

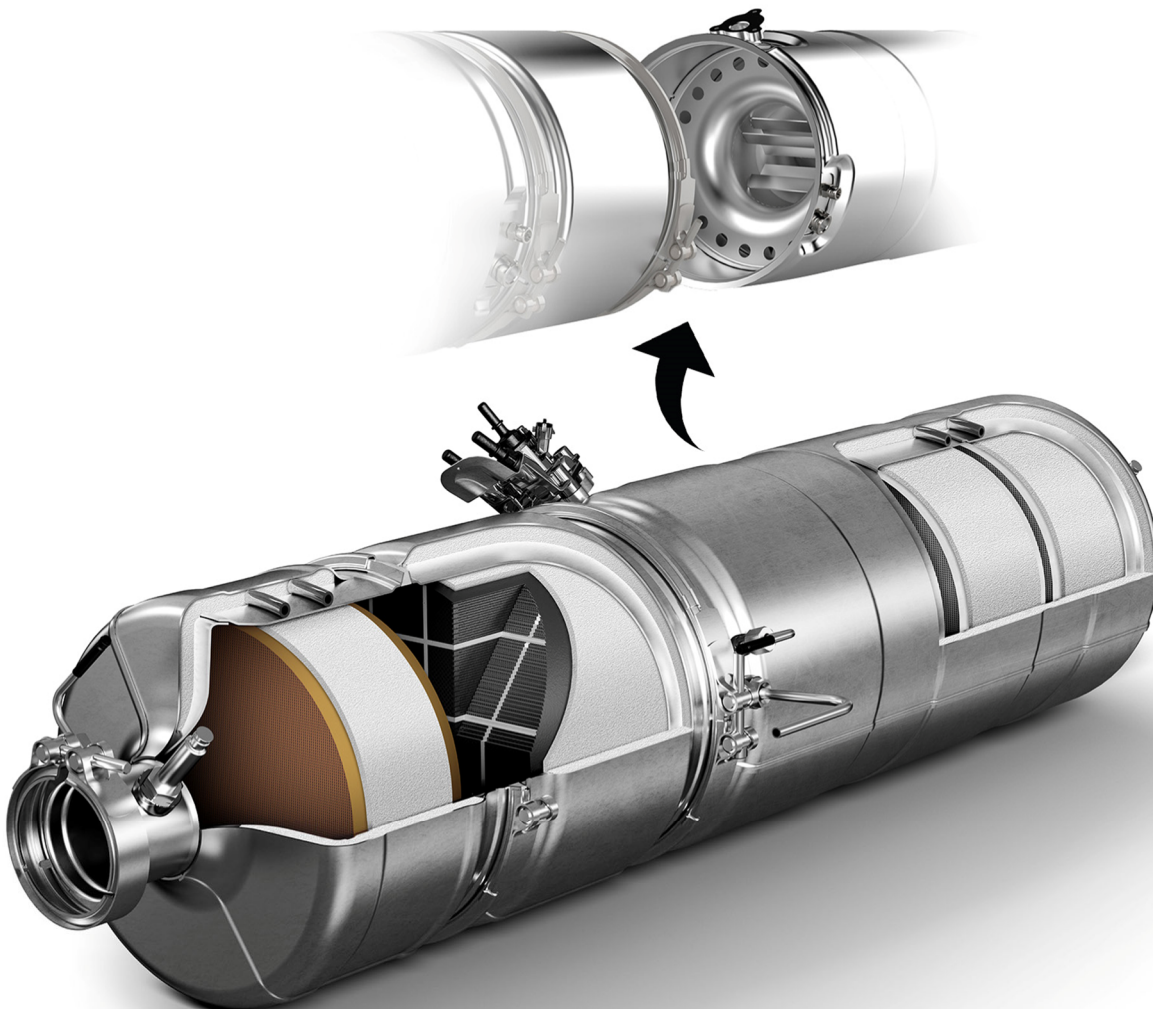


Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Kompakt mixer med lav termisk masse

MUDP Rapport

December 2020



Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Kasper Steen Andersen, Dinex A/S

Jim Elkjær Bebe, Dinex A/S

Syddansk Universitet

ISBN: 978-87-7038-253-3

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

Forord

Projektet "Kompakt mixer med lav termisk masse" er gennemført som et teknologiudviklingsprojekt af en løsning til renere luft, med støtte fra Miljø- og Fødevareministeriets program for Miljøteknologisk Udviklings og Demonstrations Program (MUDP). Projektet modtog tilsagnet i 2017.

Projektgruppen har bestået af deltager fra Dinex A/S og Syddansk Universitet.
Projektleder for projektet;

2017-ultimo 2019: Kasper Steen Andersen, Dinex A/S

2020: Jim Elkjær Bebe, Dinex A/S

Fra miljøstyrelsen har projektet været fulgt af Jytte Boll Illerup.

1. Sammenfatning og konklusion

Det forventes at fremtidig lovgivning vil stille krav om at emissioner fra tunge køretøjer reduceres i en "Real Driving Emission"-test, der også kommer til at indeholde koldstarter. Koldstarter er vanskelige af flere årsager, dels fordi NO_x reduktion afhænger af tilførsel af NH₃, det sker typisk ved at introducere AdBlue, en vandig urinstof-opløsning, som skal fordampes og dels fordi de katalytiske reaktioner kræver varme.

Der er samtidig en forventning om at CO₂-udledning begrænses, CO₂-udledningen begrænses når brændstofforbruget begrænses, det kan opnås ved at reducere køretøjets vægt. For at gøre løsningen attraktiv for køretøjsfabrikanter og til en kommerciel succes, har der været fokus på at udvikle en komponent som er skalérbar og modulær.

Teknisk konklusion

Den tekniske løsning har i projektet to sider. Den ene side handler om produktets emissionsperformance, mens den anden side handler om produktets strukturelle integritet.

Produktets design har i første omgang været drevet af emissionsperformance, det direkte input er kommet fra Computational Fluid Dynamics (CFD) simulering. For at validere resultaterne er der dels foretaget test i vindtunnel og dels på motorprøvestand.

Der er vist en god overensstemmelse mellem simulering og test på motorprøvestand, på tværs af de forskellige variationer. Korrelationen mellem simulering og test i vindtunnel, var i overordnede træk gode, mens der var en nogle uoverensstemmelser i detaljen (specifikke dråbestørelser/-hastigheder). De to undersøgelser kan ses som en makroskopisk og en mikroskopisk undersøgelse, hvor forskellene på mikroskopisk (fra vindtunnel) plan, har mindre indflydelse på de makroskopiske resultater (fra motorprøvestand) for den kompakte mixer.

For at sikre at produktet kan overholde kravene til holdbarhed og styrke er der lavet Finite Element Analysis (FEA) og Experimental Modal Analysis (EMA). Resultaterne viste at den kompakte mixers strukturelle integritet vil leve op hvad der forventes. Afslutningsvis blev der lavet en shakertest på et komplet system, hvor det dokumenteres at mixeren kan holde i den forventede levetid.

Det viste sig vanskeligt at fremstille prototyper i de meget tynde stålplader, så selvom de strukturelle undersøgelser (FEA og EMA) indikerer at produktet er holdbart og CFD-simuleringer viser 37,5 % hurtigere opvarmningstid end referencesystemet, har det ikke været muligt at dokumentere i fuld skala.

For at bringe projektet videre ses der på alternative sammenføjningsmetoder til at samle mixeren.

Kommercielt resultat

Den kompakte mixer fandt en kunde i 2017, det skabte en synergi der var gavnlig for projektet. I den nære fremtid er det også muligt at få tyndplade-dele lavet på produktionsværktøjer snarere end prototypeværktøjer. Det muliggør en evaluering der er mere repræsentativ for det endelige produkt.

I 2019 var mixeren del af et system der blev foreslået til en indisk kunde, hvor der senere blev lavet en aftale. I 2020 blev en variation af mixeren sendt som prototype til en kinesisk kunde.

1.1 Summary and conclusion

It is expected that future legislation will require reductions in emissions from heavy duty vehicles according to a "Real Driving Emission"-test, which will also contain cold starts. Cold starts are difficult for a number of reasons; partly because NO_x reduction depend on the addition of AdBlue, and urea-water-solution, which must be evaporated to release gaseous NH₃, and partly because the catalytic reactions require heat.

At the same time there is an expectation that CO₂ emissions will also reduce, CO₂-emissions will reduce when fuel consumption reduces, that can be achieved by reducing the total mass of the vehicle. For the solution developed in this project to be attractive to vehicle and engine manufacturers and to make it a commercial success, focus has also been on developing a scalable, modular solution.

Technical conclusion

The technical solution in the project has two facets. One part concerns the emissions reduction performance, whilst the other concerns the structural integrity of the product.

The product design has firstly been driven by the emissions reduction performance; the concrete input has come from Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations. Testing has been performed on both engine dyno and in wind tunnel to validate the results.

A good correlation has been shown between simulation and test on the engine dyno, across different conditions and variations. The correlation between simulation and test in the wind tunnel were overall good, while some disagreement was observable on a detailed level (specific droplet sizes/-velocities). The two investigations can be interpreted as macroscopic and microscopic, the microscopic results (from the wind tunnel), proved to have a minor influence on the macroscopic results (from the engine dyno) for the compact mixer.

Finite Element Analysis (FEA) and Experimental Modal Analysis (EMA) has been performed to ensure that the product can meet the requirements for strength and durability. The results proved that the structural integrity of the compact mixer can meet expectations. Finally, a full system shaker test was performed, to document that the mixer will last for the expected lifetime.

It proved difficult to produce prototypes from very thin steel sheets, alas even though the structural investigations (FEA and EMA) proved that the solution is durable and the CFD indicated a 37.5 % faster heat-up time compared to the reference, it has not been possible to document it in full scale.

To bring the project further, alternative joining solutions for assembling the mixer are now being investigated.

Commercial results

The compact mixer found a customer in 2017, that created a synergy in favor of the project. In the immediate future it has also opened the possibility of having low thermal mass components made on production tools rather than prototype tools. That will enable a structural evaluation more representative of the final product.

In 2019 the mixer var part of a system proposed to an Indian customer, a deal was later struck. In 2020 a variation of the mixer was sent as prototype to a Chinese customer.

Indhold

Forord	3
1. Sammenfatning og konklusion	4
1.1 Summary and conclusion	5
Indhold 6	
2. Arbejdspakke 1 - Design	8
2.1 Den kompakte mixer	8
2.1.1 Udviklingsprocessen	8
2.1.2 Konceptet	9
2.1.3 Det endelige design	10
2.1.4 Produktionsmodning	11
2.2 Vindtunnellen	12
2.2.1 Krav	12
2.2.2 Layout	12
2.2.3 Design	14
2.3 In-situ deposit inspektionsmodul	16
2.4 Shaker-fikstur	17
2.5 Fremtidigt arbejde	18
3. Arbejdspakke 2 – CFD-simulering	19
3.1 Metode	19
3.1.1 Beskrivelse af anvendelse i udviklingen af SCR-systemer	19
3.1.2 Procedure	20
3.1.3 Modeller og inputparametre	23
3.2 Designudviklingsløjfe	24
3.3 Simulering af endeligt design	24
3.3.1 Systembeskrivelse og geometri	24
3.3.2 Grænsebetingelser og lastpunkter	26
3.3.3 Resultater; modularitet	27
3.3.4 Resultater; variation over materialetykkelse	28
3.3.5 Diskussion	29
3.4 Evaluering af gevinst ved reduktion af godstykkelser	29
3.5 Validering mod arbejdspakke 4	31
3.5.1 AA1	31
3.5.2 AL1	32
3.5.3 Diskussion; sammenligning med forsøg	34
4. Arbejdspakke 3 – FEA simulering	35
4.1 Metode	35
4.1.1 Principper bag - og beskrivelse af værktøjet	35
4.1.2 Procedure	35
4.1.3 Baggrund for evaluering af resultater	37
4.2 Simulering af endeligt design	37
4.2.1 Systembeskrivelse og geometri	37
4.2.2 Resultater	38
4.2.3 Diskussion	43
4.2.4 Sammenligning med EMA	43

5.	Arbejdspakke 4 – Validering af CFD spray simuleringer	44
5.1	Laboratorieopstilling	44
5.1.1	PDA-måleudstyr	45
5.1.2	Instrumentering af laboratorieopstilling	45
5.1.3	Idriftsættelse af vindtunnel	46
5.2	Spray karakterisering	48
5.2.1	AA1	49
5.2.2	AA2	49
5.2.3	AL1	50
5.3	Spray karakterisering i vindtunnel	51
5.3.1	Parameter variationer	52
5.4	Mixerplade tests	55
5.4.1	Parameter variationer	59
5.5	Diskussion	65
6.	Arbejdspakke 5 – Validering af strukturdynamiske simuleringer	67
6.1	Metode	67
6.1.1	Procedure	67
6.1.2	Testmodel	68
6.1.3	Impact punkter	69
6.1.4	Accelerometer-positioner	70
6.1.5	Ophængspunkter	70
6.2	Dataopsamling og setup	71
6.3	Masseforskelle – Testemner vs. FE modeller	71
6.4	Resultater	72
6.4.1	Diskussion	82
7.	Arbejdspakke 6 – Testopstilling og validering	83
7.1	Prototypeproduktion	83
7.2	Test til validering af NOx-reduktionsfordeling	83
7.2.1	Metodebeskrivelse og procedure	84
7.2.2	Resultater af fordelingstest	85
7.2.3	Sammenligning med CFD-simulering	85
7.3	Test til validering af krystalliseringsrisiko	86
7.3.1	Metodebeskrivelse og procedure	86
7.3.2	Validering af metode	87
7.3.3	Resultater	87
7.4	Mekanisk test; validering ved shakertest	88
7.4.1	Metodebeskrivelse og procedure	88
7.4.2	Resultater	89
7.5	Fremtidigt arbejde	92
8.	Arbejdspakke 7 – Management og formidling	93
8.1	Statusmøde 1 (Perioden 15. oktober 2017 til 1. september 2018)	93
8.2	Statusmøde 2 (Perioden 1. september 2018 til 1. marts 2019)	93
8.3	Statusmøde 3 (Perioden 1. marts 2019 til 1. september 2019)	93
8.4	Statusmøde 4 (Perioden 1. september 2019 til 1. april 2020)	93
8.5	Formidling	93
8.5.1	14th International CTI Conference on SCR Systems	93
8.5.2	15th International CTI Conference on SCR Systems	94
8.6	Status ved projektets afslutning	94
9.	Bibliografi	95

2. Arbejdspakke 1 - Design

Arbejdspakke 1 relaterer sig dels til designet af mixer med lav termisk masse og dels design af testopstillinger. Designudviklingen er drevet af simuleringer af gasstrømning og strukturdynamik. Dette kapitel er inddelt så de individuelle leverancer beskrives for sig.

2.1 Den kompakte mixer

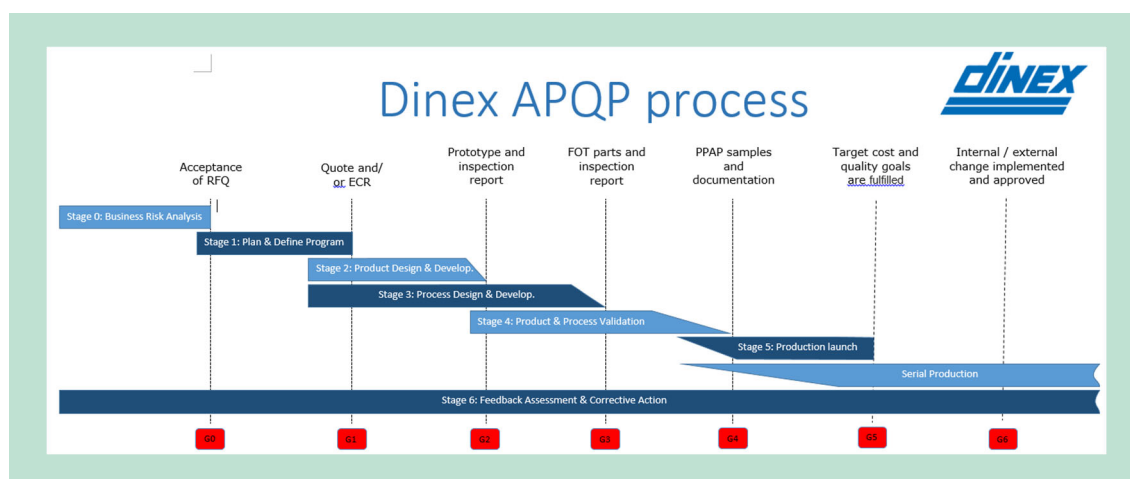
Designet af den kompakte mixer med lav termisk masse er udviklet vha. analytiske beregninger og CADs design og optimeret ud fra simuleringresultater, og vil generelt følge APQP-udviklingsmetode. Udviklingen af designet har særligt fokuseret på at reducere tykkelsen af de anvendte rustfri stålplader samt udnytte volumen af mixeren bedre end i nuværende state of the art løsninger til at øge fordampningen og fordelingen af de indsprøjtede dråber af AdBlue.

2.1.1 Udviklingsprocessen

Som nævnt i afsnit 2.1 er udviklingsprocessen generelt struktureret efter APQP-processen. APQP står for *Advanced Product and Quality Planning*, det er et produktudviklingsframework der særligt har fundet anvendelse i autobranschen. Som implementeret for det her projekt indeholder det 7 stages:

1. Stage 0: Business risk analysis
2. Stage 1: Plan and define program
3. Stage 2: Product design and development
4. Stage 3: Process design and development
5. Stage 4: Product & process validation
6. Stage 5: Production launch
7. Stage 6: Feedback assessment & corrective action

Til et teknologiudviklingsprojekt som dette bevæger man sig primært i Stage 2, hvor både design, simulering, prototypeproduktion og -test indgår. FIGUR 1 viser de 7 stages med de vigtigste milepæle markeret.

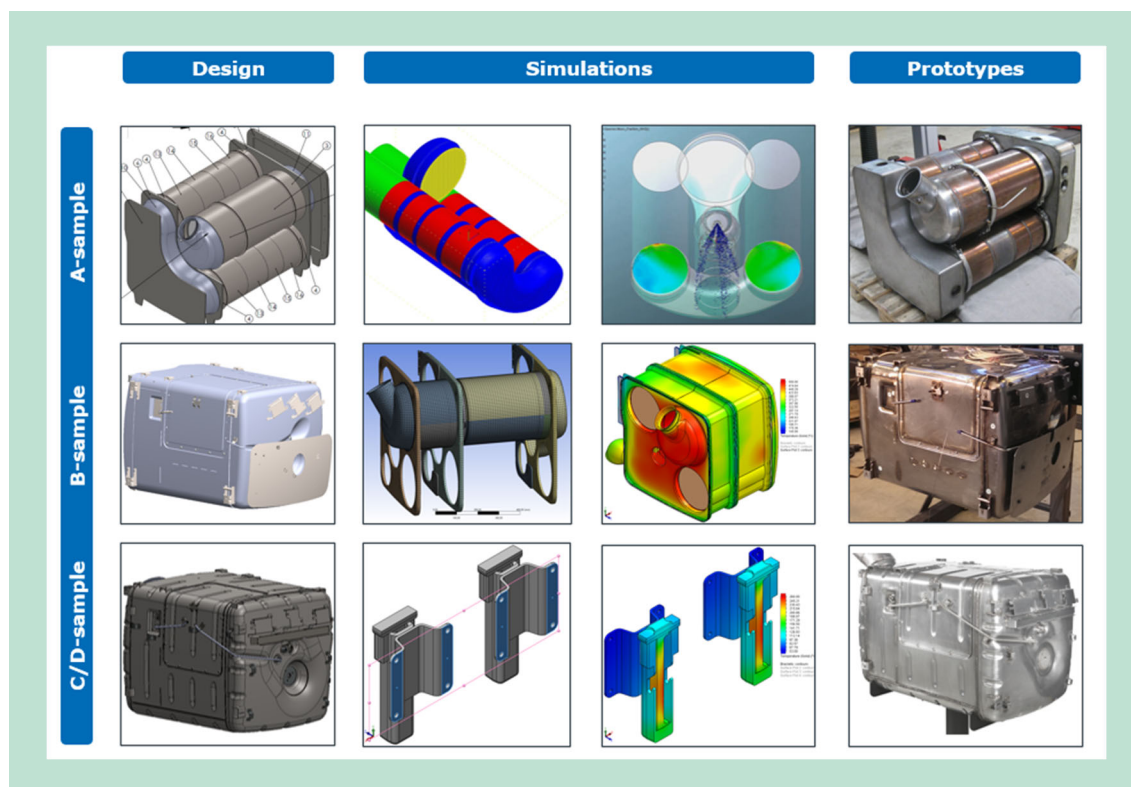


FIGUR 1. APQP som implementeret i Dinex i 2017

Udviklingen af efterbehandlingssystemer kan yderligere inddeles i "sample levels", hos Dinex opererer man med A, B, C og D-samples. Forskellene der forskellige samples imellem relaterer sig til modenhed og er illustreret i FIGUR 2. A-samples er første niveau, her er fokus på

emissionsperformance. Man simulerer på udstødningsgassens vej gennem systemet og prototyperne er typisk fleksible systemer samlet med flanger der er tiltænkt motorprøvestand snarere end køretøj.

Når A-sample er frosset, dvs. emissionsperformance er tilfredsstillende, går man videre til B-sample. B-sample systemer er fokuseret på at imødekomme de strukturelle krav, de er typisk ikke fleksible, men kan derimod monteres på køretøjet. Designet er primært drevet af strukturelle simuleringer. C/D-samples bliver til i samarbejde med produktionen, her er fokus at sørge for at designet er egnet til serieproduktion og robotsvejsning. Simuleringsarbejdet i udviklingsafdelingen er nu reduceret til at ad-hoc undersøgelser forbundet med ændringer ønsket af produktionen.



FIGUR 2. De forskellige produktudviklingsniveauer sammenholdt med design, simuleringsaktiviteter og prototype. Det viste produkt relaterer sig ikke specifikt til den kompakte mixer

2.1.2 Konceptet

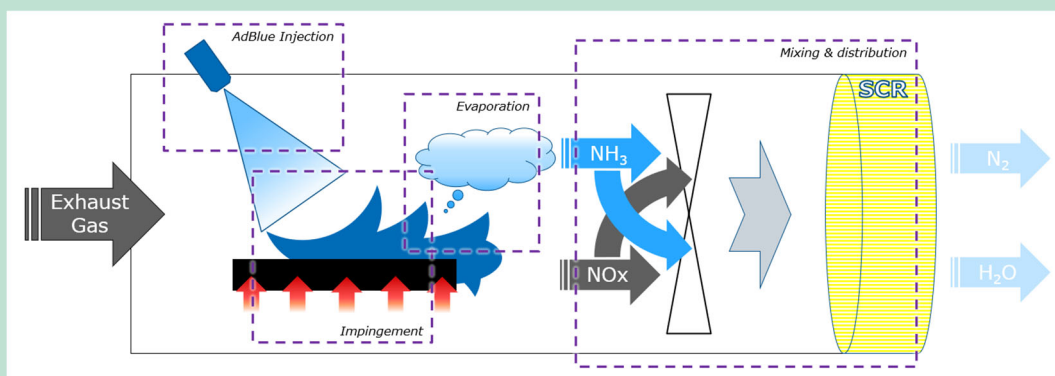
Udviklingen af den kompakte mixer er udført efter en designfilosofi, formet gennem erfaring og indsigt i de mekanismer der er i spil. Designfilosofien er illustreret i FIGUR 3.

Filosofien behandler kernefunktionaliteten for mixeren, altså at opnå en god fordeling af ammoniakgas på forside af SCR-katalysatoren. Kilden til ammoniakgasen er en vandig urinstofopløsning markedsført under navnet AdBlue. AdBlue består af 32,5% urinstof og 67,5% vand. I den varme udstødningsgas vil vandet fordampe og urinstoffet vil termisk dekomponere til ammoniak og isocyanidsyre. Isocyanidsyren vil reagere med vanddampen i en hydrolyse-reaktion med kuldioxid og ammoniakgas som resultat. På trods af at den relative temperatur mellem udstødningsgas og AdBlue er stor, sker den termiske dekomposition (ofte) for langsomt til at ske i udstødningsgassen alene. Af den grund designes særlige fordampningsplader i mixeren, fordampningsfladerne sikrer at meget af ammoniakgasproduktionen sker på et hensigtsmæssigt sted. Fordampningspladerne kan ligeledes designes så udstødningsgas ledes omkring begge sider af dem, hvorved konvektion sikrer en konstant varmetilførsel. Varmetilførslen er nødvendig da en ufuldstændig dekomposition af urea kan medføre en polymerisation som i yderste konsekvens kan blokere udstødningssystemet eller reducere NOx-reduktionsperformance.

Efter dekomposition af ureaen blandes ammoniakgassen med den NO_x-holdige udstødningsgas og der tilsigtes en homogen opblanding på forsiden af katalysatoren. Ensartetheden af opblandingen kvantificeres typisk med det dimensionsløse "Uniformity Index", beregnet på baggrund af koncentration af ammoniak, se formelen herunder.

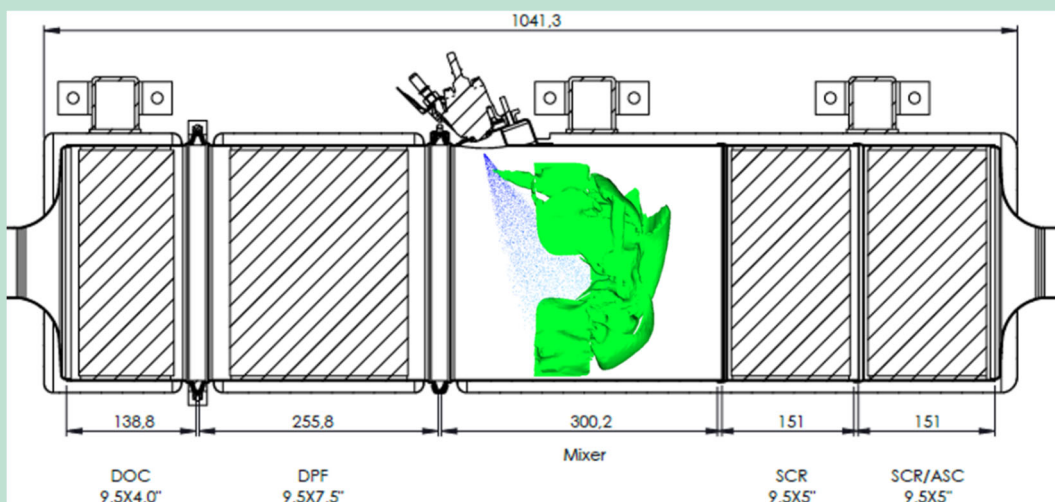
$$UI = 1 - \frac{1}{2S_{tot}} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(C_i - \bar{C})^2 \cdot S_i}}{\bar{C}_i}$$

Hvor S_i er arealet af det specifikke målepunkt, S_{tot} er arealet af hele overfladen, C_i er lokal koncentration og $\bar{C}$ er middeldkoncentration.



FIGUR 3. Designfilosofi for mixerdesign

De fysiske grænser for systemet blev fastlagt således at systemet skulle kunne skaleres mellem at passe til katalysatorer med 7,5" (190,5 mm) og 12" (304,8 mm) i diameter. Samtidig skulle mixeren kunne bruges med forskellige AdBlue doseringssystemer. Grundet kommerciel interesse, endte løsningen med en diameter på 9,5" (241,3 mm) at være størrelsen der har drevet udviklingen. Et eksempel på et 9.5" system med kompakt mixer ses på FIGUR 4.



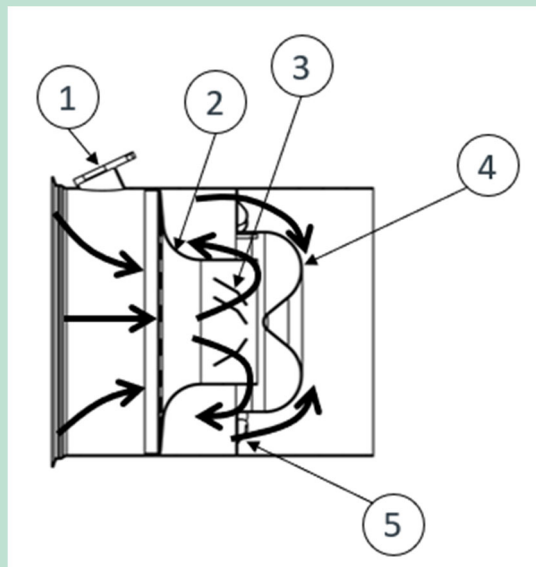
FIGUR 4. Layout for 9,5" A-sample. I mixer er vist indsprøjtning og opblanding (indgang til venstre).

2.1.3 Det endelige design

Mixerens endelige design et resultat af mange forskellige koncepter, i dette afsnit beskrives kun designet som det er blevet arbejdet med i de øvrige arbejdsplaner.

Funktionsbeskrivelse

Startende ved indsprøjtningsspunktet, se FIGUR 5; AdBlue sprøjtes ind i mixeren under tryk så ledes at væsken atomiseres til en spray før væsken rammer en ståflade. Et "flow guiding device" samler udstødningsgassen med AdBlue-dråberne samtidigt med at gassen accelereres. "Evaporation plates" der sidder i "flow guiding device" bryder flowet og hjælper til at blande udstødningsgas og afdampet væske. Bladene fungerer også som anslagsflade for AdBlue-dråberne. Dernæst sidder en "flow deflecting device" der vender flowet på en måde så et "flow-dødt" område undgås. Omkring "flow deflecting device" sidder en "swirling baffle" som inducerer en roterende bevægelse i flowet der yderligere styrker opblandingen samtidigt med at varmetilførslen til "flow deflecting device" styrkes – for at afhjælpe udkrystallisering (deposits) af urea i "flow deflecting device".



FIGUR 5. Funktionsbeskrivelse; 1: indsprøjtningsspunkt, 2: Flow guiding device, 3: Evaporation plates, 4: Flow deflecting device, 5: Swirling baffle

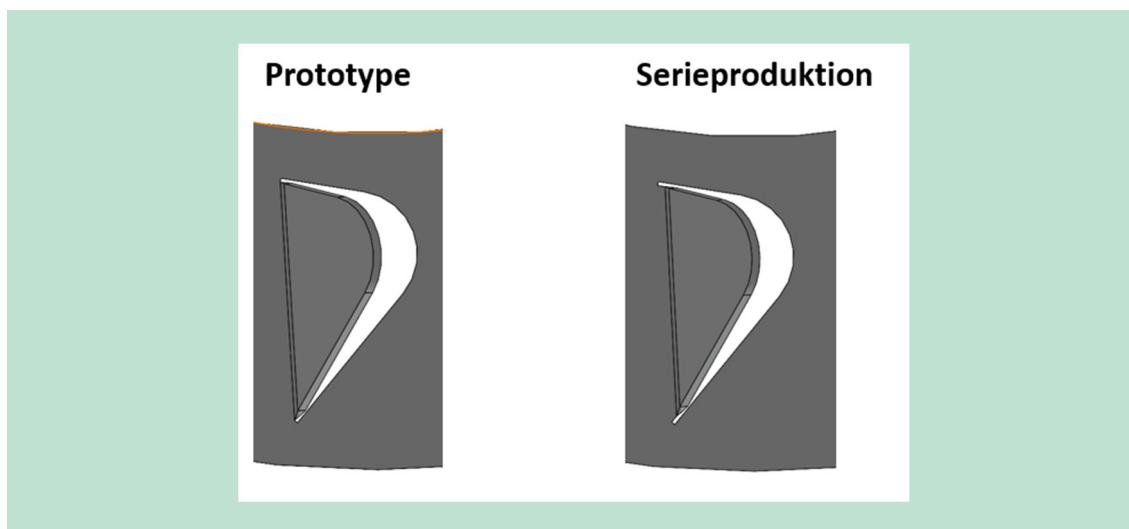
Materiale og materialetykkelse

Ståltypen der er brugt til alle dele i mixeren, er EN1.4509. Det er en type som tidligere har været brugt i Mixere hos Dinex. Materialet er valgt som det bedste kompromis mellem korrosionsbestandighed, svejs- og formbarhed, samt termiske egenskaber. Den typiske godstykkelse er 1,5 mm. Det er en pladetykkelse der er bredt tilgængelig, hvor der er behov for dem i verden. I dette projekt er der ydermere undersøgt mixere udfærdiget i 0,7 mm og 1,0 mm pladetykkelse (også EN1.4509).

2.1.4 Produktionsmodning

Følgende afsnit omhandler ændringer af mixerkomponenter, samlinger mv. som følge af produktionsmodningsprocessen. I denne proces har ydeevnen af mixeren været i fokus, så produktionsmodning ikke har haft nogen negativ indflydelse på mixerens ydeevne. Svejsninger er placeret således at der anvendes mindst muligt svejsmateriale, hvorved der opnås en mindst mulig påvirkning af materialet i forbindelse med svejsningerne. Der laves "slots" i den valsede plade og evaporation plates forlængelse således at disse placeres korrekt (Poka-yoke) og at der er tilstrækkeligt med materiale til svejseprocessen. Grundet anvendelse af dybtræk, er det muligt at reducere antallet af komponenter fra tre til en, hvorved svejsningerne også overflødiggøres. Dette er gældende for "flow guiding device" og "flow deflecting device" samt "Swirling baffle". På grund af dybtræksprocessen har det været nødvendigt at lave en radius på 4mm og 3,5mm som erstatter kantsømmene.

På FIGUR 6 ses introduktion af "corner relief" – reduktion af risiko for kærvedannelse. Mixer sleeve er modificeret med "slots" således at mixer svejsningerne er udvendigt på "kroppen". Hvorved der er opnået en reduktion på 70 % af svejselængden.



FIGUR 6. Corner relief, prototype til venstre, serieproduktion til højre. Bemærk at bukkelinjen er flyttet væk fra enden af udskæringen

2.2 Vindtunnellen

Til gennemførelse af arbejdsplan 4 har det været nødvendigt at konstruere en vindtunnel der kunne levere de flow-hastigheder og -temperaturer som er nødvendigt for at skabe forhold der er repræsentative for udstødningsgassen. Samtidigt skal man kunne kontrollere forholdene præcist nok til at forsøg kan gentages med negligerbar variation og det er nødvendigt at foretage optiske målinger i gasstrømmen af dråberne der sprøjtes ind.

2.2.1 Krav

De specifikke krav til vindtunnellen blev endeligt fastlagt 30/10 2018, og lyder således;

- 400 °C gastemperatur i målesektionen
- 10 m/s gashastighed i målesektionen
- Indsprøjtning af AdBlue skal være muligt i målesektionen
- Målesektionen skal sikre gode forhold for målinger med PDA-udstyr

Samtidigt blev målesektionens størrelse fastlagt med udgangspunkt i en 9,5" mixer.

2.2.2 Layout

Vindtunneller kan generelt inddeles i enten "closed loop" eller "open loop", hver med deres fordele og ulemper. TABEL 1 herunder beskriver de fordele og ulemper der indgik i overvejelserne i forbindelse med fastlæggelse af layout.

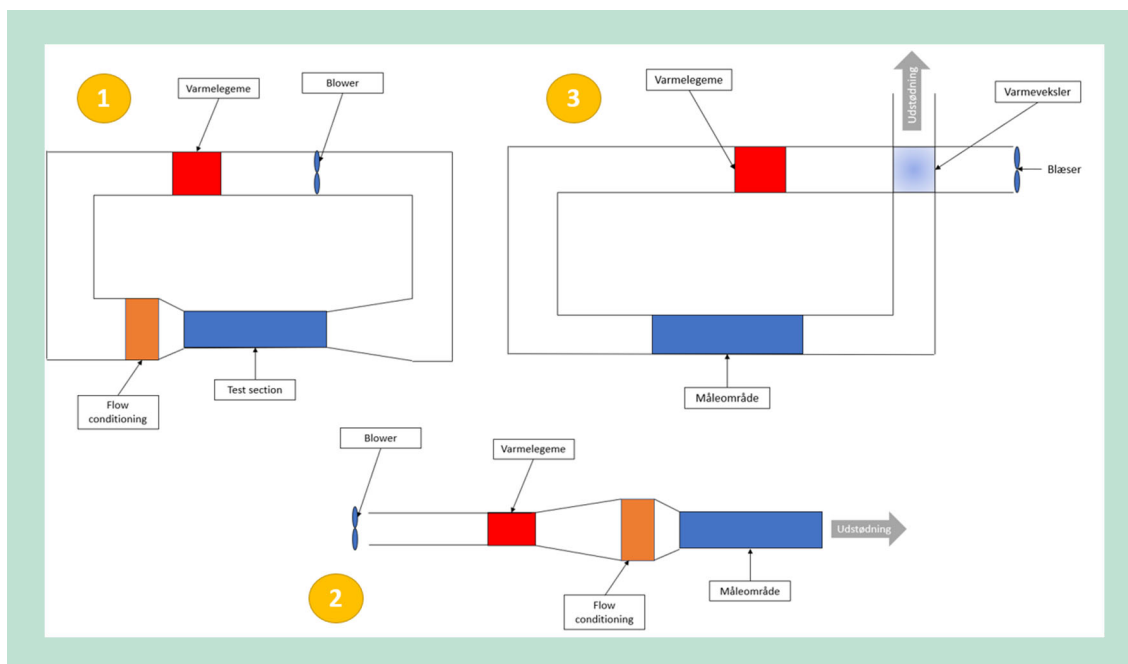
TABEL 1. Fordele og ulemper ved open- og closed loop vindtunneler i applikationer med indsprøjtning af korrosive væsker

Closed loop	Open loop
<u>Fordele</u>	
• Recirkulationen af luft tillader en lang-sommere opbygning af gastemperatur, derfor kan man nøjes med en mindre kanalvarmer – det gør den ligeledes mere energieffektiv • Der er ikke behov for udstødning til at trække gassen ud • Input flowforhold er uafhængige af de ambiente forhold	• Færre dele og pakninger • Blæseren behøver ikke at kunne tåle høje temperaturer • Ingen risiko for at korrodere vitale mekaniske dele under indsprøjtning af UWS • Luften skal ikke renses før indgang til målesektion
<u>Ulemper</u>	
• Udrensning af gassen er vanskelig • Forsøg med indsprøjtning af UWS eller andre korrosive væsker er ikke muligt/meget vanskeligt, pga. deposits og/eller korrosion af mekaniske dele. Ligeledes vil der i nogle forsøg givet vis udvikle sig en tåge i gassen når den indsprøjtede væske fordampes og dampen ydermere akkumuleres over tid	• Input flowforhold er afhængige af de ambiente forhold • Det vil være nødvendigt med en udstødning til at lede den ammoniakholdige gas ud af huset

Med afsæt i at indsprøjtning af UWS er nødvendigt og de designmæssige og mekaniske udfordringer ved et closed loop design, blev det besluttet at konstruere en "open loop, blow down" vindtunnel. "Blow down" henviser til at gassen trykkes igennem vindtunnelen snarere end at trækkes igennem. Typisk trækker man luften igennem målesektionen fordi man så undgår de flowforstyrrelser der uvægerligt vil skabes af blæseren.

En hybrid hvor man inkorporerede en varmeveksler blev også overvejet som en metode hvor man kunne reducere omkostningerne til en varmeproduktion, men grundet de høje priser for en tilstrækkeligt effektiv varmeveksler blev konceptet også fravalgt til fordel for den mere simple løsning.

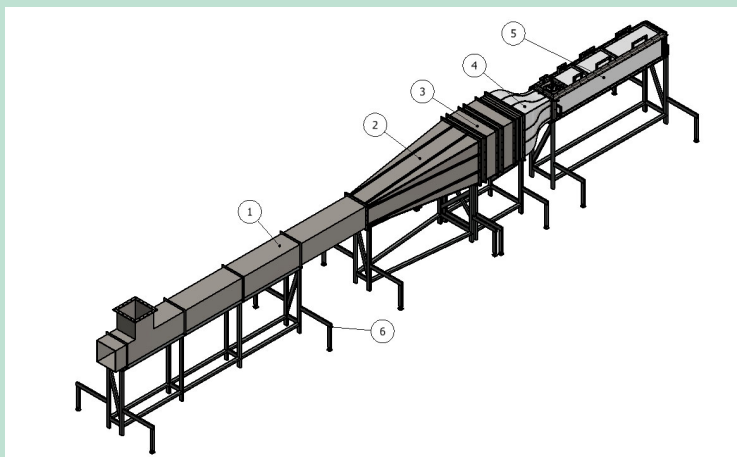
Et skematisk layout af de forskellige typer vindtunneller er vist på FIGUR 7, hvor 1 er closed loop, 2 er open loop og 3 er open loop med varmeveksling.



FIGUR 7. Skematisk layout af de 3 typer vindtunnel der blev overvejet til dette projekt.

2.2.3 Design

Den endelige vindtunnel består af mange individuelle komponenter, her følger en kort gennemgang af de forskellige komponenter, designkriterier og funktion.



FIGUR 8. Den endelige vindtunnel (blæser ikke vist). 1. kanalvarmer; 2. diffuser; 3. flowbe-handlingssektion; 4. kontraktionselement; 5. målesektion; 6. ramme

Blæser

Blæseren var allerede til rådighed hos Dinex A/S, den kan levere 9000 m³/h ved et modtryk på 5 kPa og vil ikke blive beskrevet nærmere.

2.2.3.1 Varmekanal

Varmekanalen er fremstillet specifikt til vindtunnel, den har en effekt på 145 kW den består af 27 varmelegemer der kan kontrolleres individuelt for at opnå fuld kontrol over temperaturen i gasstrømmen. Reguleringen er håndteret af en PLC, hvor der er lagt højere vægt på kontrol end indsvingningstid.

2.2.3.2 Diffuser

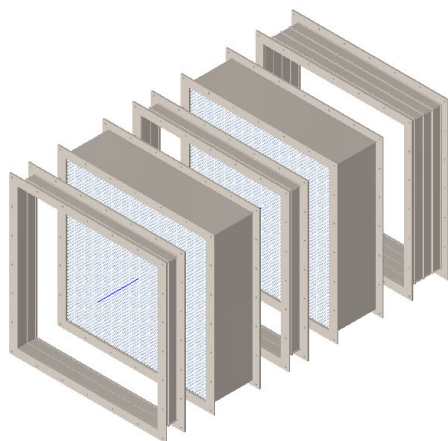
Formålet med diffuseren er at sænke gas hastigheden før flow-behandlingssementerne. Her er valgt en ekspansionsvinkel på 5° som anbefalet i litteraturen (Barlow, Rae, & Pope, 1999).

Flowbehandlingssektion

For at opnå en ensartet kvalitet af flowet er der indsat nogle flow-behandlingssementer.

Denne vindtunnel består grundlæggende af 2 typer element. En flow-ensretter, og en turbulensbryder. Ensretteren søger at "rette" flow af, altså eliminere radiale flow-baner og turbulensbryderen har til formål at bryde store turbulente eddies til mindre og reducere turbulensen i gassen. Ensretterkomponenterne er metalliske bærestrukturer brugt til katalysatorer (substrat), de er lavet af tynd korrugeret metal folie som er lagt i lag for at skabe små kanaler, størrelsen på kanalerne er givet ved antallet af kanaler per kvadrattomme (Cells Per Square Inch). Turbulensbryderne er gitre (wire mesh) med forskellige "maskestørrelser". Konfigurationen er som udgangspunkt:

1. Wire mesh S4
2. Substrat (200 CPSI)
3. Wire mesh S3
4. Substrat (200 CPSI)
5. Wire mesh S3 + S2 + S1



FIGUR 9. Flow-behandlingssektion

Dimensionerne for de individuelle wire meshes kan ses i TABEL 2.

TABEL 2. Specifikationer for wire meshes

	Enhed	S1	S2	S3	S4
Antal tråde	[-]	380	352	248	89
Tråd-diameter	[mm]	0,3	0,4	0,5	0,8
Porøsitet	[%]	77	72	75	86

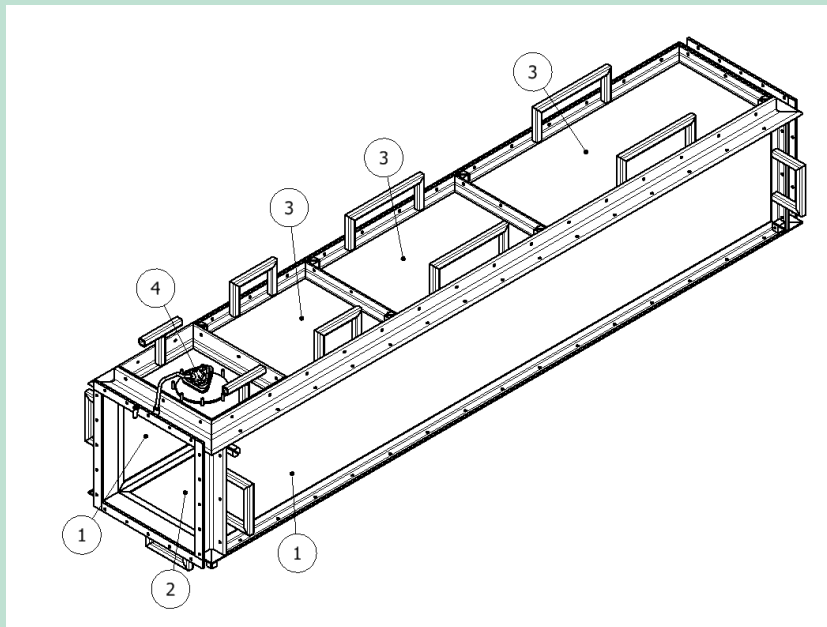
Kontraktionselement

Kontraktionselementer fører flowet fra det store tværsnit i flow-behandlingssektionen, til det mindre tværsnit i målesektionen. Formålet med kontraktionselementet er at trække flowet sammen på en måde så der ikke induceres unødigt turbulens. Kontraktionselementets form er et resultat af et sæt polynomier som beskrevet i litteraturen (Bell & Mehta, 1989). Grænserne er givet ved tværsnittet af målesektionen samt tværsnittet af substraterne.

Målesektion

Målesektionen er det måske vigtigste element for vindtunnellen. For at sikre optimal kvalitet af målingerne blev det på et tidligt tidspunkt besluttet at man ønskede et kvadratisk tværsnit af sektionen for at opnå plane glasflader til gennemlysning med PDA-måleudstyr, omend et typiske udstødningssystem er cylindrisk. Som tidligere nævnt var 9,5" mixer referencen, og målesektionen blev dimensioneret så den havde en hydraulisk diameter på 250 mm og en længde på 1500 mm.

Målesektionen består af en ramme med 4 sider der kan afmonteres for at muliggøre rengøring, samt installation af komponenter og instrumentering, se FIGUR 10.



FIGUR 10. Målesektionen. 1: sideelement; 2. bundplade; 3. topvinduer; 4. indsprøjtningspunkt

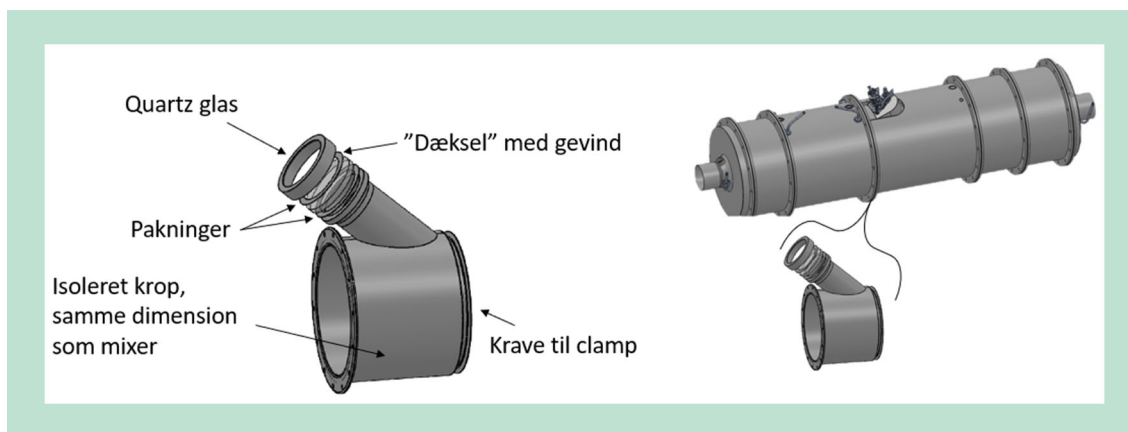
Den øverste flade består af individuelle komponenter så indsprøjtningspunktet kan flyttes frem eller tilbage. Glaspladerne i de to sider består af kvarts-glas, valgt af hensyn til kvaliteten af målingerne med laser. De øverste glasplade består af det væsentligt billigere Robax-glas, som dog stadig tåler de høje temperaturer. Bundpladen er en stålplade for at gøre montering af mixer dele simple.

Rammen

Til installation af vindtunnellen er også udført en ramme i svejste firkantprofiler. Rammen understøtter elementerne individuelt.

2.3 In-situ deposit inspektionsmodul

For at være i stand til at observere hvordan deposits formeres i udstødningssystemet under operation, er der blevet designet og fremstillet et inspektionsmodul. Inspektionsmodulet består af en cylindrisk sektion der passer på mixeren, monteret i den sektion er en rørstump med et varmebestandigt skueglas, der gør det muligt at observere udviklingen inde i systemet mens der i funktion, på en motorprøvestand. FIGUR 11 viser geometrien, og hvor modulet sidder i systemet. Opbygningen af modulet er lavet således at glasset kan afmonteres og renses og der er en krave til en clamp som sikrer hurtig demontage hvis nærmere undersøgelse påkræves.



FIGUR 11. Deposit inspektionsmodul, til højre; inspektionsmodulets opbygning, til venstre; inspektionsmodulet placering i systemet (mellem filter (DPF) og mixer), flowretning er venstre mod højre.

Verifikation, testprocedure og -opstilling, samt resultater af forsøg med inspektionsmodulet er beskrevet i kapitel 7: Arbejdspakke 6 - Testopstilling og validering.

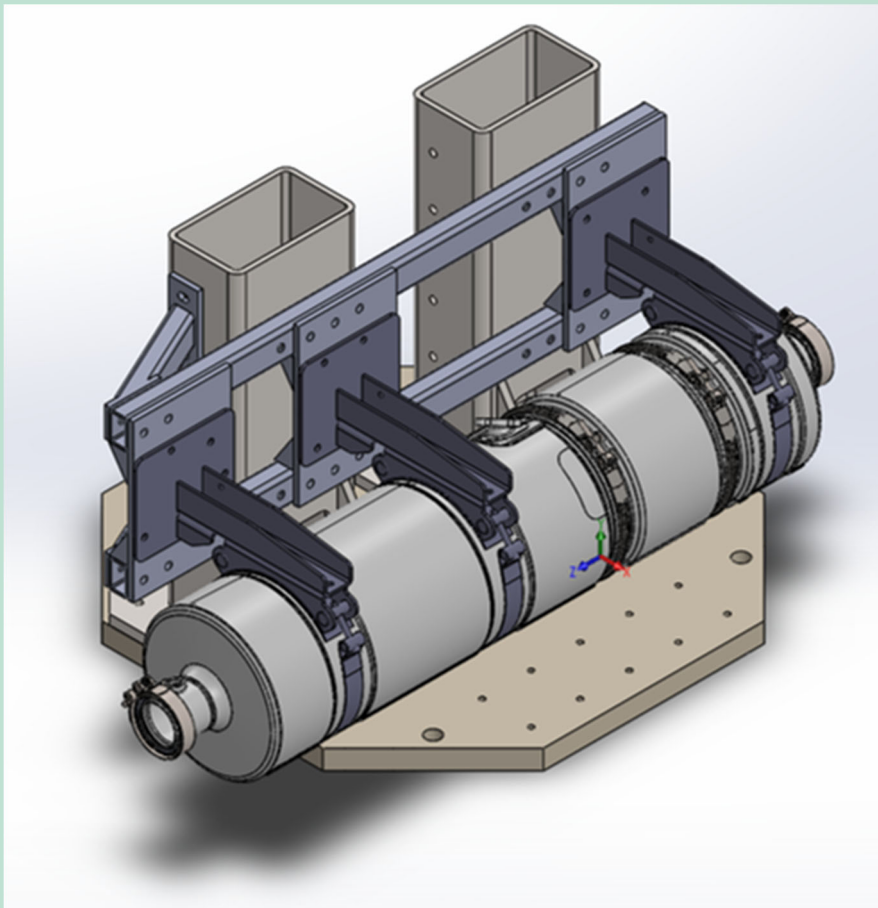
2.4 Shaker-fikstur

For at vurdere hvor holdbart systemet er under operation, i en realistisk applikation, laver man en "Hot shake" test. Testen foregår på en elektrodynamisk shaker, som er lidt som en gigantisk højttaler der kan excitere store masser ved relativt høje frekvenser. Samtidigt med at varm gas sendes igennem systemet (for at simulere udstødningsgas) exciteres systemet ved en accelereret lastprofil, optaget på et virkeligt køretøj i drift. Den varme gas sikrer at man også tager højde for stålets ændrede egenskaber ved så høje temperaturer.

Designet af et shaker fikstur kræver hensyntagen til mange parametre, udover omkostninger, tid;

- Masse – vægten skal holdes nede for at undgå for stor belastning af shakeren
- Dimensionsbegrænsninger – fiksturen skal naturligvis kunne monteres på shakeren, med systemet monteret, hvilket kan være en udfordring særligt med et system som det aktuelle pga. længden
- Modularitet – da fiksturen er dyr og tidskrævende at fremstille skal den gerne kunne bruges til flere systemer
- Stivhed – Ideelt set skal fiksturen være "uendeligt" stiv for at sikre den rette excitation af systemet
- Produktionsvenlighed – da alle fiksturer er "one-offs" skal de kunne fremstilles med bredt tilgængelige værktøjer, og i tilgængelige stålprofiler for at holde omkostningerne og arbejdsbyrden nede

Fiksturen er designet med input fra FEA-simuleringer (se også kapitel 4) for at sikre at det rette kompromis mellem stivhed, vægt og pris opnås. Den endelige fikstur med et system monteret kan ses på FIGUR 12.



FIGUR 12. Shaker-fikstur med udstødningssystem monteret

2.5 Fremtidigt arbejde

For at overkomme udfordringer med svejsninger af de meget tynde pladedele, er man i Dinex begyndt at undersøge muligheden for at bruge alternative sammenføjningsmetoder.

3. Arbejdspakke 2 – CFD-simulering

Arbejdspakke 2 relaterer sig til de fluiddynamiske analyser der bliver lavet i følge med udviklingen. Fluiddynamikken analyseres med et kommercielt simuleringsværktøj. Analysen foretages i forhold til om systemet imødekommer de emissionsrelevante krav, samtidigt fungerer analyserne som input til designet. Sidste del af arbejdspakke 2 beskæftiger sig med eksperimentel validering af CFD-analyserne.

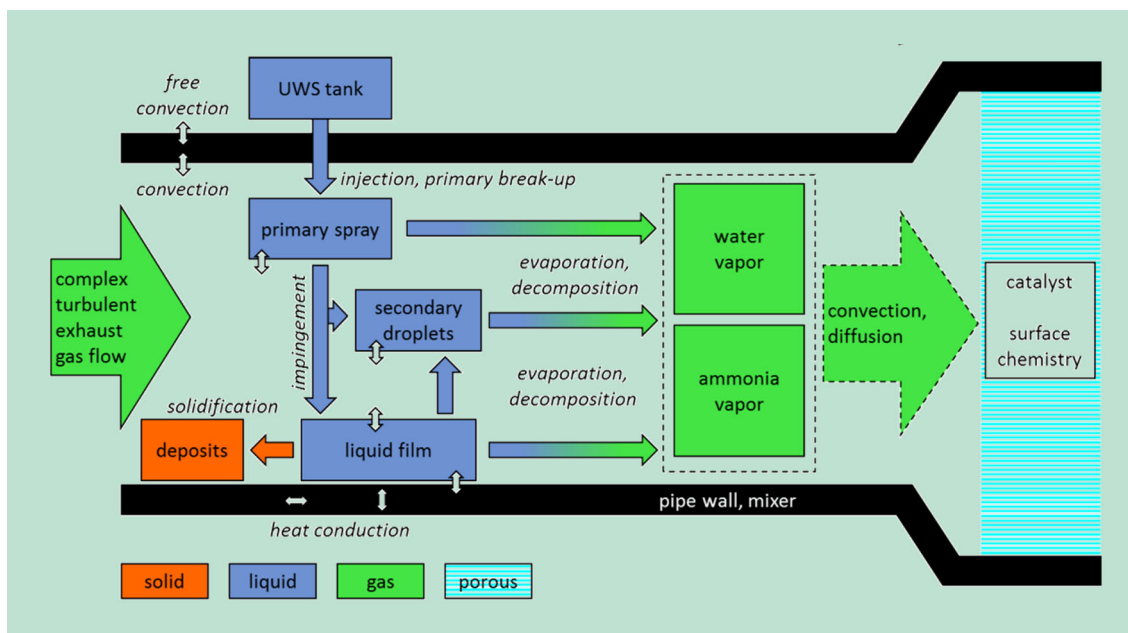
3.1 Metode

Det følgende afsnit beskriver simuleringsmetoden anvendt til evaluering af effektivitet i forhold til reduktion af NOx-emissioner og forbrug af AdBlue (reduktant).

3.1.1 Beskrivelse af anvendelse i udviklingen af SCR-systemer

Computational Fluid Dynamics (CFD), er en numerisk metode til at analysere fluiddynamik. I industrien anvendes typisk kommercielle værktøjer hvor en software leverandør sikrer at matematiske modeller er verificeret. Til analyse af mixere og modellering af indsprøjtning af AdBlue bruges softwarepakken AVL FIRE, der leveres af AVL AST. AVL FIRE er udviklet til brug i automobilindustrien, særligt med henblik på at simulere forholdene i forbrændingskamre, men bruges også i vidt omfang til at simulere andre vitale dele af køretøjet, deriblandt også efterbehandlingssystemet. FIGUR 13 søger at illustrere de forskellige mekanismer der er i spil i analysen af AdBlue mixere. Ikke alle mekanismer er modelleret i alle tilfælde, metoden som brugt i dette arbejde tager således ikke hensyn til den primære forstøvning af væske, faseskiftet ureaen gennemgår til faststof og overfladekemi på katalysatoren.

Fravalget af modellering af primær forstøvning skyldes at en sådan model kræver en detaljeret beskrivelse af dysens interne geometri, da dyserne typisk indkøbes, er detaljeret 3D modeller ikke altid tilgængelige. Ydermere af detaljeret modellering af primær forstøvning ekstremt tidskrævende og ikke praktisk i en model af et komplet efterbehandlingssystem (ATS).



FIGUR 13. SCR-mixere i en CFD-kontekst.

Ref.: Fischer, S. (2014). *Simulation SCR Systems Using STAR-CCM+: Workshop "CFD Simulation for Improving After Treatment Devices"*, Nuremberg: CD-Adapco.

3.1.2 Procedure

I **FIGUR 14** ses et flow chart der beskriver arbejdsgangen når en simulering sættes op, løses og resultaterne behandles, selvom proceduren er lavet med AVL Fire in mente, så er arbejdsgangen med få undtagelser den samme for de fleste CFD værktøjer.

Som det fremgår af flow chart, så starter man med at definere de input der er nødvendige for den specifikke analyse. Der er typisk tale om lastpunktet – altså flow rate og temperatur, beskrivelse af katalysator (med henblik på at få skabt et repræsentativt modtryk over alle komponenter), evalueringskriterierne er vigtige for at sikre at man logger det rigtige (og ikke for meget) data og i SCR-applikationer er grænsebetingelserne for indsprøjtningen af UWS ligeledes vigtig. Det største stykke arbejde ligger dog typisk i at forberede geometrien. Udgangspunktet for geometrien er typisk en 3D CAD-fil, hvor geometrien beskriver de fysiske komponenter der skal fremstilles (i den her applikation, ståldele), i simuleringen har skal man bruge den volumen hvor fluiden opholder sig – rummet inde i udstødningssystemet. Med fluidvolumen defineret indeles volumen i små elementer forbundet i deres hjørner, de små elementer kaldes typisk et mesh eller grid, størrelsen af de individuelle elementer er sådan at de relevante detaljer i geometrien beskrives tilstrækkeligt.

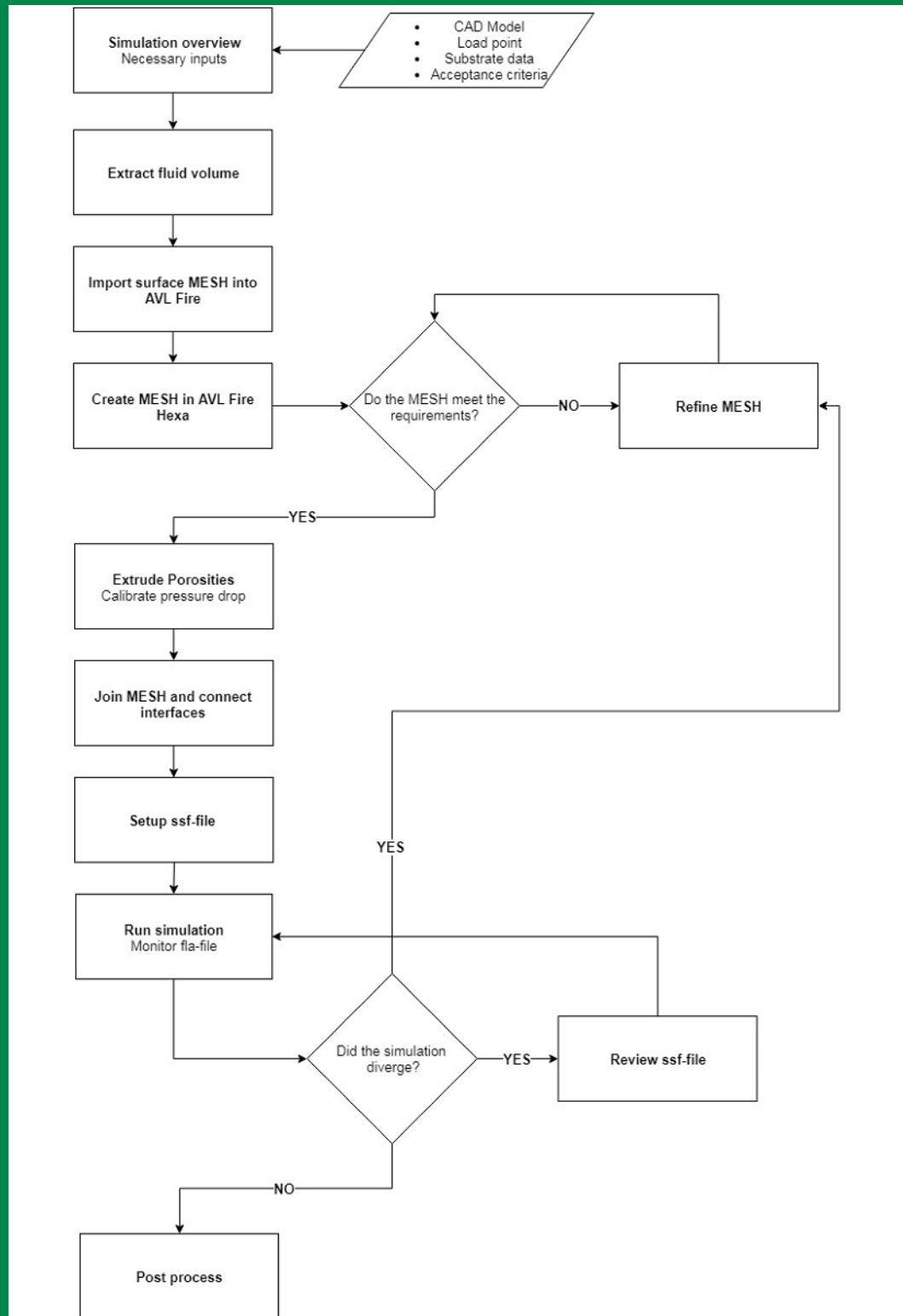
Katalysatorerne består i realiteten af keramiske bærerstrukturer med en masse tynde kanaler i, det er upraktisk at definere de enkelte kanaler derfor behandles en katalysator (eller filter) typisk som en "porøsitet", et element hvor flowet er retningsbestemt og bliver pålagt en restriktion således at flowhastigheden svarer til den forventede gashastighed i kanalerne og det resulterende tryktab over katalysatoren ligeledes repræsenterer virkeligheden. De restriktioner flowet bliver pålagt i porøsiteterne stiller særlige krav til kvaliteten af mesh'et, derfor laves de individuelt.

Dernæst bliver opsætningen lavet, simuleringsoptionsfilen i AVL Fire kaldes en *Solver Steering File*, SSF. I Dinex eksisterer en template som er skræddersyet et specifikt problem hvor generelle parametre er defineret efter Best practice, men de specifikke inputs skal naturligvis tilpasses problemet man ønsker at analysere.

Mens simuleringen kører, holder man typisk øje med simuleringsloggen (.fla-filen) her afsløres det om simuleringen når en løsning (konvergerer) samt mellemresultater på specifikke parametre.

Løses simuleringen tilfredsstillende kan resultater analyseres og rapporteres, med særlig fokus på de evalueringskriterier der blev defineret ved arbejdsgangens start.

Simuleringssprocedure i flow chart for AVL Fire



FIGUR 14. Simuleringssprocedure i flow chart for AVL Fire

Note: Fra intern metodebeskrivelse

3.1.3 Modeller og inputparametre

For at håndtere indsprøjtningen af UWS, fordampning og dekomposition af UWS, samt væginteraktion mellem UWS og stålvæg kræves en række særlige matematiske modeller.

Spray

Spray simuleringer involver multifase flows fænomener, derfor er det nødvendigt at løse ligevægtsligningerne for gas- og væskefase samtidigt, det håndteres af spraymodulet.

For mange analyser med industriel applikation bruges en metode til at beskrive indsprøjtningen med en statistisk model kaldet Discrete Droplet Method (DDM). Modellen løser ligningerne for momentum, retning, varme- og masse-overførsel for individuelle dråber, de individuelle dråber er del af en gruppe af dråber, kaldet en *parcel*, der består af mange dråber alle med de samme egenskaber.

Parcels introduceres i flowet med følgende startbetingelser defineret ved; position, størrelse, hastighed, temperatur og antal dråber i en parcel. Modellen tager højde for fuldstændig 2-vejs kobling mellem væske- og gasfase.

Spray modellen håndterer også løsrevne dråber fra vægfilms-modellen herunder.

Vægfilm

En del af den indsprøjtede væske kan deponeres som en tynd film (defineret som mindre end 500 µm på de overflader hvor væsken rammer. Modellen er defineret ved en række antagelser:

- Gas- og vægfilmsfaser er separate faser forbundet ved filmens overflade, koblingen mellem de to faser er baseret på semi-empiriske sammenhænge
- Filmtykkelsen er meget lille i forhold til middeldiameter af gas flow
- Filmoverfladen er parallel med væggen den løber på
- Filmens overflade er ikke simuleret, men en bølgende overflade opnås ved at påtvinge filmen en ruhed
- Antagelserne herover leder til at modellen er en 2D finite volume metode
- Vægtemperaturen skal være under Leidenfrost-punktet

Man må altså acceptere at vægfilms modellen kun er nyttig ved tynde væskefilm. Et alternativ til vægfilmsmodellen er en fuldstændig kobling mellem de 2 faser hvor mængden af væske i hvert element beregnes, det er en langt mindre effektiv metode i forhold til beregningstid, og har nogle andre udfordringer – fx at bestemme hvor i cellen væsken opholder sig.

Transport af kemiske komponenter

For at kunne evaluere koncentrationen af ammoniak rummeligt i domænet er det nødvendigt med en model der kan holde styr på alle gaskomponenterne. I AVL Fire findes en database med egenskaber for en lang række kemiske komponenter. Databasen tillader at beregne følgende egenskaber:

- Mol vægt
- Specifik varme, -entropi og -entalpi
- Termisk konduktivitet
- Viskositet
- Diffusions koefficient

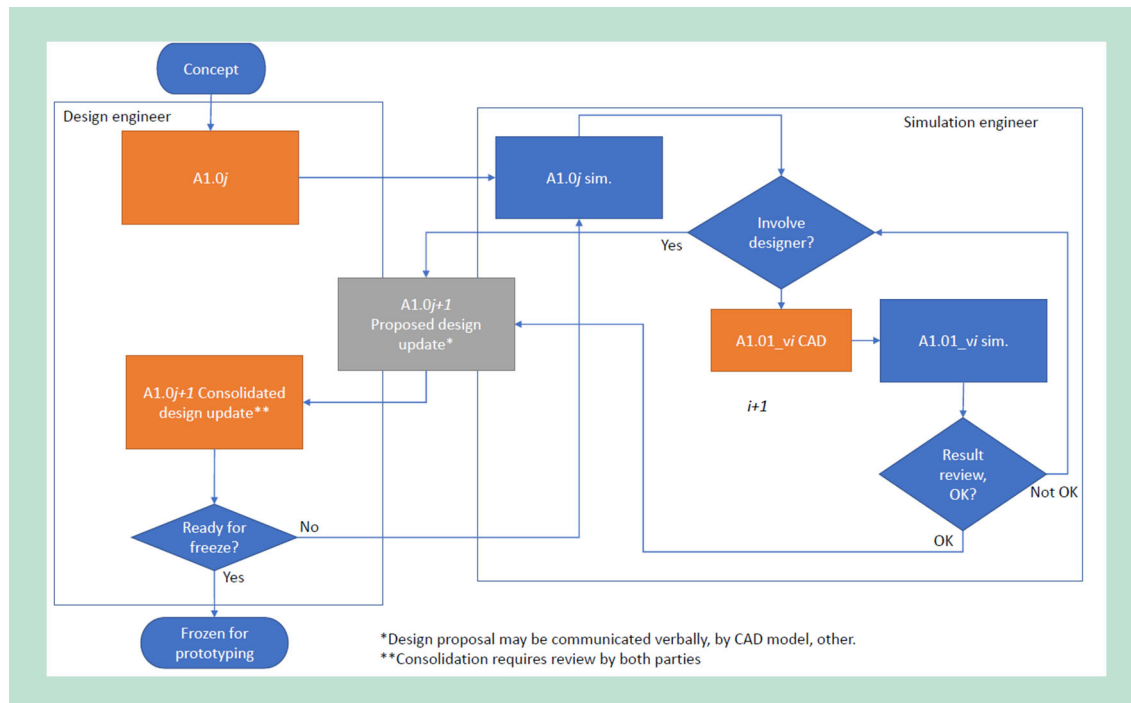
Varmeoverførsel i vægge

I AVL Fire modelleres stålvæggene ikke, for at få et korrekt billede af nedkølingen og genopvarmningen af væggene pga. interaktion med spray og vægfilm er det derfor nødvendigt med en model der kan håndtere det. I AVL Fire gøres det ved at virtuel ekstrudere væggene så et antal lag opnås med de for materialet gældende egenskaber. Antagelsen er derfor at vægtykkelsen skal være lille i forhold til den krumning væggen måtte have. I de virtuelle vægge kan varmen (eller kulden) så udbrede sig både lateralt og normalt.

Varmeoverførsel gennem vægge opnås ligeledes ved at beregnes varmebalancen på bagsiden, så en del kommer fra den gas elementet er i direkte kontakt med, mens en anden del beregnes gennem de virtuelle lag til "bagsiden".

3.2 Designudviklingssløjfe

Designudviklingen er som tidligere beskrevet stærkt simuleringsdrevet. I forbindelse med det her projekt arbejdede man på et antal overordnede og underordnede koncepter. På FIGUR 15 er sløjfen illustreret. I forbindelse med det her projekt blev 5 overordnede koncepter evalueret med AVL Fire, mens der før det første designfrys blev foretaget ca. 30 simuleringer og 15 designopdateringer.



FIGUR 15. Designudviklingssløjfe med områdeansvar fordelt på design- og simuleringsingeniør

3.3 Simulering af endeligt design

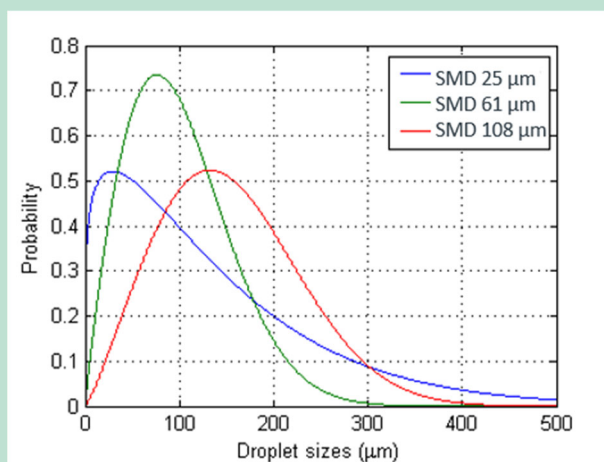
Det endelige koncept og design er blevet simuleret under forskellige lastpunkter, i forskellige størrelser samt med forskellige dyser.

3.3.1 Systembeskrivelse og geometri

De simulerede konfigurationer kan illustreres som i FIGUR 16. Det er forsøgt at dække så meget som muligt med et reduceret antal simuleringer. Øverste række angiver de forskellige dyser der er blevet simuleret, de er repræsenteret ved deres respektive Sauter Mean Diameter (SMD). SMD er et udtryk for kvaliteten af atomiseringen, størrelsen er særligt brugt i sprays hvor man ønsker at maksimere fordampning, størrelsen er et forsimplet forhold mellem overflade areal og volumen, jo lavere tal, des mindre dråber og hurtigere fordampning. De forholdsmæssige dråbestørrelsesfordelinger er illustreret på FIGUR 17. Fordelingerne er beregnet med udgangspunkt i en Rosin-Rammler fordeling. Størrelserne på de simulerede mixere er angivet ved den substratdiameter de er designet til. Det ses at størst fokus er på 9,5"-løsningen.

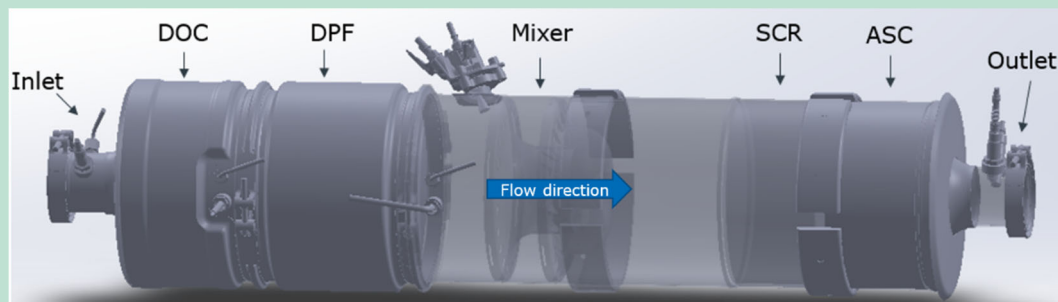
	SMD=25 μ m	SMD=61 μ m	SMD=108 μ m
Ø7,5"		Simuleret	
Ø9,5"	Simuleret	Simuleret	Simuleret
Ø12"		Simuleret	

FIGUR 16. Simulerede konfigurationer



FIGUR 17. Dråbestørrelsesfordelinger for de 3 dyser

Geometrien (CAD-model) er vist på FIGUR 18. Her er flowretning angivet ligesom katalysatorpositionerne er indikeret.



FIGUR 18. Systemgeometri med katalysatorpositioner samt flowretning indikeret

Katalysatorerne for basissystemet (9,5" diameter) er listet i TABEL 3.

TABEL 3. Katalysator overblik for 9,5" diameter.

	L, inch	V, liter	Type	Coating
DOC	4	4,65	Ceramic 400/4	Pt:Pd 4:1, 35 g/cft PGM
DPF	7,5	8,71	CHP-SiC 300/10	Pt, 5 g/cft
SCR	5	5,81	Ceramic 400/4	Cu-SCR, 180 g/L
ASC	5	5,81	Ceramic 400/4	Cu-SCR, 180 g/L 1,5" zone with Pt

3.3.2 Grænsebetingelser og lastpunkter

Her følger både grænsebetingelser for det specifikke system og de generelle grænsebetingelser for simulering af udstødningssystemer. TABEL 4 viser gaskompositionen ved simuleringens begyndelse. For NH₃ og HNCO bemærkes det at en forsvindende lille værdi angives for at sikre positionen af de 2 komponenter der introduceres senere i simuleringen. Til disse simuleringer tages ikke højde for gasfasereaktioner. TABEL 5 beskriver kompositionen af AdBlue, også som denne dekomponerer. TABEL 6 beskriver stållegeringens termiske egenskaber. Her bemærkes det at specifik varme i simuleringen skaleres med en faktor 10 for at opnå hurtigere transient respons (nedkøling ved interaktion med væske). Lastpunkterne brugt til både simulering og test på motorprøvestand er givet i TABEL 7.

TABEL 4. Gaskomposition ved simuleringsstart

	NO	NO ₂	NH ₃	H ₂ O	O ₂	CO ₂	HNCO	N ₂
Fraktion	4.7679e-4	1.8277e-4	1e-10	3.0e-2	1.37e-1	7.0e-2	1e-10	0.76234

TABEL 5. AdBlue komposition

	Vand (H ₂ O) – fordamper til vanddamp	Urea (CH ₄ N ₂ O) dekomponerer til HNCO)	Urea (CH ₄ N ₂ O) dekomponerer til NH ₃)
Fraktion	0.675	0.23284	0.09216

TABEL 6. Termiske egenskaber for EN1.4509 (stål)

Densitet [kg/m ³]	Termisk konduktivitet [W/mK]	Specifik varme [J/kgK]
7700	26	460

TABEL 7. Lastpunkter til CFD og test for Ø9,5"-mixer

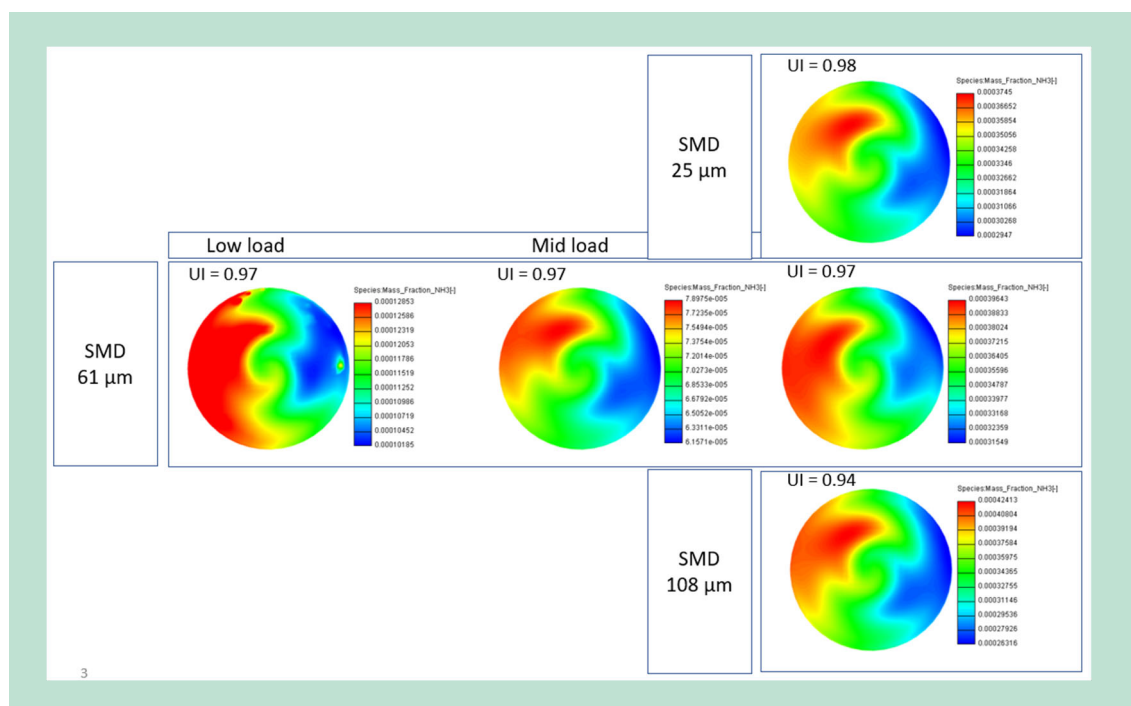
Mode/Operating point	Masse flow rate [kg/h]	Temperatur [°C]	RPM [min ⁻¹]	Last [Nm]
Lav OP	170	300	1080	190
Medium OP	300	300	1450	230
Høj OP	650	520	1899	636

3.3.3 Resultater; modularitet

Dyser og doseringssystemer

Resultaterne for en skalérbar mixer der kan akkommodere flere forskellige dyser, er vist herunder. De viste resultater er NH_3 -fordelingsplots, det er den primære parameter for at vurdere NO_x reduktionspotentiale. Resultatet er desuden belejligt da en metode til at opnå et lignende resultat eksperimentelt eksistere og har været en del af prototypeevalueringen hos Dinex A/S gennem en årrække.

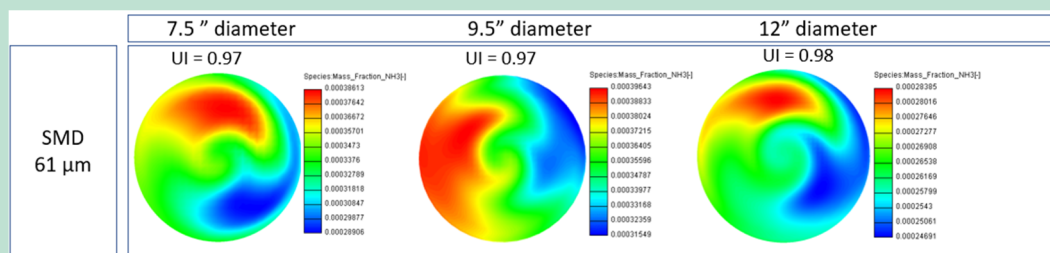
FIGUR 19 viser fordelingsresultater med forskellige dyser, fra venstre mod højre varieres lastpunktet med referencedysen ($61\ \mu\text{m}$), fra top mod bund varieres dysen (ved det høje lastpunkt). Som beskrevet i afsnit 2.2.1 angiver størrelsen UI -ensartetheden af fordelingen af NH_3 på katalysatoren ved en enkelt værdi. Med dysen som eneste ændring mellem de 3 resultater ved høj last, ses det at en højere ensartethed opnås som dråberne bliver mindre, samt at systemet synes robust for variationer i lastpunkt.



FIGUR 19. Resultatmatrice, vist er fordelingsresultater for 9,5" mixer med forskellige doseringssystemer. Referencen er det høje lastpunkt

Mixerdiameter (størrelse)

På samme måde som studiet i *Dyser og doseringssystemer* er også forskellige mixerdiametre simuleret. Mixeren er blevet skaleret fra 9,5" ned til 7,5" og ligeledes fra 9,5" og op til 12" for at dække det segment (spænd af motorstørrelser) Dinex typisk operere i. Resultater for en høj last (lasten er skaleret til at repræsentere den større diameter) er vist i FIGUR 20,



FIGUR 20. Virkningsgrad ved skalering af diameter med reference doseringssystem.

Det ses at virkningsgraden fortsætter med at være robust, også i udformninger med alternative diametre.

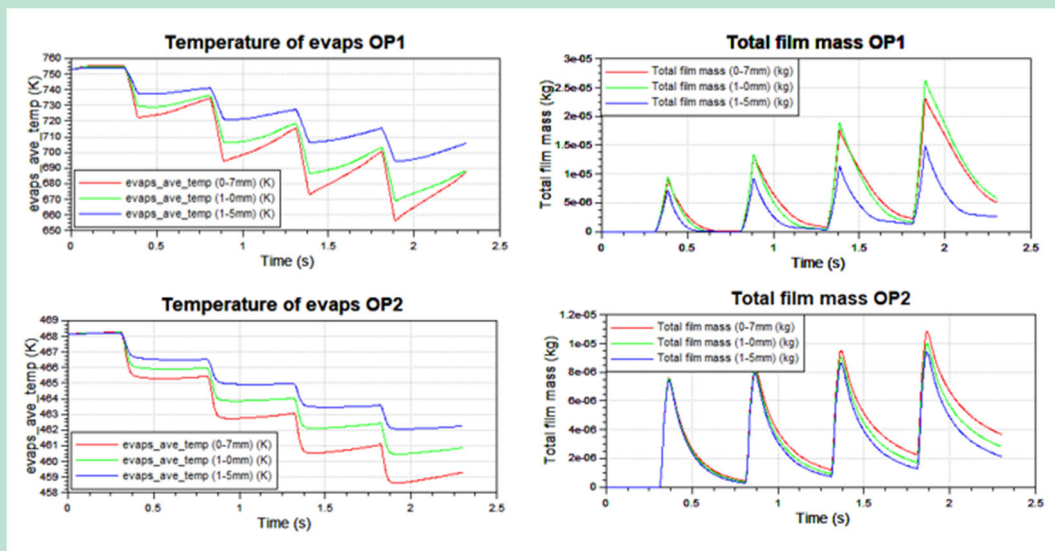
3.3.4 Resultater; variation over materialetykkelse

For den endelige løsning er der simuleret 2 lastpunkter og 3 forskellige materialetykkelser i kombination med 1 dyse. De 2 lastpunkter er beskrevet i TABEL 8, lastpunkterne er baseret på en virkelig applikation.

TABEL 8. Lastpunkter

	OP1_685	OP3_160
Masse flow af udstødningsgas [kg/h]	685	160
Gastemperatur °C	480	160
AdBlue doseringsmængde [g/h]	2074	313
Note	Valgt for at evaluere ydeevne under "worst case"	Valgt for at evaluere depositionsrisiko

For at evaluere indflydelsen af forskellige materialetykkelse er systemet simuleret med alle tykkelsen af alle mixerkomponenter i 3 tykkelser, hhv. 1,5mm, 1,0mm og 0,7mm. Med udgangspunkt i "evaporations blades" – hvor der er kontinuert tilføjelse af væske, observeres udviklingen af ståltemperatur samt mængde af vægfilm (væske samlet som en film på stålets overflade). Resultater vist på FIGUR 21; det ses at temperaturen falder hurtigere når godstykkelsen mindskes, samtidig øges temperaturen også hurtigst som væsken fordamper. Opbygningen af væskefilmen er omvendt proportionel med ståltemperaturen – af det kan afledes at mere ammoniakgas er til stede ved indgangen til katalysatoren (i den simulerede periode). Ingen indflydelse på modtryk, fordeling af ammoniak og fordeling af flow blev observeret.



FIGUR 21. Resultater for "evaporation blades" i forskellige tykkelser. Blå: 1,5mm, grøn: 1,0mm og rød: 0,7mm

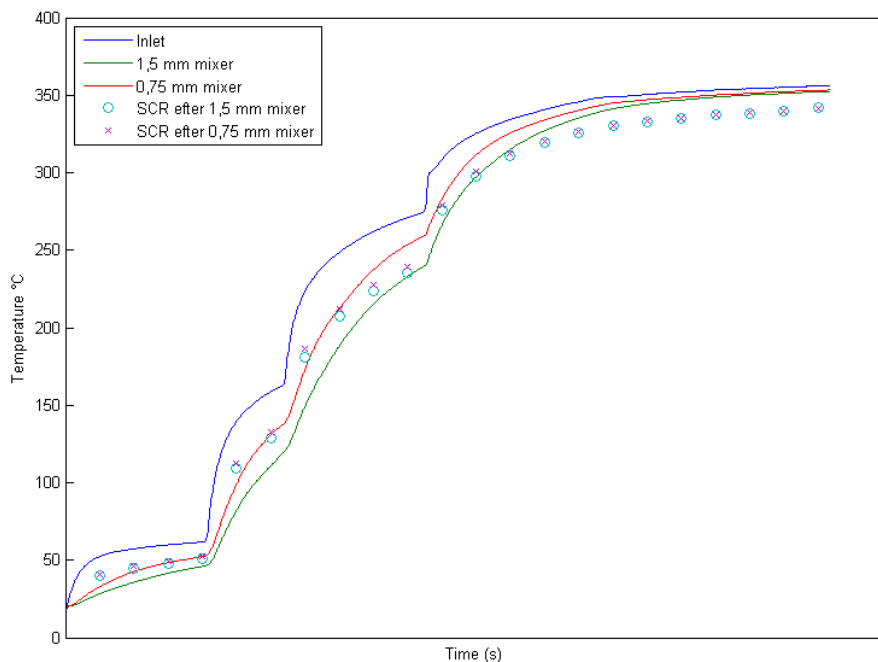
3.3.5 Diskussion

Simuleringerne over forskellig tykkelse af "evaporation blades" når ikke at stabiliseres på temperatur, men det forventes at ståltemperaturer vil stabiliseres omkring samme punkt lastpunkterne imellem, da samme mængde energi og væske er til rådighed. De simulerede punkter er stationære, men responsen indikerer at systemet vil opvarmes hurtigere og derfor hurtigere være i stand til termisk at nedbryde eventuelle deposits. Fordelen af den hurtigere opvarmning er også vist på systemniveau i afsnittet 3.4.

3.4 Evaluering af gevinst ved reduktion af godstykkelse

For at evaluere indflydelsen af reduktionen i termisk masse, er to systemer simuleret, de to systemer er identiske, på nær en forskel i termisk masse. Et system inkluderer en mixer udført i 1,5 mm plade, mens det andet system inkluderer en mixer udført i 0,75 mm plade. Begge systemer er det tidligere beskrevet reference system med DOC, DPF og SCR-katalysatorer (se afsnit 3.3.1).

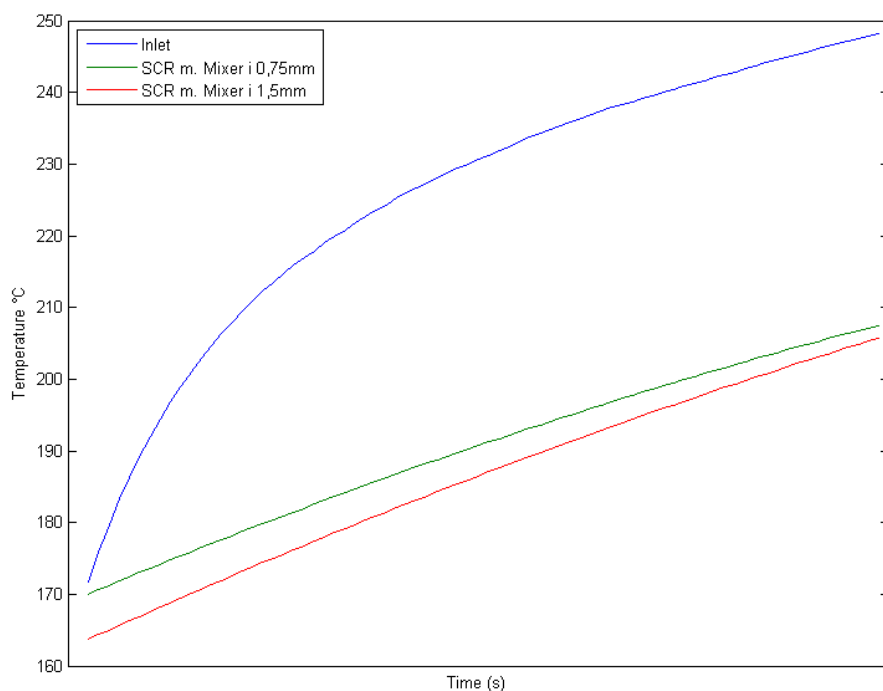
Der er foretaget transiente simuleringer i real time, hvor inlet masse flow og temperatur er taget fra målinger under opvarmning af en motor, målt på motorprøvestand. Opvarmningsrutinen er vist på FIGUR 22. Det ses at der er en væsentlig forskel i hastigheden med hvilken mixeren varmes op, mens indflydelsen på hastigheden med hvilken SCR'en varmes op er mindre udtalt.



FIGUR 22. Gennemsnits temperatur for 1,5 mm og 0,75 mm mixer, samt for SCR-katalysator efter hhv. 1,5 mm mixer og 0,75 mm mixer sammenholdt med indgangstemperaturen (inlet)

For at kvantificere reduktionen i opvarmningstid er der set på hvor lang tid der går fra inlet temperaturen når 180 °C til SCR'en når en gennemsnitstemperatur på ligeledes 180 °C. Der er derfor set på et relativ kort periode af den samlede simulerede periode, se FIGUR 23.

Katalysatoreernes (DOC og SCR) og filtrets termiske masse er naturligvis uændret og er derfor skyld i et offset i respons på inlet temperatur og gennemsnitlig SCR-temperatur. På trods af det, viser simuleringen at en reduktion i opvarmningstid på 37,5 % er opnået på systemniveau, med en mixer udført i 0,75 mm plade i forhold til referencen (udført i 1,5 mm plade). Derudover når selve mixeren en gennemsnitstemperatur på 180 °C ~40 sekunder hurtigere når materialetykkelsen reduceres fra 1,5 mm til 0,75 mm, så udover at forskellen i tidspunktet for start af indsprøjtning af AdBlue nedsættes (doseringsstart antages at være givet ved en SCR temperatur på 180 °C), så forventes det også at AdBlue'en vil omsættes mere effektivt med en tyndere materialetykkelse, fordi overfladerne er relativt varmere når indsprøjtningen starter.



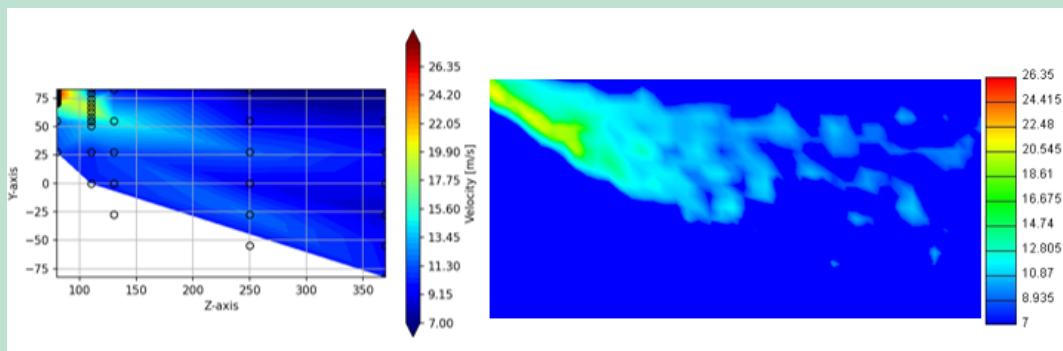
FIGUR 23. Gennemsnitstemperatur af hhv. SCR efter 1,5 mm og 0,75 mm mixer sammenholdt med indgangstemperatur

3.5 Validering mod arbejds pakke 4

Til sammenligning med arbejds pakke 4 er der set på spray-propagation med AdBlue som indsprøjtet medie. Der er søgt at lave direkte sammenligninger mellem CFD og vindtunneltest. Der er i denne sammenligning taget udgangspunkt i AA1 (se også afsnit 5.2.1) og AL1 (afsnit 5.2.3), derved dækkes begge operationsprincipper (air-assisted og air-less). Resultaterne er for et lastpunkt karakteriseret ved; gashastighed: 8 m/s, gastemperatur 400 °C og AdBlue-dosering: 2100 g/h.

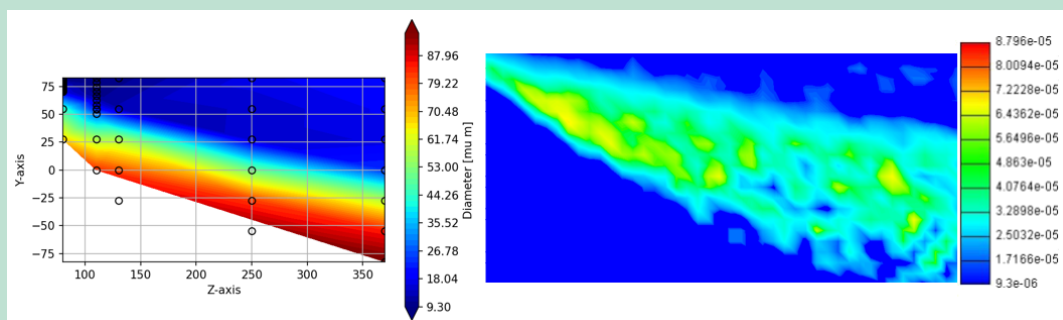
3.5.1 AA1

På FIGUR 24 ses en sammenligning mellem dråbehastigheder for hhv. test og simulering. Den visuelle sammenligning afslører relativt god korrelation, selvom dråbehastigheder i simuleringen tæt på indsprøjtningsspunktet er lidt lavere.



FIGUR 24. AA1 dyse, sammenligning mellem vindtunnel-test og simulering, her ses dråbehastigheder (baseline simulering)

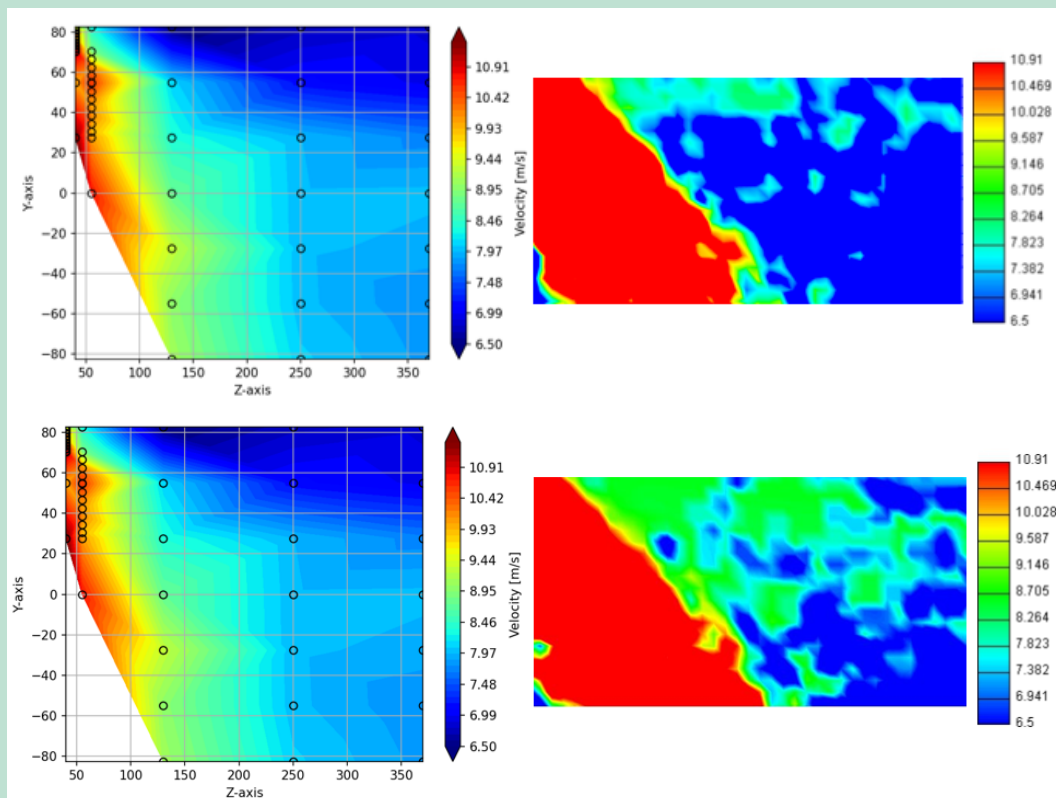
Betragtes dråbestørrelserne på samme måde, er der generelt målt større dråber i vindtunnelen.



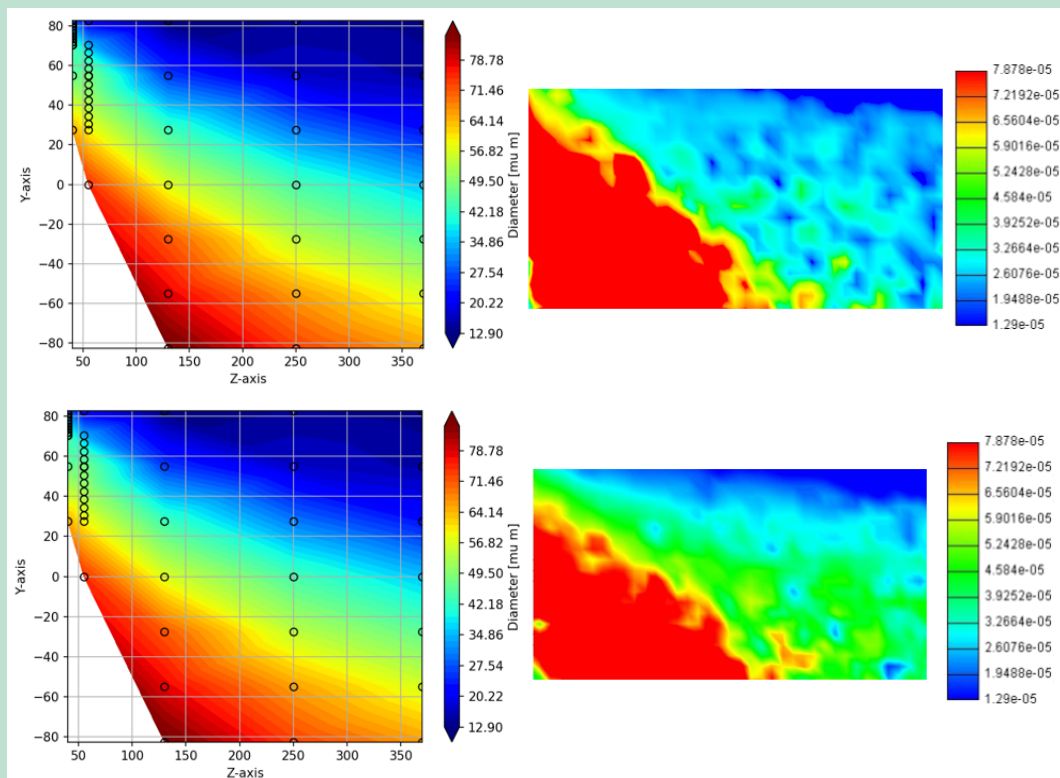
FIGUR 25. AA1 dyse, sammenligning mellem vindtunnel-test og simulering, her ses dråbestørrelser (D10) (baseline simulering)

3.5.2 AL1

På FIGUR 27 øverst ses en direkte sammenligning af D10 dråbestørrelse mellem test (venstre) og simulering (højre). Figuren er fra midten af vindtunnelen. Det ses generelt at simuleringen forudsiger større dråber en testen viser. Det samme billede gør sig generelt gældende når man betragter dråbehastigheder FIGUR 26 øverst. Hvis den målte dråbestørrelse bruges som input opnås resultater som på FIGUR 26 nederst og FIGUR 27 nederst, det ses at ændringen i dråbestørrelsesfordeling flytter sig nærmere testresultatet, en sammenligning mellem dråbestørrelsesfordelingerne kan ses på FIGUR 43.



FIGUR 26. AL1 dyse, sammenligning mellem vindtunnel test og simulering, her ses dråbehaestigheder (baseline simulering)



FIGUR 27. AL1 dyse, sammenligning mellem vindtunnel test og simulering, her ses dråbestørrelser (D10) (baseline simulering)

3.5.3 Diskussion; sammenligning med forsøg

Sammenligningen mellem vindtunnel-test og simulering viser at simuleringen er i stand til at fange de overordnede tendenser, selvom der er forskelle mellem de specifikke dråbestørrelser og -hastigheder. Dråbestørrelses input til AL1 synes ikke at korrelere med test (se også afsnit 5.2.3) derfor blev en simulering foretaget med den målte dråbestørrelsesfordeling. Det gav nogen forbedring af resultatet.

Selvom den detaljerede sammenligning mellem test og simulering for vindtunnelforsøgene ikke viste ideel korrelation, viste test på motorprøvestand og simulering på NH₃-UI god korrelation. Det kan skyldes at mixeren er designet på en måde så dråberne opholder sig relativt kort tid i fri gas før de rammer en overflade, hvorfor afvigelser i størrelse og hastighed træder mindre tydeligt frem.

4. Arbejdspakke 3 – FEA simulering

Formålet med projektet er at reducere den termiske masse af et udstødningssystem med det mål at reducere den tid der går fra motoren startes til systemets har nået sin arbejdstemperatur. Arbejdspakke 3 er fokuseret omkring evalueringen af konsekvenserne af at opnå reduktionen af termisk masse gennem at reducere tykkelsen af forskellige dele i mixerdelen af udstødningssystemet. Ved at anvende Finite Element Analyses (FEA) bestemmes den strukturdynamiske opførsel af, såvel individuelle del som hele systemet, når materialetykkelsen reduceres. Finite Element analyserne er foretaget med et kommercielt simuleringsværktøj. Arbejdspakken behandler også sammenligning mellem simuleringsmodel og eksperimentelle resultater, med det formål at forbedre nøjagtigheden for fremtidige simuleringer.

4.1 Metode

Metodebeskrivelsen dækker den metode Dinex har fastlagt til at foretage en strukturdynamisk analyse af et arbitrært udstødningssystem gennem brug kommercielle værktøjer.

4.1.1 Principper bag - og beskrivelse af værktøjet

Finite-element-metoden (FEM, også kendt under forkortelsen FEA (Finite Element Analysis)) er en numerisk metode til at opnå approksimerede løsninger til grænseværdiproblemer. Grænseværdiproblemer beskriver et felt eller et domæne man ønsker at beskrive. I denne applikation er feltet en fysisk konstruktion, som altså er defineret ved grænseværdier og et sæt differentialligninger.

Den primære karakteristik for et strukturelt "finite element" er stivhedsmatricen. Stivhedsmatricen beskriver de geometriske og materialerelaterede egenskaber der afgør elementets deformation når denne udsættes for en last.

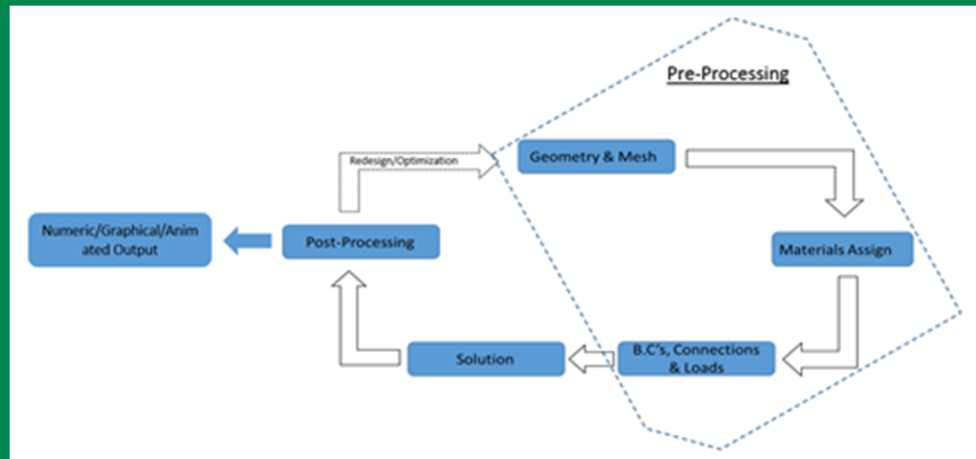
Den strukturdynamiske integritet evalueres på baggrund af komponentens- eller systemets egenfrekvens.

I industrien, ligeledes hos Dinex, anvendes oftest kommercielle værktøjer, det sikre at de matematiske modeller er verificeret. Den primære software er ANSYS Workbench, senere opdateres modellerne med FEMtools resultater (som opnås i Arbejdspakke 5). CAD-modellen præpareres i SpaceClaim, hvor det sikres ANSYS tolker geometrien efter hensigten.

4.1.2 Procedure

FIGUR 28 viser simuleringsproceduren som et flow chart. Denne generelle procedure er fulgt for alle komponenter. Finite Element analyser starter med en 3D model, 3D modellen diskretiseres så i små dele som tilsammen udgør hvad der kendes som et "mesh" eller "grid". Hvert element i mesh'et er defineret ved 20 punkter som tillader andenordens forskydning. Materialeegenskaberne for de individuelle elementer defineres dernæst, egenskaberne inkluderer; densitet, elasticitets modul og Poisson's ratio. Afslutningsvis defineres grænsebetingelser og simuleringen kan køres. Resultaterne evalueres i en korrelations analyse og en følsomhedsanalyse efterfulgt af en opdatering til modellen.

Simuleringsprocedure



<u>INPUT til simulering</u>	<u>OUTPUT fra simuleringer</u>
• CAD Model (dimensioner, tegninger) • Materiale egenskaber ○ Elasticitetsmodul ○ Densitet ○ Flydespænding • Mesh • Masse egenskaber og lokation (vægt) • Laster og grænsebetingelser	• Mode shapes • Frekvens

FIGUR 28. Simuleringsprocedure for FEA I flow chart (øverst) Input og output beskrivelse (nederst)
Note: Fra intern metodebeskrivelse

4.1.3 Baggrund for evaluering af resultater

Igennem modalanalyse bestemmes den struktur-dynamiske opførsel for en konstruktion og er udgangspunktet for mere komplekse dynamiske analyser. For at undgå resonans og reducere støj, er det nødvendigt at kende systemets egenfrekvenser. Når en excitationsfrekvens rammer en egenfrekvens vil det have en dramatisk indflydelse på strukturen, den indflydelse benævnes mode shape. Det er et udtryk for relative forskydning af elementer eller noder i et mekanisk system. Et mekanisk system i dette tilfælde er individuelle komponenter og er som sådan et kontinuert system med uendeligt mange frihedsgrader og modes. Det er umuligt at måle og simulere, derfor forsimples strukturen til et afgrænset antal noder, punkter - som beskriver strukturen. Det er ikke et problem så længe diskretionen, beskriver systemet tilstrækkeligt, det er ikke nødvendigt at kende alle modes, fordi mange af dem forekommer ved meget høje frekvenser, udenfor det område systemet typisk exciteres.

4.2 Simulering af endeligt design

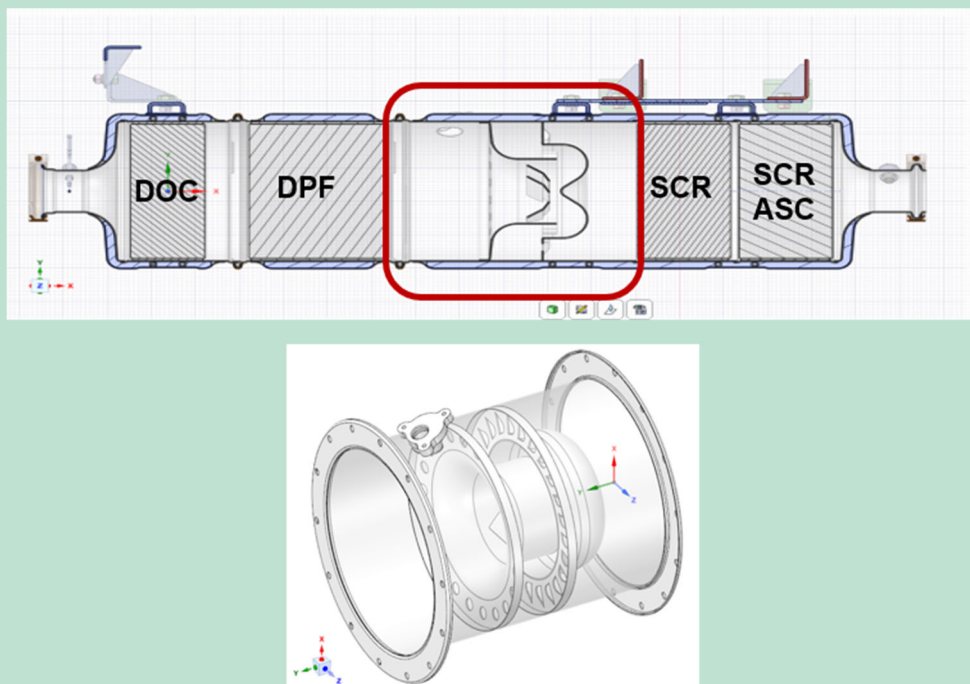
Det endelige koncept og design er blevet simuleret med variation i tykkelse, og en følsomhedsanalyse er gennemført, i hvilken et parameterstudie på variation af elasticitetsmodul indgår.

4.2.1 Systembeskrivelse og geometri

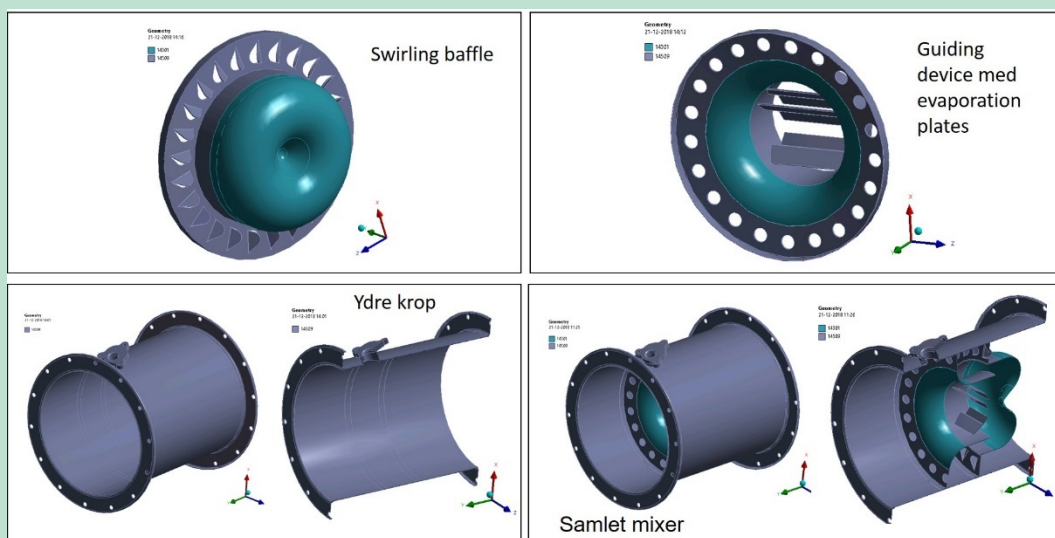
Det endelige design eller referencesystemet er tilpasset 9,5" substrater, de ydre dimensioner af mixeren er en smule større. Den indre diameter på mixeren er 249,3 mm. Det fulde system er vist i FIGUR 29. De individuelle dele af mixer CAD modellen er vist i FIGUR 30 – til udførelsen af mixeren er brugt to materialetyper; EN1.4509 og EN1.4301, legeringernes egenskaber er vist i TABEL 9.

TABEL 9. Materialer brugt til mixer

Materiale	Densitet (kg/m ³)	Flydespænding (MPa)	Poisson's Ratio
Rustfast stål (EN1.4509)	7700	1,85E+05	0,29
Rustfast stål (EN1.4301)	7800	1,70E+05	0,29



FIGUR 29. Øverst; et komplet system, med kompakt mixer inkluderet, nederst; kompakt mixer detalje

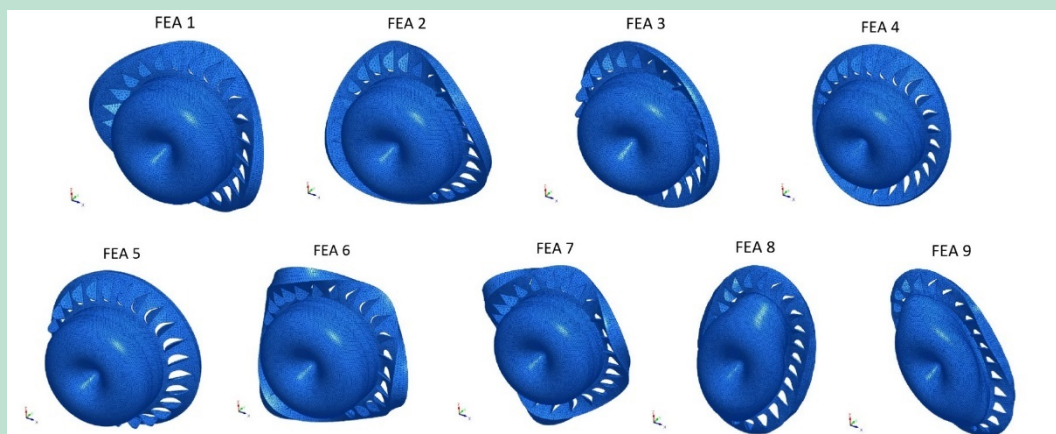


FIGUR 30. Flow guiding device med evaporation plates, swirling baffle og ydre krop. Samt samlet mixer

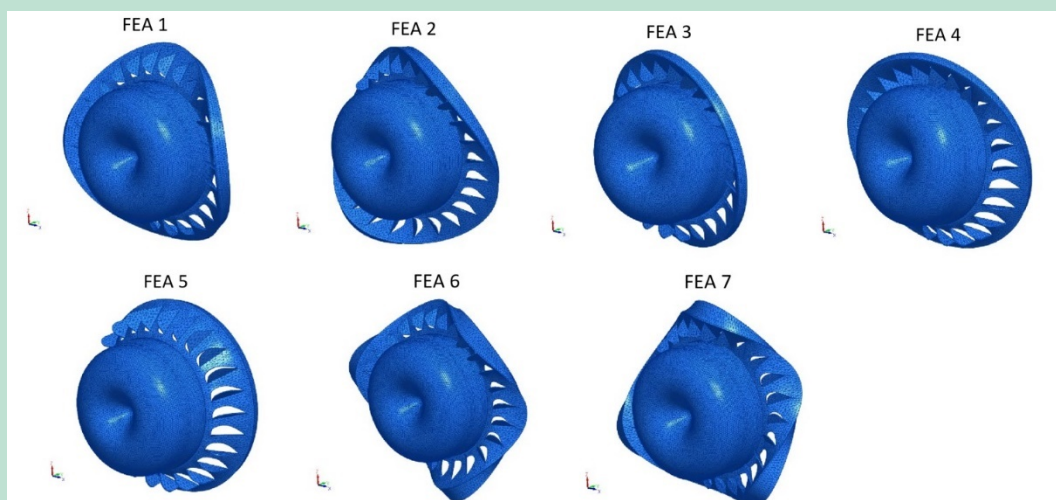
4.2.2 Resultater

Modalanalysen er foretaget for at studere de individuelle resonanser og der mode shape. Formålet er at være i stand til at eliminere resonanser i excitationområdet for de 3 del-komponenter og det samlede system, som vist i FIGUR 30.

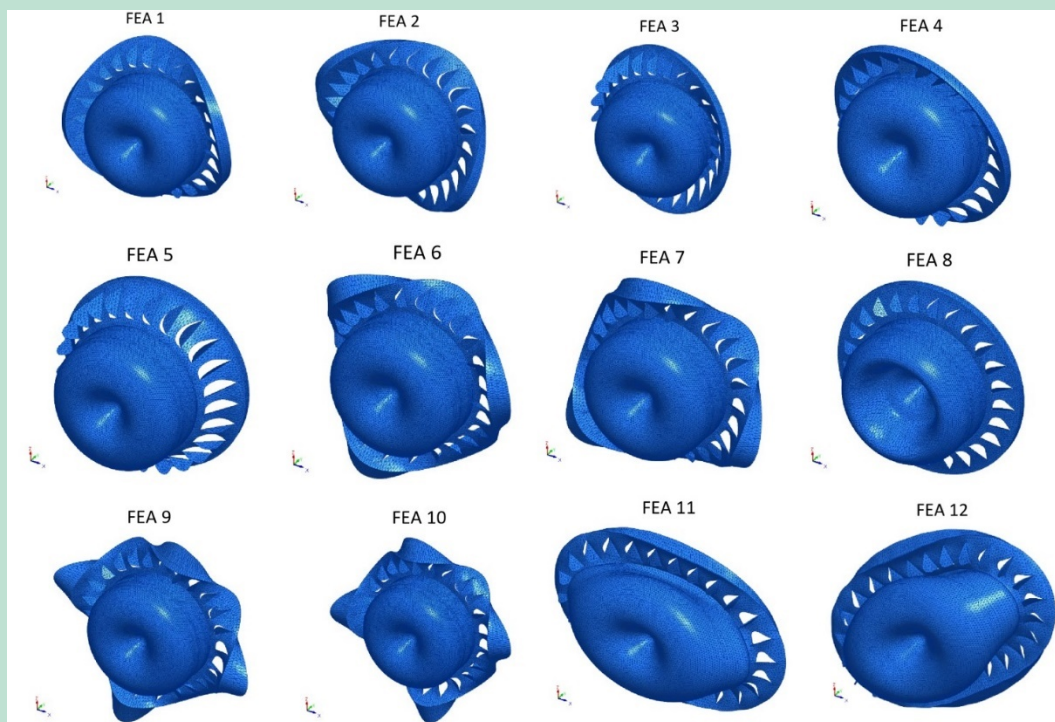
Mode shapes for Swirling baffle udført i 1,5 mm plade er vist på FIGUR 31, mens 1,0 mm og 0,7 mm tykke Swirling baffles er vist på hhv. FIGUR 32 og FIGUR 33. De tilhørende frekvenser kan aflæses i TABEL 10.



FIGUR 31. Mode shapes for Swirling baffle i 1,5 mm



FIGUR 32. Mode shapes for Swirling baffle i 1,0 mm

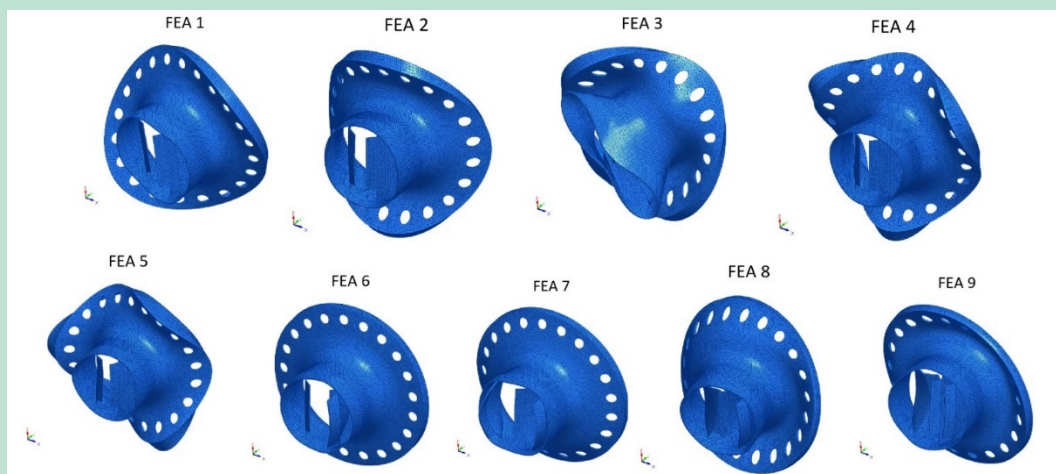


FIGUR 33. Mode shapes for Swirling baffle i 0,7 mm

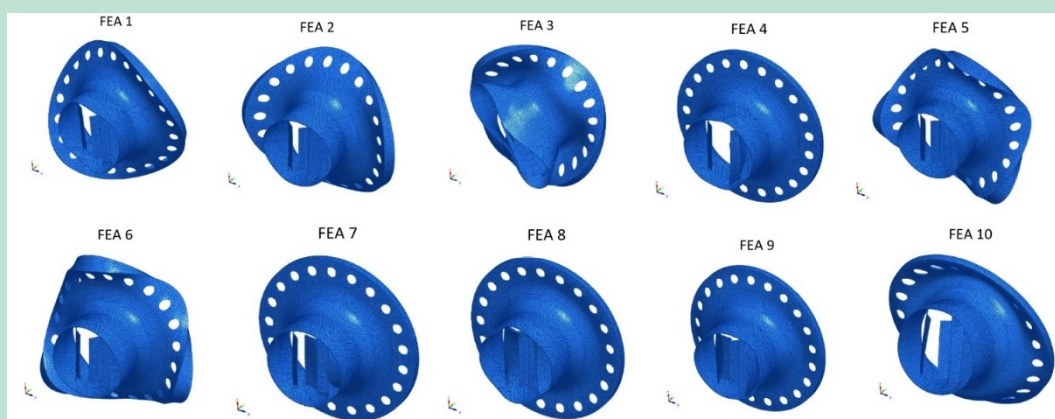
TABEL 10. Frekvenser for Swirling baffle (tilhørende viste mode shapes)

Mode shape #	Frekvens (Hz) 1,5 mm	Frekvens (Hz) 1,0 mm	Frekvens (Hz) 0,7 mm
1	486	301	220
2	492	301	221
3	708	513	382
4	710	513	
5	734	553	413
6	799	645	499
7	802	645	499
8	1440		1061
9	1442		1073
10			1073
11			1275
12			1276

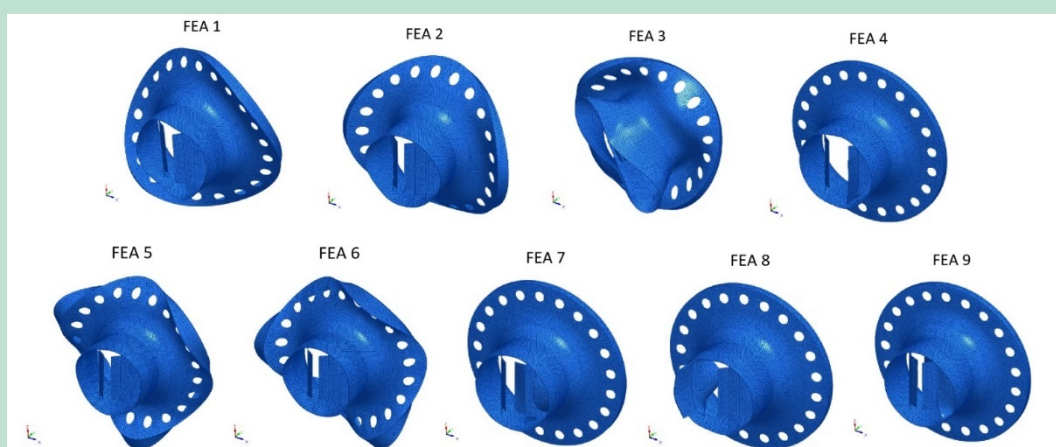
Mode shapes for Flow guiding device med evaporation plates, ligeledes udført i 3 forskellige tykkelse; 1,5 mm (FIGUR 34), 1,0 mm (FIGUR 35) og 0,7 mm (FIGUR 36). De tilhørende frekvenser kan ses i TABEL 11



FIGUR 34. Mode shapes for Flow guiding device med evaporation plates i 1,5 mm



FIGUR 35. Mode shapes for Flow guiding device med evaporation plates i 1,0 mm

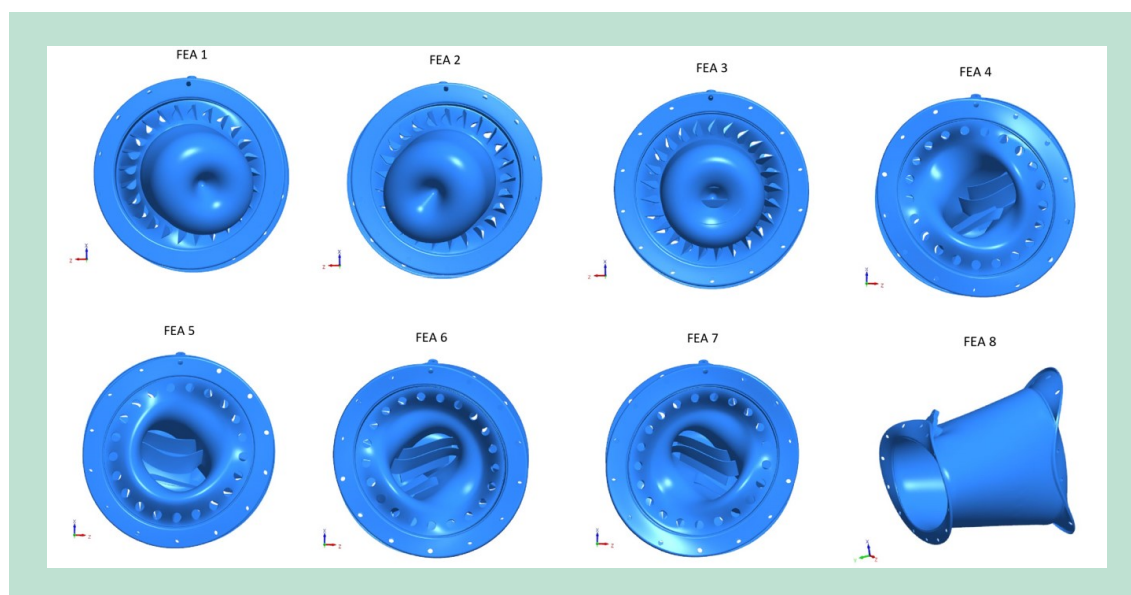


FIGUR 36. Mode shapes for Flow guiding device med evaporation plates i 0,7 mm

TABEL 11. Frekvenser for Flow guiding device med evaporation plates (tilhørende viste mode shapes)

Mode shape #	Frekvens (Hz) 1,5 mm	Frekvens (Hz) 1,0 mm	Frekvens (Hz) 0,7 mm
1	319	223	168
2	405	266	200
3	616	439	331
4	764		469
5	772	639	497
6	821	640	498
7	1029		524
8	1041	829	658
9	1048	842	662
10		867	
11			
12			

Afslutningsvis er vist den samlede mixer, udført som referencesystem i 1,5 mm (og tilhørende frekvenser).



FIGUR 37. Mode shapes for den samlede mixer udført i 1,5 mm

TABEL 12. Frekvenser for den samlede mixer (tilhørende viste mode shapes)

Mode shape #	Frekvens (Hz)
1	434
2	435
3	437
4	616
5	619
6	623
7	642
8	756

4.2.3 Diskussion

Eigenfrekvenserne afhænger også af modelleringsmetoden og i nogle tilfælde vil modes skifte og optræde i en anden rækkefølge.

Når materialetykkelsen mindskes, falder eigenfrekvensen for en given geometri, men den relative mode shape ændres ikke.

Swirling baffle FE modellen er ret symmetrisk og det ses at de resulterende mode shapes ligeledes er meget symmetriske, med de tilhørende eigenfrekvenser som kommer parvis.

I valideringen viste FE modellen generelt højere eigenfrekvenser end teststrukturen, dog primært i størrelsesordenen 5 % med enkelte op til 10 %. Eigenfrekvensen for Swirling baffle, Flow guiding device med evaporation plates samt ydre kroppen øges drastisk når komponenter samles den "Samlede mixer". Der var generelt en god korrelation mellem mode shapes for FE modellerne og teststrukturen. Korrelationen kunne muligvis øges ved at øge antallet af målepunkter i teststrukturen.

Mode shapes for de symmetriske dele er relativt nemme at finde i test, men det er mere kompliceret for asymmetriske komponenter hvor rotationen af komponenten ikke er arbitrær. For den kombinerede struktur med både symmetriske og asymmetriske komponenter har det vist sig vanskeligt at identificere og parre de korresponderende modes for simulering relativ test.

4.2.4 Sammenligning med EMA

En grundig sammenligning mellem FEA og EMA fremgår af kapitel 6.

5. Arbejdspakke 4 – Validering af CFD spray simuleringer

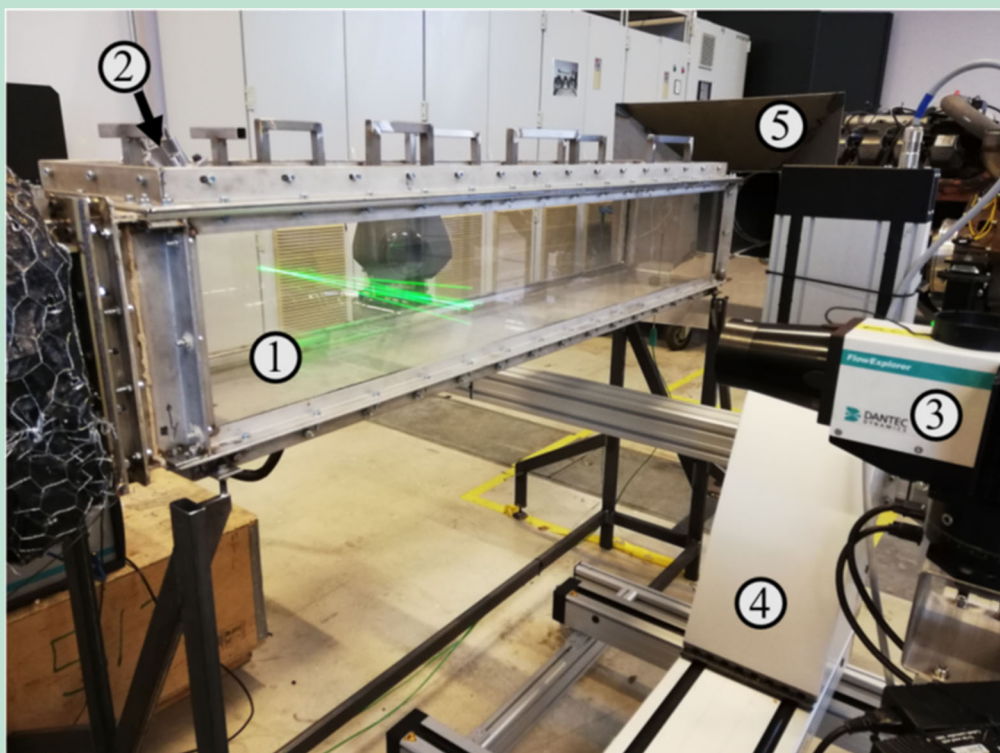
Formålet med denne arbejdspakke er at opbygge et eksperimentelt grundlag for valideringen af CFD-simuleringerne beskrevet i arbejdspakke 2 (kapitel 3). Denne arbejdspakke indeholder derfor både beskrivelser af opbygning og idriftsættelse af eksperimentelt udstyr, opsamling af data og udførsel af relevante eksperimenter, samt dokumentation og postprocessering af udvalgte data. Leverancerne fra denne arbejdspakke indeholder karakterisering af spray fra en række udvalgte dyser, samt karakterisering af sprayens interaktion med gasstrøm og pladeelementer.

Til at udføre denne opgave har det været nødvendigt at designe og opbygge en laboratorieopstilling, hvor analysering af karakteristiske parametre kunne udføres under realistiske driftsforhold. Opstillingen består af en højtemperatur vindtunnel med optisk adgang for laserbaseret måleudstyr. Beskrivelsen af design og udvikling af vindtunnelen findes i arbejdspakke 1, afsnit 2.2.

5.1 Laboratorieopstilling

Den eksperimentelle opstilling består hovedsageligt af 3 dele, selve vindtunnelen, Phase Doppler Anemometer (PDA) til analysering af dråber samt en dataopsamlingsenhed til logning af relevante parametre fra testsektionen, såsom gastemperaturer og -hastigheder.

FIGUR 38. In situ billede af testsektionen og måleudstyret. (1) Testsektion, (2) Dyse, (3) PDA Sender, (4) Traverseringssystem, (5) Udsugningskanal. viser testsektion og måleudstyr.



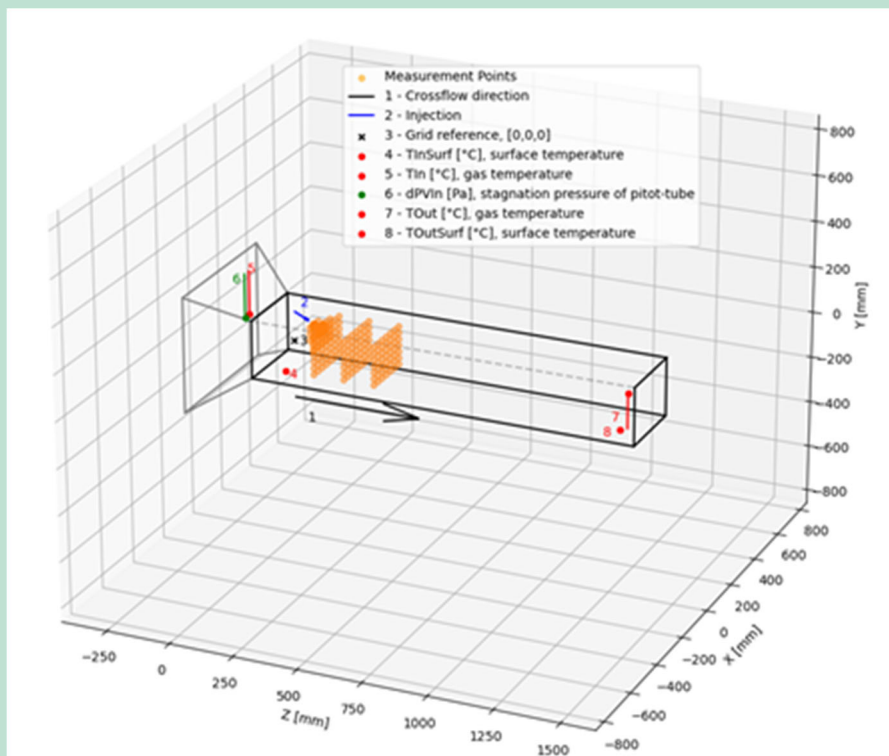
FIGUR 38. In situ billede af testsektionen og måleudstyret. (1) Testsektion, (2) Dyse, (3) PDA Sender, (4) Traverseringssystem, (5) Udsugningskanal.

5.1.1 PDA-måleudstyr

PDA-måleudstyret er af typen DANTEC SprayExplorer (Dantec Dynamics A/S, 2020), og er konfigureret til at kunne måle dråbestørrelser og -hastigheder i to dimensioner i vilkårlige punkter i en gasstrøm. Målingerne foretages i et krydsningsfelt mellem 2 laserstråler og udføres for hver enkelt dråbe der passerer igennem målevolumenet. Udstyret er monteret på et traverseringssystem fra DANTEC som tillader at den optiske måleprobe kan placeres præcist og gentageligt hvor det ønskes i testsektionen.

5.1.2 Instrumentering af laboratorieopstilling

Udover målingerne fra PDA-måleudstyret opsamles der data fra en række temperatur- og tryk-målepunkter fordelt udover testsektionen. Ved indløbet måles gas- og overflade-temperatur på bundpladen samt hastigheden af gassen. Ved udløbet måles ligeledes gas- og overfladetemperaturen på bundpladen. FIGUR 39. Instrumentering af testsektion samt position af PDA-målepunkter. viser målepunkternes placering i testsektionen samt et repræsentativt grid af PDA-målepunkter.



FIGUR 39. Instrumentering af testsektion samt position af PDA-målepunkter.

Det absolutte nulpunkt for koordinatsystemet som målepunkterne er lagt ud efter, er placeret i forhold til dysens lokation i vindtunnelen. På FIGUR 39. Instrumentering af testsektion samt position af PDA-målepunkter. er dysen markeret med en blå pil, og referencepunktet med et sort kryds. Referencepunktet ligger på dysens vertikale centerlinje, og i center af testsektionen med hensyn til x- og y-retningen.

Hastigheds- og temperaturmålinger opsamles via et ALMEMO 2890-9 system med relevante forstærkere fra Ahlborn. Temperaturmålinger foretages med type-k termoelementer med Almemo forstærkere af typen ZA9020FS og hastighedsmålinger foretages med et pitot-rør vha. differenstrøkmålere af typen Almemo FDA602S1K.

Ved forsøg med mixerpladeelementer i testsektionen opsamles temperaturen på pladeelementet ligeledes med Almemo systemet.

5.1.3 Idriftsættelse af vindtunnel

Idriftsættelsen af vindtunnelen omfattede opstilling og instrumentering, indkøring af reguleringsystemet til varmekanalen samt dokumentation af flowkvaliteten i selve testsektionen. De følgende punkter beskriver de vigtigste dele af disse processer.

Indkøring af varmekanal

Hovedformålet med indkøringen af varmekanalen var at opstille en velfungerende reguleringsalgoritme samt at indstille de relevante parametre så der kunne opnås en tilfredsstillende stabilitet af temperaturen i testsektionen under det eksperimentelle arbejde. I denne proces blev fokus lagt på at opnå et system der leverede stabile temperaturforhold, hvorimod det ansås for mindre vigtigt at indsvingningstiden af systemet blev reduceret.

Vind tunnelen er designet efter to spidsbelastninger:

1. Gas massestrøm 0,328 kg/s (1180 kg/time), ækvivalent gas hastighed 10 m/s, temperatur 400°C.

2. Gas massestrøm 0,933 kg/s (3357 kg/time), ækvivalent gas hastighed 20 m/s, temperatur 200°C.

Hvoraf første spidsbelastning dækker hoveddelen af det planlagte eksperimentelle arbejde. Indkøringen blev begrænset til at dække denne del af arbejdsområdet, da processen var vanskelig grundet systemets natur med store tidskonstanter for både varmekanal og flowkonditioneringsenhed.

Reguleringsalgoritmen blev tilpasset ad flere omgange for at sikre den nødvendige temperaturstabilitet, samtidig med at varmelegemerne i varmekanalen blev beskyttet.

Den endelige algoritme fungerer efter PID princippet og varmelegemerne styres både i forhold til antal tændte legemer og ved pulsebreddemodulering. Hvis alle varmelegemer ikke er tændt, skiftes der med lav frekvens mellem alle varmelegemer. Dette gøres for at sikre en ensartet temperaturfordeling i tværsnittet af test-sektionen.

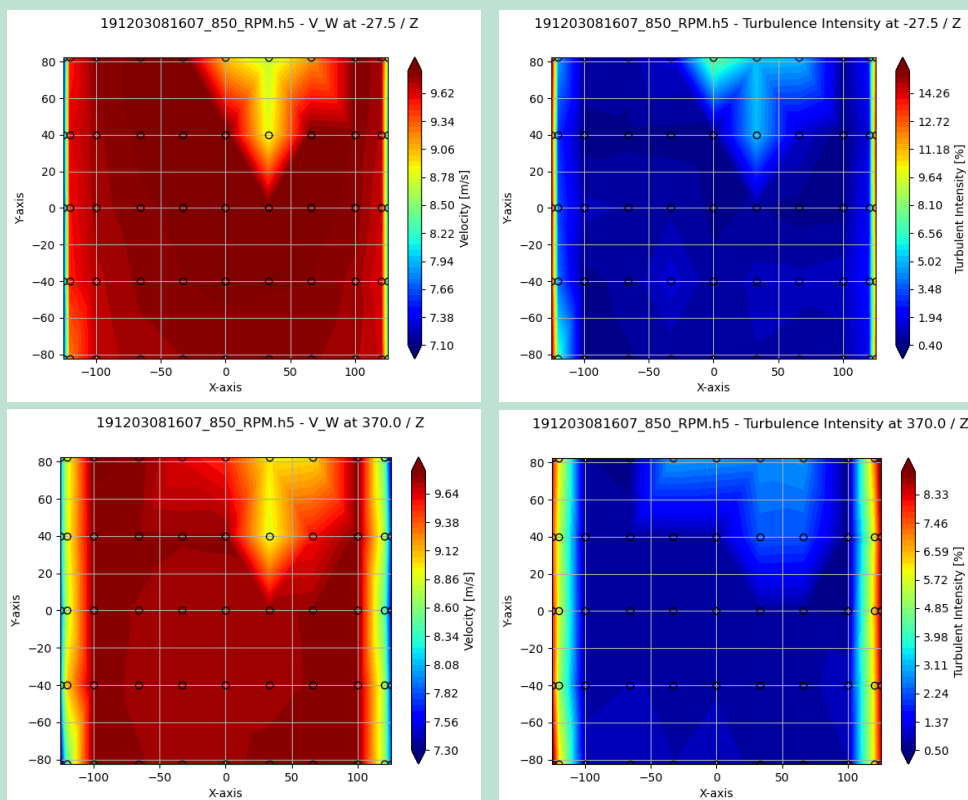
Ydermere blev der implementeret en række sikkerhedsforanstaltninger så varmelegemerne ikke ødelægges ved høj belastning eller u hensigtsmæssig brug.

Dokumentation af flowkvaliteten i testsektionen

Flowkvaliteten blev undersøgt ved analysing af hastighedsfordelingen og turbulens intensiteter på tværs af test sektionen. PDA målesystemet detekterer partikler i en gasstrøm og i forbindelse med luftflows analyserne tilføres tågepartikler til vindtunnelen før testsektionen. Tågen blev generet med udstyr af mærket SAFEX Fog Generator NS4 og væsken der blev anvendt, var af mærket SAFEX Blitz. SAFEX Fog Generator NS4 kombineret med SAFEX Blitz leverer partikler med en diameter mellem $\varnothing 1 - \varnothing 2.5 \mu\text{m}$, med et gennemsnit på $1.8 \mu\text{m}$. Med udgangspunkt i gennemsnitsværdien har denne partikkelstørrelse maksimalt en sliphastighed på 1% til og med hastighedsfluktuationer på 2000 Hz. Det vil sige at tågepartiklerne opnår samme hastighed som gasflowet.

Hastighed- og partikkelstørrelserne blev målt i 3 planer, første plan var placeret cirka 400 mm fra testsektionens start. Placering af planerne ses i FIGUR 39. Instrumentering af testsektion samt position af PDA-målepunkter..

FIGUR 40. Hastigheds- og turbulens intensitets fordelinger fra $z = -27,5$ og $z = 370$. viser gennemsnitshastigheder og turbulens intensiteter for tværsnit i vindtunnelen ved henholdsvis $z = -27.5 \text{ mm}$ og $z = 370 \text{ mm}$ ved en massestrøm der svarer til en hastighed i testsektionen på 10 m/s. Grænselaget ses ved $|x| > 100 \text{ mm}$.



FIGUR 40. Hastigheds- og turbulens intensitets fordelinger fra $z = -27,5$ og $z = 370$.

TABEL 13. Statistiske parametre for kvantificering af flowets kvalitet. viser gennemsnits hastigheder og turbulens intensiteter samt de respektive standardafvigelser. Den gennemsnitlige turbulens intensitet er for alle hastigheder under 1,5 % i hovedflowet. Turbulensintensiteter opdeles ofte i 3 kategorier (lav, middel og høj), hvor en middel turbulens intensitet typisk ligger mellem 1 og 5 %

TABEL 13. Statistiske parametre for kvantificering af flowets kvalitet.

Test hastighed [m/s]	Hastighed, gennemsnit [m/s]	Hastighed, standardafvigelse	Turbulens Intensitet, gennemsnit [%]	Turbulens Intensitet, standardafvigelse
3	2.94	0.1	1.46	1.24
6	5.79	0.18	1.39	1.19
10	9.68	0.28	1.22	1.17
20	18.81	1.91	1.1	1.28

5.2 Spray karakterisering

Karakteriseringen af sprayet fra de 3 anvendte dysesystemer er foregået ved at måle dråbestørrelse- og hastighedsfordelinger i et grid af målepunkter omsluttende den ønskede spray. Sprayen fra de forskellige systemer påvirkes og styres af forskellige parametre, derfor blev der i forbindelse med karakteriseringen foretaget parametre studier. De typiske variationer i disse studier indeholdt sætpunktsændringer i væskestrømmen samt spraymodulerende parametre som trykket af den assisterende luft og/eller doseringsfrekvens.

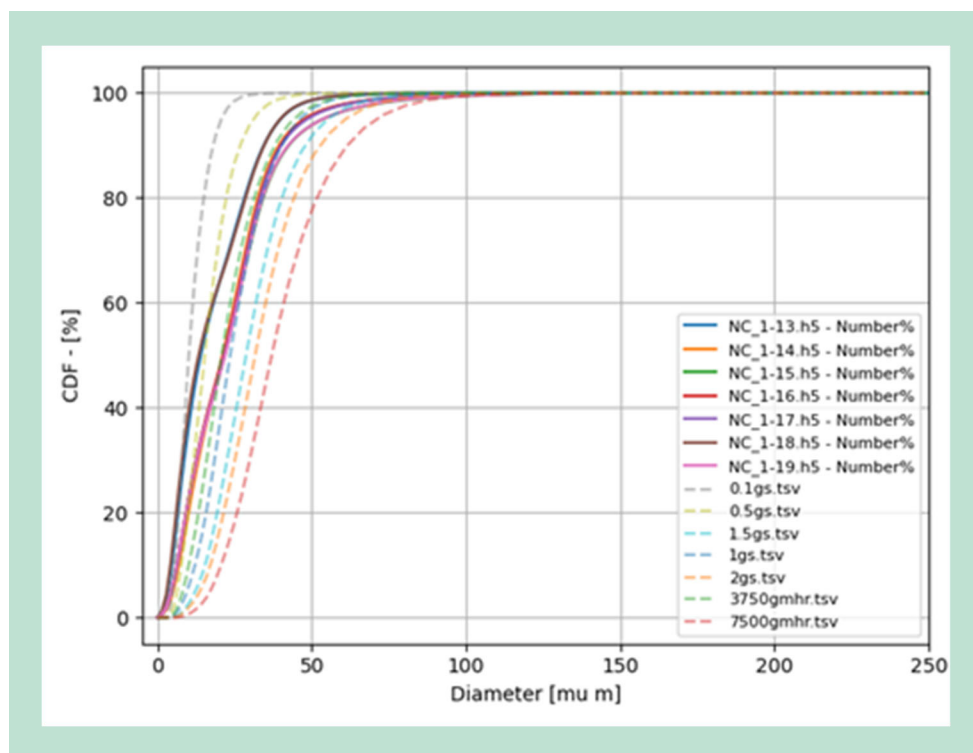
Fra disse datasæt er der ved hjælp af en række processeringsrutiner udtrukket relevante parametre, heriblandt kumulative distribueringsfunktioner og repræsentative dråbestørrelse- og hastighedsfordelinger.

Disse data er blevet analyseret og sammenlignet med data tilgængeligt fra dysefabrikanterne og fungerer samtidig som inputs i forbindelse med relevante simuleringer og beregninger.

5.2.1 AA1

AA1-systemet er et luftassisteret system hvor væsken tilføres via en dedikeret boring og forstøvningen udføres ved en assisterende luftstrøm via en sekundær boring som omslutter væskestrømmen. De relevante parametre i dette system er derfor hovedsageligt massestrømmen og det assisterende lufttryk.

FIGUR 41 viser en sammenligning af kumulative distribueringsfunktioner af dråbestørrelsesfordelingen på tværs af varierende væskestrømme og assisterende lufttryk, samt en sammenligning med fabrikantens data. Dysevinkel på 90° (lodret) og forstøvning af vand ved 20°C.



FIGUR 41. Sammenligning af kumulative distribuering (CDF), antals baseret, ved varierende væskestrømme og assisterende lufttryk. Eksperimentelt data er markeret med fuldt optrukne linjer og fabrikant-data med stiplede. NC_1-13 & -18 er foretaget ved en væskestrøm på 0,278 kg/s (1000 g/time), NC_1-14, -16 & -17 ved 1,111 kg/s (4000 g/time) og NC_1-15 og -19 ved 1,944 kg/s (7000 g/time).

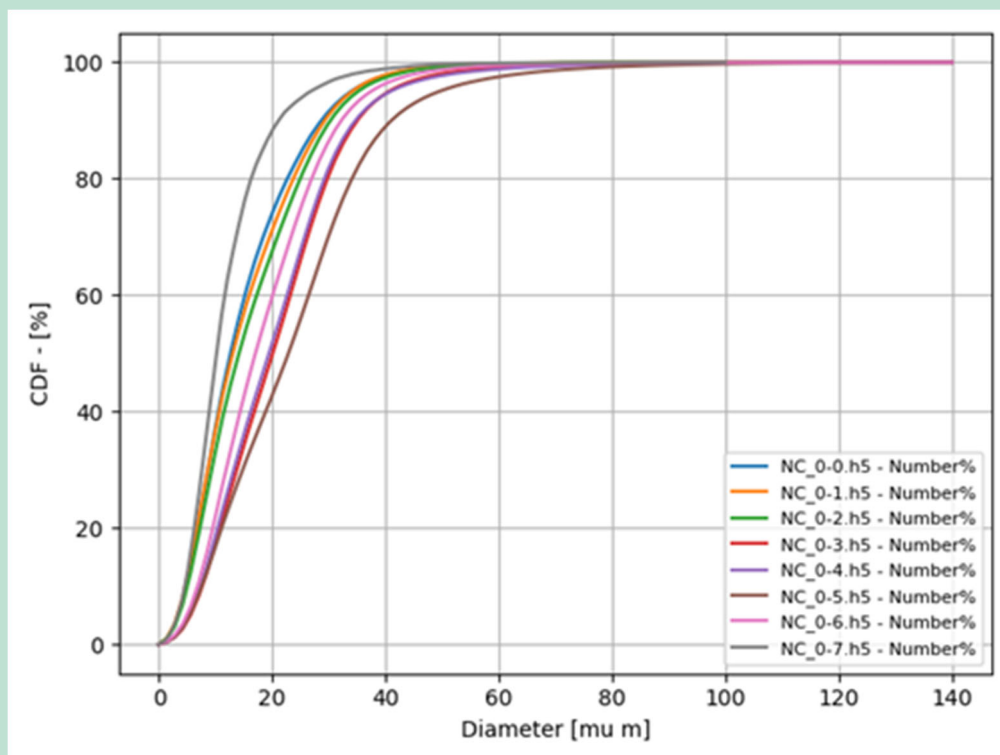
Der ses en ensartet tendens imellem ændringerne i data ved øgede væskestrømme, dog ses en mindre påvirkning i sprayen ved de eksperimentelle data.

Det assisterende lufttryk har en lille effekt på den producerede spray, hvilket stemmer overens med systemets funktionsmåde, hvor trykket reguleres mekanisk af selve doseringsenheden.

5.2.2 AA2

AA2-systemet fungerer efter samme princip som AA1-systemet, hvor assisterende luft driver den primære atomisering af sprayet. De relevante parametre i dette system er derfor hovedsageligt massestrømmen og det assisterende lufttryk.

FIGUR 42 viser en sammenligning af kumulative distribueringsfunktioner af dråbestørrelsesfordelingen på tværs af varierende væskestrømme og assisterende lufttryk. Dysevinkel på 90° (lodret) og forstøvning af vand ved 20°C.



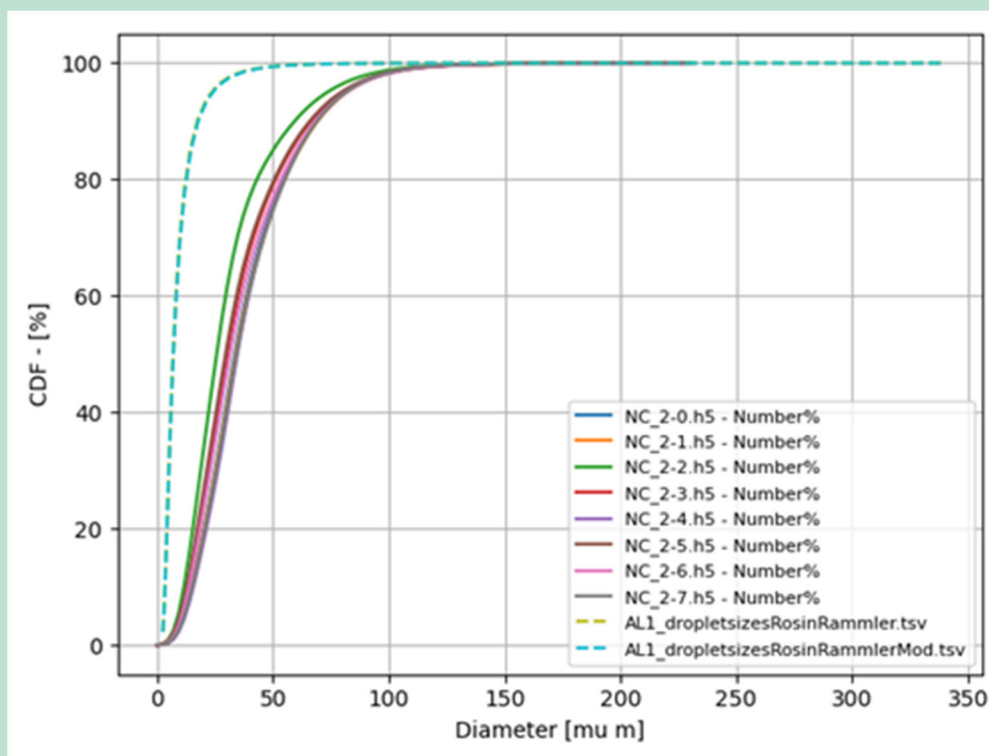
FIGUR 42. Sammenligning af kumulative distribuering (CDF), antals baseret, ved varierende væskestrømme og assisterende lufttryk. NC_0-5 & -6 er foretaget med en væskestrøm på 1,111 kg/s (4000 g/time) ved henholdsvis 0.5 bar og 1.5 bar assisterende lufttryk. De resterende tests er foretaget ved 1 bar assisterende lufttryk med væskestrømme mellem 0,014 kg/s (50 g/time) og 1,9444 kg/s (7000 g/time).

Det ses tydeligt her at det assisterende lufttryk påvirker atomiseringsprocessen, og en større mængde af væsken indeholdes i større dråber ved lavere lufttryk. Udover denne effekt ses en forholdsvis ensartet ydeevne på tværs af forskellige væskestrømme. Det ses dog at der sker en finere forstøvning ved meget lave væskestrømme, 0,014 kg/s (NC_0-7.h5).

5.2.3 AL1

AL1-systemet fungerer som en konventionel hydraulisk dyse, hvor den doserede mængde reguleres ved at variere frekvensen af dysens arbejdscyklus. Arbejdsfrekvensen variere, ved normalt brug, oftest mellem 1 og 5 Hz. Udover variationer i væskemængden, er det andet relevante parametre for dette system derfor arbejdsfrekvensen. Systemet arbejder med et konstant væsketryk på 9 bar.

FIGUR 43. Sammenligning af kumulative distribuering (CDF), antals baseret, ved varierende væskestrømme og arbejdsfrekvenser. Eksperimentelt data er markeret med fuldt optrukne linjer og fabrikant data med stiplede. NC_2-0, -1 & -7 er foretaget ved en væskestrøm på 1,111 kg/s (4000 g/time). De resterende tests er variationer af væskestrømme og arbejdsfrekvenser, mellem 0,056 kg/s (200 g/time) og 1,944 kg/s (7000 g/time) samt 1 og 4 Hz. viser en sammenligning af kumulative distribueringsfunktioner af dråbestørrelsesfordelingen på tværs af varierende væskestrømme og arbejdsfrekvenser. Dysevinkel på 90° (lodret) og forstøvning af vand ved 20°C.



FIGUR 43. Sammenligning af kumulative distribuering (CDF), antals baseret, ved varierende væskestrømme og arbejdsfrekvenser. Eksperimentelt data er markeret med fuldt optrukne I linjer og fabrikant data med stiplede. NC_2-0, -1 & -7 er foretaget ved en væskestrøm på 1,111 kg/s (4000 g/time). De resterende tests er variationer af væskestrømme og arbejdsfrekvenser, mellem 0,056 kg/s (200 g/time) og 1,944 kg/s (7000 g/time) samt 1 og 4 Hz.

AL1-systemet leverer meget ensartede sprays på tværs af variationer i væskestrøm og arbejdsfrekvens. Igen ses der en forbedret forstøvningsproces ved lave væskestrømme, 0,056 kg/s (NC_2-2.h5).

5.3 Spray karakterisering i vindtunnel

Hovedformålet med målingerne i vindtunnelen var at karakterisere og dokumentere spray og dråbetransporten samt interaktionen med gasstrømmen. Dette blev gjort ved at måle dråbestørrelse- og hastighedsfordelinger i en række positioner vha. PDA-udstyret.

Til formålet blev der til hver dysetype (AA1, AA2, AL1) udviklet specifikke grids, som beskrev de ønskede målepositioner. Disse bestod overordnet set af 2 regioner, én region relativt tæt på dysens munding som havde til funktion at kortlægge den første del af sprayet, samt én region med måleplaner fordelt langs testsektionens z-akse. Hvert måleplan var udført med et grid lagt ud efter identiske mål. Første region anvendes til at bedømme dysens position i testsektionen og derved om det er nødvendigt at korrigere de opsamlede data for eventuelle fejl i montageprocessen.

Med udgangspunkt i ovenstående procedure blev to måleserier planlagt. Første serie havde til formål at undersøge spray fra AA1-dysen med forskellige parametervariationer samt sammenligne en ren vandopløsning med en urea-vand opløsning (UWS), 32.5 %. Anden serie var møntet på at skabe valideringsgrundlaget for simuleringerne og omhandlede derfor præcist beskrevne sætpunkter med relevans for beregningerne til alle tre doseringssystemer.

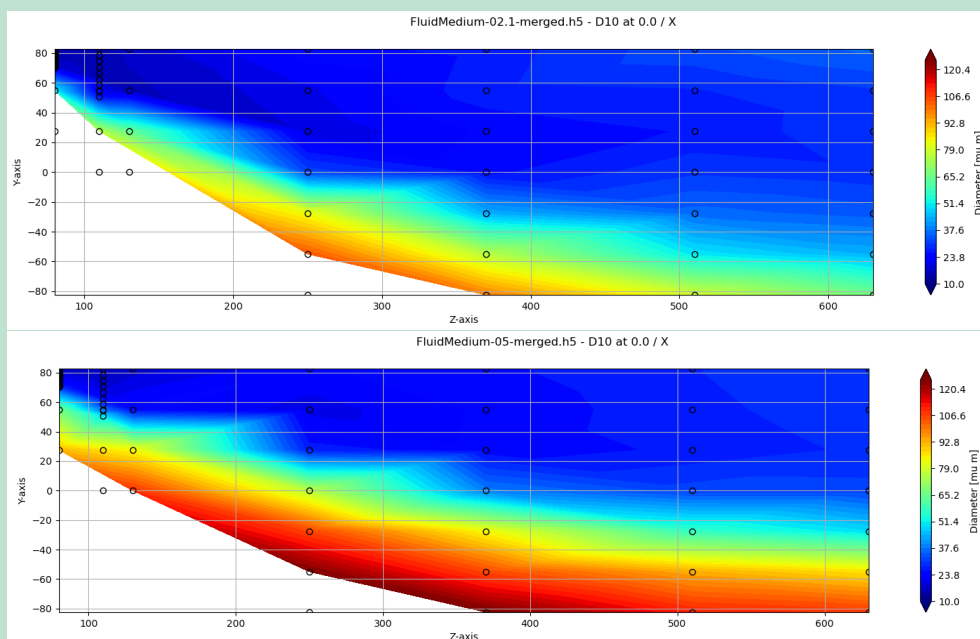
5.3.1 Parameter variationer

Adskillige parametre med mulig indvirkning på selve sprayen og dens dynamik blev afprøvet i løbet af de to måleserier. De vigtigste parametre samt deres indvirkning vil blive præsenteret i det følgende afsnit.

Gas temperatur

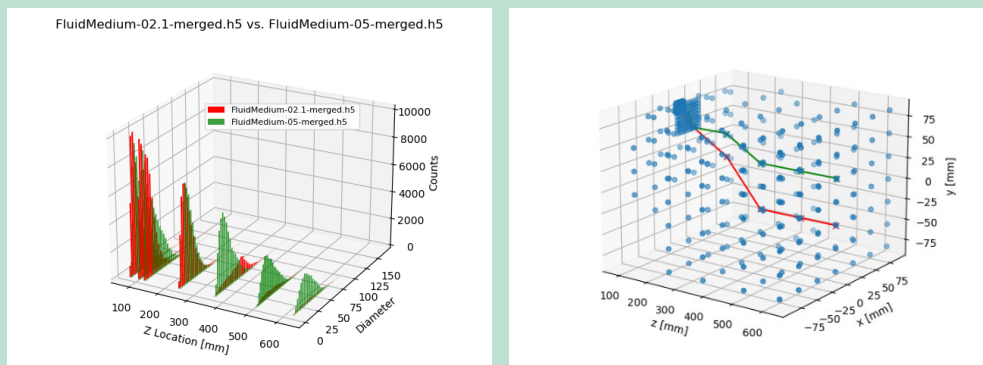
Variationer af gas temperaturen blev hovedsageligt udført med AA1-doseringsystemet. De følgende figurer visualiserer effekten af at øge gastemperaturen 200 °C, fra 200 °C til 400 °C. Testen blev udført ved en gashastighed på 7 m/s og en doseringsrate på 1,111 kg/s (4000 g/time). Dysevinkel på 30° og forstøvning af vand ved 17 °C.

FIGUR 44 viser D10 i y-z planet ved x = 0 mm. Det ses tydeligt at de gennemsnitlige diametre, især for den nedre del af test-sektionen, er større ved lavere temperaturer, grundet en lavere fordampningsrate.



FIGUR 44. D10 kontur i y-z planet der viser den gennemsnitlige forskel for dråbestørrelserne. FluidMedium-02.1 er foretaget ved 400°C (øverst) og FluidMedium-05 er foretaget ved 200°C (nederst).

Betragtes derimod den øvre del af test-sektionen, FIGUR 44, er variationen i D10 relativt lille. Beregnes dråbestørrelsesfordelingerne fra de forskellige planer i testsektionen langs en linje med den højeste datarate er forskellen i fordampning ved de to temperaturer tydelig, som det ses i FIGUR 45. Dette ses både ved en stigende forskel i målte dråber som funktion af positionen i z retningen, men også ved ændringen af dråbestørrelsesfordelingerne. Især ved z = 370 mm er fordelingen for testen ved 400 °C (FluidMedium-02.1), forskudt i retning mod højere dråbestørrelser.



FIGUR 45. Dråbestørrelsesfordelingen som funktion af højeste data rate for hvert plan i målepunkterne (Grøn=200 °C og rød=400 °C).

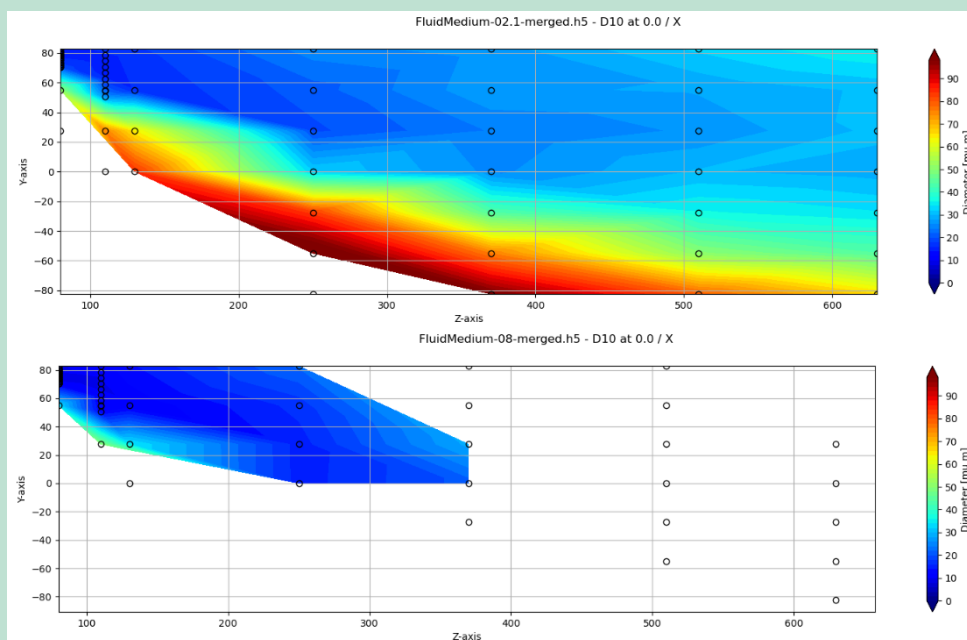
Hastighedsfordelinger samt retninger er stort set upåvirket af den ændrede gastemperatur.

5.3.1.1 Fluid massestrøm

Variationer af væske massestrømme blev ligeledes hovedsageligt foretaget på AA1 systemet. Målingerne blev foretaget ved henholdsvis 1,111 kg/s (4000 g/time) og 0,111 kg/s (400 g/time) samt ved en dysevinkel på 30° og forstøvning af vand ved 17°C.

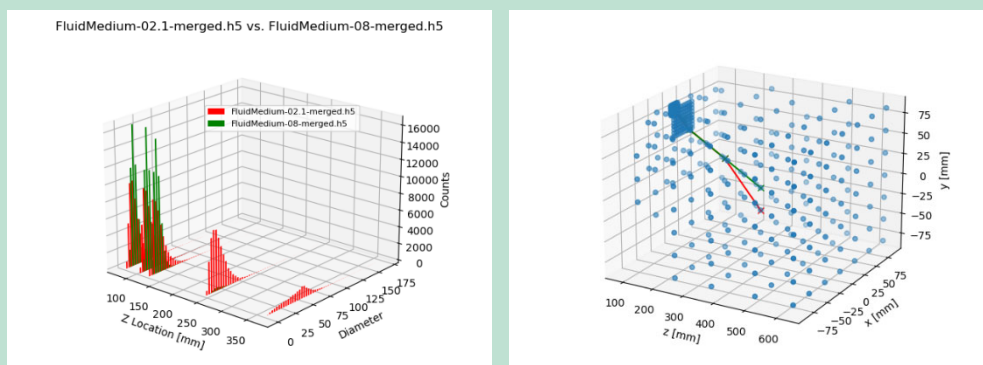
FIGUR 46. Sammenligning af D10 for tests ved to væskestrømme, henholdsvis 1,111 kg/s (4000 g/time) (øverst) og 0,111 kg/s (400 g/time) (nederst). viser en sammenligning af de gennemsnitlige diametre for hvert målepunkt. Det ses at de gennemsnitlige diametre for alle tilgængelige målepunkter er mindre for testen med den lavere massestrøm, hvilket også er tilfældet for dråbestørrelsesfordelingerne i FIGUR 41.

Hvis der ikke angives nogen diameter for et specifikt punkt, illustreret ved manglende farve, betyder det at der ikke har været tilstrækkeligt data tilgængeligt til at kunne estimere diameteren.



FIGUR 46. Sammenligning af D10 for tests ved to væskestrømme, henholdsvis 1,111 kg/s (4000 g/time) (øverst) og 0,111 kg/s (400 g/time) (nederst).

FIGUR 47 viser dråbestørrelsesfordelingerne langs linjer i hvert datasæt hvor $x = 0$, og y vælges så den maksimale datarate opnås for de individuelle planer i z -retningen. De to udvalgte linjer gennem datasættene er ligeledes angivet.

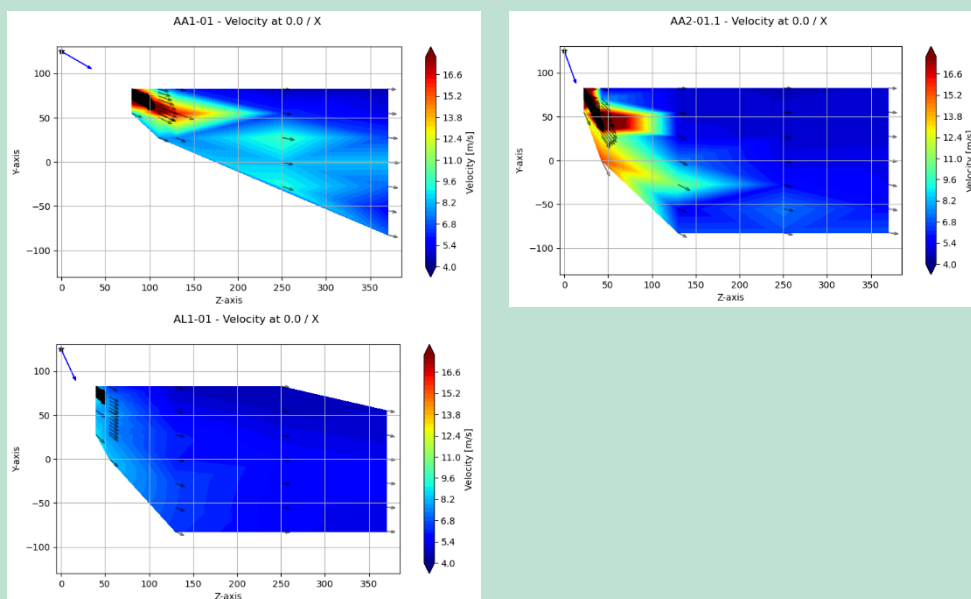


FIGUR 47. Dråbestørrelsesfordelinger givet ved Z -position og test, samt visualisering af de udvalgte sammenligningspunkter (Rød=1,111 kg/s (4000 g/time) og grøn= 0,111 kg/s (400 g/time)).

Det ses at målepunkterne tæt på dysens munding, har sammenlignelige datarater og dråbestørrelsesfordelinger. I målepunkterne længere væk fra dysen ses et markant fald i målte dråber for testen med en væskestrøm på 0,111 kg/s.

Effekt af indsprøjtningvinkel

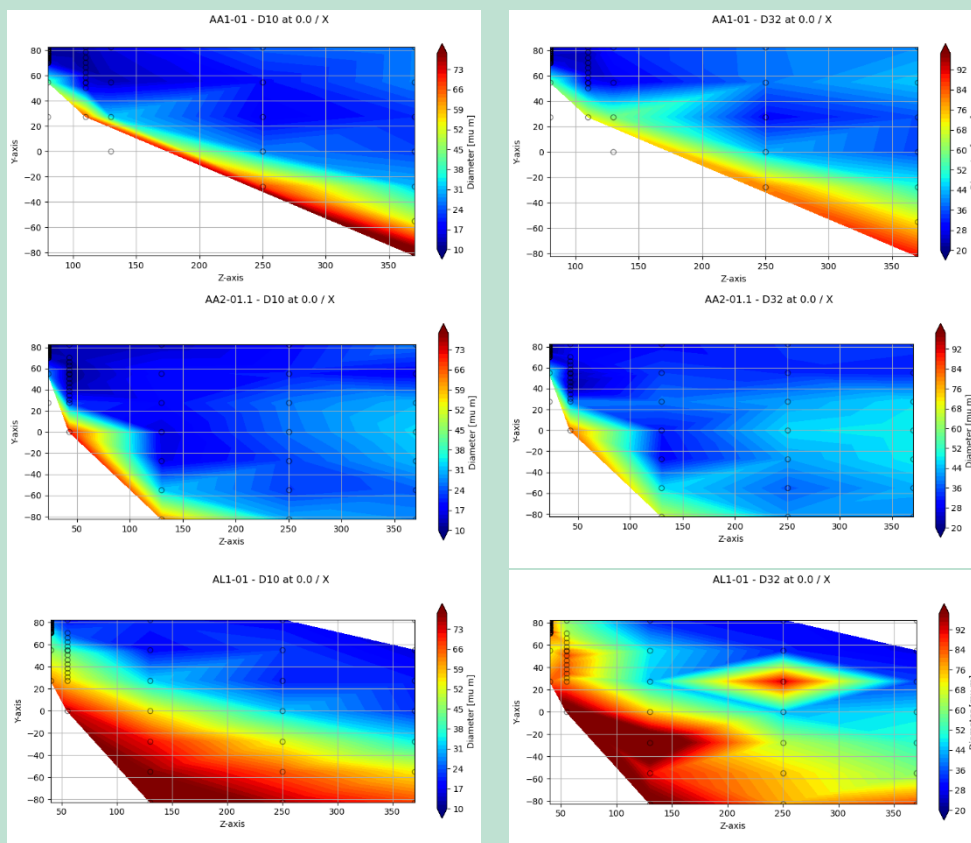
Indsprøjtningvinklen kan også have betydning for den rumlige dråbestørrelses fordeling. Målingerne blev foretaget ved 0,444 kg/s (1600 g/time) og ved forstøvning af vand ved 17°C. Indsprøjtningvinklen varieredes fra 30° (øverst til venstre), 70° (øverst til højre) og 65° (nederst til venstre).



FIGUR 48. Totale gennemsnitlige hastigheder samt gennemsnitlige dråberetninger for målepunkter i y - z planet. Dysens position og vinkel er vist med den blå pil.

FIGUR 48 viser effekten af at ændre dysens vinkel og funktionsmåde. Med afsæt i at AA1- og AA2-systemet fungerer efter samme princip, ses det tydeligt hvordan vinkelændringen, 30° til 70°, påvirker dråbernes fordeling i testsektionen. Sammenlignes AL2-systemet med de to luft-assisterede systemer er der tydelige forskelle i de begyndelseshastigheder, og dermed også fordelingen af dråberne i test-sektionen.

Disse forskelle påvirker derfor også en række af de relevante diametre-statistikker. FIGUR 49 viser D10 og D32 (SMD) i y-z planet ved x = 0 mm. Den rumlige dråbestørrelsesfordeling viser for alle tilfælde den samme tendens med mindre dråber ved positiv ændring i y-retningen.



FIGUR 49. D10 og D32 sammenligninger på tværs af doseringssystemer. Indsprøjtningsvinklen er 30° (øverst), 70° (midt) og 65° (nederst).

AA2-systemet forstøver væsken med mest ensartede dråbefordelinger og med mindste gennemsnitlige D10 og D32 værdier for planerne efter z = 300 mm.

5.4 Mixerplade tests

Formålet med mixerplade testene var at undersøge effekten af spray og dråbeinteraktionen med pladeelementet ved forskellige doseringsrater og gastemperaturer.

Undersøgelserne blev udført ved at placere pladeelementerne i vindtunnelen, som det ses på FIGUR 50. Målingerne blev udført ved variationer i doseringsrate, gastemperatur og -hastighed, pladevinkel og -tykkelse samt fluider. Data for disse målinger blev opsamlet med PDA-udstyret, med et grid designet specifikt til opgaven, samt via temperaturmålinger af selve pladeelementet. Målepunkterne for PDA-udstyret blev placeret i et enkelt plan orienteret i y-z

retningen, med $x = 0$ mm. Griddet indeholdt flest målepunkter umiddelbart efter pladeelementets ophør, hvor de mest interessante forskelle i dråbestørrelsesfordelingerne formodes at findes.

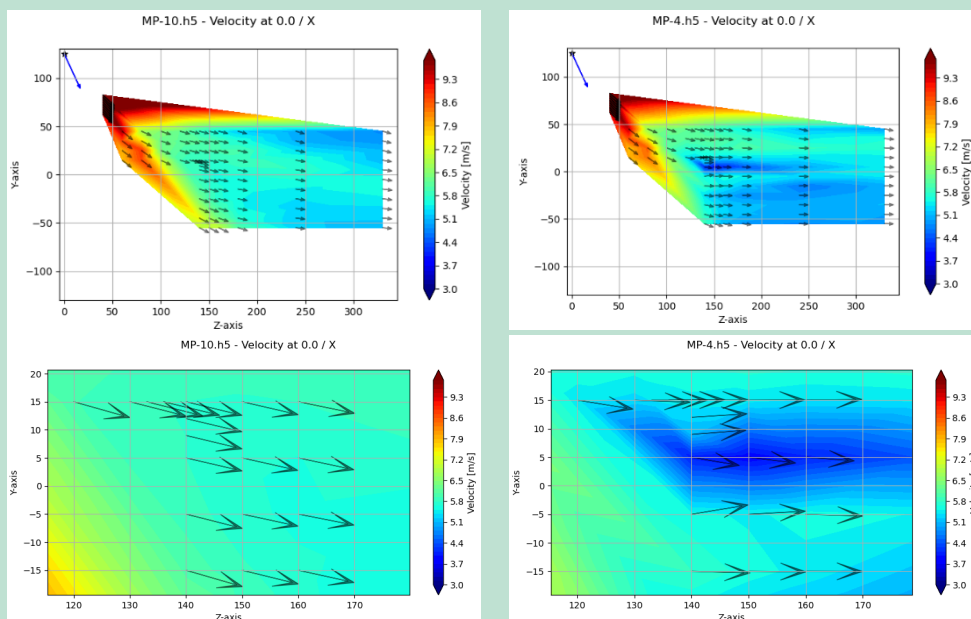


FIGUR 50. Mixerplade testene blev foretaget i vindtunnelen ved PDA-målinger og temperaturmålinger af selve plade element.

Gashastigheder og -temperaturer, samt doseringsrater, blev lagt ud efter de specifikationer der blev anvendt til valideringsforsøgene udført for de respektive doseringssystemer. Samtidig blev forsøgene udført med AL1-systemet, som giver det mest konstante spray på tværs af doseringsrater, se afsnit 5.2.3 AL1. Målingerne blev foretaget ved 0,444 kg/s (1600 g/time) og ved forstøvning af vand ved 17°C. Indsprøjtningens vinkel var 65° og mixerpladens tykkelse var på 1 mm og dens vinkel relativt til vandret var 25°.

For sammenlignings- og valideringsgrundlag blev der foretaget målinger efter det specielt udlagte grid uden et pladeelement i testsektionen.

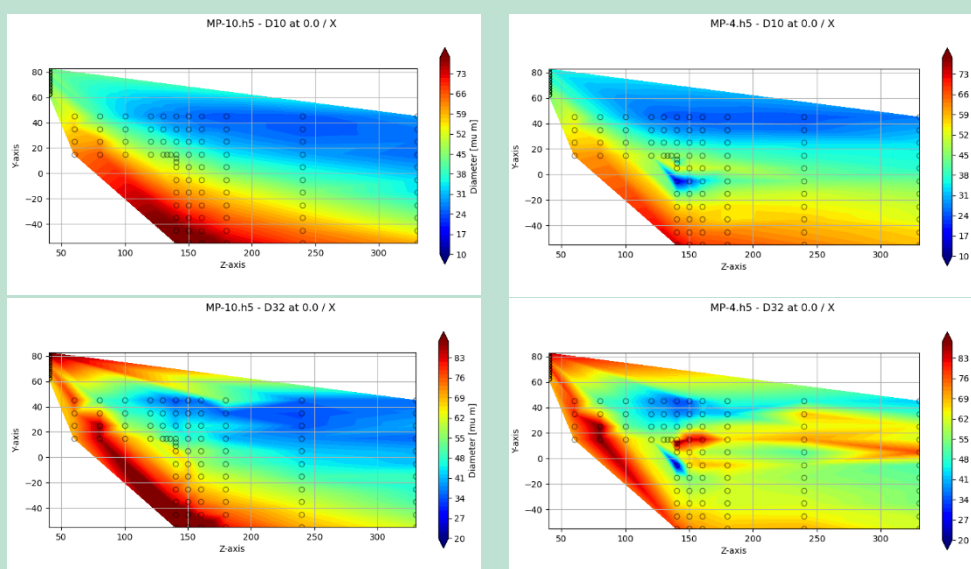
FIGUR 51 viser totale gennemsnitlige dråbehastigheder og -retninger for basistesten (MP-4.h5) og for testen uden pladeelement i testsektionen (MP-10.h5).



FIGUR 51. Sammenligning af dråbehastigheder ved målinger med og uden pladeelement placeret i test-sektionen. Test MP-10.h5 er uden pladeelement og MP-4.h5 med pladeelement.

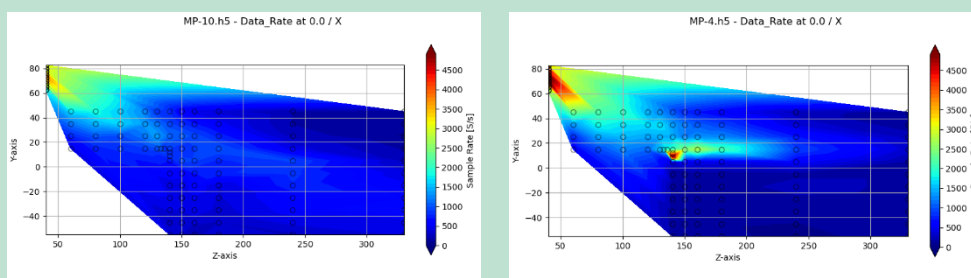
Der ses en tydelig ændring i hastighedernes retning umiddelbart under og efter pladeelementet, samtidig er nedstrøms og skygge regionen fra pladeelementet karakteriseret ved lavere gennemsnitlige hastigheder.

Tydelige ændringer i de gennemsnitlige diametre, D10 og D32, fremgår af FIGUR 52. Specielt umiddelbart bagved pladeelementet ses en forekomst af små partikler. Samtidig ses en afretning af sprayet nedstrøms fra pladeelementet, samme afretning kunne også observeres på dråbernes retning, FIGUR 51.



FIGUR 52. D10 og D32 sammenlignes for testene med identiske konditioner hvor variationen ligger i pladeelementets tilstedeværelse. Uden pladeelement til venstre og med pladeelement til højre

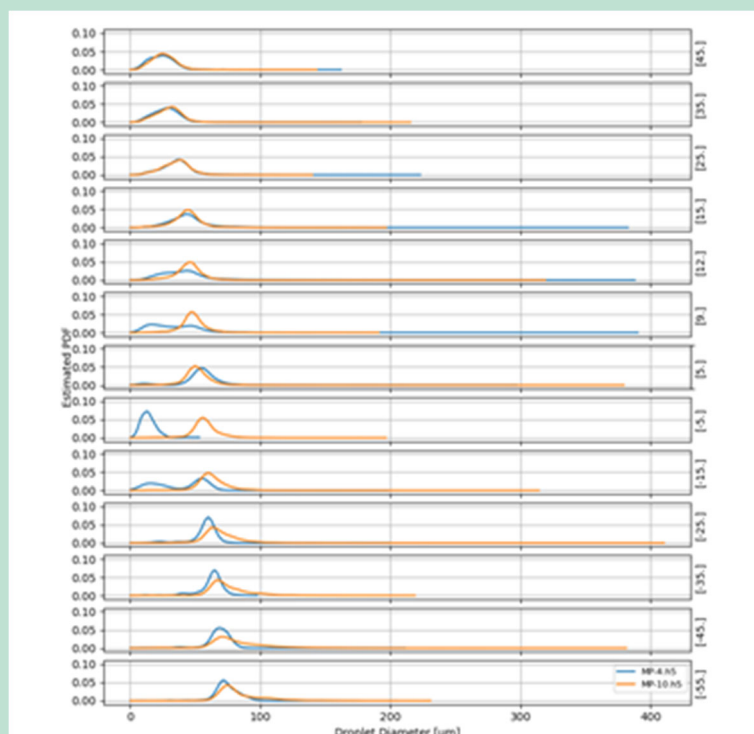
Med pladeelementet placeret i test-sektionen (MP-4.h5), forskubbes D32 opad dog synes spændet af D32 ikke at ændre sig markant. Umiddelbart under selve pladeelementet reduceres både D10 og D32 markant, hvilket reducerer potentialet for at fluidvæsken deponeres på bundpladen af vind tunnelen.



FIGUR 53. Datarate sammenlignes for MP-10.h5 uden pladeelement og MP-4.h5 med pladeelement.

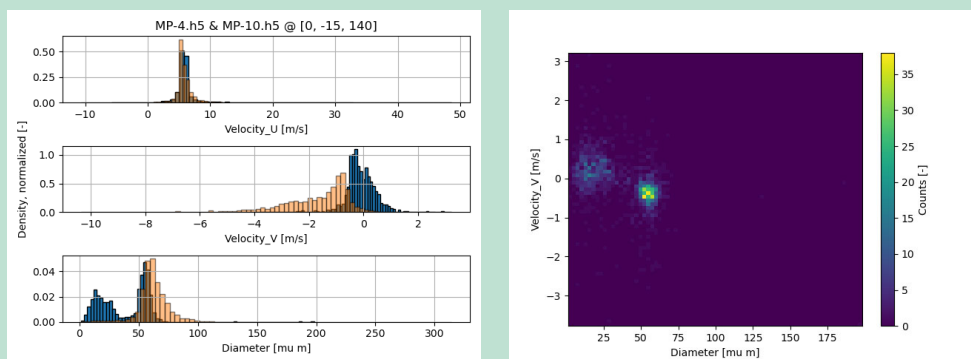
At der deponeres mindre væske på bundpladen underbygges ydermere af faldet i datarate, som ses på FIGUR 53, hvor der i hele regionen under pladeelementet er et markant fald i dataraten, altså mængden af dråber der detekteres.

Som det fremgår af de gennemsnitlige dråbestørrelser, FIGUR 52, ændres dråbestørrelsesfordelingen markant umiddelbart efter pladeelementet. FIGUR 54 sammenligner dråbestørrelsesfordelingen fra punkter langs en linje igennem $z = 140$ mm, $x = 0$ mm. Der ses ikke nogen markante ændringer i randzonerne, men omkring selve pladeelementet påvirkes dråbestørrelsesfordelingerne markant.



FIGUR 54. Dråbestørrelsesfordelinger fra $z = 140$ mm og $x = 0$ mm. Y positionen for de enkelte grafer er angivet i højre side. Gul kurve viser fordelingen uden pladeelement, medens blå kurve viser fordelingen med pladeelement

De markant ændrede fordelinger, især ved $y = [9 \text{ mm}, -5 \text{ mm}]$, kan formentligvis skyldes væskefilmen der dannes på pladeelementet som genererer dråber langs pladeelementets kant. Væskefilmen kan ses i FIGUR 50. Kigger man nærmere på dråbestørrelses- og hastighedsfordelingerne i punktet $[x, y, z] = [0 \text{ mm}, -15 \text{ mm}, 140 \text{ mm}]$ iagttages en tydelig bimodal fordeling med pladeelement (MP-4.h5) i modsætning til uden pladeelement (MP-10.h5).



FIGUR 55. Dråbestørrelses- og hastighedsfordelinger for punktet $[x, y, z] = [0, -15, 140]$.

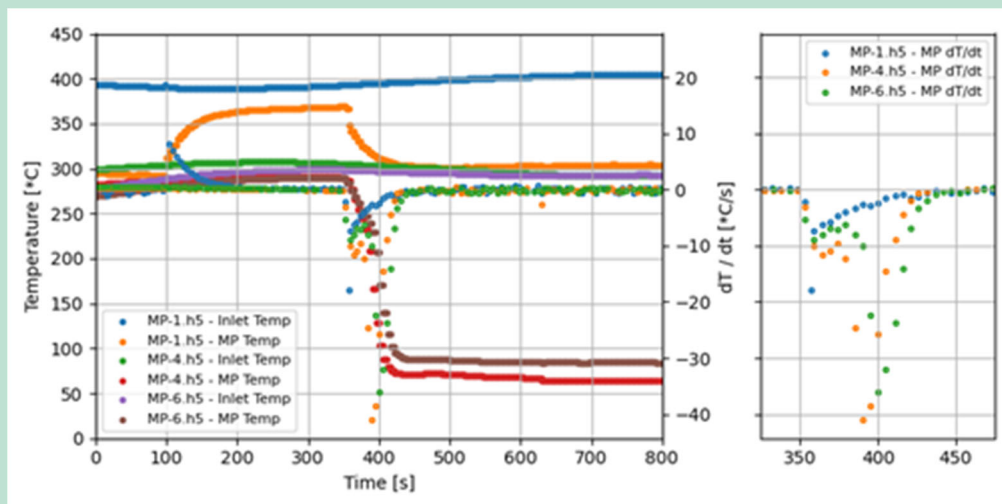
Den bimodale fordeling af både hastighed og dråbestørrelser, som ses tydeligt i sektion 2 af FIGUR 55, peger på at den ene gruppe af disse dråber genereres fra pladeelementet, da både retninger og størrelser har hver deres karakteristik.

5.4.1 Parameter variationer

I forbindelse med mixer-plade forsøgene blev der foretaget en række parametre studier af forskellige indstillinger af pladeelementet og forskellig brug af doseringssystemet. De følgende afsnit omhandler analyse af disse forsøg. Analyserne foretages ud fra pladeelementets temperatursvingninger samt påvirkningen af dråbestørrelsesfordelingerne direkte nedstrøms pladeelementet.

5.4.1.1 Gastemperatur og massestrøm

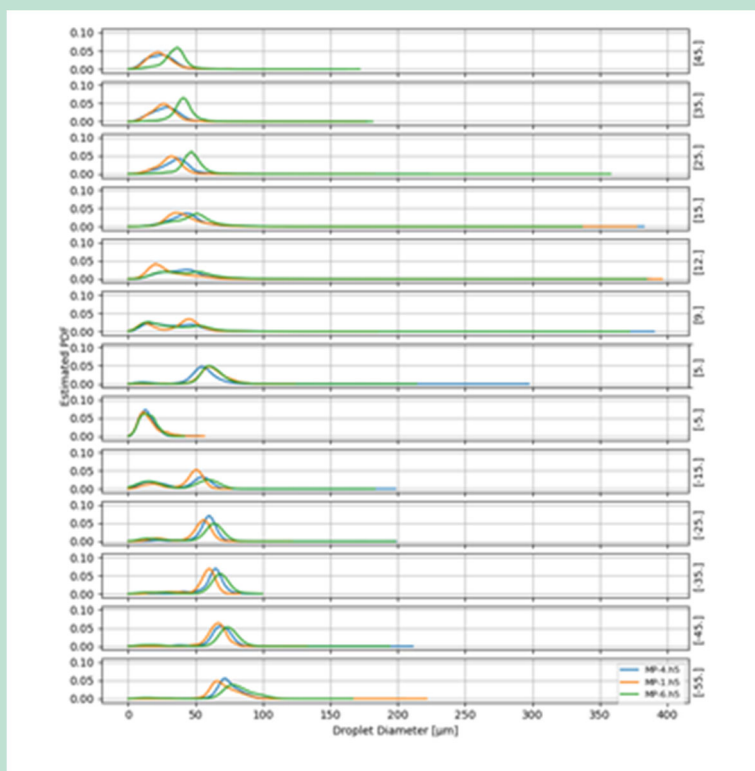
Variationer i gasflowets massestrøm og temperatur blev udført i testene med MP-6.h5 (400 °C) og MP-1.h5, med sammenligning til testen MP-4.h5 (300 °C). Alle målingerne blev foretaget ved 0,444 kg/s (1600 g/time) og ved forstøvning af vand ved 20°C. Indsprøjtningens vinkel var 65° og mixerpladens tykkelse var på 1 mm og dens vinkel relativt til vandret var 25°. FIGUR 56 viser vind tunnelens indløbstemperatur samt pladetemperaturen, derudover ses gradienten af temperaturen for pladeelementet. Med en gasstrømning på 400°C og 5.5 m/s opnås den største gradient i forbindelse med afkøling når indsprøjtning startes. Pladeelementstemperatur falder derefter fra 380 °C til omkring 300 °C (MP-1.h5). Den næststørste gradient, under afkøling, opleves ved en gasstrømning på 300 °C og 8.0 m/s (MP-4.h5), her falder pladeelementets temperatur fra 285 °C til 65 °C.



FIGUR 56. Sammenligning af pladeelementets nedkøling og opvarmning i forbindelse med start og stop af indsprøjtning.

Den relativt store forskel i hvornår temperaturligevægtstilstanden opnås kan hænge sammen med om det er muligt at opbygge en væskefilm på pladeelementet eller ej.

I tråd med hvordan pladetemperaturen påvirkes mest af gassens temperatur, er påvirkningerne af dråbestørrelsesfordelingerne mest markante når gasmassestrømmen ændres, som det fremgår af FIGUR 57 i forbindelse med målinger direkte nedstrøms fra pladeelementet. Betragter man i stedet målepunkterne i yderområderne påvirkes fordelingerne mest af den ændrede massestrømning.

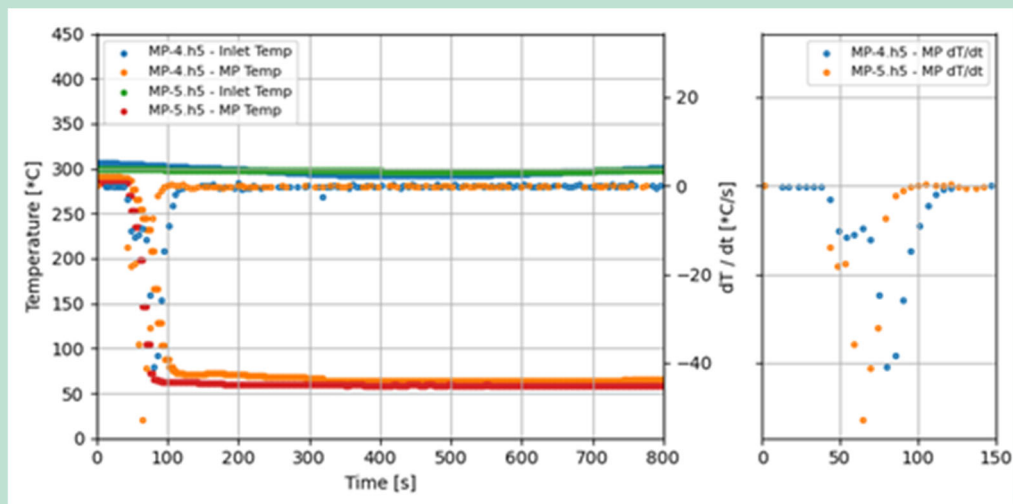


FIGUR 57. Sammenligning af dråbestørrelsesfordelinger for MP-1.h5, MP-4.h5, MP-6.h5.

Den bimodale fordeling der kunne iagttages i FIGUR 55 ses igen ved punkterne $[x, z] = [0, 140]$ og $y = [12, 9, -5, -15]$.

Doseringsrate

Variationen i doseringsrate bestod af en forøgelse på cirka 25 % fra 0,444 kg/s (1600 g/time) til 0,582 kg/s (2100 g/time). Målingerne blev udført ved forstøvning af vand ved 20°C. Indsprøjtningens vinkel var 65° og mixerpladens tykkelse var på 1 mm og dens vinkel relativt til vandret var 25°. Gradienten under afkøling af pladeelementet er større når doseringsraten øges, men temperaturligevægtstilstanden er uændret, og pladeelementet falder fra omtrent 285 °C til 65-70 °C. FIGUR 58 viser temperaturernes forløb i forbindelse med testen.

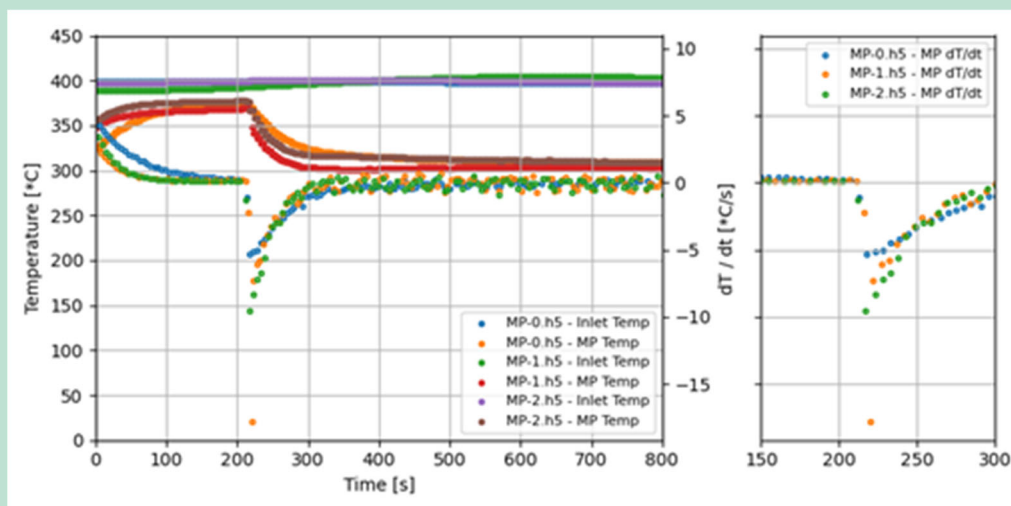


FIGUR 58. Pladeelementets temperatur og temperaturgradient, samt indløbstemperaturen for vind tunnelen, som funktion af tiden.

Dråbestørrelsesfordelingerne er stort set uændrede af variationen i doseringsrate.

5.4.1.2 Pladetykkelse

Der blev foretaget forsøg med 3 forskellige pladetykkelser, 1,5 mm, 1,0 mm og 0,7 mm. Målingerne blev udført ved forstøvning af vand ved 20 °C og et masseflow på 0,444 kg/s (1600 g/time). Indsprøjtningens vinkel var 65° og mixerpladens vinkel relativt til vandret var 25°. FIGUR 59 viser temperaturforløbene, samt deres gradienter. De største gradienter blev iagttaget for den tyndeste plade i forbindelse med afkøling af pladeelementet. Alle 3 pladetykkelser endte med en temperaturligevægt omkring 305 °C, ved en start temperatur omkring 375 °C.

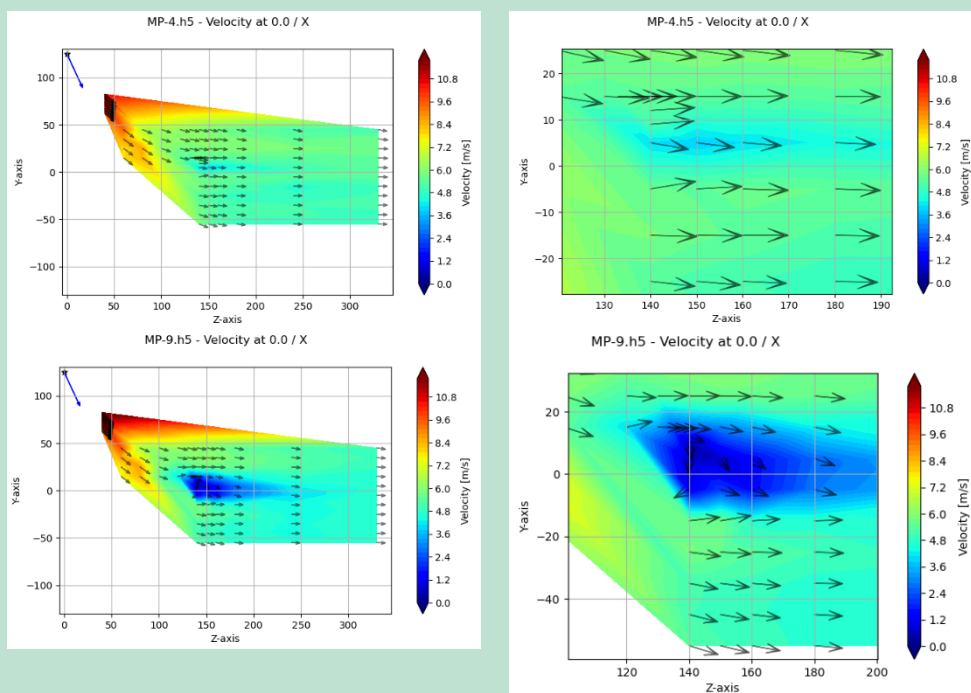


FIGUR 59. Pladeelementets temperatur og temperaturgradient, samt indløbstemperaturen for vind tunnelen, som funktion af tiden. Testene forløb med pladetykkelserne 1.5 mm, 1.0 mm og 0.7 mm, de respektive tests er MP-0.h5, MP-1.h5 og MP-2.h5.

Pladetykkelsen havde ingen væsentlig indflydelse på dråbestørrelsesfordelinger, svarende til observationerne fra variationen af doseringsrate.

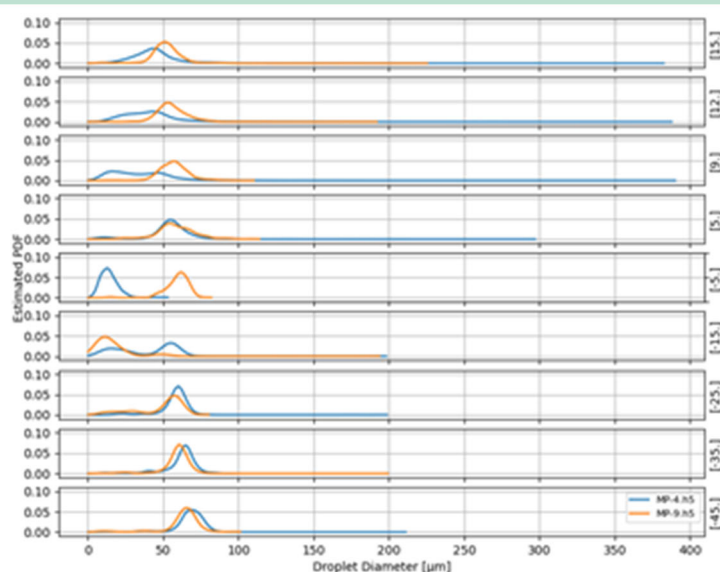
Pladevinkel

Samtlige tests, på nær variationen med plade vinkel, blev udført så vinklen imellem dysen og den vinklede del af pladeelementet stod vinkelret på hinanden. I forbindelse med variationen i pladevinkel, blev vinklen af elementet øget fra 25° til 40°, hvilket betød at vinklen mellem dysen og den vinklede del af elementet spidsede. Målingerne blev udført ved forstøvning af vand ved 20 °C og et masseflow på 0,444 kg/s (1600 g/time). Indsprøjtningsvinklen var 65° og mixerpladens tykkelse var på 1 mm. FIGUR 60 viser effekten af den varierede vinkel, især retnin-gen af dråberne umiddelbart efter pladeelementet påvirkes markant. Derudover ses der også et fald i generelle hastigheder nedstrøms og i skygge af pladeelementet.



FIGUR 60. Gennemsnitlige hastigheder og retninger for variationen med pladevinklen (øverst 25° og nederst 40°).

Samtidig påvirkes dråbestørrelsesfordelingerne bagved pladeelementet. De tidligere observerede bimodale fordelinger aftager, som det fremgår af FIGUR 61.

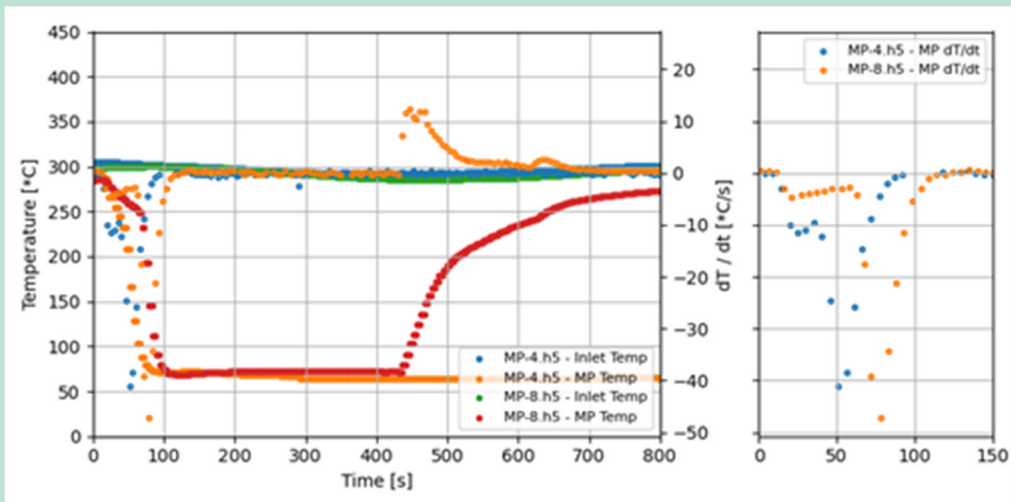


FIGUR 61. Dråbestørrelsesfordelinger for pladevinkel variationen (blå 25° og gul 40°).

Især punkterne omkring $[x, z] = [0, 140]$ og $y = [9, -15]$, som tidligere producerede de mest markante bimodale dråbestørrelsesfordelinger, ophører med at udvise denne trend.

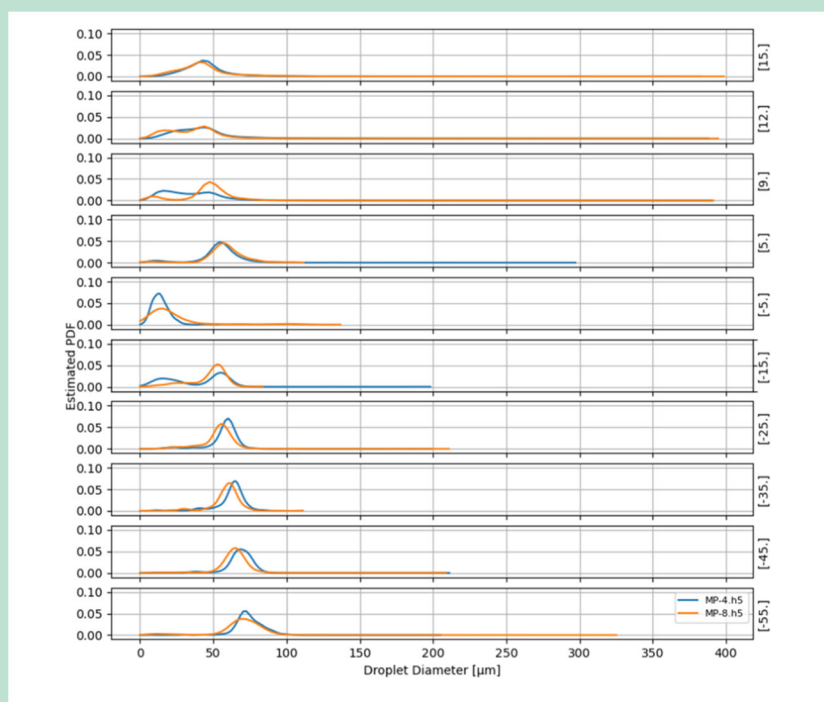
Fluid media

Som en del af mixerplade forsøgene blev der yderligere udført et forsøg med AdBlue (UWS). Målingerne blev udført ved en gastemperatur på 300 °C og en indsprøjtningvinkel på 65°. Mixerpladens tykkelse var på 1 mm og dens vinkel relativt til vandret var 25°. Der er ikke markante forskelle i ligevægtstemperaturen for forsøg med UWS og vand, hvilket fremgår af FIGUR 62. Sammenligning af temperatur og temperaturgradient for forsøg med vand (MP-4.h5) og UWS (MP-8.h5). Temperaturgradienternes magnituder er relativt ens for de to væsker. Selve forløbet af temperaturen i forbindelse med afkølingen er dog anderledes for UWS, hvor pladeelementet kortvarigt opvarmes igen, inden temperaturen atter falder mod ligevægtspunktet. Dette fænomen kan også iagttages for de andre tests, dog slet ikke så markant som ved UWS.



FIGUR 62. Sammenligning af temperatur og temperaturgradient for forsøg med vand (MP-4.h5) og UWS (MP-8.h5).

Dråbestørrelsesfordelingerne nedstrøms og i læ af pladeelementet påvirkes markant af fluidvariationen. Igen mindskes de bimodale fordelinger når UWS anvendes, og under pladeelementet skifter gennemsnitsdiameteren for UWS mod mindre størrelser, FIGUR 63.



FIGUR 63. Dråbestørrelsesfordelinger angivet for både vand (blå kurve) og UWS (gul kurve) umiddelbart nedstrøms fra pladeelementet.

5.5 Diskussion

Statistiske parametre er som udgangspunkt kun anvendt til valideringsgrundlag samt sammenligninger af relativt få tests. En gennemgående statistisk analyse af samtlige målinger med henblik på at kortlægge og sammenligne relevante statistiske størrelser er derfor interessant

og direkte mulig ved brug af det eksisterende data. I samme analyse kunne man estimere hvilke af de varierede parametre der har signifikant indvirkning på relevante statistiske parametre, og derved kortlægge doseringssystemernes sensitivitet overfor relevante randbetingelser.

6. Arbejdspakke 5 – Validering af strukturdynamiske simuleringer

Arbejdspakke 5 fokuserer primært på at præsentere den eksperimentelle og numerisk estimerede struktur-dynamiske opførsel når godstykkelsen på mixerdele reduceres. De eksperimentelle resultater bruges også til at validere (eller opdatere) Finite Element simuleringerne, så pålideligheden af fremtidige simuleringer øges.

Testemnet (ATS) benævnes Samlet mixer, den består af tre komponenter; Swirling baffle, Flow guiding device og Ydre krop. Samlet mixer og ydre krop er produceret i 1,5 mm plade, Swirling baffle og Flow guiding device er produceret i tre set af hhv. 1,5 mm, 1,0 mm og 0,7 mm plade. I alt er der altså 8 testemner.

Impact-hammer-metoden er brugt til den eksperimentelle modalanalyse (EMA) og modal-parametre er estimeret vha. Abravibe toolbox i MatLab, udviklet af Prof. Anders Brandt. Pretest og korrelations analyse er lavet i softwaren FEMtools sammen med en eventuel opdatering til FE-modellen.

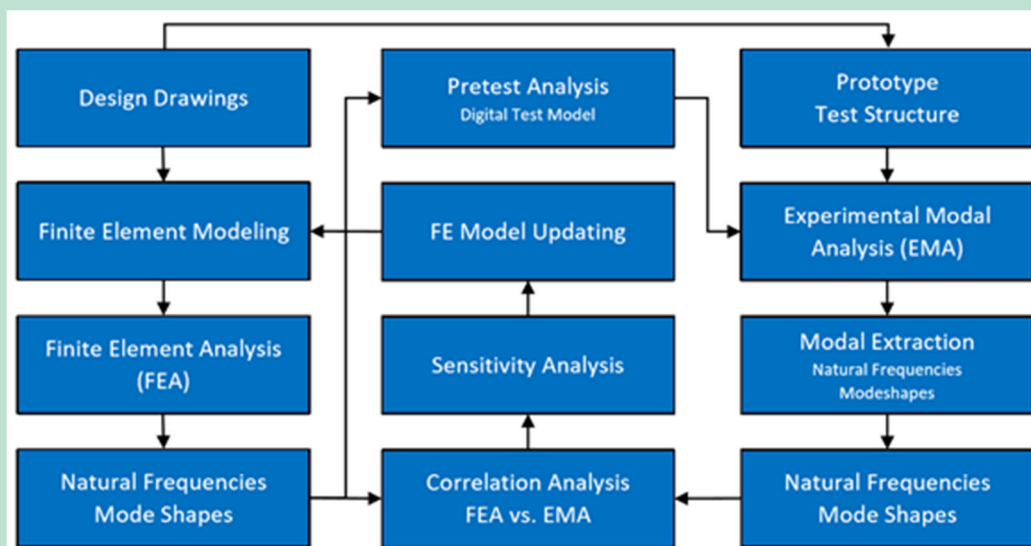
6.1 Metode

Metodebeskrivelsen dækker den eksperimentelle evaluering af den kompakte mixers struktur-dynamiske opførsel og egenskaber.

6.1.1 Procedure

Dette afsnit beskriver den generelle procedure som gennemført på alle komponenter.

Før den eksperimentelle modalanalyse foretages en Pretest; resultater fra en Finite Element analyse bruges i FEMtools til at bestemme de optimale sensor-, ophængs-, og excitations punkter for en given geometri og til at gennemføre en digital test. Arbejdsprocessen er beskrevet som et flow chart i FIGUR 64.



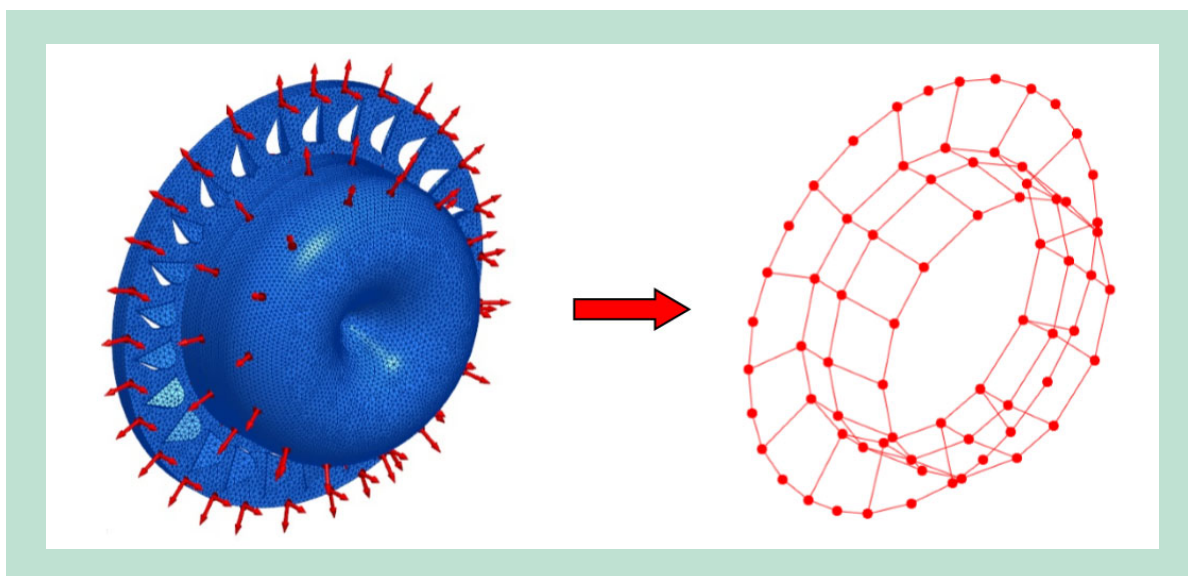
FIGUR 64. Workflow procedure for FE model validering og opdatering

6.1.2 Testmodel

En testmodel er brugt i pretest analysefasen, den fungerer som en *digital twin* for testemnet hvor sensor lokationer- og retninger er defineret. Testmodellen bruges for at lette arbejdet med at markere og nummerere målepunkterne på testemnet, men også for at forbinde EMA- og FEA-data således at det bliver nemt at foretage en korrelationsanalyse på henholdsvis eksperimentelle og numeriske resultater. Testmodellen er defineret ved et antal punkter og frihedsgrader (DOF's), der defineres når sensorpositioner vælges fra en node i en FE model. En tabel med nodepoint par og en tabel med DOF-par genereres automatisk og udgør forbindelsen mellem FE model og testmodel. Forskellige analyseværktøjer kan bruges i pretestanalysefasen med henblik på at bestemme de optimale sensorpositioner, så antallet af sensorer og tiden det kræver at gennemføre en EMA - med tilstrækkelig kvalitet - reduceres.

Det har dog vist sig gennem arbejdet med emnerne i dette projekt, at det reducerede antal sensorer ofte var utilstrækkelige, i de tilfælde har det være nødvendigt manuelt at øge antallet af målepunkter. Når alle målepunkter (sensorpositioner) er defineret, kan testmodellen visualiseres ved at forbinde punkterne med linjer, se FIGUR 65.

FEA-resultaterne er automatisk overført til testmodellens frihedsgrader og en Auto-MAC matrix er produceret for at kontrollere at opløsningen af modellen i frihedsgrader er tilstrækkelig til at sikre mode shape ortogonalitet.



FIGUR 65. (Venstre) Viser et FE mesh med sensorpositioner og retninger fra hvilke en testmodel er defineret. (Højre) Viser en testmodel bestående af punkter forbundet med linjer for at skabe en visuel repræsentation af modellen.

6.1.3 Impact punkter

Hver enkelt impact punkt der føjes til modellen, er defineret ved en position og en retning, svarende til en frihedsgrad i testmodellen. Et praktisk værktøj i FEMtools er muligheden for at definere et impact punkt på en krum overflade ved at vælge at bruge "normal-to-surface", det sikrer at testmodellens frihedsgrader svare til de retninger impact hammeren og accelerometrene oplever. "Normal-to-surface" gælder kun for noder der er defineret i en overflade, og altså ikke for kant- eller hjørne noder, så hvis der er behov for en sensor på en kant, skal det manuelt sikres at retningen kommer til at svare til retningen på testemnet. Det letter databehandlingen da alle frihedsgrader og mode shape vektorer naturligt er i det relativt rigtige koordinatsystem. Det kan lade sig gøre fordi FEMtools automatisk forbinder en frihedsgrad fra EMA-dataene med den tilsvarende frihedsgrad på testmodellen. Forbindelsen håndteres med tabeller på samme vis som forbindelsen mellem FE-model og testmodel, se afsnit 6.1.2. Punkterne markeres på testemnet med tusch og hvert punkt identificeres med et tal, et eksempel er vist på FIGUR 66.



FIGUR 66. Et eksempel på en 1,0mm Swirling baffle med punkter markeret med et identifikationsnummer

6.1.4 Accelerometer-positioner

Accelerometerpositionerne er valgt fra et sæt kandidat-positioner fra testmodel punktsættet. Ved "roving impact hammer" metode med stationære accelerometer, kan begyndelses- og potentielt brugbare positioner vælges ved på baggrund af Pretest resultaterne;

- Positioner der har høje værdier på et minimal eller average normalized modal displacement (NMD) map.
- Positioner der har høje værdier på minimal eller average normalized kinetic energy (NKE) map.
- Positioner der har høje værdier på mode participation analysis maps (MPM).

Processen kan automatiseres og den endelige udvælgelse er bestemt på baggrund af en Mode Participation Analysis (MPA), en sådan analyse giver informationer om hvor meget de valgte frihedsgrader deltager i hver enkelt mode.

Ved beregne forskellige måleparametre i FEMtools, fx, Normalized Modal Displacement (NMD), Normalized Kinetic Energy (NKE) og Mode Participation Maps (MPM), og evaluere resultaterne kan de optimale accelerometerpositioner bestemmes.

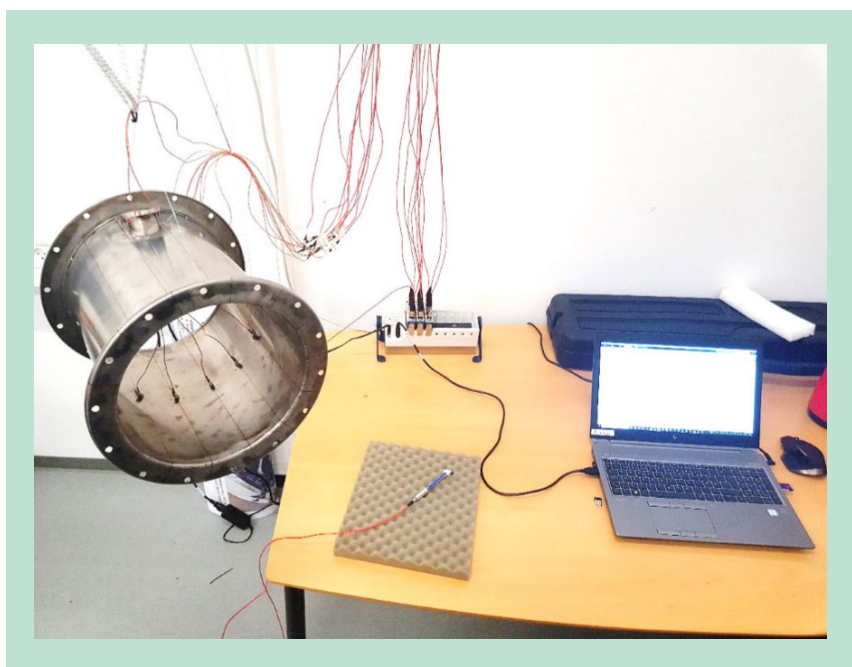
En Mode Participation Analysis (MPA) af det endelige sæt frihedsgrader er evalueret, for at få information om hvor meget hver enkelt frihedsgrad deltager i hver enkelt mode. Accelerometre er monteret på de udvalgte punkter i korrekte retninger, ledninger føres så de ikke kommer i kontakt med overfladen af testemnet.

6.1.5 Ophængspunkter

Testemnerne er ophængt i elastikker der gør det ud for en fri-fri (ingen restriktion for bevægelse) grænsebetingelse. Ved at vælge de ophængspunkter der har den mindste forskydning eller kinetiske energi på tværs af alle modes, bliver indflydelsen på individuelle modes fra ophængt minimeret.

6.2 Dataopsamling og setup

Som udgangspunkt er "roving impact hammer" metoden brugt, i andre tilfælde vil det blive uddybet i specifikke underafsnit. Antallet af accelerometre brugt på hver enkelt komponent varierer, men det maksimale antal kanaler er 16, hvoraf kanal et er dedikeret til hammeren. Den maksimale frekvens der evalueres for dette studie er 1500 Hz, derfor sættes samplefrekvensen til 5 kHz. Nogle testemner var vanskelige at exciterer uden at påvirke med et dobbelt eller endda trippel-anslag, selvom det bør undgås. Problemet opstår når en exciteret overflade "springer tilbage" og rammer hammerens spids før hammeren er fjernet fra emnets overflade. En løsning på det problem har været at "opbløde" hammerspidsen således at efterfølgende anslag vil blive dæmpet. Som et resultat reduceres kraft-input spektret til 2000 Hz, spektret er dog stadig tilstrækkeligt, i forhold til de 1500 Hz der maksimalt evalueres. Måletiden per frihedsgrad varierer fra 30-60 sekunder, afhængigt af hvor lang tid det tager for testemnet at "falde til ro" efter at have være exciteret. Målet er at have 4-6 anslag per målepunkt, hver måling er gemt i en MatLab datafil. Et eksempel på det eksperimentelle setup kan ses på FIGUR 67.



FIGUR 67. Eksempel på et eksperimentelt setup

6.3 Masseforskelle – Testemner vs. FE modeller

Testemnernes faktiske vægt og den beregnede masse af FE modellerne (både shell og solid) er vist i TABEL 14.

TABEL 14. Sammenligning af masser på tværs af simulering og test

	Teststruktur		FE model (solid)	FE model (shell)	
	Masse (g)	Masse (g)	Afvigelse til test- struktur	Masse (g)	Afvigelse til test- struktur
Swirling baffle (1,5mm)	900	1006	12 %	1063	18 %
Swirling baffle (1,0mm)	759	704	-7 %	704	-7 %
Swirling baffle (0,7mm)	506	494	-2 %	528	4 %
Flow guiding device med evaporation plates (1,5mm)	818	898	10 %	951	16 %
Flow guiding device med evaporation plates (1,0mm)	584	632	8 %	617	6 %
Flow guiding device med evaporation plates (0,7mm)	440	443	1 %	478	9 %
Ydre krop (1,5mm)	3810	3848	1 %		
Samlet mixer (1,5mm)	5554	5752	4 %		

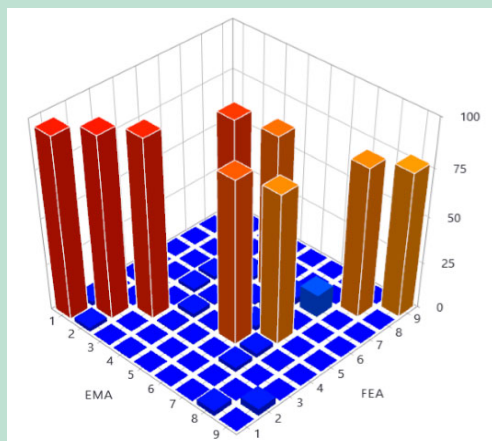
Den beregnede afvigelse afslører at forskellene i masse for enkelte af komponenterne er væsentlige og bør tages i betragtning når resultaterne evalueres.

Afvigelsen i masse skyldes ikke en forkert materialedensitet, fordi havde det været tilfældet, vi alle komponenter have den samme relative forskel. Derudover er densiteten for disse materialer velbeskrevet og varierer ikke væsentligt på tværs af ståltyper. Under antagelsen at materialedensiteten ikke er problemet, må afvigelserne skyldes at volumenerne for virtuelle komponenter ikke er i overensstemmelse med testemnerne. Det kan have en væsentlig indflydelse på den geometriske stivhed af komponenten. Fra resultaterne i TABEL 14 er det vanskeligt at sige hvordan masse-stivhedsforholdet vil påvirke frekvenser og modes, for de forskellige modeller og emner.

6.4 Resultater

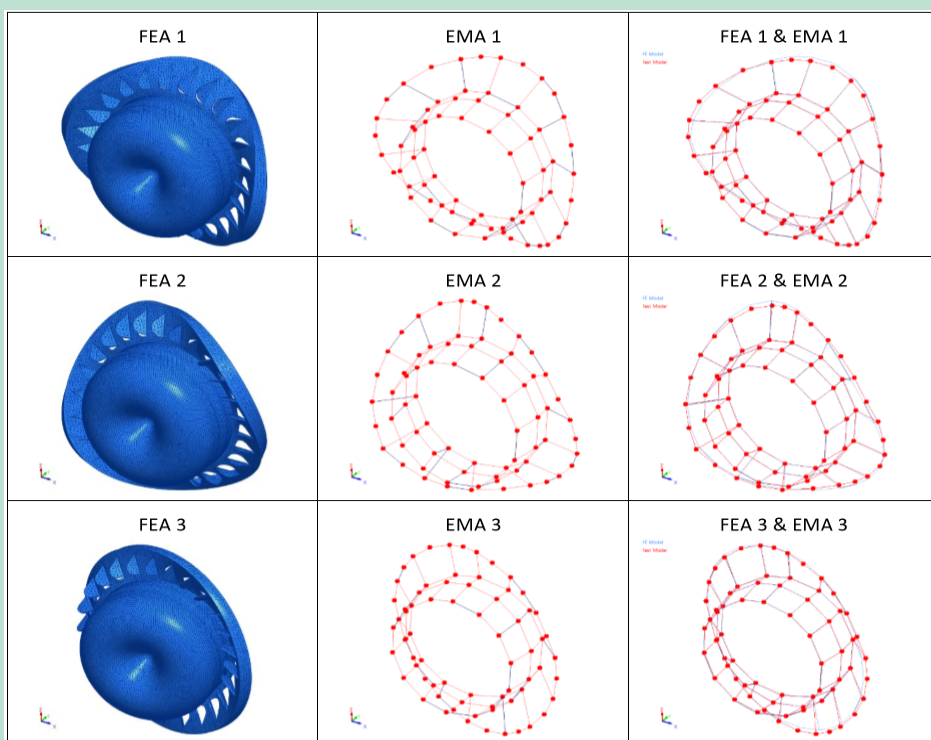
Modalanalysen blev udført for at undersøge specifikke eigen modes og være i stand til at eliminere eigenfrekvenser i frekvensområdet, for specifikke mixerkomponenter, i dette tilfælde Swirling baffle, Flow guiding device og Ydre krop samt naturligvis den samlede model. De eksperimentelle resultater beskrives i relation til simuleringresultater (den ideelle struktur). I dette afsnit er altså vist korrelationen mellem test og simulering for at evaluere om den virtuelle model er i stand til at forudsige det virkelige strukturs dynamiske egenskaber.

Korrelation mellem FE model og testemnet for Swirling baffle i 1,5 mm, inklusive cross-MAC er vist i FIGUR 68 og den visuelle sammenligning i FIGUR 69. Det ses at rækkefølgen mellem mode 4 og 5 og mode 6 og 7 er ombyttet, det skyldes geometriens overvejende aksesymmetri.



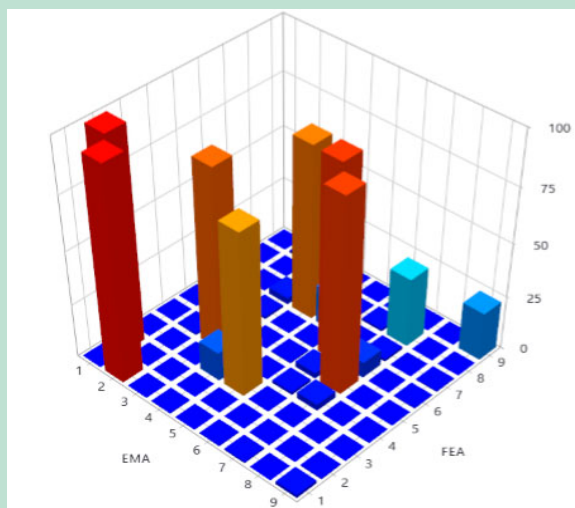
Pair #	FEA	[Hz]	EMA	[Hz]	Δ Freq [%]	MAC [%]
1	1	485.83	1	460.48	5.51	96.1
2	2	492.04	2	462.71	6.34	96.2
3	3	708.49	3	777.67	-8.90	94.9
4	4	709.66	6	814.36	-12.86	86.8
5	5	733.86	7	859.88	-14.66	79.5
6	6	798.71	4	799.23	-0.06	91.6
7	7	802.09	5	801.44	0.08	83.5
8	8	1440.3	8	1380.3	4.34	79.7
9	9	1442.3	9	1390.5	3.73	77.2

FIGUR 68. Korrelation mellem FE model og test-emne (nederst) samt cross-MAC (øverst) for Swirling baffle i 1,5 mm tykkelse



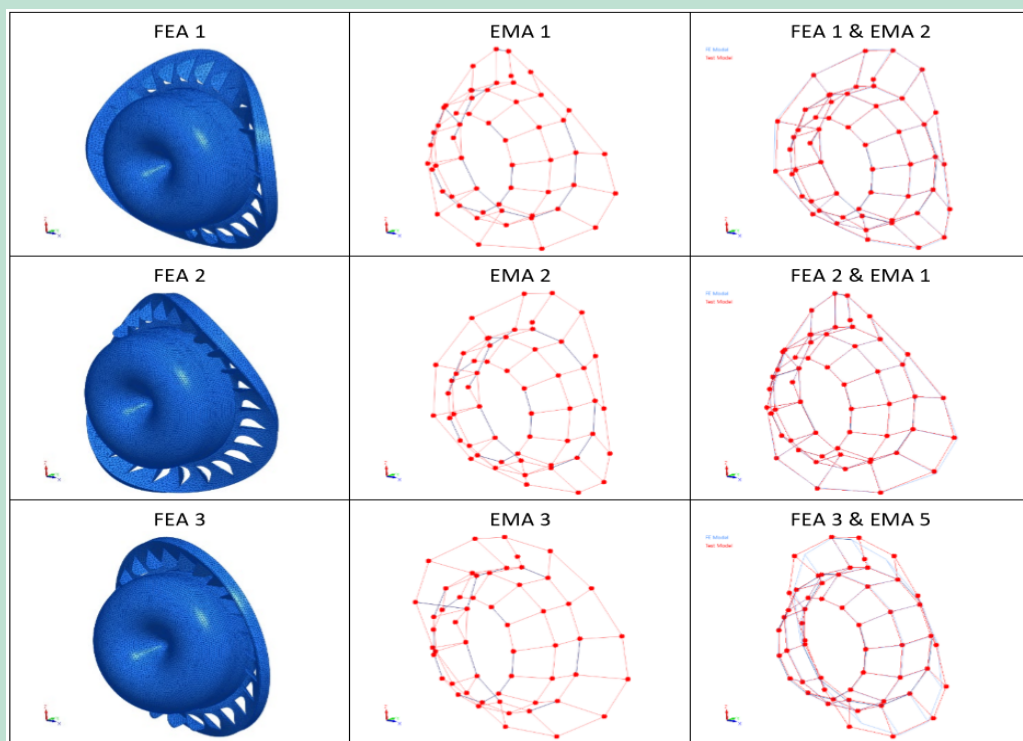
FIGUR 69. De 3 første mode shapes visualiseret, FE model i første kolonne EMA i anden kolonne og “parret” mode i tredje kolonne. For Swirling baffle i 1,5 mm tykkelse.

På samme vis er resultaterne for Swirling baffle i 1,0 mm tykkelse vist i FIGUR 70 og FIGUR 71, også her er der en ombytning mellem rækkefølgen parrede modes optræder.



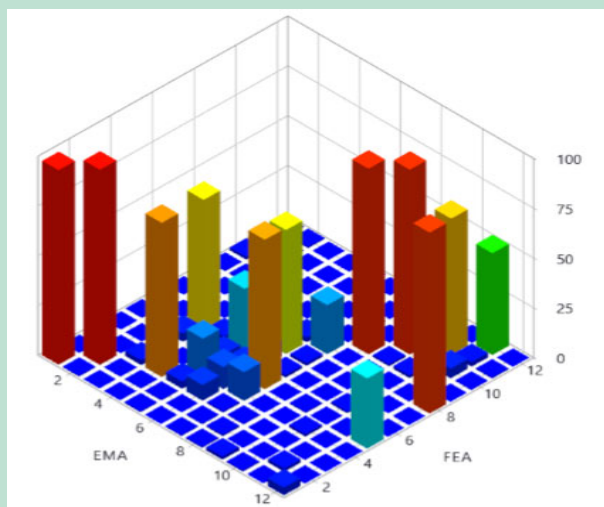
Pair #	FEA	[Hz]	EMA	[Hz]	Δ Freq [%]	MAC [%]
1	1	300.67	2	306.25	-1.82	98.9
2	2	300.90	1	296.74	1.40	98.9
3	3	513.36	5	573.39	-10.47	75.9
4	4	513.36	3	551.86	-6.98	84.4
5	5	553.65	7	617.77	-10.38	90.5
6	6	645.16	6	593.17	8.77	91.7
7	7	645.18	4	572.29	12.74	80.9

FIGUR 70. Korrelation mellem FE model og test-empne (nederst) samt cross-MAC (øverst) for Swirling baffle i 1,0 mm tykkelse



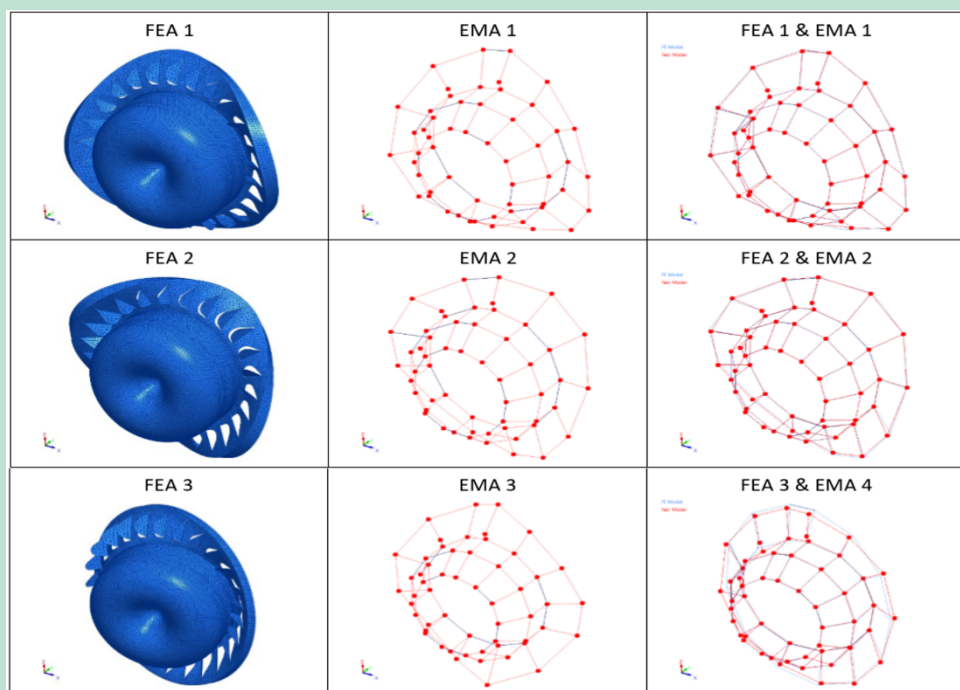
FIGUR 71. De 3 første mode shapes visualiseret, FE model i første kolonne EMA i anden kolonne og "parret" mode i tredje kolonne. For Swirling baffle i 1,0 mm tykkelse.

Resultaterne for Swirling baffle i 0,7 mm tykkelse vist i FIGUR 72 og FIGUR 73, her er der en knap så god korrelation som de "tykkere" komponenter.



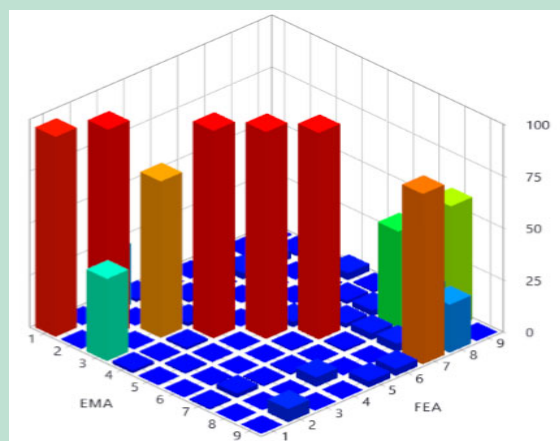
Pair #	FEA	[Hz]	EMA	[Hz]	Δ Freq [%]	MAC [%]
1	1	220.17	1	198.96	10.67	97.7
2	2	220.62	2	206.97	6.59	98.0
3	3	381.99	4	425.18	-10.16	77.4
4	5	412.79	7	473.79	-12.87	75.1
5	6	498.91	3	416.68	19.73	65.4
6	7	499.02	6	434.51	14.85	62.3
7	8	1060.9	12	1286.0	-17.51	90.9
8	9	1072.9	8	952.99	12.58	93.3
9	10	1072.9	9	999.85	7.31	92.8
10	11	1274.9	10	1200.2	6.23	68.4
11	12	1276.0	11	1208.9	5.55	51.1

FIGUR 72. Korrelation mellem FE model og test-empne (nederst) samt cross-MAC (øverst) for Swirling baffle i 0,7 mm tykkelse



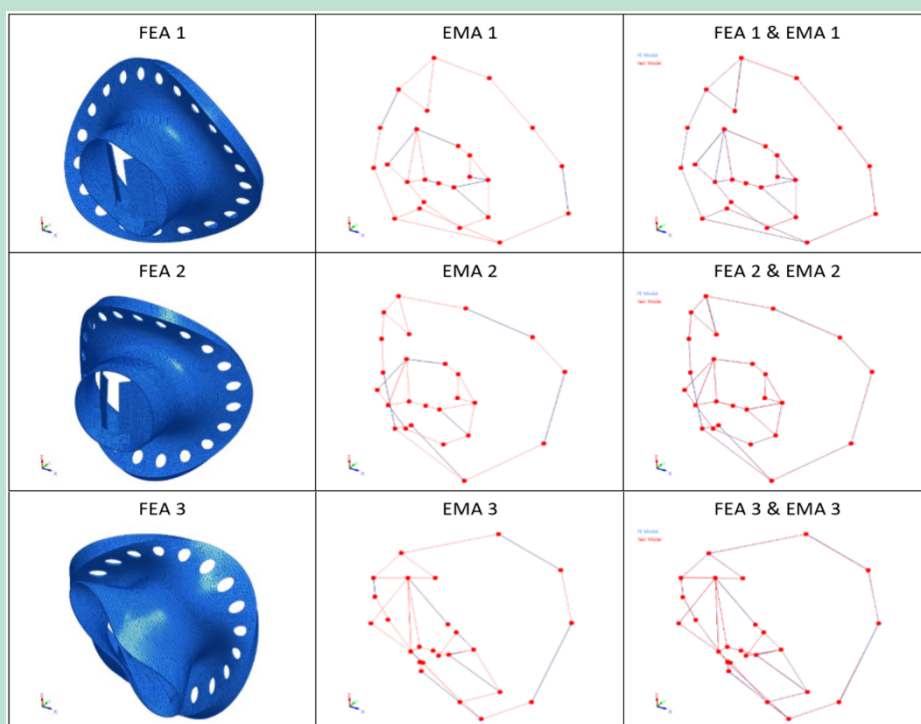
FIGUR 73. De 3 første mode shapes visualiseret, FE model i første kolonne EMA i anden kolonne og “parret” mode i tredje kolonne. For Swirling baffle i 0,7 mm tykkelse.

Korrelation mellem FE model og testemnet for Flow guiding device i 1,5 mm, inklusiv cross-MAC er vist i FIGUR 74 og den visuelle sammenligning i FIGUR 75. Det ses at ombytninger optræder i mindre grad end for Swirling baffle.



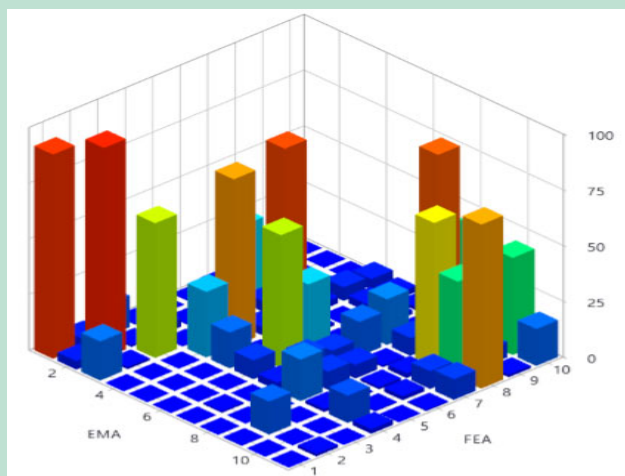
Pair #	FEA	[Hz]	EMA	[Hz]	Δ Freq [%]	MAC [%]
1	1	318.90	1	322.56	-1.14	96.2
2	2	405.21	2	407.72	-0.62	99.9
3	3	616.15	3	622.01	-0.94	75.3
4	4	764.20	4	772.51	-1.08	99.9
5	5	772.14	5	780.75	-1.10	99.6
6	6	821.18	6	852.79	-3.71	99.3
7	7	1029.2	9	1067.4	-3.57	82.0
8	8	1040.9	7	1048.7	-0.75	46.7
9	9	1047.7	8	1052.4	-0.45	59.0

FIGUR 74. Korrelation mellem FE model og test-emne (nederst) samt cross-MAC (øverst) for Flow guiding device i 1,5 mm tykkelse



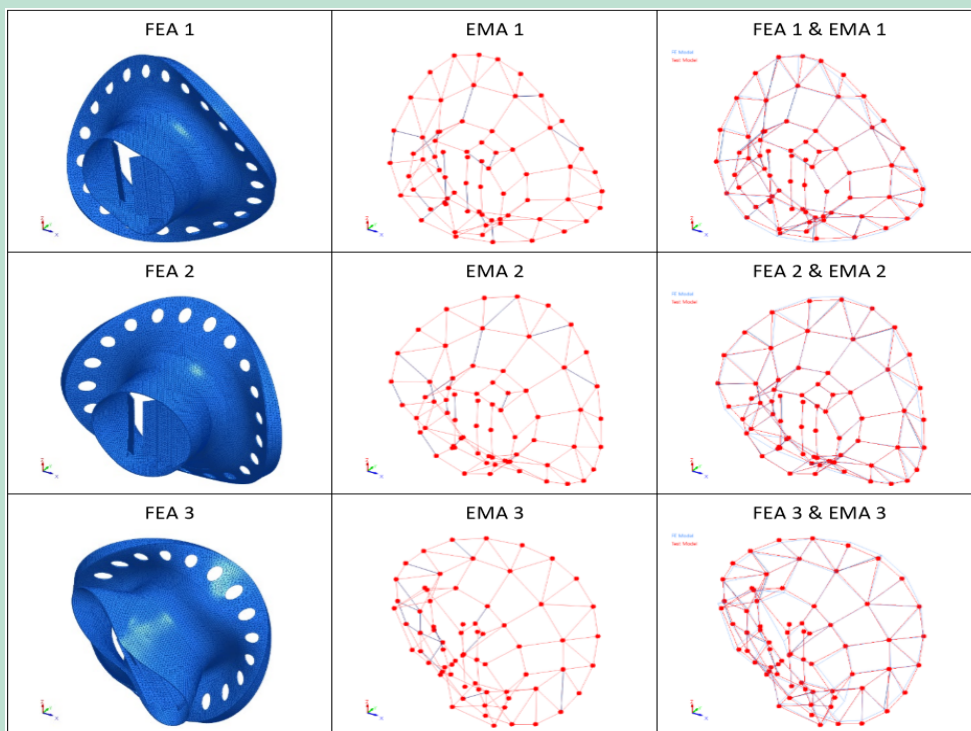
FIGUR 75. De 3 første mode shapes visualiseret, FE model i første kolonne EMA i anden kolonne og "parret" mode i tredje kolonne. For Flow guiding device i 1,5 mm tykkelse.

Resultaterne for Flow guiding device i 1,0mm tykkelse, FIGUR 76 og FIGUR 77, viser en generelt ringere korrelation end for den tykkere geometri og ombytning ved højere frekvenser.



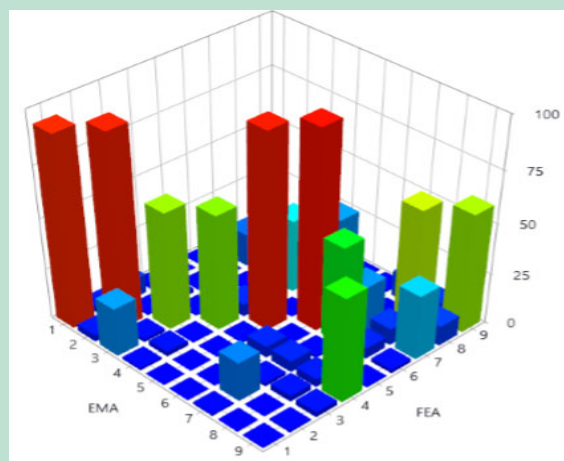
Pair #	FEA	[Hz]	EMA	[Hz]	Δ Freq [%]	MAC [%]
1	1	222.55	1	156.55	42.16	91.7
2	2	266.34	2	210.87	26.30	94.5
3	3	438.65	3	427.37	2.64	60.5
4	5	638.51	4	542.94	17.60	74.9
5	6	639.58	5	554.63	15.32	88.5
6	8	828.52	11	757.51	9.37	73.6
7	9	842.29	8	667.43	26.20	85.1
8	10	867.35	10	711.29	21.94	43.7

FIGUR 76. Korrelation mellem FE model og test-emne (nederst) samt cross-MAC (øverst) for Flow guiding device i 1,0 mm tykkelse



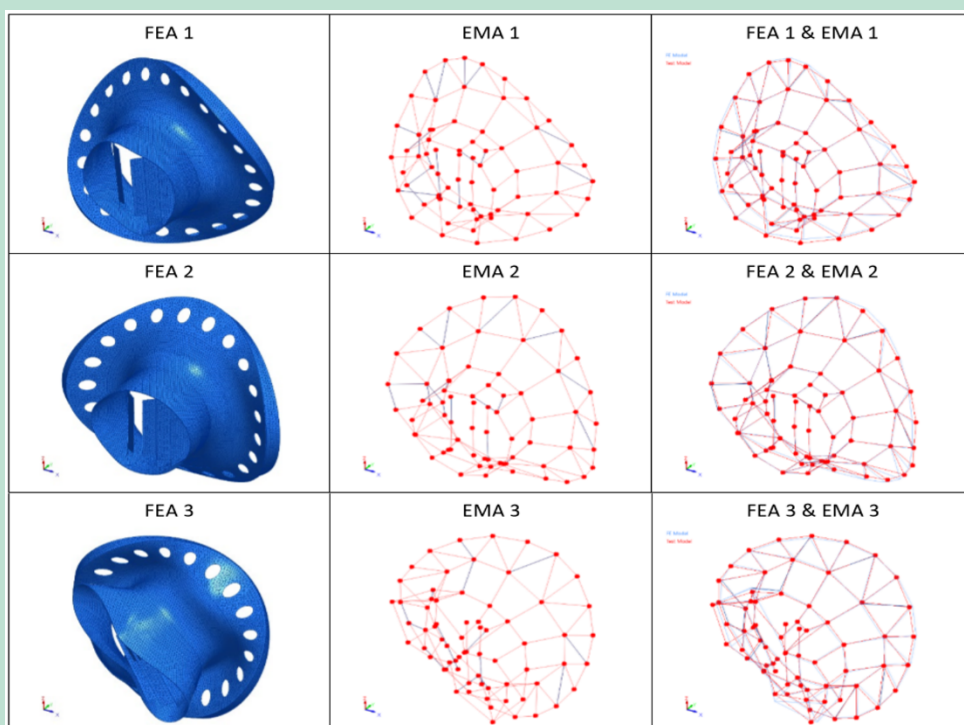
FIGUR 77. De 3 første mode shapes visualiseret, FE model i første kolonne EMA i anden kolonne og “parret” mode i tredje kolonne. For Flow guiding device i 1,0 mm tykkelse.

Resultaterne for Flow guiding device i 0,7 mm tykkelse viser samme tendens, altså at der generelt er dårligere korrelation mellem FEA og EMA, dog er der ingen ombytninger af modes.



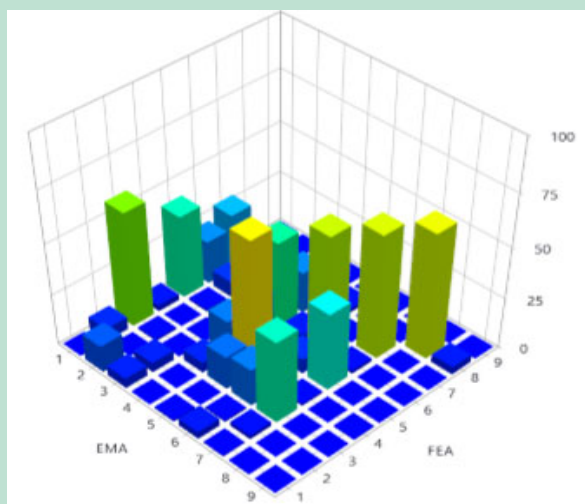
Pair #	FEA	[Hz]	EMA	[Hz]	Δ Freq [%]	MAC [%]
1	1	167.80	1	147.51	13.76	93.5
2	2	199.76	2	185.56	7.65	94.7
3	3	331.38	3	321.69	3.01	58.0
4	4	469.20	4	411.99	13.89	56.9
5	5	496.61	5	424.62	16.95	95.8
6	6	497.89	6	435.24	14.39	97.4
7	7	523.57	7	469.86	11.43	22.5
8	8	658.23	8	537.74	22.41	60.4
9	9	661.99	9	561.77	17.84	58.7

FIGUR 78. Korrelation mellem FE model og test-empne (nederst) samt cross-MAC (øverst) for Flow guiding device i 0,7 mm tykkelse



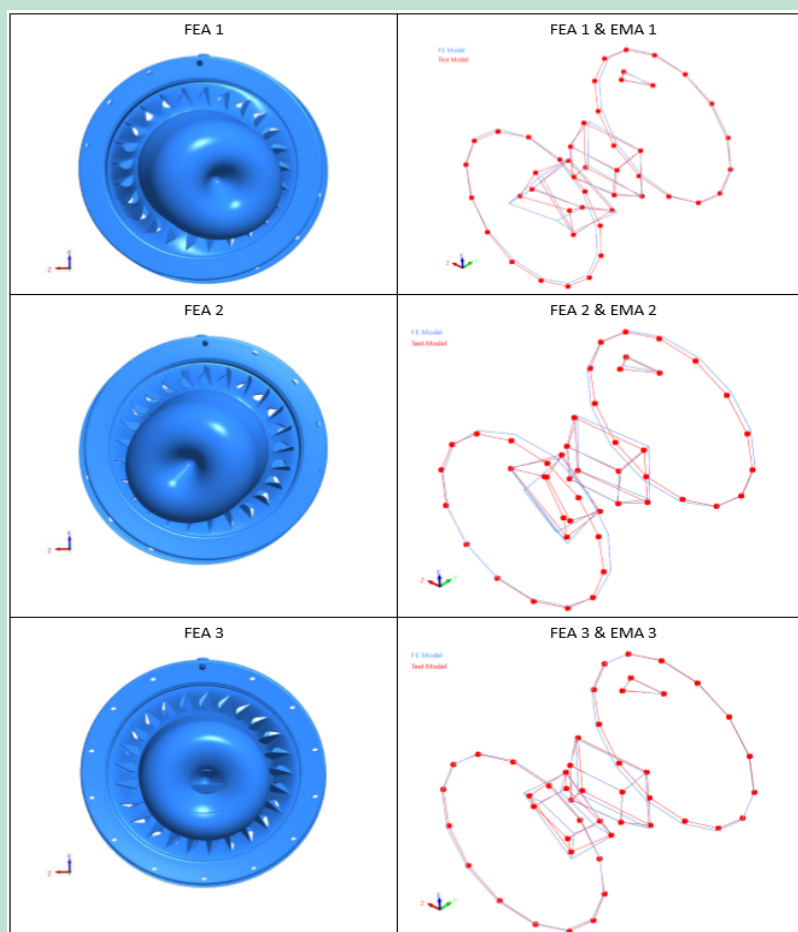
FIGUR 79. De 3 første mode shapes visualiseret, FE model i første kolonne EMA i anden kolonne og “parret” mode i tredje kolonne. For Flow guiding device i 0,7 mm tykkelse.

Afslutningsvis præsenteres resultaterne for den samlede mixer (alle komponenter i 1,5 mm). På FIGUR 80 ses korrelationsanalysen og på FIGUR 81 de parrede mode shapes. Korrelationen er omkring 50 % og der er, i de lave frekvenser, mange ombytninger af modes.



Pair #	FEA	[Hz]	EMA	[Hz]	Δ Freq [%]	MAC [%]
1	1	434.15	2	409.73	5.96	13.1
2	2	435.38	3	422.00	3.17	4.8
3	3	437.34	1	400.75	9.13	56.3
4	4	615.68	5	567.48	8.49	65.1
5	5	618.84	4	555.47	11.41	20.5
6	6	622.73	6	605.49	2.85	59.9
7	7	642.17	7	625.27	2.70	60.7
8	8	756.20	8	712.31	6.16	61.6

FIGUR 80. Korrelation mellem FE model og test-emne (nederst) samt cross-MAC (øverst) for den samlede mixer



FIGUR 81. De 3 første mode shapes visualiseret, FE model i første kolonne EMA i anden kolonne og "parret" mode i tredje kolonne. For den samlede mixer.

6.4.1 Diskussion

Alle modes blev parret succesfuldt ved at benytte en kombination af MAC værdier og visuel evaluering af mode shapes. Generelt estimerede FE modellen højere frekvenser en testemnet. Resonansfrekvenser for Swirling baffle, Flow guiding device og Ydre krop øges drastisk når de samles til den samlede mixer. Rækkefølgen af de individuelle mode shapes er valideret for alle modes.

Mode shapes der relaterer sig til symmetrien af delkomponenter i den samlede mixer struktur, kan optræde i enhver orientering omkring symmetriaksen, men de mode shapes der relaterer sig til ikke-symmetriske komponenter, vil have en fast orientering der ikke tillader at mode shapes kan roteres for at finde det bedste match. En struktur der består af en kombination af symmetriske og ikke symmetriske dele, har vist sig at øge kompleksiteten forbundet med at identificere og forbinde de individuelle modes, det er årsagen til at korrelationsresultaterne er så lave.

Afvigelsen i vægt mellem den samlede mixer som test-empne og FE model er 4 %. Når massen af individuelle dele rettes, kan en ny sammenligning mellem EMA og FE model foretages. For at forbedre resultaterne kunne antallet af frihedsgrader øges, både ved at føje flere punkter til, men også ved at føje flere frihedsgrader til hvert punkt, det kan opnås ved at bruge tri-axiale accelerometre. Kombination af accelerometre inde i den samlede mixer og "roving hammer-metoden" fungerede tilfredsstillende.

7. Arbejdspakke 6 – Testopstilling og validering

Dette afsnit omhandler dels produktionen af prototyper og komponenter til test, samt udførsel af test på systemniveau, dvs. test på mixeren i forbindelse med katalysatorer og andre komponenter der udgør et efterbehandlingssystem der kan møde EU VI-normen.

NOx-reduktionsfordelingstest og deposit-test er udført på motorprøvestand, mens vibrations-valideringen er foretaget på shaker med varm gas ledt igennem systemet.

7.1 Prototypeproduktion

State of art mixer består typisk af mange komplicerede komponenter udført i rustfast stål. I serieproduktion kan sådanne komponenter sagtens presse eller dybtrækkes, men for prototypeproduktion vil sådanne værktøjer være forbundet med alt for store omkostninger, derfor blev forskellige produktionsmetoder kortlagt i forbindelse med prototypeforberedelsen, se TABEL 15.

TABEL 15. Fremstillingsmuligheder til prototyper i rustfast stål

	ISF (incremental sheet metal forming)	Additive fremstillingsprocesser (3D print)	Spinning	Presning/ dybtræk	Hydroforming
Tidsforbrug	Hurtig	Hurtig	Semihurtig	Semihurtig	Konventionel
Enhedsomkostninger	Medium	Høj	Medium	Lav	Lav
Investering i maskiner	Meget stor	Meget stor	Stor	Meget stor	Meget stor
Behov for særligt værktøj	Nej	Nej	Ja	Ja	Ja
Kompleksitet	Høj	Høj	Lav	Lav	Høj

Baseret på den kortlægning blev komponenter fremstillet ved spinning. Spinning har den begrænsning at emnerne skal være aksesymmetriske. I dette tilfælde udgør den begrænsning ikke et problem.

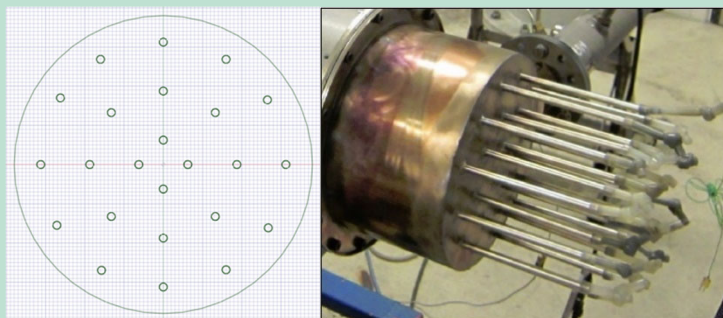
7.2 Test til validering af NOx-reduktionsfordeling

Dinex Uniformity Test foretages ved stationære lastpunkter på en motorprøvestand. Lastpunktet er i dette tilfælde valgt så det svarer til simuleringerne foretaget i afsnit 3.3, ligeledes afspejler systemet, det layout der er beskrevet i afsnit 3.3.1. Testen foretages uden ammoniak oxidationskatalysator for at undgå at overskydende ammoniak omdannes til NOx. Formålet med testen er at bestemme fordelingen af ammoniak på forsiden af SCR'en under antagelse af at NOx reagere med ammoniak i forholdet 1:1.

Outputtet er en grafisk repræsentation samt et Uniformity Index – efter samme formel som vist i afsnit 2.1.2.

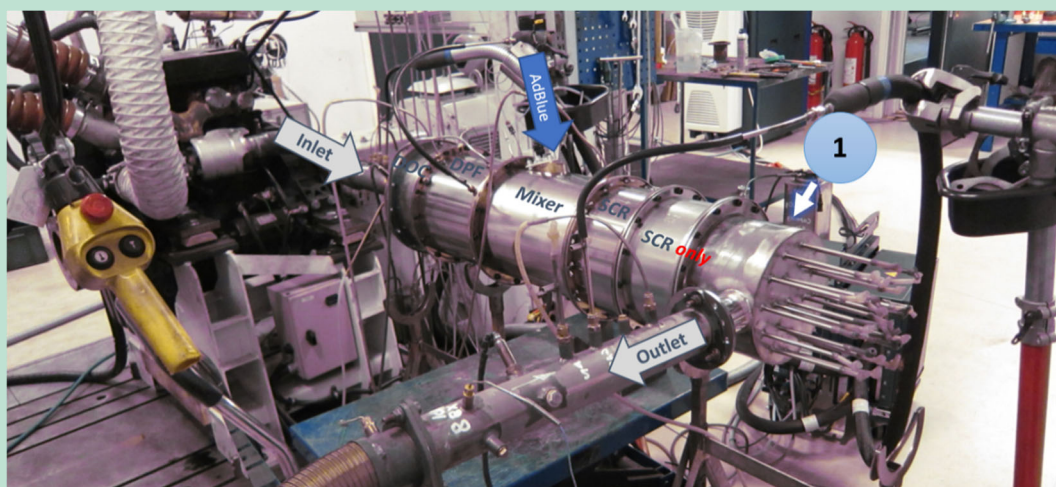
7.2.1 Metodebeskrivelse og procedure

For at foretage denne test, konstrueres et *fordelingsmodul*, fordelingsmodulet erstatter det almindelige afgangsparti. Fordelingsmodulet er en variation af et afgangsparti hvori der er installeret et antal tynde rør der slutter få mm fra katalysatorens afgangsside, derved kan man optage en måling af gaskoncentrationen der er repræsentativ for et specifikt punkt. De tynde rør er fordelt ensartet over afgangsarealet af katalysatoren. Fordelingsmodul-layoutet er vist på FIGUR 82.



FIGUR 82. Fordelingsmodul

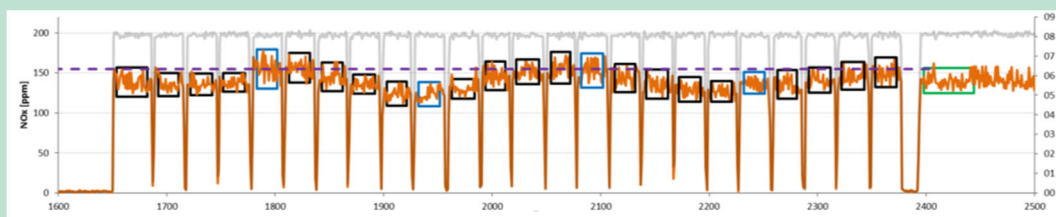
Test opstillingen er vist i FIGUR 83, det ses hvordan systemet er samlet med flanger for at sikre nem udskiftning af specifikke komponenter.



FIGUR 83. Test-opstilling på motorprøvestand til fordelingstest. 1 angiver fordelingsmodulet.

Før testen startes, kontrolleres nogle specifikke parametre for at sikre reproducerbarheden af test. Først varmes motoren op og kølevæsketemperaturen kontrolleres. Gasanalytatorer (Fourier-Transform Infrared Spectroscopy spektrometer) sluttes til og korrekt opstilling vælges i loggersoftware. Når motoren er varmet op, findes driftspunktet hvorefter system tillades at stabilisere over en periode. Dernæst påbegyndes dosering, hvorefter NO_x niveauet tillades at stabilisere. Nu kan selve dataopsamlingen påbegyndes.

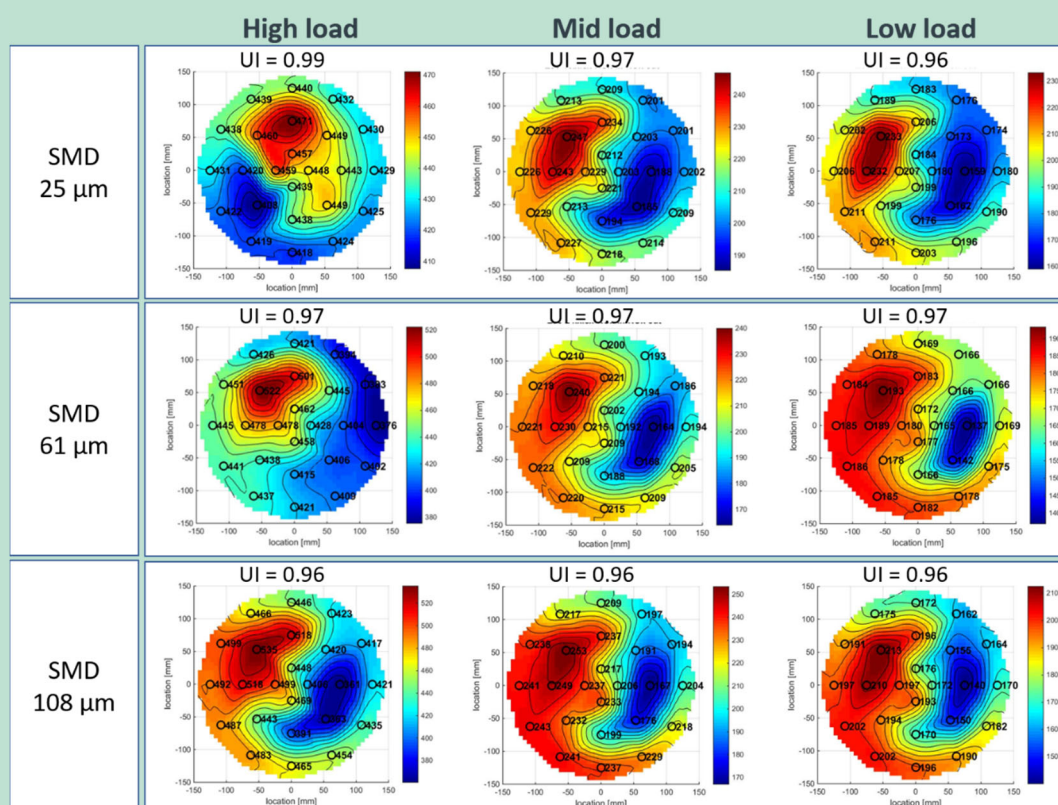
Dataopsamlingen foregår ved at et samplingrør flyttes mellem de (i dette tilfælde) 24 målerør på fordelingsmodulet, man måler i hvert punkt i 30 sekunder. Det rå data kan visualiseres som i FIGUR 84. I databehandlingen bestemmes start/stop af måle-sekvens i hvert punkt automatisk for at sikre uafhængighed af testoperatøren.



FIGUR 84. Rå-data fra fordelingsmåling.

7.2.2 Resultater af fordelingstest

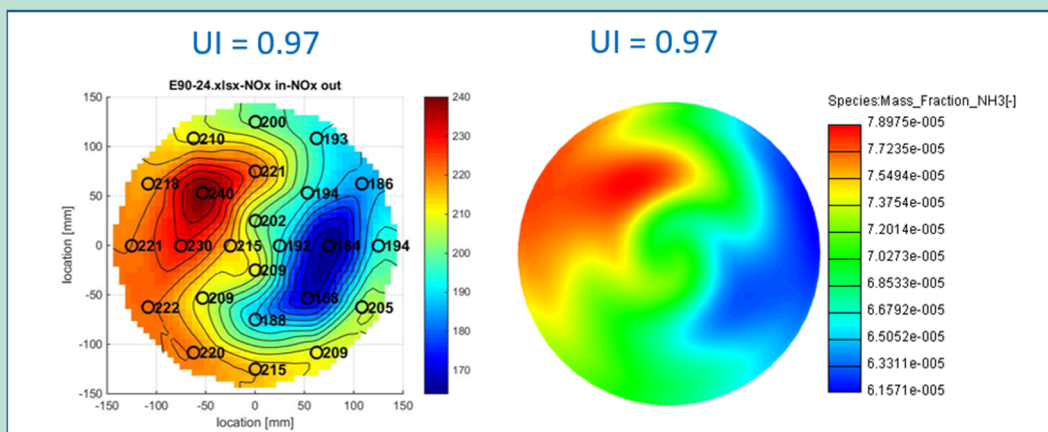
Test-dataene kan visualiseres så de kan bruges i direkte sammenligning med resultaterne vist i Arbejdspakke 2. Resultaterne for det Ø9,5" system der er valgt som reference, på tværs af de forskellige doseringsmoduler og lastpunkter, er vist i FIGUR 85. I overensstemmelse med simuleringer ses et system der synes robust i forhold til lastpunkt, sammenhængen mellem dråbestørrelse og fordeling synes også i overensstemmelse med simulering.



FIGUR 85. Resultater af fordelingstest for Ø9,5" referencesystem

7.2.3 Sammenligning med CFD-simulering

En nærmere sammenligning mellem testresultat og simuleringresultat er vist i FIGUR 86. Der ses en god overensstemmelse mellem de to konturer, dog er der ikke en tydelig sammenhæng mellem de absolutte størrelser. Hvilket bl.a. skyldes at reduktionsreaktionerne i katalysatoren ikke løses i simuleringen.



FIGUR 86. Sammenligning mellem test og simulering i et lastpunkt.

Et mere komplet overblik er vist i TABEL 16 herunder. resultaterne vist i FIGUR 86 er fremhævet i tabellen med fed og kursiv.

TABEL 16. Sammenligning på Uniformity Index mellem test og CFD-simulering

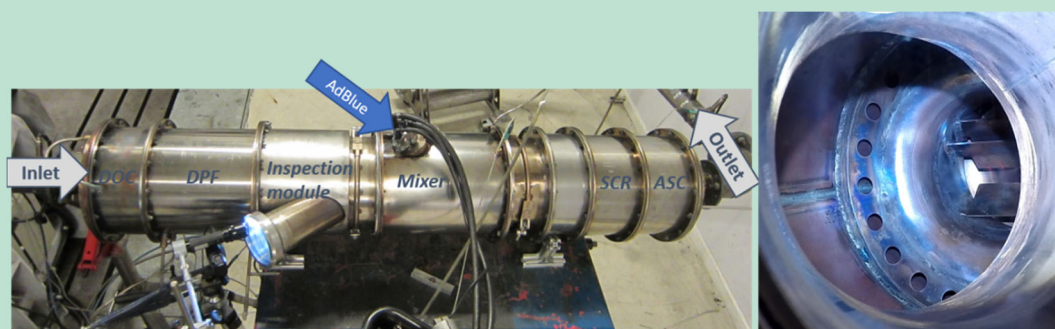
	Høj last		Medium last		Lav last	
	Test	CFD	Test	CFD	Test	CFD
25 µm SMD	0.99	0.98	0.97	0.92	0.96	0.96
61 µm SMD	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
108 µm SMD	0.96	0.94	0.96	0.94	0.96	0.93

7.3 Test til validering af krystalliseringsrisiko

For at evaluere krystalliseringsrisikoen (depositriskoen) blev et særligt modul designet og fremstillet, beskrivelsen kan findes i afsnit 2.3, modulet tillader in-situ observation af systemet under drift. Det tillader en hurtig kvalitativ vurdering af hvornår formationen af deposits forekommer (under hvilke forhold). Man kan derfor hurtigt lave en parametervariation med henblik på at bestemme kritiske forhold.

7.3.1 Metodebeskrivelse og procedure

Testen foretages på motorprøvestand, systemet er et fleksibelt referencesystem hvor in-situ deposit-modulet er monteret, forsøgsopstillingen kan ses på FIGUR 87.



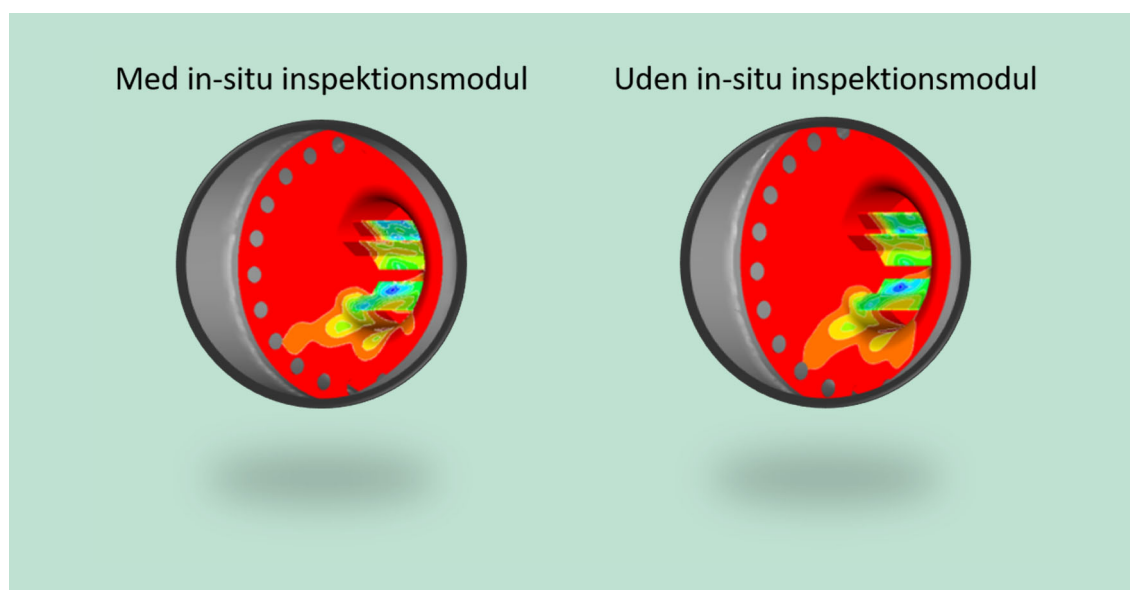
FIGUR 87. Venstre; deposit test setup, højre; et kig i in-situ deposit modulet

Opstillingen instrumenteres yderligere med et kamera der laver timelaps optagelser samt en lyskilde. Testen er foretaget ved 4 stationære load points karakteriseret ved samme temperatur og varierende gasmassestrøm, i hvert load point øges doseringen indtil deposits kan bekræftes visuelt.

Startende ved lavest gasmassestrøm doseres i hvert trin i 15 minutter indtil deposits kan bekræftes visuelt. Dernæst findes det næste gasmassestrøms-punkt og der doseres igen i 15 minutters intervaller med gradvist øget doseringsmængde. Processen gentages yderligere et vilkårligt antal gange indtil man i bedste fald har kortlagt mixerens operationsområde. I dette tilfælde er kørt 4 gasmassestrømme i et særligt kritisk temperaturområde.

7.3.2 Validering af metode

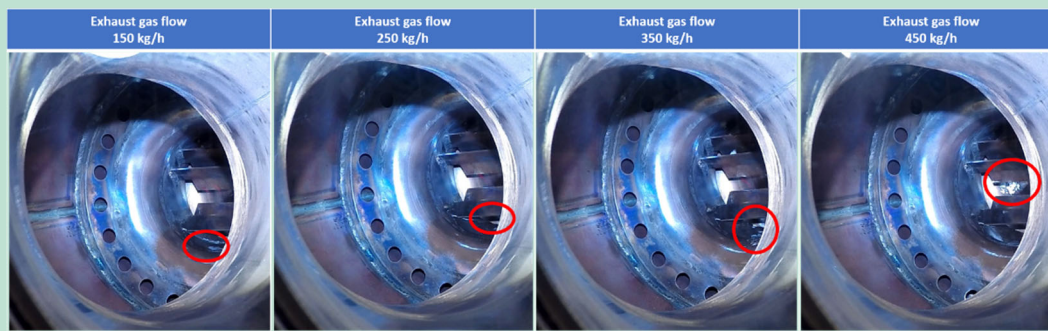
For at sikre at in-situ modulet ikke forstyrrer flowet, eller på anden vis påvirker sprayudviklingen eller formationen af deposits, simuleredes en af de karakteristiske laster både med og uden modulet. En direkte sammenligning af de to simuleringer kan ses på FIGUR 88. Billederne viser ståltemperaturen på mixergeometrien, det ses på farvekonturerne at der kun er en lille forskel (temperaturgrænsen på de to konturplot er den samme).



FIGUR 88. CFD-simulering med og uden in-situ inspektionsmodul

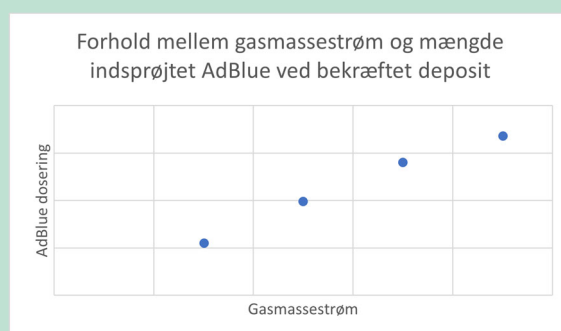
7.3.3 Resultater

På FIGUR 89 ses visuelt bekræftet deposit for de 4 specifikke gasmassestrømme. Det ses at depositformationen synes at bevæge sig gennem mixeren i flow retningen når gasmassestrømmen øges.



FIGUR 89. Depositformation i mixeren

Ses på doseringsmængden som en funktion af gasmassestrømmen ses en næsten lineær sammenhæng, se FIGUR 90.



FIGUR 90. Forhold mellem gasmassestrøm og visuelt bekræftet deposit

7.4 Mekanisk test; validering ved shakertest

Til den mekaniske test er testobjektet udført i 1,5 mm stålplade da de tynde mixerkomponenter var meget svære at slutmontere, varmepåvirkningen fra svejsningen gjorde det umuligt at beholde den ønskede form af de individuelle dele.

Testobjektet er et udstødningssystem med mixeren er inkluderet for at simulere virkelige betingelser, udstødningssystemet har samme layout som beskrevet i afsnit 3.3.1.

Den mekaniske test består af 4 dele;

1. Sinus sweep i alle 3 på hinanden vinkelrette akser - før
2. Random vibration i alle 3 på hinanden vinkelrette akser
3. Shock test i alle 3 på hinanden vinkelrette akser
4. Sinus sweep i alle 3 på hinanden vinkelrette akser – efter
5. Post mortem inspektion af forsøg-objektet.

Forsøgs-objektet udsættes for de 4 dele af testen i samme rækkefølge som ovenfor, i fald at strukturelle komponenter fejler undervejs, forstærkes disse og testen fortsættes. Del 1. foretages mens varm luft sendes igennem systemet for at simulere virkelige operationsforhold.

Shock test og sinus sweep foretages uden gennemledning af varmluft.

Alle tests gennemføres på en "ETS MPA714" elektrodynamisk shaker. Den varme gas leveres at et system bestående af 4 "Leister LE10000 DF HT" varmeelementer og en "Becker VariAir" blæser. Hele opstillingen er installeret hos Dinex A/S.

7.4.1 Metodebeskrivelse og procedure

Testobjektet monteres med accelerometre og for *random vibration* test, også temperatursensorer. Accelerometrene måler accelerationer i en retning.

Når objektet er monteret på fiksturet (se afsnit 2.4) foretages den første sinus sweep, formålet med den del af testen er at bestemme systemets dynamiske respons før eventuelle skader indtræffer. Dernæst monteres rørføring til at lede opvarmet luft gennem systemet og systemet opvarmes til at nå en stationær temperatur på afgangssiden. Med temperaturen stabil påbegyndes *random vibration* testen. Som beskrevet i afsnit 2.4 fungerer shakeren som en stor højttaler, når man foretager en *random vibration* test, så afspiller man på højttaleren en sekvens der afspejler et signal målt på et køretøj, det målte signal ordnes som statistiske gennemsnitsværdier i specifikke frekvensområder og afspilles for at simulere den dynamiske påvirkning systemet udsættes for over i sin levetid.

Efter *random vibrations* foretages en shock test, her udsættes systemet for en puls med en meget høj amplitude (g-påvirkning). Afslutningsvis foretages endnu en sinus sweep for at se om systemets dynamiske respons har ændret sig, forskelle i systemets dynamiske respons betyder at strukturen har ændret sig, det er derfor en god indikator for om skader er sket.

Dernæst afmonteres systemet og monteres på ny, således den dynamiske påvirkning har en ny relativ retning, hvorefter hele testprogrammet gentages.

En installation på shakeren er vist i FIGUR 91.

Afslutningsvis laves en *post mortem* en post mortem er en destruktiv evalueringsmetode. Systemet skæres i stykker, del-for-del, så alle de indvendige komponenter og samlinger kan inspiceres. Selve evalueringen foregår i 2 trin, trin 1 er en visuel inspektion med en kraftig lyskilde, trin 2 et check med "Rocol Flawfinder". "Rocol Flawfinder" er en opløsning der sprayes på en særligt præpareret overflade for at få eventuelle revner til at fremstå tydeligere.

7.4.2 Resultater

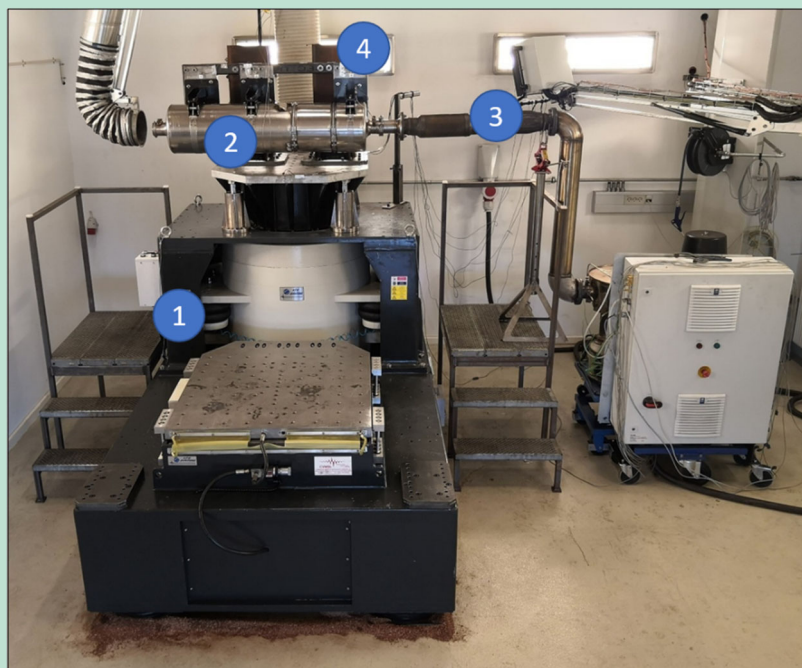
Som tidligere nævnt blev strukturelle komponenter der fejlede forstærket således testen kunne fortsættes. De komponenter der blev forstærket, er således udelukkende ydre, lettilgængelige komponenter, det har altså ingen relevans for mixeren (som sidder utilgængeligt inde i systemet).

Sinus sweep

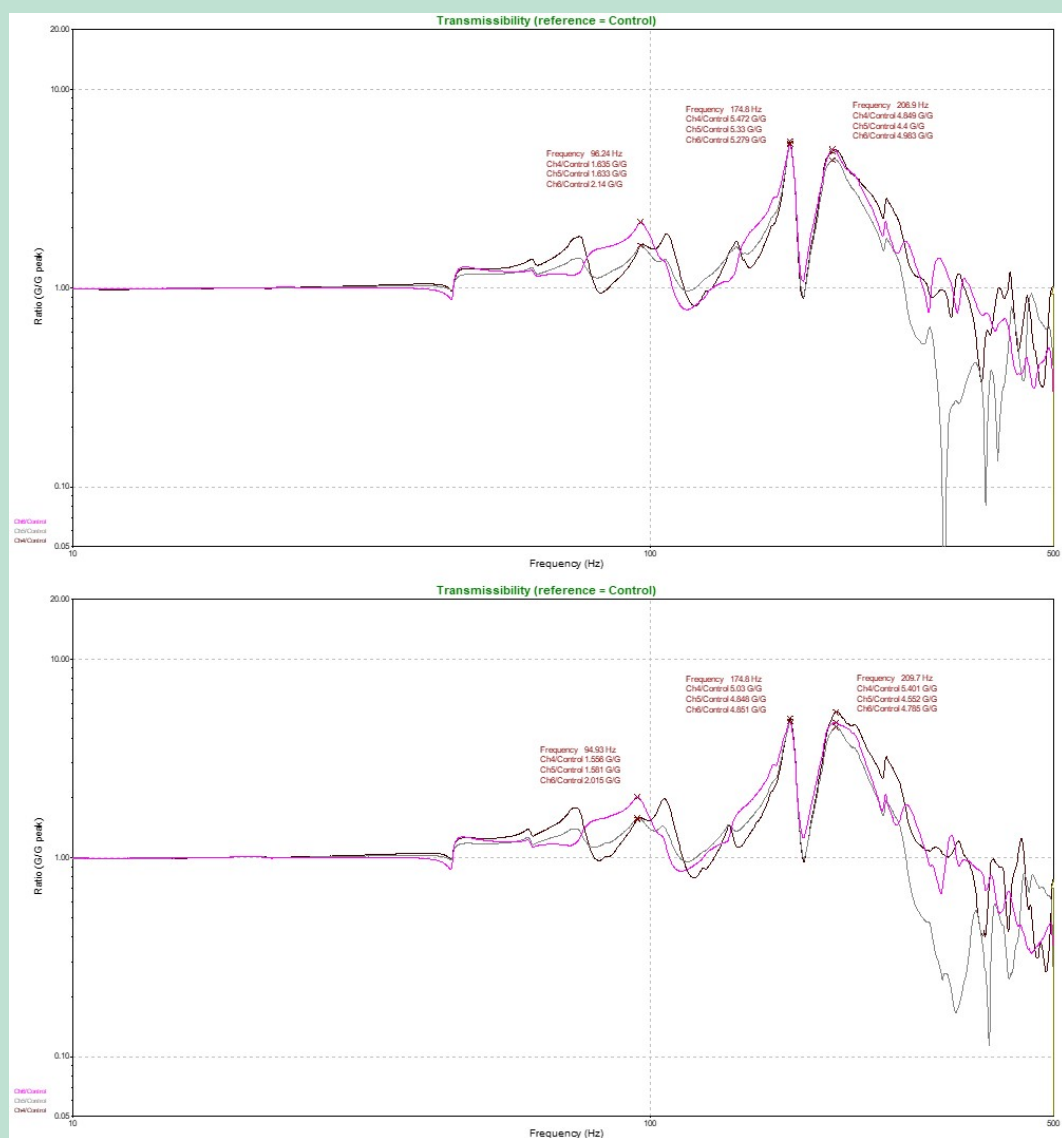
Evalueringen af den dynamiske respons foregår som sammenligning af før/efter overførselsfunktioner, som vist i FIGUR 92, det observeres at de to funktioner er tæt på identiske, altså er der ingen ændring til systemet. Ligeledes indikere de resterende overførselsfunktioner (vertikal, side-side) heller ikke at systemet skal have ændret sig.

Post-mortem

Resultaterne af den destruktive evaluering ses på FIGUR 93. Det noteres at ingen revnedannelse observeres efter "Rocol Flawfinder" påføres.



FIGUR 91. Forsøgsopstilling til mekanisk test på shaker (til test i vertikal retning (op/ned)); 1.: shaker, 2.: udstødningssystem med Compact Mixer, 3.: rørføring til opvarmet gas, 4.: shaker-fikstur



FIGUR 92. Overførselsfunktioner for sinus sweep test i længderetning.



FIGUR 93. Mixer post mortem

7.5 Fremtidigt arbejde

Grundet udfordringer med prototypefremstilling blev alle tests gennemført på 1,5 mm referencemixer. Det betyder også at opvarmningstiden, er evalueret som en del af arbejds pakke 2, i stedet for evalueret gennem test. Der arbejdes på en at implementere en alternativ sammenføjningsmetode der bør gøre det muligt at fremstille prototyper i tyndere materialer – det vil muliggøre en eksperimentel validering af de tidligere nævnte simuleringsresultater. Det vil ligeledes være interessant at gentage depositformations-testen med mixer i tyndere materiale.

8. Arbejdspakke 7 – Management og formidling

Dette afsnit søger at dokumentere projektets udvikling fra start til slut. Til det formål betragtes projektet i lyset af de individuelle statusrapporteringer der er lavet som opfølgning på de periodiske statusmøder.

8.1 Statusmøde 1 (Perioden 15. oktober 2017 til 1. september 2018)

I denne periode blev grundkonceptet defineret og en Patentansøgning blev indgivet.

Der blev afholdt kickoff møder og konceptet blev præsenteret til kundemøder i Italien og Rusland. Den kompakte mixer endte med at indgå i flere applikationsprodukter til en stor russisk kunde, det forventes at der skal sælges omkring 25.000 stk. om året med produktionsstart i 2020.

Der blev produceret et system med den kompakte mixer til udstilling på IAA Commercial vehicles i Hannover med afholdelse september 2018.

8.2 Statusmøde 2 (Perioden 1. september 2018 til 1. marts 2019)

I denne periode blev det endelige design frosset og produktionsmodningen begyndte. Systemet blev udstillet på IAA, hvor der blev demonstreret både modularitet i forhold til doseringssystemer, samt nogle af de studier der demonstrerer fordelene af lav termisk masse (afsnit 3.4). Arbejdspakke 4 var i denne periode særligt udfordret af udfordringer med at imødekomme kravet til gastemperatur.

8.3 Statusmøde 3 (Perioden 1. marts 2019 til 1. september 2019)

Den endelige mixer er blevet simuleret i FEA- og CFD-værktøjer. Mixer dele er blevet valideret i arbejdspakke 5 med gode resultater, der indgyder tro på at strukturen kan håndtere den dynamiske belastning den udsættes for på køretøjet. Vindtunnellen til arbejdspakke 4 er færdigdesignet og produceret.

Mixeren skaber i denne periode stor interesse hos indiske kunder, hvor Dinex er i færd med at etablere forretning.

8.4 Statusmøde 4 (Perioden 1. september 2019 til 1. april 2020)

I denne periode blev vindtunnellen endelig kørt ind og dataopsamlingen påbegyndt. Der blev produceret tynde (1.0 mm og 0.7 mm) mixerdele til modalanalyse hos SDU.

Projektorganisationen hos Dinex gennemgik i denne periode også store forandringer og en ny projektleder tiltrådte pr. 1. januar 2020.

En første prototype af mixeren til en indisk kunde sendes afsted hvor der er indgået en aftale med et potentiale omkring 25.000-30.000 stk. om året fra udgangen af 2020.

8.5 Formidling

Udover de kommercielle præsentationer til diverse kundemøder. Er der også gennemført præsentationer i offentlige fora;

8.5.1 14th International CTI Conference on SCR Systems

Konferencen blev afholdt i juli 2018 og arbejdet med den kompakte mixer blev præsenteret i et indlæg kaldet "Development of a compact mixer for a modular inline EU6 ATS".

Præsentationen beskrev overvejelser og løsninger i forhold til modularitet (størrelse, doseringssystem og køretøjsapplikation), designudviklingen med fokus på CFDm, prototype produktion og validering i forhold til NOx reduktions fordeling og deposits.

8.5.2 15th International CTI Conference on SCR Systems

Konferencen blev afholdt i juli 2019 og indlægget havde titlen "Development of SCR mixers for EU6 heavy duty in emerging markets". Overskrifterne for denne præsentation var design verifikation gennem CFD og FEA samt NOx fordeling og deposit, hvor en ny metode, som beskrevet i afsnit 7.3, blev præsenteret.

8.6 Status ved projektets afslutning

Mixeren er siden blevet foreslået i to forskellige applikationer til to forskellige kinesiske kunder. En prototype skal produceres, sendes og evalueres af kunden i nær fremtid.

Der er iværksat undersøgelser af andre sammenføjningsmetoder til at samle mixere med meget tynde pladedele, hvor de tynde pladedele vil blive lavet på serieværktøjer og processer. Derudover skal vindtunnelen bruges i et projekt til evaluering af en ny type dyse, der skal være med til at forberede Dinex på en kommende EU7 emissionsnorm.

9. Bibliografi

- Barlow, J., Rae, W., & Pope, A. (1999). Low-speed wind tunnel testing.
- Bashkatov, A. N., & Genina, E. A. (2003). Water refractive index in dependence on temperature and wavelength: a simple approximation. *Saratov Fall Meeting 2002: Optical Technologies in Biophysics and Medicine IV* (s. 393-395). International Society for Optics and Photonics.
- Bell, J. H., & Mehta, R. D. (1989). Boundary-layer predictions for small low speed contractions. *AIAA J.*, vol 27, no. 3, 372-374.
- Dantec Dynamics A/S. (02. 10 2020). *SprayExplorer*. Hentet fra Dantec Dynamics: <https://www.dantecdynamics.com/solutions-applications/solutions/spray-and-particle/phase-doppler-anemometry-pda/sprayexplorer/>
- Warren, J. R., & Gordon, J. A. (1966). On the refractive indices of aqueous solutions of urea. *The Journal of Physical Chemistry* (s. 297-300). ACS Publications.

Kompakt mixer med lav termisk masse

Projektets formål har været at lave en kompakt mixer med lav termisk masse til tunge køretøjer. Den tekniske løsning har i projektet to sider. Den ene side handler om produktets emissionsperformance, mens den anden side handler om produktets strukturelle integritet.

Produktets design har i første omgang været drevet af emissionsperformance, det direkte input er kommet fra Computational Fluid Dynamics (CFD) simulering. For at validere resultaterne er der dels foretaget test i vindtunnel og dels på motorprøvestand. Der er vist en god overensstemmelse mellem simulering og test på motorprøvestand, på tværs af de forskellige variationer. Korrelationen mellem simulering og test i vindtunnel, var i overordnede træk gode, mens der var en nogle uoverensstemmelser i detaljen (specifikke dråbestørrelser/-hastigheder).

For at sikre at produktet kan overholde kravene til holdbarhed og styrke er der lavet Finite Element Analysis (FEA) og Experimental Modal Analysis (EMA). Resultaterne viste at den kompakte mixers strukturelle integritet vil leve op hvad der forventes. Afslutningsvis blev der lavet en shakertest på et komplet system, hvor det dokumenteres at mixeren kan holde i den forventede levetid.

Det viste sig vanskeligt at fremstille prototyper i de meget tynde stålplader, så selvom de strukturelle undersøgelser (FEA og EMA) indikerer at produktet er holdbart og CFD-simuleringer viser 37,5 % hurtigere opvarmningstid end referencesystemet, har det ikke været muligt at dokumentere i fuld skala.

For at bringe projektet videre ses der på alternative sammenføjningsmetoder til at samle mixeren.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk