



Miljø- og  
Fødevareministeriet  
Miljøstyrelsen

# Optimering af EGR køler

MUDP-projekt

Juni 2017

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Nis Peter Reinholdt, Teknologisk Institut,

Claus H. Ibsen, Vestas Aircoil og

Jannik B. Pedersen, MAN Diesel & Turbo

ISBN: 978-87-93614-84-0

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter indenfor 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 indlægget udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

# Indhold

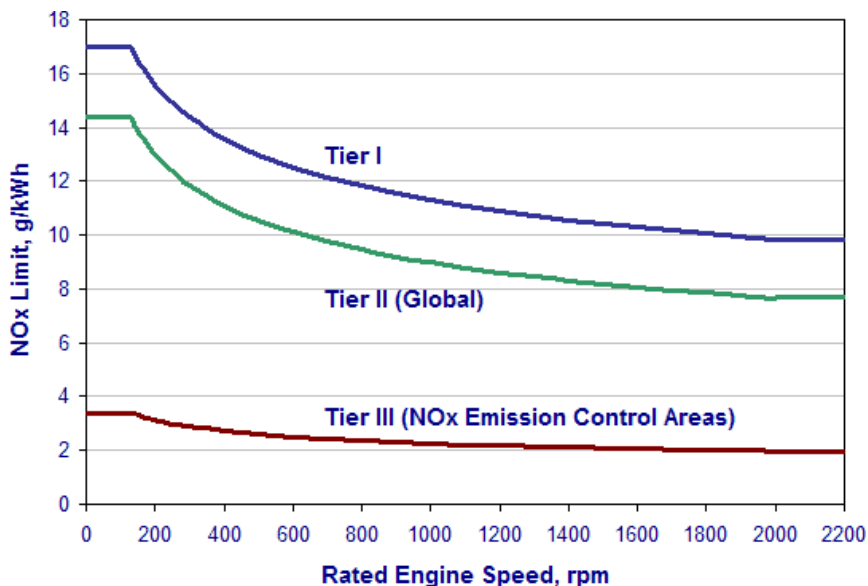
<b>1.</b>	<b>Introduktion</b>	<b>4</b>
1.1	Baggrund for projektet	4
1.2	Det simple EGR-system	4
1.3	Projektets formål	5
1.4	Støttens betydning	6
<b>2.</b>	<b>Målekampagne</b>	<b>7</b>
2.1	Introduktion	7
2.2	Test set-up hos MAN Diesel & Turbo	7
2.3	Resultater fra tests hos MAN Diesel & Turbo	9
2.4	Eksisterende test set-up hos Vestas Aircoil	11
2.5	Forberedelser til nyt test set-up hos Vestas Aircoil	11
2.5.1	Ombygget teststand	12
2.5.2	Oliesystem	12
2.5.3	Spray-system	13
2.5.4	EGR kølekreds	13
2.6	Resultater fra test hos Vestas Aircoil	13
2.6.1	Test uden vand	14
2.7	Test med vand	15
<b>3.</b>	<b>Beregningsmodel</b>	<b>19</b>
3.1	Introduktion	19
3.2	Beregningsmodel til teststand hos MAN Diesel & Turbo	19
3.3	Beregningsmodel til teststand hos Vestas Aircoil	20
3.4	Beregningsmodel til EGR køler	20
<b>4.</b>	<b>Materialeundersøgelse</b>	<b>21</b>
4.1	Introduktion	21
4.2	Konklusioner fra materialeundersøgelse	21
<b>5.</b>	<b>Konklusion</b>	<b>24</b>
<b>6.</b>	<b>Bibliografi</b>	<b>25</b>
<b>Bilag 1.PI-diagrammer</b>		<b>26</b>
Bilag 1.1	PI-diagram for ombygget teststand – Vestas Aircoil	26
Bilag 1.2	PI-diagram for ombygget oliesystem til teststand - Vestas Aircoil	27

# 1. Introduktion

Kapitlet indeholder en indføring i projektets problemstilling, relevans, formål, samt den miljømæssige kontekst

## 1.1 Baggrund for projektet

Behovet for en optimeret EGR køler opstod i forbindelse med nye udledningskrav (Tier III) fra IMO – den internationale maritime organisation. IMOs NO<sub>x</sub> udledningskrav gælder for alle skibe over 130 kW motoreffekt, og Tier III kravene er indført for alle nybyggede skibe over denne størrelse, der sejler i et NO<sub>x</sub> ECA (Emission Control Area) område, fra og med 1. januar 2016. På nuværende tidspunkt vil det sige langs en stor del af Nordamerikas kyster samt US Caribbean, men der er ambitioner om at etablere NO<sub>x</sub> ECA ved flere andre kyststrækninger. En grafik repræsentation af IMOs udledningskrav vises i figur 1.



Figur 1: IMOs udledningskrav i NO<sub>x</sub> ECA zoner (Dieselnet.com, 2016).

## 1.2 Det simple EGR-system

EGR teknologien er den ene af to primære metoder til at nedbringe NO<sub>x</sub> udledningen fra store dieselmotorer på skibe. Metoden går ganske enkelt ud på at føre en andel af udstødningsgassen fra motoren (ca. 0-40%) tilbage til motoren igennem en opblanding med indsugningsluften/skylleluften.

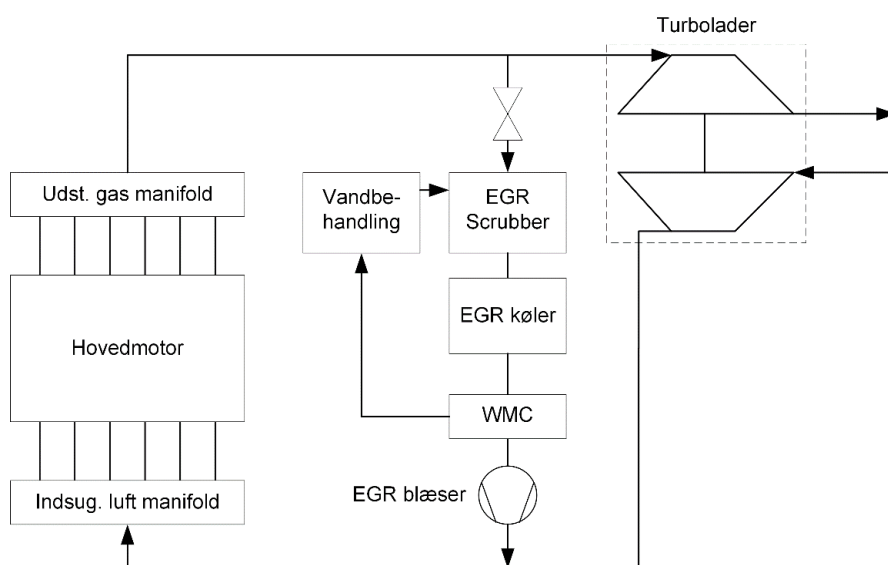
NO<sub>x</sub> dannes ved forbrænding via flere forskellige mekanismer, men ofte kommer den største andel fra såkaldt termisk NO<sub>x</sub>, dvs. NO<sub>x</sub> dannet som følge af høj forbrændingstemperatur. Ved at recirkulere en del af udstødningsgassen tilbage i motoren, sænkes forbrændingstemperaturen og derved formationen af NO<sub>x</sub> (med op til 70-80%) (Toftegaard, 2013).

På grund af bl.a. høj temperatur og uønskede partikler i udstødningsgassen, kan den ikke uden videre blandes med indsugningsluften og ledes ind i selve motoren uden videre behandling. Der

er derfor udviklet et EGR system af forskellige komponenter, der samlet set sikrer, at gassen har de ønskede konditioner ved punktet for iblanding med indsugningsluften.

Ved store turboladede to-takts motorer til skibe anvendes det høje tryk fra udstødningsgassen til at komprimere indsugningsluften, hvilket ses i turboladeren. Udstødningsgassens tryk falder, hvorefter den afkøles og ledes til skorstenen. Omvendt forårsager kompressionen af indsugningsluften en temperaturstigning, hvilken normalt nedbringes igen via en ladeluftskøler/skylleluftskøler, inden luften når motoren.

Når et skib sejler i et NO<sub>x</sub> ECA område, og dermed skal have nedbragt NO<sub>x</sub> emissionen, recirkuleres en andel af udstødningsgassen igennem EGR systemet, før det blandes med indsugningsluften. Et sådan maritimt EGR system kan naturligvis have lidt varierende konfiguration, men figur 2 viser en simpel fremstilling af et EGR system.



Figur 2: Simplificeret EGR system omkring hovedmotoren på et skib.

Gassen kommer ind i EGR systemet fra et punkt før turboladeren og har derved høj temperatur og højt tryk. I sidste ende skal gassen fra EGR systemet have samme tryk som indsugningsluften, så trykket skal så vidt muligt holdes oppe undervejs igennem EGR systemet, ellers skal EGR blæseren sidst i systemet blot tilføre mere arbejde. Temperaturen skal derimod nedbringes sammen med de uønskede elementer i udstødningsgassen, hvilket gøres ved at tilsætte vand. Der medfølger et delsystem for rensning og behandling af scrubber vandet, hvilket er angivet samlet som "vandbehandling" i figuren. Returløbet af beskidt vand behøver ikke at være fysisk placeret ved dråbefanget (water mist catcher - WMC), men er blot angivet sådan i figuren. For at komme langt nok ned i temperatur føres gassen igennem en køler, før det når blæseren. Denne køler danner omdrejningspunktet for dette projekt.

I forhold til en traditionel ladeluftkøler adskiller EGR køleren sig ved ikke udelukkende at køle luft, men desuden også udstødningsgas, vand og damp som følge af tilsætning af vand til en meget varm gas.

### 1.3 Projektets formål

Projektets hovedformål er at optimere en EGR køler-enhed, der indgår i røggasrensning af udstødningsgas fra skibsmotorer. EGR køleren er en nøglekomponent i et EGR system. For-

målet med EGR systemet er at reducere NOX udledning således, at skibsflåden kan leve op til de skærpede krav i Tier III. Arbejdet vil bestå af at udvikle en beregningsmodel til dimensionering, målinger og verifikationer samt inkorporering af nye materialer således, at EGR køleren bliver tilstrækkelig effektiv og billig at producere.

## 1.4 Støttens betydning

Støtten i projektet har muliggjort et samarbejde mellem Vestas Aircoil A/S, MAN Diesel & Turbo og Teknologisk Institut i et omfang, som uden støtten ville have været svært at realisere. Det er uvist om projektet ville være blevet realiseret uden støtten, da den er med til at danne det finansielle grundlag for aktiviteterne. Med støtten på plads kunne arbejdet indenfor projektets forskellige arbejdsområder igangsættes hurtigt og uden en yderligere langvarende proces omkring finansieringen.

MAN har udviklet et koncept indenfor EGR teknologien, der kan rense røggassen fra store skibsmotorer. En vigtig komponent i MANs koncept er røggaskøleren, der er med til at sikre en god effektivitet af skibsmotoren. Her har MAN valgt at samarbejde med Vestas Aircoil, der har udviklet en ny køler. Inden projektet var denne køler ikke markedsmodnet.

Ved hjælp af Teknologisk Institut og midlerne fra MUDP er køleren blevet markedsmodent og dermed været med til at fremme anvendelsen af MANs EGR koncept. Med projektresultaterne er enkelte af ulemperne ved MANs røggasrensings koncept blevet minimeret, og det er blevet et lettere valg for skibsejeren at aktivt at tilvælge røggasrensning.

Projektet omfatter bl.a. en omfattende ombygning af teststand samt testprogram foretaget hos Vestas Aircoil, som ville have været meget vanskelig for virksomheden at løfte som et udviklingsprojekt på egen hånd. Her har samarbejdet med projektets øvrige partnere og mest af alt støtten både til arbejdstimer og materialer haft en afgørende betydning for gennemførelsen af dette.

For Teknologisk Institut har støtten betydet at man igennem projektet har kunne udvikle sin viden indenfor området og dermed fremtidige ydelser til gavn for danske industrivirksomheder. Et væsentligt aspekt i Teknologisk Instituts eksistensberettigelse er at hjælpe med til at skubbe teknologisk viden ud til danske virksomheder, der kan omsætte det til nye eller forbedrede produkter. Dette hjælper støtten og indeværende projekt med til at kunne realisere indenfor dette område.

MAN Diesel & Turbo stod over for at skulle planlægge tests af en række komponenter til EGR systemet op til projektets start. Projektet passede derfor godt ind i den kontekst og støttede op om MANs aktiviteter på området. Med projektet og støtten har MAN derfor fået et større udbytte af de kræfter, der har lagt på EGR området, end det ville have været tilfældet uden støtten.

## 2. Målekampagne

**I projektet er der udført to separate målekampagner. Den første blev udført ved MAN Diesel & Turbo under driftskonditioner på en testmotor i 2013 og 2014. Den næste kampagne foregik hos Vestas Aircoil i 2016 i deres luftbaserede teststand.**

### 2.1 Introduktion

Formålet med målekampagnen er dokumentere data for prototypekøleren under så virkelighedstro forhold som muligt. Disse data kan bruges til at validere beregningsmodellens resultater.

Succeskriteriet for denne arbejdsopgave er at der fremstilles en pilotenhed på baggrund af beregninger og designanbefalinger. Kriteriet er ikke opfyldt iht. formuleringen, da det undervejs i projektet blev besluttet at teste det første EGR kølerdesign grundigt af for at have gode data at validere beregningsmodellen med. På denne måde sikres et bedre datagrundlag for beregningsmodellen. Fremtidige EGR køleren kan herefter designes og optimeres ud fra beregningsmodellen. Hvis pilotenheden skulle designes efter beregningsmodellen inden målekampagnen var fuldt udført, ville der være en risiko for, at man kom til at designe den optimerede EGR køler på et forkert grundlag, da beregningsmodellen endnu ikke var valideret på det tidspunkt.

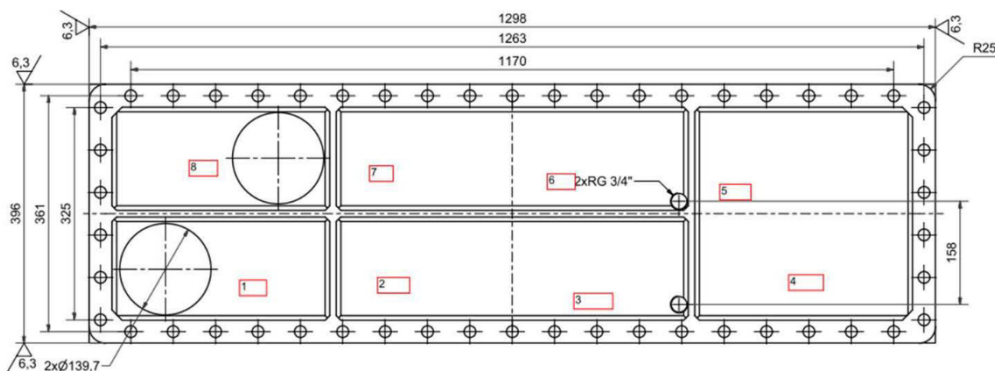
Pilotenheden til tests er altså blevet fremstillet og testet som forventet, men designet bunder i Vestas' designanbefalinger til EGR kølere fremfor beregningsmodellen af ovennævnte grunde.

### 2.2 Test set-up hos MAN Diesel & Turbo

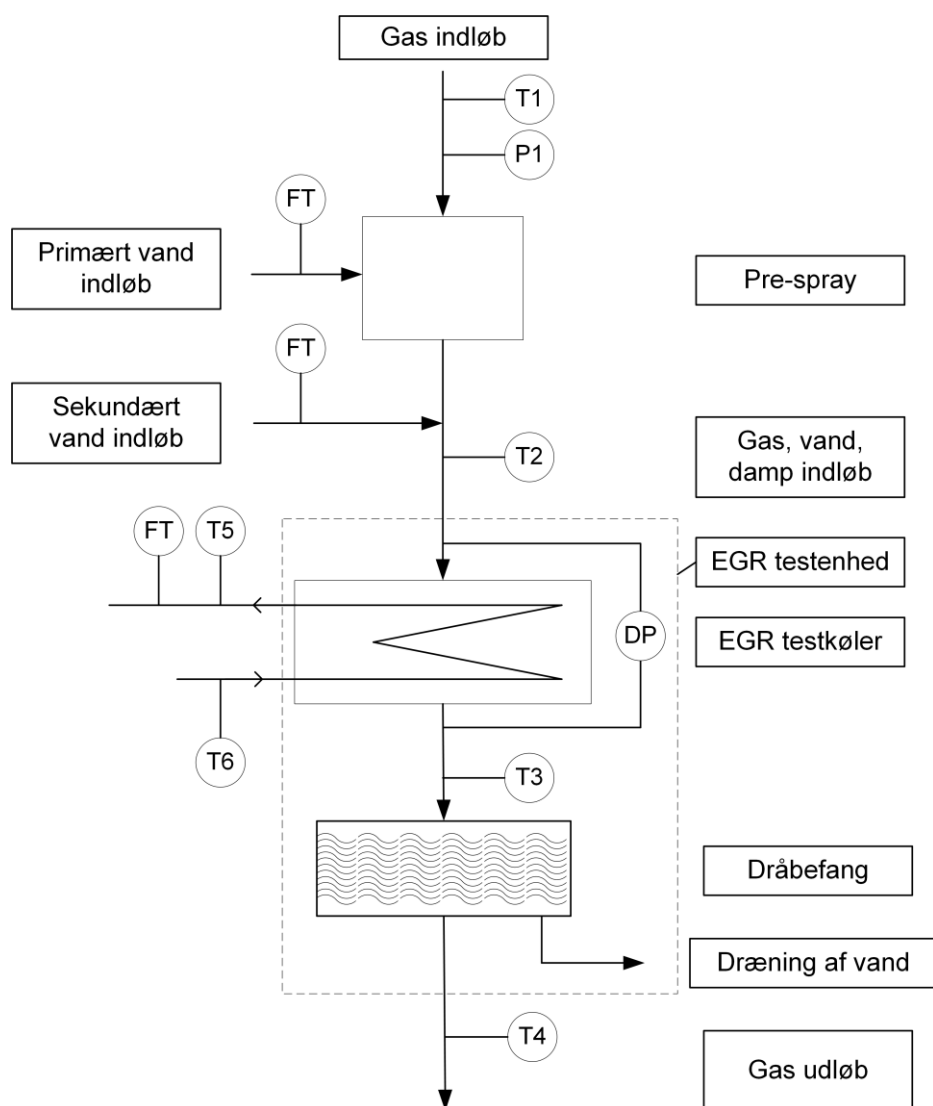
Denne del af målekampagnen blev udført i MAN Diesel & Turbos testcenter på en 4T50ME-X hovedmotor. EGR køleren er her testet i et kompakt design af EGR systemet, hvilket er angivet som "EGR testenhed" i figur 4. Figuren er en skitse over den principielle opbygning af teststanden og instrumenteringen af denne.

Vejen for den recirkulerede del af udstødningsgassen igennem teststanden er følgende: Udstødningsgassen kommer ind og blandes med vand i Pre-spray'eren, som ses i toppen af billedet. Der er placeret tryk- og temperatursensorer før Pre-spray'eren samt temperatursensorer efter denne. Efter Pre-spray'eren er der mulighed for at tilsætte mere vand, før blandingen løber ind i EGR testenheden og når EGR køleren. Gassen afkøles i EGR køleren og passerer "water mist catcher" (WMC) i bunden, før den når udløbet. Ved køleren måles der tryktab på gassiden samt ind- og udtemperatur på kølevandet samt flow. Før og efter køleren er der placeret temperatursensorer på gassiden samt endnu en temperatursensor efter WMC'en inden gassens udløb fra EGR enheden. EGR køleren bliver altså her testet i et set-up, der er meget tæt på en virkelig driftssituation.

Fronten af EGR køleren er vist i figur 3. Der er tale om en rørkøler, hvor udstødningsgassen kommer ovenfra og ned imellem kølerørene. Kølevandet har sit ind- og udløb i den ene side og tager fire løb på tværs af gas flowet i den nederste del af rørbundtet. Herefter vender kølevandet og løber op i den øverste del, hvor det igen har fire løb, inden det forlader køleren. EGR kølerens hedeplade består af 270 kølerør med et samlet overfladeareal på ca. 83 m<sup>2</sup>.



Figur 3: Målsat fronttegning af EGR køleren til tests hos MAN Diesel & Turbo. Cirklerne markerer indløb og udløb for kølevandet, mens de firkantede felter er vendekamre (Ibsen, 2014).



Figur 4: Principskitse af testopstillingens opbygningen omkring EGR testenheden. Udstødningsgas har indløb fra toppen, hvorefter dette blandes med vand i Pre-Spray'eren. Yderligere vand tilsættes før EGR køleren, hvor igennem der cirkuleres kølevand. Efter køleren fjernes vanddråber i WMC'en.



## 2.3 Resultater fra tests hos MAN Diesel & Turbo

Der  
data

foreligger  
fra 18

godkendte målepunkter fra testene, hvor blandet andet følgende parametre varieres:

Parameter	Min. værdi	Max. værdi	Enhed
Motorlast	25	100	%
EGR gas, andel af total	25	49	%
Gastryk, EGR enhed	1,2	4,4	Bar(a)
Temperatur, Pre-spray, indløb	318	488	°C
Temperatur, EGR køler, indløb	37	90	°C
Temperatur, EGR køler, udløb	17	33	°C
Vandflow, Pre-spray	10	20	m <sup>3</sup> /h
Vandflow, EGR kølevand	80	97	m <sup>3</sup> /h
Temperatur, EGR kølevand, indløb	14	25	°C
Temperatur, EGR kølevand, udløb	19	47	°C

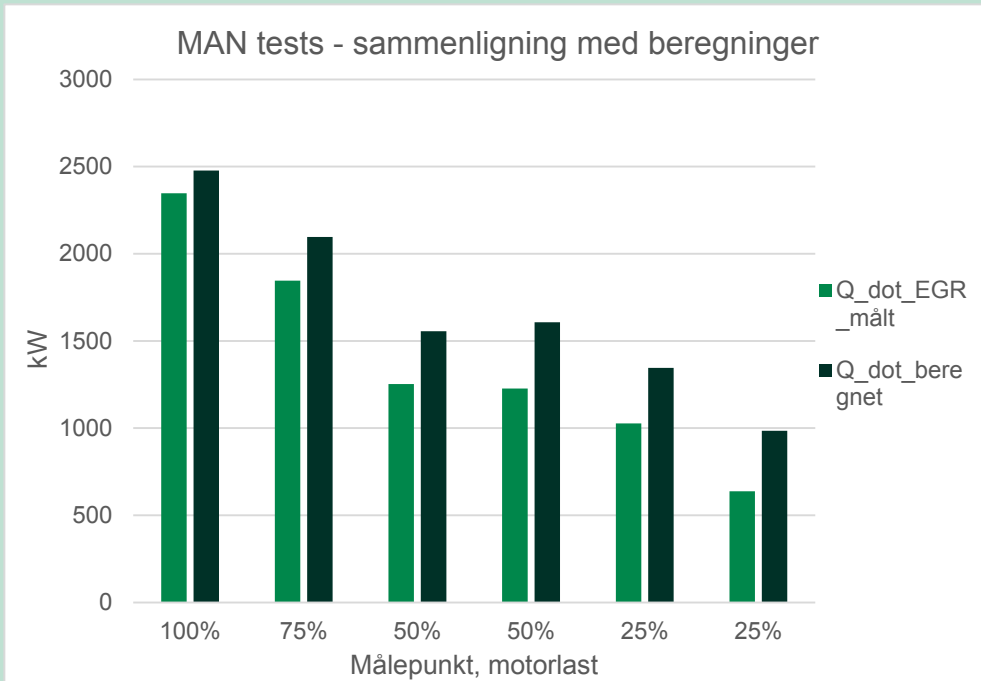
Efterfølgende beregninger udført af Teknologisk Institut og MAN Diesel & Turbo (MAN) har vist, at energibalancen passer indenfor 13%. Dette anses som værende tilfredsstillende i forhold til usikkerheder på måleresultaterne.

Et meget brugbart resultat fra testene hos MAN er viden om fordelingen af belastningen på køleren i form af effekten associeret med hhv. kondensering af damp, køling af vand og gaskøling. Beregninger på måleresultaterne viser, at langt den største del af effekten, som køleren skal lede bort, kommer fra varmt vand på væskeform (50-70%), og herefter kondensering af damp til væske (18-40%) samt en mindre del til gaskøling (8-10%). Den høje andel effekt til væskekøling er et specialtilfælde for disse tests, hvor der blandt andet blev testet ydeevne ved et højt flow af tilsat vand i fortil til gasflowet. I den nuværende designspecifikation til kølerleverandører er vandflowet lavere og fordelingen af kølereffekten ligger tættere på 40-50% til væskekøling, 40-50% til kondensering og ca.10% til gaskøling.

Graf 1 viser en sammenligning mellem måle- og beregningsresultater for udvalgte målepunkter fra testene hos MAN. Der er valgt eksempler indenfor de forskellige motorlaste, der har været kørt. "Q\_dot\_EGR\_målt" benævner effekten udledt fra målinger på EGR-kølevandet. "Q\_dot\_beregnet" er betegnelsen for den samlede beregnede overførte effekt og dækker over de separat udførte beregninger for hhv. gaskøling, kondensering og vandkøling. Det ses af graf 1 at beregningsmodellen passer det omtrent med "Q\_EGR\_køler\_målt" i det første målepunkt, men ellers overestimerer modellen resultatet. Dog er tale om en konsekvent overestimering, der øges med faldende motorlast.

Overordnet set udviste EGR køleren tilfredsstillende ydeevne med hensyn til at nedbringe temperaturen på gas-vandblandingen.

**GRAF 1.** Sammenligning af måleresultater fra målekampagnen hos MAN med beregningsresultater.

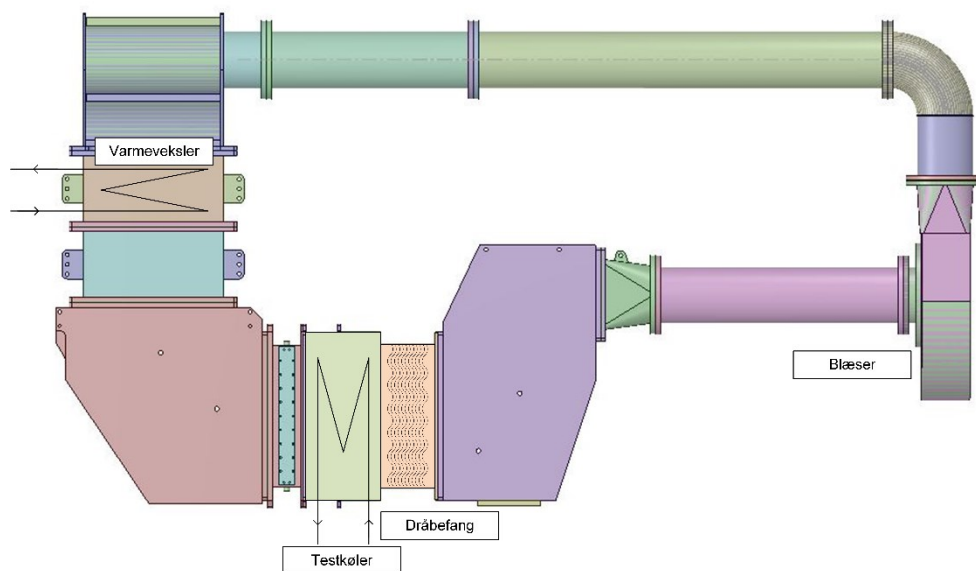


## 2.4 Eksisterende test set-up hos Vestas Aircoil

Testene hos MAN var underlagt driften af hovedmotoren, som var anvendt til forsøgene. Ændredes blot en enkelt indstilling på motoren, ændres der samtidigt en lang række parametre som f.eks. temperatur, tryk og gas flow. Det er derfor relevant også at teste EGR køleren i et miljø, hvor det er nemmere at styre individuelle parametre. Hertil kommer et ønske om at kunne teste køleren i forhold til hhv. ren gas, gas og vand samt gas, vand og damp. Derfor designes der endnu en målekampagne hos Vestas Aircoil med henblik på at anvende deres eksisterende teststand til yderligere kølertests.

Idet Vestas Aircoil normalt tester ladeluftkølere udelukkende med luft, er teststanden bygget op til netop dette formål. Figur 5 viser en skitse af den eksisterende teststand hos Vestas Aircoil, som den så ud inden ombygningen i forbindelse med dette projekt gik i gang.

Teststanden er opbygget af en blæser, en varmeveksler, og en køler samt et antal firkantede og runde rørprofiler. Blæseren i højre side af billedet cirkulerer et luftflow rundt i teststanden. Med trykluft kan luftstrømmen tryksætte op til 4 bar(a). I venstre side af teststanden rammer luften en varmeveksler, hvor den varmes op til en ønsket temperatur via varme fra et oliefyrt. Luften føres derefter mod den nederste del af teststanden, hvor køleren er placeret i "testsektionen". Her afkøles den, før den igen når blæseren.



Figur 5: Eksisterende teststand hos Vestas Aircoil før ombygningen. Blæseren i højre side af billedet cirkulerer et luftflow rundt igennem hele teststanden. En varmeveksler i venstre side af teststanden varmer luften op med varme fra et oliefyrt. I den nederste del er køleren placeret lodret i teststanden (Ibsen, 2014).

## 2.5 Forberedelser til nyt test set-up hos Vestas Aircoil

Ambitionen om at teste med både luft, vand og damp samtidigt kræver dog en markant ombygning, hvilket har været projektets hovedfokus i 2015. I første omgang blev der opstillet specifikationer til teststanden, og herefter blev det undersøgt, hvilke komponenter der kræves for at kunne opfylde specifikationen. Undervejs i dette arbejde blev det klart, at udgifterne til ombygningen ville overstige midlerne afsat til dette i projektet. Mulighederne for at hjemtage yderligere bevilling blev undersøgt, blandt andet i samarbejde med projektets bevillingsgiver, men dog uden positivt resultat. Det betød, at muligheden for at teste med damp måtte udelades, og økonomien for testene hos Vestas Aircoil blev reevalueret som en trinvis fremgangsmåde. Først blev udgifterne til den grundlæggende ombygning samt test udelukkende med luft fastlagt, og herefter udgifterne til test med opvarmet sprayvand til overrisling over EGR køleren. Et revideret udlægsbudget viste, at ombygningen godt kunne foretages indenfor projek-

tets midler, men med forbehold for lav anskaffelsespris på visse komponenter. Sidstnævnte krævede, at der blev fundet alternative løsninger til de dyre komponenter. Som eksempel anvendes anlæggets tilknyttede oliefyr til forsøgene som den eneste tilsatte effekt (bortset fra effekten som blæseren afsætter til luften). Det betyder, at den tilgængelige energitilførsel til opvarmning af luft og sprayvand er begrænset til oliefyrets maksimale effekt.

Som tidligere nævnt var ambitionen at teste med både luft, vand og damp, da dette bedst repræsenterer de virkelige forhold, som køleren vil blive udsat for under drift. Når det så ikke var muligt at gennemføre, så giver det stadig god mening at teste med vand og luft, da der fortsat kan genereres brugbar viden med dette set-up. Køleren kan fortsat belastes med en mængde varme, den skal køle bort og overfladen vil stadig være dækket af vand. Det vil sige, at varme stadig skal overføres igennem et lag vand på oversiden af kølerrørene, og der mangler blot en yderligere kondensering af damp i vandet. Hertil kommer, at der også kan genereres data om kølerens tryktab.

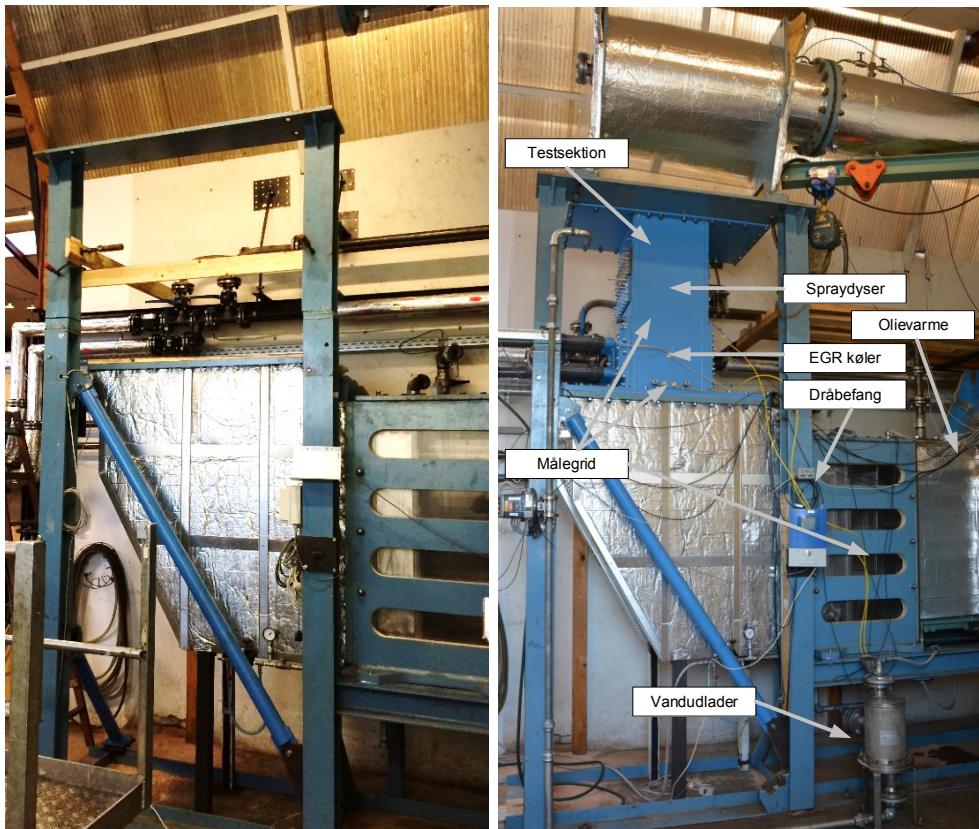
Desuden supplerede projektdeltagerne med udstyr i det omfang, de var i stand til det, f.eks. bidrog MAN med en vandudlader og Teknologisk Institut med flowmålere til vandsystemet.

### **2.5.1 Ombygget teststand**

Vedrørende teststanden kunne de fleste af rørstykkerne bibeholdes sammen med blæseren, men hele testsektionen blev udskiftet sammen med sektionen med varmeveksleren. Hertil kommer en udbygning af systemerne omkring teststanden. For at få plads til spraydyserne over EGR køleren, valgte man at flytte testsektionen op, hvor varmeveksleren tidligere var placeret. Før og efter EGR køleren er der indsat temperatursensorer og temperatur-målegrid. Der er ligeledes placeret et målegrid og en temperatursensor lige efter dråbefanget for at måle lufttemperaturen uden tilstedeværelsen af vand på væskeform. Vandet fra spraydyserne skal ledes ud af anlægget igen, hvilket sker via vandudladeren, der leder vandet tilbage til spraysystemet uden at lufttrykket i teststanden tabes. Et PI-diagram af hele opstillingen er vedlagt i bilag 1.1. Figur 6 viser billeder under og efter ombygningen af teststanden.

### **2.5.2 Oliesystem**

Luften i teststanden er hidtil blevet opvarmet via et olieflow fra et oliefyr, hvilket også var tilfældet under testene i dette projekt. Hertil kommer dog opvarmning af sprayvand til overrissing af køleren. Oliefyret har to effekttrin: 75 kW og 150 kW. Det vil sige, at der maksimalt er 150 kW varmeeffekt til deling mellem opvarmning af luft og sprayvand. Under planlægningen af forsøgene var dette en begrænsning, som forsøgene nødvendigvis måtte designes efter, dvs. forsøg med stort luftflow og høj temperatur har et lavere sprayvandsflow og vice versa, idet den samlede effekt er låst. Ombygningen af oliesystemet bestod af nye rørtræk, ventiler og isolering for at forbinde systemet til varmevekslerne i teststanden og i sprayvandstanken. Et PI-diagram over oliesystemer er vedlagt i bilag 1.2.



Figur 6: Venstre billede – Testsektion fjernet på teststanden under ombygningen af anlægget. Højre billede – Teststand med ny testsektion installeret og størstedelen af anlægget isoleret.

### 2.5.3 Spray-system

Dette delsystem sørger for at opsamle, opvarme, cirkulere og fordele sprayvand til teststanden. Systemet eksisterede ikke på den tidligere opsætning af teststanden og blev derfor bygget op fra bunden til formålet.

Efter EGR køleren opsamles vandet i bunden af teststanden og ledes ud gennem vandudladeren. Her løber det til sprayvandstanken, hvor det opvarmes igen. Sprayvandstanken er en stor isoleret varmtvandsbeholder med en indvendig coil, som olien løber igennem. Til tanken er der forbundet en ekstra tank, der er placeret et par meter herover. Denne tank fungerer som reservoir og ekspansionstank. To pumper tryksætter og sender sprayvandet mod sættet af sprayvandsdyser over EGR køleren. Opbygningen af spraysystemet indeholdt blandt andet: En emaljeret varmtvandsbeholder, reservoir-tank, to pumper, ventiler, dyser, temperatur- og flowmåler, rørtræk og isolering. Se eventuelt PI-diagrammet i bilag 1.1.

### 2.5.4 EGR kølekreds

På grund af den markant større effekt ved testene af EGR køleren i forhold til traditionelle test af ladeluftkølere skulle hele kølesystemet til teststanden redesignes. Man valgte at anvende et mindre køletårn til at køle varmen fra systemet bort til omgivelserne. Køletårnet placeres umiddelbart uden for bygningen, og ombygningen bestod dermed blandt andet i (foruden køletårnet) nye rørtræk, ventiler og isolering. Se eventuelt PI-diagrammet i bilag 1.1.

## 2.6 Resultater fra test hos Vestas Aircoil

For at skabe overblik over, hvilke målepunkter der ønskes kørt på teststanden, blev der udarbejdet en testplan til formålet. Af praktiske årsager blev denne udvidet med et sæt beregninger for systemets fire varmevekslere: EGR køler, varmeveksler (olie/luft), coil i varmtvandstank og

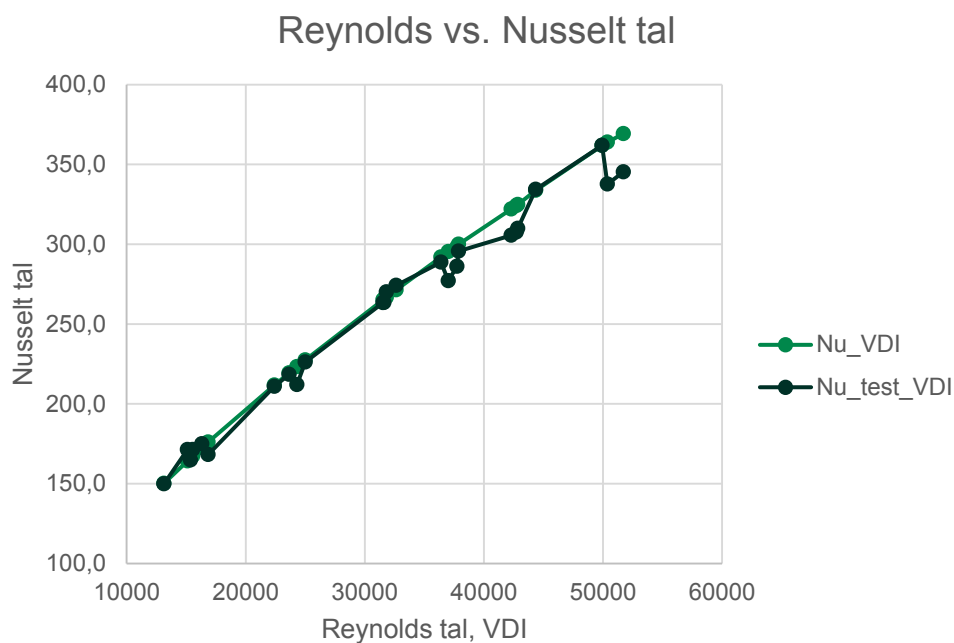
køletårnet. På denne måde kan man regne sig frem til, hvilke konditioner der er opnåelige for et givent målepunkt, idet den samlede input effekt er begrænset af oliefyrets effekt.

Ved udførelsen af test, startes anlægget op og varmes igennem. Herefter indstilles systemet mod parametrene for et ønsket målepunkt. Først når måleværdierne har stabiliseret sig fuldt ud, logges der data, hvilket foregår over en periode på 10 minutter.

### 2.6.1 Test uden vand

Denne serie af test køres uden sprayvandssystemet for at få en reference i forhold til test med sprayvand. Resultaterne fra måleserien er hold op imod beregningsmodellen for en tør køler og er afbildet i graf 2 som de dimensionsløse størrelser, Reynolds tal og Nusselt tal. Reynolds tallet beskriver det dimensionsløse flow, og Nusselt tal beskriver det dimensionsløse samlede varmeovergangstal. Der er god overensstemmelse mellem beregnede data og testdata. Afvi-

**GRAF 2.** Samlet varmeovergangstal som funktion af flowhastighed. Beregnede værdier sammenlignet med testdata.



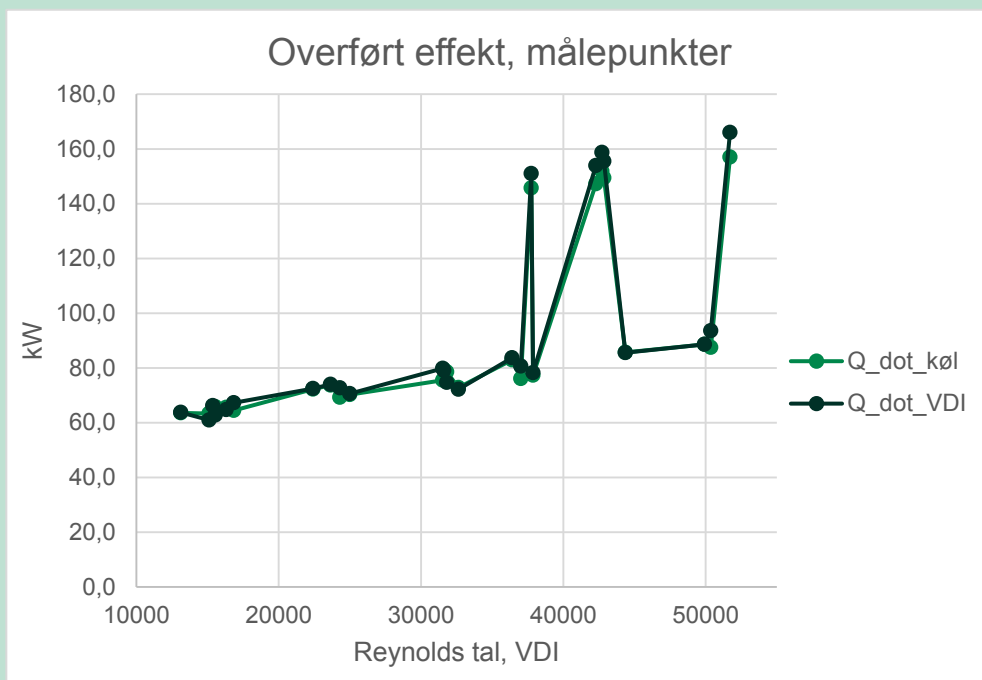
gelserne sker fortrinsvist ved de målepunkter med fuld effekt på oliefyret, hvilket generelt giver højere temperaturer i systemet. Det skønnes derfor, at afvigelse kan skyldes usikkerhed på måleudstyret.

Graf 3 viser den samlede overførte effekt fra luften til kølevandet på EGR køleren. Idet der var god overensstemmelse mht. varmeovergangstallet, er det ikke overraskende, at der også er god overensstemmelse mht. den overførte effekt. De fleste test er kørt med halv effekt på oliefyret, hvilket vises som de lave værdier på graf 3. De høje værdier angiver test med fuld effekt på oliefyret.

De overordnede parametre er angivet i nedenstående tabel:

Parameter	Min. værdi	Max. værdi	Enhed
-----------	------------	------------	-------

**GRAF 3.** Samlet effekt overført til EGR kølekredsen. Høje værdier indikerer test med fuld effekt på oliefyret, mens resterende målepunkter er kørt ved halv effekt på oliefyret.



Luftryk	3	4,5	Bar(a)
Lufflow	1,3	4,3	kg/s
Temperatur, EGR køler, indløb	62	100	°C
Temperatur, EGR køler, udløb	33	59	°C
Temperatur, EGR kølevand, indløb	13	21	°C
Temperatur, EGR kølevand, udløb	16	31	°C
Vandflow, kølevand	6	11	kg/s

## 2.7 Test med vand

Hos Vestas Aircoil er blevet kørt 17 test med sprayvand på køleren. Opbygningen af teststanden er i vid udstrækning den samme, som ved de tørre tests, men nu tages spray-systemet i brug og effekten fra oliefyret skal deles til opvarmning af sprayvand og luft i teststanden.

De primære parametre er angivet i interval i nedenstående tabel:

Parameter	Min. værdi	Max. værdi	Enhed
Luftryk	3	3,5	Bar(a)
Lufflow	1,2	2,9	kg/s
Temperatur, EGR køler, indløb	52	92	°C
Temperatur, EGR køler, udløb	31	47	°C
Temperatur, EGR kølevand, indløb	23	31	°C
Temperatur, EGR kølevand, udløb	26	38	°C
Vandflow, kølevand	6	11	kg/s

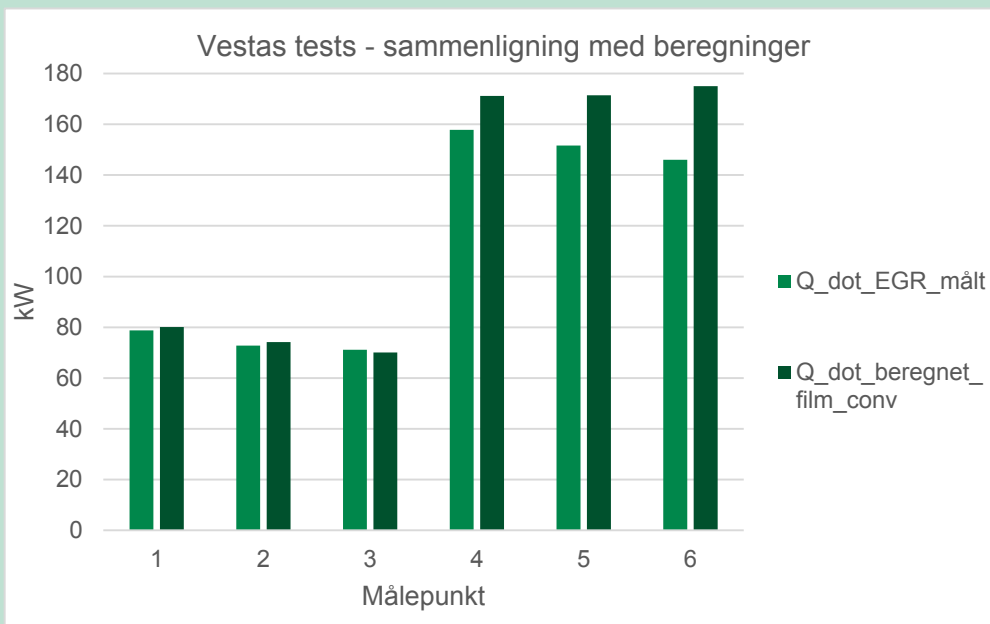
Graf 4 viser sammenligning af varmeeffekt mellem måleresultater og beregnede værdier. De første tre målepunkter i grafen er lavet ved tørre tests uden sprayvand. Men luftflowet er nogenlunde identisk i forhold til de sidste tre tests, hvilket er grunden til at de første tre er medtaget som reference. "Q\_EGR\_køler\_målt" benævner effekten udledt fra målinger på EGR-kølevandet. "Q\_dot\_beregnet\_film\_conv" er betegnelsen for den samlede beregnede overførte effekt og dækker over de separat udførte beregninger for hhv. gaskøling, kondensering og vandkøling. Den sidste del af navnet ("\_film\_conv") hentyder til at beregningsmodellen anvender en antagelse om at vandet på ydersiden af røret er i bevægelse og dermed udgør et konvektivt bidrag til varmemstrømmen.

De første tre målepunkter køres kun med luftflow og intet vand, og det ses tydeligt af graf 4 at beregningsmodellen passer det godt overens med "Q\_EGR\_køler\_målt" på disse punkter. På de efterfølgende tre målepunkter (nummer 4-6) overestimerer modellen resultatet ligesom det var tilfældet tidligere. Overestimering ligger i niveauet 8-17% på det udvalgte punkter i graf 4.

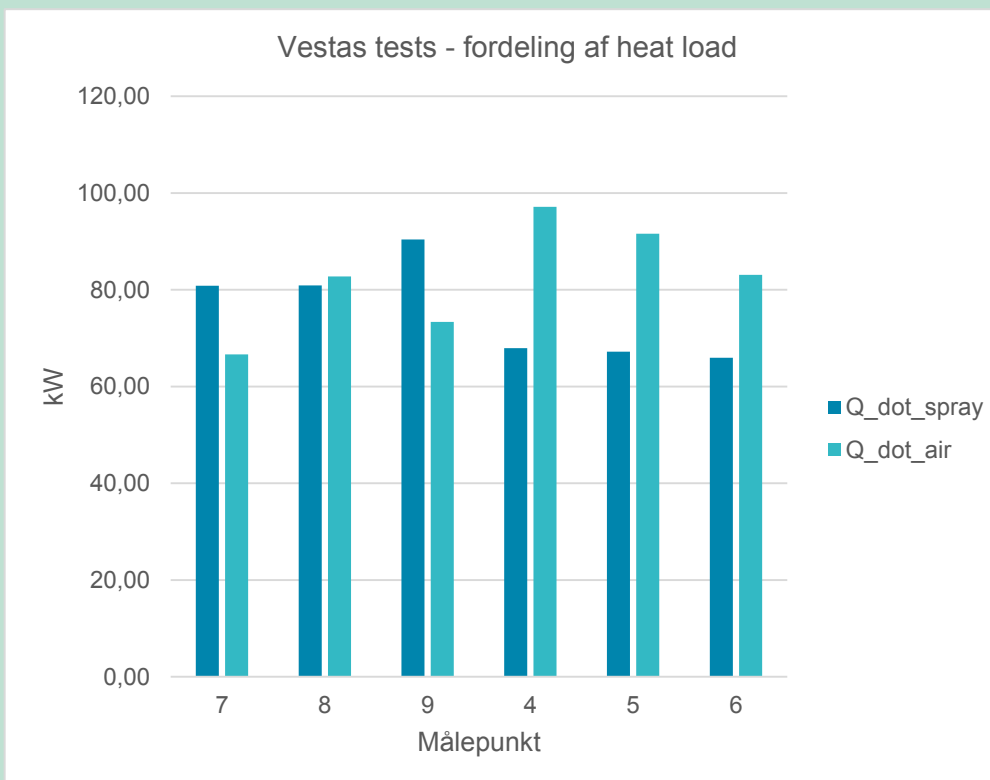
Graf 5 forestiller fordelingen af varmeeffekt på hhv. køling af vand (på væskeform) og luft for udvalgte målepunkter. Punkter 4,5 og 6 er de samme som 4, 5 og 6 i graf 4, for sammenligningens skyld. Fordelingen ligger omkring ca. halv effekt til hver, men her spiller begrænsningen i samlet effekt på teststanden ind, hvilket gør at fordelingen ser meget anderledes ud i forhold til fordelingen set ved målekampagnen hos MAN.



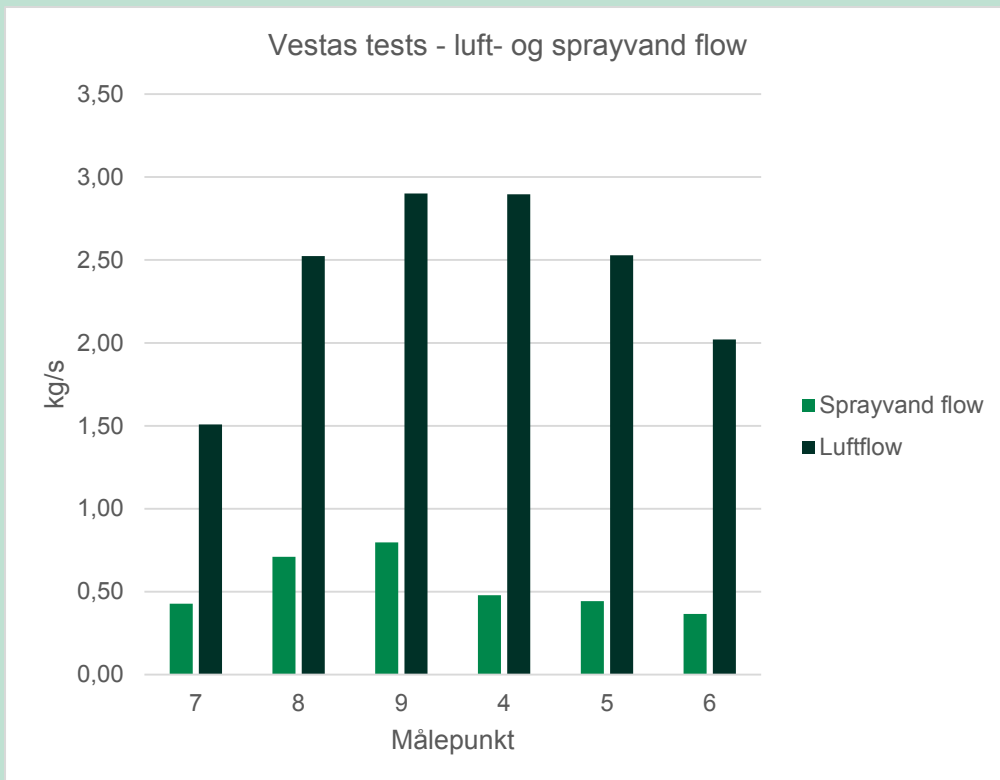
**GRAF 4.** Sammenligning af effekt fra udvalgte målepunkter fra målekampagnen hos Vestas med beregnede værdier. Målepunkterne 1, 2 og 3 er uden sprayvand, mens 4, 5 og 6 er med.



**GRAF 5.** Fordeling af effekt til hhv. køling af sprayvand og af luft ved udvalgte målepunkter. Punkterne 4, 5 og 6 er de samme punkter i GRAF 4.



**GRAF 6.** Luft- og sprayvand flow korresponderende til målepunkterne i graf 5.



# 3. Beregningsmodel

**Følgende kapitel beskriver beregnings- og modelleringsarbejdet udført i projektet. Oprindeligt var der kun tiltænkt udvikling af en beregningsmodel for EGR køleren, men i løbet af projektet opstod der et behov for at modellere andre delsystemer end blot køleren.**

## 3.1 Introduktion

Formålet med arbejdspakken er at udvikle et beregningsprogram til korrekt dimensionering af EGR køleren. Med beregningsprogrammet kan man dermed på forhånd forudsige ydelse og tryktab af en given køler i forbindelse med designet af denne. Alternativt skal der fremstilles en køler, der herefter testes igennem inden ibrugtagning for at validere ydelsen. Med et troværdigt beregningsprogram, bør tid og udgifter til yderligere tests af kølere dermed kunne minimeres. Samtidigt kan beregningsprogrammet bruges i forbindelse med parametervariation af fx rør afstand eller -diameter, for at foretage en suboptimering af en given køler til en specifik opgave.

Succeskriteriet for denne arbejdsopgave omfatter udvikling af et brugbart beregningsværktøj, som succesfuldt kan forudsige nye designs på baggrund af litteratur og de målte observationer. Kriteriet anses som værende opnået idet beregningsmodellen for EGR køleren forudsiger ydelsen for et givet kølerdesign indenfor en acceptabel nøjagtighed. Beregningsmodellen overestimerer dog kølerens ydelse en smule i forhold til målte resultater, men disse afvigelser er konsekvente og relative i forhold til ydelsen. Modellen kan derfor forventeligt finjusteres til at give resultater med god overensstemmelse i forhold til ydelsen under virkelige driftsforhold.

Selve beregningsmodellen for EGR køleren er beskrevet længere nede i denne tekst, men som nævnt ovenfor opstod der et behov for andre mindre beregningsmodeller undervejs i projektet. Disse gennemgås i følgende afsnit.

## 3.2 Beregningsmodel til teststand hos MAN Diesel & Turbo

Som opfølgning på målekampagnen hos MAN blev der konstrueret en beregningsmodel med udgangspunkt i testopstillingen, som er vist i figur 4. Formålet var her, at have en model, der kunne beregne fordelingen i belastningen på køleren i form af hhv. vandkøling, gaskøling og kondensering.

Denne model er opbygget med en gassammensætning, temperaturer, flow og tryk som input. Herefter kan modellen beregne de tilstande og mellemliggende temperaturer igennem teststandens komponenter.

Overordnet set blev denne model anvendt til at beregne:

- Masse- og energibalancer
  - Herunder teoretisk afsat effekt i teststandens komponenter
- Tilstandsværdier for befugtning af luft i alle punkter: temperatur, tryk, rel. Luftfugtighed
- Energibalancer over EGR køleren og effektmæssig fordeling

MAN har foretaget lignende beregninger og overensstemmelsen imellem ligger indenfor 13%. Det er undersøgt, at en del af unøjagtigheden har sin oprindelse i forskellige måder at definere indgangsbetingelser på.

### 3.3 Beregningsmodel til teststand hos Vestas Aircoil

I forbindelse med forberedelserne til ombygningen af teststanden hos Vestas Aircoil blev behovet for en beregningsmodel til at hjælpe med dimensioneringen af nye komponenter hurtigt klart. Modellen baserer sig på masse- og energibalancer. Input består fx i ønsket flow eller temperatur et udvalgt sted på teststanden. Modellen regner herefter alle flow, temperaturer og tryk ud igennem et antal udvalgte punkter i teststanden.

Kort sagt blev modellen anvendt til at beregne:

- Masse- og energibalancer
  - Herunder teoretisk afsat effekt i teststandens varmevekslere
- Strømningshastigheder: vand, damp, luft
- Tilstandsværdier for befugtet luft i alle punkter: temperatur, tryk, rel. luftfugtighed
- Strømningshastighed omkring kølerørene ved hhv. indløb, midt og udløb.

Herudover blev der undervejs udviklet mindre beregningsmodeller fx til at estimere varmeoverførslen i coilen i sprayvandstanken.

### 3.4 Beregningsmodel til EGR køler

Til opstarten af denne del af beregningsarbejdet, blev der foretaget en litteraturundersøgelse på relaterede emner til projektet. Kombinationen af tryksat gas, co-eksistensen af vand på væskeform og udkondensering af vand fra gassen, samt køling af gas gør problemstillingen i dette projekt unik. Muligvis af denne årsag gav litteraturundersøgelsen ikke umiddelbart det forventede gennembrug til at opstarte arbejdet med beregningsmodellen. Der blev ikke fundet materiale, der direkte stemte overens med situationen i dette projekt. Men der er en betydelig mængde litteratur omkring enkeltdele af problemstillingen, såsom kondensering, køling af gasser i en rørkøler, osv.

Af ovenstående grunde er der prøvet et par forskellige fremgangsmåder af i projektet. F.eks. er der forsøgt med at anvende et beregningsgrund til affugtning af luft via nedkøling, dog uden at dette har kunne give meningsfulde resultater.

Beregningsmodellen kan regne på en køler både med og uden overrisling med sprayvand. Det har givet god mening at sætte disse funktioner sammen i én model, da visse delberegninger går igen for begge fremgangsmåder.

Til beregning på en køler uden overrisling med sprayvand er anvendt et beregningsgrundlag fra VDI Heat Atlas 2010 (Stephan, 2010). Grundlaget er anvendt til både varmeoverføringsberegninger og tryktabs-beregninger.

Til simulering af test med flydende vand er det valgt at anskue køleren som en kondensator, skønt der sker mere end blot kondensering. Der anvendes de fleste af beregningerne for en tør køler, men på udvendig side af køleren er udtrykkene skiftet ud med de gældende for kondensatorer. Til dette er der anvendt et grundlag fra Wolverine Tube Heat Transfer Data Book (Thome, 2014).

# 4. Materialeundersøgelse

**Der er foretaget en undersøgelse af mulige alternative materialer til EGR systemet samt en vurdering af eventuelle korrosionsproblemer i de nuværende anvendte eller mest sandsynlige kandidater af materialer i systemet.**

## 4.1 Introduktion

Formålet med materialeundersøgelsen er todelt:

1. Dels at ændre designet således at materiale- og produktionsomkostningerne reduceres
2. Dels at øge levetid, korrosionsbestandighed samt sikre nemmere/billigere vedligehold.

Succeskriteriet er følgende: Der frembringes anbefalinger, som produktionsteknisk er mulige, således at det er muligt at erstatte dyre stållegeringer. Succeskriteriet er mødt idet relevante metaller, coating og plasttyper er gennemgået mht. brug i en EGR køler. Det blev dog klart under arbejdet, at hvis afgørende egenskaber såsom korrosionsbestandighed, varmeledningsevne, bearbejdningmuligheder samt pris skal holdes på et acceptabelt niveau, kan det være svært at komme uden om stållegeringer. Desuden er der tilfælde hvor alternative materialer, der er bedre eller lige så gode til opgaven som stållegeringerne, ikke nødvendigvis er billigere.

## 4.2 Konklusioner fra materialeundersøgelse

Materialeundersøgelsen er for omfattende til at kunne videregives i sin helhed i denne rapport. Derfor gengives dens konklusioner, mens der for uddybende forklaringer henvises til den fulde materialerapport.

Undersøgelsens formål var at udforske mulighederne for at udskifte de nuværende materialer i EGR køleren, således at:

- korrosionsmodstanden fastholdes eller forbedres i forhold til det nuværende materialevalg
- styrken og varmeledningsevnen af et fremtidigt materiale består i forhold til det nuværende materialevalg
- materialerne kan bearbejdes og kombineres med relativ lethed
- materialernes kostpris kan minimeres.

Det forventes, at der i fremtiden kunne ske ændringer i det nuværende design, så undersøgelsen inkluderer også metallegeringer, termoplast og kompositmaterialer samt coating-løsninger for at forlænge overfladens levetid.

Data for miljøet, som materialet anvendt til EGR er udsat for, er tilvejebragt af MAN Diesel & Turbo samt Vestas Aircoil og vedlagt som bilag i materialeundersøgelsen. Ud fra dette datagrundlag og et litteraturstudie for udvalgte rustfrie ståltyper vurderes det, at den rustfrie stållegering 316 er den mest egnede legering til brug under forholdene i et EGR system med hensyn til korrosionsmodstand og kostpris. De oplyste værdier for urenheder i gas-væske fasen er lang under værdien, hvor 316 er modtagelig overfor alvorlig korrosion. Når dette er sagt kan

tilstedeværelsen af kontaminering og metallurgiske faktorer gøre rustfrit 316 modtagelig overfor pitting korrosion<sup>1</sup>, selv i et miljø med meget lave værdier for urenheder. Hvis aggressive ioner/forbindelser såsom klor er tilstede, kan lokale korrosionsangreb initiere pitting og hermed spændingskorrosion. Tilstedeværelsen af et beskyttende oxidlag på rustfrit stål, som for eksempel 316, er en afgørende faktor med hensyn til materialets tilbøjelighed til pitting korrosion. Det samme fænomen eksisterer dog for aluminium, men ikke i det samme omfang ved aluminium-bronze og kobbernikkel.

Det har ikke været muligt at finde detaljeret information om, hvordan aluminiumlegeringer (3xxx og 5xxx), aluminiumbronze og kobbernikkel legeringer opfører sig under forholdene i EGR systemet. Aluminiumbronze og kobbernikkel har dog en god korrosionsmodstand i mange aggressive miljøer, som er sammenligneligt med miljøet i et EGR system. Hvis kostprisen på disse legeringer tages med i betragtningen, kunne aluminium ligeledes være en mulighed. Aluminium 3xxx er ofte anvendt som materiale til varmevekslere, hvor miljøets forhold er afskærmet med inhibitorer eller som aluminium med Alclad for at minimere omfanget af korrosion.

Rustfrit stål er et populært materialevalg til forskellige varmevekslere på grund af dets unikke egenskaber såsom korrosionsmodstand og høj styrke. Andre metaller og legeringer som titanium, kobberlegeringer, aluminiumlegeringer samt ikke-metaller som grafit og glas bliver dog anvendt som konstruktionsmateriale til varmevekslere (mere information i (Thulukkanam, 2013)).

Nedenstående tabel viser materialer, der kan konkurrere med den valgte rustfrie ståltype til EGR applikationer med hensyn til korrosionsmodstand:

Materiale:	Korrosionsmodstand:		
	Saltvand	Behandlet vand	Udstødningsgas med SO <sub>x</sub> og NO <sub>x</sub>
SS 316	God/pitting kan forekomme	Fremragende	God
Aluminium 3xxx og 5xxx	God/pitting kan forekomme	Fremragende	God
Aluminiumbronze <sup>2,3,4</sup> (C95400)	Fremragende	Fremragende	-
Kobbernikkel	Fremragende	Fremragende	-
Nikkel-aluminium-bronze (C95800)	God/Fremragende	God/Fremragende	God/Fremragende
Polymer plast PTFE (polytetrafluorethylene)	Fremragende	Fremragende	Fremragende
Grafit	Fremragende	Fremragende	Fremragende

<sup>1</sup> Pitting korrosion er en lokal forekommen korrosionstype, hvor materiale udelukkende fjernes elektrolytisk i meget små områder på overfladen, hvilket kan forårsage huller (deraf fænomenets betegnelse på engelsk "pitting"). Pitting opstår normalt på metaller, der er dækket af en meget tynd og tætsiddende beskyttende overfladefilm (oxidlag eller coating). Huldannelsen initieres enten på grund af fejl og flow i oxidlaget/beskyttende film, kemisk angreb eller mekanisk skade på emnet. Udbredelsen af pitting corrosion er an autokatalytisk mekanisme.

<sup>2</sup> Susceptible to inter-granular corrosion

<sup>3</sup> De-alloying for the alloys with copper content higher than 86%

<sup>4</sup> Zinc content higher than 20% results in lower SCC resistance

Hvis nogle af de alternative materialer for fremtiden overvejes som værende brugbare, bør der foretages mere omfattende korrosionsanalyser.

## 5. Konklusion

Der er i projektet "Optimering af EGR køler" opbygget teststande til forsøg, foretaget tests i form af to separate målekampagner, foretaget beregninger og undersøgt alternative materialer til konstruktion af fremtidens EGR køler.

En EGR køler blev udlagt og testet under virkelige driftsforhold hos MAN Diesel & Turbo. I deres testcenter blev EGR køleren indsat i et EGR system konstrueret omkring en hovedmotor. Køleren viste tilfredsstillende ydeevne selv ved store mængder tilsat vand i forhold til gasflowet. Beregninger på måleresultaterne viste, at langt den største del af effekten, som køleren skal lede bort, kommer fra varmt vand på væskeform (50-70%), og herefter kondensering af damp til væske (18-40%) samt en mindre del til gaskøling (8-10%).

Ud over tests under virkelige forhold, kunne det være fordelagtigt at teste køleren under forhold, der er nemmere at kontrollere. Derfor er der udført en yderligere målkampagne hos Vestas Aircoil i form af deres teststand. Før tests af EGR køleren kunne startes op, skulle teststanden dog ombygges og udbygges med flere delsystemer. Her har det været muligt at indstille systemet mere præcist og teste køleren med luft og sprayvand.

Undervejs er der udarbejdet beregningsprogrammer til flere forskellige formål. Vedrørende beregninger på testene hos MAN blev der udviklet et beregningsprogram, der med tilfredsstillende nøjagtighed kan bestemme tilstandene omkring EGR køleren i teststanden. Til opbygningen af teststanden hos Vestas Aircoil, blev der ydermere lavet en beregningsmodel, til at hjælpe med designet og bestykningen af anlægget.

I forberedelserne til selve beregningsprogrammet af EGR køleren, blev der foretaget en litteraturundersøgelse. Her blev der ikke fundet litteratur der direkte kunne beskrive den sammensatte problemstilling i dette projekt omkring køling af vand og gas samtidigt med udkondensering af vand fra gassen. Derfor er der valgt en fremgangsmetode med at bygge et beregningsprogram op af enkeltdele, som er dokumenterede. Dog viser sammenligninger med måleresultater, at beregningsmodellen ikke i tilstrækkelig grad er stand til at beskrive den komplekse varme- og massetransport, der finder sted i EGR køleren.

Sideløbende med de øvrige aktiviteter er der undersøgt muligheden for at udskifte nogle af de nuværende materialer i EGR køleren med andre. Her er der vurderet en række kandidater i forhold f.eks. korrosionsmodstand i det harske miljø, som køleren er placeret i. Blandt de rustfrie ståltyper, som allerede nu anvendes til kølere, er 316 legering vurderet til at være der mest konkurrencedygtige valg mht. korrosionsmodstand og kostpris.

Projektets resultater kan bruges fremadrettet i udviklingen af EGR-kølere via den viden, der er genereret ifm. tests, beregninger og materialeundersøgelser. Der er opnået viden omkring fordelingen af heat load på køleren, samt afdækket mulighederne og nøjagtigheden af forskellige beregningsmetoder på køleren, hvilket i fremtiden kan anvendes i designet af nye kølere. Materialeundersøgelsen afdækkede fordele og ulemper ved en række mulig kandiderende materialer til EGR systemet. Der er således skabt et bedre overblik over mulighederne og begrænsningerne ved fremtidig brug af disse. De alternative materialer/teknologier, som måske kræver yderligere forskning/udvikling før de kan anvendes direkte til EGR, er blevet belyst, således at de mest relevante af disse kan følges tæt og inddrages, når de modnes tilstrækkeligt.



## 6. Bibliografi

Dieselnet.com, 2016. *Dieselnet*. [Online]

Available at: <https://www.dieselnet.com/standards/inter/imo.php>

[Senest hentet eller vist den 17 September 2016].

Ibsen, C. H., 2014. *Udleveret materiale i projektøjemed*. Lem - Ringkøbing: Vestas Aircoil.

Pedersen, J. B., 2014. *Udleveret materiale i projektøjemed*. København: MAN Diesel & Turbo.

Stephan, D. I. P., 2010. *VDI Heat Atlas*. 2010 red. Düsseldorf: Springer Verlag Berlin Heidelberg.

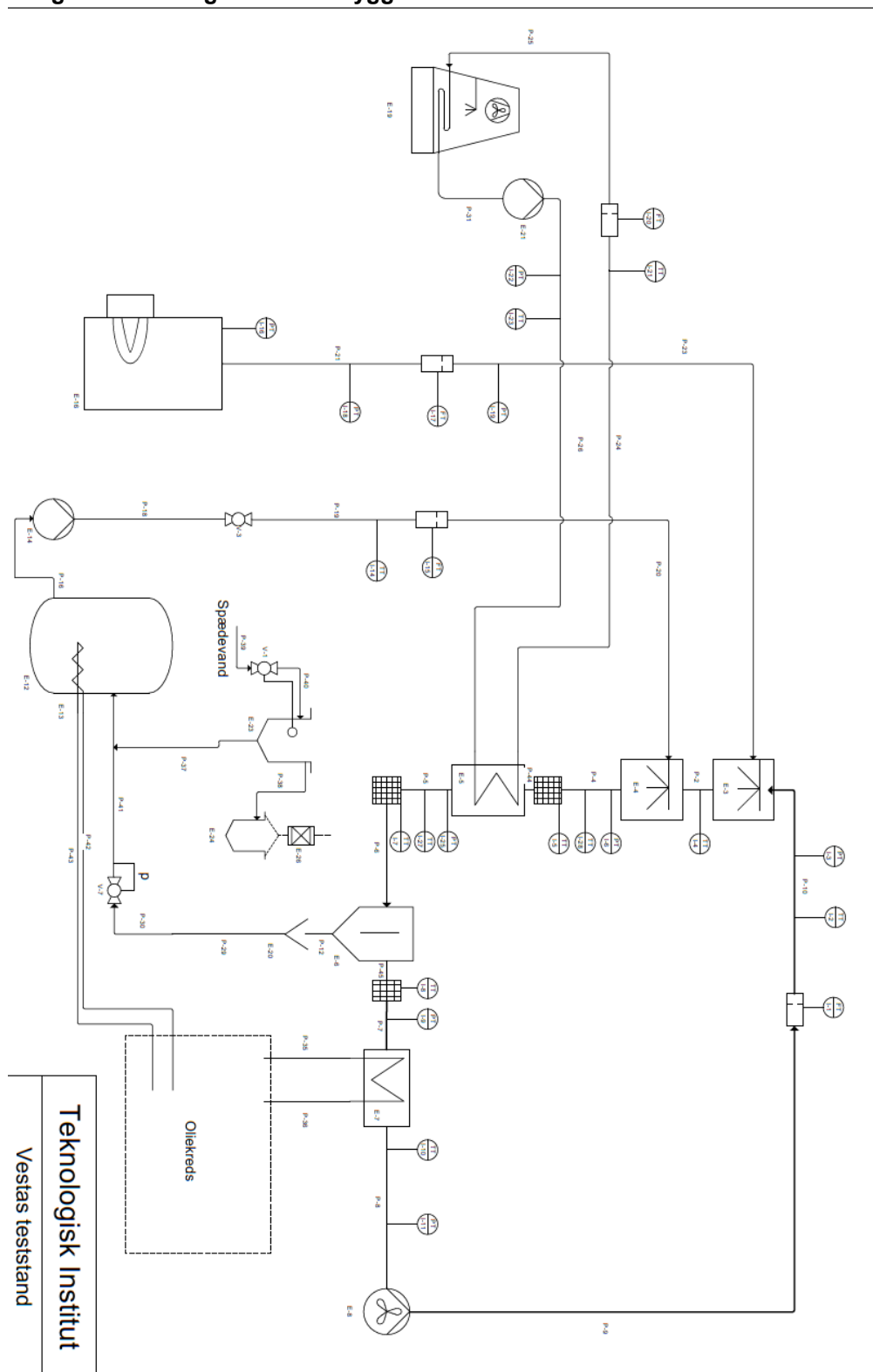
Thome, J. R., 2014. *Wolverine Tube Heat Transfer Data Book*. 2014 red. s.l.:Wolverine Tube.

Thulukkanam, K., 2013. *Heat exchanger design handbook*. 2nd edition red. s.l.:CRC Press.

Toftegaard, R., 2013. *Ansøgningskema 2013 - Optimeret EGR køler*. Aarhus: Teknologisk Institut.

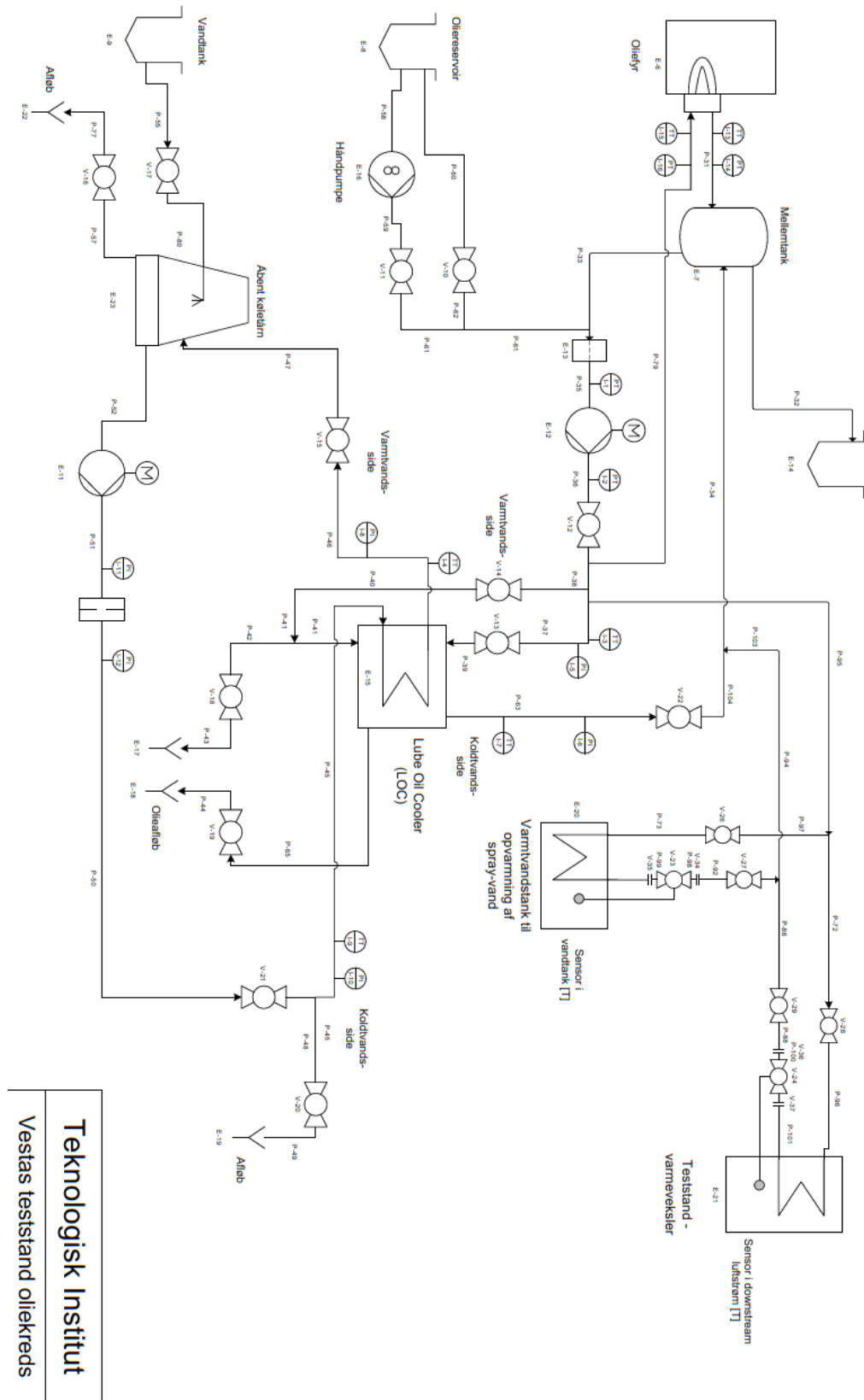
# Bilag 1. PI-diagrammer

## Bilag 1.1 PI-diagram for ombygget teststand – Vestas Aircoil



Bilag 1.1: PI-diagram af den ombyggede teststand hos Vestas Aircoil.

## Bilag 1.2 PI-diagram for ombygget oliesystem til teststand - Vestas Aircoil



Teknologisk Institut  
Vestas teststand oliekræds

Bilag 1.2: PI-diagram af ombygget oliesystem til teststanden hos Vestas Aircoil.





### **Optimering af EGR køler**

Projektet ser på udviklingen og optimeringen af en EGR køler, som anvendes til dieselmotorer på skibe. EGR teknologien er den ene af to primære metoder til at nedbringe NO<sub>x</sub> udledningen fra store dieselmotorer på skibe. NO<sub>x</sub> dannes ved forbrænding via flere forskellige mekanismer og er oftest dannet som følge af høj forbrændingstemperatur.



Miljøstyrelsen  
Haraldsgade 53  
2100 København Ø

[www.mst.dk](http://www.mst.dk)