

อกิฉนัฒนาคาร



สำนักหอสมุด



การจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยใช้วิธีวิเคราะห์แบบปฏิสัมพันธ์  
ระหว่างของไหลและโครงสร้างในส่วฉนขุดแลกเปลี่ยฉนความร้อน

Numerical simulation of a Stirling engine based on Fluid structure  
interaction analysis in heat exchangers

นายจิรศักดิ์ หิมะ 56361884  
นายจิรายุ อุดทน 56361891  
นางสาวชญาฉนสิษฐ์ บัวแก้ว 56361907

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์  
วันลงทะเบียน..... 14 ก.ย. 2559  
เลขทะเบียน..... 19181935  
เลขเรียกหนังสือ.....

ป/ร  
จ 513 ก  
2559

โครงร่างปริญญาฉนพฉนนี้เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

ปีการศึกษา 2559



## ใบรับรองโครงการงานวิศวกรรม

**หัวข้อโครงการ** : การจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยใช้วิธีวิเคราะห์แบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างในส่วนชุดแลกเปลี่ยนความร้อน  
Numerical simulation of a Stirling engine based on Fluid structure interaction analysis in heat exchangers

**ผู้ดำเนินโครงการ** : นายจิรศักดิ์ หิมะ 56361884  
นายจิราญ อดทน 56361891  
นางสาวชญาณิศร์ บัวแก้ว 56361907

**อาจารย์ที่ปรึกษา** : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขวัญชัย ไกรทอง  
**ภาควิชา** : วิศวกรรมเครื่องกล  
**ปีการศึกษา** : 2559

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี อนุมัติให้โครงการวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการสอบโครงการ

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขวัญชัย ไกรทอง)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนันต์ชัย อยู่แก้ว)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นินนาท ราชประดิษฐ์)

**หัวข้อโครงการ** : การจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยใช้วิธีวิเคราะห์แบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างในส่วนชุดแลกเปลี่ยนความร้อน  
 Numerical simulation of a Stirling engine based on Fluid structure interaction analysis in heat exchangers

**ผู้ดำเนินโครงการ** : นายจिरศักดิ์ หิมะ รหัส 56361884  
 นายจिराय อุดทน รหัส 56361891  
 นางสาวชญาณิสฐ์ บัวแก้ว รหัส 56361907

**อาจารย์ที่ปรึกษา** : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขวัญชัย ไกรทอง

**ภาควิชา** : วิศวกรรมเครื่องกล

**ปีการศึกษา** : 2559

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการจำลองเชิงตัวเลขของกระบวนการทำงานภายในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยใช้วิธีวิเคราะห์แบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างโดยใช้เครื่องยนต์สเตอร์ลิง SEB-100 สำหรับทำงานที่อุณหภูมิปานกลางเป็นกรณีศึกษา โดยในการจำลองนี้จะพิจารณาผลของความร้อนที่สูญเสียผ่านโครงสร้างของชุดแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งมีผลทำให้ค่าสมรรถนะของเครื่องยนต์ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์แบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างแบบถ่ายเทความร้อนชนิดเชื่อมต่อ ถูกเปรียบเทียบกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณซึ่งพิจารณาเฉพาะในส่วนของของไหล

จากผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่สภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ที่อุณหภูมิผิวส่วนรับความร้อนเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส ความดันอากาศที่เติมเท่ากับ 7 บาร์ พบว่าการจำลองที่พิจารณาผลของความร้อนที่สูญเสียผ่านโครงสร้างของชุดแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการวิเคราะห์แบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างให้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิในส่วนรับความร้อนและส่วนคายความร้อนมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการสูญเสียความร้อนที่เกิดขึ้นผ่านโครงสร้างของชุดแลกเปลี่ยนความร้อนจากส่วนรับความร้อนไปที่ส่วนคายความร้อน

**Project Title** : Numerical simulation of a Stirling engine based on Fluid structure interaction analysis in heat exchangers

**Name** : Mr. Jirasak Hima Code 56361884  
Mr. jirayu Aodton Code 56361891  
Miss. Chayanit Buakaew Code 56361907

**Project Advisor** : Assistant Professor Kwanchai Kraitong

**Department** : Mechanical Engineering

**Academic Year** : 2016

---

### Abstract

This project works on the numerical simulation of a Stirling engine based on fluid structure interaction analysis, FSI, by using a medium temperature difference SEB-100 Stirling engine as a case study. This modelling considered in an internal heat loss throughout the structure of all heat exchangers that it effected on the engine performance. The results obtained from fluid structure interaction analysis with the conjugate heat transfer were compared to the results obtained from the simulation with computational fluid dynamics model.

From the numerical results under the working condition of the heater space temperature of 500 °C and the charged air pressure of 7 bars, it was found that the results obtained from the fluid structure interaction analysis with the conjugated heat transfer presented the temperature difference of gas between the heater space and the cooler space being lower than that of the results obtained from the simulation with computational fluid dynamics model. It showed an internal heat loss occurring throughout the structure of engine from the heater part to the cooler part.



## กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

โครงการวิศวกรรมเครื่องกลฉบับนี้สามารถทำงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทางคณะผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขวัญชัย ไกรทอง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่กรุณาให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินโครงการ ตลอดจนติดตามประเมินผลการดำเนินโครงการมาโดยตลอด ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนันต์ชัย อยู่แก้ว และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นินนาท ราชประดิษฐ์ ที่ช่วยเหลือให้คำปรึกษาและแนะนำความรู้ต่างๆ เพื่อให้โครงการนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณฝ่ายเลขานุการ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการดำเนินโครงการ

ขอบพระคุณบิดาและมารดาที่ให้การอุปการะเลี้ยงดูและสั่งสอนจนกระทั่งสามารถเติบโตมาจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนช่วยอุปการะทางการเงินและคอยให้กำลังใจจนกระทั่งโครงการนี้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ ผู้ดำเนินงานขอมอบคุณงามความดีที่เกิดขึ้นจากโครงการนี้ แต่ผู้มิมีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการทำให้โครงการนี้เสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีและถ้าเกิดข้อผิดพลาดประการใดจากโครงการนี้ ผู้ดำเนินงานต้องกราบขอภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นายจรัสศักดิ์ หิมะ  
นายจिरายู อดทน  
นางสาวชญาณิสร์ บัวแก้ว

## สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงการวิศวกรรม	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญกราฟ	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อ	ญ
บทที่ 1	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 แผนการดำเนินงาน	3
1.6 รายละเอียดงบประมาณที่ใช้	3
บทที่ 2	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 หลักการและทฤษฎี	8
2.2.2 หลักการสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) และ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง (FSI) ใน 3 มิติ	11

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 3	18
3.1 โครงสร้างของแบบจำลองของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	18
3.2 สภาวะการทำงานของเครื่องยนต์	20
3.3 การสร้าง Mesh	23
3.4 การวิเคราะห์แบบจำลอง	24
บทที่ 4	25
4.1 ผลจากแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	25
4.2 ผลการคำนวณจากการทำแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างจากซอฟต์แวร์	27
4.3 ผลการเปรียบเทียบการคำนวณ	29
บทที่ 5	25
5.1 บทสรุป	32
5.2 ข้อเสนอแนะ	32
เอกสารอ้างอิง	34
ประวัติผู้เขียนโครงการ	77

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 การกระจายของแรงดัน(Pa) ในวัฏจักรก๊าซภายในของเครื่องยนต์ ผลการจำลองแบบ CFD ให้ค่า ความดันสูงสุดประมาณ 2.2 MPa ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 200 rpm (3.33 Hz )	4
รูปที่ 2.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้และลวดเหล็กที่ความเร็วต่างๆ (a) ไนโตรเจน และ (b) ก๊าซไฮโดรเจนที่ 0.16 m/s	6
รูปที่ 2.3 เซตข้อมูลการเปลี่ยนแปลงการปฏิรูประบบระบายความร้อน ความเร็ว ความดัน ความหนืด ปั่นป่วนและอุณหภูมิที่ (ทั้งของเหลวและของแข็ง)	7
รูปที่ 2.4 แผนภาพ T-s และ P-v ของวัฏจักรคาร์โนต์ สเตอริง และ อีริคสัน [14]	9
รูปที่ 2.5 เครื่องยนต์สเตอริงประเภท แอลฟา เบตา และแกมมา ตามลำดับ [14]	9
รูปที่ 2.6 รูปแสดงส่วนประกอบ การทำงาน และ ปริมาตรต่างๆของเครื่องยนต์สเตอริงแบบเบตา (SEB-100) ที่ถูกนำเสนอโดย ชนะ ศรีคำ [5]	11
รูปที่ 2.7 กระบวนการของแบบจำลองแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง	14
รูปที่ 2.8 แผนภาพกระบวนการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลกับโครงสร้าง [15]	14
รูปที่ 2.9 วิธีการแบบ Conjugate Heat Transfer	15
รูปที่ 2.10 การถ่ายโอนข้อมูลระหว่างของไหลกับโครงสร้างของแบบจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างแบบ one-way	16
รูปที่ 2.11 การถ่ายโอนข้อมูลระหว่างของไหลกับโครงสร้างของแบบจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างแบบ two-way	17
รูปที่ 3.1 โมเดลสามมิติของแบบจำลองเครื่องยนต์สเตอริงรุ่น SEB 100 แบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง (FSI)	19
รูปที่ 3.2 boundary condition สำหรับแบบจำลอง	21
รูปที่ 3.3 โมเดลสามมิติของแบบจำลองเครื่องยนต์สเตอริงรุ่น SEB 100 แบบพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD)	22
รูปที่ 3.4 mesh สำหรับแบบจำลองแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง (FSI)	23
รูปที่ 3.5 mesh สำหรับแบบจำลองแบบพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD)	24
รูปที่ 4.1 รูปการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่งมุมเพลลาข้อเหวี่ยง 0 องศา	27
รูปที่ 4.2 รูปการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่งมุมเพลลาข้อเหวี่ยง 180 องศา	27
รูปที่ 4.3 รูปการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่งมุมเพลลาข้อเหวี่ยง 0 องศา	28
รูปที่ 4.4 รูปการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่งมุมเพลลาข้อเหวี่ยง 180 องศา	28

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลทางกายภาพและคุณสมบัติของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง SEB 100 [5]	18
ตาราง ข.1 ผลการคำนวณจากการทำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจากซอฟต์แวร์	39
ตาราง ข.2 ผลการคำนวณจากการทำแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างจากซอฟต์แวร์	56



## สารบัญกราฟ

กราฟที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของเพลลาข้อเหวี่ยง	25
กราฟที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของเพลลาข้อเหวี่ยง	27
กราฟที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของเพลลาข้อเหวี่ยง	29
กราฟที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของเพลลาข้อเหวี่ยง	30
กราฟที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของเพลลาข้อเหวี่ยง	31



### คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อ

ตัวแปล	ความหมาย	หน่วย
$x, y, z$	ทิศในทางของ 3 มิติ	(m)
$u, v, w$	ความเร็วในทิศทาง $x, y$ และ $z$	
$T$	อุณหภูมิ	(K)
$t$	เวลา	(sec)
$P$	ความดัน	(Pa)
$C_p$	ค่าความร้อนจำเพาะความดัน	(J/kg-K)
$e$	พลังงานรวม	(J/kg)
$Pr_t$	ตัวเลข Prandtl สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน	
$S_e$	ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในของแข็ง	
$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yx}, \tau_{yy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{zz}, \tau_{zy}$	ความเค้นเฉือน	
$\mu_t$	turbulent viscosity	(Pa-s)
$\lambda$	ค่าการนำความร้อนของสารทำงาน	(W/m-K)
$\rho$	ความหนาแน่น	(kg / m <sup>3</sup> )

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันปัญหาด้านพลังงานได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากพลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานในการผลิตทั้งในภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม โดยในปัจจุบันโลกใช้พลังงานจากน้ำมัน ถ่านหินและก๊าซธรรมชาติเป็นอัตราส่วนถึง 86% จากทั้งหมด [1] ซึ่งมีแนวโน้มที่ขาดแคลนในอนาคต อีกทั้งส่วนประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงเหล่านี้เมื่อเกิดการเผาไหม้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การพัฒนาและวิจัยทางด้านพลังงานทดแทนจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเพื่อให้ทดแทนการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงปิโตรเลียม

เครื่องจักรเปลี่ยนรูปพลังงานชนิดหนึ่งซึ่งมีชื่อว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ได้รับการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องในต่างประเทศ เนื่องจากมีพื้นฐานการทำงานง่าย ส่วนประกอบน้อยและประสิทธิภาพในการทำงานสูง มีเสียงและการสั่นสะเทือนต่ำขณะทำงาน การปล่อยมลพิษต่ำและสามารถทำงานได้กับแหล่งความร้อนหลากหลาย จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับแหล่งพลังงานทดแทนได้หลากหลายโดยสามารถใช้ได้กับพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานชีวมวล ซึ่งในต่างประเทศได้มีการนำเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมาพัฒนาในการผลิตด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ โดยเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจะมีค่าใช้จ่ายในการผลิตไฟฟ้าอยู่ที่ 0.1 ยูโรต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง สำหรับกำลังผลิตไฟฟ้าขนาด 30 เมกะวัตต์ [2]

ในการออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้น เพื่อลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการสร้างเครื่องต้นแบบ รวมถึงเพื่อให้ได้เครื่องยนต์ที่ให้ค่าสมรรถนะสูง ได้มีการนำแบบจำลองมาช่วยในการคาดการณ์ถึงกำลังบ่งชี้ที่ได้จากเครื่องยนต์จริง โดยการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ด้วยแบบจำลองในหนึ่งมิติ [3] เป็นการวิเคราะห์โดยการตั้งสมมติฐานโดยให้ค่าอุณหภูมิที่ส่วนรับความร้อนและส่วนคายความร้อนเป็นค่าคงที่ ซึ่งเมื่อนำค่ากำลังบ่งชี้จากแบบจำลองไปเทียบกับค่ากำลังบ่งชี้จากเครื่องยนต์ที่ทำการทดสอบ ผลที่ได้ออกมานั้นมีค่าน้อยกว่ากำลังบ่งชี้ที่คาดการณ์ไว้ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทำนายสมรรถนะให้มากขึ้นได้มีการนำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) แบบสามมิติมาใช้เพื่อคาดการณ์ค่ากำลังบ่งชี้ที่ได้จากวัฏจักรสเตอร์ลิงซึ่งผลที่ได้นั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกับกำลังที่ได้จากการทดสอบมากขึ้น โดยการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์แบบสามมิติจะพิจารณา 5 ส่วนประกอบดังนี้ ปริมาตรอัด (Compression space) ส่วนคายความร้อน (Cooler) รีเจนเนอเรเตอร์ (Regenerator) ส่วนรับความร้อน (Heater) และปริมาตรขยาย (Expansion



space) จากงานวิจัยที่ทำการศึกษากลไกการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างของอุณหภูมิปานกลาง [4] พบว่าภายใต้การทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเกิดการสูญเสียความร้อนเกิดขึ้นภายนอก ซึ่งเป็นส่วนสำคัญทำให้สมรรถนะและประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ลดลง ซึ่งการทำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนั้นไม่ได้คำนึงถึงความร้อนที่สูญเสียไป โครงงานนี้จึงมีแนวคิดที่จะใช้วิธีวิเคราะห์แบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง (Fluid structure interaction, FSI) ในการช่วยวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนที่สูญเสียไประหว่างบริเวณส่วนของของไหลและโครงสร้างโดยเฉพาะส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะเป็แนวทางในการพัฒนาไปสู่การทำนายค่าสมรรถนะของเครื่องยนต์ได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น โดยในส่วนนี้จะใช้ซอฟต์แวร์สำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อพัฒนาผลการจำลองการทำงานของสารทำงานในเครื่องยนต์ให้มีความใกล้เคียงกับวัฏจักรจริงมากขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้ระหว่างแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) กับการจำลองแบบการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง (FSI)

1.2.2 เพื่อพัฒนาการวิเคราะห์การทำงานของของไหลภายในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงให้ใกล้เคียงกับปรากฏการณ์การไหลในเครื่องยนต์จริงให้มากขึ้น ซึ่งจะนำไปสู่การทำนายสมรรถนะที่ใกล้เคียงกับเครื่องยนต์จริงต่อไป

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

จำลองการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเบต้าขนาดเล็กรุ่น SEB100 ที่แบบการจำลองแบบการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง (FSI) เฉพาะในส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน โดยเปรียบเทียบกับผลการทำนายค่าสมรรถนะจากการทำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ที่อุณหภูมิสารทำงานที่ส่วนรับความร้อน 500 องศาเซลเซียส ส่วนคายความร้อน 35 องศาเซลเซียส ความดันเฉลี่ย 7 บาร์ โดยมีสารทำงานเป็นอากาศ

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถนำวิธีการวิเคราะห์แบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างไปช่วยในการออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ซึ่งจะสามารถพัฒนาสู่การทำนายค่าสมรรถนะได้ใกล้เคียงมากขึ้น

## 1.5 แผนการดำเนินงาน

### ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

กิจกรรม	2559				2560				
	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.ศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง									
2. ศึกษาการใช้งานซอฟต์แวร์									
3.สร้างแบบจำลอง FSI									
4.วิเคราะห์ผลที่ได้จากแบบจำลอง									
5. สรุปผลและจัดทำรายงาน									

## 1.6 รายละเอียดงบประมาณที่ใช้

1.6.1 กระดาษ 500 บาท

1.6.2 จัดทำรูปเล่ม 2,000 บาท

1.6.3 ค่าอุปกรณ์อื่นๆ 500 บาท

1.6.4 ซอฟต์แวร์ได้รับการสนับสนุนจากหน่วยวิจัย

## บทที่ 2

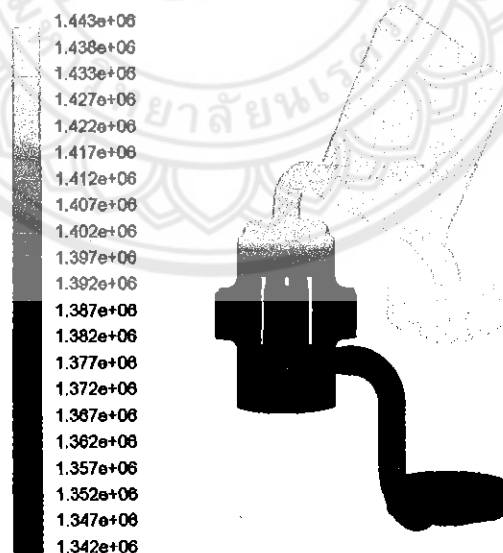
### หลักการทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นอกจากการใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบหนึ่งมิติในการวิเคราะห์การทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง แล้วยังมีค้นคว้าโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสองมิติและสามมิติในการจำลองการทำงานของเครื่องยนต์เพื่อให้ผลของสมรรถนะของการทำงานของเครื่องยนต์ดียิ่งขึ้น

##### 2.1.1 แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD)

Mahkamov and Ingham [6] ได้แสดงให้เห็นถึงการใช้แบบจำลองสองมิติของ CFD ในการวิเคราะห์การทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแสงอาทิตย์แบบ V-type Axisymmetric กับปัญหาสมการการปั่นป่วน k- $\epsilon$  สำหรับการไหลอัดโดยใช้การจำลองทางคณิตศาสตร์ ก็คือได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่รวมกับผลของการสูญเสียความร้อนและผลการสูญเสียภายในกระบอกสูบมาเปรียบเทียบกับผลการทำแบบจำลอง CFD พบว่าผลจากการวิเคราะห์ของแบบจำลอง CFD มีความแม่นยำมากกว่าในการคาดการณ์ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การกระจายของความดัน(Pa) ในวัฏจักรก๊าซภายในของเครื่องยนต์ ผลการจำลองแบบ CFD ให้ค่าความดันสูงสุดประมาณ 2.2 MPa ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 200 rpm (3.33 Hz )

Ibrahim [7] ได้ทำการพัฒนาแบบจำลอง CFD ในสองมิติเพื่อวิเคราะห์ที่ถูกรเรียกว่าแบบจำลอง CAST ที่ใช้ในการแก้ปัญหาสมการรูปแบบการปั่นป่วน  $k-\epsilon$  เพื่อคาดการณ์การสูญเสีย Hysteresis นำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้รับจากการจำลองโดยใช้ซอฟต์แวร์ CFD คือ CFD-ACE+ ซึ่งค่าที่ออกมาสามารถยอมรับได้ แต่ก็มีความแตกต่างกับผลของการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ

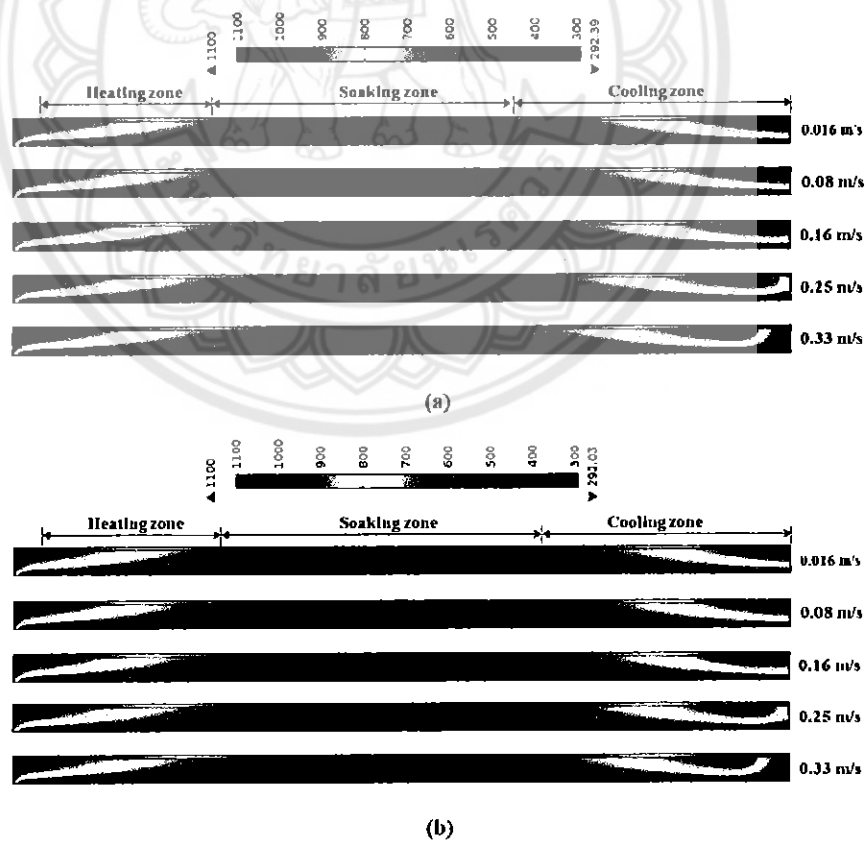
หลังจากนั้นได้มีการวิเคราะห์ขั้นตอนการทำงานที่ซับซ้อนขึ้นโดยมีการประยุกต์ใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบสามมิติได้เพื่อใช้ในการปรับปรุงการออกแบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง Mahkamov and Djumanov [8] ได้ทำการวิเคราะห์การทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบสามมิติ โดยใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS และสมการการปั่นป่วน  $k-\epsilon$  ของกระบวนการทำงานภายในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา ซึ่งข้อมูลของอุณหภูมิ ความดันและทิศทางความเร็วของของไหลในเครื่องยนต์สเตอร์ลิง และกำลังขาออกได้ถูกคำนวณออกมาโดยใช้ความดันและปริมาตรภายในบริเวณปริมาตรอัดและปริมาตรขยาย นอกจากนี้ Tan et al. [9] ได้เสนอการใช้แบบจำลองแบบสามมิติในการสร้างแบบจำลองและรายละเอียดของการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบต้าขนาดเล็กที่ทำงานร่วมกับจานพาราโบลา ซึ่งจะช่วยให้ทำนายค่ากำลังขาออกได้ดีขึ้น ยิ่งไปกว่านั้น Mahkamov and Ingham [6] ดำเนินการสร้างแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบสามมิติ สำหรับการออกแบบการปรับปรุงเครื่องยนต์ชีวมวล ซึ่งงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบต้าโดยอาศัยความร้อนจากพลังงานชีวมวล ซึ่งได้ถูกตรวจสอบครั้งแรกโดยการใช้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบหนึ่งมิติ ลำดับที่สองและแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบสามมิติถูกนำมาใช้สำหรับการคำนวณ ซึ่งจะแสดงให้เห็นความผิดพลาดของการทำนายสมรรถนะจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลำดับที่สอง และแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบสามมิติ ที่ 30 % และ 12-18 % ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าจากการทดลอง โดยซอฟต์แวร์ ANSYS ได้ถูกนำมาใช้สำหรับการจำลองการไหลของก๊าซและการถ่ายเทความร้อนในส่วนประกอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงและใช้การจำลองรูปแบบการปั่นป่วน  $k-\epsilon$  สำหรับการไหลแบบอัดตัวได้นำไปใช้ในแบบจำลองของวัฏจักร จากผลการวิเคราะห์ปรับปรุงการออกแบบได้ถูกเสนอ โดยส่วนของรีเจเนอเรเตอร์ปรับปรุงโดยการเพิ่มความพรุนและส่วนโครงสร้างโดยเปลี่ยนโครงสร้างเป็นชนิดอัลฟา

จากการศึกษารวบรวมกรณีปริทรรศน์ของการสร้างการวิเคราะห์ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ พบว่าแบบจำลองนี้สามารถทำนายค่าสมรรถนะได้ในระดับความผิดพลาดประมาณ 12-18 % เมื่อเทียบกับการทดลอง เนื่องจากการทำแบบจำลองแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจะคำนวณการถ่ายเทค่าความร้อนเฉพาะส่วนที่เป็นของไหลเท่านั้น แต่

ในความจริงเกิดการถ่ายเทความร้อนในส่วนโครงสร้างด้วย ซึ่งแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจะไม่ได้คำนวณในส่วนนี้

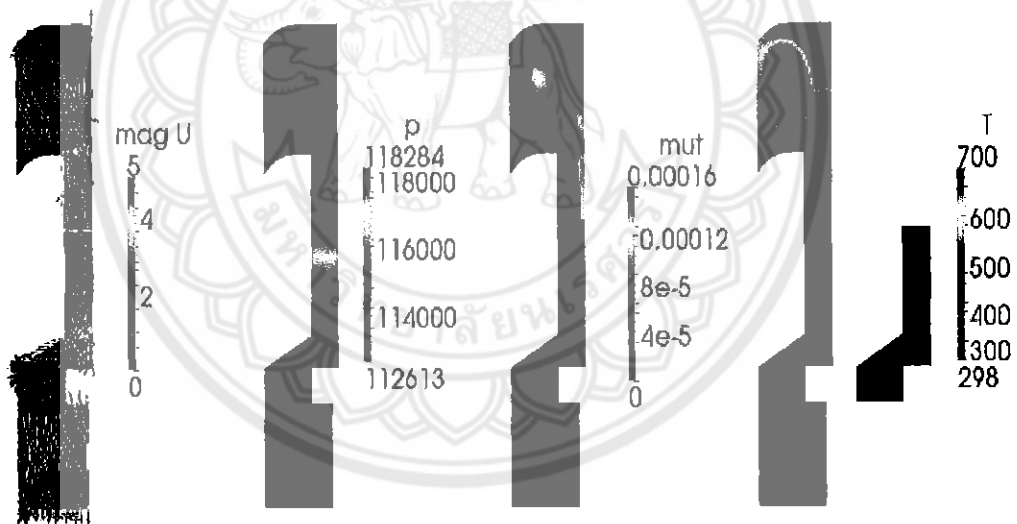
### 2.1.2 วิธีวิเคราะห์แบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง (Fluid Structure Interaction, FSI)

จากรายงานการวิจัยของ Ahmad et al. [10] ได้นำแบบจำลอง FSI มาวิเคราะห์เชิงความร้อนของกระบวนการอบอ่อนสำหรับลวดเหล็กในเตาเผาแบบท่อ โดยให้ลวดเหล็กเคลื่อนที่ส่วนทางกับก๊าซไหลร้อน ได้แสดงให้เห็นถึง สมบัติทางความร้อนซึ่งได้แก่ อุณหภูมิ การถ่ายเทความร้อน จะลดลงเมื่อลวดหรือก๊าซไหลร้อนมีความเร็วลดลง ซึ่งจะทำให้การกระจายตัวของความร้อนภายในเส้นลวดเปลี่ยนไป นอกจากนี้ Hellenkamp and Pfeifer [11] ได้นำเสนอผลของความร้อนต่อความเค้นของท่อความร้อนจากแบบจำลอง FSI ซึ่งแสดงให้เห็นผลของการกระจายอุณหภูมิและการกระจายความเค้นบนท่อความร้อน ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิในท่อเผาไหม้และลวดเหล็กที่ความเร็วต่างๆ (a) ไนโตรเจน และ (b) ก๊าซไฮโดรเจนที่ 0.16 m/s

ในส่วนของการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์แบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้น พบบงานวิจัยของ Torre et al. [12] ซึ่งได้สร้างแบบจำลองการวิเคราะห์แบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงในการถ่ายเทความร้อนในส่วนของรีเจเนอเรเตอร์ที่มีลักษณะเป็นรูพรุน โดยใช้โปรแกรม OpenFoam นอกจากนี้มีงานนำเสนอโดย Dyson et al. [13] ซึ่งได้ทำการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระโดยวิเคราะห์ทั้งในส่วนโครงสร้างและของไหล โดยคำนึงถึงผลของสนามแม่เหล็ก ความดันของของไหล แรงโน้มถ่วง แรงของสปริง แรงเฉื่อยในสภาพเริ่มต้นการทำงาน ความล่า รวมถึงความคืบของวัสดุ ซึ่งเมื่อนำไปเทียบกับการทำแบบจำลองแบบหนึ่งมิติพบว่า แบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง จะให้ค่าสมรรถนะภาพที่ใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่า ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เขตข้อมูลการเปลี่ยนแปลงการปฏิรูประบบระบายความร้อน ความเร็ว ความดัน ความหนืด ปั่นป่วนและอุณหภูมิที่ (ทั้งของเหลวและของแข็ง)

จากผลการทำแบบจำลองการวิเคราะห์แบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างจะพบว่าแบบจำลองนี้สามารถคำนวณค่า อุณหภูมิ กำลังที่ออกมา รวมถึงค่าสมรรถนะต่างๆออกมาได้ ใกล้เคียงกว่าแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เนื่องจากการทำแบบจำลองการวิเคราะห์แบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างจะคำนึงในส่วนที่เป็นโครงสร้างด้วย ซึ่งจะทำให้สามารถนำผลของความเค้น ความเครียด ของโครงสร้างอีกด้วย

## 2.2 หลักการและทฤษฎี

ในส่วนนี้จะบอกถึงวัฏจักรสเตอร์ลิง รูปแบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ส่วนประกอบ และ การทำงาน ลักษณะทางกายภาพของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนระบบส่งกำลังของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงต้นแบบและหลักการการหาค่าการหาค่าที่เหมาะสม

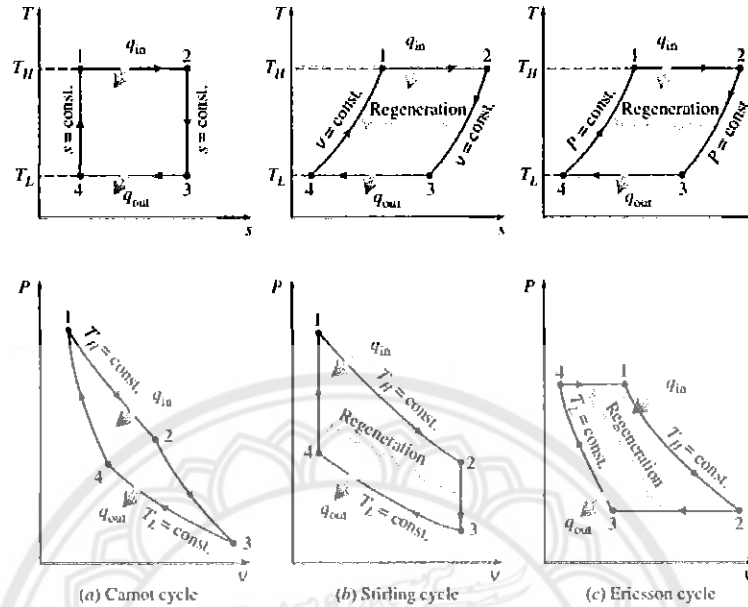
### 2.2.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิง (Stirling engine)

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถแบ่งตามลักษณะทางกายภาพได้ทั้งหมด 3 แบบคือ แอลฟา เบต้า และแกมมา

#### 2.2.1.1 วัฏจักรสเตอร์ลิง

หากพิจารณาเครื่องยนต์ความร้อนในอุดมคติที่ทำงานระหว่างแหล่งความร้อน ( $T_H$ ) และแหล่งรับความร้อน ( $T_L$ ) โดยวัฏจักรของเครื่องยนต์ความร้อนนั้นเป็นแบบผันกลับได้ทั้งหมด กระบวนการรับความร้อนและกระบวนการคายความร้อนทั้งที่เป็นกระบวนการอุณหภูมิคงที่ วัฏจักรแบบนี้จะเรียกว่าวัฏจักรคาร์โนต์ ซึ่งเป็นวัฏจักรที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

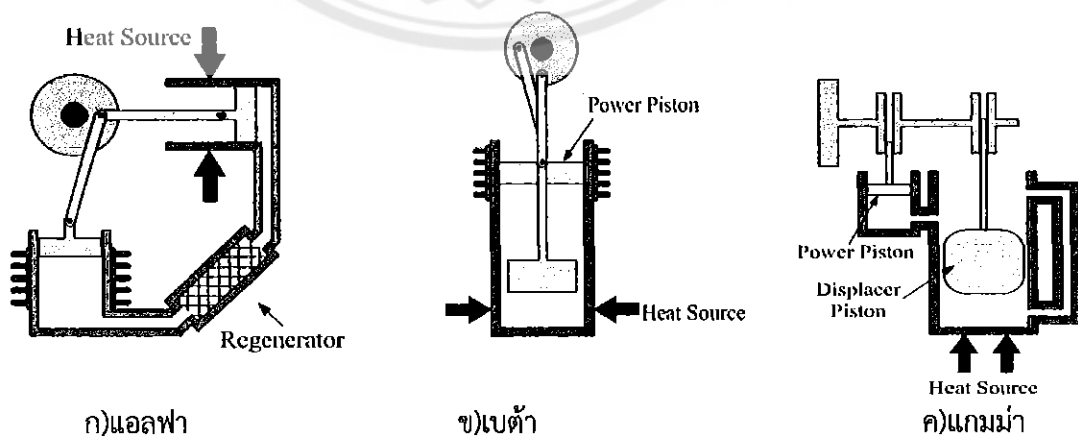
แต่มีวัฏจักรการทำความร้อนอยู่สองวัฏจักรที่มีกระบวนการรับความร้อนและกระบวนการคายความร้อนทั้งที่เป็นกระบวนการอุณหภูมิคงที่เหมือนกับวัฏจักรคาร์โนต์ และมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับวัฏจักรคาร์โนต์ วัฏจักรทั้งสองนั้นคือ วัฏจักรสเตอร์ลิงและวัฏจักรอีริคสัน โดยวัฏจักรทั้งสองจะแตกต่างจากวัฏจักรคาร์โนต์ตรงที่กระบวนการเอนโทรปีคงที่ทั้งสองในวัฏจักรคาร์โนต์นั้นจะถูกแทนที่ด้วยกระบวนการปริมาตรคงที่กับ regeneration ในวัฏจักรสเตอร์ลิงและกระบวนการความดันคงที่กับ regeneration ในวัฏจักรอีริคสันดังรูปที่ 2.4 วัฏจักรทั้งสองใช้ประโยชน์จาก regeneration โดยการที่ความร้อนบางส่วนถูกถ่ายโอนไปไว้ยังอุปกรณ์กักเก็บความร้อนเรียกว่า regenerator ในช่วงหนึ่งของกระบวนการและความร้อนจะถูกถ่ายโอนกลับมายังสารทำงานในอีกช่วงของกระบวนการ regenerator อาจทำมาจากลวดตาข่าย เซรามิกหรือวัสดุพูน ที่มีค่าความจุความร้อนสูง



รูปที่ 2.4 แผนภาพ T-s และ P-v ของวัฏจักรคาร์โนต์ สเตอร์ลิง และ อีริคสัน[14]

2.2.1.2 รูปแบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ส่วนประกอบ และ การทำงาน

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงตามแบบต่างๆได้ดังนี้ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาจะมีกระบอกสูบ 2 สูบ ต่อข้อเหวี่ยงร่วมกัน ดังรูปที่ 2.5 ก เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบต้า จะมีกระบอกสูบ 1 สูบ แต่มีลูกสูบ 2 อันต่อข้อเหวี่ยงร่วมกัน ดังรูปที่ 2.5 ข เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแกมมา จะเหมือนกับแบบเบต้า แต่แยกกระบอกสูบออกมาเป็น 2 สูบ ต่อข้อเหวี่ยงร่วมกัน ดังรูป 2.5 ค



รูปที่ 2.5 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงประเภท แอลฟา เบตา และแกมมา ตามลำดับ [14]



นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งได้ตามระดับผลต่างอุณหภูมิการทำงานที่ด้านร้อนและด้านเย็นของ เครื่องยนต์ ( $\Delta T$ ) คือ ผลต่างอุณหภูมิต่ำ ( $\Delta T$  อยู่ในช่วง  $<300$  °C) ผลต่างอุณหภูมิปานกลาง ( $\Delta T$  อยู่ในช่วง  $300-500$  °C) ผลต่างอุณหภูมิสูง ( $\Delta T$  อยู่ในช่วง  $>500$  °C) เครื่องยนต์สเตอร์ลิง จะมีส่วนประกอบหลัก 4 ส่วนคือ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (ภายในจะมีส่วนประกอบอีก 3 ส่วน คือ ส่วนรับความร้อน ส่วนระบายความร้อน และ รีเจนเนอเรเตอร์) ปริมาตรอัด ปริมาตรขยาย และ กลไกขับเคลื่อน ส่วนประกอบทั้งหมดนี้จะทำให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อน เป็นพลังงานทางกลได้

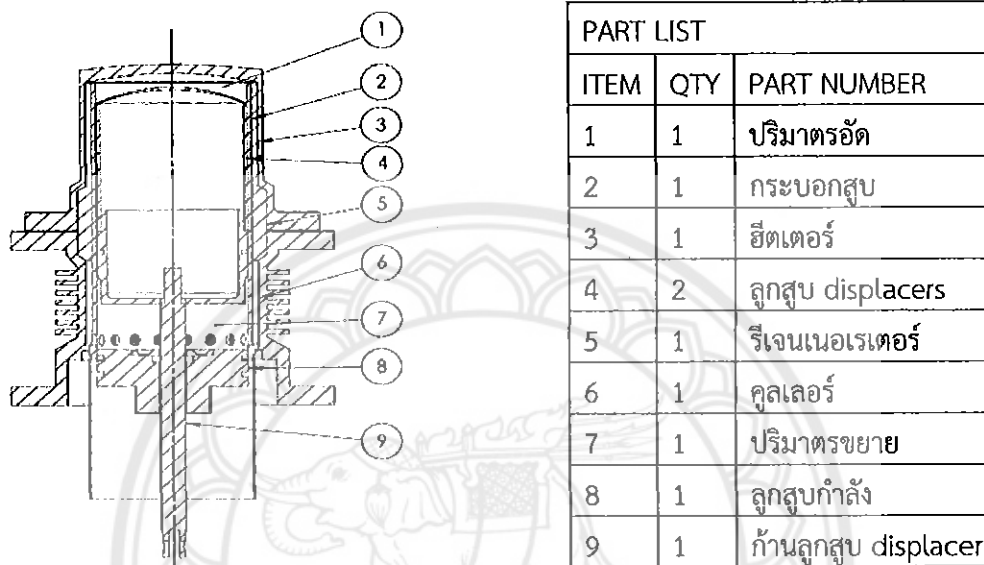
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนให้แก่เครื่องยนต์ สเตอร์ลิงโดยจะมีส่วนประกอบย่อยอีก 3 ส่วนดังนี้ ส่วนรับความร้อนทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อน จากแหล่งความร้อนภายนอกให้กับสารทำงาน รีเจนเนอเรเตอร์ทำหน้าที่สะสมความร้อนบางส่วนจาก สารทำงานที่ไหลจากส่วนรับความร้อนไปยังส่วนระบายความร้อนและให้ความร้อนแก่สารทำงานที่ ไหลกลับจากคูลเลอร์ไปยังส่วนรับความร้อน ส่วนระบายความร้อนทำหน้าที่ดึงความร้อนส่วนเกินออก จากสารทำงานโดยแลกเปลี่ยนกันระหว่างสารทำงานกับแหล่งรับความร้อนภายนอก

ปริมาตรขยายเป็นส่วนที่สารทำงานขยายตัวและไหลเข้าไปหลังจากได้รับความร้อน ก่อนที่จะ ถูกดันให้ไหลไปยังปริมาตรอัดโดยลูกสูบ ปริมาตรอัดเป็นส่วนที่สารทำงานที่ขยายตัวไหลเข้าไปดัน ลูกสูบกำลัง และถูกอัดให้ไหลกลับไปยังปริมาตรขยาย

สำหรับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบต้าเป็นเครื่องยนต์ที่ถูกนำมาใช้ในการจำลองในจะ ประกอบไปด้วย ลูกสูบ 2 อัน โดยมีเฟสของมุมที่เพลอาซอเทียต่างกันและมีบริเวณที่อุณหภูมิต่างกัน 2 แห่ง ก๊าซหรืออากาศซึ่งเป็นสารทำงานจะถูกปิดไม่ให้มีการรั่วไหลออกมภายนอก ลูกสูบที่มีขนาดเล็กกว่าเป็นลูกสูบกำลัง (Power piston) กำลังที่ออกจากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทั้งหมดได้จากลูกสูบ

กำลัง ลูกสูบที่มีขนาดใหญ่กว่าเรียกว่า ลูกสูบไล่หรือดิสเพลสเซอร์ (Displacer piston) ลูกสูบไล่จะมี ขนาดเล็กกว่าตัวกระบอกสูบเล็กน้อยอากาศภายในกระบอกสูบ สามารถเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างของ ลูกสูบไล่ได้ หน้าที่ของลูกสูบไล่ก็คือไล่อากาศในกระบอกสูบให้เคลื่อนที่อยู่ระหว่างด้านร้อนกับด้าน เย็น ลูกสูบไล่ไม่ได้สร้างกำลังให้กับเครื่องยนต์ การทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยเริ่มจากสาร ทำงานเคลื่อนที่ผ่านส่วนรับความร้อนเพื่อรับความร้อนจากแหล่งความร้อนภายนอก และไหลเข้าไป ยังปริมาตรขยายจากนั้นสารทำงานถูกแทนที่ด้วยลูกสูบดิสเพลสเซอร์และไหลผ่านส่วนรับความร้อน ผ่านรีเจนเนอเรเตอร์ความร้อนบางส่วนจากสารทำงานถ่ายเทให้กับรีเจนเนอเรเตอร์ผ่านส่วนระบาย ความร้อน ไปยังปริมาตรอัดสารทำงานจะขยายตัวดันลูกสูบกำลังให้กำลังออกมา กำลังบางส่วนจะถูก นำกลับมาอัดสารทำงานเพื่อให้ไหลกลับโดยผ่านคูลเลอร์เพื่อคายความร้อนทิ้งไปยังแหล่งรับความร้อน

ภายนอก ผ่านรีเจนเนอเรเตอร์รับความร้อนส่วนที่รีเจนเนอเรเตอร์เก็บไว้ ผ่านไปยังส่วนรับความร้อน เพื่อเป็นการเริ่มต้นวัฏจักรใหม่อีกครั้ง ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 รูปแสดงส่วนประกอบ การทำงาน และ ปริมาตรต่างๆของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบตา (SEB-100) ที่ถูกนำเสนอโดย ชนะ ศรีคำ [5]

### 2.2.2 หลักการสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) และ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง (FSI) ใน 3 มิติ

สำหรับการวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้นจะทำการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็นแบบใน 3 มิติ ในงานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์แบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง โดยในส่วนของสารทำงานนั้นมีการวิเคราะห์โดยใช้สมการควบคุมคือ สมการอนุรักษ์มวลสมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งมีลักษณะการวิเคราะห์ที่เหมือนกับการทำ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ แต่จะมีการแลกเปลี่ยนผลกระทบต่อกันและกันกับของแข็ง ณ บริเวณจุดที่เฟสของของแข็งและสารทำงานมาพบกัน โดยการวิเคราะห์ทั้งพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างมีหลักการดังต่อไปนี้

### 2.2.2.1 การวิเคราะห์ในส่วนของสารทำงาน

สารทำงานในเครื่องยนต์เป็นของไหล มีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมา จึงใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สำหรับการวิเคราะห์การทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง เพื่อให้เข้าใจถึงกระบวนการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงและปรับปรุงความแม่นยำในการคาดการณ์ผลการทำงานของเครื่องยนต์ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณถูกใช้ควบคู่กับแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนสองสมการสำหรับการไหลแบบอัดตัวได้ถูกนำมาใช้สำหรับจำลองกระบวนการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการไหลภายในเครื่องยนต์สเตอร์ลิง สามารถวิเคราะห์ได้จากชุดสมการควบคุม ได้แก่

สมการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (1)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u^2 + p)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \\ + \frac{\partial(-\rho \overline{u^2})}{\partial x} + \frac{\partial(-\rho \overline{u'v'})}{\partial y} + \frac{\partial(-\rho \overline{u'w'})}{\partial z} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2 + p)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \\ + \frac{\partial(-\rho \overline{u'v'})}{\partial x} + \frac{\partial(-\rho \overline{v^2})}{\partial y} + \frac{\partial(-\rho \overline{v'w'})}{\partial z} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2 + p)}{\partial z} = -\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \\ + \frac{\partial(-\rho \overline{u'w'})}{\partial x} + \frac{\partial(-\rho \overline{v'w'})}{\partial y} + \frac{\partial(-\rho \overline{w^2})}{\partial z} \end{aligned} \quad (4)$$

สมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho e}{\partial t} + \frac{\partial (u(\rho e + p))}{\partial x} + \frac{\partial (v(\rho e + p))}{\partial y} + \frac{\partial (w(\rho e + p))}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \lambda + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \lambda + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( \lambda + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

### 2.2.2.2 การวิเคราะห์ในส่วนของโครงสร้าง

การถ่ายเทความร้อนผ่านโครงสร้างของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจะวิเคราะห์โดยอาศัยสมการการถ่ายเทความร้อนดังนี้

สมการการถ่ายเทความร้อน

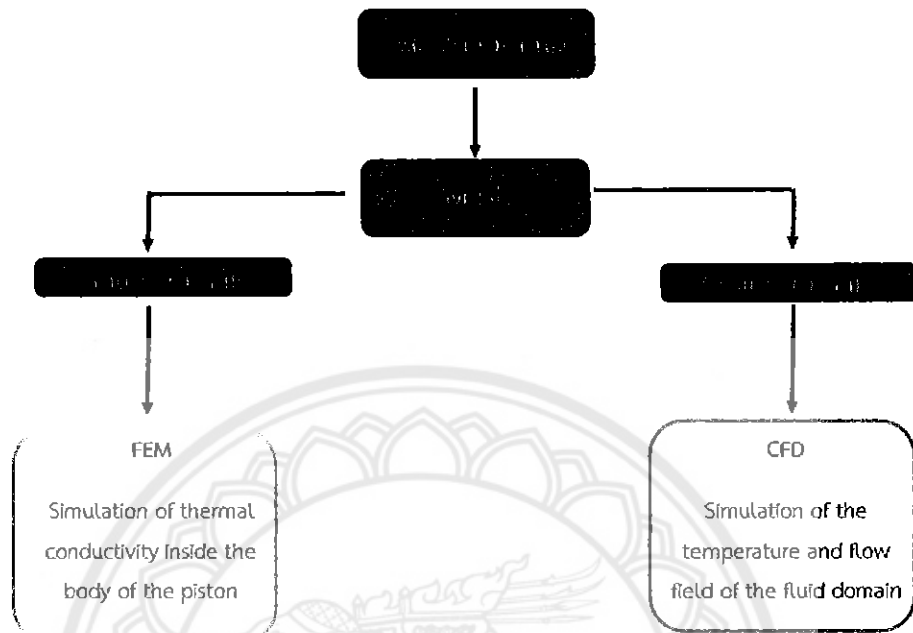
การถ่ายเทความร้อนในส่วนของของแข็งจะพิจารณาในส่วนของการนำความร้อน

$$\frac{\partial \rho c_p T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_s \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_s \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_E \quad (6)$$

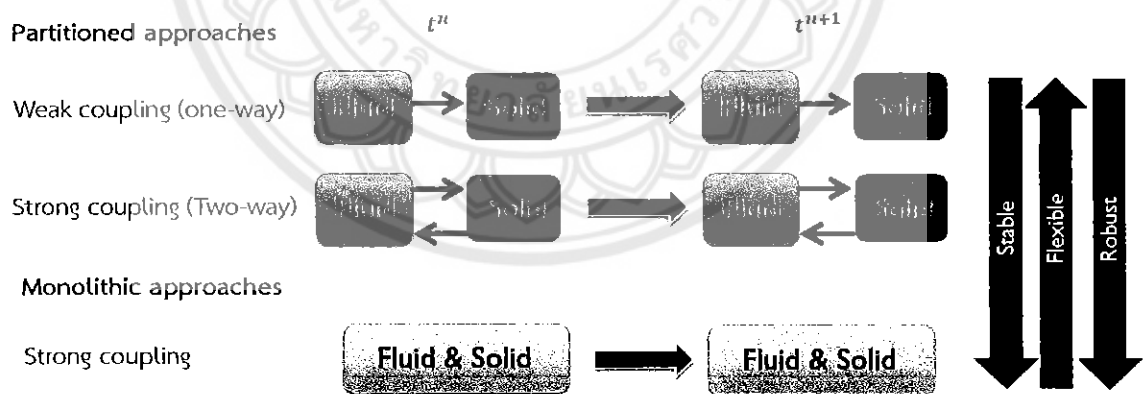
เมื่อ  $\lambda_s$  คือค่าการนำความร้อนของโครงสร้าง (W/mK)

### 2.2.2.3 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลกับโครงสร้างการถ่ายโอนข้อมูลระหว่างของไหลกับโครงสร้างของแบบจำลอง FSI จะมีการถ่ายโอนข้อมูลกัน (ความดัน ความเค้นเฉือน ฟลักซ์ความร้อน และอื่นๆ) ระหว่างขอบเขตที่ติดต่อกันระหว่างสารทำงานและโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.7 โดยผลการคำนวณที่ได้จากในส่วนของการสารทำงานจะส่งผลให้เกิดการกระจายอุณหภูมิในโครงสร้าง เกิดความเค้นในโครงสร้าง หรือแม้กระทั่งทำให้โครงสร้างเกิดการเสียรูป [15] กระบวนการเชิงตัวเลขสำหรับแก้สมการของปัญหาปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลกับโครงสร้างแบ่งออกเป็น Monolithic approaches และ Partitioned approaches [15] ดังแสดงแผนภาพกระบวนการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลกับโครงสร้าง ในรูปที่ 2.8



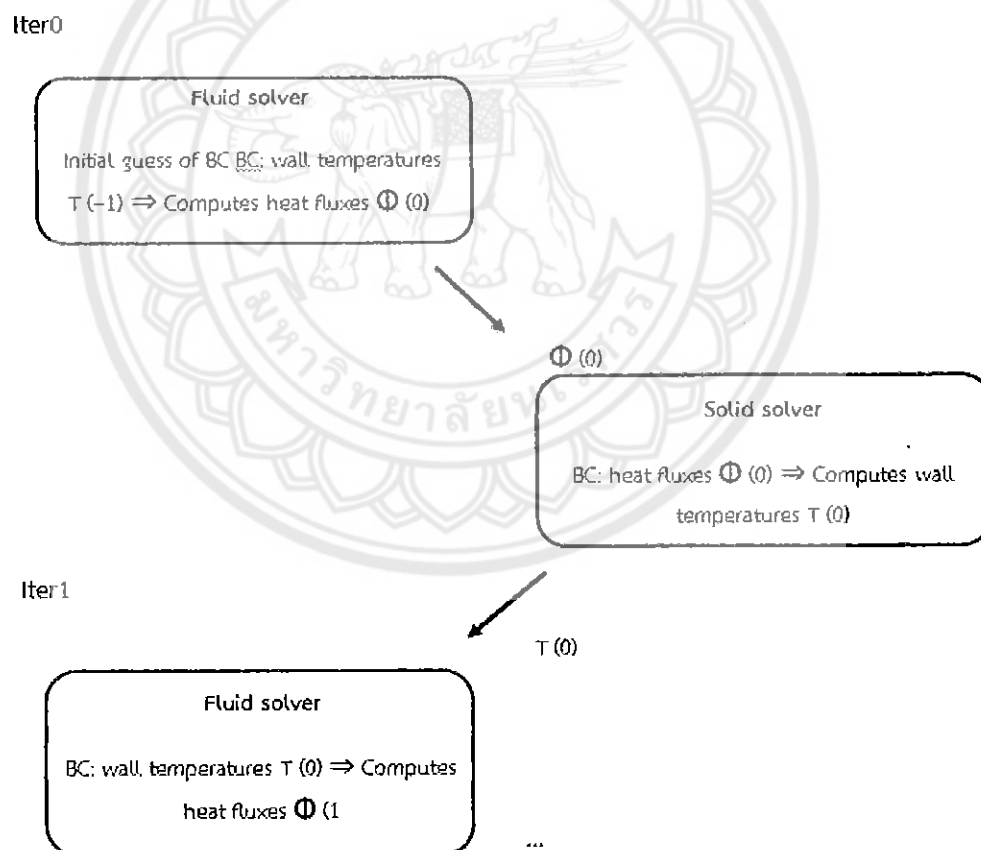
รูปที่ 2.7 กระบวนการของแบบจำลองแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง



รูปที่ 2.8 แผนภาพกระบวนการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลกับโครงสร้าง [15]

### 2.2.2.3.1 Monolithic Approaches

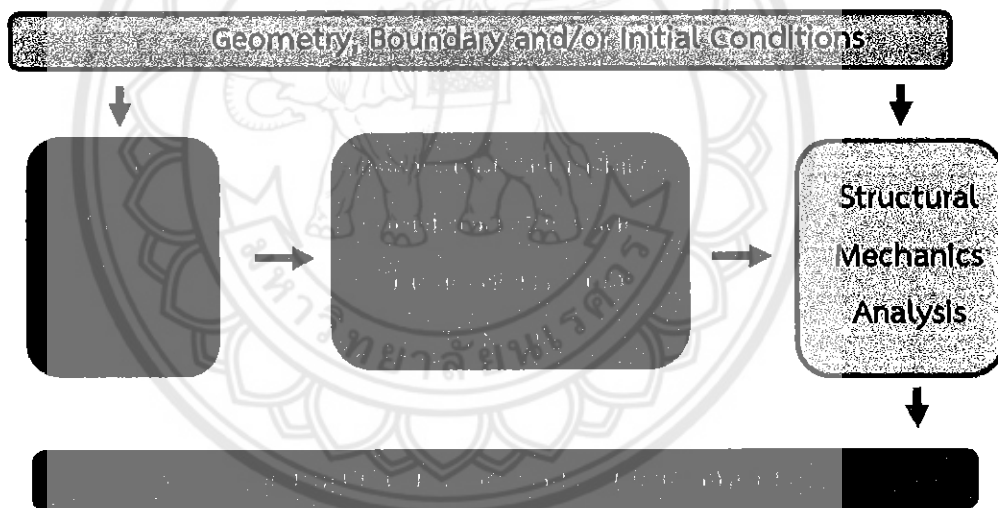
วิธีนี้จะพิจารณาสมการควบคุมของของไหลกับโครงสร้างให้ระบบสมการเดียวและจะแก้ปัญหาพร้อมกันทีเดียว โดยทั่วไป Monolithic approaches ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับแก้ปัญหาเฉพาะและจะมีการประเมินการเปลี่ยนแปลงในการแก้ปัญหา วิธีนี้เหมาะสำหรับการแก้ปัญหาเดียวซึ่งมีความแม่นยำสูงสำหรับปัญหาปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง แต่การพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาเฉพาะแต่ละปัญหาต้องใช้ทรัพยากรและเวลาดำเนินการมาก สำหรับโครงการนี้ใช้วิธี Conjugate Heat Transfer วิธีนี้เป็นการคำนวณการนำความร้อนผ่านของแข็งควบคู่ไปกับการพาความร้อนในของเหลว โดยใช้ชุดสมการสำหรับการจำลองเพียงชุดสมการเดียว ดังแสดงลักษณะสมการการคำนวณในรูปที่ 2.9



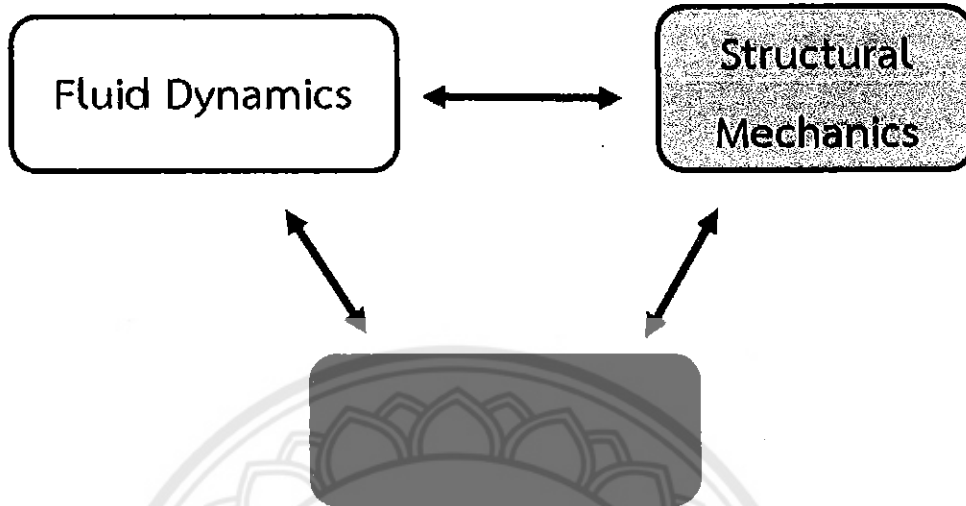
รูปที่ 2.9 วิธีการแบบถ่ายเทความร้อนชนิดเชื่อมต่อ (Conjugate Heat Transfer)

### 2.2.2.3.3 Partitioned Approaches

วิธีการแบ่งพาร์ติชันนี้จะถือว่าโดเมนของของแข็งและของเหลวแยกกันต่างหาก ในวิธี monolithic approach จะอธิบายการทั้งสองโดเมนโดยถือว่าเป็นระบบของสมการเดียว จะใช้ mesh ที่ค่าเหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหา โดยจะใช้ระเบียบวิธีการเชิงตัวเลขเพื่อเข้ามาแก้ปัญหาที่แต่ละกริดในแต่ละโดเมน วิธีการนี้จะทำได้อย่างรวดเร็วสำหรับการคำนวณ วิธีการแบ่งพาร์ติชันสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทคือ ทิศทางเดียว (one-way) และสองทิศทาง (two-way) โดยทิศทางเดียวจะทำการคำนวณในส่วนของโดเมนของไหลก่อนจาก CFD และผลการคำนวณที่ได้จะนำไปวิเคราะห์ต่อในโดเมนของโครงสร้างแต่ผลการวิเคราะห์จากโดเมนของโครงสร้างจะไม่ถูกนำมาวิเคราะห์ในโดเมนของไหลดังรูปที่ 2.10 ส่วนสองทิศทางจะมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลกันทั้งสองโดเมนดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 การถ่ายโอนข้อมูลระหว่างของไหลกับโครงสร้างของแบบจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างแบบ one-way



รูปที่ 2.11 การถ่ายโอนข้อมูลระหว่างของไหลกับโครงสร้างของแบบจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างแบบ two-way



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

ในการทำแบบจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้นต้องทราบข้อมูลทางกายภาพของส่วนประกอบ ข้อมูลสภาวะการทำงาน ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ภาวะต่างๆ ซึ่งค่าต่างๆจะได้จากการทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจากวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอโดยชนะ ศรีคำ [5] ในแบบจำลองเชิงตัวเลขนี้จะทำการจำลองเพื่อที่จะให้ได้ลักษณะการทำงานภายในของเครื่องยนต์และวิเคราะห์ที่เปรียบเทียบผลการจำลองระหว่างการจำลองแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) กับการจำลองแบบการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง (FSI)

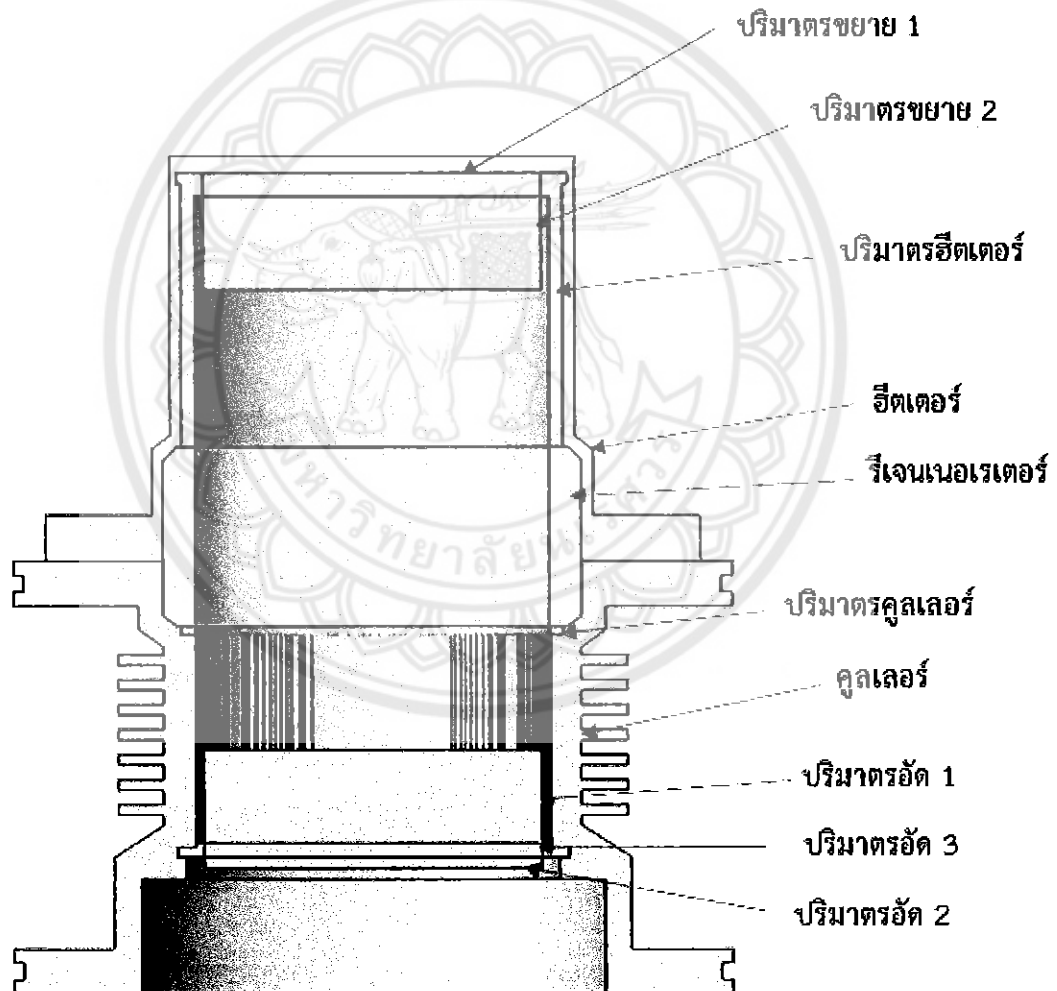
#### 3.1 โครงสร้างของแบบจำลองของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

ในการสร้างโครงสร้างของแบบจำลองโดยใช้วิธีวิเคราะห์แบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง จะทำการนำข้อมูลทางกายภาพของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมาจากวิทยานิพนธ์ของ ชนะ ศรีคำ[5] ดังตารางที่ 3.1 โดยในการสร้างแบบจำลองจะทำการจำลองในส่วนของอุปกรณ์ที่เกิดการถ่ายเทความร้อนและให้งานของเครื่องยนต์เท่านั้น จะไม่คำนึงถึงส่วนที่เป็นการทำงานของกลไกขับเคลื่อน และทำการปรับปรุงรูปร่างทางกายภาพของชิ้นส่วนบางส่วนเพื่อให้ง่ายต่อการสร้างแบบจำลอง โดยโครงสร้างสามมิติของเครื่องยนต์และสารทำงานจะถูกสร้างขึ้นด้วยซอฟต์แวร์ SolidWorks แล้วจึงทำการนำเข้ามาในซอฟต์แวร์ Ansys ดังรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลทางกายภาพและคุณสมบัติของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง SEB 100 [5]

ปริมาตรกวาดด้านขยายตัว	165 cc
เส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบ x ระยะชัก	74 x 37 mm
ความเร็วรอบเครื่องยนต์	360 รอบต่อนาที
มุมต่างปริมาตร	120 องศา
ปริมาตรด้านอัดตัว : ปริมาตรด้านขยายตัว	1:1
อัตราส่วนการอัด	1.61

ปริมาตรคงที่ฮีตเตอร์	20 cc
ปริมาตรคงที่คูลเลอร์	16.5 cc
ปริมาตรคงที่รีเจเนอเรเตอร์	46 cc
ความพรุนของรีเจเนอเรเตอร์	75%

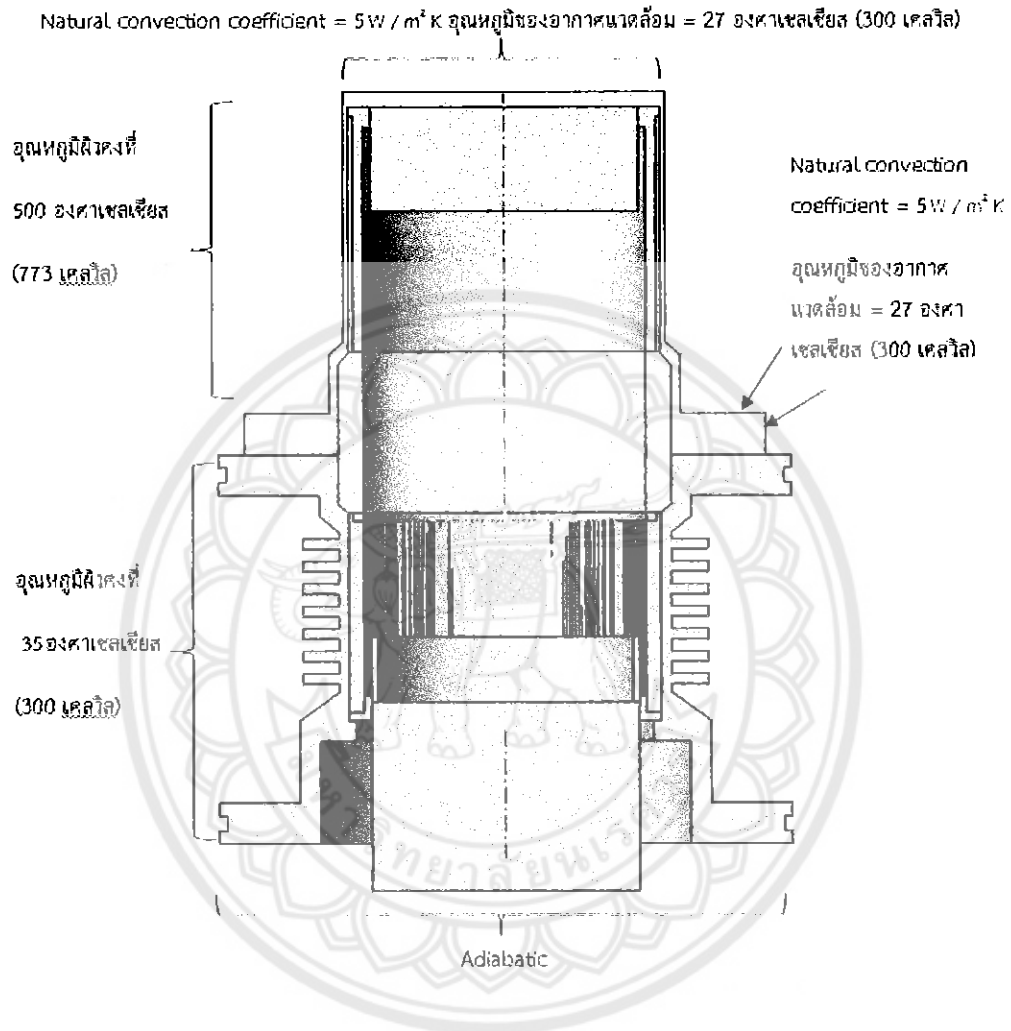


รูปที่ 3.1 โมเดลสามมิติของแบบจำลองเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรุ่น SEB 100 แบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง (FSI)

### 3.2 สภาวะการทำงานของเครื่องยนต์

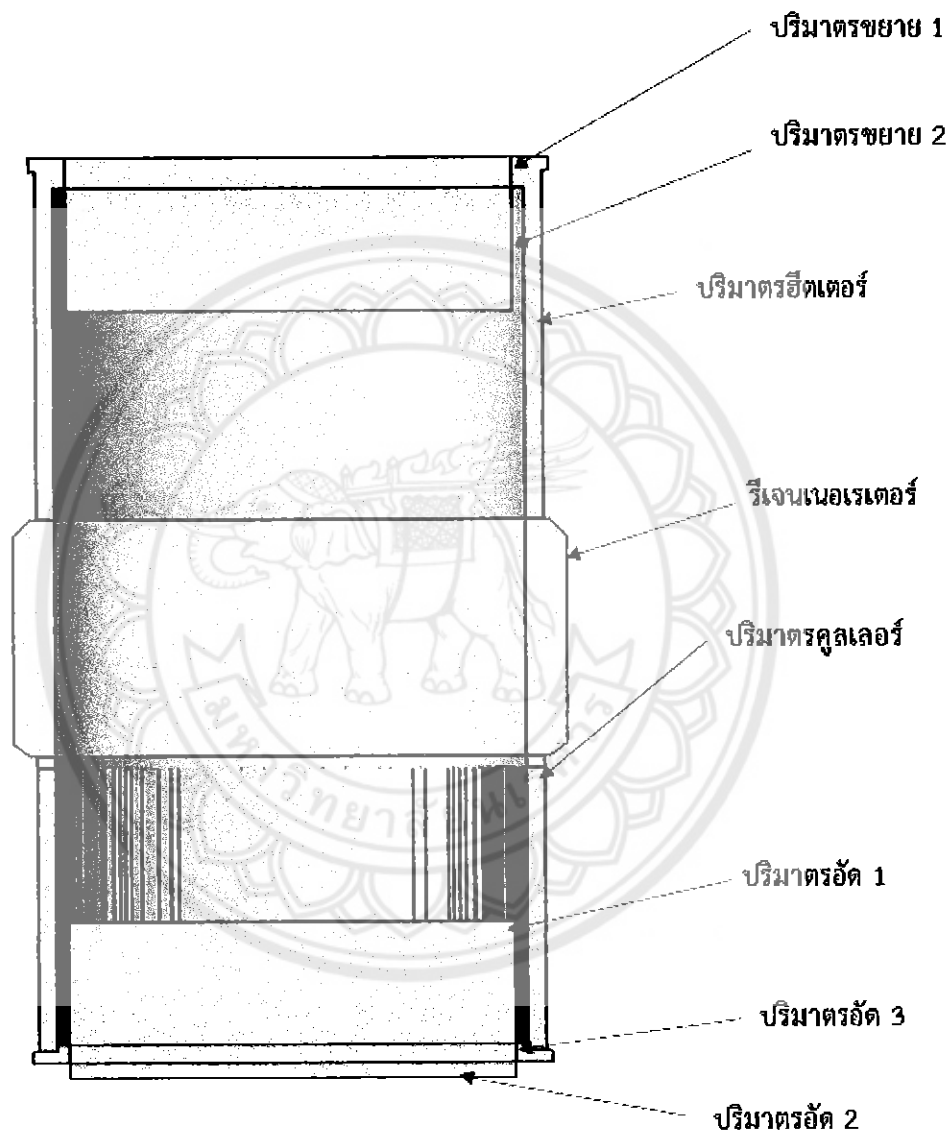
จากการศึกษาวิทยานิพนธ์ของชนะ ศรีคำ[5] ได้ทำการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรุ่น SEB100 ที่ระดับอุณหภูมิ 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส ในแต่ละระดับอุณหภูมิ จะทดสอบที่ระดับความดันต่างๆ ตั้งแต่ 1, 3, 5 และ 7 บาร์ พบว่าเครื่องยนต์ที่ได้ทำการทดสอบให้ผลของสมรรถนะที่ดีที่สุดที่ สภาวะการทำงานที่ระดับความดัน 7 บาร์ และระดับอุณหภูมิที่ผิวนอกส่วนรับความร้อน 500 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ผิวนอกส่วนคายความร้อน 35 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 360 รอบต่อนาที ซึ่งจากผลการทดสอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยชนะ ศรีคำ[5] พบว่าเป็นค่าที่ให้กำลังขาออกที่มากที่สุด จึงใช้สภาวะการทำงานนี้เพื่อทำการจำลองการทำงานของเครื่องยนต์โดยซอฟต์แวร์ Ansys โดยตั้งสมมติฐานและข้อกำหนดสำหรับแบบจำลองในส่วนของวิเคราะห์แบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง (FSI) คือ

1. อุณหภูมิผิวนอกส่วนคายความร้อน 35 องศาเซลเซียส (308 เคลวิน)
2. ผิวของอุปกรณ์ที่ติดกับเสื่อสูบและผิวของของไหลที่ไหลสู่เสื่อสูบกำหนดให้ไม่มีการถ่ายเทความร้อน (Adiabatic)
3. ผิวของอุปกรณ์ที่มีการถ่ายเทความร้อนกับอากาศบริเวณโดยรอบ จะกำหนดอุณหภูมิของอากาศที่ 27 องศาเซลเซียส (300 เคลวิน) และ natural convection coefficient ที่  $5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
4. มุมต่างของเพลาค้อเหวี่ยงเริ่มต้นที่  $90^\circ$



รูปที่ 3.2 boundary condition สำหรับแบบจำลอง

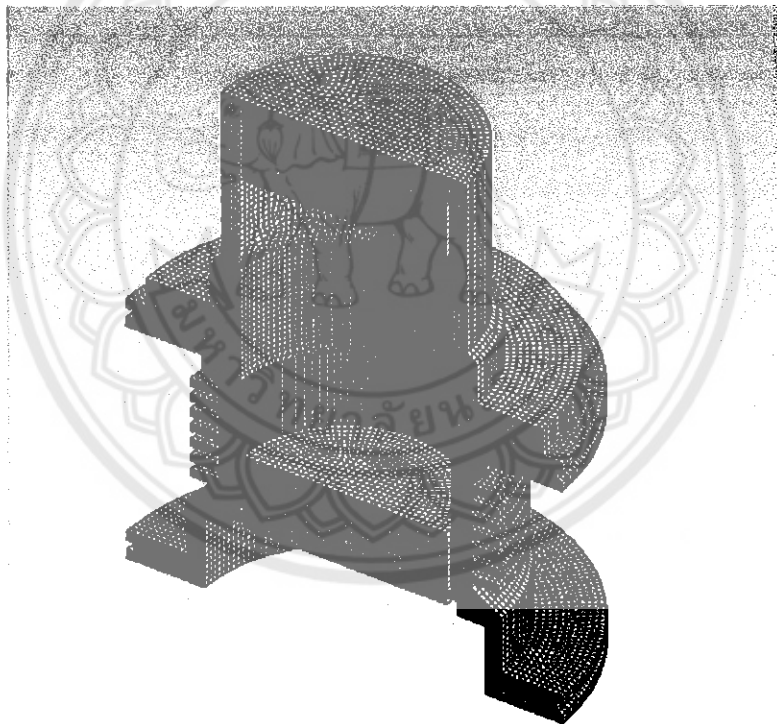
และแบบจำลองในส่วนการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ดังรูปที่ 3.3



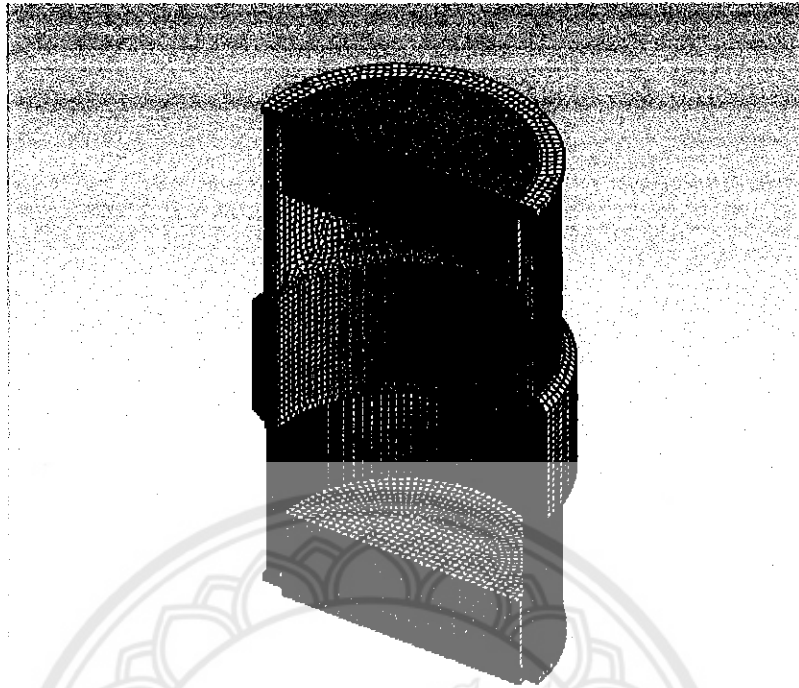
รูปที่ 3.3 โมเดลสามมิติของแบบจำลองเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรุ่น SEB 100 แบบพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD)

### 3.3 การสร้าง Mesh

สำหรับแบบจำลองเชิงตัวเลขนั้น mesh เป็นส่วนที่สำคัญมากสำหรับการคำนวณ โดยโหนดแต่ละโหนดจะเป็นตำแหน่งสำหรับการคำนวณ ซึ่งการที่มีจำนวนโหนดมากจะทำให้การคำนวณมีค่าที่ถูกต้องมากขึ้น แต่การที่มีจำนวนโหนดของแบบจำลองมีมากก็ย่อมต้องการฮาร์ดแวร์ที่มีประสิทธิภาพสูงตาม ดังนั้นการกำหนดจำนวนโหนดจำเป็นต้องกำหนดให้มีขนาดที่เหมาะสมเพื่อให้เหมาะสมกับฮาร์ดแวร์ที่มีอยู่ ในการสร้าง mesh สำหรับแบบจำลองของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง จะควบคุมขนาดของ mesh ที่ 2 มิลลิเมตร ทำให้ FSI มีจำนวนโหนดทั้งสิ้น 164,310 โหนด และ CFD มีจำนวนโหนดทั้งสิ้น 66,359 โหนด การสร้าง mesh ของโมเดลสามมิติส่วนที่อยู่ภายในกระบอกสูบทั้งส่วนที่เป็นสารทำงานและชิ้นส่วนอุปกรณ์จะควบคุมให้มีลักษณะสี่เหลี่ยม เป็นชั้นของ layer เพื่อให้สามารถตั้งค่า Dynamic layering ได้ดังรูปที่ 3.4 และ 3.5



รูปที่ 3.4 mesh สำหรับแบบจำลองแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง (FSI)



รูปที่ 3.5 mesh สำหรับแบบจำลองแบบพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD)

### 3.4 การวิเคราะห์แบบจำลอง

วิธี “Dynamic layering” จะถูกนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์สำหรับการสร้างแบบจำลอง การเคลื่อนที่ของลูกสูบในทรงสี่เหลี่ยมย่อยของ mesh การคำนวณของเครื่องยนต์ โดยวิธีนี้จะเป็น การเพิ่มหรือลดเซลล์ ที่อยู่ติดกับขอบเขตที่เคลื่อนที่ โดยจะขึ้นอยู่กับความสูงที่กำหนดไว้ในแต่ละชั้นที่ อยู่ติดกับผิวที่มีการเคลื่อนที่ ซึ่งจะมี Subroutine ที่อธิบายการเคลื่อนที่ของลูกสูบกำลังและ displacer ถูกเขียนโดยภาษา C (ภาคผนวก ก) เพื่อ compiled เข้าไปในซอฟต์แวร์ ANSYS สำหรับการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ในส่วนสารทำงานของเครื่องยนต์เท่านั้น แต่ สำหรับวิธีการวิเคราะห์แบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง (FSI) จำลองการไหลของสาร ทำงานและโครงสร้างในส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยวิธีการถ่ายเทความร้อนชนิดเชื่อมต่อ (Conjugate Heat Transfer) ซึ่งเป็นวิธีการแก้สมการของปัญหาปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลกับ โครงสร้างแบบ Monolithic approaches โดยจะตั้งค่าการจำลองเชิงตัวเลขที่ 360 time step ต่อ รอบการเคลื่อนที่ของเครื่องยนต์ เพื่อเก็บข้อมูลที่สำคัญดังนี้

1. ปริมาตรอัดที่แต่ละ time step
2. ความดันของปริมาตรอัดที่แต่ละ time step
3. อุณหภูมิของปริมาตรอัดที่แต่ละ time step
4. ปริมาตรขยายที่แต่ละ time step
5. ความดันของปริมาตรขยายที่แต่ละ time step
6. อุณหภูมิของปริมาตรขยายที่แต่ละ time st



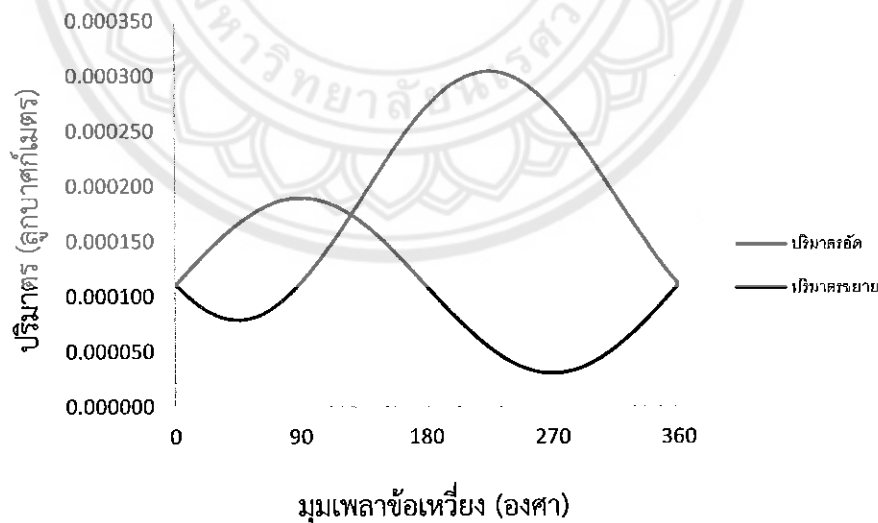
## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

ในบทนี้จะเป็นการนำโปรแกรม ANSYS มาใช้ในการแก้ปัญหาการจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง เพื่อทำนายลักษณะการไหลภายในเครื่องยนต์ที่เกิดขึ้น โดยใช้วิธีวิเคราะห์แบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง และนำมาเปรียบเทียบกับผลการทำนายค่าสมรรถนะจากการทำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD)

#### 4.1 ผลจากแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

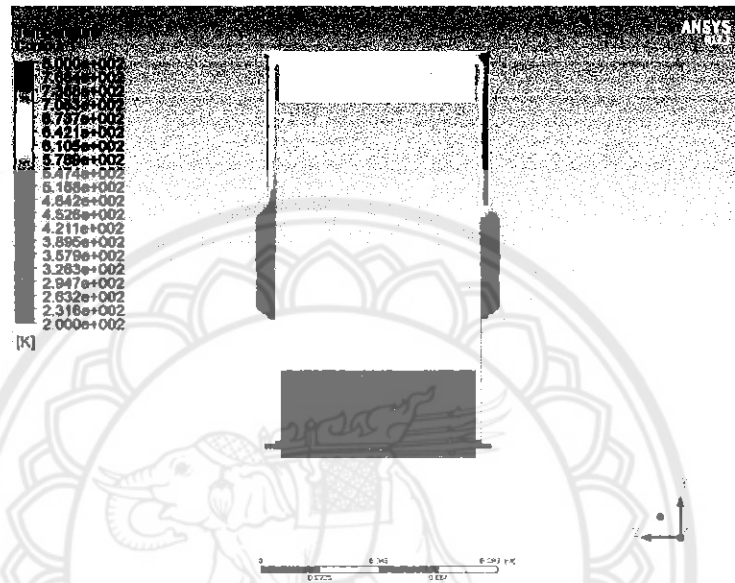
จากกราฟที่ 4.1 พบว่าปริมาตรอัดและปริมาตรขยายมีการเปลี่ยนแปลงเป็นลักษณะของกราฟไซน์ โดยปริมาตรขยายจะมีเฟสนำปริมาตรอัดอยู่ 135 องศา ปริมาตรขยายจะมีปริมาตรสูงสุดคือ 0.0001892 ลูกบาศก์เมตรเมื่อเพลาค้อเหวี่ยงเคลื่อนที่ไปได้ 90 องศา และมีปริมาตรต่ำสุดคือ 0.0000302 ลูกบาศก์เมตร เมื่อเพลาค้อเหวี่ยงเคลื่อนที่ไปได้ 270 องศา ปริมาตรอัดจะมีปริมาตรสูงสุดคือ 0.0003039 ลูกบาศก์เมตรเมื่อเพลาค้อเหวี่ยงเคลื่อนที่ไปได้ 225 องศา และมีปริมาตรต่ำสุดคือ 0.0000789 ลูกบาศก์เมตร เมื่อเพลาค้อเหวี่ยงเคลื่อนที่ไปได้ 45 องศา



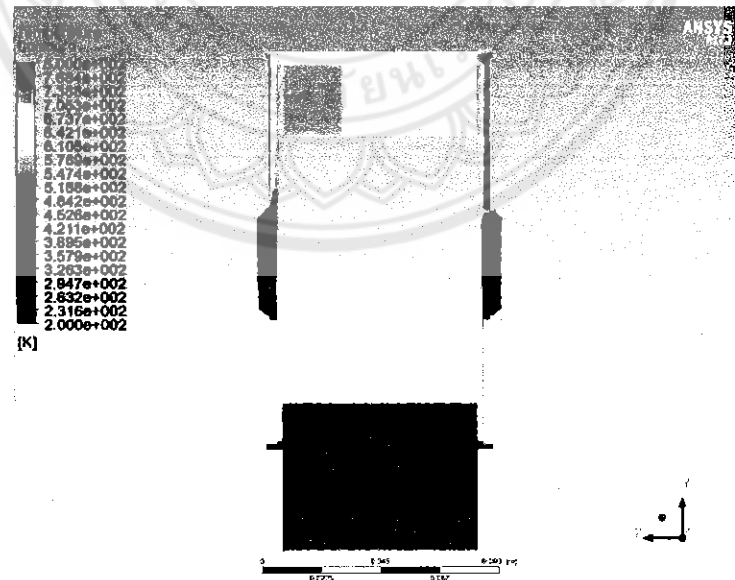
กราฟที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของเพลาค้อเหวี่ยง



จากรูปการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆของแบบจำลอง แสดงให้เห็นผลการถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งจากส่วนรับความร้อนและส่วนคายความร้อนซึ่งจะมีผลให้อุณหภูมิภายในปริมาตรขยายและปริมาตรหดเปลี่ยนไป ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2

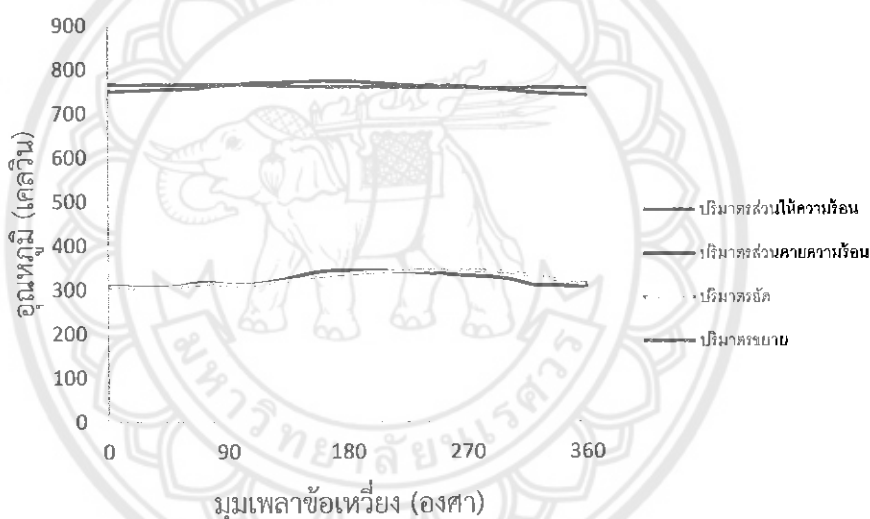


รูปที่ 4.1 รูปการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่งมุมเพลลาข้อเหวี่ยง 0 องศา



รูปที่ 4.2 รูปการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่งมุมเพลลาข้อเหวี่ยง 180 องศา

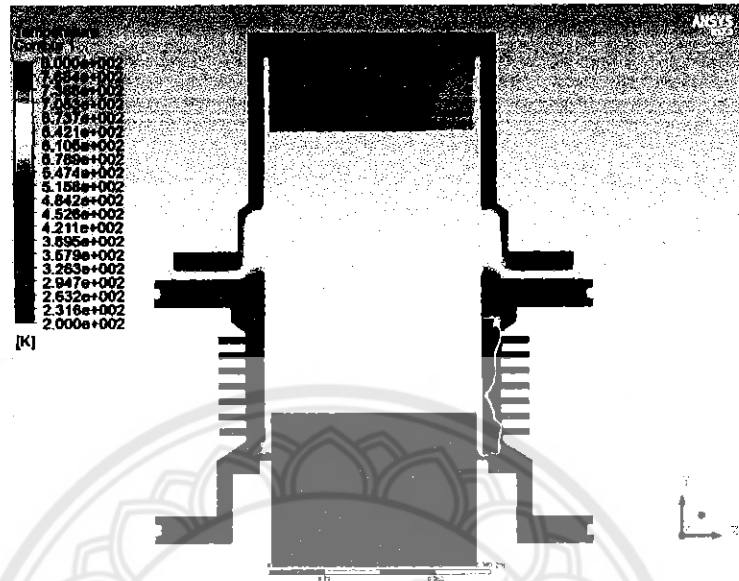
จากกราฟที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของเพลลาข้อเหวี่ยง จะเห็นว่าในส่วนของอุณหภูมิที่ปริมาตรของส่วนรับความร้อน จุดต่ำสุดของอุณหภูมิมอยู่ที่ 740.51 เคลวิน มุมเพลลาข้อเหวี่ยง 189 องศา จุดสูงสุดของอุณหภูมิมอยู่ที่ 774.02 เคลวิน มุมเพลลาข้อเหวี่ยง 161 องศา และอุณหภูมิที่ปริมาตรของส่วนคายความร้อน จุดต่ำสุดของอุณหภูมิมอยู่ที่ 305.84 เคลวิน มุมเพลลาข้อเหวี่ยง 33 องศา จุดสูงสุดของอุณหภูมิมอยู่ที่ 344.62 เคลวิน มุมเพลลาข้อเหวี่ยง 348 องศา อุณหภูมิที่ปริมาตรในส่วนของปริมาตรอัด จุดต่ำสุดของอุณหภูมิมอยู่ที่ 304.93 เคลวิน มุมเพลลาข้อเหวี่ยง 33 องศา จุดสูงสุดของอุณหภูมิมอยู่ที่ 334.11 เคลวิน มุมเพลลาข้อเหวี่ยง 205 องศา และอุณหภูมิที่ปริมาตรส่วนของปริมาตรขยาย จุดต่ำสุดของอุณหภูมิมอยู่ที่ 756.87 เคลวิน มุมเพลลาข้อเหวี่ยง 287 องศา จุดสูงสุดของอุณหภูมิมอยู่ที่ 766.35 เคลวิน มุมเพลลาข้อเหวี่ยง 1 องศา



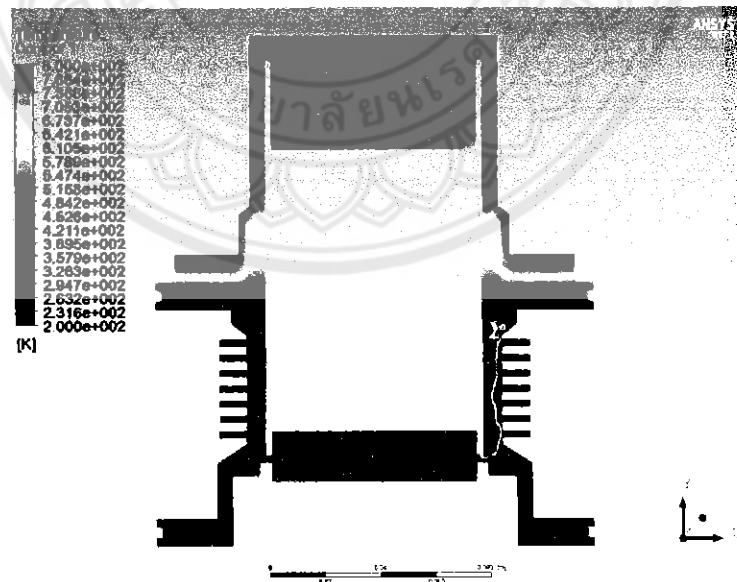
กราฟที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของเพลลาข้อเหวี่ยง

#### 4.2 ผลการคำนวณจากการทำแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างจากซอฟต์แวร์

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆพบว่าในแบบจำลองโดยวิธีวิเคราะห์แบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างมีการถ่ายเทอุณหภูมิในส่วนฮีตเตอร์สู่ปริมาตรขยาย มีการถ่ายเทอุณหภูมิในส่วนคูลเลอร์สู่ปริมาตรอัด และมีการถ่ายเทความร้อนจากฮีตเตอร์สู่คูลเลอร์ซึ่งมีผลทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนผ่านโครงสร้าง แต่ก็ยังมีจุดความร้อนบริเวณคูลเลอร์ที่ผลเป็นผิดพลาดจากการคำนวณโดยใช้โปรแกรมที่เกิดขึ้น

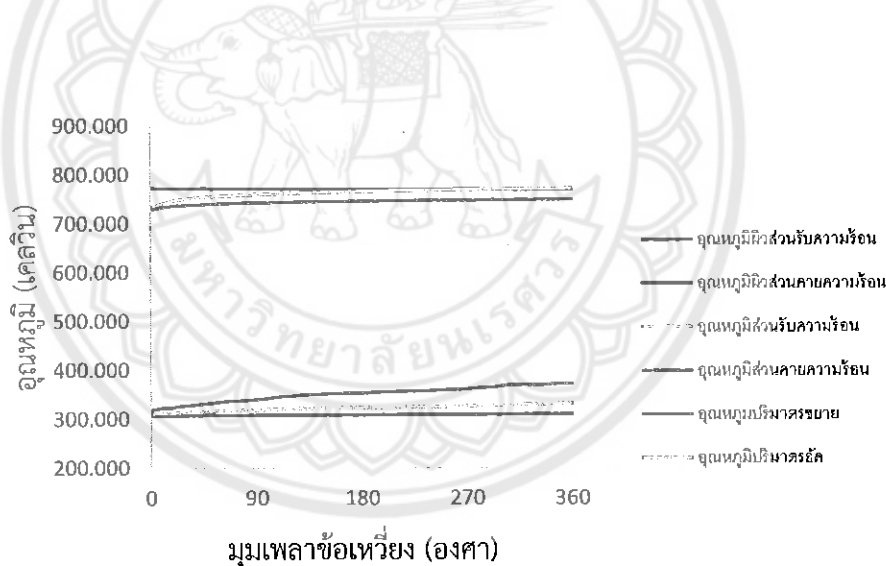


รูปที่ 4.3 รูปการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่งมุมเพลลาข้อเหวี่ยง 0 องศา



รูปที่ 4.4 รูปการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่งมุมเพลลาข้อเหวี่ยง 180 องศา

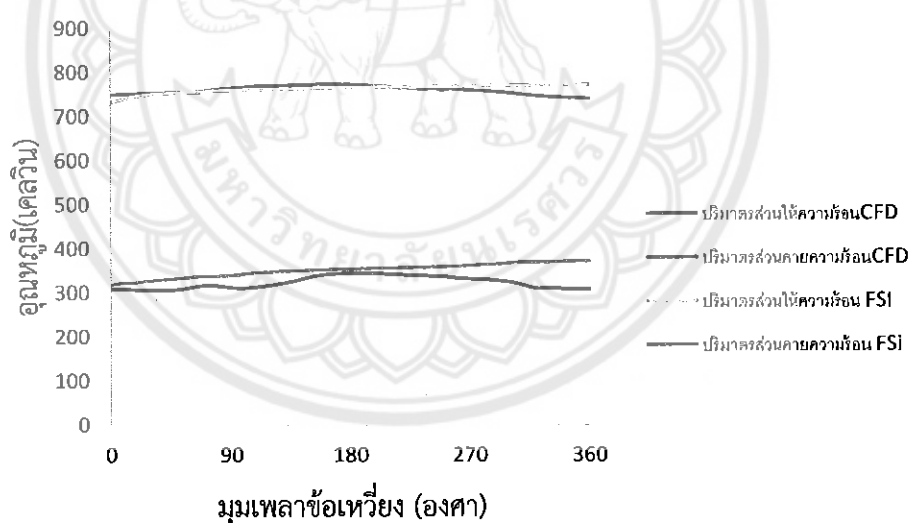
จากกราฟที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของเพลลาข้อเหวี่ยง จะเห็นว่าในส่วนของอุณหภูมิที่ผิวของส่วนรับความร้อน จุดต่ำสุดของอุณหภูมิอยู่ที่ 769.02 เคลวิน มุมเพลลาข้อเหวี่ยง 360 องศา จุดสูงสุดของอุณหภูมิอยู่ที่ 772.70 เคลวิน มุมเพลลาข้อเหวี่ยง 1 องศา และอุณหภูมิที่ผิวของส่วนคายความร้อน จุดต่ำสุดของอุณหภูมิอยู่ที่ 308.00 เคลวิน มุมเพลลาข้อเหวี่ยง 1 องศา จุดสูงสุดของอุณหภูมิอยู่ที่ 309.58 เคลวิน มุมเพลลาข้อเหวี่ยง 360 องศา และส่วนของอุณหภูมิที่ปริมาตรของส่วนรับความร้อน จุดต่ำสุดของอุณหภูมิอยู่ที่ 733.80 เคลวิน มุมเพลลาข้อเหวี่ยง 1 องศา จุดสูงสุดของอุณหภูมิอยู่ที่ 771.45 เคลวิน มุมเพลลาข้อเหวี่ยง 360 องศา และอุณหภูมิที่ปริมาตรของส่วนคายความร้อน จุดต่ำสุดของอุณหภูมิอยู่ที่ 319.43 เคลวิน มุมเพลลาข้อเหวี่ยง 1 องศา จุดสูงสุดของอุณหภูมิอยู่ที่ 371.78 เคลวิน มุมเพลลาข้อเหวี่ยง 354 องศา อุณหภูมิที่ปริมาตรในส่วนของปริมาตรอัด จุดต่ำสุดของอุณหภูมิอยู่ที่ 311.15 เคลวิน มุมเพลลาข้อเหวี่ยง 1 องศา จุดสูงสุดของอุณหภูมิอยู่ที่ 331.07 เคลวิน มุมเพลลาข้อเหวี่ยง 358 องศา และอุณหภูมิที่ปริมาตรส่วนของปริมาตรขยาย จุดต่ำสุดของอุณหภูมิอยู่ที่ 729.90 เคลวิน มุมเพลลาข้อเหวี่ยง 1 องศา จุดสูงสุดของอุณหภูมิอยู่ที่ 748.76 เคลวิน มุมเพลลาข้อเหวี่ยง 360 องศา



กราฟที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของเพลลาข้อเหวี่ยง

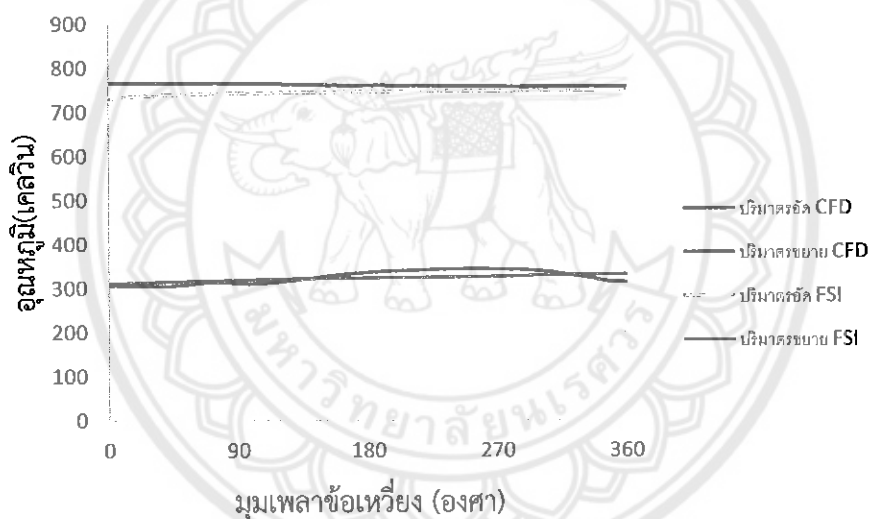
### 4.3 ผลการเปรียบเทียบการคำนวณ

จากกราฟที่ 4.4 พบว่าผลการคำนวณอุณหภูมิที่ปริมาตรส่วนรับความร้อนโดยวิธี CFD เฉลี่ยตลอดการทำงานในหนึ่งวัฏจักรคือ 760.35 เคลวิน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าผลการคำนวณอุณหภูมิที่ปริมาตรส่วนรับความร้อนโดยวิธี FSI ที่มีค่าเฉลี่ยตลอดการทำงานในหนึ่งวัฏจักรคือ 763.21 เคลวิน และพบว่าผลการคำนวณอุณหภูมิที่ปริมาตรส่วนคายความร้อนโดยวิธี CFD เฉลี่ยตลอดการทำงานในหนึ่งวัฏจักรคือ 323.47 เคลวิน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าผลการคำนวณอุณหภูมิที่ปริมาตรส่วนคายความร้อนโดยวิธี FSI ที่มีค่าเฉลี่ยตลอดการทำงานในหนึ่งวัฏจักรคือ 351.58 เคลวิน ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างปริมาตรส่วนรับความร้อนและเซลล์ที่ถูกคำนวณด้วยวิธี CFD มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 436.88 เคลวิน ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างปริมาตรส่วนรับความร้อนและส่วนคายความร้อนที่ถูกคำนวณด้วยวิธี FSI มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 411.63 เคลวิน แสดงให้เห็นถึงการสูญเสียความร้อนผ่านโครงสร้างจากส่วนรับความร้อนไปสู่ส่วนคายความร้อน ซึ่งเรียกว่าความสูญเสียภายใน (internal heat losses)



กราฟที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของเพลาค้อเหวี่ยง

จากกราฟที่ 4.5 พบว่าผลการคำนวณอุณหภูมิที่ปริมาตรอัดโดยวิธี CFD เฉลี่ยตลอดการทำงานในหนึ่งวัฏจักรคือ 325.53 เคลวิน ซึ่งมีค่ามากกว่าผลการคำนวณอุณหภูมิที่ปริมาตรอัดโดยวิธี FSI ที่มีค่าเฉลี่ยตลอดการทำงานในหนึ่งวัฏจักรคือ 322.78 เคลวิน และ พบว่าผลการคำนวณอุณหภูมิที่ปริมาตรขยายโดยวิธี CFD เฉลี่ยตลอดการทำงานในหนึ่งวัฏจักรคือ 761.2936 เคลวิน ซึ่งมีค่ามากกว่าผลการคำนวณอุณหภูมิที่ปริมาตรขยายโดยวิธี FSI ที่มีค่าเฉลี่ยตลอดการทำงานในหนึ่งวัฏจักรคือ 744.73 เคลวิน ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างปริมาตรขยายและปริมาตรอัดที่ถูกคำนวณด้วยวิธี CFD มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 435.77 เคล ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างปริมาตรขยายและปริมาตรอัดที่ถูกคำนวณด้วยวิธี FSI มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 421.95 เคลวิน



กราฟที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและการเคลื่อนของเพลาค้อเหวียง

พบว่าอุณหภูมิของแบบจำลอง CFD ที่ปริมาตรอัดและขยายจะมากกว่าอุณหภูมิของแบบจำลอง FSI เนื่องจากแบบจำลอง FSI ความร้อนที่ส่งเข้ามีการสูญเสียหลักจากผ่านส่วนที่เป็นโครงสร้าง

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 บทสรุป

โครงการนี้เป็นการจำลองเชิงตัวเลขของกระบวนการทำงานภายในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยใช้การวิเคราะห์แบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง (FSI) ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง SEB-100 สำหรับทำงานที่อุณหภูมิปานกลางเป็นกรณีศึกษา เพื่อศึกษาผลของการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่เครื่องยนต์สเตอร์ลิงและผลของความร้อนที่สูญเสียในส่วนโครงสร้าง โดยความร้อนที่สูญเสียไปจะมีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ที่ความดันสารทำงานซึ่งคืออากาศ 7 บาร์ ระดับอุณหภูมิผิวส่วนรับความร้อน 773 เคลวิน โดยนำไปเทียบกับผลของความร้อนที่ถ่ายเทของแบบจำลองแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ซึ่งแบบจำลองนี้จะคำนวณในส่วนของของไหลเท่านั้น

จากผลการทำแบบจำลองทั้งสองแบบพบว่าแบบจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยใช้วิธีวิเคราะห์แบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างจะให้ผลของอุณหภูมิของส่วนรับความร้อนและส่วนคายความร้อนที่ตำแหน่งต่างๆน้อยกว่าแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิระหว่างปริมาตรส่วนรับความร้อนและส่วนคายความร้อนจากแบบจำลอง CFD มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 436.8843 เคลวิน แบบจำลอง FSI มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 411.6263 เคลวิน แสดงให้เห็นถึงการสูญเสียความร้อนผ่านโครงสร้างจากส่วนรับความร้อนไปสู่ส่วนคายความร้อน ซึ่งเรียกว่า ความร้อนสูญเสียภายใน (Internal heat losses) ซึ่งจะต่างกับแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่จำลองให้ถ่ายเทความร้อนเข้าที่ผิวของไหลบริเวณส่วนคายความร้อนโดยตรง ดังนั้นในการใช้แบบจำลองโดยวิธีวิเคราะห์แบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างจะสามารถจำลองปรากฏการณ์การทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้ดีขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการสร้างโมเดลแบบจำลองควรกำหนดขนาดของ mesh ให้มีความเหมาะสมเพื่อให้การคำนวณด้วยระเบียบวิธีการเชิงตัวเลขเกิดความผิดพลาดน้อยลง

5.2.2 เพื่อให้ใกล้เคียงกับสภาวะการทำงานจริงของเครื่องยนต์ SEB-100 ควรกำหนดขนาดมุมต่างของเพลาค้อเหวี่ยงที่ 60 องศา

5.2.3 ควรเพิ่มส่วนของโครงสร้างภายในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเพื่อศึกษาผลของการถ่ายเทความร้อนผ่านโครงสร้าง เพื่อให้ผลของแบบจำลองใกล้เคียงปรากฏการณ์จริงมากขึ้น





## เอกสารอ้างอิง

- [1] Global Energy Trends – BP Statistical Review 2015." [Http://euanmearns.com/](http://euanmearns.com/). Accessed November 20, 2559. <http://euanmearns.com/global-energy-trends-bp-statistical-review-2015/>.
- [2] M. Euan "Global Energy Trends – BP Statistical Review 2015" [www.http://euanmearns.com/](http://euanmearns.com/). <http://euanmearns.com/global-energy-trends-bp-statistical-review-2015/> (accessed June 12, 2015).
- [3] I. Urieli and D.M. Berchowitz. "Stirling Cycle Engine Analysis." Bristol, Adam Hilger Lt (1984): .
- [4] กฤษลิน ฅมยาบัตร์ "การศึกษาจากโลกการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างของอุณหภูมิปานกลาง", จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2010.
- [5] ชนะ ศรีคำ "การออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงสำหรับอุณหภูมิปานกลาง", จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2009
- [6] K. Mahkamov. "Design Improvements to a Biomass Stirling Engine Using Mathematical Analysis and 3D CFD Modeling." Journal of Energy Resources Technology 128 (2006): 203-215..
- [7] M.B. Ibrahim. "CFD modeling of free-piston Stirling engines." NASA Report No NASA/TM-2001-211132 (2001): .
- [8] K. Mahkamov, D. Djumanov. "Three- Dimensional CFD Modelling of a Stirling Engine." Proceeding of 11th International Stirling Engine Conference (2003): 96-107.
- [9] R. Tan, K. Mahkamov, D. Djumanov. "Experimental and numerical investigations on a small physical Model of a solar Stirling engine." Proceeding of 12th International Stirling Engine Conference (2005): 74-85.
- [10] T.A. Cheema . "Numerical Investigation on the Effects of Sample Wire Motion in a Tube Furnace." Applied Mechanics and Materials (2013): 771-774.

- [11] M. Hellenkamp and H. Pfeifer . . "Thermally induced stresses on radiant heating tubes including the effect of fluid–structure interaction." elsevier (2015): .
- [12] A. Della Torre, A. Guzzetti, G. Montenegro, T. Cerri1, A. Onorati and F. Aloui . "CFD MODELLING OF A BETA-TYPE STIRLING MACHINE." Dip. di Energia, Politecnico di Milano (2014): .
- [13] W. Rodger ,M. Steven . "Towards Fully Three-Dimensional Virtual Stirling Convertors For Multi-Physics Analysis and Optimization ." NASA Glenn Research Center (2006): .
- [14] A. Yunus and A. Boles. Thermodynamics An Engineering Approach. , 5 edition (June 3, 2005).
- [15] J. Miller. "A conjugate heat transfer method for modeling oil-cooled pistons." Computational Analysis of Technical Systems (2015): .

### ภาคผนวก ก

C Subroutine สำหรับ Dynamics Layering

```

#include "udf.h"
#include "dynamesh_tools.h"

#define RADIANS(deg) (M_PI*(deg)/180.0)
#define Ae 0.0185 /* crank throw */
#define Ac 0.0185 /* crank throw */
#define L 0.1 /* conrod length */
#define Z_LIMIT -0.037

DEFINE_CG_MOTION(piston_e, dt, cg_vel, cg_omega, time, dtime)
{
    /* get RPM and starting crank angle */
    real rpm = RP_Get_Real ("dynamesh/in-cyn/crank-rpm");
    real start_angle = RP_Get_Real ("dynamesh/in-cyn/crank-start-angle");
    real z_piston, angle;

    /* compute current angle at t = time
       note: crank-rpm is in units of RPM
           crank-start-angle is in units of degree */
    angle = start_angle+time/(1/(rpm/60)/360);
    angle = RADIANS (angle);

    /* compute current z_piston (=0 at tdc, angle = 0) */
    z_piston = Ae*(1+cos(angle))-Ae;
    Message ("\ntime = %f, piston_e = %f, angle_e = %f", time, z_piston,
    angle*180/M_PI);

    /* compute position of CG from reference origin */
    NV_V_VS (cg_vel, =, DT_REFO((Dynamic_Thread *)dt), +,
            DT_AXIS ((Dynamic_Thread *)dt), *, -z_piston);

    /* compute change in cg location */

```

```

NV_V (cg_vel, -=, DT_CG ((Dynamic_Thread *)dt));

/* compute velocity vector */
NV_S (cg_vel, /=, dtime);
NV_S (cg_omega, =, 0.0); /* no angular motion */
}

DEFINE_CG_MOTION(piston_e_b, dt, cg_vel, cg_omega, time, dtime)
{
/* get RPM and starting crank angle */
real rpm = RP_Get_Real ("dynamesh/in-cyn/crank-rpm");
real start_angle = RP_Get_Real ("dynamesh/in-cyn/crank-start-angle");
real z_piston, angle;

/* compute current angle at t = time
note: crank-rpm is in units of RPM
crank-start-angle is in units of degree */
angle = start_angle+time/(1/(rpm/60)/360);
angle = RADIANS (angle);

/* compute ceeurrent z_piston (=0 at tdc, angle = 0) */
z_piston = Ae*(1+cos(angle))-Ae;
Message ("\ntime = %f, piston_e = %f, angle_e = %f", time, z_piston,
angle*180/M_PI);

/* compute position of CG from reference origin */
NV_V_VS (cg_vel, =, DT_REF0((Dynamic_Thread *)dt), +,
DT_AXIS ((Dynamic_Thread *)dt), *, -z_piston);

/* compute change in cg location */
NV_V (cg_vel, -=, DT_CG ((Dynamic_Thread *)dt));

/* compute velocity vector */
NV_S (cg_vel, /=, dtime);
NV_S (cg_omega, =, 0.0); /* no angular motion */

```

```

}

DEFINE_CG_MOTION(piston_c, dt, cg_vel, cg_omega, time, dtime)
{
  /* get RPM and starting crank angle */
  real rpm = RP_Get_Real ("dynamics/in-cyn/crank-rpm");
  real start_angle = RP_Get_Real ("dynamics/in-cyn/crank-start-angle");
  real z_piston, angle;

  /* compute current angle at t = time
     note: crank-rpm is in units of RPM
           crank-start-angle is in units of degree */
  angle = start_angle + 90 + time/(1/(rpm/60)/360);
  angle = RADIANS (angle);

  /* compute current z_piston (=0 at tdc, angle = 0) */
  z_piston = Ac*(1+cos(angle+M_Pi))-2*Ac;
  Message ("ntime = %f, z_piston_c = %f, angle_c = %f", time, z_piston,
  angle*180/M_Pi-90);

  /* compute position of CG from reference origin */
  NV_V_VS (cg_vel, =, DT_REF0((Dynamic_Thread *)dt), +,
           DT_AXIS ((Dynamic_Thread *)dt), *, -z_piston);

  /* compute change in cg location */
  NV_V (cg_vel, -=, DT_CG ((Dynamic_Thread *)dt));

  /* compute velocity vector */
  NV_S (cg_vel, /=, dtime);
  NV_S (cg_omega, =, 0.0); /* no angular motion */
}

```

ภาคผนวก ข

ตาราง ข.1 ผลการคำนวณจากการทำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp										ex avg	com avg
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	compression2	compression3	compression2		
1	733.794	319.430	729.893	729.905	317.434	317.441	319.455	317.441	319.455	317.441	729.899	311.152
2	734.653	319.849	730.323	730.336	317.856	317.865	319.882	317.865	319.882	317.865	730.329	311.294
3	735.080	320.265	730.538	730.550	318.276	318.287	320.307	318.287	320.307	318.287	730.544	311.436
4	735.511	320.754	730.754	730.767	318.768	318.781	320.805	318.781	320.805	318.781	730.761	311.602
5	736.397	321.205	731.198	731.211	319.223	319.239	321.266	319.239	321.266	319.239	731.204	311.755
6	737.938	321.645	731.969	731.983	319.666	319.685	321.716	319.685	321.716	319.685	731.976	311.905
7	738.241	322.096	732.122	732.135	320.121	320.144	322.178	320.144	322.178	320.144	732.128	312.059
8	739.369	322.571	732.687	732.701	320.599	320.626	322.665	320.626	322.665	320.626	732.694	312.222
9	740.365	322.767	733.186	733.200	320.799	320.829	322.873	320.829	322.873	320.829	733.193	312.291
10	741.255	322.918	733.632	733.646	320.953	320.988	323.039	320.988	323.039	320.988	733.639	312.346
11	742.060	322.983	734.036	734.050	321.021	321.061	323.122	321.061	323.122	321.061	734.043	312.374
12	742.795	323.028	734.405	734.419	321.070	321.117	323.189	321.117	323.189	321.117	734.412	312.396
13	743.472	323.152	734.744	734.758	321.198	321.251	323.336	321.251	323.336	321.251	734.751	312.445
14	744.098	323.186	735.058	735.073	321.235	321.295	323.395	321.295	323.395	321.295	735.065	312.465
15	744.681	323.240	735.351	735.365	321.292	321.360	323.474	321.360	323.474	321.360	735.358	312.491
16	745.226	323.296	735.625	735.639	321.352	321.428	323.552	321.428	323.552	321.428	735.632	312.517
17	745.738	323.248	735.883	735.897	321.307	321.391	323.523	321.391	323.523	321.391	735.890	312.508
18	746.221	323.430	736.126	736.140	321.493	321.585	323.724	321.585	323.724	321.585	736.133	312.575

ตาราง ข.1 ผลการคำนวณจากการทำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp											ex avg	com avg
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3						
19	746.678	323.907	736.356	736.370	321.973	322.074	324.218	736.363	312.739				
20	747.111	324.416	736.574	736.588	322.486	322.594	324.742	736.581	312.914				
21	747.523	325.085	736.782	736.795	323.159	323.276	325.428	736.788	313.143				
22	747.916	325.703	736.980	736.993	323.780	323.905	326.066	736.986	313.355				
23	748.291	326.113	737.169	737.182	324.193	324.326	326.495	737.176	313.498				
24	748.651	326.460	737.351	737.364	324.544	324.686	326.860	737.357	313.620				
25	748.995	326.847	737.525	737.537	324.934	325.083	327.267	737.531	313.756				
26	749.326	327.047	737.693	737.705	325.138	325.296	327.483	737.699	313.828				
27	749.645	327.250	737.855	737.865	325.344	325.509	327.709	737.860	313.903				
28	749.952	327.686	738.010	738.020	325.784	325.957	328.160	738.015	314.053				
29	750.249	327.877	738.161	738.170	325.978	326.159	328.362	738.165	314.121				
30	750.535	328.017	738.306	738.315	326.122	326.310	328.525	738.311	314.175				
31	750.812	328.265	738.447	738.455	326.374	326.570	328.786	738.451	314.262				
32	751.080	328.442	738.583	738.591	326.554	326.757	328.985	738.587	314.328				
33	751.339	328.613	738.715	738.722	326.728	326.938	329.176	738.719	314.392				
34	751.591	328.826	738.844	738.850	326.945	327.163	329.400	738.847	314.467				
35	751.836	328.963	738.969	738.974	327.086	327.310	329.547	738.971	314.516				
36	752.074	329.161	739.090	739.094	327.287	327.518	329.756	739.092	314.585				
37	752.305	329.349	739.208	739.211	327.479	327.716	329.958	739.209	314.653				
38	752.530	329.608	739.322	739.326	327.741	327.984	330.231	739.324	314.744				

ตาราง ข.1 ผลการคำนวณจากการทำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp								compression3	ex avg	com avg
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg			
39	752.749	329.972	739.434	739.437	328.108	328.358	330.612	739.436	314.871		
40	752.963	330.246	739.544	739.545	328.386	328.642	330.905	739.544	314.968		
41	753.172	330.548	739.650	739.651	328.691	328.954	331.226	739.651	315.075		
42	753.375	330.927	739.754	739.754	329.074	329.343	331.626	739.754	315.209		
43	753.573	331.277	739.856	739.855	329.427	329.702	331.998	739.856	315.333		
44	753.767	331.534	739.956	739.954	329.688	329.969	332.279	739.955	315.426		
45	753.957	331.685	740.053	740.050	329.843	330.130	332.454	740.052	315.485		
46	754.143	331.817	740.148	740.145	329.978	330.270	332.610	740.147	315.537		
47	754.324	332.127	740.242	740.237	330.292	330.590	332.946	740.239	315.649		
48	754.502	332.434	740.333	740.327	330.602	330.906	333.280	740.330	315.760		
49	754.676	332.642	740.423	740.416	330.813	331.122	333.512	740.419	315.837		
50	754.846	332.840	740.510	740.503	331.015	331.329	333.736	740.507	315.912		
51	755.013	333.070	740.596	740.588	331.249	331.568	333.993	740.592	315.998		
52	755.177	333.314	740.680	740.672	331.496	331.821	334.263	740.676	316.088		
53	755.338	333.561	740.763	740.754	331.746	332.076	334.536	740.758	316.179		
54	755.495	333.954	740.844	740.834	332.143	332.477	334.956	740.839	316.319		
55	755.650	334.353	740.924	740.913	332.546	332.885	335.379	740.918	316.460		
56	755.802	334.662	741.002	740.991	332.858	333.201	335.712	740.996	316.571		
57	755.951	334.998	741.079	741.067	333.198	333.545	336.076	741.073	316.692		
58	756.098	335.360	741.155	741.142	333.563	333.915	336.469	741.149	316.823		



ตาราง ข.1 ผลการคำนวณจากการทำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp											ex avg	com avg
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	compression2	compression3	compression2	compression3		
59	756.242	335.608	741.230	741.216	333.814	334.170	336.749	334.170	336.749	334.170	336.749	741.223	316.916
60	756.384	335.897	741.304	741.288	334.107	334.466	337.071	334.466	337.071	334.466	337.071	741.296	317.024
61	756.523	336.232	741.376	741.359	334.445	334.808	337.439	334.808	337.439	334.808	337.439	741.368	317.146
62	756.660	336.512	741.447	741.429	334.729	335.095	337.756	335.095	337.756	335.095	337.756	741.438	317.252
63	756.795	336.791	741.517	741.498	335.011	335.381	338.071	335.381	338.071	335.381	338.071	741.508	317.357
64	756.928	336.978	741.586	741.566	335.202	335.575	338.294	335.575	338.294	335.575	338.294	741.576	317.431
65	757.059	337.073	741.653	741.633	335.301	335.677	338.425	335.677	338.425	335.677	338.425	741.643	317.475
66	757.187	337.291	741.720	741.699	335.522	335.902	338.679	335.902	338.679	335.902	338.679	741.710	317.560
67	757.314	337.486	741.786	741.764	335.721	336.103	338.909	336.103	338.909	336.103	338.909	741.775	317.636
68	757.439	337.594	741.850	741.828	335.832	336.217	339.051	336.217	339.051	336.217	339.051	741.839	317.684
69	757.562	337.598	741.914	741.891	335.839	336.228	339.089	336.228	339.089	336.228	339.089	741.903	317.696
70	757.683	337.623	741.977	741.954	335.868	336.260	339.147	336.260	339.147	336.260	339.147	741.965	317.716
71	757.803	337.701	742.039	742.015	335.950	336.344	339.258	336.344	339.258	336.344	339.258	742.027	317.753
72	757.921	337.787	742.100	742.075	336.039	336.436	339.378	336.436	339.378	336.436	339.378	742.088	317.793
73	758.037	337.811	742.160	742.135	336.067	336.466	339.437	336.466	339.437	336.466	339.437	742.148	317.812
74	758.152	337.827	742.220	742.194	336.086	336.488	339.487	336.488	339.487	336.488	339.487	742.207	317.829
75	758.265	337.944	742.278	742.252	336.207	336.611	339.637	336.611	339.637	336.611	339.637	742.265	317.879
76	758.377	338.054	742.336	742.309	336.320	336.726	339.778	336.726	339.778	336.726	339.778	742.323	317.926
77	758.487	338.106	742.393	742.366	336.375	336.783	339.859	336.783	339.859	336.783	339.859	742.380	317.953
78	758.595	338.199	742.449	742.422	336.472	336.882	339.980	336.882	339.980	336.882	339.980	742.436	317.993

ตาราง ข.1 ผลการคำนวณจากการทำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp											
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg	com avg			
79	758.703	338.302	742.505	742.477	336.579	336.991	340.111	742.491	318.037			
80	758.809	338.430	742.560	742.532	336.710	337.124	340.263	742.546	318.088			
81	758.913	338.517	742.614	742.585	336.800	337.216	340.374	742.600	318.125			
82	759.017	338.636	742.668	742.639	336.923	337.340	340.518	742.653	318.173			
83	759.119	338.740	742.721	742.691	337.030	337.449	340.645	742.706	318.215			
84	759.220	338.869	742.773	742.743	337.163	337.584	340.798	742.758	318.266			
85	759.319	339.052	742.825	742.795	337.349	337.772	341.004	742.810	318.335			
86	759.418	339.287	742.876	742.845	337.588	338.012	341.262	742.860	318.421			
87	759.515	339.558	742.926	742.896	337.862	338.288	341.556	742.911	318.519			
88	759.611	339.842	742.976	742.945	338.150	338.578	341.862	742.961	318.621			
89	759.707	340.101	743.025	742.994	338.412	338.841	342.141	743.010	318.714			
90	759.801	340.410	743.074	743.043	338.725	339.156	342.469	743.058	318.823			
91	759.894	340.610	743.122	743.091	338.929	339.362	342.686	743.106	318.895			
92	759.986	340.760	743.169	743.138	339.082	339.518	342.852	743.154	318.951			
93	760.077	340.841	743.216	743.185	339.166	339.604	342.948	743.201	318.983			
94	760.167	340.942	743.262	743.232	339.271	339.711	343.064	743.247	319.021			
95	760.256	341.098	743.308	743.278	339.431	339.873	343.234	743.293	319.078			
96	760.344	341.398	743.354	743.323	339.734	340.179	343.548	743.339	319.183			
97	760.431	341.868	743.399	743.368	340.208	340.655	344.031	743.384	319.344			
98	760.518	342.340	743.443	743.413	340.683	341.132	344.515	743.428	319.505			

ตาราง ข.1 ผลการคำนวณจากการทำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp										
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg	com avg		
99	760.603	342.751	743.487	743.457	341.098	341.550	344.938	743.472	319.646		
100	760.688	343.095	743.531	743.501	341.445	341.900	345.293	743.516	319.764		
101	760.772	343.458	743.574	743.544	341.811	342.269	345.667	743.559	319.889		
102	760.854	343.852	743.616	743.587	342.209	342.668	346.071	743.602	320.024		
103	760.937	344.114	743.659	743.630	342.475	342.937	346.344	743.644	320.115		
104	761.018	344.345	743.701	743.672	342.709	343.174	346.586	743.686	320.195		
105	761.098	344.658	743.742	743.713	343.025	343.492	346.909	743.728	320.303		
106	761.178	344.974	743.784	743.755	343.345	343.814	347.236	743.769	320.412		
107	761.257	345.314	743.825	743.796	343.688	344.161	347.587	743.810	320.529		
108	761.335	345.624	743.865	743.836	344.002	344.476	347.908	743.851	320.636		
109	761.413	345.905	743.905	743.877	344.286	344.763	348.199	743.891	320.733		
110	761.490	346.099	743.945	743.917	344.484	344.963	348.404	743.931	320.801		
111	761.566	346.174	743.984	743.956	344.563	345.044	348.490	743.970	320.830		
112	761.642	346.342	744.023	743.995	344.734	345.218	348.668	744.009	320.889		
113	761.716	346.487	744.061	744.034	344.883	345.369	348.824	744.048	320.941		
114	761.790	346.738	744.100	744.073	345.137	345.625	349.084	744.086	321.028		
115	761.864	346.874	744.138	744.111	345.277	345.767	349.230	744.124	321.077		
116	761.937	346.901	744.175	744.149	345.307	345.799	349.267	744.162	321.089		
117	762.009	346.969	744.212	744.186	345.378	345.872	349.346	744.199	321.115		
118	762.081	347.124	744.249	744.223	345.537	346.032	349.512	744.236	321.171		

ตาราง ข.1 ผลการคำนวณจากการทำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp										com avg
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg	com avg		
119	762.152	347.100	744.286	744.260	345.516	346.013	349.499	744.273	321.166		
120	762.222	347.344	744.322	744.297	345.764	346.262	349.752	744.309	321.251		
121	762.292	347.603	744.358	744.333	346.027	346.527	350.020	744.345	321.340		
122	762.361	347.918	744.393	744.369	346.345	346.846	350.343	744.381	321.448		
123	762.430	348.225	744.428	744.405	346.656	347.158	350.658	744.417	321.553		
124	762.498	348.478	744.463	744.440	346.912	347.416	350.920	744.452	321.640		
125	762.565	348.656	744.498	744.475	347.094	347.598	351.106	744.487	321.702		
126	762.632	348.837	744.532	744.510	347.278	347.784	351.296	744.521	321.765		
127	762.699	349.015	744.567	744.545	347.459	347.966	351.482	744.556	321.827		
128	762.765	349.228	744.600	744.579	347.676	348.184	351.704	744.590	321.901		
129	762.830	349.422	744.634	744.613	347.874	348.382	351.907	744.624	321.969		
130	762.895	349.565	744.667	744.647	348.020	348.529	352.058	744.657	322.019		
131	762.960	349.706	744.700	744.681	348.165	348.674	352.209	744.690	322.070		
132	763.024	349.890	744.733	744.714	348.352	348.862	352.402	744.724	322.134		
133	763.087	350.016	744.765	744.747	348.481	348.992	352.536	744.756	322.179		
134	763.150	350.128	744.797	744.780	348.597	349.108	352.658	744.789	322.219		
135	763.213	350.278	744.829	744.813	348.751	349.262	352.816	744.821	322.272		
136	763.275	350.493	744.860	744.845	348.969	349.480	353.039	744.853	322.346		
137	763.336	350.530	744.892	744.877	349.009	349.521	353.083	744.884	322.361		
138	763.397	350.491	744.923	744.909	348.974	349.486	353.051	744.916	322.350		

ตาราง ข.1 ผลการคำนวณจากการทำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp											
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg	com avg			
139	763.458	350.555	744.953	744.941	349.041	349.553	353.122	744.947	322.374			
140	763.518	350.630	744.984	744.972	349.120	349.631	353.203	744.978	322.401			
141	763.578	350.746	745.014	745.004	349.240	349.751	353.325	745.009	322.442			
142	763.638	350.876	745.045	745.035	349.373	349.884	353.461	745.040	322.487			
143	763.697	350.974	745.074	745.066	349.475	349.986	353.563	745.070	322.521			
144	763.755	351.115	745.104	745.096	349.619	350.130	353.707	745.100	322.569			
145	763.813	351.175	745.134	745.127	349.682	350.193	353.769	745.130	322.590			
146	763.871	351.310	745.163	745.157	349.821	350.331	353.906	745.160	322.635			
147	763.928	351.437	745.192	745.187	349.951	350.461	354.035	745.189	322.678			
148	763.985	351.600	745.221	745.217	350.118	350.628	354.201	745.219	322.734			
149	764.042	351.716	745.249	745.246	350.237	350.747	354.318	745.248	322.773			
150	764.098	351.908	745.277	745.276	350.433	350.942	354.512	745.277	322.837			
151	764.154	352.065	745.306	745.305	350.594	351.102	354.670	745.305	322.890			
152	764.210	352.177	745.334	745.334	350.709	351.217	354.782	745.334	322.927			
153	764.265	352.277	745.362	745.363	350.812	351.320	354.883	745.363	322.961			
154	764.319	352.316	745.390	745.392	350.855	351.362	354.923	745.391	322.974			
155	764.374	352.292	745.417	745.421	350.834	351.341	354.900	745.419	322.967			
156	764.428	352.338	745.445	745.449	350.884	351.390	354.946	745.447	322.982			
157	764.481	352.402	745.472	745.477	350.951	351.457	355.010	745.475	323.003			
158	764.535	352.497	745.499	745.506	351.050	351.555	355.104	745.502	323.035			

ตาราง ข.1 ผลการคำนวณจากการทำงานจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp										com avg
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg	com avg		
159	764.588	352.529	745.525	745.534	351.086	351.590	355.136	745.530	323.045		
160	764.641	352.581	745.552	745.561	351.141	351.645	355.187	745.557	323.062		
161	764.693	352.685	745.578	745.589	351.249	351.753	355.290	745.584	323.097		
162	764.745	352.804	745.605	745.616	351.371	351.874	355.407	745.611	323.136		
163	764.797	352.932	745.631	745.644	351.503	352.005	355.533	745.637	323.178		
164	764.848	353.082	745.656	745.671	351.656	352.158	355.681	745.664	323.227		
165	764.899	353.189	745.682	745.698	351.766	352.268	355.785	745.690	323.262		
166	764.950	353.246	745.707	745.725	351.827	352.328	355.840	745.716	323.280		
167	765.000	353.313	745.732	745.751	351.897	352.398	355.905	745.742	323.302		
168	765.050	353.415	745.757	745.778	352.003	352.503	356.004	745.767	323.335		
169	765.100	353.421	745.781	745.804	352.013	352.513	356.008	745.793	323.336		
170	765.150	353.341	745.806	745.831	351.936	352.436	355.926	745.818	323.309		
171	765.199	353.286	745.831	745.857	351.884	352.384	355.868	745.844	323.289		
172	765.248	353.294	745.855	745.882	351.896	352.395	355.874	745.869	323.291		
173	765.297	353.264	745.879	745.908	351.869	352.368	355.841	745.893	323.280		
174	765.345	353.302	745.903	745.934	351.911	352.409	355.877	745.918	323.292		
175	765.393	353.335	745.926	745.959	351.948	352.446	355.908	745.943	323.303		
176	765.441	353.302	745.950	745.985	351.918	352.415	355.872	745.967	323.291		
177	765.489	353.304	745.973	746.010	351.924	352.421	355.872	745.991	323.291		
178	765.536	353.378	745.997	746.035	352.001	352.499	355.943	746.016	323.314		

ตาราง ข.1 ผลการคำนวณจากการทำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp									
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg	com avg	
179	765.583	353.444	746.020	746.060	352.070	352.567	356.005	746.040	323.335	
180	765.630	353.524	746.043	746.084	352.154	352.651	356.082	746.064	323.361	
181	765.677	353.640	746.066	746.109	352.274	352.770	356.195	746.087	323.398	
182	765.723	353.838	746.089	746.133	352.475	352.971	356.389	746.111	323.463	
183	765.769	353.986	746.112	746.158	352.626	353.123	356.534	746.135	323.511	
184	765.815	354.118	746.135	746.182	352.762	353.258	356.663	746.158	323.554	
185	765.860	354.318	746.157	746.206	352.965	353.462	356.860	746.181	323.620	
186	765.905	354.403	746.179	746.230	353.054	353.550	356.943	746.204	323.648	
187	765.950	354.468	746.201	746.253	353.123	353.619	357.006	746.227	323.669	
188	765.995	354.634	746.223	746.277	353.292	353.788	357.170	746.250	323.723	
189	766.040	354.754	746.245	746.300	353.416	353.912	357.289	746.273	323.763	
190	766.084	354.864	746.267	746.324	353.529	354.024	357.398	746.295	323.799	
191	766.128	354.995	746.289	746.347	353.664	354.160	357.529	746.318	323.843	
192	766.172	355.124	746.311	746.370	353.796	354.292	357.658	746.340	323.886	
193	766.216	355.226	746.332	746.392	353.902	354.397	357.762	746.362	323.921	
194	766.259	355.316	746.354	746.415	353.995	354.491	357.854	746.384	323.951	
195	766.302	355.467	746.375	746.437	354.149	354.645	358.005	746.406	324.002	
196	766.345	355.719	746.396	746.460	354.405	354.900	358.259	746.428	324.086	
197	766.388	355.961	746.417	746.482	354.650	355.146	358.503	746.450	324.168	
198	766.430	356.124	746.439	746.504	354.817	355.313	358.668	746.471	324.223	

ตาราง ข.1 ผลการคำนวณจากการทำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp										com avg
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg	ex avg	com avg	
199	766.473	356.231	746.460	746.525	354.927	355.423	358.776	746.493	746.493	324.259	
200	766.515	356.292	746.481	746.547	354.992	355.488	358.840	746.514	746.514	324.280	
201	766.557	356.327	746.502	746.568	355.030	355.526	358.877	746.535	746.535	324.292	
202	766.598	356.303	746.523	746.589	355.010	355.506	358.856	746.556	746.556	324.285	
203	766.640	356.309	746.544	746.610	355.019	355.516	358.865	746.577	746.577	324.288	
204	766.681	356.280	746.565	746.631	354.994	355.490	358.840	746.598	746.598	324.280	
205	766.722	356.323	746.586	746.652	355.040	355.537	358.886	746.619	746.619	324.295	
206	766.763	356.352	746.607	746.673	355.073	355.569	358.918	746.640	746.640	324.306	
207	766.804	356.352	746.627	746.693	355.077	355.573	358.922	746.660	746.660	324.307	
208	766.844	356.362	746.648	746.713	355.090	355.587	358.936	746.681	746.681	324.312	
209	766.884	356.421	746.669	746.733	355.153	355.650	358.999	746.701	746.701	324.333	
210	766.925	356.427	746.690	746.753	355.162	355.659	359.009	746.722	746.722	324.336	
211	766.964	356.411	746.711	746.773	355.149	355.646	358.997	746.742	746.742	324.332	
212	767.004	356.392	746.731	746.793	355.134	355.631	358.982	746.762	746.762	324.327	
213	767.044	356.400	746.752	746.813	355.146	355.643	358.995	746.782	746.782	324.332	
214	767.083	356.415	746.773	746.832	355.164	355.661	359.014	746.803	746.803	324.338	
215	767.122	356.571	746.793	746.852	355.323	355.821	359.174	746.823	746.823	324.391	
216	767.161	356.682	746.813	746.871	355.438	355.936	359.290	746.842	746.842	324.430	
217	767.200	356.813	746.833	746.891	355.572	356.070	359.425	746.862	746.862	324.475	
218	767.238	356.991	746.853	746.910	355.754	356.252	359.608	746.881	746.881	324.536	



ตาราง ข.1 ผลการคำนวณจากการทำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp											
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg	com avg			
219	767.277	357.151	746.872	746.929	355.918	356.416	359.773	746.901	324.591			
220	767.315	357.237	746.892	746.947	356.007	356.505	359.863	746.920	324.621			
221	767.353	357.336	746.911	746.966	356.110	356.608	359.967	746.938	324.656			
222	767.391	357.364	746.929	746.984	356.141	356.640	359.999	746.957	324.666			
223	767.429	357.346	746.947	747.002	356.127	356.625	359.985	746.975	324.662			
224	767.466	357.384	746.965	747.020	356.168	356.667	360.028	746.993	324.676			
225	767.504	357.429	746.983	747.038	356.217	356.716	360.078	747.011	324.693			
226	767.541	357.481	747.001	747.056	356.272	356.772	360.134	747.029	324.711			
227	767.578	357.572	747.019	747.073	356.367	356.866	360.230	747.046	324.743			
228	767.615	357.684	747.037	747.090	356.482	356.982	360.346	747.063	324.782			
229	767.652	357.771	747.054	747.107	356.572	357.072	360.438	747.080	324.813			
230	767.688	357.925	747.071	747.123	356.730	357.231	360.597	747.097	324.866			
231	767.725	357.900	747.088	747.140	356.708	357.208	360.576	747.114	324.859			
232	767.761	357.837	747.105	747.155	356.649	357.149	360.518	747.130	324.839			
233	767.797	357.855	747.122	747.171	356.671	357.172	360.542	747.146	324.847			
234	767.833	357.858	747.138	747.186	356.677	357.178	360.550	747.162	324.850			
235	767.869	357.900	747.155	747.201	356.722	357.223	360.597	747.178	324.866			
236	767.904	357.970	747.171	747.215	356.796	357.297	360.672	747.193	324.891			
237	767.940	358.214	747.187	747.229	357.044	357.546	360.923	747.208	324.974			
238	767.975	358.305	747.203	747.242	357.138	357.640	361.020	747.223	325.007			

ตาราง ข.1 ผลการคำนวณจากการทำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp											
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg	com avg			
239	768.010	358.467	747.219	747.255	357.304	357.806	361.188	747.237	325.063			
240	768.045	358.460	747.235	747.268	357.300	357.803	361.187	747.251	325.062			
241	768.080	358.516	747.250	747.280	357.360	357.863	361.250	747.265	325.083			
242	768.115	358.611	747.265	747.293	357.458	357.962	361.352	747.279	325.117			
243	768.149	358.740	747.280	747.305	357.591	358.094	361.488	747.293	325.163			
244	768.184	358.895	747.295	747.317	357.749	358.252	361.650	747.306	325.217			
245	768.218	358.987	747.309	747.329	357.844	358.348	361.749	747.319	325.250			
246	768.252	359.119	747.323	747.340	357.980	358.485	361.889	747.331	325.296			
247	768.286	359.174	747.337	747.350	358.038	358.543	361.951	747.344	325.317			
248	768.320	359.287	747.351	747.361	358.155	358.660	362.072	747.356	325.357			
249	768.354	359.406	747.365	747.370	358.278	358.783	362.199	747.368	325.400			
250	768.388	359.502	747.378	747.380	358.377	358.883	362.302	747.379	325.434			
251	768.421	359.606	747.391	747.390	358.485	358.991	362.415	747.390	325.472			
252	768.455	359.719	747.403	747.399	358.601	359.108	362.536	747.401	325.512			
253	768.488	359.796	747.415	747.408	358.682	359.189	362.621	747.412	325.540			
254	768.521	359.943	747.427	747.418	358.832	359.339	362.778	747.422	325.593			
255	768.554	359.906	747.438	747.427	358.798	359.306	362.751	747.432	325.584			
256	768.587	359.969	747.449	747.436	358.865	359.374	362.825	747.443	325.608			
257	768.619	360.064	747.460	747.445	358.964	359.473	362.931	747.453	325.644			
258	768.652	360.133	747.470	747.455	359.036	359.546	363.011	747.462	325.670			

ตาราง ข.1 ผลการคำนวณจากการทำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp											
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg	com avg			
259	768.684	360.241	747.480	747.464	359.147	359.658	363.131	747.472	325.710			
260	768.717	360.327	747.490	747.474	359.237	359.748	363.228	747.482	325.743			
261	768.749	360.384	747.500	747.484	359.297	359.809	363.298	747.492	325.766			
262	768.781	360.421	747.510	747.494	359.338	359.850	363.348	747.502	325.783			
263	768.813	360.535	747.519	747.504	359.455	359.968	363.475	747.512	325.825			
264	768.845	360.658	747.529	747.515	359.582	360.095	363.612	747.522	325.871			
265	768.876	360.864	747.539	747.526	359.792	360.306	363.833	747.532	325.944			
266	768.908	361.050	747.548	747.537	359.981	360.496	364.034	747.542	326.011			
267	768.939	361.193	747.558	747.548	360.128	360.644	364.194	747.553	326.065			
268	768.971	361.371	747.567	747.559	360.309	360.826	364.387	747.563	326.129			
269	769.002	361.560	747.577	747.571	360.502	361.019	364.593	747.574	326.198			
270	769.033	361.595	747.587	747.583	360.540	361.059	364.647	747.585	326.216			
271	769.064	361.802	747.597	747.594	360.750	361.270	364.874	747.596	326.291			
272	769.095	361.996	747.608	747.606	360.948	361.469	365.089	747.607	326.363			
273	769.126	362.236	747.618	747.618	361.191	361.714	365.349	747.618	326.450			
274	769.157	362.525	747.629	747.630	361.484	362.007	365.658	747.630	326.553			
275	769.187	362.669	747.640	747.643	361.631	362.156	365.821	747.641	326.607			
276	769.217	362.884	747.651	747.655	361.850	362.376	366.057	747.653	326.686			
277	769.248	363.119	747.663	747.668	362.088	362.615	366.311	747.665	326.770			
278	769.278	363.322	747.674	747.681	362.295	362.824	366.536	747.678	326.845			

ตาราง ข.1 ผลการคำนวณจากการทำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp										
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg	com avg		
279	769.308	363.424	747.686	747.694	362.400	362.931	366.659	747.690	326.886		
280	769.338	363.727	747.694	747.706	362.707	363.241	367.007	747.700	327.002		
281	769.368	363.849	747.707	747.719	362.832	363.368	367.154	747.713	327.051		
282	769.398	364.095	747.719	747.732	363.082	363.620	367.426	747.726	327.142		
283	769.427	364.226	747.731	747.746	363.217	363.758	367.584	747.739	327.195		
284	769.457	364.269	747.744	747.760	363.263	363.806	367.655	747.752	327.218		
285	769.486	364.269	747.756	747.773	363.267	363.813	367.686	747.765	327.229		
286	769.516	364.316	747.769	747.787	363.317	363.866	367.765	747.778	327.255		
287	769.545	364.386	747.781	747.801	363.391	363.944	367.868	747.791	327.289		
288	769.574	364.499	747.794	747.814	363.507	364.064	368.014	747.804	327.338		
289	769.603	364.523	747.807	747.828	363.535	364.095	368.070	747.817	327.357		
290	769.632	364.780	747.820	747.841	363.795	364.359	368.358	747.831	327.453		
291	769.661	364.979	747.833	747.855	363.997	364.566	368.587	747.844	327.529		
292	769.690	365.179	747.846	747.868	364.201	364.774	368.819	747.857	327.606		
293	769.718	365.410	747.859	747.882	364.435	365.013	369.081	747.870	327.694		
294	769.747	365.630	747.872	747.896	364.659	365.242	369.335	747.884	327.778		
295	769.775	365.909	747.885	747.909	364.941	365.530	369.650	747.897	327.883		
296	769.804	366.201	747.899	747.923	365.237	365.833	369.980	747.911	327.993		
297	769.832	366.459	747.912	747.936	365.498	366.102	370.275	747.924	328.092		
298	769.860	366.759	747.925	747.950	365.802	366.413	370.613	747.937	328.204		

ตาราง ข.1 ผลการคำนวณจากการทำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp										
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg	com avg		
299	769.888	367.173	747.938	747.964	366.219	366.838	371.064	747.951	328.355		
300	769.916	367.592	747.951	747.977	366.642	367.270	371.520	747.964	328.507		
301	769.944	367.946	747.964	747.991	367.000	367.637	371.911	747.978	328.637		
302	769.972	368.278	747.977	748.005	367.335	367.983	372.281	747.991	328.760		
303	770.000	368.550	747.990	748.018	367.610	368.270	372.592	748.004	328.864		
304	770.028	368.749	748.003	748.032	367.813	368.485	372.832	748.018	328.944		
305	770.055	368.952	748.016	748.046	368.019	368.706	373.078	748.031	329.026		
306	770.083	369.119	748.029	748.059	368.190	368.892	373.287	748.044	329.096		
307	770.110	369.292	748.041	748.073	368.366	369.084	373.501	748.057	329.167		
308	770.137	369.407	748.053	748.086	368.485	369.218	373.657	748.070	329.219		
309	770.164	369.518	748.066	748.099	368.599	369.351	373.811	748.082	329.270		
310	770.191	369.630	748.078	748.113	368.715	369.486	373.967	748.096	329.322		
311	770.219	369.580	748.091	748.126	368.669	369.461	373.963	748.108	329.321		
312	770.245	369.488	748.103	748.140	368.580	369.395	373.919	748.121	329.306		
313	770.272	369.393	748.116	748.153	368.489	369.329	373.875	748.134	329.292		
314	770.299	369.427	748.129	748.167	368.526	369.394	373.961	748.148	329.320		
315	770.326	369.482	748.142	748.180	368.584	369.482	374.070	748.161	329.357		
316	770.352	369.503	748.155	748.194	368.609	369.539	374.152	748.174	329.384		
317	770.379	369.557	748.168	748.207	368.667	369.628	374.270	748.188	329.423		
318	770.405	369.649	748.181	748.221	368.762	369.756	374.428	748.201	329.476		

ตาราง ข.1 ผลการคำนวณจากการทำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp										com avg
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg	com avg		
319	770.432	369.690	748.195	748.234	368.807	369.836	374.534	748.214	329.511		
320	770.458	369.690	748.208	748.248	368.810	369.876	374.598	748.228	329.533		
321	770.484	369.792	748.221	748.261	368.915	370.021	374.760	748.241	329.587		
322	770.510	369.793	748.234	748.275	368.920	370.068	374.820	748.255	329.607		
323	770.536	369.719	748.247	748.288	368.850	370.042	374.804	748.268	329.601		
324	770.562	369.796	748.261	748.302	368.930	370.170	374.943	748.281	329.648		
325	770.588	369.828	748.274	748.315	368.966	370.255	375.045	748.295	329.682		
326	770.614	369.847	748.287	748.329	368.988	370.330	375.148	748.308	329.716		
327	770.639	369.796	748.300	748.342	368.941	370.339	375.186	748.321	329.729		
328	770.665	369.776	748.314	748.356	368.924	370.379	375.252	748.335	329.751		
329	770.691	369.779	748.327	748.369	368.931	370.446	375.339	748.348	329.780		
330	770.716	369.864	748.340	748.383	369.019	370.596	375.504	748.362	329.835		
331	770.741	369.933	748.354	748.396	369.092	370.733	375.650	748.375	329.883		
332	770.767	369.963	748.367	748.410	369.125	370.833	375.753	748.388	329.918		
333	770.792	370.015	748.380	748.423	369.180	370.955	375.880	748.402	329.960		
334	770.817	370.029	748.394	748.436	369.198	371.042	375.975	748.415	329.992		
335	770.842	370.005	748.407	748.450	369.177	371.091	376.039	748.428	330.013		
336	770.867	370.039	748.420	748.463	369.215	371.199	376.172	748.442	330.057		
337	770.892	370.068	748.433	748.477	369.247	371.303	376.300	748.455	330.100		
338	770.917	370.127	748.447	748.490	369.310	371.437	376.453	748.468	330.151		

ตาราง ข.1 ผลการคำนวณจากการทำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol. temp											ex avg	com avg
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	compression2	compression3	ex avg	com avg		
339	770.942	370.294	748.461	748.503	369.481	371.678	376.707	376.707	376.707	748.482	330.236		
340	770.966	370.555	748.474	748.516	369.745	372.013	377.049	377.049	377.049	748.495	330.350		
341	770.991	370.763	748.488	748.530	369.956	372.293	377.331	377.331	377.331	748.509	330.444		
342	771.015	371.030	748.501	748.543	370.227	372.631	377.668	377.668	377.668	748.522	330.556		
343	771.040	371.281	748.515	748.556	370.482	372.951	377.989	377.989	377.989	748.536	330.663		
344	771.064	371.365	748.529	748.569	370.569	373.102	378.143	378.143	378.143	748.549	330.714		
345	771.089	371.236	748.542	748.583	370.444	373.039	378.093	378.093	378.093	748.562	330.698		
346	771.113	371.230	748.556	748.596	370.441	373.096	378.172	378.172	378.172	748.576	330.724		
347	771.137	371.286	748.570	748.609	370.501	373.212	378.306	378.306	378.306	748.589	330.769		
348	771.161	371.285	748.583	748.622	370.503	373.267	378.373	378.373	378.373	748.603	330.791		
349	771.185	371.397	748.597	748.635	370.618	373.432	378.542	378.542	378.542	748.616	330.847		
350	771.209	371.546	748.610	748.648	370.771	373.630	378.735	378.735	378.735	748.629	330.912		
351	771.233	371.695	748.624	748.661	370.923	373.824	378.916	378.916	378.916	748.643	330.972		
352	771.257	371.746	748.637	748.674	370.978	373.916	378.994	378.994	378.994	748.656	330.998		
353	771.281	371.769	748.650	748.687	371.004	373.975	379.055	379.055	379.055	748.669	331.018		
354	771.304	371.776	748.663	748.700	371.015	374.015	379.108	379.108	379.108	748.682	331.036		
355	771.328	371.688	748.676	748.713	370.930	373.956	379.062	379.062	379.062	748.695	331.021		
356	771.352	371.706	748.689	748.726	370.952	373.999	379.112	379.112	379.112	748.708	331.037		
357	771.375	371.706	748.702	748.739	370.956	374.022	379.132	379.132	379.132	748.720	331.044		
358	771.399	371.768	748.715	748.752	371.021	374.102	379.200	379.200	379.200	748.733	331.067		

ตาราง ข.1 ผลการคำนวณจากการทำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp									
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg	com avg	
359	771.422	371.767	748.728	748.764	371.023	374.116	379.198	748.746	331.066	
360	771.445	371.702	748.741	748.777	370.962	374.065	379.132	748.759	331.044	
min	733.794	319.430	729.893	729.905	317.434	317.441	319.455	729.899	311.152	
max	771.445	371.776	748.741	748.777	371.023	374.116	379.200	748.759	331.067	





ตาราง ข.2 ผลการคำนวณจากการทำแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างองไหลและโครงสร้างจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp										
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg	com avg		
1	733.794	319.430	729.893	729.905	317.434	317.441	319.455	729.899	311.152		
2	734.653	319.849	730.323	730.336	317.856	317.865	319.882	730.329	311.294		
3	735.080	320.265	730.598	730.550	318.276	318.287	320.307	730.544	311.436		
4	735.511	320.754	730.754	730.767	318.768	318.781	320.805	730.761	311.602		
5	736.397	321.205	731.198	731.211	319.223	319.239	321.266	731.204	311.755		
6	737.938	321.645	731.969	731.983	319.666	319.685	321.716	731.976	311.905		
7	738.241	322.096	732.122	732.135	320.121	320.144	322.178	732.128	312.059		
8	739.369	322.571	732.687	732.701	320.599	320.626	322.665	732.694	312.222		
9	740.365	322.767	733.186	733.200	320.799	320.829	322.873	733.193	312.291		
10	741.255	322.918	733.632	733.646	320.953	320.988	323.039	733.639	312.346		
11	742.060	322.983	734.036	734.050	321.021	321.061	323.122	734.043	312.374		
12	742.795	323.028	734.405	734.419	321.070	321.117	323.189	734.412	312.396		
13	743.472	323.152	734.744	734.758	321.198	321.251	323.336	734.751	312.445		
14	744.098	323.186	735.058	735.073	321.235	321.295	323.395	735.065	312.465		
15	744.681	323.240	735.351	735.365	321.292	321.360	323.474	735.358	312.491		
16	745.226	323.296	735.625	735.639	321.352	321.428	323.552	735.632	312.517		
17	745.738	323.248	735.883	735.897	321.307	321.391	323.523	735.890	312.508		
18	746.221	323.430	736.126	736.140	321.493	321.585	323.724	736.133	312.575		
19	746.678	323.907	736.356	736.370	321.973	322.074	324.218	736.363	312.739		

ตาราง ข.2 ผลการคำนวณจากการทำแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp										ex avg	com avg	
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	compression2	compression3	compression1			
20	747.111	324.416	736.574	736.588	322.486	322.594	324.742	322.594	324.742	322.486	324.742	736.581	312.914
21	747.523	325.085	736.782	736.795	323.159	323.276	325.428	323.159	325.428	323.159	325.428	736.788	313.143
22	747.916	325.703	736.980	736.993	323.780	323.905	326.066	323.780	326.066	323.780	326.066	736.986	313.355
23	748.291	326.113	737.169	737.182	324.193	324.326	326.495	324.193	326.495	324.193	326.495	737.176	313.498
24	748.651	326.460	737.351	737.364	324.544	324.686	326.860	324.544	326.860	324.544	326.860	737.357	313.620
25	748.995	326.847	737.525	737.537	324.934	325.083	327.267	324.934	327.267	324.934	327.267	737.531	313.756
26	749.326	327.047	737.693	737.705	325.138	325.296	327.483	325.138	327.483	325.138	327.483	737.699	313.828
27	749.645	327.250	737.855	737.865	325.344	325.509	327.709	325.344	327.709	325.344	327.709	737.860	313.903
28	749.952	327.686	738.010	738.020	325.784	325.957	328.160	325.784	328.160	325.784	328.160	738.015	314.053
29	750.249	327.877	738.161	738.170	325.978	326.159	328.362	325.978	328.362	325.978	328.362	738.165	314.121
30	750.535	328.017	738.306	738.315	326.122	326.310	328.525	326.122	328.525	326.122	328.525	738.311	314.175
31	750.812	328.265	738.447	738.455	326.374	326.570	328.786	326.374	328.786	326.374	328.786	738.451	314.262
32	751.080	328.442	738.583	738.591	326.554	326.757	328.985	326.554	328.985	326.554	328.985	738.587	314.328
33	751.339	328.613	738.715	738.722	326.728	326.938	329.176	326.728	329.176	326.728	329.176	738.719	314.392
34	751.591	328.826	738.844	738.850	326.945	327.163	329.400	326.945	329.400	326.945	329.400	738.847	314.467
35	751.836	328.963	738.969	738.974	327.086	327.310	329.547	327.086	329.547	327.086	329.547	738.971	314.516
36	752.074	329.161	739.090	739.094	327.287	327.518	329.756	327.287	329.756	327.287	329.756	739.092	314.585
37	752.305	329.349	739.208	739.211	327.479	327.716	329.958	327.479	329.958	327.479	329.958	739.209	314.653
38	752.530	329.608	739.322	739.326	327.741	327.984	330.231	327.741	330.231	327.741	330.231	739.324	314.744
39	752.749	329.972	739.434	739.437	328.108	328.358	330.612	328.108	330.612	328.108	330.612	739.436	314.871

ตาราง ข.2 ผลการคำนวณจากการทำงานแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp									
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg	com avg	
40	752.963	330.246	739.544	739.545	328.386	328.642	330.905	739.544	314.968	
41	753.172	330.548	739.650	739.651	328.691	328.954	331.226	739.651	315.075	
42	753.375	330.927	739.754	739.754	329.074	329.343	331.626	739.754	315.209	
43	753.573	331.277	739.856	739.855	329.427	329.702	331.998	739.856	315.333	
44	753.767	331.534	739.956	739.954	329.688	329.969	332.279	739.955	315.426	
45	753.957	331.685	740.053	740.050	329.843	330.130	332.454	740.052	315.485	
46	754.143	331.817	740.148	740.145	329.978	330.270	332.610	740.147	315.537	
47	754.324	332.127	740.242	740.237	330.292	330.590	332.946	740.239	315.649	
48	754.502	332.434	740.333	740.327	330.602	330.906	333.280	740.330	315.760	
49	754.676	332.642	740.423	740.416	330.813	331.122	333.512	740.419	315.837	
50	754.846	332.840	740.510	740.503	331.015	331.329	333.736	740.507	315.912	
51	755.013	333.070	740.596	740.588	331.249	331.568	333.993	740.592	315.998	
52	755.177	333.314	740.680	740.672	331.496	331.821	334.263	740.676	316.088	
53	755.338	333.561	740.763	740.754	331.746	332.076	334.536	740.758	316.179	
54	755.495	333.954	740.844	740.834	332.143	332.477	334.956	740.839	316.319	
55	755.650	334.353	740.924	740.913	332.546	332.885	335.379	740.918	316.460	
56	755.802	334.662	741.002	740.991	332.858	333.201	335.712	740.996	316.571	
57	755.951	334.998	741.079	741.067	333.198	333.545	336.076	741.073	316.692	
58	756.098	335.360	741.155	741.142	333.563	333.915	336.469	741.149	316.823	
59	756.242	335.608	741.230	741.216	333.814	334.170	336.749	741.223	316.916	

ตาราง ข.2 ผลการคำนวณจากการทำแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp										
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg	com avg		
60	756.384	335.897	741.304	741.288	334.107	334.466	337.071	741.296	317.024		
61	756.523	336.232	741.376	741.359	334.445	334.808	337.439	741.368	317.146		
62	756.660	336.512	741.447	741.429	334.729	335.095	337.756	741.438	317.252		
63	756.795	336.791	741.517	741.498	335.011	335.381	338.071	741.508	317.357		
64	756.928	336.978	741.586	741.566	335.202	335.575	338.294	741.576	317.431		
65	757.059	337.073	741.653	741.633	335.301	335.677	338.425	741.643	317.475		
66	757.187	337.291	741.720	741.699	335.522	335.902	338.679	741.710	317.560		
67	757.314	337.486	741.786	741.764	335.721	336.103	338.909	741.775	317.636		
68	757.439	337.594	741.850	741.828	335.832	336.217	339.051	741.839	317.684		
69	757.562	337.598	741.914	741.891	335.839	336.228	339.089	741.903	317.696		
70	757.683	337.623	741.977	741.954	335.868	336.260	339.147	741.965	317.716		
71	757.803	337.701	742.039	742.015	335.950	336.344	339.258	742.027	317.753		
72	757.921	337.787	742.100	742.075	336.039	336.436	339.378	742.088	317.793		
73	758.037	337.811	742.160	742.135	336.067	336.466	339.437	742.148	317.812		
74	758.152	337.827	742.220	742.194	336.086	336.488	339.487	742.207	317.829		
75	758.265	337.944	742.278	742.252	336.207	336.611	339.637	742.265	317.879		
76	758.377	338.054	742.336	742.309	336.320	336.726	339.778	742.323	317.926		
77	758.487	338.106	742.393	742.366	336.375	336.783	339.859	742.380	317.953		
78	758.595	338.199	742.449	742.422	336.472	336.882	339.980	742.436	317.993		
79	758.703	338.302	742.505	742.477	336.579	336.991	340.111	742.491	318.037		

ตาราง ข.2 ผลการคำนวณจากการทำแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp											ex avg	com avg
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	compression2	compression3	compression2	compression3		
80	758.809	338.430	742.560	742.532	336.710	337.124	340.263	340.263	337.124	340.263	340.263	742.546	318.088
81	758.913	338.517	742.614	742.585	336.800	337.216	340.374	340.374	337.216	340.374	340.374	742.600	318.125
82	759.017	338.636	742.668	742.639	336.923	337.340	340.518	340.518	337.340	340.518	340.518	742.653	318.173
83	759.119	338.740	742.721	742.691	337.030	337.449	340.645	340.645	337.449	340.645	340.645	742.706	318.215
84	759.220	338.869	742.773	742.743	337.163	337.584	340.798	340.798	337.584	340.798	340.798	742.758	318.266
85	759.319	339.052	742.825	742.795	337.349	337.772	341.004	341.004	337.772	341.004	341.004	742.810	318.335
86	759.418	339.287	742.876	742.845	337.588	338.012	341.262	341.262	338.012	341.262	341.262	742.860	318.421
87	759.515	339.558	742.926	742.896	337.862	338.288	341.556	341.556	338.288	341.556	341.556	742.911	318.519
88	759.611	339.842	742.976	742.945	338.150	338.578	341.862	341.862	338.578	341.862	341.862	742.961	318.621
89	759.707	340.101	743.025	742.994	338.412	338.841	342.141	342.141	338.841	342.141	342.141	743.010	318.714
90	759.801	340.410	743.074	743.043	338.725	339.156	342.469	342.469	339.156	342.469	342.469	743.058	318.823
91	759.894	340.610	743.122	743.091	338.929	339.362	342.686	342.686	339.362	342.686	342.686	743.106	318.895
92	759.986	340.760	743.169	743.138	339.082	339.518	342.852	342.852	339.518	342.852	342.852	743.154	318.951
93	760.077	340.841	743.216	743.185	339.166	339.604	342.948	342.948	339.604	342.948	342.948	743.201	318.983
94	760.167	340.942	743.262	743.232	339.271	339.711	343.064	343.064	339.711	343.064	343.064	743.247	319.021
95	760.256	341.098	743.308	743.278	339.431	339.873	343.234	343.234	339.873	343.234	343.234	743.293	319.078
96	760.344	341.398	743.354	743.323	339.734	340.179	343.548	343.548	340.179	343.548	343.548	743.339	319.183
97	760.431	341.868	743.399	743.368	340.208	340.655	344.051	344.051	340.655	344.051	344.051	743.384	319.344
98	760.518	342.340	743.443	743.413	340.683	341.132	344.515	344.515	341.132	344.515	344.515	743.428	319.505
99	760.603	342.751	743.487	743.457	341.098	341.550	344.938	344.938	341.550	344.938	344.938	743.472	319.646

ตาราง ข.2 ผลการคำนวณจากการทำแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp									
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg	com avg	
100	760.688	343.095	743.531	743.501	341.445	341.900	345.293	743.516	319.764	
101	760.772	343.458	743.574	743.544	341.811	342.269	345.667	743.559	319.889	
102	760.854	343.852	743.616	743.587	342.209	342.668	346.071	743.602	320.024	
103	760.937	344.114	743.659	743.630	342.475	342.937	346.344	743.644	320.115	
104	761.018	344.345	743.701	743.672	342.709	343.174	346.586	743.686	320.195	
105	761.098	344.658	743.742	743.713	343.025	343.492	346.909	743.728	320.303	
106	761.178	344.974	743.784	743.755	343.345	343.814	347.236	743.769	320.412	
107	761.257	345.314	743.825	743.796	343.688	344.161	347.587	743.810	320.529	
108	761.335	345.624	743.865	743.836	344.002	344.476	347.908	743.851	320.636	
109	761.413	345.905	743.905	743.877	344.286	344.763	348.199	743.891	320.733	
110	761.490	346.099	743.945	743.917	344.484	344.963	348.404	743.931	320.801	
111	761.566	346.174	743.984	743.956	344.563	345.044	348.490	743.970	320.830	
112	761.642	346.342	744.023	743.995	344.734	345.218	348.668	744.009	320.889	
113	761.716	346.487	744.061	744.034	344.883	345.369	348.824	744.048	320.941	
114	761.790	346.738	744.100	744.073	345.137	345.625	349.084	744.086	321.028	
115	761.864	346.874	744.138	744.111	345.277	345.767	349.230	744.124	321.077	
116	761.937	346.901	744.175	744.149	345.307	345.799	349.267	744.162	321.089	
117	762.009	346.969	744.212	744.186	345.378	345.872	349.346	744.199	321.115	
118	762.081	347.124	744.249	744.223	345.537	346.032	349.512	744.236	321.171	
119	762.152	347.100	744.286	744.260	345.516	346.013	349.499	744.273	321.166	

ตาราง ข.2 ผลการคำนวณจากการทำแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp										
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg	com avg		
120	762.222	347.344	744.322	744.297	345.764	346.262	349.752	744.309	321.251		
121	762.292	347.603	744.358	744.333	346.027	346.527	350.020	744.345	321.340		
122	762.361	347.918	744.393	744.369	346.345	346.846	350.343	744.381	321.448		
123	762.430	348.225	744.428	744.405	346.656	347.158	350.658	744.417	321.553		
124	762.498	348.478	744.463	744.440	346.912	347.416	350.920	744.452	321.640		
125	762.565	348.656	744.498	744.475	347.094	347.598	351.106	744.487	321.702		
126	762.632	348.837	744.532	744.510	347.278	347.784	351.296	744.521	321.765		
127	762.699	349.015	744.567	744.545	347.459	347.966	351.482	744.556	321.827		
128	762.765	349.228	744.600	744.579	347.676	348.184	351.704	744.590	321.901		
129	762.830	349.422	744.634	744.613	347.874	348.382	351.907	744.624	321.969		
130	762.895	349.565	744.667	744.647	348.020	348.529	352.058	744.657	322.019		
131	762.960	349.706	744.700	744.681	348.165	348.674	352.209	744.690	322.070		
132	763.024	349.890	744.733	744.714	348.352	348.862	352.402	744.724	322.134		
133	763.087	350.016	744.765	744.747	348.481	348.992	352.536	744.756	322.179		
134	763.150	350.128	744.797	744.780	348.597	349.108	352.658	744.789	322.219		
135	763.213	350.278	744.829	744.813	348.751	349.262	352.816	744.821	322.272		
136	763.275	350.493	744.860	744.845	348.969	349.480	353.039	744.853	322.346		
137	763.336	350.530	744.892	744.877	349.009	349.521	353.083	744.884	322.361		
138	763.397	350.491	744.923	744.909	348.974	349.486	353.051	744.916	322.350		
139	763.458	350.555	744.953	744.941	349.041	349.553	353.122	744.947	322.374		

ตาราง ข.2 ผลการคำนวณจากการทำแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp										
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg	com avg		
140	763.518	350.630	744.984	744.972	349.120	349.631	353.203	744.978	322.401		
141	763.578	350.746	745.014	745.004	349.240	349.751	353.325	745.009	322.442		
142	763.638	350.876	745.045	745.035	349.373	349.884	353.461	745.040	322.487		
143	763.697	350.974	745.074	745.066	349.475	349.986	353.563	745.070	322.521		
144	763.755	351.115	745.104	745.096	349.619	350.130	353.707	745.100	322.569		
145	763.813	351.175	745.134	745.127	349.682	350.193	353.769	745.130	322.590		
146	763.871	351.310	745.163	745.157	349.821	350.331	353.906	745.160	322.635		
147	763.928	351.437	745.192	745.187	349.951	350.461	354.035	745.189	322.678		
148	763.985	351.600	745.221	745.217	350.118	350.628	354.201	745.219	322.734		
149	764.042	351.716	745.249	745.246	350.237	350.747	354.318	745.248	322.773		
150	764.098	351.908	745.277	745.276	350.433	350.942	354.512	745.277	322.837		
151	764.154	352.065	745.306	745.305	350.594	351.102	354.670	745.305	322.890		
152	764.210	352.177	745.334	745.334	350.709	351.217	354.782	745.334	322.927		
153	764.265	352.277	745.362	745.363	350.812	351.320	354.883	745.363	322.961		
154	764.319	352.316	745.390	745.392	350.855	351.362	354.923	745.391	322.974		
155	764.374	352.292	745.417	745.421	350.834	351.341	354.900	745.419	322.967		
156	764.428	352.338	745.445	745.449	350.884	351.390	354.946	745.447	322.982		
157	764.481	352.402	745.472	745.477	350.951	351.457	355.010	745.475	323.003		
158	764.535	352.497	745.499	745.506	351.050	351.555	355.104	745.502	323.035		
159	764.588	352.529	745.525	745.534	351.086	351.590	355.136	745.530	323.045		



ตาราง ข.2 ผลการคำนวณจากการทำแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp									
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg	com avg	
160	764.641	352.581	745.552	745.561	351.141	351.645	355.187	745.557	323.062	
161	764.693	352.685	745.578	745.589	351.249	351.753	355.290	745.584	323.097	
162	764.745	352.804	745.605	745.616	351.371	351.874	355.407	745.611	323.136	
163	764.797	352.932	745.631	745.644	351.503	352.005	355.533	745.637	323.178	
164	764.848	353.082	745.656	745.671	351.656	352.158	355.681	745.664	323.227	
165	764.899	353.189	745.682	745.698	351.766	352.268	355.785	745.690	323.262	
166	764.950	353.246	745.707	745.725	351.827	352.328	355.840	745.716	323.280	
167	765.000	353.313	745.732	745.751	351.897	352.398	355.905	745.742	323.302	
168	765.050	353.415	745.757	745.778	352.003	352.503	356.004	745.767	323.335	
169	765.100	353.421	745.781	745.804	352.013	352.513	356.008	745.793	323.336	
170	765.150	353.341	745.806	745.831	351.936	352.436	355.926	745.818	323.309	
171	765.199	353.286	745.831	745.857	351.884	352.384	355.868	745.844	323.289	
172	765.248	353.294	745.855	745.882	351.896	352.395	355.874	745.869	323.291	
173	765.297	353.264	745.879	745.908	351.869	352.368	355.841	745.893	323.280	
174	765.345	353.302	745.903	745.934	351.911	352.409	355.877	745.918	323.292	
175	765.393	353.335	745.926	745.959	351.948	352.446	355.908	745.943	323.303	
176	765.441	353.302	745.950	745.985	351.918	352.415	355.872	745.967	323.291	
177	765.489	353.304	745.973	746.010	351.924	352.421	355.872	745.991	323.291	
178	765.536	353.378	745.997	746.035	352.001	352.499	355.943	746.016	323.314	
179	765.583	353.444	746.020	746.060	352.070	352.567	356.005	746.040	323.335	

ตาราง ข.2 ผลการคำนวณจากการทำแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp										ex avg	com avg
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	compression2	compression3	compression2		
180	765.630	353.524	746.043	746.084	352.154	352.651	356.082	746.064	323.361			
181	765.677	353.640	746.066	746.109	352.274	352.770	356.195	746.087	323.398			
182	765.723	353.838	746.089	746.133	352.475	352.971	356.389	746.111	323.463			
183	765.769	353.986	746.112	746.158	352.626	353.123	356.534	746.135	323.511			
184	765.815	354.118	746.135	746.182	352.762	353.258	356.663	746.158	323.554			
185	765.860	354.318	746.157	746.206	352.965	353.462	356.860	746.181	323.620			
186	765.905	354.403	746.179	746.230	353.054	353.550	356.943	746.204	323.648			
187	765.950	354.468	746.201	746.253	353.123	353.619	357.006	746.227	323.669			
188	765.995	354.634	746.223	746.277	353.292	353.788	357.170	746.250	323.723			
189	766.040	354.754	746.245	746.300	353.416	353.912	357.289	746.273	323.763			
190	766.084	354.864	746.267	746.324	353.529	354.024	357.398	746.295	323.799			
191	766.128	354.995	746.289	746.347	353.664	354.160	357.529	746.318	323.843			
192	766.172	355.124	746.311	746.370	353.796	354.292	357.658	746.340	323.886			
193	766.216	355.226	746.332	746.392	353.902	354.397	357.762	746.362	323.921			
194	766.259	355.316	746.354	746.415	353.995	354.491	357.854	746.384	323.951			
195	766.302	355.467	746.375	746.437	354.149	354.645	358.005	746.406	324.002			
196	766.345	355.719	746.396	746.460	354.405	354.900	358.259	746.428	324.086			
197	766.388	355.961	746.417	746.482	354.650	355.146	358.503	746.450	324.168			
198	766.430	356.124	746.439	746.504	354.817	355.313	358.668	746.471	324.223			
199	766.473	356.231	746.460	746.525	354.927	355.423	358.776	746.493	324.259			

ตาราง ข.2 ผลการคำนวณจากการทำแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp										
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg	com avg		
200	766.515	356.292	746.481	746.547	354.992	355.488	358.840	746.514	324.280		
201	766.557	356.327	746.502	746.568	355.030	355.526	358.877	746.535	324.292		
202	766.598	356.303	746.523	746.589	355.010	355.506	358.856	746.556	324.285		
203	766.640	356.309	746.544	746.610	355.019	355.516	358.865	746.577	324.288		
204	766.681	356.280	746.565	746.631	354.994	355.490	358.840	746.598	324.280		
205	766.722	356.323	746.586	746.652	355.040	355.537	358.886	746.619	324.295		
206	766.763	356.352	746.607	746.673	355.073	355.569	358.918	746.640	324.306		
207	766.804	356.352	746.627	746.693	355.077	355.573	358.922	746.660	324.307		
208	766.844	356.362	746.648	746.713	355.090	355.587	358.936	746.681	324.312		
209	766.884	356.421	746.669	746.733	355.153	355.650	358.999	746.701	324.333		
210	766.925	356.427	746.690	746.753	355.162	355.659	359.009	746.722	324.336		
211	766.964	356.411	746.711	746.773	355.149	355.646	358.997	746.742	324.332		
212	767.004	356.392	746.731	746.793	355.134	355.631	358.982	746.762	324.327		
213	767.044	356.400	746.752	746.813	355.146	355.643	358.995	746.782	324.332		
214	767.083	356.415	746.773	746.832	355.164	355.661	359.014	746.803	324.338		
215	767.122	356.571	746.793	746.852	355.323	355.821	359.174	746.823	324.391		
216	767.161	356.682	746.813	746.871	355.438	355.936	359.290	746.842	324.430		
217	767.200	356.813	746.833	746.891	355.572	356.070	359.425	746.862	324.475		
218	767.238	356.991	746.853	746.910	355.754	356.252	359.608	746.881	324.536		
219	767.277	357.151	746.872	746.929	355.918	356.416	359.773	746.901	324.591		

ตาราง ข.2 ผลการคำนวณจากการทำแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp										ex avg	com avg
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	compression2	compression3	compression2		
220	767.315	357.237	746.892	746.947	356.007	356.505	359.863	356.505	359.863	356.505	746.920	324.621
221	767.353	357.336	746.911	746.966	356.110	356.608	359.967	356.608	359.967	356.608	746.938	324.656
222	767.391	357.364	746.929	746.984	356.141	356.640	359.999	356.640	359.999	356.640	746.957	324.666
223	767.429	357.346	746.947	747.002	356.127	356.625	359.985	356.625	359.985	356.625	746.975	324.662
224	767.466	357.384	746.965	747.020	356.168	356.667	360.028	356.667	360.028	356.667	746.993	324.676
225	767.504	357.429	746.983	747.038	356.217	356.716	360.078	356.716	360.078	356.716	747.011	324.693
226	767.541	357.481	747.001	747.056	356.272	356.772	360.134	356.772	360.134	356.772	747.029	324.711
227	767.578	357.572	747.019	747.073	356.367	356.866	360.230	356.866	360.230	356.866	747.046	324.743
228	767.615	357.684	747.037	747.090	356.482	356.982	360.346	356.982	360.346	356.982	747.063	324.782
229	767.652	357.771	747.054	747.107	356.572	357.072	360.438	357.072	360.438	357.072	747.080	324.813
230	767.688	357.925	747.071	747.123	356.730	357.231	360.597	357.231	360.597	357.231	747.097	324.866
231	767.725	357.900	747.088	747.140	356.708	357.208	360.576	357.208	360.576	357.208	747.114	324.859
232	767.761	357.837	747.105	747.155	356.649	357.149	360.518	357.149	360.518	357.149	747.130	324.839
233	767.797	357.855	747.122	747.171	356.671	357.172	360.542	357.172	360.542	357.172	747.146	324.847
234	767.833	357.858	747.138	747.186	356.677	357.178	360.550	357.178	360.550	357.178	747.162	324.850
235	767.869	357.900	747.155	747.201	356.722	357.223	360.597	357.223	360.597	357.223	747.178	324.866
236	767.904	357.970	747.171	747.215	356.796	357.297	360.672	357.297	360.672	357.297	747.193	324.891
237	767.940	358.214	747.187	747.229	357.044	357.546	360.923	357.546	360.923	357.546	747.208	324.974
238	767.975	358.305	747.203	747.242	357.138	357.640	361.020	357.640	361.020	357.640	747.223	325.007
239	768.010	358.467	747.219	747.255	357.304	357.806	361.188	357.806	361.188	357.806	747.237	325.063

ตาราง ข.2 ผลการคำนวณจากการทำแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp										
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg	com avg		
240	768.045	358.460	747.235	747.268	357.300	357.803	361.187	747.251	325.062		
241	768.080	358.516	747.250	747.280	357.360	357.863	361.250	747.265	325.083		
242	768.115	358.611	747.265	747.293	357.458	357.962	361.352	747.279	325.117		
243	768.149	358.740	747.280	747.305	357.591	358.094	361.488	747.293	325.163		
244	768.184	358.895	747.295	747.317	357.749	358.252	361.650	747.306	325.217		
245	768.218	358.987	747.309	747.329	357.844	358.348	361.749	747.319	325.250		
246	768.252	359.119	747.323	747.340	357.980	358.485	361.889	747.331	325.296		
247	768.286	359.174	747.337	747.350	358.038	358.543	361.951	747.344	325.317		
248	768.320	359.287	747.351	747.361	358.155	358.660	362.072	747.356	325.357		
249	768.354	359.406	747.365	747.370	358.278	358.783	362.199	747.368	325.400		
250	768.388	359.502	747.378	747.380	358.377	358.883	362.302	747.379	325.434		
251	768.421	359.606	747.391	747.390	358.485	358.991	362.415	747.390	325.472		
252	768.455	359.719	747.403	747.399	358.601	359.108	362.536	747.401	325.512		
253	768.488	359.796	747.415	747.408	358.682	359.189	362.621	747.412	325.540		
254	768.521	359.943	747.427	747.418	358.832	359.339	362.778	747.422	325.593		
255	768.554	359.906	747.438	747.427	358.798	359.306	362.751	747.432	325.584		
256	768.587	359.969	747.449	747.436	358.865	359.374	362.825	747.443	325.608		
257	768.619	360.064	747.460	747.445	358.964	359.473	362.931	747.453	325.644		
258	768.652	360.133	747.470	747.455	359.036	359.546	363.011	747.462	325.670		
259	768.684	360.241	747.480	747.464	359.147	359.658	363.131	747.472	325.710		

ตาราง ข.2 ผลการคำนวณจากการทำแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp											
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg	com avg			
260	768.717	360.327	747.490	747.474	359.237	359.748	363.228	747.482	325.743			
261	768.749	360.384	747.500	747.484	359.297	359.809	363.298	747.492	325.766			
262	768.781	360.421	747.510	747.494	359.338	359.850	363.348	747.502	325.783			
263	768.813	360.535	747.519	747.504	359.455	359.968	363.475	747.512	325.825			
264	768.845	360.658	747.529	747.515	359.582	360.095	363.612	747.522	325.871			
265	768.876	360.864	747.539	747.526	359.792	360.306	363.833	747.532	325.944			
266	768.908	361.050	747.548	747.537	359.981	360.496	364.034	747.542	326.011			
267	768.939	361.193	747.558	747.548	360.128	360.644	364.194	747.553	326.065			
268	768.971	361.371	747.567	747.559	360.309	360.826	364.387	747.563	326.129			
269	769.002	361.560	747.577	747.571	360.502	361.019	364.593	747.574	326.198			
270	769.033	361.595	747.587	747.583	360.540	361.059	364.647	747.585	326.216			
271	769.064	361.802	747.597	747.594	360.750	361.270	364.874	747.596	326.291			
272	769.095	361.996	747.608	747.606	360.948	361.469	365.089	747.607	326.363			
273	769.126	362.236	747.618	747.618	361.191	361.714	365.349	747.618	326.450			
274	769.157	362.525	747.629	747.630	361.484	362.007	365.658	747.630	326.553			
275	769.187	362.669	747.640	747.643	361.631	362.156	365.821	747.641	326.607			
276	769.217	362.884	747.651	747.655	361.850	362.376	366.057	747.653	326.686			
277	769.248	363.119	747.663	747.668	362.088	362.615	366.311	747.665	326.770			
278	769.278	363.322	747.674	747.681	362.295	362.824	366.536	747.678	326.845			
279	769.308	363.424	747.686	747.694	362.400	362.931	366.659	747.690	326.886			

ตาราง ข.2 ผลการคำนวณจากการทำแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างโพลและโครงสร้างจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp											ex avg	com avg
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	compression2	compression1	compression2	compression3		
280	769.338	363.727	747.694	747.706	362.707	363.241	367.007	363.241	362.707	363.241	367.007	747.700	327.002
281	769.368	363.849	747.707	747.719	362.832	363.368	367.154	363.368	362.832	363.368	367.154	747.713	327.051
282	769.398	364.095	747.719	747.732	363.082	363.620	367.426	363.620	363.082	363.620	367.426	747.726	327.142
283	769.427	364.226	747.731	747.746	363.217	363.758	367.584	363.758	363.217	363.758	367.584	747.739	327.195
284	769.457	364.269	747.744	747.760	363.263	363.806	367.655	363.806	363.263	363.806	367.655	747.752	327.218
285	769.486	364.269	747.756	747.773	363.267	363.813	367.686	363.813	363.267	363.813	367.686	747.765	327.229
286	769.516	364.316	747.769	747.787	363.317	363.866	367.765	363.866	363.317	363.866	367.765	747.778	327.255
287	769.545	364.386	747.781	747.801	363.391	363.944	367.868	363.944	363.391	363.944	367.868	747.791	327.289
288	769.574	364.499	747.794	747.814	363.507	364.064	368.014	364.064	363.507	364.064	368.014	747.804	327.338
289	769.603	364.523	747.807	747.828	363.535	364.095	368.070	364.095	363.535	364.095	368.070	747.817	327.357
290	769.632	364.780	747.820	747.841	363.795	364.359	368.358	364.359	363.795	364.359	368.358	747.831	327.453
291	769.661	364.979	747.833	747.855	363.997	364.566	368.587	364.566	363.997	364.566	368.587	747.844	327.529
292	769.690	365.179	747.846	747.868	364.201	364.774	368.819	364.774	364.201	364.774	368.819	747.857	327.606
293	769.718	365.410	747.859	747.882	364.435	365.013	369.081	365.013	364.435	365.013	369.081	747.870	327.694
294	769.747	365.630	747.872	747.896	364.659	365.242	369.335	365.242	364.659	365.242	369.335	747.884	327.778
295	769.775	365.909	747.885	747.909	364.941	365.530	369.650	365.530	364.941	365.530	369.650	747.897	327.883
296	769.804	366.201	747.899	747.923	365.237	365.833	369.980	365.833	365.237	365.833	369.980	747.911	327.993
297	769.832	366.459	747.912	747.936	365.498	366.102	370.275	366.102	365.498	366.102	370.275	747.924	328.092
298	769.860	366.759	747.925	747.950	365.802	366.413	370.613	366.413	365.802	366.413	370.613	747.937	328.204
299	769.888	367.173	747.938	747.964	366.219	366.838	371.064	366.838	366.219	366.838	371.064	747.951	328.355

ตาราง ข.2 ผลการคำนวณจากการทำแบบปฏิบัติสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและโครงสร้างจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp									
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg	com avg	
300	769.916	367.592	747.951	747.977	366.642	367.270	371.520	747.964	328.507	
301	769.944	367.946	747.964	747.991	367.000	367.637	371.911	747.978	328.637	
302	769.972	368.278	747.977	748.005	367.335	367.983	372.281	747.991	328.760	
303	770.000	368.550	747.990	748.018	367.610	368.270	372.592	748.004	328.864	
304	770.028	368.749	748.003	748.032	367.813	368.485	372.832	748.018	328.944	
305	770.055	368.952	748.016	748.046	368.019	368.706	373.078	748.031	329.026	
306	770.083	369.119	748.029	748.059	368.190	368.892	373.287	748.044	329.096	
307	770.110	369.292	748.041	748.073	368.366	369.084	373.501	748.057	329.167	
308	770.137	369.407	748.053	748.086	368.485	369.218	373.657	748.070	329.219	
309	770.164	369.518	748.066	748.099	368.599	369.351	373.811	748.082	329.270	
310	770.191	369.630	748.078	748.113	368.715	369.486	373.967	748.096	329.322	
311	770.219	369.580	748.091	748.126	368.669	369.461	373.963	748.108	329.321	
312	770.245	369.488	748.103	748.140	368.580	369.395	373.919	748.121	329.306	
313	770.272	369.393	748.116	748.153	368.489	369.329	373.875	748.134	329.292	
314	770.299	369.427	748.129	748.167	368.526	369.394	373.961	748.148	329.320	
315	770.326	369.482	748.142	748.180	368.584	369.482	374.070	748.161	329.357	
316	770.352	369.503	748.155	748.194	368.609	369.539	374.152	748.174	329.384	
317	770.379	369.557	748.168	748.207	368.667	369.628	374.270	748.188	329.423	
318	770.405	369.649	748.181	748.221	368.762	369.756	374.428	748.201	329.476	
319	770.432	369.690	748.195	748.234	368.807	369.836	374.534	748.214	329.511	



ตาราง ข.2 ผลการคำนวณจากการทำแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol temp										
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg	com avg		
320	770.458	369.690	748.208	748.248	368.810	369.876	374.598	748.228	329.533		
321	770.484	369.792	748.221	748.261	368.915	370.021	374.760	748.241	329.587		
322	770.510	369.793	748.234	748.275	368.920	370.068	374.820	748.255	329.607		
323	770.536	369.719	748.247	748.288	368.850	370.042	374.804	748.268	329.601		
324	770.562	369.796	748.261	748.302	368.930	370.170	374.943	748.281	329.648		
325	770.588	369.828	748.274	748.315	368.966	370.255	375.045	748.295	329.682		
326	770.614	369.847	748.287	748.329	368.988	370.330	375.148	748.308	329.716		
327	770.639	369.796	748.300	748.342	368.941	370.339	375.186	748.321	329.729		
328	770.665	369.776	748.314	748.356	368.924	370.379	375.252	748.335	329.751		
329	770.691	369.779	748.327	748.369	368.931	370.446	375.339	748.348	329.780		
330	770.716	369.864	748.340	748.383	369.019	370.596	375.504	748.362	329.835		
331	770.741	369.933	748.354	748.396	369.092	370.733	375.650	748.375	329.883		
332	770.767	369.963	748.367	748.410	369.125	370.833	375.753	748.388	329.918		
333	770.792	370.015	748.380	748.423	369.180	370.955	375.880	748.402	329.960		
334	770.817	370.029	748.394	748.436	369.198	371.042	375.975	748.415	329.992		
335	770.842	370.005	748.407	748.450	369.177	371.091	376.039	748.428	330.013		
336	770.867	370.039	748.420	748.463	369.215	371.199	376.172	748.442	330.057		
337	770.892	370.068	748.433	748.477	369.247	371.303	376.300	748.455	330.100		
338	770.917	370.127	748.447	748.490	369.310	371.437	376.453	748.468	330.151		
339	770.942	370.294	748.461	748.503	369.481	371.678	376.707	748.482	330.236		

ตาราง ข.2 ผลการคำนวณจากการทำแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol. temp										ex avg	com avg
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg	com avg			
340	770.966	370.555	748.474	748.516	369.745	372.013	377.049	748.495	330.350			
341	770.991	370.763	748.488	748.530	369.956	372.293	377.331	748.509	330.444			
342	771.015	371.030	748.501	748.543	370.227	372.631	377.668	748.522	330.556			
343	771.040	371.281	748.515	748.556	370.482	372.951	377.989	748.536	330.663			
344	771.064	371.365	748.529	748.569	370.569	373.102	378.143	748.549	330.714			
345	771.089	371.236	748.542	748.583	370.444	373.039	378.093	748.562	330.698			
346	771.113	371.230	748.556	748.596	370.441	373.096	378.172	748.576	330.724			
347	771.137	371.286	748.570	748.609	370.501	373.212	378.306	748.589	330.769			
348	771.161	371.285	748.583	748.622	370.503	373.267	378.373	748.603	330.791			
349	771.185	371.397	748.597	748.635	370.618	373.432	378.542	748.616	330.847			
350	771.209	371.546	748.610	748.648	370.771	373.630	378.735	748.629	330.912			
351	771.233	371.695	748.624	748.661	370.923	373.824	378.916	748.643	330.972			
352	771.257	371.746	748.637	748.674	370.978	373.916	378.994	748.656	330.998			
353	771.281	371.769	748.650	748.687	371.004	373.975	379.055	748.669	331.018			
354	771.304	371.776	748.663	748.700	371.015	374.015	379.108	748.682	331.036			
355	771.328	371.688	748.676	748.713	370.930	373.956	379.062	748.695	331.021			
356	771.352	371.706	748.689	748.726	370.952	373.999	379.112	748.708	331.037			
357	771.375	371.706	748.702	748.739	370.956	374.022	379.132	748.720	331.044			
358	771.399	371.768	748.715	748.752	371.021	374.102	379.200	748.733	331.067			
359	771.422	371.767	748.728	748.764	371.023	374.116	379.198	748.746	331.066			

ตาราง ข.2 ผลการคำนวณจากการทำแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างจากซอฟต์แวร์

Crankshaft angle	vol. temp									
	air heater	air cooler	expansion1	expansion2	compression1	compression2	compression3	ex avg	com avg	
360	771.445	371.702	748.741	748.777	370.962	374.065	379.132	748.759	331.044	
min	733.794	319.430	729.893	729.905	317.434	317.441	319.455	729.899	311.152	
max	771.445	371.776	748.741	748.777	371.023	374.116	379.200	748.759	331.067	



## ประวัติผู้เขียนโครงการ

ชื่อ -นามสกุล	นายจรัสศักดิ์ หิมะ
วัน/เดือน/ปี เกิด	16 มกราคม 2538
ภูมิลำเนา	31/4 หมู่1 ตำบลแควใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดนครสวรรค์ 60000
ประวัติการศึกษา	-มัธยมศึกษาตอนต้นโรงเรียนโพธิสารศึกษา -มัธยมศึกษาตอนปลายโรงเรียนโพธิสารศึกษา -ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ชื่อ -นามสกุล	นายจรัญ อดทน
วัน/เดือน/ปี เกิด	3 กันยายน 2535
ภูมิลำเนา	160 หมู่1 ตำบลเมืองพาน อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย 57120
ประวัติการศึกษา	-มัธยมศึกษาตอนต้นโรงเรียนศิริมาตย์เทวี -มัธยมศึกษาตอนปลายโรงเรียนดำรงราษฎร์ สงเคราะห์ -ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

