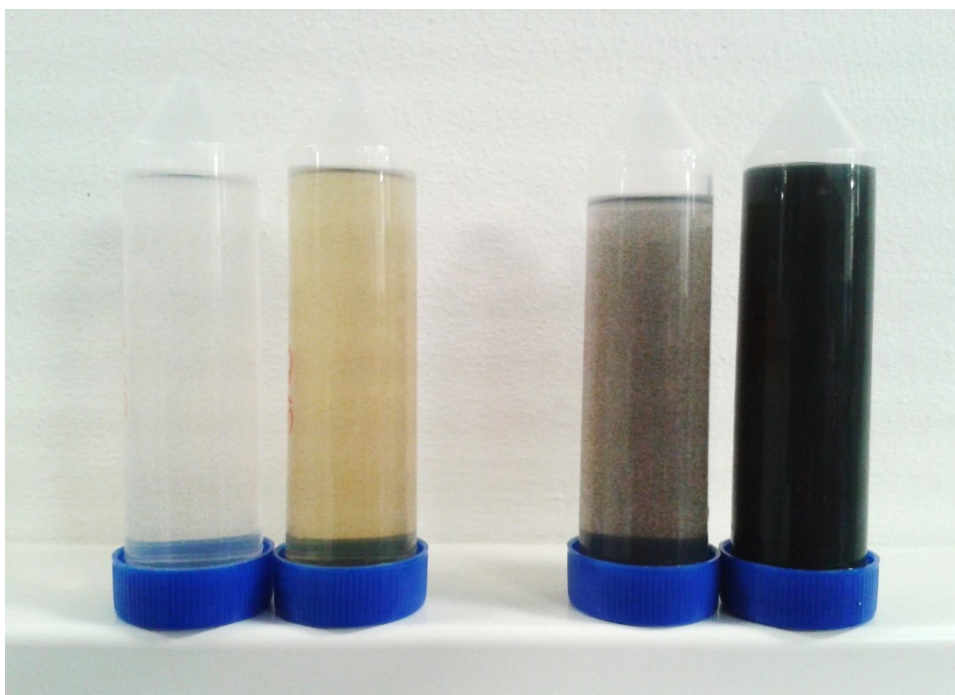


Figur 27: Dekanter (PureDry) for opkoncentrering af slammet fra separatoren til fast sod der blev opsamlet i spande og vejlet løbende under 150 timers testene.



Figur 28: Produktion af sod-slam under 150 timers testene.

Under "50 timers" forsøgene startende den 20-03-2015 blev der udtaget prøver af vandet fra jettanken og absorbertanken efter henholdsvis 24 timers og 48 timers drift i REFLUX mode og uden drift af separatoren for vandrensning. Af figur 29 ses tydeligt, at vandet i absorber-tanken er langt mere klart end vandet i jet-tanken, hvilket helt er som tiltænkt i REFLUX princippet. Yderligere analyser af vandet fremgår af Tabel 5. Også her ses en kraftig reduktion af "suspended solid" (SS) og "total dissolved solid" (TDS) i absorber vandet i forhold til jet-vandet. REFLUX flowet måles til omkring 1,0 m³/h, hvilket også er i overensstemmelse med beregningerne, og hvilket for et typisk fuldskala-anlæg kan reducere kravet til separatorkapacitet for behandling af scrubbevand med ca. 50%. Selvom scrubberen er forsynet med en effektiv dråbefang til fjernelse af vanddråber, inden gassen forlader scrubberen, kan det ikke undgås, at nogle få mikroskopiske dråber rives med gassen ud. Det renere vand i absorbersektionen gør, at disse dråber bliver mindre sorte, hvorved risikoen for misfarvning af dækket på et skib mindskes.



Figur 29: Vandprøver fra jet- og absorbertanken efter henholdsvis 24 timers og 48 timers drift med REFLUX. Fra venstre: Absorber vand efter 24 timer, jet vand efter 24 timer, absorber vand efter 48 timer og jet vand efter 48 timer. Bemærk at separatoren for rensning af vandet ikke har kørt under disse forsøg for at fremhæve forskellene i renhed mellem jet- og absorber vandet. Under normale omstændigheder med separatoren i drift vil vandet ikke blive så beskidt som vist her.

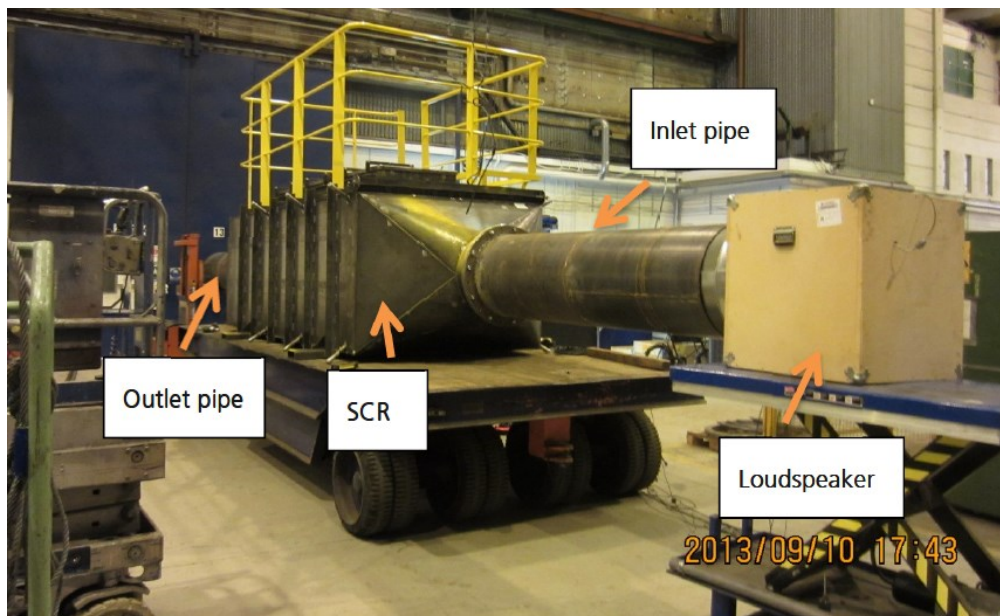
Tabel 5: Analyse af jet og absorber vand efter 24 og 48 timers drift. SS = suspended solid, TDS = total dissolved solid

		SS	TDS	TDS+SS
	Hours	g/L	g/L	g/L
Abs	24	0.17	9.9	10.07
Jet	24	0.82	48.0	48.82
Abs	48	0.23	21.0	21.23
Jet	48	1.10	67.0	68.10

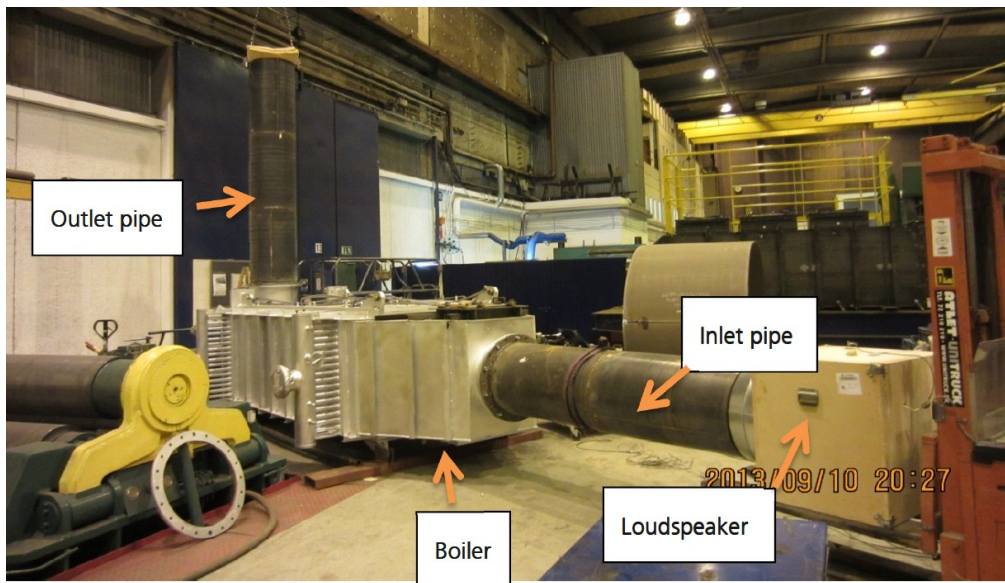
5.13 Lyddæmpning

Lydmålinger blev foretaget af Lloyds Register of Consulting (LRC) over hver af de enkelte enheder som vist i figur 30 til figur 32. Metoden er at placere en højttaler i indløbsrøret og måle lydintensiteten før og efter enheden henover hele lydspektret (1/3 octave band). Transmissionsstabet (TL) beregnes så som beskrevet i afsnit 4.4.3.

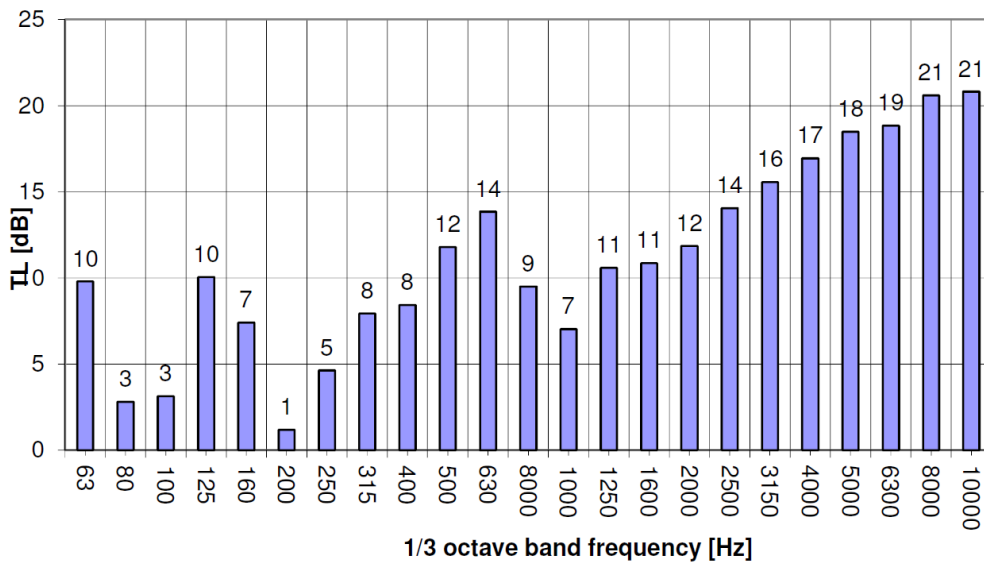
Som det ses af figur 33, opnås der betydelig lyddæmpning over SCR'en (over 10 dB) ved frekvenser over 1000 Hz og også ved 63 og 125 Hz. Kedlen har en bedre lyddæmpningseffekt end SCR'en henover næsten hele frekvensspekteret (men også et højere tryktab). Ses der for eksempel på motorfrekvenserne i figur 11, topper lydniveauet ved 63 Hz men forbliver kraftigt helt op til 4000 Hz. Det kan i øvrigt tilføjes, at SCR designet til dette anlæg er udført med henblik på ekstra lavt modtryk for at sikre mulighed for test af andet udstyr i systemet. Et sådant design ikke er optimalt i forhold til lyddæmpning, hvorfor man i praksis ofte vil se betydeligt bedre bidrag til lyddæmpning fra en SCR. Til sammen giver SCR, kedel og scrubberen en meget effektiv lyddæmpning, hvilket også bekræftes af, at der ikke er problemer med støj hverken indenfor eller udenfor, når vi kører med motoren. Sidstnævnte er vigtigt og en betingelse for miljøgodkendelsen, idet der ligger boliger tæt ved testcentret. Potentialet for den samlede lyddæmpning er stort, når vi ser på udbredelsen af teknologien, idet problemer med støj fra skibe er et stigende problem i havneområder¹⁷.



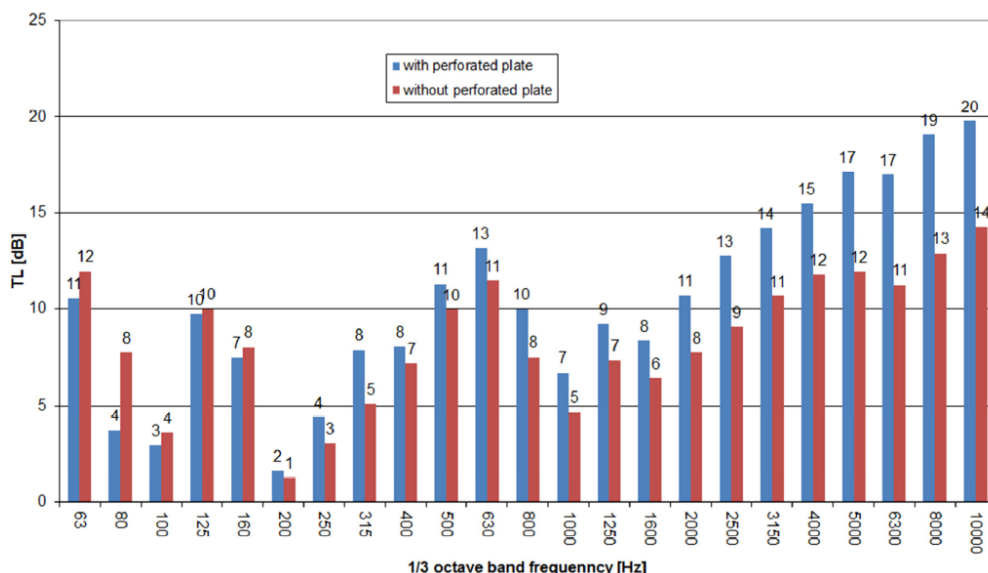
Figur 30: Setup for målinger af lyddæmpningen over SCR reaktoren.



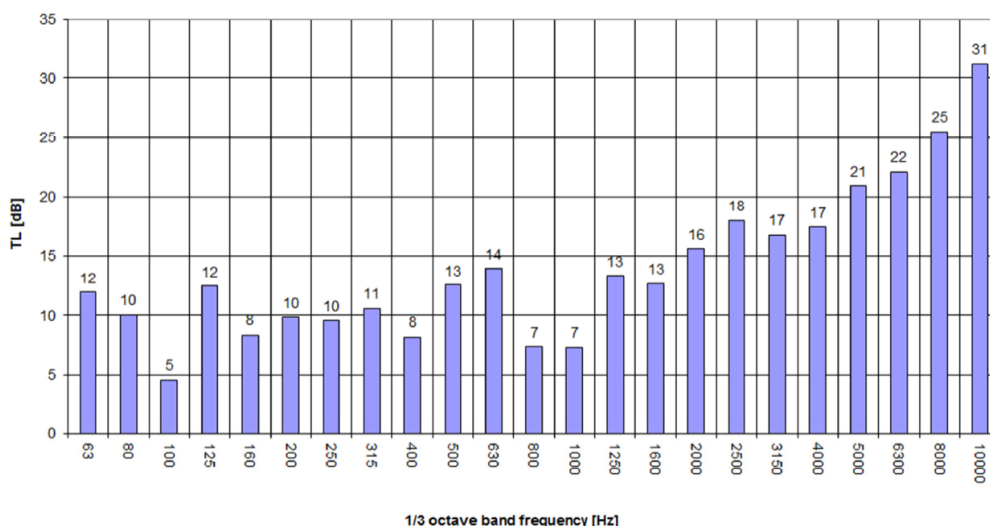
Figur 31: Opsætning for måling af lydæmpningen over røgrørskedlen.



Figur 32: Opsætning for målinger af lydæmpning over scrubberen.



Figur 33: Transmission Loss (TL) målt over SCR'en med og uden fordeleplade ved indgangen.



Figur 34: Transmission Loss (TL) målt over røgrørskedlen.

5.14 Optimalt systemdesign

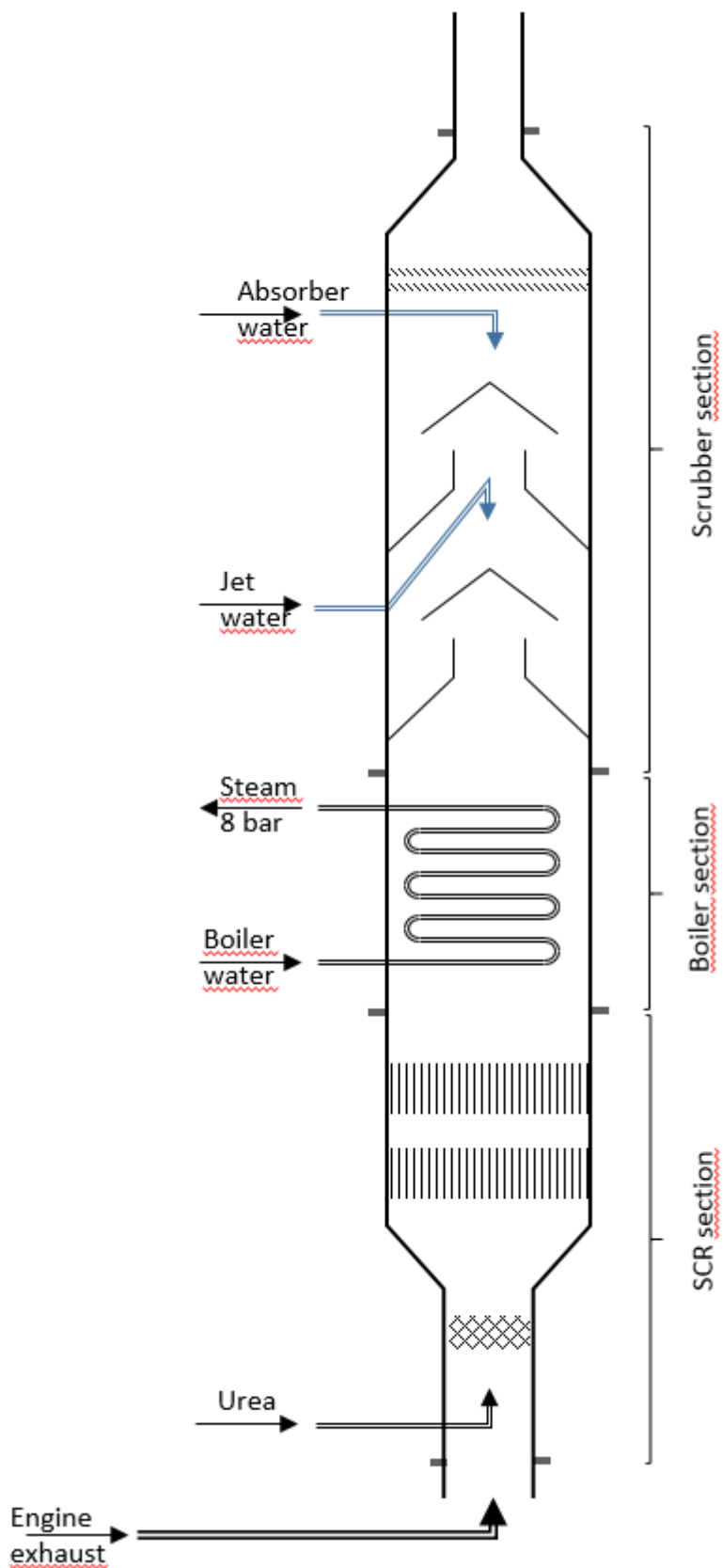
En af de største udfordringer i projektet har været tryktabet henover hele systemet. Dette vil specielt være et problem i retrofit situationer, hvor turboladeren ikke er udlagt til at have disse komponenter efter sig. Nyere motorer tillader et højere modtryk, idet turboladeren kan designes (matches) til dette krav. Et øget modtryk vil dog altid medføre et øget brændstofforbrug. En måde at reducere tryktabet på kunne være ved at placere alle komponenterne i et langt lige rør fra bunden af maskinrummet og op til toppen af skorsten som skitseret i figur 35. På denne måde undgås kontraktioner og ekspansioner mellem alle enhederne samt rørbøjninger, hvorved tryktabet kan mindskes med ca. 15 mbar i forhold til installationen i testcentret. Endvidere opnås der en mere optimal gasfordeling mellem SCR'en og kedlen, idet gasstrømmen ikke centrerer i midten af røret efter SCR'en.

Installationen vil også være forholdsvis let at gennemføre på et værft, idet enhederne blot skal boltes sammen i de indikerede flanger, som i forvejen kan være lavet og kontrolleret, så disse passer fuldstændigt til hinanden.

Det udviklede program til simulering af lyddæmpningen kan benyttes til at optimere de enkelte højder og afstande, således at motorens tændingsfrekvenser (og andre ordner heraf) dæmpes mest effektivt. Den højfrekvente støj vil særligt blive dæmpet af SCR'en, kedlen og af dråbefanget over skrubberen.

PLC styresystemet, der er udviklet og testet i testcenteret som en del af dette projekt, vil kunne overføres og anvendes til at styre både ureadoseringen, sodblæsningen til SCR'en, dampsystemet til kedlen og hele vandsystemet til skrubberen. Dette styresystem indeholder også en datalogger, så der er dokumentation for, at emissionskravene bliver overholdt.

Der skal arbejdes videre med procesberegninger og detailtegninger af den viste konceptløsning for at bestemme de overordnede dimensioner, tryktab og lyddæmpningsspektra.



Figur 35: Koncept for et komplet rensningsanlæg til at blive monteret efter et skib. Ideen er at integrere alle enhederne i et langt cirkulært rør fra bunden af skibet til toppen af skorstenen. Herved undgås kontraktioner, ekspansioner og bøjninger af gaskanalen så tryktabet kan minimeres.

6. Konklusion og videre arbejde

I projektet er der opbygget et komplet efterbehandlingsanlæg for reduktion af NO_x, SO_x, PM og støj fra større marinemotorer, som drives af høj svovlholdigt brændstof. Endvidere består efterbehandlingsanlægget også af en kedel, som kan hjælpe til med at udnytte overskudsvarmen i udstødningsgassen til andre opvarmningsformål eller til fremdrift af skibet ved hjælp af en damp turbine (specielt relevant på større skibe). Potentielt kan en kedel være med til at reducere brændstofforbruget med helt op til ca. 8%, hvilket ikke alene reducerer CO₂ emissionen men også alle de andre emissioner med ca. 8%.

En væsentlig problemstilling i projektet har været at koble teknologierne, herunder særligt at koble SCR'en med en kedel, idet et eventuelt slip af NH₃ fra SCR'en potentielt kan reagere med svovl og danne ammoniumsulfat (AS) eller ammoniumbisulfat (ABS), som efterfølgende kan kondensere og danne belægninger på kedlen. I projektet er der blevet kørt i alt 500 timers drift, uden at der er blevet konstateret hårde belægninger, som ikke let kan blæses af. Dette gælder for både vandrørs- og røgrørskedlen. Under forsøgene med røgrørskedlen opbyggede der sig et løst lag af sod på kedelrørene på samme måde som efter motorer uden SCR. Dette sod indeholder ca. 70% (w/w) ABS men er ikke fedtet og danner ikke hårde belægninger, hvorved drift af motoren på højsvovlholdigt olie og med SCR, kedel og scrubber er muligt.

I projektet er der også udviklet en ny type in-line scrubber med et såkaldt REFLUX vandsystem. Analyser af gassen har vist, at denne scrubber reducerer SO₂ emissionen til ca. 8-10 ppm, hvilket er væsentligt under de 16-20 ppm en typisk motor, som sejler på 0,1% svovlholdigt olie, ville emitte. REFLUX princippet og den separator, der er installeret til rensning af scrubber-vandet, opsamler ca. 1,5 kg fast sod per time per MW.

Samlet set giver SCR'en, kedlen og scrubberen en rigtig god lyddæmpning henover hele frekvensspektret. Dog er modtrykket for højt i den nuværende opstilling og et område, hvor der stadig bør forbedres i det videre arbejde. I en virkelig skibsinstallation, hvor der typisk er over 30 meter fra motorrummet i bunden af skibet til toppen af skorstenen, vil det være oplagt at lave SCR'en, kedlen og scrubberen i ét samlet lige optræk og fjerne alle kontraktioner og ekspansioner mellem enhederne. Dette vil reducere modtrykket markant, men kan dog også påvirke lyddæmpningen en smule negativt.

Mere overordnet er der i kraft af dette projekt blevet skabt en platform for videre forskning og udvikling af motorerne samt alle komponenterne og efterbehandlingsanlæg efter denne. Samarbejde er således blevet dannet og/eller forstærket med andre firmaer, kunder og uddannelsesinstitutioner. I perioden 2014 og 2015 har der været ca. 870 registrerede besøgende på testcentret. Firmaer som eksempelvis DANFOSS IXA har testet en ny in-situ gasanalysator efter motoren, og et firma som Green Instruments har testet en ny analysator for monitorering af særlige oliekomponenter (PAH'er) i udledningsvandet fra scrubberen. En lang række maskinmesterstuderende har udført afgangsprojekter i testcentret (eksempelvis omkring rensning af scrubbevand, separator til oprensning af smøreolie og for programmering af PLC styresystemer). Nye projekter og samarbejde er allerede planlagt for de næste 3 år og en større udvikelse af testcentret er under udarbejdelse. Særligt skal nævnes INNO+ projekterne²¹, hvor 2 projekter vil drage nytte af testcentret opbygget på baggrund af dette projekt. I det første projekt skal de kemiske reaktioner og aerosoldannelsen på SCR reaktoren yderligere afdække de kemiske reaktioner og fysiske forhold, som spiller ind på dannelsen af ABS og AS.

Her fortsætter Alfa Laval A/S i samarbejde med Haldor Topsøe A/S, Danmarks Tekniske Universitet og Maersk Maritime A/S forskningen og udviklingen af SCR'en og de relaterede belægningsdannelser. I det andet projekt fokuseres der i samarbejde med MAN Diesel & Turbo på karakterisering og måling af sodpartikler, samt på hvordan motoren og skrubberen påvirker PM emissionerne. Begge disse Inno+ projekter forventes afsluttet i 2018.

7. Referencer

1. Hein de Wilde, Pieter Kroon; CLEANER SHIPPING: TRADE OFF BETWEEN AIR POLLUTION, COSTS AND REFINERY CO2 EMISSIONS, 2008; <https://www.ecn.nl/docs/library/report/2008/m08047.pdf>
2. Arto Sarvia, Carl-Johan Fogelholmb, Ron Zevenhovena; Emissions from large-scale medium-speed diesel engines:2. Influence of fuel type and operating mode; Fuel Processing Technology, 89, p 520–527, 2008.
3. http://www.lr.org/en/_images/213-34172_global_marine_fuel_trends_2030.pdf
4. Sebastian Oeder et al; Particulate Matter from Both Heavy Fuel Oil and Diesel Fuel Shipping Emissions Show Strong Biological Effects on Human Lung Cells at Realistic and Comparable In Vitro Exposure Conditions; PLOS one, Open Access; June 3, 2015.
5. <http://mst.dk/service/publikationer/publikationsarkiv/2012/jun/udvikling-og-demonstration-af-et-modulopbygget-varmegenvindings--og-skrubberanlaeg-til-reduktion-af-sox-pm-co2-og-nox/>
6. Jensen, Anders Bo, Selective Catalytic Reduction for maximum NOx emission Control, Haldor Topsøe A/S, Scandinavian Yearbook of Maritime Technology 2000.
7. Henrik Christensen, Michael Finch Pedersen, Peter Skjoldager and Marco Fam; Tier III SCR FOR LARGE 2-STROKE MAN B&W DIESEL ENGINES; MAN Diesel & Turbo, Tegholmegade 41, 2450 Copenhagen SV, Denmark
8. <http://www.indexmundi.com/>
9. http://da.wikipedia.org/wiki/Aalborg_V%C3%A6rft
10. <http://mst.dk/service/publikationer/publikationsarkiv/2012/jun/udvikling-og-demonstration-af-et-modulopbygget-varmegenvindings--og-skrubberanlaeg-til-reduktion-af-sox-pm-co2-og-nox/>
11. <http://mst.dk/service/publikationer/publikationsarkiv/2012/jun/exhaust-gas-scrubber-installed-onboard-mv-ficaria-seaways/>
12. <http://mst.dk/service/publikationer/publikationsarkiv/2012/jun/assessment-of-possible-impacts-of-scrubber-water-discharges-on-the-marine-environment/>
13. Exhaust Gas Scrubber Washwater Effluent; United States Environmental Protection Agency Office of Wastewater Management; EPA-800-R-11-006; November 2011.

14. <http://www.fasterfreightcleanerair.com/pdfs/Presentations/FFCAPNW2008/Dave%20Kircher%20presentation%20FFCA%20PNW.pdf>
15. <http://cleantech.cnss.no/wp-content/uploads/2011/05/2010-Holland-America-Line-Sea-water-scrubber-technology-demonstration-project-on-the-MS-Zaandam.pdf>
16. Jens Peter Hansen, Søren Mølgaard, Cleaning system and method for reduction of SOx in exhaust gases, 2014, EP2775112 (B1).
17. Lloyds Register ODS, Noise from ships in ports – Possibilities for noise reduction, Environmental Project No 1330 2010
18. Istanvan L. Ver, Leo L. Beranek; Noise and Vibration Control Engineering, Principles and applications, 2nd edition, page 6-7.
19. <http://www.alfalaval.com/products/process-solutions/environmental-protection-solutions/Wet-exhaust-gas-cleaning-system/PureSOx/>
20. Thøgersen, Joakim Reimer; Slabiak, Torben; White, Nathan; Ammonium bisulphate inhibition of SCR catalysts; Haldor Topsøe A/S.
21. http://ufm.dk/publikationer/2013/filer-2013/innova_hovedkatalog_interaktiv_web.pdf

Komplet efterbehandlingssystem til skibe

To test, develop, and optimize a complete exhaust gas cleaning system, a test facility consisting of a 2 MW 4-stroke engine + SCR reactor for NO_x reduction + exhaust gas boiler for waste heat recover + exhaust gas scrubber has been erected. This report describes the result of testing and optimizing the complete train of components: SCR, Waste Heat Recovery and scrubber. It also describes the noise attenuation in these units.



Miljøstyrelsen
Strandgade 29
1401 København K

www.mst.dk