

# Udvikling af Regenerativt Kølet Roterende Detonationsmotor til Luftfart

## 1. Introduktion

- \* En turbojet-motor bruger en termodynamisk cyklus, der hedder 'Brayton-cyklussen'.
- \* En detonations-motor bruger Humphrey-cyklussen, der er op til **25%** mere effektiv. (Se Fig. 1)
- \* En detonation kan løbe rundt i ring, kan på den måde opretholdes i en roterende detonationsmotor (RDM)
- \* Eksisterende luftåndende RDM (dvs. RDM som bruger luft som oxidationsmiddel) overopheder ved langvarig operation.

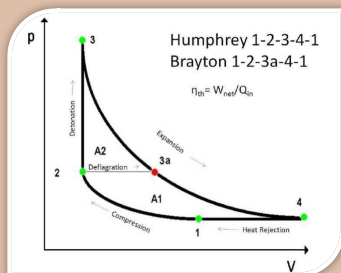


Fig. 1 Sammenligning mellem termodynamikken i Humphrey og Brayton cyklusserne. Begge cyklusser består først af kompression (1), og derefter giver detonationen i Humphrey cyklusen en isokor proces, så trykket og temperaturen stiger så hurtigt at ingen energi går tabt (3). Brayton cyklusen har derimod en Isobar proces (3a), hvor energi går tabt ved opvarmning af gassen før den kan udføre arbejde. Begge cyklusser slutter derefter med en adiabatisk proces hvor gassen udfører arbejde (4). Humphrey cyklusen er således en forbedret version af Brayton cyklusen.

## 2. Problem

*Hvordan kan man udvikle en luftåndende roterende detonationsmotor, som i praksis kan bruges af flyvemaskiner til at generere fremdrift i luften?*

## 3. Mål

*Målet med projektet er, at bygge en RDM, som kan køre kontinuerligt i mindst 5 minutter ad gangen.*

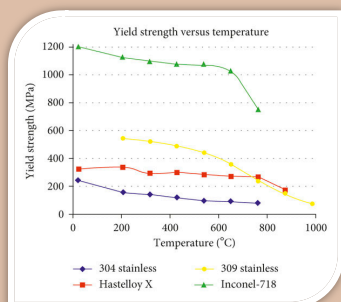


Fig. 4. Kurve som sammenligner ydestyrken af Inconel 718 med forskellige legeringer af stål ved forskellige temperaturer.

## 4. Design

- \* Samme specifikationer som TU Berlins RDM (Se Fig. 2)
- \* Centrifugal Kompressor
- \* Eksisterende luftåndende RDM
- \* 2 Konfigurationer af regenerativt kølesystem: *Kølekanaler og Hul Væg* (Se Fig. 3)
- \* SLM fremstilling for ensformighed og kompleks kølesystem-geometri

## Metode

### 5. Materialevalg

- Inconel 718:**
- \* Nikkel-Krom legering
  - \* Bruges allerede i jetmotorer
  - \* Holder bedre styrke end stål, også ved  $T > 1000^{\circ}K$  (Se Fig. 4)
  - \* Kan fremstilles additivt (3D-print)

### 6. Brændstof

- Brint H<sub>2</sub>**
- \* Minimal cellestørrelse  $\lambda_{H_2} = 4,9mm$  betyder mindre motor.
  - \* Bæredygtig og CO<sub>2</sub> neutral.
  - \* Ophobes ikke ved læk.
  - \* God til køling.

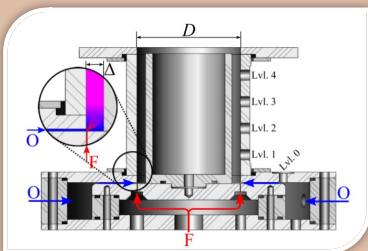


Fig. 2. Tværnsnitdiagram af TU Berlins RDM. F viser brændstof, og O viser luftveje. Vores RDM er en forbedring af dette design

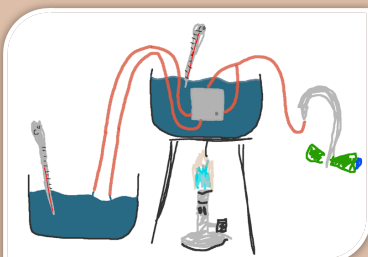


Fig. 5. Skitse af forsøgsdesign til test af forskellige kølesystems-konfigurationer.

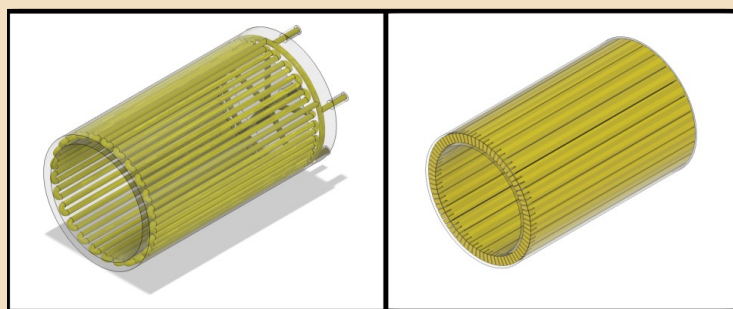


Fig. 3. Rendinger som illustrerer kølekanals-konfigurationerne som testes i forsøget. Forbrændingskammerets vægge er gennemsigtige. Der vises kun kølekanalerne i den inderste væg, og disse er farvet gule.

## 7. Tests

### Test af kølesystemer

- \* Motormodel placeres i vandbad ved konstant  $T = 70^{\circ}C$ . Kølesystemet forbindes til kold vandhane, og udgangen fører hen i en tom beholder (se Fig. 5 & 6).
- \* Det kolde vand tændes, og der ventes  $t = 20s$
- \* Efter forsøget måles temperaturen og vægten af vandet i den kolde beholder.
- \* Resultatet behandles med:

$$P = \Delta T \cdot c \cdot \frac{m}{t}$$

Køleeffekt,  $P$ , af konfigurationerne sammenlignes.

### Quasi-1D Simulation

Vi ville udføre en quasi-1D simulation af motoren for at undersøge varmeudvikling inde i motoren.

### Test af færdig prototype

Motoren testes i en shipping container hos DanSTAR. Motoren holdes tændt i 5 minutter, mens den overvåges med et termisk kamera, så den kan stoppes hvis den begynder at overophede.

### CHT-simulationer

Conjugate Heat Transfer (CHT) simulationer benyttes til at simulere effekten på kølesystemerne. Der simuleres det tidligere nævnte forsøg samt kølesystemet under reel operation af en RDM. Data behandles som i forsøget med test af kølesystemer.

## Resultater

### Fysisk test af kølesystem

- ! Kølekanal designet viste gennemsnitlig køleeffekt på 897W
- ! Hul-væg designet viste gennemsnitlig køleeffekt på 534W
- ! Hul-væg designet fejlede katastrofalt under første test og krævede re-design.

Symbol	$m$	$\Delta T$	$t$	$P$
1. Kanal design	1,179 kg	3,3 K	20 s	814 W
2. Kanal design	1,164 kg	4,0 K	20 s	974 W
3. Kanal design	1,166 kg	3,7 K	20 s	903 W
1. Hul-væg design	1,943 kg	1,7 K	20 s	691 W
2. Hul-væg design	2,019 kg	0,8 K	20 s	338 W
3. Hul-væg design	2,110 kg	1,3 K	20 s	574 W

Tabel 1. Data fra forsøget samt udregnet effekt.

### CHT-Resultater

- ! Hul-væg designet har en køleevne på 3716W
- ! Kanal-designet havde en køleevne på 5342W

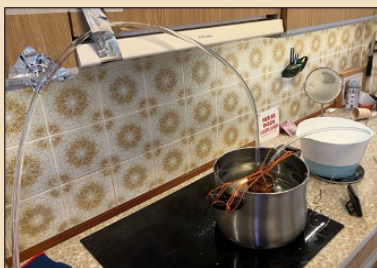


Fig. 6. Forsøgsopstillingen til sammenligning af kølesystemer, holdt sammen af gaffatape og drømme.

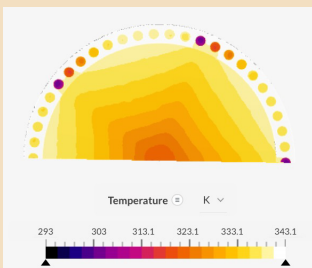


Fig. 7. Horisontalt tværsnit af Kanal-designet. De forskellige kanaler ses repræsenteret som de cirkulære rør, hvor farven indikerer temperaturen på vandet der løber igennem. Det kan ses at temperaturændringen stopper ved den 5-6 kanal.

## 8. Diskussion

- ! Designet bruger både Inconel 718 og regenerativ køling, i modsætning til alle forrige RDM, og kan derfor potentielt køres kontinuerligt i længere tid ad gangen.
- ! Quasi-1D simulationen gør brug af AISTJAN software, som ikke er tilgængelig længere.
- ! Der fandtes lækager i forsøgsopstillingen og begge forsøgsmodeller deformerede.
- ! Både forsøgsdata og CHT viser at kanal designet fungerer bedst.
- ! Der findes en afvigelse mellem effektforskel på forsøgsdata og CHT på 10,04 procentpoint.

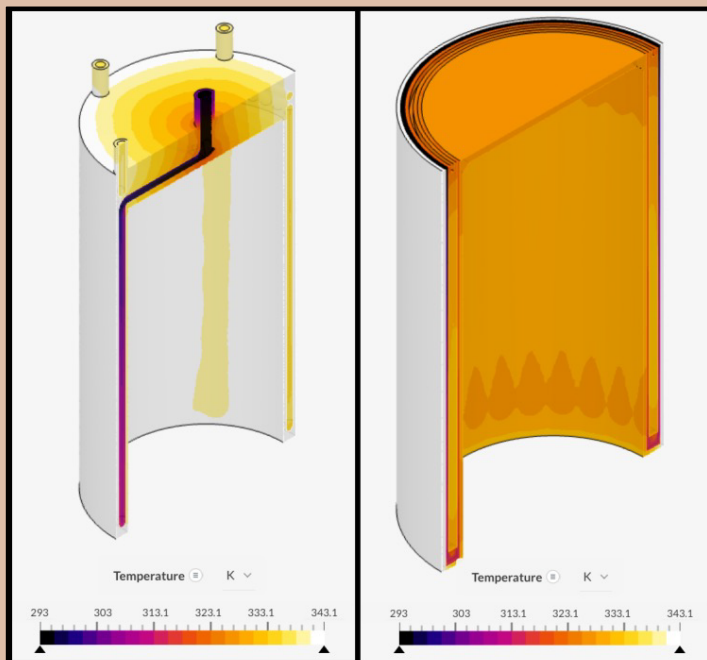


Fig. 8. Vertikale tværsnit af kølesystemerne, hvor farven indikerer temperaturen på vandet der løber igennem. Det kan ses at temperaturen holder op med at ændre sig omkring den 5 og 6 kanal.

## 10. Konklusion

Dette studie har brugt følgende proces med henblik på at udvikle en RDM som kan køre i mindst 5 min ad gangen:

- ! Litteratursøgning
- ! Iterativ CAD modellering af prototype
- ! Praktisk forsøg til at finde den bedste kølekonfiguration
- ! Simulation til validering af forsøg samt test under rigtige omstændigheder

Fremstilling og test af prototypen er nødvendig for definitiv konklusion.

## 11. Perspektiver

Yderligere nødvendig forskning før kommerciel brug af RDM:

- ! Kølesystemet videreudvikles for endnu længere holdbarhed i praktisk anvendelse.
- ! Der skal observeres hvor mange arbejds cyklusser en RDM kan klare før den skal udskiftes.
- ! Udvikle deres brug som forbrændingskammer koblet til en turbinesektion der driver kompressoren (Turbojet-konfiguration).