



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาสมรรถนะอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อดึงความร้อนที่  
กลับมาใช้งานในเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าจาก  
เชื้อเพลิงความร้อนต่ำ

Development of Heat Exchanger to Recovery Heat in Micro Gas  
Turbine Engine for Electrical Generative for Low-Calorific Value Fuel

รศ.ดร.จากรวัตร เจริญสุข  
นายทรงศักดิ์ สมนา

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาสมรรถนะอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อดึงความร้อนที่  
กลับมาใช้งานในเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าจาก  
เชื้อเพลิงความร้อนต่ำ

Development of Heat Exchanger to Recovery Heat in Micro Gas  
Turbine Engine for Electrical Generative for Low-Calorific Value Fuel

รศ.ดร.จาร์วัตร เจริญสุข  
นายทรงศักดิ์ สมนานา

12695014

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) :** การพัฒนาสมรรถนะอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อดึงความร้อนทิ้งกลับมาใช้งานในเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงความร้อนต่ำ

**แหล่งเงิน :** เงินรายได้

**ประจำปีงบประมาณ** พ.ศ. 2557 **จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน** 60,000 บาท

**ระยะเวลาทำการวิจัย** 1 ปี ตั้งแต่ 1 ต.ค. 56 ถึง 30 ก.ย. 57

**หัวหน้าโครงการวิจัย** นายจรรูวัตร เจริญสุข

**ผู้ร่วมโครงการวิจัย** นายทรงศักดิ์ สมนา

**หน่วยงานต้นสังกัด** ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการจำลองปรากฏการณ์การแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน Heat recovery unit ที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบไหลสวนทางกัน (Counter-Flow) เปรียบเทียบผลการจำลองการไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้ปรากฏอยู่ในรายงานการวิจัยที่นำเชื้อถ่านและสมการสหสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกับเงื่อนไขที่ทำการศึกษานำเพื่อออกแบบลักษณะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ตามลักษณะการนำไปใช้งานในเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก โดยนำโมเดลความปั่นป่วนแบบ RNG k-epsilon, enhance wall treatment มาใช้สำหรับแบบจำลองเนื่องด้วยการทำนายสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่มีการถ่ายเทความร้อนของโมเดลนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาในอดีต ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำแบบจำลองอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน 3 โมเดล ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและรูปทรงช่องการไหลที่ช่องทางเข้าออกของอากาศดีและก๊าซไอเสียที่แตกต่างกัน โดยทั้งหมดมีพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากัน โดยผลของการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้จากการทำแบบจำลองนั้น จะได้ว่าโมเดลแบบที่ 3 ซึ่งถูกบีบลดขนาดช่องการไหลของอากาศดีและขยายขนาดช่องการไหลของก๊าซไอเสียนั้น มีอัตราการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดกว่าแบบอื่นและได้ถึงค่าที่คาดหวัง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 89,897 Watts โดยที่ความดันลดของโมเดลทั้งสามแบบนี้มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ

**คำสำคัญ :** อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน การถ่ายเทความร้อน การจำลองการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Research Title:** Development of Heat Exchanger to Recovery Heat in Micro Gas Turbine Engine for Electrical Generative for Low-Calorific Value Fuel

**Researcher:** Assoc. Prof. Dr. Jaruwat Charoensuk, Mr. Songsak Sonna

**Faculty:** Engineering                      **Department:** Mechanical engineering

## ABSTRACT

This research aims to investigate aerodynamic and heat transfer in the counter-flow heat recovery unit. The simulated results are first validated with the reliable research reports and correlation equations. The design feature of the heat exchanger is based on its deployment on micro gas turbine engine. The simulation was carried out using the RNG k-epsilon turbulence model with enhance wall treatment because of it is consistent with the literature review in the past. For this research, the three different models based on diameter and shape of inlet and outlet of the air and exhaust gas were compared, while the heat exchange surface area is equal. The results show that model 3 in which the size of air inlet is reduced and the size of exhaust gas flow channel is expanded, has the highest heat transfer rate and meet the requirement at 89,897 Watts. The pressure drops, however, are not significantly different.

**Keywords:** Heat recovery unit, Heat transfer, Computer simulate flow

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยใคร่ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนทำให้รายงานการวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ และการวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุน เงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2557

ร.ศ.ดร.จากรุวัตร เจริญสุข  
นายทรงศักดิ์ สมนา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 แนวคิดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1.1 หลักการและทฤษฎีเครื่องยนต์กังหันแก๊ส.....	4
2.1.1.1 หลักการทำงานของเครื่องยนต์.....	4
2.1.1.2 วัฏจักรในอุดมคติ (Ideal cycle).....	4
2.1.1.3 วัฏจักรที่แท้จริง (Actual cycle).....	6
2.1.1.4 วัฏจักรเครื่องยนต์กังหันแก๊สเมื่อเพิ่ม Heat Recovery.....	7
2.1.2 ทฤษฎีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	8
2.1.2.1 ประเภทของการถ่ายเทความร้อน.....	8
2.1.2.2 การสูญเสียภายในท่อ.....	12
2.1.2.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	13
2.1.3 ทฤษฎีพลศาสตร์ของไหล.....	15
2.1.4 ทฤษฎีการไหลแบบปั่นป่วน.....	15
2.1.4.1 อิทธิพลของความปั่นป่วนในสมการนาเวียร์-สโตกส์.....	15
2.1.4.2 แบบจำลองของความปั่นป่วน.....	17
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 3 การจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	26
3.1 วิธีทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณช่วยในการวิเคราะห์และการสอบเทียบ.....	26
3.1.1 การสอบเทียบเงื่อนไขการจำลองสำหรับการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกต (Conjugate heat transfer).....	26
3.1.2 การสอบเทียบเงื่อนไขการจำลองสำหรับการไหลผ่านท่อเปล่า (Turbulent Pipe Flows).....	29
3.1.2.1 สภาวะการไหล.....	29
3.1.2.2 ตัวประกอบความเสียหาย.....	30
3.1.2.3 การกำหนดเงื่อนไขการจำลอง.....	31
3.1.3 การไหลผ่านท่อแบบปั่นป่วนที่มีการถ่ายเทความร้อนจากผนังสู่ของไหล (Turbulent Pipe Flow Heat Transfer).....	33
3.1.3.1 สภาวะการถ่ายเทความร้อน.....	33
3.1.3.2 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง.....	34
3.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับลักษณะรูปแบบพื้นฐานเบื้องต้นที่ใช้ ออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งมีการไหลแบบสวนทางกัน (Counter-Flow).....	39
3.2.1 รูปทรงของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	39
3.2.2 เงื่อนไขขอบเขต.....	39
3.2.2.1 การคำนวณคุณสมบัติของของไหลที่ใช้ในการจำลอง.....	40
3.2.3 การคำนวณพื้นที่ผิวที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด ( $A_s$ , Total heat transfer area ( $m^2$ )).....	47
3.2.4 เมช (Mesh).....	48
บทที่ 4 การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	53
4.1 รูปทรงและพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	53
4.1.1 การคำนวณพื้นที่ผิวเพื่อใช้แลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	53
4.2 การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยการใช่วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณช่วย วิเคราะห์ (Computational Fluid Dynamics).....	55
4.2.1 เงื่อนไขขอบเขต.....	55
4.2.2 ผลที่ได้จากการจำลองวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	58
4.3 วิเคราะห์ผลการจำลองของโมเดลอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่แตกต่างกัน 3 แบบ.....	61
4.4 การปรับเปลี่ยนรูปทรงของช่องการไหลสำหรับออกแบบเพื่อสร้างต้นแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความ ร้อนแลกเปลี่ยนความร้อน.....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	72
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	72
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	72
 บทที่ 6 สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย.....	 73
บรรณานุกรม.....	74
ภาคผนวก.....	76
ภาคผนวก ก. ตาราง Excel การคำนวณต่างๆ สำหรับวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีลักษณะรูปแบบพื้นฐานซึ่งมีการไหลแบบสวนทางกัน (Counter-Flow).....	77
ภาคผนวก ข. แบบ Drawing ของช่องการไหลที่ใช้ในการทำแบบจำลองสำหรับวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีลักษณะรูปแบบพื้นฐานซึ่งมีการไหลแบบสวนทางกัน (Counter-Flow).....	80
ภาคผนวก ค. แบบ Drawing อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งมีการไหลแบบสวนทางกัน (Counter-Flow) ซึ่งถูกออกแบบสำหรับใช้ในการทำแบบจำลองไหล.....	83
ภาคผนวก ง. แบบสิ่งผลิต.....	88
ภาคผนวก จ. สรุปการใช้จ่ายเงิน.....	104
ประวัติผู้เขียน.....	106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าการนำความร้อน (ที่อุณหภูมิ 300 K).....	9
2.1 (ต่อ) แสดงค่าการนำความร้อน (ที่อุณหภูมิ 300 K) (ต่อ).....	10
2.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย.....	11
2.3 แสดงค่าความขรุขระสัมบูรณ์.....	12
2.3 (ต่อ) แสดงค่าความขรุขระสัมบูรณ์ (ต่อ).....	13
2.4 สมการการเคลื่อนย้ายของ $k$ และ $\epsilon$ .....	20
2.5 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแบบจำลอง $k-\epsilon$ .....	22
3.1 ตารางคุณสมบัติวัสดุและของไหลที่ใช้ในการจำลอง (Material Properties).....	26
3.2 แสดงค่าขอบเขตและเงื่อนไขในการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	27
3.3 ตารางคุณสมบัติวัสดุและของไหลที่ใช้ในการจำลอง (Material Properties).....	31
3.4 แสดงค่าขอบเขตและเงื่อนไขในการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	31
3.5 แสดงค่าตัวประกอบความเสียดทาน (Friction factor, $f$ ) จากผลเฉลยแม่นยำตรงเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรมทั้ง 3 แบบของโมเดลแบบจำลองความปั่นป่วน ค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 1.69 \times 10^4$ ( $Re < 10^5$ ) จำนวนเมชเท่ากับ 288,000.....	32
3.6 แสดงค่าตัวประกอบความเสียดทาน (Friction factor, $f$ ) จากผลเฉลยแม่นยำตรงเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรมทั้ง 3 แบบของโมเดลแบบจำลองความปั่นป่วน ค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 1.5 \times 10^5$ ( $Re > 10^5$ ) จำนวนเมชเท่ากับ 288,000.....	32
3.7 ตารางคุณสมบัติวัสดุและของไหลที่ใช้ในการจำลอง (Material Properties).....	34
3.8 แสดงค่าขอบเขตและเงื่อนไขในการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	34
3.9 แสดงค่า Grid Convergence Index (GCI) ภายใต้อัตราจำนวนเมชที่แตกต่างกัน.....	36
3.10 แสดงค่าจากผลเฉลยแม่นยำตรงเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรม.....	38
3.11 ตัวแปรต่างๆ จากการทำออฟติไมเซชันเบื้องต้นเพื่อใช้ในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก.....	40
3.12 อุณหภูมิและความดันแต่ละสถานะต่างๆ จากการทำออฟติไมเซชันเบื้องต้น.....	41
3.13 แสดงค่าของแต่ละตัวสัมประสิทธิ์.....	41
3.14 ค่าการนำความร้อนของอากาศ (Air Thermal Conductivity, $k$ ) ณ อุณหภูมิและความดันต่างๆ .....	43
3.15 ค่าความหนืดพลวัตของอากาศ (Air Dynamic viscosity, $\mu$ ) ณ อุณหภูมิและความดันต่างๆ..	44
3.16 ตารางคุณสมบัติวัสดุและของไหลที่ใช้ในการจำลอง (Material Properties).....	46
3.17 แสดงค่าขอบเขตและเงื่อนไขในการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ .....	46
3.17 (ต่อ) แสดงค่าขอบเขตและเงื่อนไขในการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (ต่อ).....	47
3.18 การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยการทำให้ Mesh Independence.....	48
3.19 แสดงผลบางส่วนที่ได้จากการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยใช้ค่าเมชที่ 1,485,208	50
4.1 ตารางตัวแปรและคุณสมบัติของของไหลที่ใช้ในการคำนวณพื้นที่ผิวการแลกเปลี่ยนความร้อน.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.2 ตารางคุณสมบัติวัสดุและของไหลที่ใช้ในการจำลอง (Material Properties).....	56
4.3 แสดงค่าขอบเขตและเงื่อนไขในการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ .....	57
4.4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะช่องการไหลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 3 โมเดล.....	58
4.5 แสดงผล Static Temperature (K) และ Total Pressure (Pa) ที่ทางเข้าออกของของไหลทั้งสองและปริมาณการถ่ายเทความร้อนสำหรับอากาศดีของโมเดลอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 3 แบบ ที่ได้จากการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งค่าปริมาณการถ่ายเทความร้อนที่ต้องการสำหรับอากาศดี เท่ากับ 81687.371 W.....	59
ก.1 การคำนวณพื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนทั้งหมด ( $A_s$ , Total heat transfer area, m <sup>2</sup> ) สำหรับการไหลแบบสวนทางกัน Counter-Flow โดยวิธี $\epsilon$ -NTU.....	78
ก.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ( $U$ , Overall Heat Transfer Coefficient , W/m <sup>2</sup> -K) ที่เป็นค่าเฉลี่ย.....	78
ก.3 การคำนวณความยาวของช่องการไหลจากพื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนทั้งหมดความร้อนทั้งหมด.....	78
ก.4 การคำนวณค่า Dynamic viscosity และ Thermal conductivity.....	79
ก.5 การคำนวณค่า Mach Number.....	79
ค.1 รายการชื่อส่วนประกอบย่อยของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั้งส่วนของช่องการไหลด้านอากาศดี ก๊าซไอเสียและตัวกลางสแตนเลส.....	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงการทำงานของเครื่องยนต์กังหันแก๊ส.....	4
2.2 การทำงานของเครื่องยนต์กังหันแก๊ส.....	5
2.3 แสดงแผนภาพ P-v.....	5
2.4 แสดงแผนภาพ T-s.....	5
2.5 แสดงเครื่องยนต์กังหันแก๊สที่มีการเพิ่มอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	7
2.6 แผนภาพ T-s ของวัฏจักร Brayton ที่ประกอบด้วยรีเจนเนอเรชัน.....	8
2.7 แสดงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ cross-flow a) unmixed b) mixed.....	13
2.8 แสดงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนท่อซ้อนกัน (a) Parallel flow (b) Counter flow.....	14
2.9 แสดงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิด shell and tube.....	14
2.10 กระบวนการเปลี่ยนผ่านของลำการไหลไปสู่ความปั่นป่วน.....	15
2.11 เครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กพิกัดกำลัง 195 กิโลวัตต์ (Capstone Co.Ltd.).....	24
2.12 แผนภาพแสดงวัฏจักร Recuperative.....	25
3.1 แสดงภาพ 2 มิติ การไหลแบบสวนทางกัน (Counter - Flow) ระหว่างชั้นโมเดลของไหลร้อน (Hot fluid) หนา 0.1 เมตร กับชั้นโมเดลของไหลเย็น (Cold fluid) หนา 0.1 เมตร โดยมีชั้นโมเดลตัวกลางของแข็ง (Solid) หนา 0.1 เมตร อยู่ตรงกลาง.....	27
3.2 แสดงปริมาตรควบคุมหน้าสัมผัสระหว่างของไหลและของแข็งที่ถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกต... ..	28
3.3 แสดงภาพ 3 มิติ ของโมเดลทรงสี่เหลี่ยมที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตที่มีตัวกลางของแข็งอยู่ตรงกลางระหว่างของไหลร้อน (Hot fluid) และของไหลเย็น (Cold fluid).....	28
3.4 ภาพตัดที่ตำแหน่ง Z/2 ของโมเดล 3 มิติ แสดงการกระจายอุณหภูมิ (Temperature Distribution).....	28
3.5 แสดงเส้นกราฟอุณหภูมิ (Temperature Profile) ที่ตำแหน่ง $X=L/2$ กราฟเส้น A: ที่ได้จากการจำลองการถ่ายเทความร้อนของโมเดล 3 มิติ เทียบกับ B: โมเดล 2 มิติ ซึ่งได้จากงานวิจัยที่น่าเชื่อถือ. ..	29
3.6 ลักษณะของเมชที่ใช้ในการจำลองการไหลในท่อยาว.....	35
3.7 ลักษณะเวกเตอร์ความเร็วที่ได้จากการจำลองการไหลในท่อยาว.....	35
3.8 แสดงค่า Y Plus ที่ผนังท่อตามแนวการไหลของแบบจำลองที่มีจำนวนของเมชแตกต่างกัน 6 ค่า.. ..	35
3.9 รูปทรงของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเบื้องต้นที่ใช้ในการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ประกอบไปด้วย 3 ส่วนประกอบหลักดังนี้ (A) ช่องการไหลของอากาศ, (B) ตัวกลางสแตนเลสแผ่น, (C) ช่องการไหลของก๊าซไอเสีย.....	39
3.10 แสดงแผนภาพ T-S ของกระบวนการจริงซึ่งพิจารณาความดันสูญเสียที่เกิดจากอุปกรณ์ของวัฏจักรเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบ ดึงความร้อนทั้งกลับมาใช้งาน.....	40
3.11 แสดงลักษณะการไหลของอากาศและก๊าซไอเสียภายในช่องการไหล.....	45
3.12 เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	48
3.13 เมชสามมิติของช่องการไหลอากาศและก๊าซไอเสียซึ่งไหลระหว่างตัวกลางแผ่นสแตนเลส.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน Mesh Element กับค่า Total Pressure ของก๊าซไอเสียที่ไหลเข้าช่องการไหล.....	49
3.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน Mesh Element กับค่า Static Temperature ของอากาศดีที่ไหลออกจากช่องการไหล.....	49
3.16 แสดงค่า contour ของ Static Temperature (K) ที่ Center Plane.....	50
3.17 แสดงค่าความหนาแน่นของของไหลทั้งสองตามแนวการไหลสำหรับการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Flow).....	51
3.18 แสดงค่าความหนาแน่นของของไหลทั้งสองตามแนวการไหลสำหรับการไหลแบบอัดตัวได้ (Compressible Flow).....	51
3.19 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลทั้งสองตามแนวการไหลสำหรับการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Flow).....	51
3.20 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลทั้งสองตามแนวการไหลสำหรับการไหลแบบอัดตัวได้ (Compressible Flow).....	52
4.1 รูปทรงของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ไหลแบบสวนทางกัน (Counter-Flow) โดยตัวกลางกลางสแตนเลสมีรูปทรงเป็นแผ่นพับ ประกอบไปด้วย 3 ส่วนประกอบหลักดังนี้ 1. ช่องการไหลของอากาศดี 2. ตัวกลางสแตนเลสแผ่นพับ 3. ช่องการไหลของก๊าซไอเสีย.....	53
4.2 แสดงภาพตัดขวางด้านข้างของลักษณะรูปทรงของแบบจำลองทั้งสามส่วนอันประกอบด้วยส่วนของ 1.อากาศดี (Air Domain) 2.ตัวกลางสแตนเลสแผ่นพับ (Wavy Stainless Plate Domain) 3.ก๊าซไอเสีย (Exhaust gas Domain).....	56
4.3 เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่เป็นแบบ Rotationally Periodic (2 degree) (ก) ภาพ Isometric (ข) ภาพ Front side.....	56
4.4 รูปทรงของช่องการไหลที่มีขนาดแตกต่างกันของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 3 แบบ .....	58
4.5 แสดงค่า contour ตำแหน่งกึ่งกลางที่ Center Plane ของช่องการไหลสำหรับใช้พล็อตกราฟค่าอุณหภูมิ Static Temperature (K) ที่เปลี่ยนแปลงตามแนวแกน Y ตามรูปลูกศร ของโมเดลอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 3 แบบ.....	60
4.6 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าของอุณหภูมิ Static Temperature (K) ที่เปลี่ยนแปลงตามแนวแกน Y ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของช่องการไหลของโมเดลอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 3 แบบ.....	60
4.7 Contour อุณหภูมิ Static Temperature (K) บนพื้นผิวตัวกลางของของแข็งด้านก๊าซไอเสีย โมเดลแบบที่ 1.....	61
4.8 Contour อุณหภูมิ Static Temperature (K) บนพื้นผิวตัวกลางของของแข็งด้านก๊าซไอเสีย โมเดลแบบที่ 2.....	61
4.9 Contour อุณหภูมิ Static Temperature (K) บนพื้นผิวตัวกลางของของแข็งด้านก๊าซไอเสีย โมเดลแบบที่ 3.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.10 (ก) Contour ของอุณหภูมิ Static Temperature (K) ในระนาบขวางการไหล ณ ตำแหน่งที่ (1), (2) และ (3) (ข) แสดงรายละเอียดระนาบตัดขวาง ซึ่งจะถูกแสดงเปรียบเทียบสำหรับโมเดลทั้ง 3 แบบ.....	62
4.11 Contour ของอุณหภูมิ Static Temperature (K) ในระนาบขวางการไหล ณ ตำแหน่งที่ (1) สำหรับ (ก) โมเดลแบบที่ 1 (ข) โมเดลแบบที่ 2 และ (ค) โมเดลแบบที่ 3.....	63
4.12 Contour ของอุณหภูมิ Static Temperature (K) ในระนาบขวางการไหล ณ ตำแหน่งที่ (2) สำหรับ (ก) โมเดลแบบที่ 1 (ข) โมเดลแบบที่ 2 และ (ค) โมเดลแบบที่ 3.....	63
4.13 Contour ของอุณหภูมิ Static Temperature (K) ในระนาบขวางการไหล ณ ตำแหน่งที่ (3) สำหรับ (ก) โมเดลแบบที่ 1 (ข) โมเดลแบบที่ 2 และ (ค) โมเดลแบบที่ 3.....	64
4.14 แสดงค่า Vector ความเร็วซึ่งแสดงตามสีของอุณหภูมิที่ Center Plane ของช่องการไหล อากาศดี โมเดลแบบที่ 1 .....	65
4.15 แสดงค่า Vector ความเร็วซึ่งแสดงตามสีของอุณหภูมิที่ Center Plane ของช่องการไหล อากาศดี โมเดลแบบที่ 2.....	65
4.16 แสดงค่า Vector ความเร็วซึ่งแสดงตามสีของอุณหภูมิที่ Center Plane ของช่องการไหล อากาศดี โมเดลแบบที่ 3.....	65
4.17 จากบริเวณ (A) ที่แสดงค่า Vector ความเร็วซึ่งแสดงตามสีของอุณหภูมิที่ Center Plane ช่วง ทางเข้าของช่องการไหลอากาศดี โมเดลแบบที่ 1.....	66
4.18 จากบริเวณ (B) ที่แสดงค่า Vector ความเร็วซึ่งแสดงตามสีของอุณหภูมิที่ Center Plane ช่วง ทางเข้าของช่องการไหลอากาศดี โมเดลแบบที่ 2 .....	66
4.19 จากบริเวณ (C) ที่แสดงค่า Vector ความเร็วซึ่งแสดงตามสีของอุณหภูมิที่ Center Plane ช่วง ทางเข้าของช่องการไหลอากาศดี โมเดลแบบที่ 3.....	66
4.20 แสดงค่า Vector ความเร็วซึ่งแสดงตามสีของความเร็วที่ Center Plane ของช่องการไหลก๊าซ ไอเสีย โมเดลแบบที่ 1.....	68
4.21 แสดงค่า Vector ความเร็วซึ่งแสดงตามสีของความเร็วที่ Center Plane ของช่องการไหลก๊าซ ไอเสีย โมเดลแบบที่ 2 .....	68
4.22 แสดงค่า Vector ความเร็วซึ่งแสดงตามสีของความเร็วที่ Center Plane ของช่องการไหลก๊าซ ไอเสีย โมเดลแบบที่ 3.....	68
4.23 จากบริเวณ (D) ที่แสดงค่า Vector ความเร็วซึ่งแสดงตามสีของความเร็วที่ Center Plane ช่วง ทางเข้าของช่องการไหลก๊าซไอเสีย โมเดลแบบที่ 1.....	69
4.24 จากบริเวณ (E) ที่แสดงค่า Vector ความเร็วซึ่งแสดงตามสีของความเร็วที่ Center Plane ช่วง ทางเข้าของช่องการไหลก๊าซไอเสีย โมเดลแบบที่ 2.....	69
4.25 จากบริเวณ (F) ที่แสดงค่า Vector ความเร็วซึ่งแสดงตามสีของความเร็วที่ Center Plane ช่วง ทางเข้าของช่องการไหลก๊าซไอเสีย โมเดลแบบที่ 3.....	69
4.26 ภาพโดยรวมของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ออกแบบด้วยโปรแกรมช่วยเขียนแบบ 3มิติ.....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.27 แสดงภาพตัดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	71
4.28 แสดงภาพเครื่องต้นแบบของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจริงที่ได้จากการสังเคราะห์.....	71
ข.1 แบบ Drawing ที่ประกอบเข้าด้วยกันของ (1) ช่องการไหลของอากาศดี (2) ช่องการไหลของก๊าซไอเสีย (3) ตัวกลางสแตนเลสแผ่น ที่มีการไหลแบบสวนทางกัน Counter-Flow ที่เป็นรูปทรงพื้นฐาน).....	81
ข.2 แบบ Drawing ของส่วนที่เป็นช่องการไหลของของไหลอากาศดี.....	81
ข.3 แบบ Drawing ของส่วนที่เป็นช่องการไหลของของไหลก๊าซไอเสีย.....	82
ข.4 แบบ Drawing ของส่วนที่เป็นตัวกลางสแตนเลสแผ่น.....	82
ค.1 รูปทรงของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ไหลแบบสวนทางกัน (Counter-Flow) โดยตัวกลางสแตนเลสมีรูปทรงเป็นแผ่นพับ ประกอบไปด้วย 3 ส่วนประกอบหลักดังนี้ 1. ช่องการไหลของอากาศดี 2. ตัวกลางสแตนเลสแผ่นพับ 3. ช่องการไหลของก๊าซไอเสีย.....	84
ค.2 ส่วนประกอบย่อยของช่องการไหลด้านอากาศดี.....	84
ค.3 ส่วนประกอบย่อยของหน้าแปลนทั้งด้านช่องการไหลอากาศดีและก๊าซไอเสีย.....	84
ค.4 ตัวกลางสแตนเลสที่ขึ้นรูปทรงโดยการพับ.....	85
ค.5 ส่วนประกอบย่อยของช่องการไหลด้านก๊าซไอเสีย.....	85
ค.6 แบบ Drawing ของส่วนโดเมนการไหลของของไหลอากาศดีที่ใช้สำหรับทำแบบจำลอง.....	86
ค.7 แบบ Drawing ของส่วนโดเมนตัวกลางสแตนเลสที่ขึ้นรูปทรงโดยการพับที่ใช้สำหรับทำแบบจำลอง.....	86
ค.8 แบบ Drawing ของส่วนโดเมนการไหลของของไหลก๊าซไอเสียที่ใช้สำหรับทำแบบจำลอง.....	87
ง1.1 ส่วนประกอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	90
ง1.2 รายละเอียดของชิ้นส่วนหมายเลข 1-C: Inlet/Outlet Cold Front, 2-C: Inlet/Outlet Cold Back .....	90
ง1.3 รายละเอียดของชิ้นส่วนหมายเลข 3-C: Inlet & Outlet Cold Side, 4-C: Flange Cold Inlet Tube To Taper .....	91
ง1.4 รายละเอียดของชิ้นส่วนหมายเลข 5-C: Bar Bottom Cold, 6-C: Stand Cover Cold Bottom.....	91
ง1.5 รายละเอียดของชิ้นส่วนหมายเลข 1-F: Flange Front/Rear.....	92
ง1.6 รายละเอียดของชิ้นส่วนหมายเลข 2-F: Flange Top Cover Solid, 3-F: Flange Top Edge Solid.....	92
ง1.7 รายละเอียดของชิ้นส่วนหมายเลข 4-F: Flange Bottom Cover Solid, 5-F: Flange Bottom Edge Solid.....	93
ง1.8 รายละเอียดของชิ้นส่วนหมายเลข 1-M: Top Solid, 2-M: Inner Side Solid .....	93
ง1.9 รายละเอียดของชิ้นส่วนหมายเลข 3-M: Outer Side Solid, 1-H: Flange Hot Inlet .....	94
ง1.10 รายละเอียดของชิ้นส่วนหมายเลข 2-H: Hot Inlet Tube to Taper, 3-H: Hot Inlet Side ....	94
ง1.11 รายละเอียดของชิ้นส่วนหมายเลข 4-H: Hot Inlet Top, 5-H: Hot Inlet Bottom.....	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ง1.12 รายละเอียดของชิ้นส่วนหมายเลข 6-H: Hot Outlet Side, 7-H: Hot Outlet-Front .....	95
ง1.13 รายละเอียดของชิ้นส่วนหมายเลข 8-H: Hot Outlet Back, 9-H: (Hot Inlet Tube to Taper)+(Flange Hot Inlet).....	96
ง1.14 รายละเอียดของชิ้นส่วนหมายเลข 10-H: Hot Guide .....	96
ง1.15 รายละเอียดของชิ้นส่วนหมายเลข 11-H: Bar Top Hot.....	97
ง2.1 ขั้นตอนการเชื่อมชิ้นส่วนของตัวกลางระหว่างช่องการไหล 01-Assem': Medium.....	99
ง2.2 ขั้นตอนการเชื่อมชิ้นส่วนของตัวกลางระหว่างช่องการไหลกับหน้าแปลน 02-Assem'(1): Medium + Flange_01.....	99
ง2.3 ขั้นตอนการเชื่อมชิ้นส่วนของตัวกลางระหว่างช่องการไหลกับหน้าแปลน (ต่อ) 02-Assem'(2): Medium + Flange_01.....	100
ง2.4 ขั้นตอนการเชื่อมชิ้นส่วนของตัวกลางระหว่างช่องการไหลกับหน้าแปลน (ต่อ 1) 03-Assem': Medium + Flange_02.....	100
ง2.5 ขั้นตอนการเชื่อมชิ้นส่วนของตัวกลางระหว่างช่องการไหลกับหน้าแปลนและช่องอากาศดี04-Assem'(1): Medium + Flange + Cold .....	101
ง2.6 ขั้นตอนการเชื่อมชิ้นส่วนของตัวกลางระหว่างช่องการไหลกับหน้าแปลนและช่องอากาศดี (ต่อ) 04-Assem'(2): Medium + Flange + Cold.....	101
ง2.7 ขั้นตอนการเชื่อมชิ้นส่วนของตัวกลางระหว่างช่องการไหลกับหน้าแปลนกับช่องอากาศดีและก๊าซไอเสีย 05-Assem'(1): Medium + Flange + Cold + Hot_01.....	102
ง2.8 ขั้นตอนการเชื่อมชิ้นส่วนของตัวกลางระหว่างช่องการไหลกับหน้าแปลนกับช่องอากาศดีและก๊าซไอเสีย (ต่อ) 05-Assem'(2): Medium + Flange + Cold + Hot_01.....	102
ง2.9 ขั้นตอนการเชื่อมชิ้นส่วนของตัวกลางระหว่างช่องการไหลกับหน้าแปลนกับช่องอากาศดีและก๊าซไอเสีย (ต่อ 1) 06-Assem'(2): Medium + Flange + Cold + Hot_02.....	103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันและอนาคตข้างหน้า เชื้อเพลิงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นอย่างมากในการใช้ขับเคลื่อนของเครื่องยนต์หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องต้นกำลัง เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและเครื่องจักรใหญ่ๆ ที่ต้องการกำลังขับเคลื่อน เป็นต้น เครื่องยนต์เหล่านี้ส่วนใหญ่แล้วใช้น้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งปัจจุบันเชื้อเพลิงเหล่านี้มีแนวโน้มที่มีปริมาณที่ลดลงจากโลกและมีราคาที่สูงขึ้น ดังนั้นมนุษย์เรามีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องหาเชื้อเพลิงชนิดอื่นมาใช้เป็นพลังงานทดแทนและพัฒนาเครื่องยนต์เหล่านั้นให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

เครื่องยนต์กังหันก๊าซนั้นเป็นเครื่องยนต์ชนิดหนึ่งซึ่งถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่องเพราะเป็นเครื่องยนต์ที่ให้กำลังในการขับเคลื่อนสูงโดยเป็นเทคโนโลยีการแปรรูปพลังงานจากเชื้อเพลิงเหลวหรือก๊าซให้กลายเป็นพลังงานกลชนิดหนึ่ง เนื่องจากข้อได้เปรียบทางด้านประสิทธิภาพและการปลดปล่อยมลพิษที่ต่ำกว่าเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าแบบเดิม เช่น ในระบบเตาเผาไหม้ที่ใช้ร่วมกับหม้อต้มไอน้ำ และกังหันไอน้ำเพียงอย่างเดียว เครื่องยนต์กังหันก๊าซเป็นเครื่องยนต์ทางความร้อน (Heat engine) ซึ่งทำงานโดยมีกระบวนการทำงานแบบต่อเนื่อง ประกอบด้วยการอัดอากาศจากบรรยากาศปกติ แล้วอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นโดยการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ เชื้อเพลิงที่เผาไหม้ส่วนมากเป็นน้ำมันก๊าด ก๊าซที่มีอุณหภูมิสูงเมื่อถูกสันดาบจะขยายตัวและไปขับเคลื่อนกังหันให้หมุนเพื่อไปขับเคลื่อนเพลาลูกเบี้ยว ซึ่งการสันดาบจะเกิดขึ้นต่อเนื่องตลอดเวลาต่างจากเครื่องยนต์แบบลูกสูบและงานที่ได้ออกมาจะเป็นงานในลักษณะของกระบวนการไหลส่วสม่ำเสมอ (Flow work) เครื่องยนต์กังหันแก๊สอย่างง่าย จะประกอบด้วยเครื่องอัดอากาศหรือคอมเพรสเซอร์ (Compressor) ห้องเผาไหม้ (Combustion chamber) และชุดกังหันแก๊สหรือเทอร์ไบน์ (Turbine unit)

ด้วยเงื่อนไขทางด้านสังคมที่นำไปสู่กฎหมายกำกับกิจการผลิตไฟฟ้า ทำให้การผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่สำหรับประเทศไทยเป็นไปได้ยาก การผลิตกระแสไฟฟ้าในลักษณะที่เป็นโรงไฟฟ้าขนาดเล็กที่กระจายอยู่ตามแหล่งที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้าและใกล้กับแหล่งวัตถุดิบที่นำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิง เช่น ก๊าซสังเคราะห์จากวัสดุทางการเกษตร ก๊าซชีวมวล จึงเป็นทางเลือกที่น่าจะมีการเติบโตได้สำหรับในต่างประเทศเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กได้มีการพัฒนาขึ้นจนกระทั่งมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนใกล้เคียงกับเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดใหญ่ ในการเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซมีการสูญเสียความร้อนไปเป็นจำนวนมากจากแก๊สไอเสียทิ้งจากห้องเผาไหม้ การนำความร้อนที่นี้กลับมาใช้ประโยชน์ใหม่เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยให้มีการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงลดลงได้ และด้วยเทคนิคในการนำเอาความร้อนเหลือทิ้งจากไอเสียกลับมาใช้ในการอุ่นอากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้ ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีเพิ่มขึ้นถึง 29 เปอร์เซ็นต์ [1, 2] ในการนี้ต้องอาศัยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในการดึงความร้อนที่นี้กลับมาใช้ใหม่ การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีสมรรถนะในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงสุดจึงเป็นประเด็นสำคัญที่นักศึกษายัง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อดึงความร้อนที่กลับมาใช้งานในเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงความร้อนต่ำ ซึ่งจะเป็นการศึกษาแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยในส่วนของแบบจำลองเชิงตัวเลขนั้นจะศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการทำงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยคำนึงถึงความดันลดเมื่อของไหลทั้งสองคืออากาศและไอเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะนำไปสู่ประสิทธิภาพด้านสมรรถนะในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมจากการทำงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อดึงความร้อนทิ้งกลับมาใช้งานในเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก โดยในส่วนของ การเขียนแบบสำหรับสิ่งผลิตสร้างเครื่องต้นแบบของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้นจะต่างไปจากแบบที่ได้จากการทำแบบจำลองอันเนื่องจากข้อจำกัดของวัสดุที่ใช้ผลิต ข้อจำกัดของอุณหภูมิสำหรับใช้ในการทดลองในอนาคตและความสามารถในการผลิตได้จริง ซึ่งคาดว่าในอนาคตจะสามารถนำอุปกรณ์ที่ถูกสร้างขึ้นมาประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อจำลองปรากฏการณ์การแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้นใน Heat recovery unit และเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้ กับรายงานการวิจัยที่น่าเชื่อถือ

1.2.2 เพื่อออกแบบลักษณะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน Heat recovery unit ตามลักษณะการนำไปใช้งานในเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก และประยุกต์กระบวนการจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่ได้พัฒนาขึ้นนั้น ในการจำลองการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ดังกล่าว

1.2.3 เพื่อสร้างต้นแบบชุดแลกเปลี่ยนความร้อน

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 กำหนดขอบเขตของการศึกษาวิจัยเฉพาะ Heat recovery unit ไม่รวมส่วนของห้องเผาไหม้ (Combustion Chamber) เครื่องอัดอากาศ (Compressor) และกังหัน (Turbine)

1.3.2 กำหนดให้การไหลของอากาศดี และก๊าซไอเสีย ที่เข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้น เป็นแบบสม่ำเสมอ (Uniform inlet Flow)

1.3.3 ก๊าซไอเสียที่ไหลเข้าสู่อุปกรณ์ให้เสมือนเป็นอากาศที่มีอุณหภูมิ 904 K โดยไม่พิจารณาส่วนของเชื้อเพลิง และอากาศดีที่ไหลเข้าสู่อุปกรณ์ให้เสมือนเป็นอากาศที่มีอุณหภูมิ 581 K

1.3.4 ก๊าซไอเสียที่ไหลเข้าสู่อุปกรณ์มีความดันอยู่ในช่วง 85 Pa ถึง 232 Pa และอากาศดีที่ไหลเข้าสู่อุปกรณ์มีความดันอยู่ในช่วง 398943 Pa ถึง 398989 Pa ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [3]

1.3.5 กำหนดให้ของไหลเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible Fluid)

1.3.6 ตัวกลางของแข็งที่ใช้สำหรับแลกเปลี่ยนความร้อนให้เป็นโลหะสแตนเลสเกรด S304 มีคุณสมบัติทางความร้อนคงที่

## 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยโดยเริ่มต้นจากการรวบรวมองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ หลังจากนั้นกำหนดคุณลักษณะและประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแล้ว ออกแบบรูปทรงเบื้องต้นของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจากนั้นทำการเขียนแบบ 3 มิติ สร้างเมช และใช้โปรแกรมแอนซิส (ANSYS) ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนเพื่อช่วยวิเคราะห์ถึงอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยมีรายละเอียดขั้นตอนการวิจัยดังนี้

1.4.1 ศึกษาการทำแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกต (Conjugate Heat Transfer) ที่ไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) เพื่อจะสามารถกำหนดเงื่อนไขการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตซึ่งเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบ 3 โดเมน ที่มีโดเมนติดกันระหว่างของไหลกับของแข็ง ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะถ่ายเทความร้อนจากโดเมนของไหลร้อนผ่านโดเมนของของแข็งก่อนจะถ่ายเทไปสู่โดเมนของของไหลเย็น โดยโดเมนของของแข็งเป็นตัวกลางคั่นระหว่างโดเมนของของไหลร้อนและเย็นซึ่งไหลแบบสวนทางกัน (Counter-Flow) โดยเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่น่าเชื่อถือ

1.4.2 ศึกษาการทำแบบจำลองการไหลผ่านท่อแบบปั่นป่วน (Turbulent Pipe Flow) เพื่อกำหนดเงื่อนไขการไหลซึ่งพิจารณาค่าความดันตกคร่อมและตัวประกอบความเสียดทาน (Friction Factor) จากค่าเลขเรย์โนลด์ที่แตกต่างกัน โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนที่แตกต่างกัน 3 โมเดล คือ  $k-\epsilon$  STANDARD,  $k-\epsilon$  RNG และ  $k-\epsilon$  REALIZABLE ที่ Near-Wall Treatment แบบ Standard Wall Functions กับ Enhance Wall Treatment โดยเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำ

1.4.3 สร้างแบบจำลองการไหลผ่านท่อแบบปั่นป่วนที่มีการถ่ายเทความร้อนจากผนังสู่ของไหล (Turbulent Pipe Flow Heat Transfer) เพื่อกำหนดเงื่อนไขการถ่ายเทความร้อนที่ไหลแบบปั่นป่วน โดยพิจารณาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่มีฟังก์ชันความร้อนคงที่ผ่านชั้นขีดเฉียดระหว่างท่อทั้งสองไหล รวมถึงการกำหนดค่าชี้วัดการลู่เข้าของกริด (Grid Convergence Index, GCI) สำหรับค่า  $Y^+$  ที่ชั้นขีดเฉียด ซึ่งน้อยกว่า 1 โดยเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำ

1.4.4 นำวิธีการทำแบบจำลองที่ได้เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่น่าเชื่อถือและผลเฉลยแม่นยำ มาสร้างแบบจำลองลักษณะรูปแบบพื้นฐานเบื้องต้นสำหรับใช้ออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการไหลแบบสวนทางกัน (Counter-Flow)

1.4.5 ออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อให้สามารถถ่ายเทความร้อนได้ตามเป้าหมาย โดยใช้ทฤษฎีพื้นฐานด้านการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

1.4.6 ศึกษาความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยการจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในระบบ ด้วยโปรแกรมการจำลอง (Simulation) เชิงพาณิชย์ ANSYS ในรูปแบบ 3 มิติ

1.4.7 เขียนแบบสั่งผลิตเครื่องต้นแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยโปรแกรมช่วยเขียนแบบ 3 มิติ (Solid Works) โดยคำนึงถึงความสามารถในการผลิตได้จริง

1.4.8 นำแบบสั่งผลิตที่เสร็จเรียบร้อยแล้วทำการสั่งผลิตเครื่องต้นแบบ

1.4.9 สรุปผลการดำเนินโครงการ

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถนำพลังงานความร้อนทิ้งจากไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซกลับมาใช้เพื่ออุ่นอากาศก่อนการเผาไหม้และลดอัตราการบริโภคเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์กังหันก๊าซลง

1.5.2 สามารถนำโปรแกรมแบบจำลองมาช่วยในการออกแบบให้ได้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมสำหรับการใช้เชื้อเพลิงก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก

1.5.3 เครื่องต้นแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้จากการใช้แบบจำลองและทฤษฎีพื้นฐานด้านการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

1.5.4 ได้รับความรู้เกี่ยวกับการทำงานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซและการปรับปรุงประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อน

1.5.5 พัฒนางองค์ความรู้และเทคโนโลยีสำหรับการพัฒนาทางด้านพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

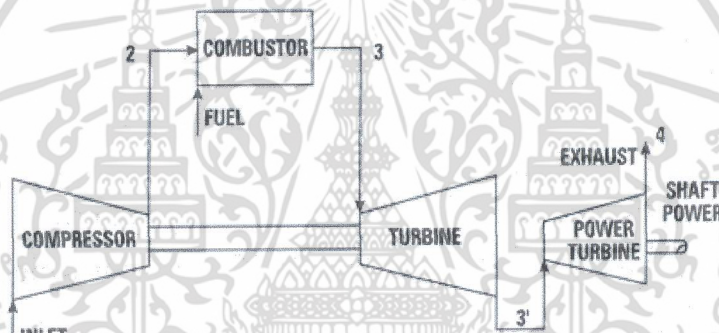
## บทที่ 2 แนวคิดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 แนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1.1 หลักการและทฤษฎีเครื่องยนต์กังหันแก๊ส

##### 2.1.1.1 หลักการทำงานของเครื่องยนต์

การทำงานของเครื่องยนต์กังหันแก๊ส เริ่มจากการดูดอากาศเข้าที่จุดที่ 1 ที่อุณหภูมิและความดันอากาศและถูกอัดผ่านเครื่องอัดอากาศ ทำให้มีความดันและอุณหภูมิที่สูงขึ้นไปยังจุดที่ 2 และผ่านเข้าไปในห้องเผาไหม้ ซึ่งมีหัวฉีดก๊าซเชื้อเพลิงออกมาผสมกับอากาศ และทำการจุดระเบิดให้เกิดการเผาไหม้ขึ้น โดยจะเกิดงานที่ได้จากการขยายตัวของแก๊สผสม ทำให้มีแรงไปหมุนกังหันซึ่งมีเพลลาต่อกับเครื่องอัดอากาศ จากนั้นก๊าซไอเสียที่ยังมีความดัน อุณหภูมิและพลังงานจลน์เหลืออยู่ก็จะไหลออกไปสู่บรรยากาศที่จุดที่ 4 ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 แสดงการทำงานของเครื่องยนต์กังหันแก๊ส

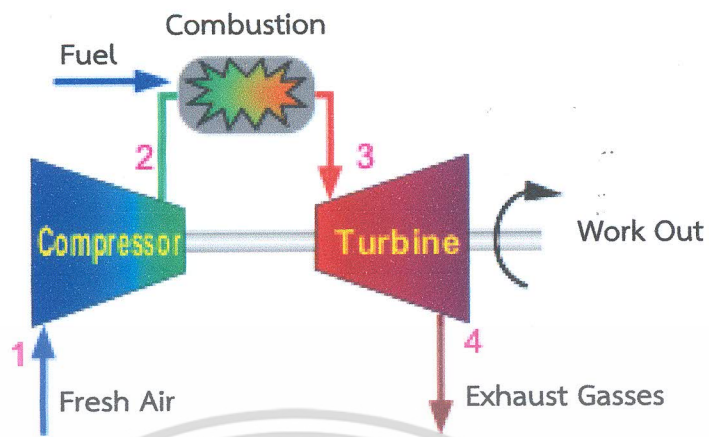
##### 2.1.1.2 วัฏจักรในอุดมคติ (Ideal cycle)

การพิจารณาพลังงานที่ได้และประสิทธิภาพของเครื่องยนต์กังหันแก๊สเพื่อให้ง่ายจึงต้องคิดในลักษณะของวัฏจักรอุดมคติก่อน ซึ่งในสภาวะนี้แต่ละองค์ประกอบของเครื่องยนต์จะแยกกันคิดงานที่ได้ของแต่ละชนิด (Specific work) และประสิทธิภาพของวัฏจักรขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความดันและอุณหภูมิสูงสุดของวัฏจักรเท่านั้น หลังจากนั้นจึงทำการพิจารณาให้ถูกต้องมากขึ้นในภายหลัง จากหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่กล่าวถึงเครื่องยนต์กังหันแก๊สได้ตั้งข้อสมมุติฐานไว้ดังนี้

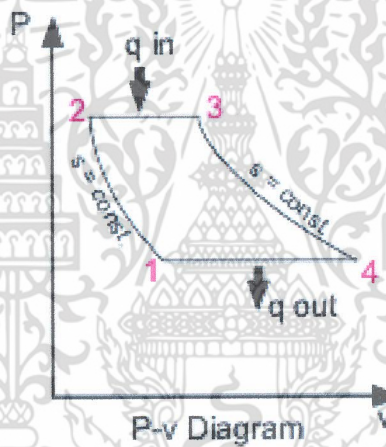
- 1) กระบวนการอัดและการขยายตัวเป็นแบบอเดียเบติกชนิดย้อนกลับได้ (Reversible adiabatic)
- 2) ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของสารตัวกลางระหว่างทางเข้าและทางออกของแต่ละส่วนของอุปกรณ์
- 3) ไม่มีการสูญเสียความดันในอุปกรณ์ต่างๆ
- 4) กำหนดให้สารตัวกลางมีองค์ประกอบไม่เปลี่ยนแปลงตลอดวัฏจักรและเป็นแก๊สสมบูรณ์ที่มีค่าความร้อนจำเพาะ (Specific heat) คงที่

5) มวลที่ไหลตลอดวัฏจักรมีค่าคงที่

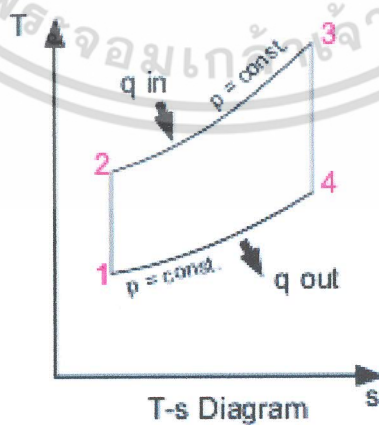
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.2 การทำงานของเครื่องยนต์กังหันแก๊ส



ภาพที่ 2.3 แสดงแผนภาพ P-v



ภาพที่ 2.4 แสดงแผนภาพ T-s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการพิจารณา specific work และความร้อนต่อ 1 kg สารทำงาน ในแต่ละอุปกรณ์จะได้จากจุดที่ 1-2 เป็นกระบวนการอัดตัวแบบอเดียเบติก จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์จะได้

จากจุดที่ 1-2 เป็นกระบวนการอัดตัวแบบอเดียเบติก จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์จะได้

$$W_{12} = -h_2 - h_1 = -c_p (T_2 - T_1) \quad (2.1)$$

จากจุดที่ 2-3 เป็นกระบวนการให้ความร้อนในแบบความดันคงที่ จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์จะได้

$$Q_{23} = h_3 - h_2 = c_p (T_3 - T_2) \quad (2.2)$$

จากจุดที่ 3-4 เป็นกระบวนการขยายตัวแบบอเดียเบติก จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์จะได้

$$W_{34} = h_3 - h_4 = c_p (T_3 - T_4) \quad (2.3)$$

จากจุดที่ 4-1 เป็นกระบวนการคายความร้อนในแบบความดันคงที่ จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์จะได้

$$Q_{41} = -h_4 - h_1 = -c_p (T_4 - T_1) \quad (2.4)$$

เมื่อ Q และ W เป็นความร้อนและงานที่ถ่ายเทจากระบบต่อหนึ่งหน่วยมวล ทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักร (Thermal efficiency,) คือ

$$\begin{aligned} \eta_t &= \frac{W_{net}}{Q_{in}} \\ &= \frac{W_{34} - W_{12}}{Q_{23}} = \frac{C_p (T_3 - T_4) - C_p (T_2 - T_1)}{C_p (T_3 - T_2)} \end{aligned} \quad (2.5)$$

### 2.1.1.3 วัฏจักรที่แท้จริง (Actual cycle)

ข้อแตกต่างของการทำงานของวัฏจักรที่แท้จริงของเครื่องยนต์กังหันแก๊สจะไม่เป็นไปตามวัฏจักรในอุดมคติ ทั้งนี้เป็นเพราะว่าในวัฏจักรที่เกิดขึ้นจริงนั้น จะมีตัวแปรหลายอย่างที่ทำให้วัฏจักรไม่เป็นไปตามทฤษฎี ดังนั้นในการคำนวณหาค่าต่าง ๆ ของวัฏจักรจึงต้องคำนึงถึงข้อแตกต่างเหล่านั้น ดังนี้

1) เนื่องจากการไหลของมวลในอุปกรณ์มีความเร็วสูง มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ระหว่างทางเข้าและทางออกมาก ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องออกแบบเครื่องมือวัดความดันและอุณหภูมิที่สแตกเนชัน (Stagnation) ซึ่งเป็นการพิจารณาพลังงานที่เกิดขึ้นทั้งหมด

เอกลักษณะเป็นเอกลักษณ์ของวิศวกรรมการบินเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) กระบวนการที่เกิดขึ้นในขณะมีการอัดตัวในคอมเพรสเซอร์และการขยายตัวในเทอร์ไบน์เป็นกระบวนการอะเดียเบติกแบบย้อนกลับไม่ได้ (Irreversible adiabatic) จึงเป็นการเพิ่มขึ้นของเอนโทรปี (Entropy)

3) จากความผิดจึงทำให้มีการสูญเสียความดันในห้องเผาไหม้ ตลอดจนในท่อทางเข้าและทางออกของห้องเผาไหม้

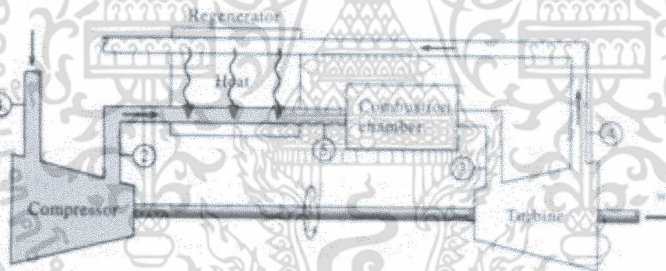
4) จำเป็นต้องมีการป้อนงานให้กับคอมเพรสเซอร์มากกว่าทางทฤษฎี เนื่องจากการสูญเสียพลังงานที่แท้จริง การต้านของแรงลมและการสูญเสียในระบบการส่งกำลังระหว่างคอมเพรสเซอร์

5) ค่าของ  $C_p$  และ  $\gamma$  ของสารตัวกลาง ขณะทำงานตลอดวัฏจักรเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ และตามองค์ประกอบทางเคมีของสารของไหล

6) การเผาไหม้ไม่มีความสมบูรณ์ ดังนั้นประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ไม่ถึง 100% จึงมีผลต่อการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น

7) มวลของแก๊สที่ไหลออกจากห้องเผาไหม้มีมากกว่ามวลของอากาศที่ออกจากคอมเพรสเซอร์ เนื่องจากมวลของเชื้อเพลิงที่ผสมเข้าไป ในทางปฏิบัติมวลจะมีเพิ่มขึ้นประมาณ 1-2% เนื่องจากมีค่าเล็กน้อยจึงเป็นการสมมุติว่า มวลไหลผ่านคอมเพรสเซอร์และเทอร์ไบน์เท่ากัน

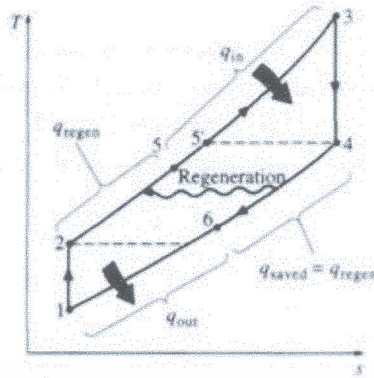
#### 2.1.1.4 วัฏจักรเครื่องยนต์กังหันแก๊สเมื่อเพิ่ม Heat Recovery



ภาพที่ 2.5 แสดงเครื่องยนต์กังหันแก๊สที่มีการเพิ่มอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ในเครื่องยนต์กังหันแก๊ส อุณหภูมิของอากาศที่ระบายออกจากกังหันมักจะสูงกว่าอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากเครื่องอัดอากาศค่อนข้างมาก ดังนั้น อากาศที่มีความดันสูงที่ออกจากเครื่องอัดสามารถถูกทำให้ร้อนขึ้นโดยการถ่ายโอนความร้อนจากแก๊สร้อนที่ระบายออกจากกังหันได้ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้ถูกเรียกว่า รีเจนเนอเรเตอร์ (regenerator) หรือ รีคิวเพอเรเตอร์ (recuperator) ภาพของเครื่องยนต์กังหันแก๊สที่ใช้รีเจนเนอเรเตอร์ และแผนภาพ T-s ของวัฏจักรนี้ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.6 แผนภาพ T-s ของวัฏจักร Brayton ที่ประกอบด้วยรีเจนเนอเรชัน

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักร Brayton เพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของรีเจนเนอเรชัน เพราะว่าพลังงานบางส่วนของแก๊สที่ระบายออกจากกังหัน ซึ่งโดยปกติจะถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมนั้นถูกนำไปใช้ในการให้ความร้อนขั้นต้นกับอากาศก่อนที่จะป้อนเข้าห้องเผาไหม้ ทำให้สามารถลดปริมาณความร้อน (ประหยัดเชื้อเพลิง) ที่ต้องป้อนเข้าไปเพื่อให้ได้งานสุทธิในปริมาณที่เท่ากัน แต่อย่างไรก็ตาม การใช้รีเจนเนอเรเตอร์ถูกแนะนำให้ใช้ในกรณีที่อุณหภูมิของแก๊สที่ระบายออกจากกังหันสูงกว่าอุณหภูมิของแก๊สที่ไหลเข้าเครื่องอัดมากๆเท่านั้น มิฉะนั้นแล้วความร้อนที่จะถ่ายโอนในทิศทางย้อนกลับได้ (ถ่ายโอนไปยังแก๊สที่ระบายออกจากกังหัน) ทำให้ประสิทธิภาพลดลง

อุณหภูมิสูงสุดภายในรีเจนเนอเรเตอร์ คือ อุณหภูมิ  $T_4$  ซึ่งเป็นอุณหภูมิของแก๊สที่ระบายออกจากกังหันและไหลเข้ารีเจนเนอเรเตอร์ โดยปกติอากาศจะไหลออกจากรีเจนเนอเรเตอร์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $T_4$  คือ  $T_5$  ในกรณีอุดมคติ อุณหภูมิของอากาศจะไหลออกจากรีเจนเนอเรเตอร์ ( $T_5$ ) จะเท่ากับ  $T_4$  สมมติว่ารีเจนเนอเรเตอร์จะถูกหุ้มด้วยฉนวนอย่างดี และการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์น้อยมาก การถ่ายโอนความร้อนจริงและสูงสุดจากแก๊สที่ระบายออกจากกังหันไปยังอากาศสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$q_{\text{regen,act}} = h_5 - h_2 \quad (2.6)$$

และ

$$q_{\text{regen,max}} = h_5 - h_2 = h_4 - h_2 \quad (2.7)$$

## 2.1.2 ทฤษฎีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน[4]

### 2.1.2.1 ประเภทของการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นเนื่องจากผลของความแตกต่างของอุณหภูมิโดยจะเกิดการถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งการถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งออกได้ 3 รูปแบบคือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) การนำความร้อน

การนำความร้อนเป็นรูปแบบหนึ่งของการถ่ายเทความร้อน ในลักษณะของการแลกเปลี่ยนพลังงานจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในตัวกลางเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิหรือการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างตัวกลางที่ติดกันเมื่อมีความแตกต่างกันของอุณหภูมิ โดยการนำความร้อนจะเคลื่อนที่ได้ดีที่สุดในตัวกลางที่เป็นของแข็ง ซึ่งความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลของเนื้อตัวกลางที่อยู่หนึ่ง โดยอาจจะมีการเคลื่อนที่ของเหลว และ ก๊าซแต่มีจะแยกออกจากการถ่ายเทความร้อนโดยการพาไม่ได้ หลักการคำนวณเกี่ยวกับการนำความร้อนที่ถูกเสนอขึ้นโดย โจเซฟ ฟูริเยร์ (Joseph Fourier) ในปี ค.ศ. 1822 โดยอาศัยข้อมูลจากการทดลองจากกฎสหสัมพันธ์ของการนำความร้อนโดยถือเกณฑ์การสังเกตจากการทดลองของ บีโธต์ (Biot) กฎนี้กล่าวว่า อัตราการไหลของการนำความร้อนในทิศทางที่กำหนดเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อนและเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในทิศทางนั้นและได้เสนอสมการที่ใช้สำหรับคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำไว้ดังนี้

$$Q_x = -kA \frac{dT}{dx} \tag{2.8}$$

หรือ

$$q_x = -k \frac{dT}{dx}$$

เมื่อ

- $Q_x$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำผ่านพื้นที่หน้าตัด , W
- $q_x$  คือ ค่าฟลักซ์ความร้อน ,  $W/m^2$
- $k$  คือ ค่าการนำความร้อนของวัตถุ (Thermal Conductivity) ,  $W/m K$
- $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน
- $\frac{dT}{dx}$  คือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อระยะทาง

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าการนำความร้อน (ที่อุณหภูมิ 300 K)

วัสดุ	ค่าสภาพการนำความร้อน (W/m °C)
เงิน	429
ทองแดงบริสุทธิ์	401
ทอง	317
อลูมิเนียม	237
เหล็ก	80.2
ปรอท	8.54
แก้ว	1.4
อิฐ	0.72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าการนำความร้อน (ที่อุณหภูมิ 300 K) (ต่อ)

วัสดุ	ค่าสภาพการนำความร้อน (W/m °C)
น้ำ	0.613
ผิวหนังของคน	0.37
สารทำความเย็น R-12	0.072
อากาศ	0.026
สแตนเลส	16.3

ค่าสภาพการนำความร้อนเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของวัสดุที่ได้จากการวัด และทดสอบโดยทั่วไปสภาพการนำความร้อนจะแปรผันตามอุณหภูมิซึ่งจากการวิเคราะห์การแลกเปลี่ยนพลังงานจลน์จะพบว่าค่าสภาพการนำความร้อนของแก๊สจะแปรผันตามกำลังสองของอุณหภูมิและค่าสภาพการนำความร้อนของเหลวต่างๆ ยกเว้นน้ำจะแปรผันตามอุณหภูมิสมบูรณ์ สำหรับการใช้งานจริงที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก จะใช้ค่าสภาพการนำความร้อนคงที่ ซึ่งหาที่อุณหภูมิเฉลี่ย โดยค่า  $k$  ของสารทั่วไป ดังแสดงในตารางที่ 2.1

## 2) การพาความร้อน ( Convection )

การพาความร้อนคือการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลจะเป็นตัวพาความร้อนมาให้ หรือพาความร้อนจากผิวของแข็ง สำหรับกลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพานี้จะเกิดจากผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงาน และการเคลื่อนที่ของของไหล การพาความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทคือ การพาความร้อนโดยธรรมชาติ (free or natural convection) ซึ่งมีผลมาจากความแตกต่างของความหนาแน่นที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิกานในของของไหล และการพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยของไหลจะถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของแข็งโดยกลไกจากภายนอกเช่น พัดลม เครื่องสูบน้ำ เป็นต้น

สำหรับการพาความร้อนสมการที่ใช้สำหรับคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อน โดยใช้สมการที่ได้มาจากกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's Law of cooling) คือ

$$Q_{\text{conv}} = hA(T_s - T_f) \quad (2.9)$$

หรือ

$$q_{\text{conv}} = h(T_s - T_f)$$

โดย  $T_s > T_f$

เมื่อ  $Q_{\text{conv}}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาผ่านพื้นที่หน้าตัด , W

$q_{\text{conv}}$  คือ ฟลักซ์ความร้อนโดยการพา ,  $\frac{W}{m^2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $h$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ,  $\frac{W^2}{m \cdot K}$   
 $T_s$  คือ อุณหภูมิของผิวของแข็ง , K  
 $T_f$  คือ อุณหภูมิของของไหล , K

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การนำพาความร้อน ( $h$ ) จะมีค่าแปรเปลี่ยนตามชนิดของการไหล สามารถหาค่าได้จากการทดลอง ซึ่งได้มีการเก็บข้อมูลของของไหลบางชนิด และบางประเภทของการพาความร้อน ไว้ดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย

ประเภทของการพาความร้อนและชนิดของไหล	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน $W / m^2 \cdot ^\circ C$
การพาความร้อนแบบอิสระของอากาศ	5-25
การพาความร้อนแบบอิสระของน้ำ	20-100
การพาความร้อนแบบบังคับของอากาศ	10-200
การพาความร้อนแบบบังคับของน้ำ	50-10,000
น้ำในระหว่างการระเหย	3,000-100,000
น้ำในระหว่างการควบแน่น	5,000-100,000

### 3) การแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีความร้อนคือการส่งออกของรังสีที่เชื่อว่าเป็นการเปลี่ยนการจัดเรียงอิเล็กตรอน ขององค์ประกอบอะตอมหรือโมเลกุลโดยพลังงานของการแผ่รังสีนั้นจะถูกนำออกไปด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) หรือ โฟตอน ในความเป็นจริงการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีนี้จะเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดในสภาพสุญญากาศซึ่งไม่จำเป็นต้องการตัวกลาง แต่ในขณะที่การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนหรือการพาความร้อนนั้นจะต้องการตัวกลาง พลังค์สูงสุดของการแผ่รังสีออกจากผิวตัวกลาง คำนวณจากกฎของสเตฟาน – โบลต์ซมันน์ (Stefan-Boltzmann) ดังนี้

$$q_{\text{rad}} = \sigma T_s^4 \quad (2.10)$$

- เมื่อ  $q_{\text{rad}}$  คือ พลังค์สูงสุดของการแผ่รังสีความร้อน ,  $W / m^2$   
 $\sigma$  คือ ค่าคงที่ของสเตฟาน – โบลต์ซมันน์ =  $5.67 \times 10^{-8}$  ,  $W/m^2 K^4$   
 $T_s$  คือ อุณหภูมิที่ผิวแผ่รังสี , K

สมการนี้ใช้กับกรณีของตัวแผ่รังสีในอุดมคติ (Ideal Radiator) หรือ วัตถุดำ (Black Body) สำหรับกรณีของพื้นผิวจริง (Real Surface) พลังค์แผ่รังสีความร้อนจะน้อยกว่ากรณีของวัตถุดำ ทั้งนี้ขึ้นกับสภาพเปล่งรังสี (Emissivity) ของพื้นผิวนั้น พลังค์แผ่รังสีบนพื้นผิวจริงคำนวณจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (2.11)$$

เมื่อ  $\varepsilon$  คือสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (Emissivity)

### 2.1.2.2 การสูญเสียภายในท่อ

การสูญเสียภายในท่อสามารถแบ่งออกได้เป็นสองแบบ คือการสูญเสียหลัก (Major loss) และ การสูญเสียรอง (Minor loss)

#### 1) การสูญเสียหลัก

การสูญเสียหลักเกิดขึ้นจากแรงเสียดทานในท่ออันเนื่องมาจากขนาดของท่อ ความยาวของท่อ และความเร็วในการไหลภายในท่อของของไหล

$$\Delta P = \frac{f L \rho V^2}{2D_h} \quad (2.12)$$

โดย  $\Delta P$  คือ ความดันตกคร่อมภายในท่อ, Pa

$f$  คือ Friction Factor

$L$  คือ ความยาวของท่อ, m

$V$  คือ ความเร็วของไหลเฉลี่ย, m/s

ค่า  $f$  ที่คำนวณได้จากสมการต่างๆ อาจจะนำมาใช้งานจริงได้แต่ไม่สะดวกนัก จึงมักหาค่า  $f$  จากแผนภูมิที่เรียกว่า Moody Chart ซึ่ง Moody ได้พลอตค่าข้อมูลที่ดีที่สุดลงในสมการ โดยการใช้ Moody Chart จะต้องทราบค่าความขรุขระสัมบูรณ์ของท่อแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าความขรุขระสัมบูรณ์

ประเภทของท่อ	ค่าความขรุขระสัมบูรณ์
ท่อที่รีดขึ้นรูป ท่อทองเหลือง ท่อดีบุก ท่อที่เคลือบปิทมินัส	0.0015
ท่อซีเมนต์หล่อด้วยการเหวี่ยงหินปูน	0.0015
ท่อเหล็กเหนียว	0.046
ท่อเหล็กหล่อที่ขึ้นรูปโดยการเชื่อม	0.0046
ท่อเหล็กหล่อเคลือบยางมะตอย	0.12
ท่อชุบสังกะสี	0.15
ท่อเหล็กหล่อทั่วไป	0.25
ท่อไม้	0.18-0.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าความขรุขระสัมบูรณ์ (ต่อ)

วัสดุ	ค่าสภาพการนำความร้อน (W/m °C)
ท่อคอนกรีต	0.3-3
ท่อเหล็กที่ใช้หมุดยึด	0.9-9

## 2) การสูญเสียแรง

การสูญเสียแรงจะเกิดจากการไหลผ่านท่อที่เปลี่ยนแปลงขนาดกะทันหัน หรือ การไหลผ่านอุปกรณ์ต่างๆเช่น ข้อต่อ ข้องอ เป็นต้น ซึ่งสามารถแสดงได้เป็นสมการดังนี้

$$h_m = \frac{KV^2}{2g} \quad (2.13)$$

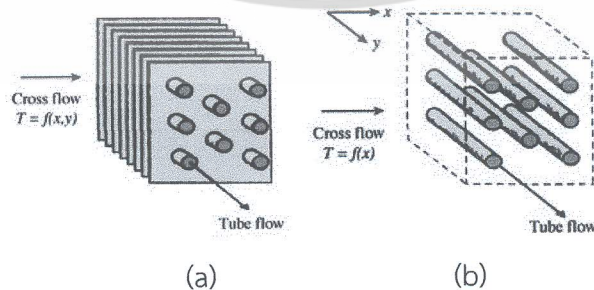
เมื่อ  $h_m$  คือ การสูญเสียแรง, m  
 $V$  คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหลภายในท่อ, m/s  
 $g$  คือ อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, m/s<sup>2</sup>  
 $K$  คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสีย

## 2.1.2.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนธรรมดาอาจแบ่งได้เป็น 2 แบบ โดยขึ้นอยู่กับการจัดวางทิศทางสัมพันธ์ของทิศทางการไหลของกระแสของไหล 2 ชนิด

1) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตัดกันหรือตั้งฉากกัน (cross-flow heat exchanger)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ cross - flow เป็นเครื่องที่กระแสของไหล 2 ชนิดมีทิศทางการทำมุมซึ่งกันและกัน เครื่องแบบนี้ใช้บ่อยมากในเครื่องบินหรือยานอวกาศ



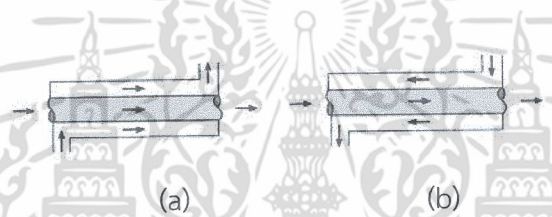
ภาพที่ 2.7 แสดงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ cross-flow a) unmixed b) mixed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.7 แสดงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ cross-flow ซึ่งอาจติดครีบก็ได้ การวิเคราะห์เครื่องนี้ยุ่งยากมาก เพราะกว่าอุณหภูมิของไหลแปรเปลี่ยนทั้งสองทิศทางการไหล และทิศทางตั้งฉากกับการไหลถ้าของไหลไม่มีการผสมกันในทิศทางตั้งฉากเครื่องแลกเปลี่ยนนี้ยังแยกได้เป็น 2 กรณี คือ การที่ของไหลแต่ละชนิดมีช่องทางที่แน่นอน ไม่มีการผสมกันระหว่างช่องเรียกว่า unmixed และในกรณีที่ของไหลชนิดใดชนิดหนึ่ง ไม่มีช่องว่างการไหลที่แน่นอนสามารถผสมกันได้เรียกของไหลแบบนี้ว่า mixed

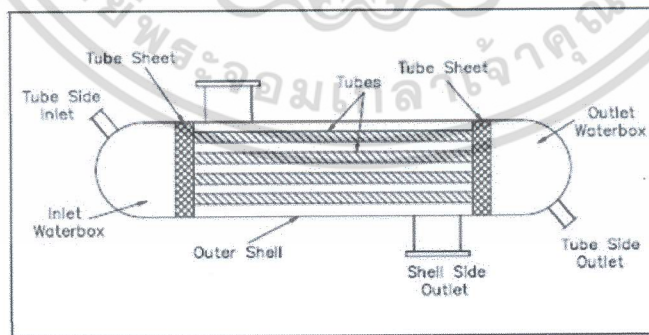
2) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (shell and tube) ท่อซ้อนกัน (concentric pipe)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ประกอบด้วยเครื่องที่ซึ่งกระแสการไหล 2 ชนิด เคลื่อนที่ผ่านทางผนังท่อชั้นในถ้าของไหลสองชนิดไหลไปในทางเดียวกันเรียกว่า Parallel flow แล้วถ้าของไหลสวนทางกันเรียกว่า counter flow เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้จำกัดปริมาณเนื้อที่หรือพื้นที่ผิวสำหรับการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลสองชนิด พื้นที่ถ่ายเทความร้อนออกทำให้มากขึ้นได้โดยการเพิ่มจำนวนท่อภายใน (tubes) เท่าที่ทำได้ในเปลือกใหญ่ (shell)



ภาพที่ 2.8 แสดงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนท่อซ้อนกัน (a) Parallel flow (b) Counter flow

รูปแบบที่นิยมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ shell-and-tube ประกอบด้วยจำนวนชั้นของท่อเล็กๆ (tube) ซึ่งตรึงไว้อย่างหนาแน่นที่ปลายทั้งสองข้างในแผ่นท่อซึ่งเป็นแผ่นรูเจาะขนาดใหญ่เพื่อยึดท่อไว้โดยเชื่อมชั้นท่อเล็กๆทั้งหมดไว้ภายในเปลือกท่อใหญ่ที่ปิดมิดชิด เพื่อขึ้นรูปเป็น 2 ช่องใหญ่สำหรับของไหลร้อนและของไหลเย็น



ภาพที่ 2.9 แสดงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิด shell and tube

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน shell-and-tube อาจมีรูปแบบที่สลับซับซ้อน ขึ้นก็ได้ขึ้นอยู่กับข้อจำกัดของช่องว่างภายในสำหรับ จัดรูปทรงต่างๆ นอกเหนือจากที่กล่าวมาเช่นเป็นแบบ one shell pass และ two shell pass และแบบ two shell pass , four tube pass ก็ได้ซึ่งใช้กันมากในคอนเดนเซอร์ ของไอน้ำเพื่อเพิ่มพื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ทฤษฎีพลศาสตร์ของไหล[5]

สมการควบคุมการไหลของของไหลแบบนิวโทเนียนอัดตัวได้

มวล 
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{u}) = 0 \tag{2.14}$$

โมเมนตัม x 
$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } u) + S_{Mx} \tag{2.15}$$

โมเมนตัม y 
$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } v) + S_{My} \tag{2.16}$$

โมเมนตัม z 
$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } w) + S_{Mz} \tag{2.17}$$

สเกลลาร์ 
$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \text{div}(\rho i \bar{u}) = -p \text{div } \bar{u} + \text{div}(k \text{grad } T) + \Phi + S_i \tag{2.18}$$

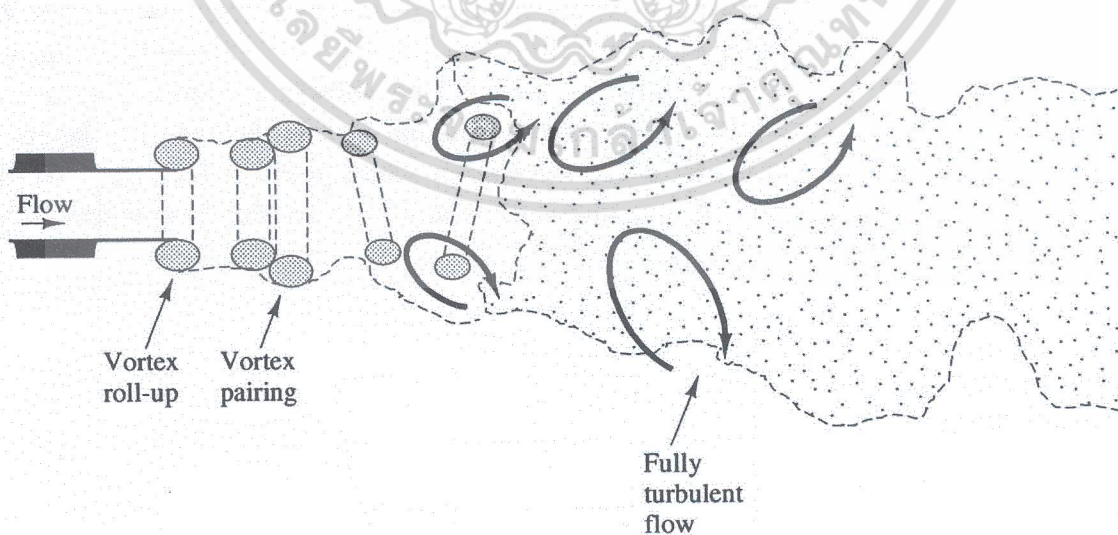
สมการสถานะ 
$$p = p(\rho, T) \text{ and } i = i(\rho, T) \tag{2.19}$$
  

$$p = \rho RT \text{ and } i = C_v T$$

2.1.4 ทฤษฎีการไหลแบบปั่นป่วน

2.1.4.1 อิทธิพลของความปั่นป่วนในสมการนาเวียร์-สโตกส์

ความแตกต่างระหว่างการไหลแบบราบเรียบกับการไหลแบบปั่นป่วนก็คือ ที่การไหลปั่นป่วนนั้นจะเกิดการหมุนวนขึ้นโดยมีขนาดที่แตกต่างกัน ในทางปฏิบัตินั้นเรามักจะสนใจค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติต่างๆของของไหล เช่น ค่าความเร็วเฉลี่ย ความดันเฉลี่ย ความเค้นเฉลี่ย เป็นต้น



ภาพที่ 2.10 กระบวนการเปลี่ยนผ่านของลำการไหลไปสู่ความปั่นป่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปเมื่อลำการไหลพุ่งออกจากท่อ มันจะสร้างวงแหวนการหมุนวนขึ้นรอบๆ ลำการไหล จากนั้นก็จะเกิดปรากฏการณ์การขยายขนาดการหมุนวน โดยเกิดวงแหวนเป็นคู่อยู่ชิดกันโดยมีความแรงมากขึ้น เมื่อสังเกตต่อไปจะพบว่าเกิดการเสียรูปของวงแหวนดังกล่าวและลักษณะของวงแหวนนั้นจะสังเกตเห็นได้ยากขึ้น กล่าวคือการไหลวนจะแตกออกและเกิดการหมุนวนเล็กๆ ขึ้นมากมายซึ่งได้วิวัฒนาการเป็นความปั่นป่วนในที่สุด

ในสมการถ่ายโอนของโมเมนตัม พจน์ที่แสดงอิทธิพลของความปั่นป่วนนี้ ถูกเขียนอยู่ในรูปการคูณกันของความเร็วผันแปร ซึ่งมีความหมายเป็นการเคลื่อนย้ายหรือถ่ายโอนโมเมนตัมอันเนื่องมาจากความเร็วผันแปรนั้น โดยทั่วไปเราจะจัดกลุ่มพจน์นี้ไว้ด้านขวาของสมการ เพื่อที่จะสะท้อนให้เห็นถึงบทบาทของพจน์นี้ว่าเป็นความเค้นอันเนื่องมาจากความปั่นป่วน

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \text{div}(UU) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \text{div grad } U + \left[ -\frac{\overline{\partial u'^2}}{\partial x} - \frac{\overline{\partial u'v'}}{\partial y} - \frac{\overline{\partial u'w'}}{\partial z} \right] \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \text{div}(VU) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \text{div grad } V + \left[ -\frac{\overline{\partial u'v'}}{\partial x} - \frac{\overline{\partial v'^2}}{\partial y} - \frac{\overline{\partial v'w'}}{\partial z} \right] \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \text{div}(WU) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \text{div grad } W + \left[ -\frac{\overline{\partial u'w'}}{\partial x} - \frac{\overline{\partial v'w'}}{\partial y} - \frac{\overline{\partial w'^2}}{\partial z} \right] \quad (2.22)$$

ทำการกระจายเทอมเหล่านี้ให้เห็นเพื่อให้ชัดเจน ซึ่งประกอบด้วยความเค้นตั้งฉาก 3 เทอมและเทอมของความเค้นเฉือน 3 เทอม

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= -\rho \overline{u'^2} & \tau_{yy} &= -\rho \overline{v'^2} & \tau_{zz} &= -\rho \overline{w'^2} \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} &= -\rho \overline{u'v'} & \tau_{xz} = \tau_{zx} &= -\rho \overline{u'w'} & \tau_{zy} = \tau_{yz} &= -\rho \overline{v'w'} \end{aligned} \quad (2.23)$$

เทอมของความเค้นอันเนื่องมาจากความปั่นป่วนเราเรียกว่า Reynolds stress การไหลแบบปั่นป่วนนั้น ค่าของความเค้นตั้งฉากคือ  $-\rho \overline{u'^2}$ ,  $-\rho \overline{v'^2}$  และ  $-\rho \overline{w'^2}$  จะไม่เป็นศูนย์ เนื่องจากมันเป็นค่ายกกำลังสองของความผันแปร ค่าของความเค้นเฉือน  $-\rho \overline{u'v'}$ ,  $-\rho \overline{u'w'}$  และ  $-\rho \overline{v'w'}$  จะเกี่ยวข้องกับสหสัมพันธ์ของค่าความผันแปรขององค์ประกอบความเร็วที่ต่างทิศทางกันนั้น เช่น ถ้าหากความผันแปร  $u'$  กับ  $v'$  ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างสิ้นเชิงแล้ว ย่อมหมายความว่าค่าของผลคูณ  $u'v'$  จะเท่ากับศูนย์ โดยทั่วไปนั้นค่าความเค้นอันเนื่องมาจากความปั่นป่วนนี้จะมีค่าสูงกว่าความเค้นเนื่องจากความหนืดของของไหลอย่างมาก

เมื่อพิจารณาสมการการเคลื่อนย้ายปริมาณสเกลลาร์  $\Phi$  ใดๆ ของของไหลภายใต้การไหลแบบปั่นป่วน เราจะสามารถแปลงสมการได้ด้วยวิธีที่คล้ายกับการแปลงสมการโมเมนตัม ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \text{div}(\Phi U) = \text{div}(\Gamma_{\Phi}^* \text{grad } \Phi) + \left[ -\frac{\overline{\partial u'\Phi'}}{\partial x} - \frac{\overline{\partial v'\Phi'}}{\partial y} - \frac{\overline{\partial w'\Phi'}}{\partial z} \right] + S_{\Phi} \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางวิศวกรรมเรามักจะให้ความสนใจกับค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติต่างๆ ของการไหลและของไหล อย่างไรก็ตาม เราจะพบว่าเกิดตัวแปรซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่เรียกว่า Reynolds Stress ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 6 เทอม ในขณะที่ ในสมการการเคลื่อนย้ายปริมาณสเกลลาร์เฉลี่ย ก็จะเกิดตัวแปรขึ้นอีก 3 เทอมในแต่ละปริมาณสเกลลาร์ที่เกิดขึ้น นั่นคือ  $\overline{u'\varphi}$ ,  $\overline{v'\varphi}$  และ  $\overline{w'\varphi}$  และด้วยความซับซ้อนของความปั่นป่วนเราจะไม่พบสมการอย่างง่ายที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว ดังนั้นเนื้อหาหลักในการสร้างแบบจำลองความปั่นป่วนจึงเกี่ยวข้องกับ การพัฒนากระบวนการวิธีในการคำนวณเพื่อให้มีความถูกต้องในระดับที่เพียงพอและมีความครอบคลุม ปัญหาความปั่นป่วนโดยทั่วไปได้

#### 2.1.4.2 แบบจำลองของความปั่นป่วน

แบบจำลองความปั่นป่วนนั้นเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่มาใช้เติมเต็มระบบสมการที่ใช้อธิบายการไหล เพื่อให้จำนวนสมการเท่ากับจำนวนตัวแปร ในงานทางวิศวกรรมนั้นเรามักจะไม่ให้ความสนใจรายละเอียดของความปั่นป่วน แต่จะให้ความสนใจกับผลของมันต่อกระแสการไหลหลัก หมายความว่าเราต้องการสมการของค่า Reynolds Stress ที่ปรากฏในสมการ และผลของการเคลื่อนย้ายปริมาณสเกลลาร์ที่เกิดอันเนื่องมาจากความปั่นป่วนนั้น แบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้นควรจะต้องใช้ได้ ในลักษณะของการไหลที่หลากหลาย มีความแม่นยำ ง่ายต่อการใช้และประหยัดทรัพยากรที่ใช้ในการคำนวณ แบบจำลองที่พบโดยทั่วไป สามารถจัดกลุ่มได้เบื้องต้นตามที่ให้ไว้ข้างล่างนี้

##### 1. แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน

แบบจำลองลักษณะทั่วไป อยู่บนพื้นฐานของสมการเรย์โนลด์เฉลี่ย

- Zero equation model- Mixing length model
- two-equation model k- $\epsilon$  model
- Reynolds stress equation model
- Algebraic stress model
- Non-linear k- $\epsilon$  model
- Large Eddy Simulation อยู่บนพื้นฐานของสมการที่มีการตัดกรองขนาดของการหมุนวน

แบบจำลองในลักษณะทั่วไปนั้นจะมีอยู่ในโปรแกรมเชิงพาณิชย์ ในขณะที่ Large Eddy Simulation เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่ขึ้นกับเวลา โดยที่กระแสการไหลหลักและการหมุนวนจะถูกคำนวณโดยตรง ในขณะที่การหมุนวนขนาดเล็กจะถูกแทนด้วยฟังก์ชันที่กำหนดขึ้น วิธีนี้จะใช้ทรัพยากรในการคำนวณมาก ผู้ที่สนใจในรายละเอียดสามารถหาอ่านได้จาก Abbott and Basco (1989)

Mixing length model และ k- $\epsilon$  model นั้นเป็นแบบจำลองที่ได้รับการตรวจสอบอย่างมากระหว่างการไหลลักษณะต่างๆ แบบจะลองถูกพัฒนาขึ้นโดยมีสมมติฐานว่าบทบาทของ Reynolds stress ที่มีต่อการถ่ายโอนโมเมนตัมในการไหลเฉลี่ยนั้นจะคล้ายกับความเค้นอันเนื่องมาจากความหนืด ซึ่งเทอมทั้งสองนี้ล้วนปรากฏอยู่ที่ด้านขวาของสมการโมเมนตัม ในกรณีของการไหลเป็นแบบนิวโทเนียนจะได้ว่า

$$\tau_{ij} = \mu e_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อที่จะให้กระจายในการกำหนดทิศทาง เรากำหนด 1, 2, 3 ในแต่ละค่าของ  $i, j$  ซึ่งชี้ทิศทางตามแนวแกน  $x, y$  และ  $z$  ตามลำดับดังนี้

$$\tau_{12} = \tau_{xy} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2.26)$$

ในการทดลองนั้นจะพบว่าความปั่นป่วนมีการสลายตัวไปหากไม่มีแรงเฉือน และพบว่าค่าของ Reynolds stress จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเฉือนของการไหลเพิ่มขึ้น Boussinesq, 1877 ได้เสนอไว้ว่า ปฏิกิริยาการดังกล่าวน่าจะมีความเชื่อมโยงกันด้วยสัมประสิทธิ์ค่าหนึ่ง ดังนี้

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.27)$$

โดย  $\mu_t$  เรียกว่า eddy viscosity นอกจากนี้การเคลื่อนย้ายปริมาณสเกลลาร์อันเนื่องมาจากความปั่นป่วนก็สามารถอธิบายได้ในลักษณะที่คล้ายคลึงกันคือ

$$-\rho \overline{u'_i \phi'} = \Gamma_t \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right) \quad (2.28)$$

โดยที่  $\Gamma_t$  คือค่าของสัมประสิทธิ์การแพร่ของความปั่นป่วนนั่นเอง

และโดยที่การเคลื่อนย้ายมวล ความร้อน และโมเมนตัม ล้วนแต่เกิดขึ้นจากกลไกเดียวกันคือการหมุนวนปั่นป่วน เราจึงคาดเดาได้ว่าค่าของสัมประสิทธิ์การแพร่แบบปั่นป่วนนี้จะมีค่าใกล้เคียงกับ ค่าความหนืดปั่นป่วน เราทำการกำหนดค่า Prandtl/Schmidt number ซึ่งกำหนดดังนี้

$$\sigma_t = \frac{\mu_t}{\Gamma_t} \quad (2.29)$$

ซึ่งในการทดลองพื้นฐานจะพบว่ามีค่าใกล้เคียง 1

## 2. แบบจำลอง k-ε

เราสามารถสร้างสมการการเคลื่อนย้ายของคุณสมบัติทางด้านความปั่นป่วนได้แม้กระทั่ง อัตราการสลายของพลังงานจลน์ปั่นป่วน,  $\epsilon$  (Bradshaw et. al., 1981) หากแต่ว่าสมการการเคลื่อนย้าย ของ  $\epsilon$  นี้จะขึ้นอยู่กับตัวแปรไม่ทราบค่าจำนวนมาก และไม่สามารถวัดค่าได้ แบบจำลอง k-ε แบบมาตรฐาน (Laudar and Spalding, 1974) จะมีแบบจำลองการเคลื่อนย้ายของพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ k และ  $\epsilon$  ซึ่งพัฒนา มาจากพื้นฐานความรู้ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการที่ทำให้เกิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์เหล่านี้มันเอง เราใช้ค่า  $k$  และ  $\epsilon$  คำนวณหา ค่าตัวบ่งชี้เชิงความเร็ว และตัวบ่งชี้เชิงขนาดของ Turbulent eddies ได้ ดังนี้

$$\mathcal{G} = k^{1/2}, \ell = \frac{k^{3/2}}{\epsilon} \tag{2.30}$$

อาจมีข้อสงสัยว่าเราสามารถใช้อัตราการสลายของพลังงานในระดับการหมุนวนที่เล็กที่สุดนี้มาใช้ในการหาค่าตัวบ่งชี้เชิงขนาดของการไหลขนาดใหญ่ได้อย่างไร ซึ่งในการไหลที่มีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่สูงนั้น อัตราการสลายของพลังงานจากกระแสน้ำวนขนาดใหญ่จะเท่ากับอัตราการสลายของพลังงานจลน์ปั่นป่วน เนื่องจากการถ่ายโอนพลังงานผ่านชั้นของการหมุนวนระดับรองลงมาสู่การหมุนวนในระดับเล็กที่สุดนั่นเอง เมื่อใช้หลักการของการสร้างเทอมของ Turbulent viscosity จาก Mixing Length model มาพิจารณา เราจะได้

$$\mu_t = C_p \mathcal{G} \ell = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \tag{2.31}$$

โดยที่ ค่า  $C_\mu$  เป็นค่าตัวแปรไร้มิติซึ่งเป็นค่าคงที่ สำหรับแบบจำลอง k- $\epsilon$  มาตรฐาน จะใช้สมการการถ่ายโอนต่อไปนี้สำหรับ  $k$  และ  $\epsilon$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad} k \right] + 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \epsilon \tag{2.32}$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \epsilon \mathbf{U}) = \text{div} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \text{grad} \epsilon \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \tag{2.33}$$

ในสมการจะมีค่าคงที่อยู่ที่ทั้งสิ้น 5 ตัว ซึ่งสามารถปรับค่าเพื่อให้ใช้ได้กับลักษณะการไหลที่หลากหลายได้ ดังนี้  $C_\mu = 0.09$ ;  $\sigma_k = 1.00$ ;  $\sigma_\epsilon = 1.30$   $C_{1\epsilon} = 1.44$   $C_{2\epsilon} = 1.92$

ในการหาค่า Reynolds Stress เราสามารถนำความสัมพันธ์ของ Boussinesq มาใช้ ได้ดังนี้

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} = 2\mu_t E_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \tag{2.34}$$

เมื่อทำการพิจารณาสมการนี้ จะพบว่า มีพจน์สุดท้ายที่มี ค่า  $\delta_{ij}$  ซึ่งเรียกว่า Kronecker delta ( $\delta_{ij} = 1$  เมื่อ  $i=j$  และ  $\delta_{ij} = 0$  เมื่อ  $i \neq j$ ) พจน์นี้จะทำให้ด้านขวามือของสมการแทนความหมายของ Normal Reynolds Stress นั่นคือ  $\tau_{xx} = -\overline{\rho u'^2}$ ,  $\tau_{yy} = -\overline{\rho v'^2}$ ,  $\tau_{zz} = -\overline{\rho w'^2}$  เมื่อ  $i=j$

เห็นได้ชัดว่าในการไหลไม่ว่าจะเป็นรูปแบบใด เราก็จะได้ ผลรวมของ Normal Reynolds stress  $-\rho(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$  เป็นค่าติดลบสองเท่าของค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วน จำเพาะ ซึ่งมีหน่วยเป็นพลังงานต่อปริมาตร  $(-2\rho k)$  ดังนั้นการปรับค่าให้ถูกต้องในเชิงกายภาพจึงทำการ

เอกลักษณะปรับค่าให้ตรงกันระหว่างสมการเชิงคณิตศาสตร์กับสมการเชิงกายภาพ เมื่อผู้เขียนได้เห็นว่าแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์นี้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลบค่าออกหนึ่งในสามของค่าดังกล่าวออก ซึ่งจะทำเช่นนั้นก็ต่อเมื่อ เทอมข้างต้นเป็นเทอมของ Normal Stress การไหลที่กล่าวถึงนี้เป็นกรไหล แบบ Isotropic ซึ่งเป็นสมมุติฐานที่ใช้สำหรับแบบจำลองนี้

### 3. เงื่อนไขค่าขอบ

สมการการเคลื่อนย้ายของ  $k$  และ  $\varepsilon$  เป็นสมการจำพวก elliptic เนื่องมาจากอิทธิพลของเทอมการแพร่ ซึ่งทำให้มีความจำเป็นที่ต้องกำหนดเงื่อนไขค่าขอบ ดังนี้

ตารางที่ 2.4 สมการการเคลื่อนย้ายของ  $k$  และ  $\varepsilon$

ทางเข้า	ค่าของ $k$ และ $\varepsilon$ จะต้องมามีให้
ทางออกและบริเวณแกนสามมาตร	$\partial k / \partial n = 0$ และ $\partial \varepsilon / \partial n = 0$
การไหลอิสระ	$k = 0$ และ $\varepsilon = 0$
ผนังของแข็ง	การกำหนด ขึ้นอยู่กับค่า Reynolds number.

ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปแล้วจะใช้ค่า  $k$  และ  $\varepsilon$  ของทางเข้าที่ได้จากผลงานตีพิมพ์ของนักวิจัย อาจมีการศึกษาผลกระทบของค่าเหล่านี้ต่อการไหลเพิ่มเติมเพื่อประเมินความน่าเชื่อถือของผลการจำลองที่ได้ นอกจากนี้เราสามารถประมาณการค่า  $k$  และ  $\varepsilon$  อย่างคร่าวๆได้ จากความเข้มข้นของความปั่นป่วน (Turbulence Intensity)  $T_i$  และค่าบ่งชี้เชิงขนาด  $L$  ของช่องการไหล โดยความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$k = \frac{3}{2} (U_{ref} T_i)^2; \quad \varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l}; \quad l = 0.07L \quad (2.35)$$

สูตรที่ให้นี้จะเกี่ยวเนื่องกับสูตรของ Mixing length ในหัวข้อ 3.5.1 นั้นเอง สำหรับ ค่า ของ  $k$  และ  $\varepsilon$  บริเวณใกล้ผนัง สามารถคำนวณได้โดยแยกเป็นสองกรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 เรย์โนลด์นัมเบอร์ สูงๆ ซึ่งกำหนด โดย  $30 < y_p^+ < 500$  โดยให้แกน  $y$  มีทิศทางตั้งฉากจากผนังและตำแหน่ง  $y_p$  คือตำแหน่งที่พิจารณา และ  $y_p^+$  คือ Dimensionless distance

ที่บริเวณนี้ค่าความเร็วกระจายตัวแบบลอคกาลีทิมกับระยะทาง  $y$  อัตราการก่อกำเนิดพลังงานจลน์ปั่นป่วน จะเท่ากับอัตราการสูญเสีย จะได้ว่า

$$u^+ = \frac{U}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey_p^+); \quad k = \frac{u_\tau^2}{\sqrt{C_\mu}}; \quad \varepsilon = \frac{u_\tau^3}{\kappa y} \quad (2.36)$$

โดยที่ค่าคงที่ของ Von Karman เท่ากับ 0.41 และ Wall roughness factor,  $E$  สำหรับผนังเรียบ เท่ากับ 9.8 ในกรณีของผนังขรุขระ เราสามารถหาค่าดังกล่าวได้จาก Schlichting, 1979 สำหรับการถ่ายเทความร้อนจะได้

$$T^+ \equiv -\frac{(T - T_w) C_p \rho u_\tau}{q_w} = \sigma_{T,t} \left[ u^+ + P \left( \frac{\sigma_{T,l}}{\sigma_{T,t}} \right) \right] \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

 $T_p$  = อุณหภูมิ ณ ตำแหน่ง  $y_p$  $T_w$  = อุณหภูมิที่ผนัง $q_w$  = ฟลักซ์ความร้อนที่ผนัง $C_p$  = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของไหล $\sigma_{T,t}$  = ค่า Turbulent Prandtl Number $\sigma_{T,l} = \frac{\mu C_p}{\Gamma_T}$  Laminar Prandtl number $\Gamma_T$  = ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity)

P เป็นฟังก์ชันการแก้ค่าซึ่งขึ้นกับอัตราส่วนระหว่าง Laminar Prandtl number กับ Turbulent Prandtl number

กรณีที่ 2 เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำๆ สมการการถ่ายโอน  $k$  และ  $\varepsilon$  จะมี wall-damping function มาเสริม ดังนี้ (Patel et. al., 1985)

$$\mu_t = \rho C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.38)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad } k \right] + 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (2.39)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \mathbf{U}) = \text{div} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \text{grad } \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} f_1 \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\varepsilon} f_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.40)$$

จะเห็นว่า สัมประสิทธิ์ความหนืด ไม่สามารถตัดทิ้งได้ และ Wall-damping function เป็นดังนี้ (Lam and Bremhorst, 1981)

$$f_\mu = [1 - \exp(-0.0165 Re_y)]^2 \left( 1 + \frac{20.5}{Re_t} \right); \quad f_1 = \left( 1 + \frac{0.05}{f_\mu} \right)^3; \quad (2.41)$$

$$f_2 = 1 - \exp(-Re_t^2); \quad Re_y = k^{1/2} y / \nu; \quad Re_t = \mathcal{R}l / \nu = k^2 / \varepsilon \nu$$

ถึงแม้ว่าแบบจำลอง  $k$ - $\varepsilon$  จะได้รับความนิยมอย่างมากในการนำไปใช้ แต่ก็มีข้อจำกัดอยู่ไม่น้อย ดังกล่าวไว้โดยสังเขปในตารางข้างล่างนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแบบจำลอง k-ε

ข้อดี	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. เป็นแบบจำลองที่ไม่ซับซ้อน ต้องการเพียงเงื่อนไขค่าขอบ และ/หรือ เงื่อนไขเริ่มต้น เท่านั้น</li> <li>2. ให้ผลการจำลองดีในการไหลหลายๆลักษณะที่พบเห็นในอุตสาหกรรม</li> <li>3. เป็นแบบจำลองที่ได้รับการตรวจสอบกับการไหลที่หลากหลายที่สุด</li> </ol>
ข้อเสีย	<p>ใช้ทรัพยากรมากกว่า แบบจำลอง Mixing Length model</p> <p>ให้ผลการจำลองที่ไม่ดีในลักษณะการไหลดังต่อไปนี้</p> <p>การไหลที่ไม่มีขอบเขตแน่นอนบางแบบ</p> <p>การไหลที่มีความเครียดสูงมากๆ (ชั้นขีตผิวที่มีความโค้งมากๆ การไหลเป็นเกลียว)</p> <p>การไหลแบบหมุนวน</p> <p>การไหลที่มีการพัฒนาอย่างสมบูรณ์ในท่อที่มีหน้าตัดไม่เป็นวงกลม</p>

### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการออกแบบ พัฒนา และศึกษาสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อดึงความร้อนทิ้งกลับมาใช้งานในเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงความร้อนต่ำนั้น จำเป็นต้องทำการศึกษาปัจจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งงานวิจัยที่มีผู้ทำมาก่อน เพื่อให้ทราบถึงแนวคิด สมบัติและปัจจัยต่างๆที่อาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้ดีขึ้น ซึ่งจากอดีตจนถึงปัจจุบันนี้มีนักวิจัยทั้งในและต่างประเทศได้ศึกษาในหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับเรื่องที่มีผู้วิจัยกำลังศึกษามากมาย อาทิเช่น

กิตติภัส วศินารมณ [6] ได้นำเสนอถึง กระบวนการออกแบบวิเคราะห์เชิงความร้อนของ เครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กซึ่งได้เปรียบเทียบระหว่างวัฏจักรมาตรฐาน วัฏจักร Recuperative และวัฏจักร STIG โดยที่กำหนดให้ทุกวัฏจักรมีค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์เท่ากัน ซึ่งได้แก่ค่าประสิทธิภาพการอัดของคอมเพรสเซอร์และการขยายตัวในเทอร์โบมีค่าเท่ากับ 83% ค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ของห้องเผาไหม้ 96% ค่าประสิทธิผลการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 0.8 ค่าอุณหภูมิทางเข้าเทอร์โบสูงสุดที่ 1200K ผลการวิเคราะห์เชิงความร้อนปรากฏว่า วัฏจักร Recuperative ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงที่สุดที่ อัตราส่วนการอัด 4 โดยให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 28%

ฉนวนันท์ ช้างภูและคณะ [2] ทำการศึกษาและออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่ออุ่นอากาศที่ผ่านการอัดตัวจากเครื่องอัดอากาศสำหรับใช้ในห้องเผาไหม้เครื่องยนต์กังหันแก๊ส โดยทำการออกแบบและศึกษาแนวโน้มของประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของครีบในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยนำมาติดบริเวณรอบห้องเผาไหม้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนจากไอเสียสู่อากาศที่ต้องการอุ่นซึ่งบริเวณที่อุ่นอากาศได้เชื่อมต่อกับห้องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้รูปแบบการไหลแบบทิศทางเดียวกันระหว่างก๊าซไอเสียทิ้งจากห้องเผาไหม้กับอากาศที่ไหลผ่านการอัดตัวจากเครื่องอัดอากาศ เข้ามายังห้องแลกเปลี่ยนความร้อน ในการออกแบบอาศัยการจำลองลักษณะการไหลของไอดีและไอเสียจำลองการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้โปรแกรมแอนซิส ซีเอฟเอ็กซ์ (ANSYS® , CFX®) เป็นเครื่องมือในการนำมาวิเคราะห์โดยได้ทำการจำลองการแลกเปลี่ยนความร้อนของพื้นผิวที่มีลักษณะการติดตัวครีบถ่ายเทความร้อนแบบต่างๆกัน ซึ่งจะมีการจำลองการไหลเพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะต่างๆของครีบแลกเปลี่ยนความร้อนกับตัวแปรต่างๆ โดยในส่วนผลการจำลองการไหลซึ่งพิจารณาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของครีบแลกเปลี่ยนความร้อนลักษณะต่างๆที่ติดตั้งในส่วนของหน่วยดึงความร้อนทิ้ง กลับมาใช้ใหม่พบว่าครีบแลกเปลี่ยนความร้อนที่ขนาดมุมปะทะ 45 องศา BR เท่ากับ 0.4 ที่มี PR เท่ากับ 1

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการไหลของไอเสียที่ผ่านห้องเผาไหม้และเข้าสู่ห้องอัดตัวจากเครื่องยนต์กังหันแก๊ส ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้เป็นการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในหน่วยดึงความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่มากที่สุดเมื่อเทียบกับครีบบแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอื่นๆ หากพิจารณาแนวโน้มความสัมพันธ์ของ Effectiveness ของครีบบแลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่างๆ พบว่าที่มุมปะทะต่างๆ ยิ่งค่า BR มีค่ามากยิ่งขึ้น ค่า Effectiveness จะมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น โดยที่มุมปะทะ 60 องศา ค่า Effectiveness จะลดลงเล็กน้อยเมื่อ BR เท่ากับ 0.3

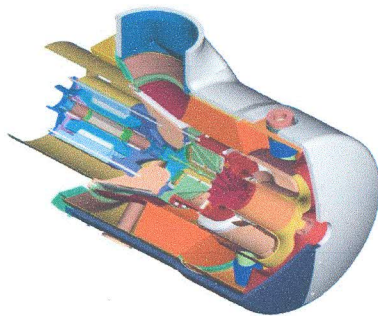
จิตรติลก ประสิทธิ์เสรีรัฐ และคณะ [7] ทำการศึกษาออกแบบและสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่ออุ่นอากาศที่ผ่านการอัดตัวจากเครื่องอัดอากาศสำหรับใช้ในห้องเผาไหม้เครื่องยนต์กังหันแก๊ส โดยทำการออกแบบและสร้างห้องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบรวมแกนกับห้องเผาไหม้เดิมซึ่งดัดแปลงส่วนกระจายอากาศของห้องเผาไหม้ให้เชื่อมต่อกับห้องแลกเปลี่ยนความร้อนที่สร้างขึ้น โดยใช้รูปแบบการไหลแบบทิศทางเดียวกันระหว่างก๊าซไอเสียทิ้งจากห้องเผาไหม้กับอากาศดีที่ไหลผ่านการอัดตัวจากเครื่องอัดอากาศเข้ามายังห้องแลกเปลี่ยนความร้อน ในการออกแบบ อาศัยทฤษฎีและหลักการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมาใช้ในการคำนวณ รวมทั้งอาศัยการจำลองลักษณะการไหล โดยในการคำนวณและการใช้โปรแกรมจำลองตั้งเป้าไว้ว่า งานที่ต้องใช้เพื่อขับเคลื่อนของไหลให้ไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้จะต้องไม่เกิน 30% ของความร้อนที่สามารถดึงกลับมาใช้ได้ หลังจากนั้นสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและทดลองเปรียบเทียบผลการทดลอง กับผลจากการคำนวณและผลการจำลองของโปรแกรม จากผลการทดลองสามารถนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้อุ่นอากาศให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นกว่าเดิมประมาณ 15-60 องศา โดยค่า Pumping Power ที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ของความร้อนที่ดึงกลับได้ในทุกการทดลอง และจากการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมพบว่าอุณหภูมิทางออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของอากาศดี มีค่าใกล้เคียงกันมีความผิดพลาดอยู่ในช่วงประมาณ 1-3 เปอร์เซ็นต์ แต่อุณหภูมิทางออกของแก๊สไอเสียที่ผ่านจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจากการทดลองมีค่าลดลงมาก ไม่สอดคล้องกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม ซึ่งอาจมีผลมาจาก 1.เกิดการรั่วซึมในชั้นของอากาศดีเข้าสู่ชั้นของแก๊สไอเสียบริเวณรอยต่อหรือประเก็น 2. การสูญเสียความร้อนออกสู่ภายนอกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน 3. ไม่สามารถทำการวัดอุณหภูมิในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งในการวัดการจากผลการจำลองด้วยโปรแกรม ซึ่งอาจส่งผลให้ค่าของอุณหภูมิไม่สอดคล้องกันได้ 4. จุดวัดอุณหภูมิทางออกของแก๊สไอเสียอยู่ใกล้กับบริเวณที่อากาศภายนอกไหลผ่านซึ่งอาจส่งผลให้ค่าของอุณหภูมิต่ำกว่าที่ควร จะวัดได้จากทางออกของแก๊สไอเสียของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

พิทักษ์ พร่อมไธสง [8] นำเสนอการตรวจสอบเชิงตัวเลขสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนสามมิติ ที่มีลักษณะการไหลแบบพัฒนาอย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงๆ ของการไหลและการถ่ายเทความร้อน โดยมีการติดตั้งแผ่นกั้นตัววีนบนแผ่นบางซึ่งจัดวางในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบทแยงมุม การคำนวณเชิงตัวเลขใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบที่มีอัตราการไหลในเทอมของเลขเรย์โนลด์ที่อยู่ในช่วง 3,000 ถึง 20,000 ซึ่งผลลัพธ์จะตรวจสอบโดยใช้การเปรียบเทียบกับข้อมูลจากสมการสหสัมพันธ์ท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ ผลการคำนวณการไหลในท่อยาวที่ติดตั้งแผ่นกั้นตัววีนนั้นแสดงให้เห็นถึงลักษณะการไหลที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงของรูปร่างความเร็วและเลขนัสเซลท์ โดยเริ่มเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง  $x/H=9$  และ  $x/H=8$  ตามลำดับ เมื่อวัดจากทางเข้าท่อทดสอบ การตรวจสอบอย่างละเอียด จากอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความสูงของแผ่นกั้นต่อความสูงของท่อ (BR) ค่าอัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อความสูงของท่อ (PR) และมุมปะทะของแผ่นกั้นกับทิศทางการไหล ( $\alpha$ ) ที่ส่งผลต่อลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อน สำหรับการไหลแบบพัฒนาอย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงๆ ในท่อที่ติดตั้งแผ่นกั้นตัววีนจะพบว่าคู่ของกระแสตามยาวที่หมุนสวนทางกันโดยเกิดจากการไหลผ่านแผ่นกั้นส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำของการไหลไปตกกระทบที่ผนังซึ่งนำไปสู่การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนตลอดช่วงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท่อทดสอบ ทำให้มีค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงสุด(TEFmax) มีค่า 1.74 สำหรับแผ่นกั้นตัววีซีทวนการไหลแบบตัดขอบที่ค่า  $e/H=0.01$  ที่มีค่า  $\alpha=45^\circ$ ,  $BR=0.15$ ,  $PR=0.7$ ,  $Re=3,000$  โดยที่อัตราส่วนของเลขนัสเซลท์ ( $Nu/Nu_0$ ) และอัตราส่วนของตัวประกอบความเสียดทาน( $f/f_0$ ) มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1.64-6.15 และ 3.61-78.2 เท่า ตามลำดับ

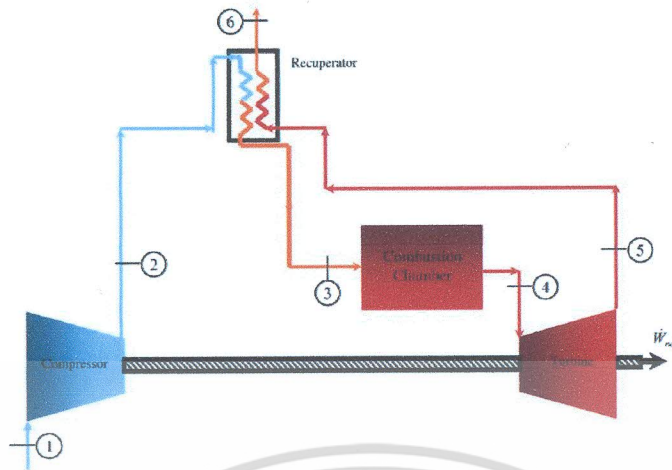
Winit Jaiboon [9] ทำการศึกษาผลกระทบจากลักษณะรูปทรงที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความเสียดทานในแผ่นครีบบานเกล็ดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในรถยนต์ โดยมีค่าเลขสแตนต์ัน (Stanton Number) และตัวประกอบความเสียดทาน (Friction Factor) เป็นตัวชี้วัดที่ค่าเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) ต่างๆ โดยนำวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) มาช่วยวิเคราะห์ลักษณะรูปทรงที่แตกต่างไม่ว่าจะเป็น ระยะพิทช์และองศาของแผ่นบานเกล็ด ระยะพิทช์ของครีบ ระยะพิทช์ของท่อ ความหนาของครีบ ค่าเลขเรย์โนลด์ที่ต่างกันในช่วงค่า 100 ถึง 4000 โดยโมเดล 3 มิติ ที่สร้างขึ้นของแบบจำลองซึ่งบริเวณติดกับผนัง (Near Wall) มีขนาดเซลล์เล็กที่สุด ซึ่งเล็กกว่าความหนาของครีบ และการถ่ายเทความร้อนแบบตอนจุดซึ่งถูกนำเสนอโดย Patankar, 1960 และโมเดลความปั่นป่วนแบบ RNG k-epsilon, enhance wall treatment ถูกนำมาใช้สำหรับแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนที่โดเมนของของไหล และผิวหน้าระหว่างของแข็งและของไหล (Solid-Fluid Interface) ตามลำดับ ซึ่งคุณภาพในการทำนายของโมเดลความปั่นป่วนโมเดลนี้ค่อนข้างดี โดยความเบี่ยงเบนมากที่สุดของการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานอยู่ที่  $\pm 15\%$

งานวิจัยที่เสนอขอการสนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้ จะเป็นการใช้องค์ความรู้ด้านการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อดึงความร้อนที่กลับมาใช้งานในเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงความร้อนต่ำที่มีมาในอดีต มาปรับใช้ให้เหมาะสมกับเงื่อนไขการทำงานขอบเขต และวัตถุประสงค์ของการวิจัยในครั้งนี้ โดยปัจจุบันทางทีมวิจัยได้ศึกษาแล้วพบว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้เป็นเครื่องยนต์ต้นแบบนั้นมีการออกแบบอุปกรณ์รวมถึงการออกแบบการทดลองที่ยังไม่เหมาะสมทำให้เกิดปัญหาต่างๆ อาทิเช่น การรั่วซึมของชุดอุปกรณ์ระหว่างชั้นของอากาศดีและแก๊สไอเสีย การสูญเสียความร้อนออกสู่ภายนอก การไม่สามารถทำการวัดอุณหภูมิในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งที่วัดการจากผลการจำลองด้วยโปรแกรม รวมถึงจุดวัดอุณหภูมิทางออกของแก๊สไอเสียอยู่ใกล้กับบริเวณที่อากาศภายนอกไหลผ่านส่งผลให้ค่าของอุณหภูมิ ต่ำกว่าที่ควรจะได้ ดังนั้นในงานวิจัยที่เสนอนี้จะทำการออกแบบ พัฒนาและศึกษาสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีความเหมาะสมสำหรับเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กที่ใช้เชื้อเพลิงความร้อนต่ำ เพื่อให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงโดยนำความร้อนที่สูญเสียจากไอเสียของเครื่องยนต์กังหันก๊าซกลับมาใช้ประโยชน์ให้ได้มากที่สุด



ภาพที่ 2.11 เครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กพิกัดกำลัง 195 กิโลวัตต์ (Capstone Co.Ltd.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.12 แผนภาพแสดงวัฏจักร Recuperative (ที่มา: Efficiency enhancement of a gas turbine cycle using an optimized tubular recuperative heat, Hoseyn Sayyaadi, Reza Mehrabipour., 2012)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

### 3.1 วิธีทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณช่วยในการวิเคราะห์และการสอบเทียบ

ในการใช้การจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาช่วยในการวิเคราะห์นั้น จำเป็นจะต้องมีการตรวจสอบเพื่อให้แน่ใจก่อนว่าแบบจำลองที่ใช้ั้นมีความถูกต้องหรือไม่โดยจะต้องทำการสอบเทียบก่อนแบบจำลองนั้นเสียก่อน โดยได้ทำการสอบเทียบกับเงื่อนไขแบบจำลองหลายๆ ซึ่งเกี่ยวข้องกับ การการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนดังนี้

3.1.1 การสอบเทียบเงื่อนไขการจำลองสำหรับการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกต (Conjugate heat transfer)

การถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตนั้นจะเป็นการถ่ายเทความร้อนที่มีลักษณะที่เกิดขึ้นระหว่างของไหล (fluid) และของแข็ง (Solid) โดยจะมีทั้งการถ่ายเทความร้อนแบบการนำ (Conduction heat transfer) และการถ่ายเทความร้อนแบบการพา (Convection heat transfer) เกิดขึ้นนั่นเอง โดยอาจจะเป็นการถ่ายเทความร้อนจากของไหลไปสู่ของแข็งหรือถ่ายเทจากของแข็งไปสู่ของไหลก็ได้

ในการสอบเทียบเงื่อนไขการจำลองสำหรับการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตนั้นจะทำการใช้โมเดล 3 มิติ โดยจะใช้เทียบกับงานวิจัยที่น่าเชื่อถือซึ่งมีการศึกษาวิจัยไว้ก่อนแล้ว [10] โดยเป็นโมเดล 2 มิติ ที่เป็นการไหลแบบสวนทางกัน (Counter - Flow) ระหว่างของไหลร้อน (Hot fluid) กับของไหลเย็น (Cold fluid) โดยมีตัวกลางของแข็ง (Solid) อยู่ตรงกลาง โดยมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

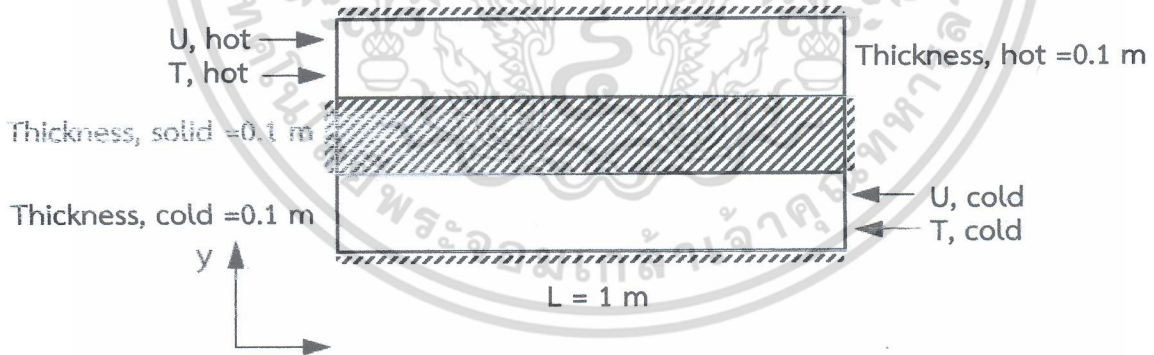
ตารางที่ 3.1 ตารางคุณสมบัติวัสดุและของไหลที่ใช้ในการจำลอง (Material Properties)

คุณสมบัติ (Properties)	ตัวกลางของแข็ง (Solid)	ของไหลเย็น (Cold fluid)	ของไหลร้อน (Hot fluid)
ความหนาแน่น (Density, $\rho$ )	8000 (kg/m <sup>3</sup> )	1000 (kg/m <sup>3</sup> )	1000 (kg/m <sup>3</sup> )
ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ณ ความดันคงที่ (Specific Heat, $C_p$ )	500 (J/kg-K)	25 (J/kg-K)	25 (J/kg-K)
ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity, $k$ )	50 (W/m-K)	10 (W/m-K)	10 (W/m-K)
ค่าความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity, $\mu$ )	-	0.15 (kg/m-s)	0.15 (kg/m-s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

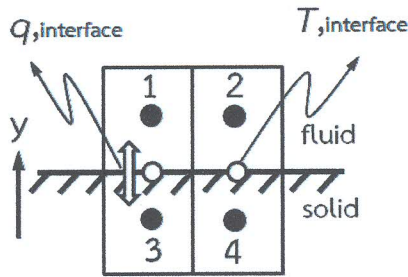
ตารางที่ 3.2 แสดงค่าขอบเขตและเงื่อนไขในการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ตำแหน่ง	ค่าที่กำหนด	
ทางเข้าของไหลเย็น (Cold fluid),in	Velocity (m/s)	0.1
	Temperature (K)	300
ทางออกของไหลเย็น (Cold fluid),out	Gauge Pressure (Pa)	0
ทางเข้าของไหลร้อน (Hot fluid),in	Velocity (m/s)	0.2
	Temperature (K)	800
ทางออกของไหลร้อน (Hot fluid),out	Gauge Pressure (Pa)	0
ผิวผนังด้านนอกของของไหลเย็นและของไหลร้อน	กำหนดเป็นผนัง (Wall) ไม่มี Heat Flux	-
แบบจำลองการไหลแบบราบเรียบ	Viscous - Laminar	-
การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับตัวกลางของแข็ง	การถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกต Conjugate Heat Transfer	-
ลักษณะการไหล	การไหลไม่อัดตัว (Incompressible Flow)	-



ภาพที่ 3.1 แสดงภาพ 2 มิติ การไหลแบบสวนทางกัน (Counter - Flow) ระหว่างชั้นโมเดลของไหลร้อน (Hot fluid) หนา 0.1 เมตร กับชั้นโมเดลของไหลเย็น (Cold fluid) หนา 0.1 เมตร โดยมีชั้นโมเดลตัวกลางของแข็ง (Solid) หนา 0.1 เมตร อยู่ตรงกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

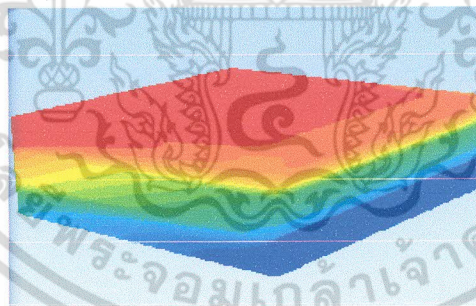


ภาพที่ 3.2 แสดงปริมาณควบคุมหน้าสัมผัสระหว่างของไหลและของแข็งที่ถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกต โดยสมการสำหรับการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตแสดงดังนี้ สมการพลั๊กความร้อนระหว่างของไหลกับผิวของแข็ง

$$q_{\text{interface}} = \frac{2k_s k_f}{k_s + k_f} \left( \frac{T_1 - T_3}{y_1 - y_3} \right) \tag{3.1}$$

สมการอุณหภูมิที่ถ่ายเทระหว่างของไหลกับผิวของแข็ง

$$T_{\text{interface}} = \frac{k_f T_2 + k_s T_4}{k_f + k_s} \tag{3.2}$$

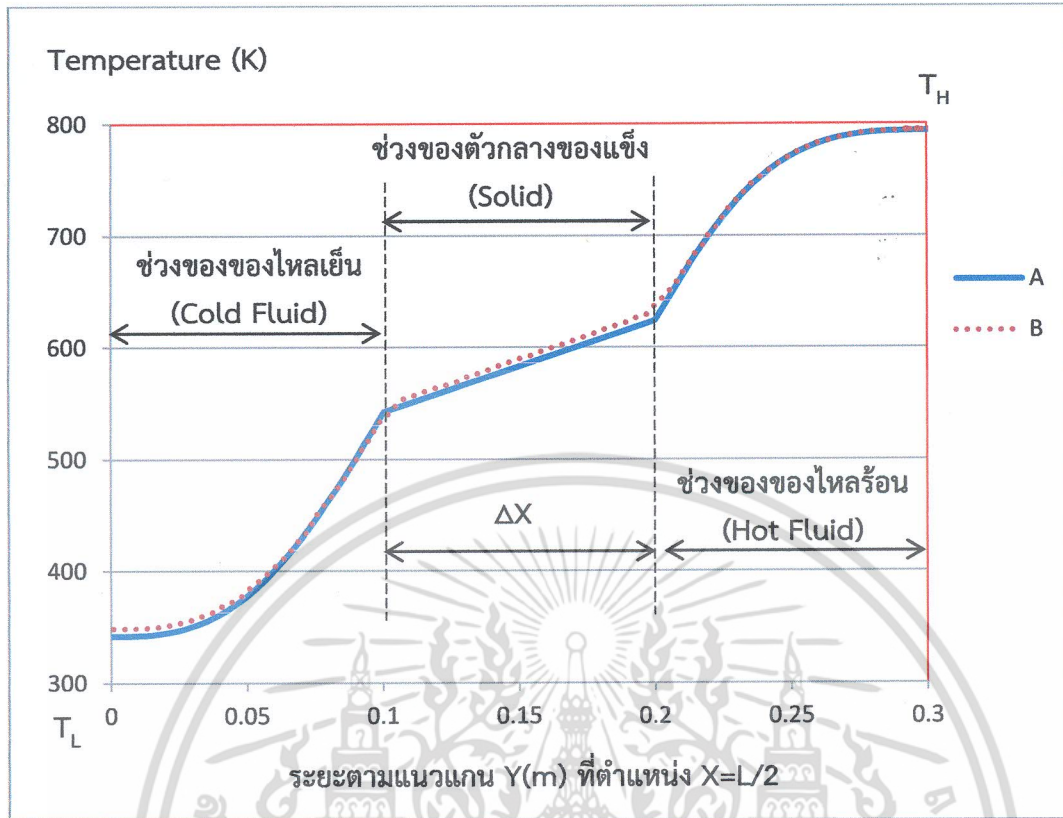


ภาพที่ 3.3 แสดงภาพ 3 มิติ ของโมเดลทรงสี่เหลี่ยมที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตที่มีตัวกลางของแข็งอยู่ตรงกลางระหว่างของไหลร้อน (Hot fluid) และของไหลเย็น (Cold fluid)



ภาพที่ 3.4 ภาพตัดที่ตำแหน่ง Z/2 ของโมเดล 3 มิติ แสดงการกระจายอุณหภูมิ (Temperature Distribution)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.5 แสดงเส้นกราฟอุณหภูมิ (Temperature Profile) ที่ตำแหน่ง  $X=L/2$  กราฟเส้น A: ที่ได้จากการจำลองการถ่ายเทความร้อนของโมเดล 3 มิติ เทียบกับ B: โมเดล 2 มิติ ซึ่งได้จากงานวิจัยที่น่าเชื่อถือ

เมื่อพิจารณาเส้นกราฟอุณหภูมิ (Temperature Profile) ที่ตำแหน่ง  $X=L/2$  พบว่ากราฟเส้น A ที่ได้จากการจำลองการถ่ายเทความร้อนของโมเดล 3 มิติ เทียบกับกราฟเส้น B โมเดล 2 มิติ จะมีลักษณะกราฟที่ค่อนข้างจะใกล้เคียงกันมากโดยจากค่าที่พล็อตได้นั้นค่าที่แตกต่างกันมากที่สุดจะอยู่ที่ตรงตำแหน่ง Y ใกล้ศูนย์ซึ่งมีค่าที่แตกต่างกันคิดเป็นร้อยละ 1.98 ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ เมื่อพิจารณาแล้วพบว่า การจำลองโดยใช้ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนี้สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ขั้นต่อไป

### 3.1.2 การสอบเทียบเงื่อนไขการจำลองสำหรับการไหลผ่านท่อเปล่า (Turbulent Pipe Flows)

เมื่อมีการไหลของของไหลผ่านเข้าไปภายในท่อเปล่า หากพิจารณาตามแนวรัศมีจากกลางท่อไปสู่บริเวณที่ติดผิวผนังท่อจะพบว่าเวกเตอร์ความเร็วของของไหลที่ไหลภายในท่อจะมีค่ามากที่สุดจากกึ่งกลางท่อและจะค่อยๆ ลดลงไปในเรื่อยๆ จนไม่มีความเร็วที่บริเวณที่ชิดกับผนัง โดยจะมีค่าตัวประกอบความเสียดทานที่ผนังท่อที่มีความเกี่ยวข้องซึ่งจะได้กล่าวถึงดังต่อไปนี้

#### 3.1.2.1 สภาวะการไหล

การไหลแบบภายในเช่นการไหลในท่อ มีขอบเขตจำกัดโดยที่ความหนาของชั้นขีดผิวไม่สามารถเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ได้ เนื่องจากเมื่อไหลไปได้ระยะหนึ่งชั้นขีดผิวจะก่อตัวเต็มหน้าตัดการไหลรูปร่างของความเร็วจะมีลักษณะชัดเจนแน่นอนไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งเรียกว่าการไหลพัฒนาอย่างสมบูรณ์ (fully developed flow) สำหรับช่วงการไหลก่อนหน้านี้เรียกว่าการไหลที่กำลังปรับตัว (developing flow) และเรียกระยะของการไหลที่กำลังปรับตัวว่าความยาวขาเข้า,  $L_e$  (hydrodynamic entrance length) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการไหลภายในช่องการไหลนั้น เลขเรย์โนลด์สำหรับการไหลกำหนดโดย

$$Re = \frac{\rho u_0 D}{\mu} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $u_0$  เป็นความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ และ  $D$  คือความยาวบ่งลักษณะของช่องทางไหล หรือเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก(hydraulic diameter) มีนิยามเป็น

$$D = \frac{4A_c}{P} \quad (3.4)$$

เมื่อค่า  $A_c$  และ  $P$  เป็นพื้นที่หน้าตัดและเส้นรอบรูปของหน้าตัดตามลำดับ

โดยทั่วไปสำหรับการไหลในท่อผิวเรียบ เลขเรย์โนลด์สวิฤทธิของการเปลี่ยนแปลงไปเป็นการไหลปั่นป่วน เริ่มต้นจาก  $Re_D > 4000$  และความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัวหาได้จากสมการ[8]

$$\left(\frac{L_e}{D}\right)_{urb} \approx 4.4 Re_D^{1/6} \quad (3.5)$$

### 3.1.2.2 ตัวประกอบความเสียดทาน

ตัวประกอบความเสียดทาน(friction factor) ของ Moody (หรือ Darcy) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ไร้มิติ มีนิยามว่า

$$f_{Darcy} \equiv \frac{(\Delta p / L) D}{\rho u_0^2 / 2} \quad (3.6)$$

เมื่อค่า  $L$  คือช่วงความยาวที่วัดค่าความดันตกคร่อม และค่า  $f_{Darcy}$  นี้แตกต่างกับค่าตัวประกอบความเสียดทาน  $f$  ซึ่งเรียกว่าตัวประกอบความเสียดทานเฟรนึ่ง มีสมการดังนี้

$$f = \frac{f_{Darcy}}{4} \quad (3.7)$$

สมการที่ใช้คำนวณค่าตัวประกอบความเสียดทานของการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อยาวที่มีค่าเลขเรย์โนลด์ไม่เกิน  $10^5$  ในช่วงที่พัฒนาเต็มท่อกลมจะใช้สมการสมการ H.Blasius ดังนี้

$$f = 0.3164 Re^{-0.25} \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2.3 การกำหนดเงื่อนไขการจำลอง

ในการสอบเทียบเงื่อนไขการจำลองสำหรับการไหลผ่านท่อเปล่านั้นจะทำการใช้โมเดล 3 มิติ ท่อยาว 5 m. มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.03 m. โดยมีโดเมนการไหลแบบสมมาตร (symmetry planes) ซึ่งไม่มีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวผนังท่อ โดยจะพิจารณาตัวประกอบความเสียดทานที่เกิดขึ้น จะใช้แบบจำลองความปั่นป่วนที่มีโมเดลแตกต่างกัน 3 โมเดล คือ  $k-\epsilon$  STANDARD,  $k-\epsilon$  RNG และ  $k-\epsilon$  REALIZABLE ที่ Near-Wall Treatment แบบ Standard Wall Functions กับ Enhance Wall Treatment โดยจะเทียบโปรแกรมกับผลเฉลยแม่นยำตรง [11] มีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 3.3 ตารางคุณสมบัติวัสดุและของไหลที่ใช้ในการจำลอง (Material Properties)

คุณสมบัติ (Properties)	ของไหล (Fluid)
ความหนาแน่น (Density, $\rho$ )	1.17 (kg/m <sup>3</sup> )
ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ณ ความดันคงที่ (Specific Heat, $C_p$ )	1006.43 (J/kg-K)
ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity, $k$ )	0.0242 (W/m-K)
ค่าความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity, $\mu$ )	1.87E-05 (kg/m-s)

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าขอบเขตและเงื่อนไขในการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ตำแหน่ง	ค่าที่กำหนด	
ทางเข้าของไหล (Fluid Inlet)	Velocity inlet	9, 80 (m/s)
ทางออกของไหล (Fluid Outlet)	Gauge Pressure	0 (Pa)
ผิวผนังของท่อ	กำหนดเป็นผนัง (Wall) ไม่มี Heat Flux	-
แบบจำลองความปั่นป่วน	$k-\epsilon$ : STANDARD, RNG, REALIZABLE Near-Wall Treatment: Standard Wall Functions, Enhanced Wall Treatment	-
ลักษณะการไหล	การไหลไม่อัดตัว (Incompressible Flow)	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 แสดงค่าตัวประกอบความเสียดทาน (Friction factor,  $f$ ) จากผลเฉลยแม่นยำตรงเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรมทั้ง 3 แบบของโมเดลแบบจำลองความปั่นป่วน ค่าเลขเรย์โนลด์  $Re = 1.69 \times 10^4$  ( $Re < 10^5$ ) จำนวนเมชเท่ากับ 288,000

โมเดล $k-\epsilon$	Near-Wall Treatment	$Y^+$	ค่าตัวประกอบความเสียดทาน (Friction factor, $f$ )		
			ผลเฉลยแม่นยำตรง	โปรแกรมแบบจำลอง	ความคลาดเคลื่อน (%)
STANDARD	SWF	1.18	0.02776	0.05634	102.96
RNG	SWF	1.16	0.02776	0.05391	94.18
REALIZABLE	SWF	1.16	0.02776	0.04715	69.85
STANDARD	EWT	0.85	0.02776	0.02883	3.84
RNG	EWT	0.85	0.02776	0.02877	3.65
REALIZABLE	EWT	0.85	0.02776	0.02875	3.57

ตารางที่ 3.6 แสดงค่าตัวประกอบความเสียดทาน (Friction factor,  $f$ ) จากผลเฉลยแม่นยำตรงเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรมทั้ง 3 แบบของโมเดลแบบจำลองความปั่นป่วน ค่าเลขเรย์โนลด์  $Re = 1.5 \times 10^5$  ( $Re > 10^5$ ) จำนวนเมชเท่ากับ 288,000

โมเดล $k-\epsilon$	Near-Wall Treatment	$Y^+$	ค่าตัวประกอบความเสียดทาน (Friction factor, $f$ )		
			ผลเฉลยแม่นยำตรง	โปรแกรมแบบจำลอง	ความคลาดเคลื่อน (%)
STANDARD	SWF	6.61	0.02259	0.02234	1.11
RNG	SWF	6.47	0.02158	0.02134	1.13
REALIZABLE	SWF	6.20	0.01990	0.01961	1.42
STANDARD	EWT	5.85	0.01767	0.01738	1.66
RNG	EWT	5.78	0.01726	0.01698	1.63
REALIZABLE	EWT	5.76	0.01714	0.01682	1.87

หมายเหตุ SWT คือ Standard Wall Functions และ EWT คือ Enhance Wall Treatment

เมื่อพิจารณา Near-Wall Treatment ระหว่าง Standard Wall Functions กับ Enhance Wall Treatment จะเห็นได้ว่าแบบ Standard Wall Functions จะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าตัวประกอบความเสียดทานที่ค่อนข้างมากสำหรับการไหลที่มีค่าเลขเรย์โนลด์น้อยกว่า  $10^5$  เกินค่าที่จะยอมรับได้ ส่วนแบบ Enhance Wall Treatment เปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนจะอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ทั้งที่เป็นการไหลในช่วงที่ค่าเลขเรย์โนลด์น้อยกว่าและมากกว่า  $10^5$  จะเห็นได้ว่า Standard Wall Functions เหมาะกับการไหลที่มีค่าเลขเรย์โนลด์มากกว่า  $15^5$  ส่วน Enhance Wall Treatment นั้นสามารถใช้ได้กับทั้งช่วงค่าเลขเรย์โนลด์น้อยกว่าและมากกว่า  $15^5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 การไหลผ่านท่อแบบปั่นป่วนที่มีการถ่ายเทความร้อนจากผนังสู่ของไหล (Turbulent Pipe Flow Heat Transfer)

ในการสอบเทียบเงื่อนไขการจำลองสำหรับการไหลผ่านท่อแบบปั่นป่วนที่มีการถ่ายเทความร้อนจากผนังสู่ของไหลนั้น จะทำการใช้โมเดล 3 มิติ ของท่อที่มีของไหลผ่านภายในซึ่งจะพิจารณาค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ปลั๊กความร้อนระหว่างผิวท่อกับของไหลคงที่ ซึ่งโมเดลความปั่นป่วนแบบ RNG k-epsilon, enhance wall treatment ถูกนำมาใช้สำหรับแบบจำลองการเนื่องด้วยการทำนายสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่มีการถ่ายเทความร้อนของโมเดลนี้ค่อนข้างดี ดังที่มีผู้ได้วิจัยไว้ก่อนแล้ว [9] โดยจะใช้แบบจำลองเทียบกับผลคำนวณจากสมการโดยตรง [12] โดยมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

#### 3.1.3.1 สภาวะการถ่ายเทความร้อน

ถ้าของไหลที่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอไหลเข้าไปในท่อโดยมีอุณหภูมิแตกต่างจากอุณหภูมิที่ผิวแล้วการพาความร้อนจะเกิดขึ้นและชั้นขีดผิวของความร้อนจะเริ่มก่อตัวขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าสภาวะที่ผิวของท่อคงที่โดยอาจเป็นอุณหภูมิผิว,  $T_s$  คงที่หรือปลั๊กความร้อนที่ผิว,  $q_s''$  คงที่ สภาวะพัฒนาอย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน (thermally fully developed condition) ก็เกิดขึ้น

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ ถ้า  $Pr > 1$  การพัฒนาชั้นขีดผิวเชิงความร้อนจะขยายตัวเร็วกว่าชั้นขีดผิวเชิงความร้อน และกลับกันถ้า  $Pr < 1$  และสำหรับอากาศการพัฒนาชั้นขีดผิวเชิงความร้อนและชั้นขีดผิวเชิงความร้อนจะใกล้เคียงกัน และจากการทดลองสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนเงื่อนไขทั้งสองเกือบจะเป็นอิสระไม่ขึ้นกับ  $Pr$  ซึ่งอาจจะประมาณได้ว่า  $L_{c,th} / D \approx 10$

ปลั๊กความร้อน ( $q_s''$ ) ระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ หาได้จากกฎเย็นตัวของนิวตัน

$$\dot{q}_s = h(T_s - T_m) \quad (3.9)$$

โดยที่  $T_s$  คืออุณหภูมิพื้นผิว

$T_m$  คืออุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่หน้าตัดของช่องทางไหล

ปลั๊กความร้อนนี้จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่แตกต่างรวมทั้งหมดระหว่างผนังกับของไหล ซึ่ง  $h$  คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาบางครั้งเรียกว่าการนำผ่านฟิล์ม เพราะความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นกระบวนการนำความร้อนในชั้นบางๆ ของของไหลที่บริเวณผิวของผนัง ค่า  $T_m$  จะเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางการไหลนั่นคือ  $dT_m / dx$  จะไม่เป็นศูนย์ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น ค่าของ  $T_m$  จะเพิ่มขึ้นไปตามระยะทางการไหล,  $x$  ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนจากผิวสู่ของไหล

ปลั๊กความร้อน  $\dot{Q} = \dot{m}c_p (T_e - T_i) = \dot{q}_s A_s$  ระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ หาได้จากกฎเย็นตัวของนิวตัน

รูปสมการทั่วไปที่ใช้คำนวณประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนแบบพัฒนาเต็มท่อกลมสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนเรียกว่าสมการ Dittus Boelter

Dittus Boelter equation

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $n=0.4$  สำหรับการให้ความร้อนแก่ของไหลภายในท่อกลมผิวเรียบ  $T_s > T_m$   
 $n=0.3$  สำหรับการดึงความร้อนออกจากของไหลภายในท่อกลมผิวเรียบ  $T_s < T_m$   
 สมการ (3.10) นี้จะนำมาใช้ได้ตามข้อกำหนดดังนี้

$$0.7 \leq Pr \leq 160$$

$$Re \geq 10^4$$

$$L/d > 60$$

### 3.1.3.2 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง

การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองนี้ได้กำหนดเงื่อนไขขอบเขตการคำนวณใช้เงื่อนไขเดียวกันกับการจำลองเปรียบเทียบที่ผ่านมาจากเบื้องต้นโดยเป็นการไหลในท่อยาว 5 m. มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.03 m. ซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนจากการให้ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวผนังท่อแบบคงที่ มีโดเมนการไหลแบบสมมาตร (symmetry planes) ดังภาพที่ 3.6

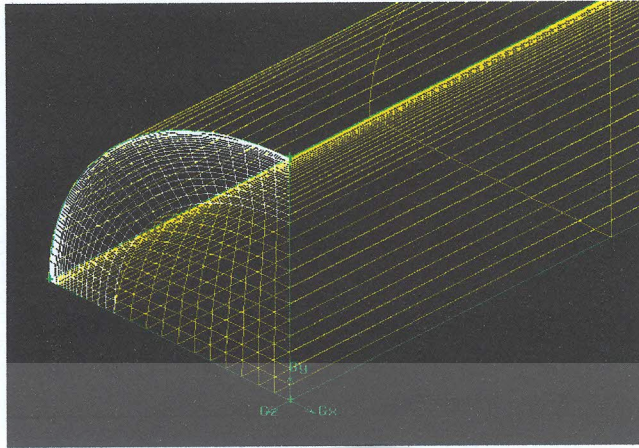
ตารางที่ 3.7 ตารางคุณสมบัติวัสดุและของไหลที่ใช้ในการจำลอง (Material Properties)

คุณสมบัติ (Properties)	ของไหล (Fluid)
ความหนาแน่น (Density, $\rho$ )	1.17 (kg/m <sup>3</sup> )
ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ณ ความดันคงที่ (Specific Heat, $C_p$ )	1006.43 (J/kg-K)
ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity, $k$ )	0.0242 (W/m-K)
ค่าความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity, $\mu$ )	1.87E-05 (kg/m-s)

ตารางที่ 3.8 แสดงค่าขอบเขตและเงื่อนไขในการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ตำแหน่ง	ค่าที่กำหนด	
ทางเข้าของไหล (Fluid Inlet)	Velocity inlet	9 (m/s)
	Temperature	300 (K)
ทางออกของไหล (Fluid Outlet)	Gauge Pressure	0 (Pa)
ผิวผนังของท่อ	กำหนดเป็น Heat Flux คงที่	5000 (w/m <sup>2</sup> )
แบบจำลองความปั่นป่วน	k- $\epsilon$ RNG , Near-Wall Treatment, Enhanced Wall Treatment	-
ลักษณะการไหล	การไหลไม่อัดตัว (Incompressible Flow)	

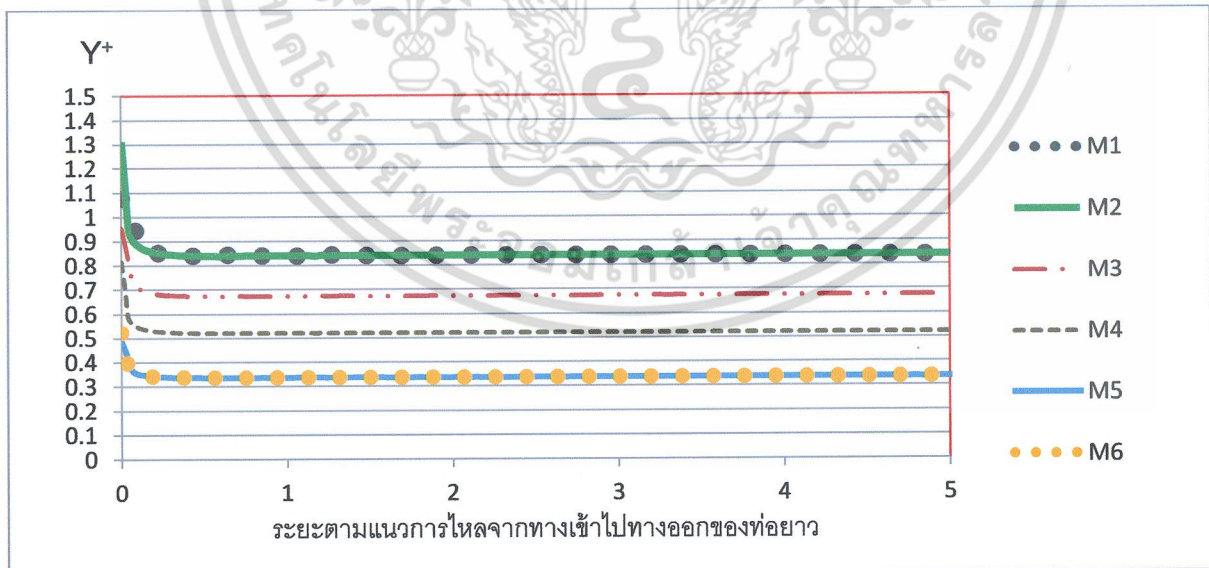
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.6 ลักษณะของเมชที่ใช้ในการจำลองการไหลในท่อยาว



ภาพที่ 3.7 ลักษณะเวกเตอร์ความเร็วที่ได้จากการจำลองการไหลในท่อยาว



ภาพที่ 3.8 แสดงค่า Y Plus ที่ผนังท่อตามแนวการไหลของแบบจำลองที่มีจำนวนของเมชแตกต่างกัน 6 ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1) การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองจากจำนวนเมช

เมชที่ใช้สำหรับกรณีการไหลในท่อยาวได้แสดงในภาพที่ 3.6 เป็นแบบสี่เหลี่ยมแบบเมชไม่สม่ำเสมอ (non-uniform mesh) บริเวณที่ติดผนังให้มีจำนวนเมชหนาแน่นและบริเวณที่ห่างออกไปจากผนังก็มีจำนวนเมชเบาบางลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่บริเวณผิวท่อหรือขอบท่อจะมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าที่บริเวณกลางท่อดังภาพที่ 3.7 ซึ่งแบบจำลองนี้เมชที่บริเวณที่ติดผนังจะพิจารณาที่ค่า  $Y^+$  น้อยกว่า 1 เพื่อที่จะทำการตรวจสอบการลู่เข้าของเมชที่มีผลต่อคำตอบได้ทำการศึกษาแบบจำลองโดยใช้จำนวนของเมชที่แตกต่างกัน 6 ค่า และได้นำหลักการของตัวชี้วัดการลู่เข้าของกริด (Grid Convergence Index, GCI) [13, 14] มาใช้ โดยค่า  $Nu_{av}, f, \Delta P$  ได้นำมาใช้พิจารณาสำหรับเมชแต่ละค่า การคำนวณค่าชี้วัดการลู่เข้าของกริดมีการคำนวณดังนี้

$$GCI(Nu_{av}) = \left| 1 - Nu_{av}(M_i) / Nu_{av}(M_o) \right| \quad (3.11)$$

$$GCI(f) = \left| 1 - f(M_i) / f(M_o) \right| \quad (3.12)$$

$$GCI(\Delta P) = \left| 1 - \Delta P(M_i) / \Delta P(M_o) \right| \quad (3.13)$$

ตารางที่ 3.9 แสดงค่า Grid Convergence Index (GCI) ภายใต้จำนวนเมชที่แตกต่างกัน

เมช	M1	M2	M3	M4	M5	M6
จำนวนของเมช	47808	144000	202176	246000	509016	1548750
$GCI(f)$	$6.54 \times 10^{-3}$	$6.23 \times 10^{-3}$	$3.58 \times 10^{-3}$	$6.68 \times 10^{-3}$	$3.96 \times 10^{-3}$	0
$GCI(\Delta P)$	$1.27 \times 10^{-2}$	$6.68 \times 10^{-3}$	$6.86 \times 10^{-3}$	$6.02 \times 10^{-3}$	$6.03 \times 10^{-3}$	0
$Nu_{av}$	62.16	62.14	61.64	61.13	60.44	60.80
$GCI(Nu_{av})$	$2.24 \times 10^{-2}$	$2.19 \times 10^{-2}$	$1.37 \times 10^{-2}$	$5.37 \times 10^{-3}$	$5.89 \times 10^{-3}$	0

ตารางที่ 3.9 เป็นค่าตัวชี้วัดการลู่เข้าของกริดที่คำนวณได้จากแบบจำลองที่จำนวนเมชแตกต่างกัน 6 ค่า จากตารางจะเห็นว่าค่า  $GCI(Nu_{av}), GCI(f)$  และ  $GCI(\Delta P)$  ของค่าเมช M4 นั้นมีค่าน้อยกว่า  $6.68 \times 10^{-3}$  ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเมช M4 มีการลู่เข้าที่ดี เพื่อที่จะลดเวลาในการประมวลผลของซีพียูและให้ได้ค่าที่มีความแม่นยำในการคำนวณของเรานั้นควรจะต้องใช้ขนาดเมช M4 ในการทำแบบจำลองนั่นเอง

## 2) การตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution)

เนื่องจากผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขเป็นค่าที่ได้จากการประมาณ การคำนวณย่อมมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ดังนั้นในการนำโปรแกรมมาใช้งานต้องมีการตรวจสอบโปรแกรมว่าให้ผลเฉลยถูกต้องหรือไม่ การตรวจสอบโปรแกรมในหัวข้อนี้จะนำผลที่ได้จากโปรแกรมมาเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรง โดยแบบจำลองนี้เป็นการถ่ายเทความร้อนที่มีการให้ฟลักซ์ความร้อนคงที่กับผนัง ดังนั้นจึงนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมาทำการเปรียบเทียบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณค่าอุณหภูมิของไหลที่ทางออก ( $T_o$ ) จากผลเฉลยแม่นยำตรง  
จากสมการฟลักความร้อน คือ

$$\dot{Q} = \dot{q}_s A_s = \dot{m} C_p (T_o - T_i) \quad (3.14)$$

คำนวณหาอุณหภูมิของไหลที่ทางออกจะได้ว่า

$$T_o = \frac{\dot{q}_s A_s}{\dot{m} C_p} + T_i \quad (3.15)$$

$$T_o = \frac{\dot{q}_s A_s}{(\rho V A_c) C_p} + T_i \quad (3.16)$$

$$T_o = \frac{\dot{q}_s (\pi D L)}{(\rho V (\pi D^2 / 4)) C_p} + T_i \quad (3.17)$$

แทนค่าในสมการที่ 3.17 จากเงื่อนไขที่กำหนดไว้เบื้องต้นในตารางที่ 3.7 และ 3.8 โดยให้ฟลักความร้อนคงที่กับ  
ผิวผนังท่อ  $\dot{q}_s = 5000 \text{ w/m}^2$  จะได้ว่า

$$T_o = \frac{5000 \times (\pi \times 0.03 \times 5)}{(1.17 \times 9 (\pi \times 0.03^2 / 4)) \times 1006.43} + 300$$

ดังนั้นอุณหภูมิของไหลที่ทางออกจะได้ว่า  $T_o = 614.53 \text{ K}$

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Coefficient,  $h$ ) จากผลเฉลยแม่นยำ  
ตรง

สมการที่ใช้คำนวณประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนแบบพัฒนาเต็มท่อกลมสำหรับการไหลแบบ  
ปั่นป่วนเรียกว่าสมการ Dittus Boelter สำหรับการให้ความร้อนแก่ของไหลภายในท่อกลมผิวเรียบ ดังนี้

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (3.18)$$

$$Nu = 0.023 (\rho V D_h / \mu)^{0.8} (\mu C_p / k)^{0.4} \quad (3.19)$$

แทนค่าในสมการที่ 3.19 จะได้ว่า

$$Nu = 0.023 \times (1.17 \times 9 \times 0.03 / 1.87 \times 10^{-5})^{0.8} (1.87 \times 10^{-5} \times 1006.43 / 0.0242)^{0.4}$$

ดังนั้นค่า Nussle Number จะได้  $Nu = 50.12$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $Nu$  กับค่า  $h$  คือ

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (3.20)$$

$$h = \frac{Nuk}{D_h} \quad (3.21)$$

แทนค่าในสมการที่ 3.21 จะได้ว่า

$$h = \frac{50.12 \times 0.0242}{0.03}$$

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะได้  $h = 40.43 \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}$

การคำนวณค่าตัวประกอบความเสียดทาน (Friction factor,  $f$ ) จากผลเฉลยแม่นยำตรง

สมการที่ใช้คำนวณค่าตัวประกอบความเสียดทานของการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อยาวที่มีค่าเลขเรย์โนลด์ไม่เกิน  $10^5$  ในช่วงที่พัฒนาเต็มท่อกลมจะใช้สมการ H.Blasius ดังนี้

$$f = 0.3146 \text{Re}^{-0.25} \quad (3.22)$$

$$f = 0.3146 \left( \rho V D_h / \mu \right)^{-0.25} \quad (3.23)$$

แทนค่าในสมการที่ 3.23 จะได้ว่า

$$f = 0.3146 \left( 1.17 \times 9 \times 0.03 / 1.87 \times 10^{-5} \right)^{-0.25}$$

ดังนั้นค่าตัวประกอบความเสียดทานจะได้  $f = 0.02776$

**ตารางที่ 3.10** แสดงค่าจากผลเฉลยแม่นยำตรงเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรม

ตัวแปร	ผลเฉลยแม่นยำตรง	โปรแกรมแบบจำลอง	ความคลาดเคลื่อน (%)
อุณหภูมิของไหลที่ทางออก ( $T_o$ )	614.53 K	614.69 K	0.026
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $h$ )	40.43 $\text{w/m}^2 \cdot \text{K}$	49.31 $\text{w/m}^2 \cdot \text{K}$	21.96 [15]
ตัวประกอบความเสียดทาน ( $f$ )	0.02776	0.02876	3.60

จากตารางที่ 3.10 เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรมกับผลเฉลยแม่นยำตรงจะมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิของไหลที่ทางออก ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และตัวประกอบความเสียดทาน เท่ากับ 0.026, 21.96, 3.60 ซึ่งอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ ผลที่ได้จากทั้งโปรแกรมและจากผลเฉลยแม่นยำตรงให้ผลที่สอดคล้องกันทำให้ยืนยันได้ว่าแบบจำลองการไหล 3 มิติ รวมทั้งโปรแกรมที่ใช้พื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมสามารถนำมาเป็นเครื่องมือในการคำนวณ เพื่อวิเคราะห์

ปัญหาการไหลในการถ่ายเทความร้อนสำหรับงานวิจัยนี้ได้

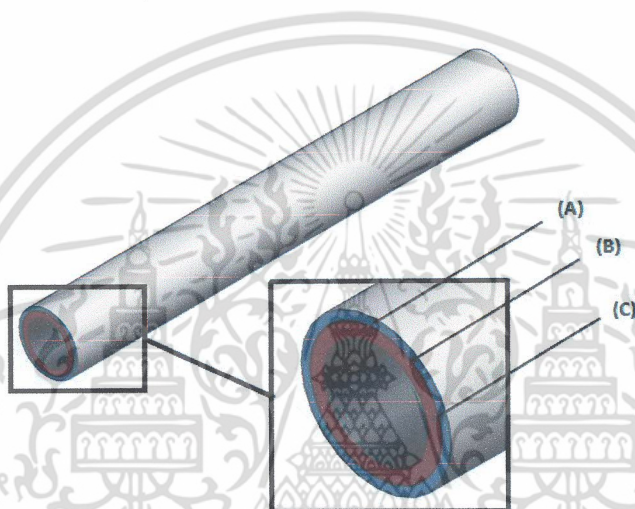
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับลักษณะรูปแบบพื้นฐานเบื้องต้นที่ใช้ออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งมีการไหลแบบสวนทางกัน (Counter-Flow)

#### 3.2.1 รูปทรงของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

แบบจำลองของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ในเบื้องต้นนั้นประกอบไปด้วย 3 ส่วนประกอบหลัก ช่องการไหลของอากาศดีที่ถูกเพิ่มอุณหภูมิและความดันจากคอมเพรสเซอร์ ช่องการไหลของก๊าซไอเสียซึ่งขยายตัวจากเทอร์ไบน์ โดยจะมีสแตนเลสแผ่นซึ่งเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศดีกับก๊าซไอเสีย ซึ่งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในเบื้องต้นนี้จะมีลักษณะแบบแอนนูลา (Annular) โดยอากาศดีกับก๊าซไอเสียจะเป็นการไหลแบบสวนทางกัน (Counter-Flow) โดยรูปทรงนี้จะจำลองเพื่อตรวจสอบแนวโน้มของการถ่ายเทความร้อนและผลของความดันในเบื้องต้น ดังภาพที่ 3.9



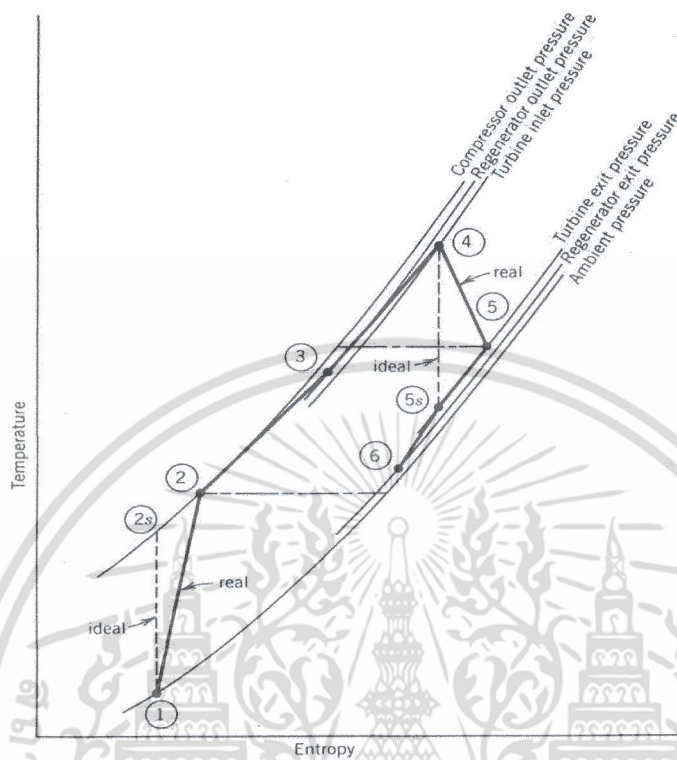
ภาพที่ 3.9 รูปทรงของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเบื้องต้นที่ใช้ในการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ประกอบไปด้วย 3 ส่วนประกอบหลักดังนี้ (A) ช่องการไหลของอากาศดี, (B) ตัวกลางสแตนเลสแผ่น, (C) ช่องการไหลของก๊าซไอเสีย

#### 3.2.2 เงื่อนไขขอบเขต

การจำลองวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ  $k-\epsilon$  RNG, Near-Wall Treatment, Enhanced Wall Treatment ซึ่งใช้เทคนิค Discretization แบบ High Resolution Scheme ที่ให้ความแม่นยำสูงกว่าวิธีแบบ First Order ทั่วไป [16] โดยค่าต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.15 และ 3.16 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากผลการคำนวณคุณสมบัติของวัสดุและของไหล ณ สภาวะต่างๆ และจากการออปติไมเซชันเบื้องต้น ลักษณะของการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตได้แสดงไว้ดังภาพที่ 3.12 โดยในที่นี้อากาศที่ไหลภายในถูกพิจารณาเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible flow) ซึ่งจะได้แสดงวิธีการคำนวณในลำดับถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2.1 การคำนวณคุณสมบัติของของไหลที่ใช้ในการจำลอง



ภาพที่ 3.10 แสดงแผนภาพ T-S ของกระบวนการจริงซึ่งพิจารณาความดันสูญเสียที่เกิดจากอุปกรณ์ของวัฏจักรเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบ ดึงความร้อนทิ้งกลับมาใช้งาน (ที่มา: Efficiency enhancement of a gas turbine cycle using an optimized tubular recuperative heat, Hoseyn Sayyaadi, Reza Mehrabipour., 2012)

ตารางที่ 3.11 ตัวแปรต่างๆ จากการทำออฟติไมเซชันเบื้องต้นเพื่อใช้ในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก [3]

ประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์ ( $\eta_c$ )	0.8
ประสิทธิภาพของห้องเผาไหม้ ( $\eta_{Comb}$ )	0.97
ประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์ ( $\eta_T$ )	0.8
ประสิทธิภาพผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ( $\mathcal{E}$ )	0.6
ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (LHV)	$18.4 \times 10^3$ kJ/kg
กำลังการผลิตไฟฟ้า ( $P_{gen}$ )	60,000 Watts
อัตราการไหลของมวลอากาศ ( $\dot{m}_a$ )	0.3919 kg/s
อัตราการไหลของมวลก๊าซไอเสีย ( $\dot{m}_g$ )	0.4076 kg/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.12 อุณหภูมิและความดันแต่ละสภาวะต่างๆ จากการทำออฟติไมเซชันเบื้องต้น [3]

อุณหภูมิ (K)		ความดัน (Pa)	
T <sub>1</sub>	306.65	P <sub>1</sub>	101,325
T <sub>2</sub>	581.237	P <sub>2</sub>	671,180
T <sub>3</sub>	774.977	P <sub>3</sub>	604,060
T <sub>4</sub>	1273.15	P <sub>4</sub>	543,660
T <sub>5</sub>	904.137	P <sub>5</sub>	112,580
T <sub>6</sub>	718.311	P <sub>6</sub>	101,325

1) ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ณ ความดันคงที่ (Specific Heat, Cp) [17]

ค่าความจุความร้อนจำเพาะจะคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยจากช่วงอุณหภูมิของ

ของไหลนั้นๆ ดังนี้

$$C_{p,avg.} = a + b(T_{avg.}) + c(T_{avg.})^2 + d(T_{avg.})^3 \quad (3.24)$$

โดยที่  $C_{p,avg.}$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ย ณ ความดันคงที่ (J/kg-K)

$T_{avg.}$  คือ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ย (K)

$a, b, c, d$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ มีค่าดังนี้

ตารางที่ 3.13 แสดงค่าของแต่ละตัวสัมประสิทธิ์

ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ			
a	b	c	d
28.11	$0.1967 \times 10^{-2}$	$0.4802 \times 10^{-5}$	$-1.966 \times 10^{-9}$

โดยที่

$$C_p \dots kJ / kmol \cdot K$$

$$\dots kJ / (kmol \times 28.85) \cdot K \Rightarrow kJ / kg \cdot K$$

เนื่องจาก  $MW_{Air} = 28.85 \text{ kg} / kmole$

ค่า  $C_p$  อากาศที่นั้นจะคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยของช่วงอุณหภูมิ  $T_2$  กับ  $T_3$

$$\bar{C}_p = a + b \left( \frac{T_3 + T_2}{2} \right) + c \left( \frac{T_3 + T_2}{2} \right)^2 + d \left( \frac{T_3 + T_2}{2} \right)^3 \quad (3.25)$$

ดังนั้น จากตารางที่ 3.12 แทนค่าอุณหภูมิ  $T_2$  กับ  $T_3$  จะได้ค่า  $C_p$  อากาศที่เท่ากับ 1075.8721

J/kg-K

ส่วนค่า  $C_p$  ของก๊าซไอเสียนั้นจะคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยของช่วงอุณหภูมิ  $T_5$  กับ  $T_6$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{C}_p = a + b \left( \frac{T_6 + T_5}{2} \right) + c \left( \frac{T_6 + T_5}{2} \right)^2 + d \left( \frac{T_6 + T_5}{2} \right)^3 \quad (3.26)$$

ดังนั้น จากตารางที่ 3.12 แทนค่าอุณหภูมิ  $T_5$  กับ  $T_6$  จะได้ค่า  $C_p$  ก๊าซไอเสียเท่ากับ 1102.8160 J/kg-K ส่วนค่า  $C_p$  ของสแตนเลสแผ่น (Stainless S304) นั้น จะมีค่าเท่ากับ 500 J/kg-K [18]

## 2) ค่าความหนาแน่น (Density, $\rho$ ) [19]

โดยกำหนดให้ทั้งอากาศดีและก๊าซไอเสียนั้นเป็นเสมือนอากาศแห้งเพื่อคำนวณค่าความหนาแน่น ณ ที่อุณหภูมิและความดัน นั้นๆ ดังนี้

$$\rho_{dry\ air} = \frac{P_{avg.}}{R \cdot T_{avg.}} \quad (3.27)$$

โดยที่  $\rho_{dry\ air}$  คือ ความหนาแน่นของอากาศแห้ง ( $\text{kg/m}^3$ )

$P_{avg.}$  คือ ความดันเฉลี่ย (Pa)

$R$  คือ ค่าคงที่จำเพาะของก๊าซของอากาศแห้ง, 287.05 (J/kg-K)

$T_{avg.}$  คือ อุณหภูมิเฉลี่ย (K)

ค่าความหนาแน่นของอากาศดีนั้นจะคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยของช่วงอุณหภูมิ  $T_2$  กับ  $T_3$  และ ค่าเฉลี่ยของช่วงความดัน  $P_2$  กับ  $P_3$

$$\rho_{air} = \frac{\left( \frac{P_3 + P_2}{2} \right)}{R \cdot \left( \frac{T_3 + T_2}{2} \right)} \quad (3.28)$$

ดังนั้น จากตารางที่ 3.12 แทนค่าอุณหภูมิ  $T_2$  กับ  $T_3$  และความดัน  $P_2$  กับ  $P_3$  จะได้ค่าความหนาแน่นอากาศดีเท่ากับ 3.2757  $\text{kg/m}^3$

ส่วนค่าความหนาแน่นของก๊าซไอเสียนั้นจะคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยของช่วงอุณหภูมิ  $T_5$  กับ  $T_6$  และค่าเฉลี่ยของช่วงความดัน  $P_5$  กับ  $P_6$

$$\rho_{air} = \frac{\left( \frac{P_6 + P_5}{2} \right)}{R \cdot \left( \frac{T_6 + T_5}{2} \right)} \quad (3.29)$$

ดังนั้น จากตารางที่ 3.12 แทนค่าอุณหภูมิ  $T_5$  กับ  $T_6$  และความดัน  $P_5$  กับ  $P_6$  จะได้ค่าความหนาแน่นอากาศดีเท่ากับ 0.4592  $\text{kg/m}^3$  ส่วนค่าความหนาแน่นของสแตนเลสแผ่น (Stainless S304) นั้นจะมีค่าเท่ากับ 8000  $\text{kg/m}^3$  [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity,  $k$  (W/m-K))

โดยจะคำนวณค่าการนำความร้อนของอากาศและก๊าซไอเสียจากค่าเฉลี่ยของช่วงอุณหภูมิและค่าเฉลี่ยของช่วงความดันซึ่งจากนั้นจะถูกนำไปทำการคำนวณเทียบค่าจากช่วงอุณหภูมิและความดันจากตารางที่ 3.14 ดังนี้

ตารางที่ 3.14 ค่าการนำความร้อนของอากาศ (Air Thermal Conductivity,  $k$ ) ณ อุณหภูมิและความดันต่างๆ [20]

$k \times 10^3$ , W/m-K ณ อุณหภูมิ (T) และความดัน (P)				
T (K)	P=1 (bar)	P=10 (bar)	P=100 (bar)	P=1000 (bar)
100	9.34	110.3	122.0	-
200	18.1	18.9	29.9	-
300	26.3	26.8	31.4	86.2
400	33.8	-	37.3	75.6
500	40.7	-	43.3	71.8
600	46.9	-	49.0	72.5
700	52.4	-	54.1	74.1
800	57.3	-	58.8	75.8

ค่าการนำความร้อนของอากาศดีนั้นจะคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยของช่วงอุณหภูมิ  $T_2$  กับ  $T_3$  และ ค่าเฉลี่ยของช่วงความดัน  $P_2$  กับ  $P_3$  จากตารางที่ 3.12 และเมื่อนำไปทำการคำนวณเทียบจากตารางที่ 3.14 จะได้ค่าการนำความร้อนของอากาศดีเท่ากับ 0.0510 W/m-K

ค่าการนำความร้อนของก๊าซไอเสียนั้นจะคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยของช่วงอุณหภูมิ  $T_5$  กับ  $T_6$  และ ค่าเฉลี่ยของช่วงความดัน  $P_5$  กับ  $P_6$  จากตารางที่ 3.2 และเมื่อนำไปทำการคำนวณเทียบจากตารางที่ 3.14 จะได้ค่าการนำความร้อนของก๊าซไอเสียเท่ากับ 0.0573 W/m-K ส่วนค่าการนำความร้อนของสแตนเลสแผ่น (Stainless S304) นั้นจะมีค่าเท่ากับ 16.2 W/m-K [18]

4) ค่าความหนืดพลวัตของอากาศ (Air Dynamic viscosity,  $\mu$  (N-s/m<sup>2</sup>))

ค่าความหนืดพลวัตของอากาศดีและก๊าซไอเสียคำนวณจากค่าเฉลี่ยของช่วงอุณหภูมิและค่าเฉลี่ยของช่วงความดันซึ่งจากนั้นจะถูกนำไปทำการคำนวณเทียบค่าจากช่วงอุณหภูมิและความดันจากตารางที่ 3.15 ดังนี้

ตารางที่ 3.15 ค่าความหนืดพลวัตของอากาศ (Air Dynamic viscosity,  $\mu$ ) ณ อุณหภูมิและความดันต่างๆ [20]

$\mu \times 10^7$ , N-s/m <sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ (T) และความดัน (P)				
T (K)	P=1 (bar)	P=10 (bar)	P=100 (bar)	P=1000 (bar)
100	71.1	837.8	1019	-
200	132.5	134.6	1812	-
300	184.6	185.9	205.0	545.5
400	230.1	231.2	243.4	463.4
500	270.1	270.9	279.9	437.5
600	305.8	306.4	313.6	434.7
700	338.8	339.4	345.3	442.7
800	369.8	370.3	375.4	456.4
900	398.1	398.5	403.0	472.0
1000	424.4	424.8	428.7	488.7
1100	449.0	449.3	452.8	505.8
1200	473.0	473.2	476.5	523.7
1300	496.0	496.3	499.2	541.8

ค่าความหนืดพลวัตของอากาศที่นั่นจะคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยของช่วงอุณหภูมิ  $T_2$  กับ  $T_3$  และ ค่าเฉลี่ยของช่วงความดัน  $P_2$  กับ  $P_3$  จากตารางที่ 3.12 และเมื่อนำไปทำการคำนวณเทียบจากตารางที่ 3.15 จะได้ค่าความหนืดพลวัตของอากาศดีเท่ากับ  $3.31934 \times 10^{-5}$  kg/m-s

ค่าความหนืดพลวัตของก๊าซไอเสียนั้นจะคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยของช่วงอุณหภูมิ  $T_5$  กับ  $T_6$  และ ค่าเฉลี่ยของช่วงความดัน  $P_5$  กับ  $P_6$  จากตารางที่ 3.12 และเมื่อนำไปทำการคำนวณเทียบจากตารางที่ 3.15 จะได้ค่าความหนืดพลวัตของก๊าซไอเสียเท่ากับ  $3.7298 \times 10^{-5}$  kg/m-s

### 3.2.2.2 การคำนวณเพื่อตรวจสอบลักษณะการไหลของของไหล [17]

การไหลของของไหลภายในช่องการไหลนั้นมีอยู่ด้วยกันสองแบบ หากพิจารณาจากความหนาแน่น นั่นก็คือ

- 1) การไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Flow) ซึ่งการไหลแบบนี้ความหนาแน่นของ Fluid จะเท่ากันตลอด หรือ  $\rho$  คงที่
- 2) การไหลแบบอัดตัวได้ (Compressible Flow) ซึ่งการไหลแบบนี้ความหนาแน่นของ Fluid  $\rho$  ไม่คงที่ ดังนั้นจะต้องทำการตรวจสอบของไหลที่ใช้ในการจำลองก่อนว่าเป็นการไหลแบบอัดตัวได้หรืออัดตัวไม่ได้ โดยพิจารณาจากค่าเลขมัค (Mach Number, Ma) ดังนี้

Ma < 0.3 เป็น Incompressible Flow

Ma > 0.3 เป็น Compressible Flow

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Ma = \frac{\text{Velocity}}{\text{Sound Speed}} = \frac{V}{C} \quad (3.30)$$

$$C = \sqrt{kRT} \quad (3.31)$$

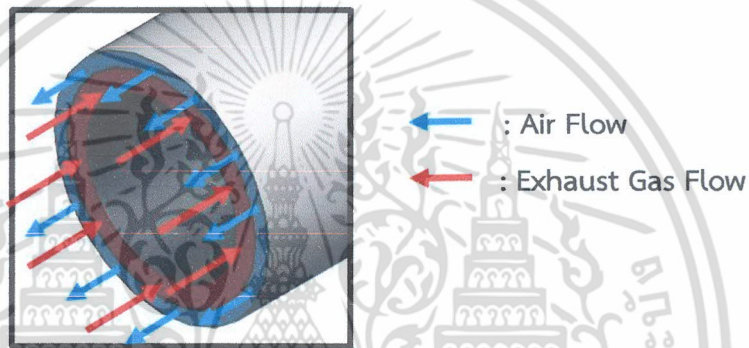
โดยที่  $\rho_{dry\ air}$  คือ ความหนาแน่นของอากาศแห้ง ( $\text{kg/m}^3$ )

$V$  คือ ค่าความเร็วภายในช่องการไหล (Velocity) (m/s)

$C$  คือ ค่าความเร็วเสียง (Sound Speed) (m/s)

$k$  คือ ค่าอัตราส่วนความร้อนจำเพาะของก๊าซในอุดมคติ (Specific Heat Ratio) มีค่าเท่ากับ 1.4

$R$  คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (Gas Constant) มีค่าเท่ากับ 287.05 (J/kg-K)



ภาพที่ 3.11 แสดงลักษณะการไหลของอากาศดีและก๊าซไอเสียภายในช่องการไหล

จากรูปแบบช่องการไหลที่ได้ออกแบบจำลองเพื่อตรวจสอบเบื้องต้นนั้น สามารถคำนวณค่า Mach Number ได้ดังนี้

พิจารณาช่องการไหลอากาศดี

คำนวณค่าความเร็วภายในช่องการไหล

จากสมการความต่อเนื่อง

$$\dot{m} = \rho VA \quad (3.32)$$

$$V = \frac{\dot{m}_a}{\rho A} \quad (3.33)$$

จากสมการคำนวณ Mach Number เบื้องต้นจะได้ว่า

$$Ma = \frac{\text{Velocity}}{\text{Sound Speed}} = \frac{V}{C} = \frac{(\dot{m} / \rho A)}{\sqrt{kRT}} \quad (3.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าของตัวแปรต่างๆที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้สำหรับของไหลแต่ละช่องการไหลจะได้ค่า Mach Number คือ

- Mach Number ของอากาศดี มีค่าเท่ากับ 0.002003103 ( $Ma < 0.3$  เป็น Incompressible Flow)
- Mach Number ของก๊าซไอเสีย มีค่าเท่ากับ 0.0094998 ( $Ma < 0.3$  เป็น Incompressible Flow)

ตารางที่ 3.16 ตารางคุณสมบัติวัสดุและของไหลที่ใช้ในการจำลอง (Material Properties)

คุณสมบัติ (Properties)	สแตนเลสแผ่น (Stainless S304)	อากาศดี (Air)	ก๊าซไอเสีย (Exhaust Gas)
ความหนาแน่น (Density, $\rho$ )	8000 (kg/m <sup>3</sup> )	3.2757 (kg/m <sup>3</sup> )	0.4592 (kg/m <sup>3</sup> )
ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ณ ความดันคงที่ (Specific Heat, $C_p$ )	500 (J/kg-K)	1075.8721 (J/kg-K)	1102.8160 (J/kg-K)
ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity, $k$ )	16.2 (W/m-K)	0.0510 (W/m-K)	0.0573 (W/m-K)
ค่าความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity, $\mu$ )	-	3.31934e-05 (kg/m-s)	3.7298e-05 (kg/m-s)

ตารางที่ 3.17 แสดงค่าขอบเขตและเงื่อนไขในการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ตำแหน่ง	ค่าที่กำหนด	
ทางเข้าอากาศดี (Air Inlet)	Mass Flow Rate (kg/s)	0.01088611
	Temperature(K)	581.237
ทางออกอากาศดี (Air Outlet)	Gauge Pressure (Pa)	469825.3
ทางเข้าก๊าซไอเสีย (Exhaust Gas Inlet)	Mass Flow Rate (kg/s)	0.01132222
	Temperature(K)	904.137
ทางออกก๊าซไอเสีย (Exhaust Gas Inlet)	Gauge Pressure (Pa)	101317.5
ผิวผนังด้านนอกของอากาศดีและก๊าซไอเสีย	กำหนดเป็นผนัง (Wall) ไม่มี Heat Flux	-
แบบจำลองความปั่นป่วน	k- $\epsilon$ RNG , Near-Wall Treatment, Enhanced Wall Treatment	-
การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับตัวกลางของแข็ง	การถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกต เกต Conjugate Heat Transfer	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.17 แสดงค่าขอบเขตและเงื่อนไขในการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (ต่อ)

ตำแหน่ง	ค่าที่กำหนด	
กำหนดให้เป็น Periodic เพื่อช่วยลดจำนวนเมช	Rotationally Periodic (10 degree)	-
ลักษณะการไหล	การไหลไม่อัดตัว (Incompressible Flow)	-

### 3.2.3 การคำนวณพื้นที่ผิวที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด ( $A_s$ , Total heat transfer area ( $m^2$ ))

ในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเครื่องยนต์กังหันก๊าซเทอร์โบ สิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งคือพื้นที่ผิวที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน ถ้าพื้นที่ผิวยิ่งมากก็จะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนได้มากขึ้นตามไปด้วยและจะเป็นตัวแปรที่มีผลโดยตรงต่อขนาดของชุดเครื่องยนต์กังหันก๊าซเทอร์โบ การคำนวณพื้นที่ผิวที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Counter-flow มีการคำนวณเบื้องต้น ดังนี้ [17]

จาก สูตร NTU (The Number of Transfer Units) สำหรับการไหลแบบ Counter-flow คือ

$$NTU = \frac{1}{c-1} \ln \left( \frac{\mathcal{E}-1}{\mathcal{E}c-1} \right) \quad (3.35)$$

โดย  $\mathcal{E}$  คือค่า ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger Effectiveness) และ  $c$  คือค่า Capacity ratio มีค่าดังสมการด้านล่าง

$$c = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \quad (3.36)$$

โดยจะมีค่า  $C_i$  ที่เรียกว่าค่า Heat capacity rate ของของไหลแต่ละชนิด โดย  $C_i = (\dot{m}c_p)_i$  ถ้าค่า  $C_i$  ของไหลไหนที่มีค่ามากกว่าจะถือว่าเป็น  $C_{\max}$  ส่วนของไหลอีกตัวที่มีค่าน้อยกว่าจะเป็น  $C_{\min}$

จากความสัมพันธ์

$$NTU = \frac{UA_s}{C_{\min}} \quad (3.37)$$

โดยที่  $U$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Heat Transfer Coefficient ( $W/m^2 \cdot K$ ))

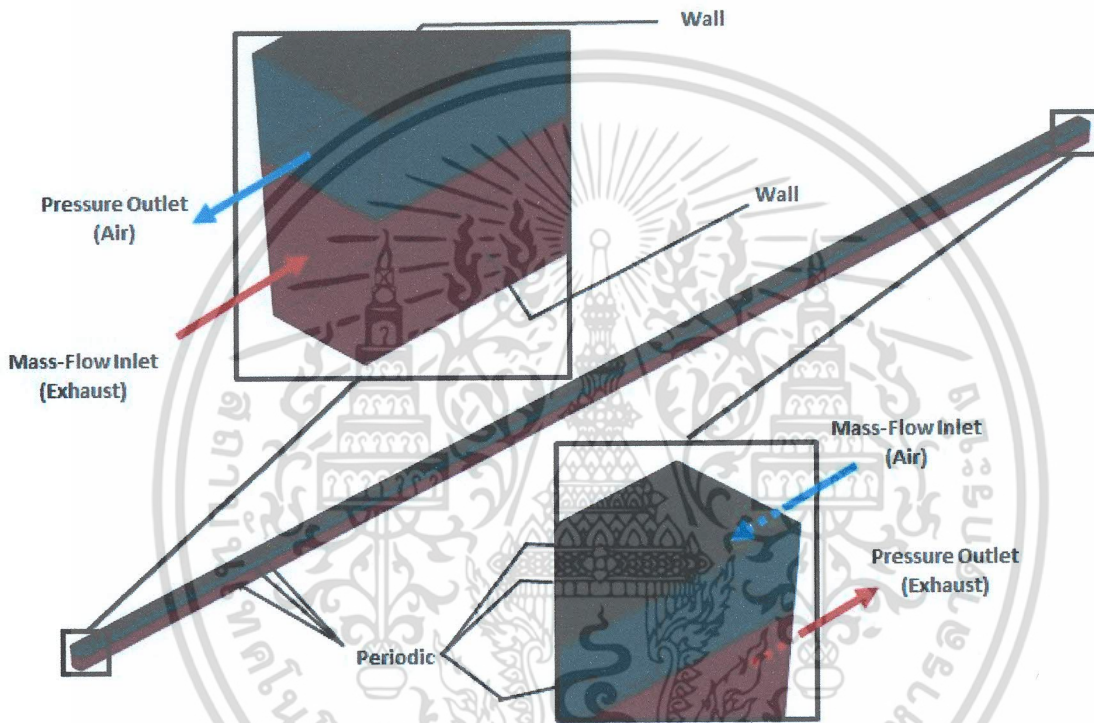
$A_s$  คือ ค่าพื้นที่ผิวที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด (Total heat transfer area ( $m^2$ ))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการข้างต้น จะได้สมการคำนวณหาพื้นที่ผิวที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด คือ

$$A_s = \frac{NTU \cdot C_{\min}}{U} = \frac{NTU \cdot (\dot{m}c_p)_{\min}}{U} \quad (3.38)$$

และเมื่อแทนค่าจากค่าตัวแปรต่างๆที่ได้กล่าวมาแล้วจากข้างต้นจะได้ค่าพื้นที่ผิวที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด เท่ากับ 14.6547 m<sup>2</sup> ซึ่งจะนำไปคำนวณหาขนาดของช่องการไหลเพื่อใช้ในการจำลองเบื้องต้น



ภาพที่ 3.12 เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

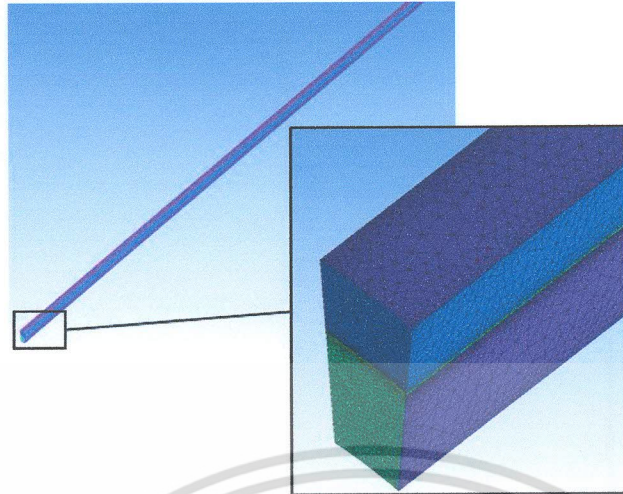
### 3.2.4 เมช (Mesh)

เมชที่ใช้ในการคำนวณเป็นเอลิเมนต์ชนิดปิรามิดฐานสามเหลี่ยมผสม (Tetrahedral/Mixed Element) โดยใช้จำนวนของเมชที่แตกต่างกันดังตารางที่ 3.18 เพื่อพิจารณาความเป็นอิสระของเมช (Mesh Independence) และผลการจำลองเป็นไปดังภาพที่ 3.13

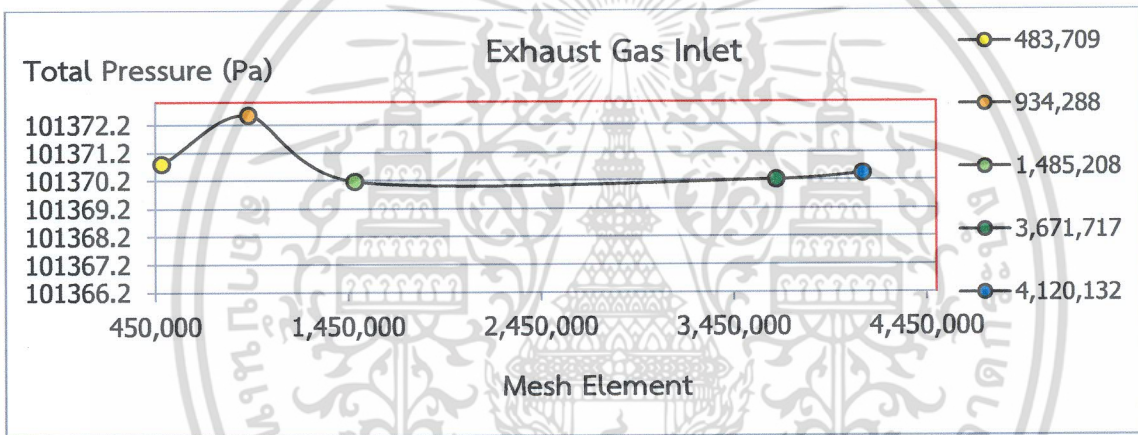
ตารางที่ 3.18 การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยการทำให้ Mesh Independence

ช่องการไหลของอากาศดี	ช่องการไหลของก๊าซไอเสีย	ตัวกลางมีสแตนเลสแผ่น	รวม
126,533	185,144	172,032	483,709
265,609	282,402	386,277	934,288
545,713	544,764	394,731	1,485,208
1,362,426	1,872,330	436,961	3,671,717
1,633,074	1,769,360	717,705	4,120,139

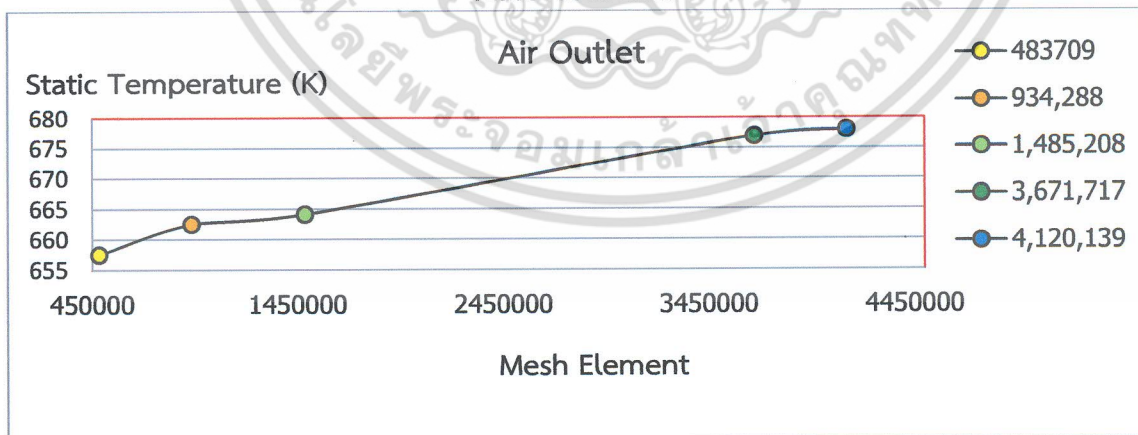
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.13 เมชสามมิติของช่องการไหลอากาศดีและก๊าซไอเสียซึ่งไหลระหว่างตัวกลางแผ่นสแตนเลส



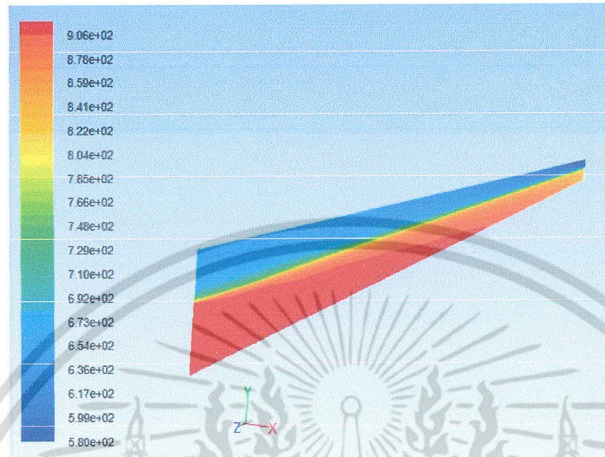
ภาพที่ 3.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน Mesh Element กับค่า Total Pressure ของก๊าซไอเสียที่ไหลเข้าช่องการไหล



ภาพที่ 3.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน Mesh Element กับค่า Static Temperature ของอากาศดีที่ไหลออกจากช่องการไหล

จากภาพที่ 3.14 และ 3.15 เมื่อพิจารณาจำนวนเมชที่เพิ่มขึ้นแตกต่างกันทั้ง 5 ค่านั้น จะเห็นได้ว่าช่วงห่างระหว่างเมชที่มีจำนวนน้อยที่สุดกับมากที่สุดถึงแม้จะมีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมากก็ตาม แต่ผลการจำลองที่ได้ออกมาไม่ว่าจะเป็นค่า Total Pressure หรือค่า Static Temperature นั้น หากพิจารณาผลที่แตกต่างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กันเป็นเปอร์เซ็นต์แล้วค่อนข้างน้อยมาก จึงกล่าวได้ว่าการทำเมซอิสระจากข้างต้นนั้นเราสามารถนำค่าเมซค่าใดค่าหนึ่งใน 5 ค่านั้นมาใช้จำลองผลได้ แต่หากนำแนวโน้มของค่าที่เริ่มเสถียรและเวลาที่ใช้ในการจำลองมาพิจารณาร่วมด้วยนั้นก็ควรที่จะเลือกกรณีที่ใช้ค่าเมซเท่ากับ 1,485,208 มาทำการจำลองวิเคราะห์ผล จะได้ค่าตามตารางที่ 3.19 ดังนี้



ภาพที่ 3.16 แสดงค่า contour ของ Static Temperature (K) ที่ Center Plane

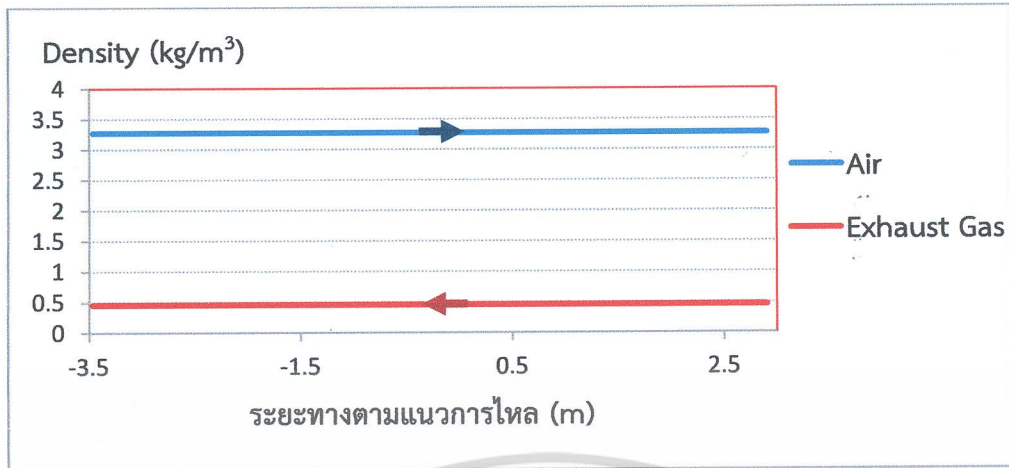
ตารางที่ 3.19 แสดงผลบางส่วนที่ได้จากการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยใช้ค่าเมซที่ 1,485,208

ค่าตัวแปร	อากาศดี		ก๊าซไอเสีย	
	ที่ทางเข้าช่อง การไหล	ที่ทางออกช่อง การไหล	ที่ทางเข้าช่อง การไหล	ที่ทางออกช่อง การไหล
Static Temperature (K)	581.24	664.13	904.14	831.19
Total Pressure (Pa)	469836.22	469826.97	101370.16	101325.62
Velocity (m/s)	0.97	0.97	5.73	5.73

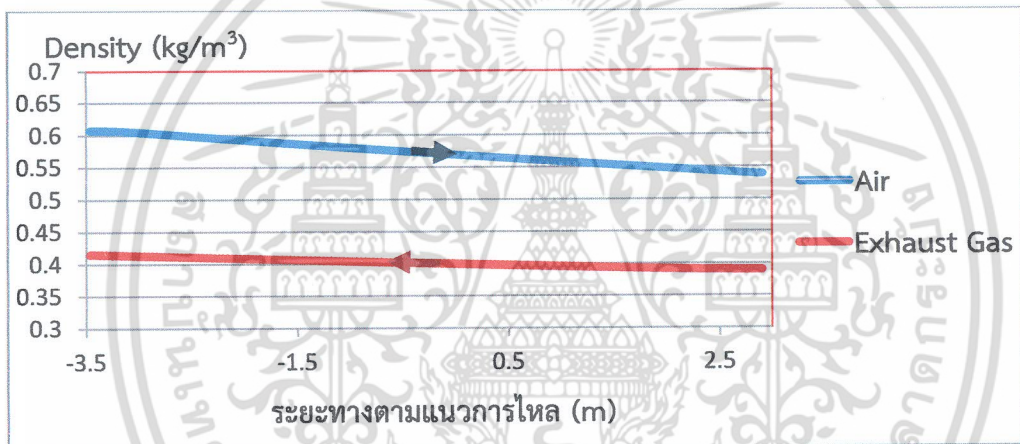
จากตารางที่ 3.19 เป็นค่าที่ได้จากการจำลองเพื่อตรวจสอบแนวโน้มของค่าต่างๆ อาทิเช่น ค่าอุณหภูมิจากผลของการถ่ายเทความร้อน ค่าของความดัน ที่ได้มีการคำนวณไว้ในเบื้องต้นเพื่อที่จะนำไปสู่การออกแบบรูปทรงของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้อย่างเหมาะสม ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองนี้จะมีค่าที่ต่างจากค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการสหสัมพันธ์สำหรับการถ่ายเทความร้อนแบบไหลสวนทางกัน (Counter-Flow) ฉะนั้นจะต้องมีการพิจารณาการจำลองที่เป็นการเผื่อค่าความคลาดเคลื่อนรวมเข้าไปด้วย เพื่อที่จะสามารถออกแบบให้ได้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับเป้าหมายที่ตั้งไว้

จากเงื่อนไขการทำแบบจำลองซึ่งกำหนดให้เป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Flow) นั้นก็เพื่อให้ง่ายในการทำแบบจำลองและได้ทำการทำแบบจำลองเพื่อแสดงให้เห็นข้อแตกต่างของการไหลแบบอัดตัวได้ (Compressible Flow) และอัดตัวไม่ได้ของค่าความหนาแน่นและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลที่เกิดขึ้น โดยผลที่ได้แสดงตามภาพที่ 3.17 ถึง 3.20

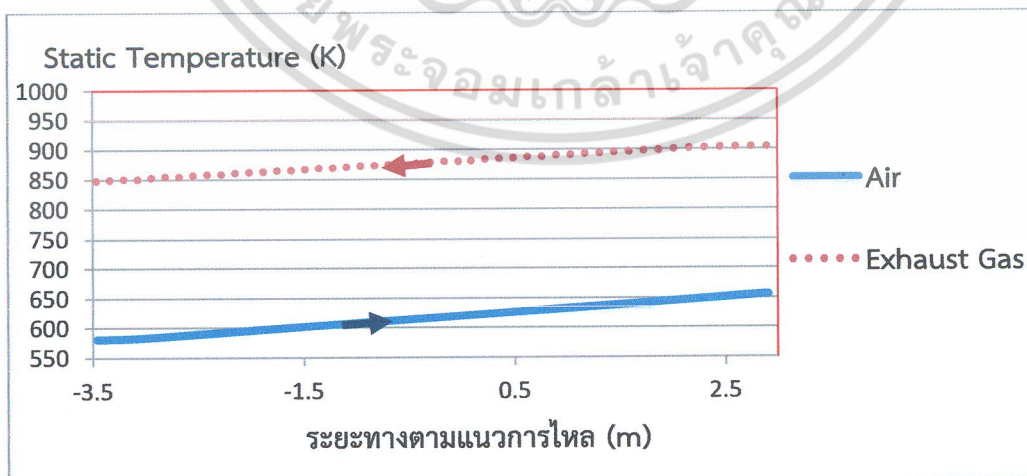
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.17 แสดงค่าความหนาแน่นของของไหลทั้งสองตามแนวการไหลสำหรับการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Flow)

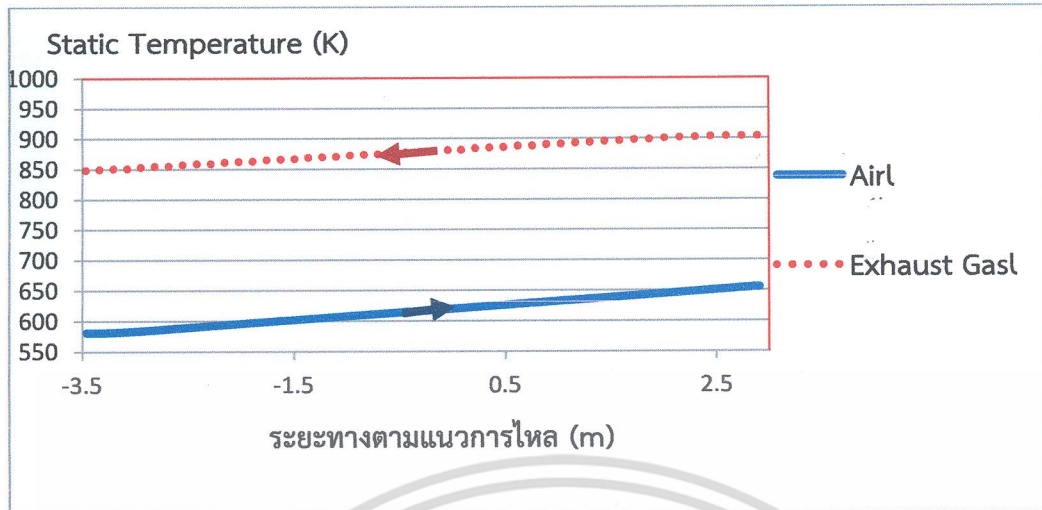


ภาพที่ 3.18 แสดงค่าความหนาแน่นของของไหลทั้งสองตามแนวการไหลสำหรับการไหลแบบอัดตัวได้ (Compressible Flow)



ภาพที่ 3.19 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลทั้งสองตามแนวการไหลสำหรับการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Flow)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.20 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลทั้งสองตามแนวการไหลสำหรับการไหลแบบอัดตัวได้ (Compressible Flow)

จากภาพที่ 3.16 ถึง 3.20 จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นสำหรับการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ นั้นจะมีค่าคงที่ตลอดตามแนวการไหลซึ่งต่างจากการไหลแบบอัดตัวได้ซึ่งจะไม่คงที่อันเนื่องมาจากอิทธิพลของอุณหภูมิและความดันที่เปลี่ยนแปลงตามแนวการไหล แต่หากพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการไหลทั้งสองแบบนี้ จะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันมาก สำหรับงานวิจัยนี้จะเป็นการทำแบบจำลองเพื่อนำไปใช้ประยุกต์สำหรับการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อให้ได้อุณหภูมิที่ทางออกของอากาศดีตามที่มุ่งหวังไว้ ดังนั้นเพื่อความง่ายในการทำแบบจำลองจึงสามารถกำหนดให้ของไหลมีการไหลแบบอัดตัวไม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

#### 4.1 รูปทรงและพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

จากที่ได้มีการกำหนดให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีลักษณะแบบแอนนูลา (Annular) โดยอากาศดีกับก๊าซไอเสียจะเป็นการไหลแบบสวนทางกัน (Counter-Flow) ในเบื้องต้นแล้ว จากนั้นจึงทำการออกแบบรูปทรงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นและความดันที่ลดลงตามเป้าหมาย ได้มีการออกแบบให้ตัวกลางสแตนเลสแผ่นที่กั้นระหว่างอากาศดีกับก๊าซไอเสียนั้นมีลักษณะรูปทรงเป็นแผ่นพับที่มีช่องว่างภายในระหว่างแผ่นพับสำหรับให้อากาศทั้งสองไหลสวนทางกันสัมผัสกับพื้นที่ผิวตัวกลางมากที่สุด ดังรูปที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 รูปทรงของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ไหลแบบสวนทางกัน (Counter-Flow) โดยตัวกลางกลางสแตนเลสมีรูปทรงเป็นแผ่นพับ ประกอบไปด้วย 3 ส่วนประกอบหลักดังนี้ 1. ช่องการไหลของอากาศ 2. ตัวกลางสแตนเลสแผ่นพับ 3. ช่องการไหลของก๊าซไอเสีย

โดยในการออกแบบรูปทรงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้น นอกจากออกแบบรูปทรงของตัวกลางกลางสแตนเลสแผ่นพับแล้วจะต้องออกแบบรูปทรงของช่องการไหลทั้งของอากาศดีและก๊าซไอเสียด้วยโดยผู้ทำการวิจัยได้มีการออกแบบช่องการไหลของอากาศของชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยจะมีโมเดลซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของช่องการไหลที่แตกต่างกัน 3 แบบ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 4.1.1 การคำนวณพื้นที่ผิวเพื่อใช้แลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

จากบทที่ 3 นำตัวแปรที่ได้จากการทำออฟติไมเซชันรวมถึงค่าคุณสมบัติของวัสดุซึ่งคำนวณได้จากเบื้องต้นมาทำการคำนวณหาพื้นที่ผิวที่ใช้สำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศดีกับก๊าซไอเสียสำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เป็นการไหลแบบสวนทางกัน (Counter-Flow) ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ตารางตัวแปรและคุณสมบัติของของไหลที่ใช้ในการคำนวณพื้นที่ผิวการแลกเปลี่ยนความร้อน

ค่าตัวแปรและคุณสมบัติ	อากาศดี (Air)	ก๊าซไอเสีย (Exhaust Gas)
ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ณ ความดันคงที่ (Specific Heat, $C_p$ )	1075.8721 (J/kg-K)	1102.8160 (J/kg-K)
Mass Flow Rate	0.3919 (kg/s)	0.4076 (kg/s)
ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ( $\mathcal{E}$ )	0.6	
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ( $U$ )	ช่วง 11.356 – 34.068 (W/m <sup>2</sup> -K) [21]	

จาก สูตร NTU (The Number of Transfer Units) สำหรับการไหลแบบ Counter-flow คือ

$$NTU = \frac{1}{c-1} \ln \left( \frac{\mathcal{E}-1}{\mathcal{E}c-1} \right) \quad (4.1)$$

สมการ Capacity ratio ( $c$ ) มีค่าดังสมการด้านล่าง

$$c = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \quad (4.2)$$

โดยค่า Heat capacity rate ( $C_i$ ) มีค่าคือ  $C_i = (\dot{m}c_p)_i$

แทนค่าตัวแปรของอากาศดีและก๊าซไอเสียเพื่อคำนวณค่า Capacity rate จะได้ดังต่อไปนี้

$$C_{Air} = (\dot{m}c_p)_{Air} = 0.3919 \times 1075.8721 = 421.634 \text{ W/K}$$

$$C_{Exhaust \text{ Gas}} = (\dot{m}c_p)_{Exhaust \text{ Gas}} = 0.4076 \times 1102.8160 = 449.508 \text{ W/K}$$

ซึ่งค่า  $C_{Exhaust \text{ Gas}} > C_{Air}$

ฉะนั้นจะได้ว่า  $C_{Exhaust \text{ Gas}}$  คือ  $C_{\max}$  และ  $C_{Air}$  คือ  $C_{\min}$

แทนค่า  $C_{\max}$  และ  $C_{\min}$  ลงในสมการ (4.2) จะได้

$$c = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{421.634}{449.508} = 0.938$$

แทนค่า Capacity ratio ( $c$ ) ที่คำนวณได้และค่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ( $\mathcal{E}$ ) จาก ตารางที่ 4.1 ลงในสมการ (4.1) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$NTU = \frac{1}{c-1} \ln\left(\frac{\mathcal{E}-1}{\mathcal{E}c-1}\right) = \frac{1}{0.938-1} \ln\left(\frac{0.6-1}{0.6 \times 0.938-1}\right) = 1.434$$

จากความสัมพันธ์  $NTU = \frac{UA_s}{C_{\min}}$  (4.3)

โดย  $A_s$  คือ ค่าพื้นที่ผิวที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด (Total heat transfer area (m<sup>2</sup>))  
จากสมการข้างต้น จะได้สมการคำนวณหาพื้นที่ผิวที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด คือ

$$A_s = \frac{NTU \cdot C_{\min}}{U} = \frac{NTU \cdot (\dot{m}c_p)_{\min}}{U} \quad (4.4)$$

เพื่อที่จะให้ได้มาซึ่งพื้นที่ผิวสำหรับการถ่ายเทความร้อน จะมีตัวแปรตั้งต้นบางตัวที่ยังไม่ทราบค่า  
ตั้งจะเห็นได้จากตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ( $U$ ) สำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยน  
ความร้อนแบบคอมแพคที่มีของไหลเป็นก๊าซ จะมีค่าอยู่ในช่วง 11.356 – 34.068 (W/m<sup>2</sup>-K) [21] โดยค่า  
 $U$  นั้นจะสมมติให้ใช้ค่าที่มากกว่าค่า 11.356 อยู่ 30 เปอร์เซ็นต์ จะได้ค่า  $U$  ที่ใช้คำนวณคือ 14.989  
และเมื่อแทนค่า  $NTU$ ,  $U$  และ  $C_{\min}$  ลงในสมการที่ (4.4) จะได้ดังนี้

$$A_s = \frac{NTU \cdot C_{\min}}{U} = \frac{NTU \cdot C_{Air}}{U} = \frac{1.434 \times 421.634}{14.989} = 40.338 \text{ m}^2$$

ดังนั้นจะได้ค่าพื้นที่ผิวที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด เท่ากับ 40.338 m<sup>2</sup> ทั้งนี้ค่าที่ได้นี้เป็น  
เพียงค่าเริ่มต้นที่ใช้สร้างพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนในแบบจำลอง 3 มิติ ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

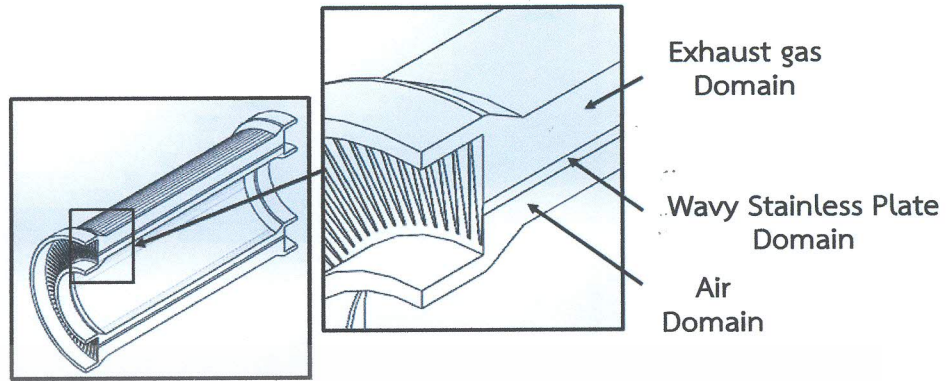
หลังจากที่คำนวณได้พื้นที่ผิวที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดแล้ว จากนั้นทำการออกแบบช่อง  
การไหลที่มีรูปทรงเป็นแผ่นพับที่มีช่องว่างภายในระหว่างแผ่นพับสำหรับให้อากาศทั้งสองไหลสวนทางกัน  
โดยจะทำการออกแบบช่องการไหลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของช่องการไหลที่แตกต่างกัน  
อยู่ 3 แบบ เพื่อที่จะศึกษาผลกระทบของการปรับเปลี่ยนขนาดช่องการไหลที่มีต่อการถ่ายเทความร้อน โดย  
ที่โมเดลทั้งสามแบบนี้มีพื้นที่ผิวที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดเท่ากัน(อ้างอิงตามภาคผนวก ค)

## 4.2 การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ช่วยวิเคราะห์ (Computational Fluid Dynamics)

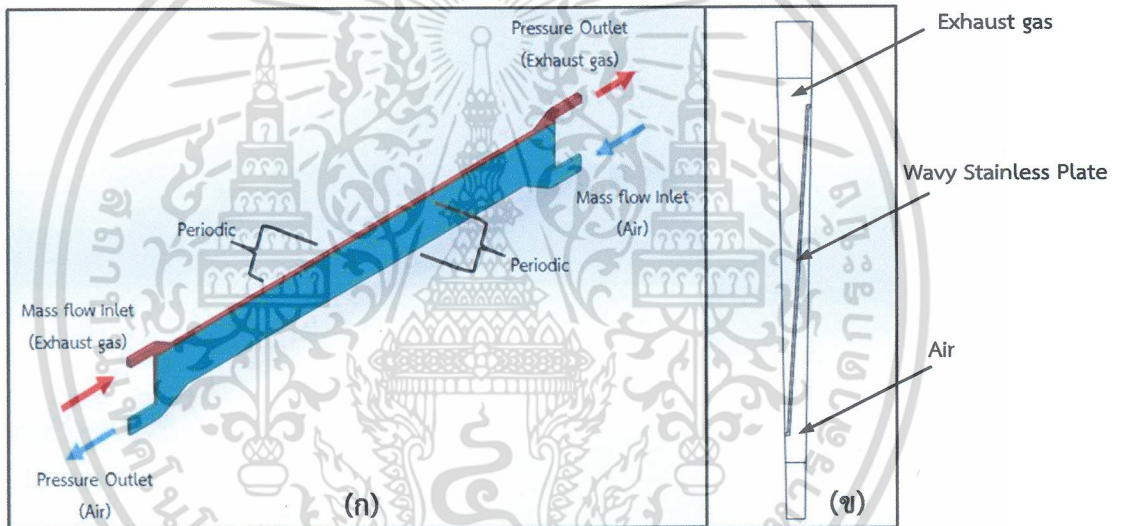
### 4.2.1 เงื่อนไขขอบเขต

เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการจำลองวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในงานวิจัยที่กำหนด  
ชนิดของแบบจำลองรวมถึงเทคนิค ที่ใช้เพื่อให้เกิดความแม่นยำขึ้น ซึ่งค่าต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งเป็น  
ค่าที่ได้จากผลการคำนวณคุณสมบัติของวัสดุและของไหล ณ สภาวะต่างๆ และจากการออฟติไมเซชันได้มี  
การพิจารณาไปแล้วในเบื้องต้นรวมถึงการเลือกจำนวนเมช โดยการทำให้แบบจำลองของอุปกรณ์แลกเปลี่ยน  
ความร้อนที่ต่างกันทั้งสามแบบจะมีเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการจำลองวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณตาม  
ตารางที่ 4.2 และ 4.3 ด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.2 แสดงภาพตัดขวางด้านข้างของลักษณะรูปทรงของแบบจำลองทั้งสามส่วนอันประกอบด้วยส่วนของ 1.อากาศดี (Air Domain) 2.ตัวกลางสแตนเลสแผ่นพับ (Wavy Stainless Plate Domain) 3.ก๊าซไอเสีย (Exhaust gas Domain)



ภาพที่ 4.3 เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่เป็นแบบ Rotationally Periodic (2 degree) (ก) ภาพ Isometric (ข) ภาพ Front side

ตารางที่ 4.2 ตารางคุณสมบัติวัสดุและของไหลที่ใช้ในการจำลอง (Material Properties)

คุณสมบัติ (Properties)	สแตนเลสแผ่น (Stainless S304)	อากาศดี (Air)	ก๊าซไอเสีย (Exhaust Gas)
ความหนาแน่น (Density, $\rho$ )	8000 (kg/m <sup>3</sup> )	3.2757 (kg/m <sup>3</sup> )	0.4592 (kg/m <sup>3</sup> )
ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ณ ความดันคงที่ (Specific Heat, $C_p$ )	500 (J/kg-K)	1075.8721 (J/kg-K)	1102.8160 (J/kg-K)
ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity, $k$ )	16.2 (W/m-K)	0.0510 (W/m-K)	0.0573 (W/m-K)
ค่าความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity, $\mu$ )	-	3.31934e-05 (kg/m-s)	3.7298e-05 (kg/m-s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าขอบเขตและเงื่อนไขในการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ตำแหน่ง	ค่าที่กำหนด	
ทางเข้าอากาศดี (Air Inlet)	Mass Flow Rate (kg/s)	0.0021772
	Temperature(K)	581.237
ทางออกอากาศดี (Air Outlet)	Gauge Pressure (Pa)	398886.7
ทางเข้าก๊าซไอเสีย ( Exhaust Gas Inlet)	Mass Flow Rate (kg/s)	0.0022644
	Temperature(K)	904.137
ทางออกก๊าซไอเสีย (Exhaust Gas Inlet)	Gauge Pressure (Pa)	7.76
ผิวผนังด้านนอกของอากาศดีและก๊าซไอเสีย	กำหนดเป็นผนัง (Wall) ไม่มี Heat Flux	-
แบบจำลองความปั่นป่วน	k- $\epsilon$ RNG , Near-Wall Treatment, Enhanced Wall Treatment	-
การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับตัวกลางของแข็ง	การถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกต Conjugate Heat Transfer	-
กำหนดให้เป็น Periodic เพื่อช่วยลดจำนวนเมช	Rotationally Periodic (2 degree)	-
ลักษณะการไหล	การไหลไม่อัดตัว (Incompressible Flow)	-

ก่อนที่จะนำเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการจำลองวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่กล่าวไว้ข้างต้นไปทำโปรแกรมแบบจำลอง จะทำการคำนวณเพื่อหาค่าปริมาณการถ่ายเทความร้อนที่ต้องการสำหรับอากาศดี ดังต่อไปนี้  
จากสมการอัตราการถ่ายเทความร้อน

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p (T_e - T_i) \quad (4.5)$$

สามารถคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ต้องการสำหรับอากาศดีได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{Air} = \dot{m}_{Air} C_{p,Air} (T_{e,Air} - T_{i,Air})$$

นำตัวแปรจากการทำออฟติไมเซชันรวมถึงค่าคุณสมบัติของวัสดุและของไหลซึ่งคำนวณไว้เบื้องต้นจากบทที่ 3 มาแทนในสมการจะได้ คือ

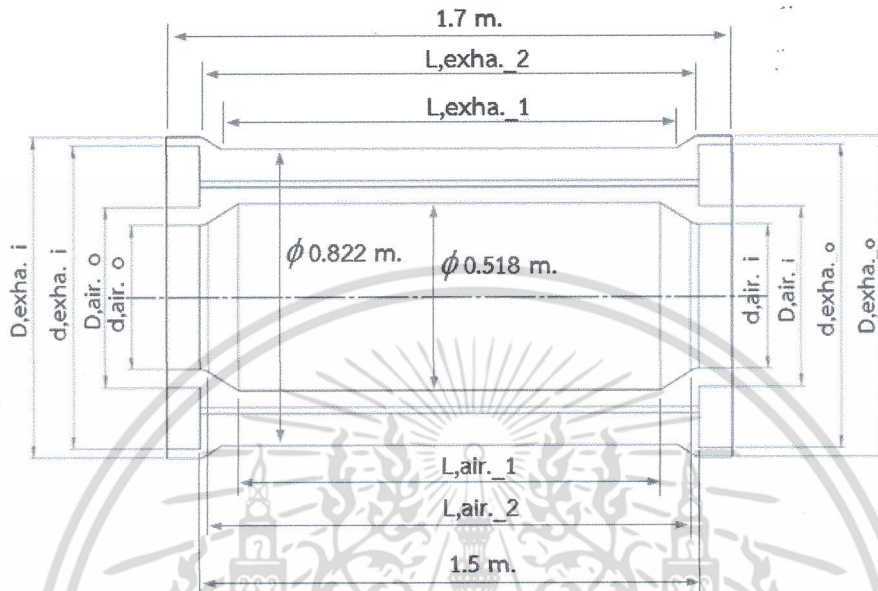
$$\dot{Q}_{Air} = \dot{m}_{Air} C_{p,Air} (T_{e,Air} - T_{i,Air}) = 0.3919 \times 1075.8721 \times (774.977 - 581.237) = 81687.371 \text{ W}$$

ดังนั้นจะได้ค่าปริมาณการถ่ายเทความร้อนที่ต้องการสำหรับอากาศดี เท่ากับ 81687.371 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ผลที่ได้จากการจำลองวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่แตกต่างกันทั้งสามแบบซึ่งถูกทำแบบจำลองนั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของช่องการไหลตามรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 4.4 รูปทรงของช่องการไหลที่มีขนาดแตกต่างกันของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 3 แบบ โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะช่องการไหลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 3 โมเดล

แบบที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของช่องการไหลที่ทางเข้าและออก (หน่วย: m)					
	อากาศ (Air)					
	เส้นผ่านศูนย์กลางด้านทางเข้า (Inlet)		เส้นผ่านศูนย์กลางด้านทางออก (Outlet)		ความยาว	
	(D,air_i)	(d,air_i)	(D,air_o)	(d,air_o)	L, air_1	L, air_2
1.	0.50	0.40	0.50	0.40	1.269	1.449
2.	0.50	0.45	0.50	0.45	1.369	1.475
3.	0.50	0.45	0.50	0.45	1.369	1.475
แบบที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของช่องการไหลที่ทางเข้าและออก (หน่วย: m)					
	ก๊าซไอเสีย (Exhaust Gas)					
	เส้นผ่านศูนย์กลางด้านทางเข้า (Inlet)		เส้นผ่านศูนย์กลางด้านทางออก (Outlet)		ความยาว	
	(D,exha_i)	(d,exha_i)	(D,exha_o)	(d,exha_o)	L, exha_1	L, exha_2
1.	0.89	0.84	0.89	0.84	1.369	1.475
2.	0.89	0.84	0.89	0.84	1.369	1.475
3.	0.94	0.84	0.94	0.84	1.269	1.450

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

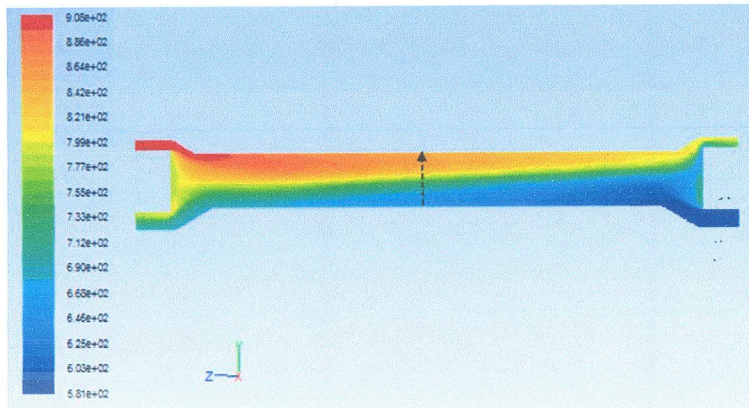
สำหรับตารางที่ 4.4 นั้นแสดงรายละเอียดของช่องการไหลทั้งของอากาศดีและก๊าซไอเสียที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและรูปทรงของช่องการไหลที่แตกต่างกันของโมเดลอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 3 แบบ หากพิจารณาให้ขนาดและรูปทรงของโมเดลแบบที่ 1 เป็นหลัก จะได้ว่าสำหรับโมเดลแบบที่ 2 จะถูกออกแบบให้มีขนาดช่องการไหลของอากาศดีลดลง โดยยังคงมีขนาดช่องการไหลของก๊าซไอเสียคงเดิม ส่วนโมเดลแบบที่ 3 นั้นถูกออกแบบให้มีขนาดช่องการไหลของอากาศดีลดลงเช่นเดียวกับโมเดลแบบที่ 2 แต่ช่องการไหลของก๊าซไอเสียจะถูกออกแบบโดยขยายให้มีขนาดโตขึ้น เมื่อนำผลที่ได้จากการทำแบบจำลองซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ถ่ายเทจากก๊าซไอเสียผ่านตัวกลางสแตนเลสไปสู่อากาศดีได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.5 แสดงผล Static Temperature (K) และ Total Pressure (Pa) ที่ทางเข้าออกของของไหลทั้งสองและปริมาณการถ่ายเทความร้อนสำหรับอากาศดีของโมเดลอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 3 แบบ ที่ได้จากการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งค่าปริมาณการถ่ายเทความร้อนที่ต้องการสำหรับอากาศดี เท่ากับ 81687.371 W

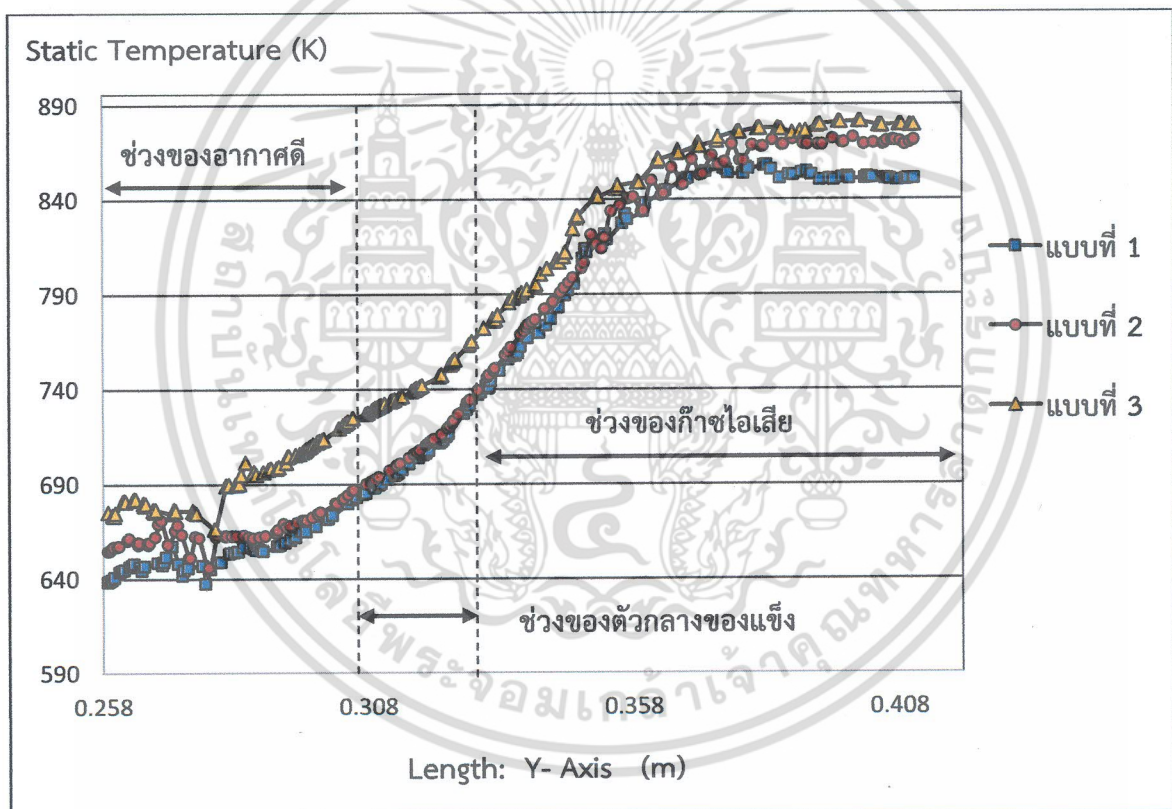
แบบที่	ค่าตัวแปร	อากาศดี			ก๊าซไอเสีย	
		ที่ทางเข้า ช่องการไหล	ที่ทางออก ช่องการไหล	ปริมาณ ความร้อน ( $\dot{Q}_{Air}$ ), Watt	ที่ทางเข้า ช่องการไหล	ที่ทางออก ช่องการไหล
1.	Static Temperature(K)	581.237	738.891	66472.330	904.137	760.948
	Total Pressure(Pa)	398943.34	398900.47		202.567	48.793
2.	Static Temperature(K)	581.237	769.332	79307.299	904.137	789.147
	Total Pressure(Pa)	398989.75	398904.25		232.071	48.916
3.	Static Temperature(K)	581.237	794.448	89897.066	904.137	802.646
	Total Pressure(Pa)	398989.03	398904.56		121.804	18.082

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของอากาศดีที่ทางออกของโมเดลแบบที่ 3 มีค่ามากที่สุดอันเป็นผลมาจากมีอัตราการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดและได้ถึงค่าที่คาดหวังไว้ เท่ากับ 89897.066 W รองลงมาคือ โมเดลแบบที่ 2 และ 1 ตามลำดับ ซึ่งค่าปริมาณการถ่ายเทความร้อนที่ได้นั้นไม่ถึงตามที่คาดหวัง โดยที่ความดันลดของโมเดลทั้งสามแบบนี้มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.5 แสดงค่า contour ตำแหน่งกึ่งกลางที่ Center Plane ของช่องการไหลสำหรับใช้พล็อตกราฟ ค่าอุณหภูมิ Static Temperature (K) ที่เปลี่ยนแปลงตามแนวแกน Y ตามรูปปลุกศร ของโมเดลอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 3 แบบ โดยแสดงค่าพล็อตไว้ตามภาพที่ 4.6 ด้านล่าง

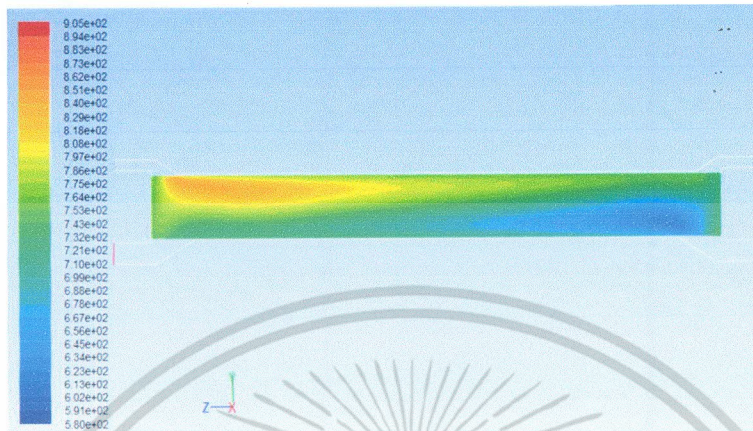


ภาพที่ 4.6 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าของอุณหภูมิ Static Temperature (K) ที่เปลี่ยนแปลงตามแนวแกน Y ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของช่องการไหลของโมเดลอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 3 แบบ

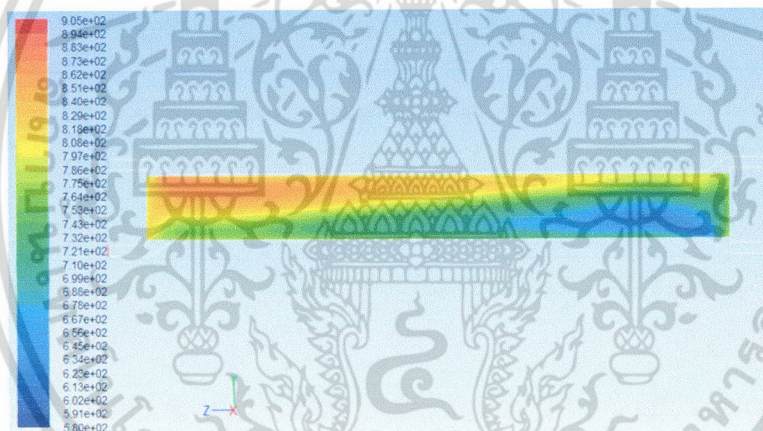
จากภาพที่ 4.6 เมื่อพิจารณาลักษณะเส้นกราฟการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Static Temperature (K)) ที่เปลี่ยนแปลงตามแนวแกน Y ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของช่องการไหลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 3 แบบ จะพบว่า โมเดลแบบที่ 1 และ 2 นั้นมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันในช่วงที่เข้าใกล้ตัวกลางของแข็งทั้งด้านอากาศดีและก๊าซไอเสีย โดยที่โมเดลแบบที่ 2 มีค่าสูงกว่าเล็กน้อย ส่วนโมเดลแบบที่ 3 จะแตกต่างจากสองแบบแรกชัดเจนโดยเฉพาะในช่วงที่อุณหภูมิที่จะถ่ายเทจากตัวกลางของแข็งไปสู่อากาศดีนั้นจะสูงมากกว่าอย่างเห็นได้ชัด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 วิเคราะห์ผลการจำลองของโมเดลอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่แตกต่างกัน 3 แบบ

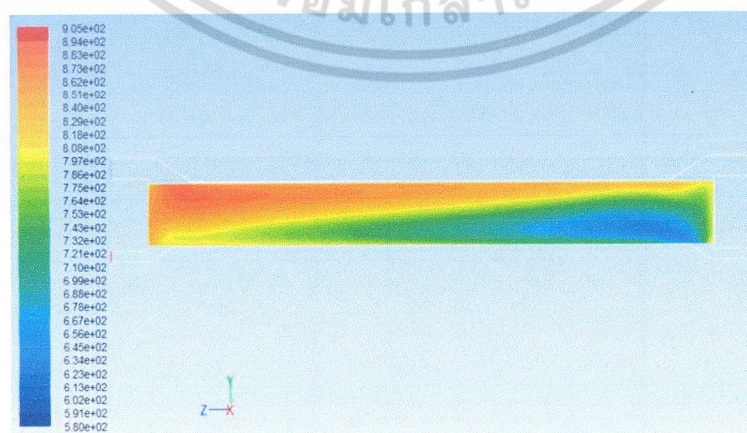
จากผลการทำแบบจำลอง หาค่าลักษณะการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของตัวกลางของแข็งด้านที่ได้รับความร้อนจากของไหลก๊าซไอเสียของโมเดลทั้ง 3 แบบ จะได้ผลดังต่อไปนี้



ภาพที่ 4.7 Contour อุณหภูมิ Static Temperature (K) บนพื้นผิวตัวกลางของของแข็งด้านก๊าซไอเสีย โมเดลแบบที่ 1



ภาพที่ 4.8 Contour อุณหภูมิ Static Temperature (K) บนพื้นผิวตัวกลางของของแข็งด้านก๊าซไอเสีย โมเดลแบบที่ 2

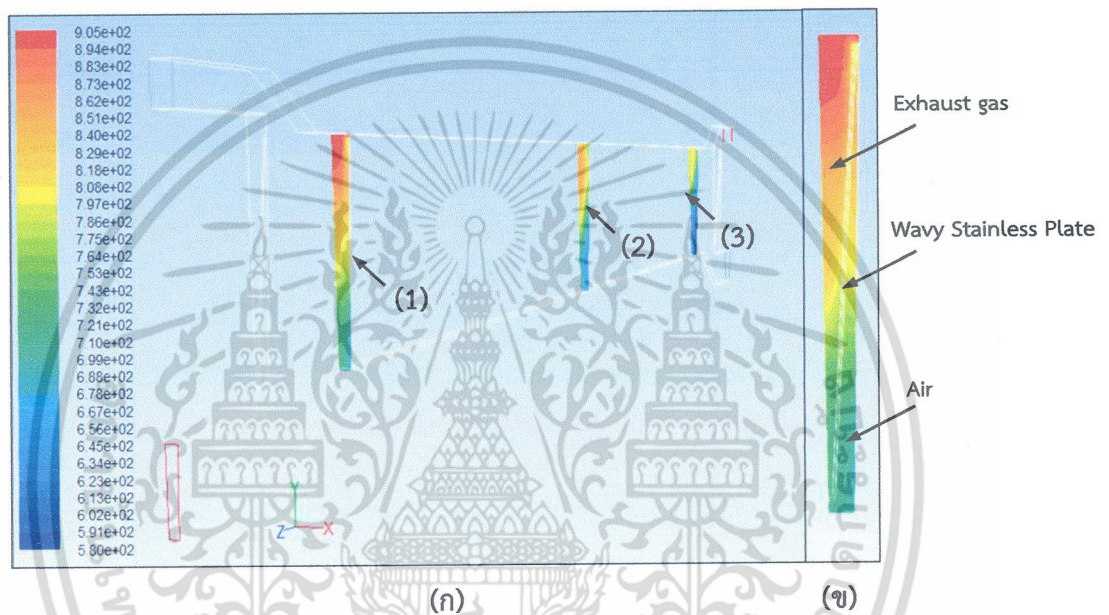


ภาพที่ 4.9 Contour อุณหภูมิ Static Temperature (K) บนพื้นผิวตัวกลางของของแข็งด้านก๊าซไอเสีย โมเดลแบบที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

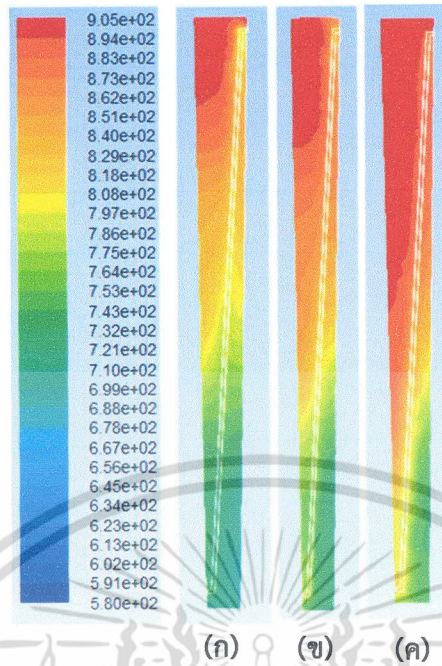
พิจารณาจากภาพที่ 4.7 ถึง 4.9 ซึ่งแสดง Contour ของอุณหภูมิ Static Temperature (K) บนพื้นผิวตัวกลางของของแข็งด้านก๊าซไอเสียของแต่ละโมเดล จะเห็นว่าโมเดลแบบที่ 3 มีลักษณะการกระจายอุณหภูมิร้อนจากก๊าซไอเสียบนพื้นผิวของตัวกลางของของแข็งได้มากที่สุด รองลงมาคือ โมเดลแบบที่ 2 และแบบที่ 1 ซึ่งสามารถสังเกตได้จากพื้นที่ Contour อุณหภูมิสีแดงของกรณีโมเดลแบบที่ 3 ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวตัวกลางของแข็ง

หากเมื่อทำการตัดระนาบในแนวขวางการไหล 3 ตำแหน่ง ณ ที่ช่วงเข้าออกและช่วงกลางของการไหลและพิจารณาการกระจายอุณหภูมิตัดขวางในระนาบขวางการไหลของโมเดลทั้ง 3 แบบ จะได้ผลดังต่อไปนี้

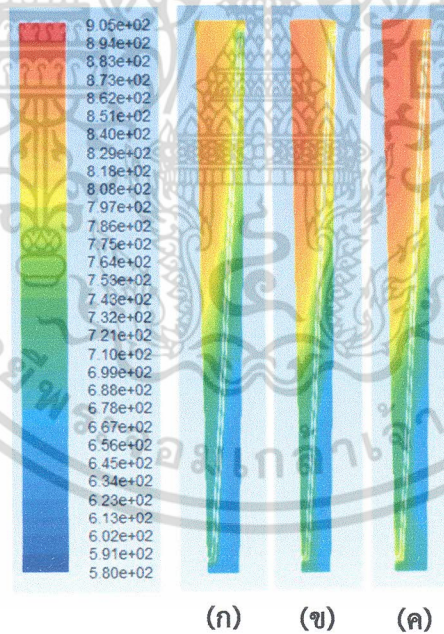


ภาพที่ 4.10 (ก) Contour ของอุณหภูมิ Static Temperature (K) ในระนาบขวางการไหล ณ ตำแหน่งที่ (1), (2) และ (3) (ข) แสดงรายละเอียดระนาบตัดขวาง ซึ่งจะถูกแสดงเปรียบเทียบสำหรับโมเดลทั้ง 3 แบบ ในลำดับถัดไปจากนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

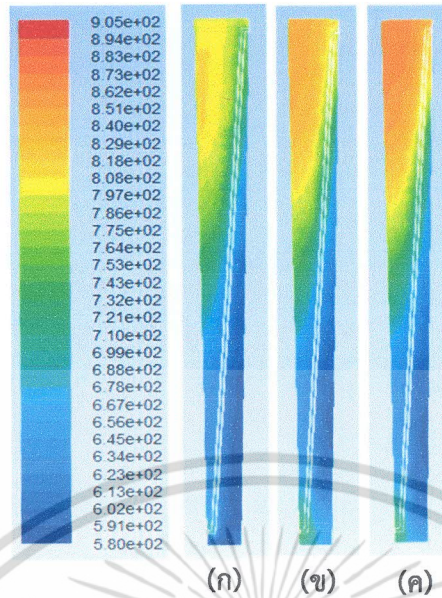


ภาพที่ 4.11 Contour ของอุณหภูมิ Static Temperature (K) ในระนาบขวางการไหล ณ ตำแหน่งที่ (1) สำหรับ (ก) โมเดลแบบที่ 1 (ข) โมเดลแบบที่ 2 และ (ค) โมเดลแบบที่ 3



ภาพที่ 4.12 Contour ของอุณหภูมิ Static Temperature (K) ในระนาบขวางการไหล ณ ตำแหน่งที่ (2) สำหรับ (ก) โมเดลแบบที่ 1 (ข) โมเดลแบบที่ 2 และ (ค) โมเดลแบบที่ 3

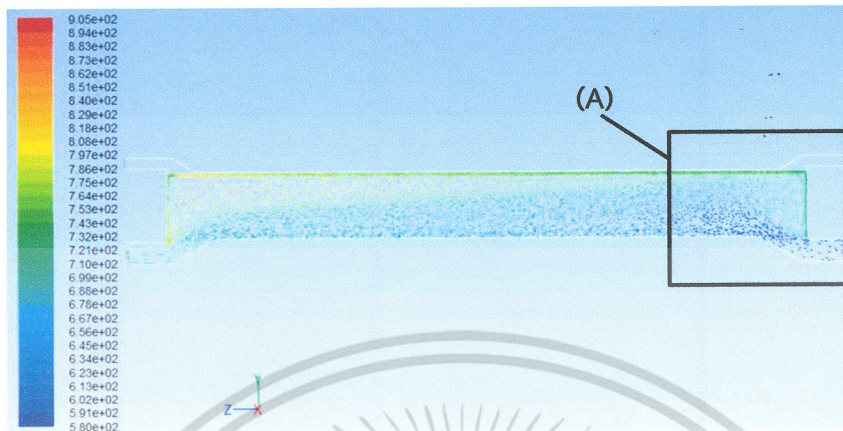
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



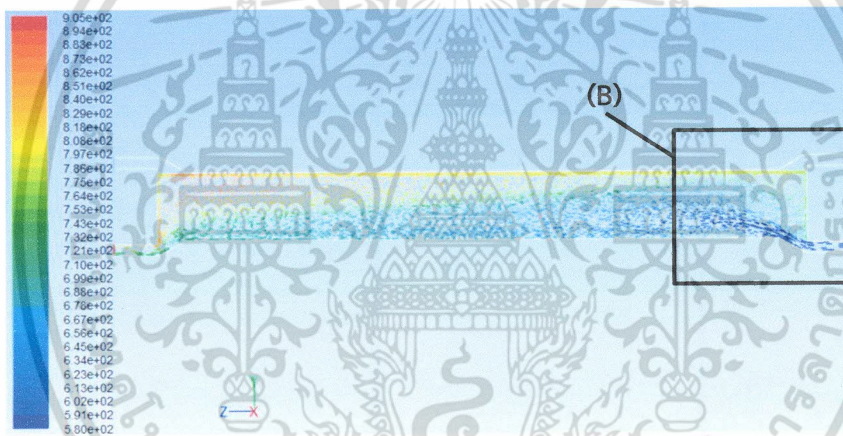
ภาพที่ 4.13 Contour ของอุณหภูมิ Static Temperature (K) ในระนาบขวางการไหล ณ ตำแหน่งที่ (3) สำหรับ (ก) โมเดลแบบที่ 1 (ข) โมเดลแบบที่ 2 และ (ค) โมเดลแบบที่ 3

ภาพที่ 4.11 ถึง 4.13 แสดง Contour ของอุณหภูมิ Static Temperature (K) ในระนาบขวางการไหล 3 ตำแหน่งของช่องการไหลของของไหลทั้งสองและตัวกลางของแข็ง เมื่อพิจารณาการกระจายอุณหภูมิสำหรับ (ก) โมเดลแบบที่ 1 (ข) โมเดลแบบที่ 2 และ (ค) โมเดลแบบที่ 3 โดยภาพที่ 4.11 แสดงระนาบขวางการไหล ณ ตำแหน่งที่ (1) ซึ่งเป็นช่วงทางเข้าช่องการไหลของของไหลก๊าซไอเสียพบว่าภายในช่องการไหลของของไหลก๊าซไอเสียนั้น โมเดลแบบที่ 1 และ 2 มีการกระจายอุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่ใกล้เคียงกันโดยที่โมเดลแบบที่ 2 กระจายได้ดีกว่าเล็กน้อย และโมเดลแบบที่ 3 จะกระจายอุณหภูมิมากที่สุดอย่างเห็นได้ชัดและกระจายไปถึงช่วงล่างของช่องการไหล ซึ่งสังเกตได้จาก Contour อุณหภูมิสีแดงที่เกิดขึ้นภายในช่องการไหลของของไหลก๊าซไอเสีย ส่วนภาพที่ 4.12 แสดงระนาบขวางการไหล ณ ตำแหน่งที่ (2) ซึ่งเป็นช่วงตรงกลางช่องการไหล ก็มีจะแนวโน้มเช่นเดียวกันแต่โมเดลทั้ง 3 แบบมีความแตกต่างกันไม่มากนักและการกระจายอุณหภูมินั้นก็ลดลงกว่าระนาบขวางการไหล ณ ตำแหน่งที่ (1) ภาพที่ 4.13 แสดงระนาบขวางการไหล ณ ตำแหน่งที่ (3) ซึ่งเป็นช่วงทางออกช่องการไหลของของไหลก๊าซไอเสีย ซึ่งจะเห็นว่าโมเดลทั้งสามมีการกระจายอุณหภูมิที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันและน้อยกว่าระนาบขวางการไหล ณ ตำแหน่งที่ (2) เมื่อพิจารณาการกระจายอุณหภูมิบนระนาบขวางการไหลทั้ง 3 ตำแหน่งของช่องการไหลจะเห็นได้ว่าจะมีการกระจายอุณหภูมिर้อนของก๊าซไอเสียได้มากที่สุดที่ช่วงทางเข้าช่องการไหลและจะค่อยลดลงที่ช่วงตรงกลางและน้อยที่สุดที่ช่วงทางออกของการไหล

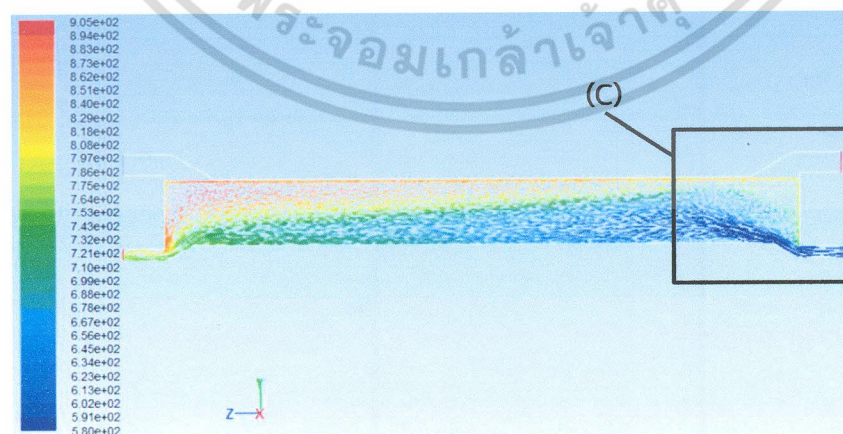
เมื่อทำการตัดระนาบที่ตรงกลางตามแนวการไหลภายในช่องการไหลของของไหลอากาศดี และพิจารณา Vector ความเร็วซึ่งแสดงตามสีของอนุกรมของโมเดลทั้ง 3 แบบ จะได้ผลดังต่อไปนี้



ภาพที่ 4.14 แสดงค่า Vector ความเร็วซึ่งแสดงตามสีของอนุกรมที่ Center Plane ของช่องการไหลอากาศดี โมเดลแบบที่ 1



ภาพที่ 4.15 แสดงค่า Vector ความเร็วซึ่งแสดงตามสีของอนุกรมที่ Center Plane ของช่องการไหลอากาศดี โมเดลแบบที่ 2



ภาพที่ 4.16 แสดงค่า Vector ความเร็วซึ่งแสดงตามสีของอนุกรมที่ Center Plane ของช่องการไหลอากาศดี โมเดลแบบที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.17 จากบริเวณ (A) ที่แสดงค่า Vector ความเร็วซึ่งแสดงตามสีของอุณหภูมิที่ Center Plane ช่วงทางเข้าของช่องการไหลอากาศดี โมเดลแบบที่ 1



ภาพที่ 4.18 จากบริเวณ (B) ที่แสดงค่า Vector ความเร็วซึ่งแสดงตามสีของอุณหภูมิที่ Center Plane ช่วงทางเข้าของช่องการไหลอากาศดี โมเดลแบบที่ 2



ภาพที่ 4.19 จากบริเวณ (C) ที่แสดงค่า Vector ความเร็วซึ่งแสดงตามสีของอุณหภูมิที่ Center Plane ช่วงทางเข้าของช่องการไหลอากาศดี โมเดลแบบที่ 3

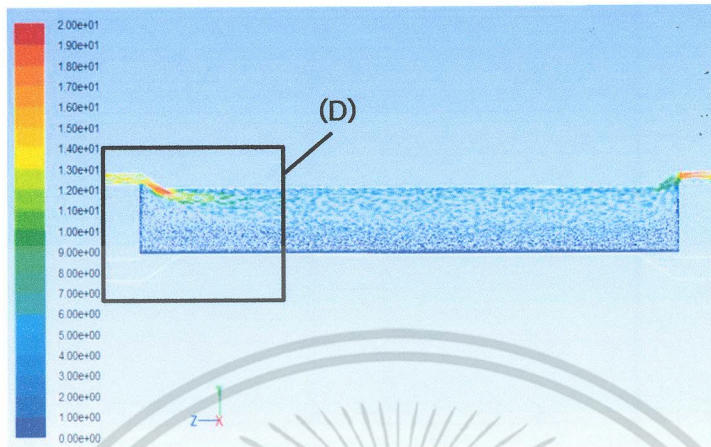
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาภาพที่ 4.14 ถึง 4.16 ที่แสดง Vector ความเร็วซึ่งแสดงตามสีของอุณหภูมิที่ Center Plane ภายในช่องการไหลของของไหลอากาศดีของโมเดลอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่แตกต่างกันทั้ง 3 โมเดล การที่โมเดลทั้ง 3 แบบมีช่องการไหลของของไหลอากาศดีให้แตกต่างกันก็เพื่อที่จะให้เห็นถึงผลของการปรับเปลี่ยนขนาดและรูปทรงที่มีต่อการถ่ายเทความร้อน ซึ่งสาเหตุของการปิดขนาดช่องการไหลของของไหลอากาศดีก็เพื่อให้อากาศดีไหลพุ่งเป็นลำและสามารถที่จะมีโมเมนตัมพอที่จะไปปะทะที่ช่วงบริเวณโครงสร้างด้านบนของแผ่นตัวกลางของของแข็งแลกเปลี่ยนความร้อนที่คั่นอยู่ระหว่างของของไหลก๊าซไอเสียและอากาศดีซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนดีขึ้นนั่นเอง ดังที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.17 ถึง 4.19 ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึง Vector ความเร็วที่บริเวณทางเข้าของช่องการไหลของของไหลอากาศดีโดย Vector ความเร็วถูกแสดงตามสีของอุณหภูมิ จะเห็นได้จาก Vector ความเร็วที่เปลี่ยนแปลงเมื่อขนาดช่องการไหลของของไหลอากาศดีถูกบีบขนาดลดลงของโมเดลแบบที่ 2 และ 3 ดังภาพที่ 4.18 และ 4.19 ซึ่งมีการไหลพุ่งขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับโมเดลแบบที่ 1 ในภาพที่ 4.17

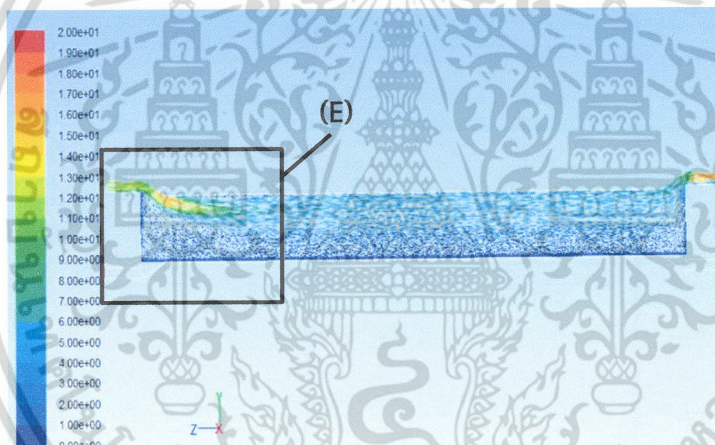


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

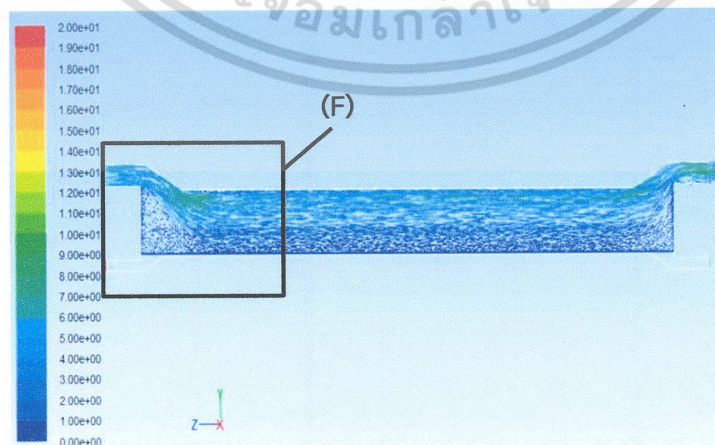
เมื่อตัดระนาบที่ตรงกลางตามแนวการไหลภายในช่องการไหลของของไหลก๊าซไอเสีย และพิจารณา Vector ความเร็วซึ่งแสดงตามสีและความเร็วของโมเดลทั้ง 3 แบบ จะได้ผลดังต่อไปนี้



ภาพที่ 4.20 แสดงค่า Vector ความเร็วซึ่งแสดงตามสีและความเร็วที่ Center Plane ของช่องการไหลก๊าซไอเสีย โมเดลแบบที่ 1

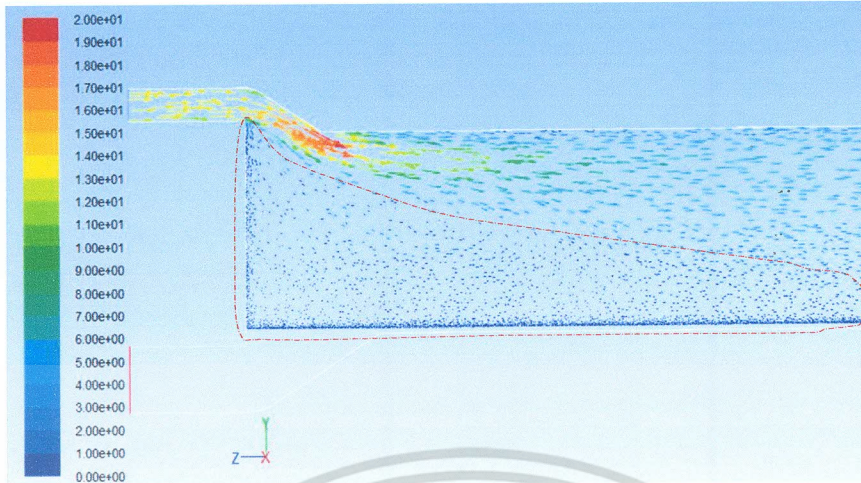


ภาพที่ 4.21 แสดงค่า Vector ความเร็วซึ่งแสดงตามสีและความเร็วที่ Center Plane ของช่องการไหลก๊าซไอเสีย โมเดลแบบที่ 2

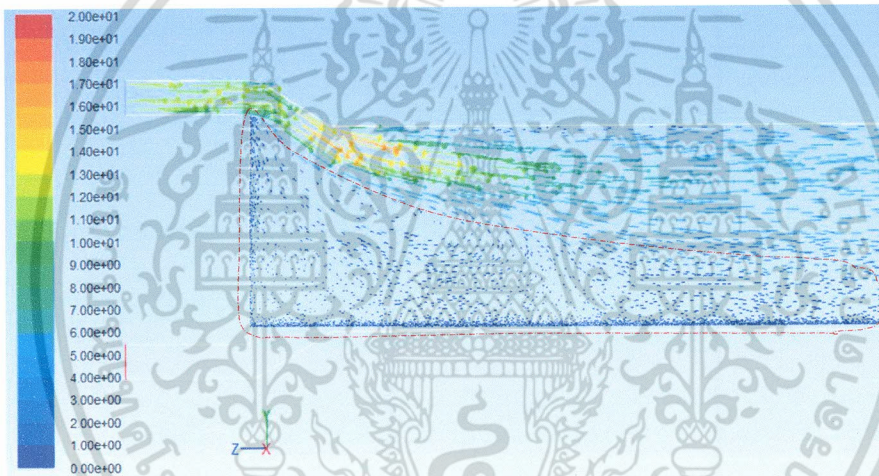


ภาพที่ 4.22 แสดงค่า Vector ความเร็วซึ่งแสดงตามสีและความเร็วที่ Center Plane ของช่องการไหลก๊าซไอเสีย โมเดลแบบที่ 3

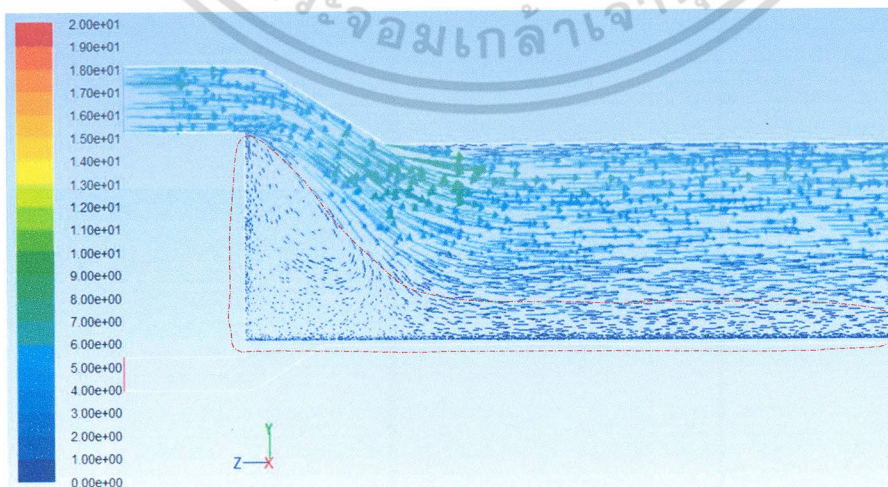
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.23 จากบริเวณ (D) ที่แสดงค่า Vector ความเร็วซึ่งแสดงตามสีของความเร็วที่ Center Plane ช่วงทางเข้าของช่องการไหลก๊าซไอเสีย โมเดลแบบที่ 1



ภาพที่ 4.24 จากบริเวณ (E) ที่แสดงค่า Vector ความเร็วซึ่งแสดงตามสีของความเร็วที่ Center Plane ช่วงทางเข้าของช่องการไหลก๊าซไอเสีย โมเดลแบบที่ 2

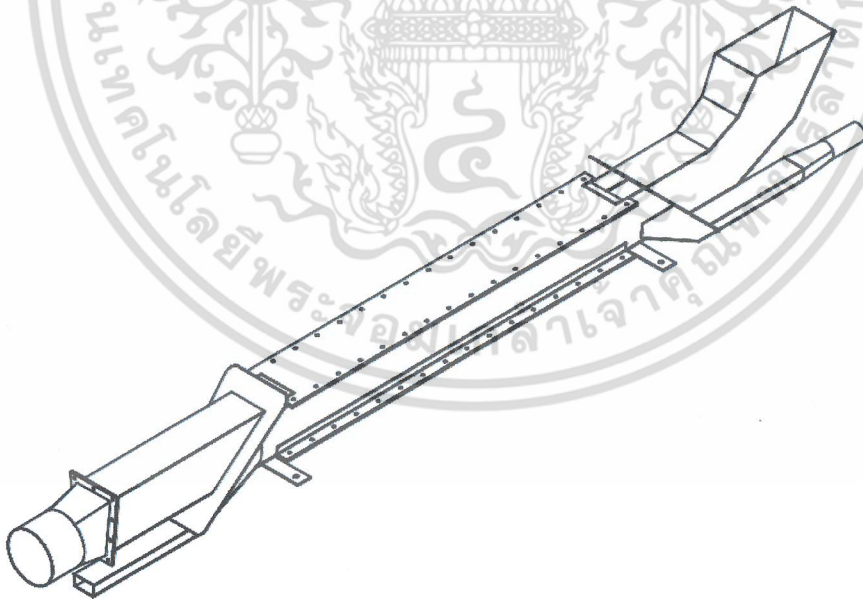


ภาพที่ 4.25 จากบริเวณ (F) ที่แสดงค่า Vector ความเร็วซึ่งแสดงตามสีของความเร็วที่ Center Plane เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาโดยผู้จัดทำให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.20 ถึง 4.22 ที่แสดง Vector ความเร็วซึ่งแสดงตามสีของความเร็วที่ Center Plane ภายในช่องการไหลของของไหลก๊าซไอเสียของโมเดลอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่แตกต่างกันทั้ง 3 โมเดล โดยเมื่อพิจารณาที่บริเวณทางเข้าของช่องการไหลของของไหลก๊าซไอเสีย ในภาพที่ 4.23 ถึง 4.25 จะเห็นได้ว่า โมเดลแบบที่ 1 และ 2 จะมีลักษณะของ Vector ความเร็วไหลที่ช่วงบนของช่องการไหล โดยมีบริเวณที่ความเร็วที่น้อยจนเกือบไม่มีความเร็วซึ่งเรียกรวมกันว่า Dead zone เกิดขึ้น ซึ่งเห็นได้จากบริเวณรอบเส้นประสีแดง ซึ่งจะเป็นบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนไม่ดี เมื่อโมเดลแบบที่ 3 ซึ่งช่องการไหลของของไหลก๊าซไอเสียถูกเพิ่มขนาดให้โตขึ้น จะทำให้ Vector ความเร็วที่ไหลช่วงทางเข้านั้นมีการไหลในช่วงด้านล่างของช่องการไหลมากขึ้นเมื่อเทียบกับโมเดลแบบที่ 1 และ 2 ซึ่งส่งผลให้ Dead zone ที่ช่วงทางเข้าของช่องการไหลนั้นลดลง ดังภาพที่ 4.25 ซึ่งจะทำให้การกระจายอุณหภูมิมากขึ้นส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนดีขึ้น

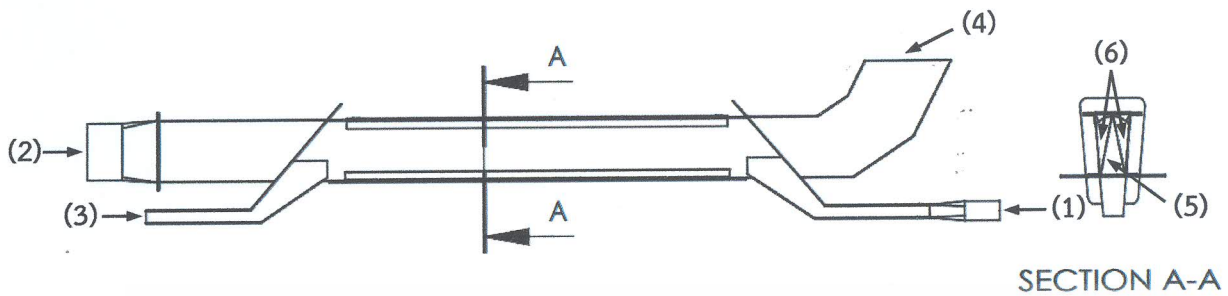
#### 4.4 การปรับเปลี่ยนรูปทรงของช่องการไหลสำหรับออกแบบเพื่อสร้างต้นแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

เมื่อทำการจำลองโดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและปรับเปลี่ยนรูปทรงของช่องการไหลจนได้ผลที่หน้าพอใจแล้ว ลำดับต่อไปจะเป็นขั้นตอนของการเขียนแบบสำหรับสิ่งผลิตอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งการเขียนแบบสำหรับสิ่งผลิตสร้างเครื่องต้นแบบของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนี้จะต่างไปจากแบบที่ได้จากการทำแบบจำลองอันเนื่องจากข้อจำกัดของวัสดุที่ใช้ผลิต ข้อจำกัดของอุณหภูมิสำหรับใช้ในการทดลองในอนาคตและคำนึงถึงความสามารถของกระบวนการผลิต ซึ่งจะต้องผลิตได้จริง



ภาพที่ 4.26 ภาพโดยรวมของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ออกแบบด้วยโปรแกรมช่วยเขียนแบบ 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.27 แสดงภาพตัดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

พิจารณาภาพที่ 4.27 จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนประกอบไปด้วยชิ้นส่วนหลักๆ 5 ชิ้นด้วยกัน ดังนี้

1. ช่องทางเข้าอากาศดี เป็นส่วนซึ่งทำหน้าที่สำหรับรับอากาศดีที่ไหลเข้ามาภายในตัวเครื่อง
2. ช่องทางเข้าก๊าซไอเสีย เป็นส่วนซึ่งทำหน้าที่สำหรับรับก๊าซไอเสียที่ไหลเข้ามาภายในตัวเครื่อง
3. ช่องทางออกอากาศดี เป็นส่วนซึ่งทำหน้าที่สำหรับรับปล่อยอากาศดีที่ผ่านการแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วไหลออกจากตัวเครื่อง
4. ช่องทางออกก๊าซไอเสีย เป็นส่วนซึ่งทำหน้าที่สำหรับรับปล่อยก๊าซไอเสียที่ผ่านการแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วไหลออกจากตัวเครื่อง
5. ช่องการไหลอากาศดีภายในตัวเครื่อง เป็นส่วนซึ่งทำหน้าที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับก๊าซไอเสีย
6. ช่องการไหลก๊าซไอเสียภายในตัวเครื่อง เป็นส่วนซึ่งทำหน้าที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศดี



ภาพที่ 4.28 แสดงภาพเครื่องต้นแบบของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจริงที่ได้จากการสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยเลือกรูปแบบการถ่ายเทความร้อนที่เป็น การไหลระวางของไหลร้อนและเย็นแบบสวนทางกัน (Counter-flow) เนื่องจากเป็นรูปแบบที่ใช้พื้นที่เพื่อ แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบอื่น โดยได้ศึกษาและทำการจำลองด้วยวิธี พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับการไหลที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนเพื่อเป็นพื้นฐานในการ ออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและผลการจำลองได้ถูกเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่น่าเชื่อถือและ สมการสหสัมพันธ์ ซึ่งผลจากการเปรียบเทียบยืนยันได้ว่าแบบจำลองนั้นสามารถที่จะนำมาใช้วิเคราะห์ใน งานวิจัยนี้ได้ จากผลการศึกษางานวิจัยนี้เราสามารถออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อให้ได้อัตรา การถ่ายเทความร้อนตามที่คาดหวังได้ จากผลการทำแบบจำลองอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งมีโมเดล แตกต่างกัน 3 แบบนั้น จะได้ว่าโมเดลแบบที่ 3 ซึ่งถูกบีบลดขนาดช่องการไหลของอากาศดีและขยายขนาด ช่องการไหลของก๊าซไอเสียขึ้น มีอัตราการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดกว่าแบบอื่นและได้ถึงค่าที่คาดหวัง ซึ่ง มีค่าเท่ากับ 89,897 Watts โดยที่ความดันลดของโมเดลทั้งสามแบบนี้มีความแตกต่างกันไม่ค่อนมาก ดังนั้นจะเห็นได้ว่าถึงแม้พื้นที่ผิวที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนของโมเดลทั้งสามแบบนี้จะเท่ากันแต่เมื่อ ลักษณะการไหลของของไหลซึ่งเปลี่ยนไปตามขนาดและรูปทรงของช่องการไหลที่แตกต่างกันนั้น ก็จะส่งผล ต่อการถ่ายเทความร้อนด้วยเช่นกัน เมื่อได้แบบจำลองที่น่าพอใจแล้ว หลังจากนั้นจึงทำการเขียนแบบ ด้วยโปรแกรมช่วยเขียนแบบสามมิติสำหรับสิ่งผลิตเครื่องต้นแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยแบบที่ สิ่งผลิตนั้นจะต่างจากที่ออกแบบไว้จากแบบจำลองอันเนื่องมาจากข้อจำกัดของวัสดุที่ใช้ผลิต ข้อจำกัดของ อนุภูมิสำหรับใช้ในการทดลองในอนาคตและความสามารถในการผลิตได้จริง

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยแสดงให้เห็นว่าขนาดและรูปทรงของช่องการไหลที่เปลี่ยนแปลงนั้นจะมีผลต่อการ ถ่ายเทความร้อน สำหรับช่องการไหลของก๊าซไอเสียขึ้นหากต้องการให้มีความดันลดที่น้อยลง เรายัง สามารถปรับขนาดที่ทางเข้าของช่องการไหลให้โตขึ้น และหากต้องการนำประเด็นของการสิ้นเปลืองมา พิจารณาในกรณีที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีการวิจัยร่วมกับเครื่องอัดอากาศของชุดเครื่องยนต์กังหัน ก๊าซเราสามารถที่จะปรับลดอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ได้อีกด้วย

ในการวิจัยนอกจากการนำโปรแกรมแบบจำลองมาช่วยในการออกแบบแล้วการคำนึงถึง กระบวนการผลิตชิ้นงานจริงก็เป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากมีข้อจำกัดบางประการในการผลิตที่ ไม่อาจสามารถทำได้จริงซึ่งอาจมีผลทำให้สูญเสียเวลาและค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นเกินความจำเป็น และเนื่องจาก งานวิจัยนี้เป็นเพียงการออกแบบเพื่อสร้างเครื่องต้นแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งยังจะต้องมี การต่อยอดทำการทดลองเครื่องต้นแบบเพื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองในอนาคตต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

งานวิจัยนี้ซึ่งได้นำเอาวิธีทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาช่วยในการวิเคราะห์สำหรับการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยผลผลิตที่ได้ทำการวิจัยจนบรรลุตามเป้าหมายนั้น ได้แก่

6.1 ทำการจำลองปรากฏการณ์การแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้นใน Heat recovery unit และเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้ กับรายงานการวิจัยที่น่าเชื่อถือร่วมถึงสมการสหสัมพันธ์ โดยได้ผลการเปรียบเทียบที่ยืนยันได้ว่าแบบจำลองนั้นสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์สำหรับการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้

6.2 ทำการประยุกต์กระบวนการวิธีการจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนมาใช้ในการจำลองการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อออกแบบลักษณะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน Heat recovery unit ซึ่งมีการไหลแบบสวนทางกัน Counter-Flow ระหว่างอากาศดีและก๊าซไอเสียสำหรับเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก และได้อัตราการถ่ายเทความร้อนตามที่คาดหวัง

6.3 ได้ต้นแบบชุดแลกเปลี่ยนความร้อน (Prototype of Heat recovery unit) สำหรับเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บรรณานุกรม

- [1] เดชดนัย บุญช่วย. 2554., “การจำลองรูปทรงใบพัดต่อสมรรถนะของคอมเพรสเซอร์แรงเหวี่ยงสำหรับเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาด 200 kW.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [2] ฉมนันท์ ช้างภูและคณะ. 2554., “การออกแบบและศึกษาแนวโน้มของประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในหน่วยดึงความร้อนทิ้งกลับมาใช้งานสำหรับเครื่องยนต์กังหันแก๊ส.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [3] ทรงศักดิ์ สมนา. 2556. “การวิเคราะห์วัฏจักรทางอุณหพลศาสตร์โดยวิธีออฟดีไมเซชันสำหรับเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงความร้อนต่ำ.” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27. มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี
- [4] พงษ์เจต พรหมวงศ์. “การถ่ายเทความร้อน.” ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542.
- [5] เอกสารประกอบการสอน “พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ” บัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
- [6] กิตติภาส วศินารมณ 2553., “การวิเคราะห์ทางความร้อนและการจำลองเชิงตัวเลขของห้องเผาไหม้เครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก(200 กิโลวัตต์).” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [7] จิตรติลก ประสิทธิ์เสริฐและคณะ. 2553., “การศึกษาออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อดึงความร้อนทิ้งกลับมาใช้งานสำหรับเครื่องยนต์กังหันแก๊ส.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [8] พิทักษ์ พร้อมไธสง. 2556., “การศึกษาเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนและลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นตัววีวางแนวทแยง.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [9] Winit Jaiboon. "Numerical Investigation of Fluid Flow and Heat Transfer in a Louver-Fin Radiator." Master Thesis of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. 2012.
- [10] Xi Chen and Peng Han. 1999. “A note on the solution of conjugate heat transfer problems using SIMPLE-like algorithms.” *International Journal of Heat and Fluid Flow* 21, 463-467.
- [11] Maxim Pisarenko, Robert Mattheij, Arris Tijsselin, Bas van der Linden and Axel Klar., “Friction Factor Estimation for Turbulent Flows in Corrugated Pipes with Rough Walls” *Department of Mathematics and Computer Science, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2007*
- [12] Yunus A. Cengel., “Heat and Mass Transfer” *Department of Mechanical Engineering, University of Nevada, Reno, 2006*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บรรณานุกรม (ต่อ)

- [13] Roache, P.J. "Quantification of Uncertainty in Computational Fluid Dynamics." Annual Review of Fluid Mechanics 29, 1997. pp. 123-160.
- [14] H. L. Huang and B. Li. 2010. "Heat transfer enhancement of free surface MHD-flow by the wall with non-uniform electrical conductivity." **International Journal of Energy and Environment** 6, 1027-1038.
- [15] Jamuna A B and Somashekar V. 2013. "Cfd Simulation and Experimental verification of Air Flow through Heated Pipe." **International Journal of Heat and Fluid Flow** 10, 30-35.
- [16] ANSYS Fluent-Solver Theory Guide. ANSYS Fluent Release 12.0, ANSYS Inc., 2009-01-29.
- [17] Yanus, A.C and Michael, A.C. (2007). Thermodynamics An Engineering Approach, 6th edition, ISBN: 978-007-125771-8, University of Nevada, Reno.
- [18] MatWeb (2539). 304 Stainless Steel, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=abc4415b0f8b490387e3c922237098da&ckck=1>, เข้าดูเมื่อวันที่ 11/01/2557
- [19] Fly me to the moon (2556). How to Calculate Air Density, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.brisbanehotairballooning.com.au/faqs/education/116-calculate-air-density.html>, เข้าดูเมื่อวันที่ 25/03/2557
- [20] Thermopedia (2555). Air (Properties of), [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.thermopedia.com/content/553/?tid=110&sn=5>, เข้าดูเมื่อวันที่ 20/03/2557.
- [21] Pacontrol (2557). (Heat Transfer and Exchangers), [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา [http://www.pacontrol.com/process-information-book/Heat%20Transfer%20and%20Exchangers%2093851\\_08a.pdf](http://www.pacontrol.com/process-information-book/Heat%20Transfer%20and%20Exchangers%2093851_08a.pdf), เข้าดูเมื่อวันที่ 19/05/2557.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The seal of Rajabhat Buriram University is a circular emblem. It features a central sunburst with a crown-like top, flanked by two traditional Thai stupas. Below the sunburst is a large Thai numeral '๕' (5). The entire emblem is surrounded by a decorative border with Thai script. The text 'ภาคผนวก ก.' is centered over the seal.

ภาคผนวก ก.

ตาราง Excel การคำนวณต่างๆ สำหรับวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มี  
ลักษณะรูปแบบพื้นฐานซึ่งมีการไหลแบบสวนทางกัน (Counter-Flow)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 การคำนวณพื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนทั้งหมด ( $A_s$ , Total heat transfer area,  $m^2$ ) สำหรับการไหลแบบสวนทางกัน Counter-Flow โดยวิธี  $\epsilon$ -NTU

Total Heat Transfer Surface Area	
$C_{p,a}$	1.0758721 kJ/kg-K
$C_{p,g}$	1.102816 kJ/kg-K
$m,a$	0.3919 kg/s
$m,g$	0.4076 kg/s
$C_{h}=(m,g)*(C_{p,g})$	0.4495078 $\rightarrow$ (Cmax)
$C_{c}=(m,a)*(C_{p,a})$	0.4216343 $\rightarrow$ (Cmin)
$C_{h}>C_{c}$	
$c=(C_{min}/C_{max})$	0.937991
$e$	0.6
NTU(Counter-Flow)	$[1/(c-1)]*\ln[(e-1)/(e*c-1)]$ 1.4342847
NTU	$: U*A_s/C_{min}$
$A_{s}$	$: [(NTU)*(C_{min})]/U$
$A_{s}$	14.654705 $m^2$

ตารางที่ ก.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ( $U$ , Overall Heat Transfer Coefficient,  $W/m^2-K$ ) ที่เป็นค่าเฉลี่ย

U (Tube side, cold gas)			
	P(kPa)	U(W/(m <sup>2</sup> K))	
At P,atm	101.325	5	35
At P,cold side	637.62	8.907937338	47.53235
At P 200bar	20000	150	500

ตารางที่ ก.3 การคำนวณความยาวของช่องการไหลจากพื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนทั้งหมด ความร้อนทั้งหมด

Surface Area of Heat Transfer (Calculate on surface of stainless steel, contact to hot fluid side)	
Surface Area of Heat Transfer	14.6547 $m^2$
Inside Diameter of Solid	0.7328 m
Length of Solid	6.365635 m
	$\cong$ 6.37 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 การคำนวณค่า Dynamic viscosity และ Thermal conductivity

Dynamic viscosity and thermal conductivity Calculation		
(μ)		
T,(K)	P=1 bar 100 kPa	P=10 bar 1000 kPa
600	305.8	306.4
700	338.8	339.4
800	369.8	370.3
900	398.1	398.5

(k)		
T,(K)	P=1 bar 100 kPa	P=100 bar 10000 kPa
600	46.9	49
700	52.4	51.4
800	57.3	58.8

Air (Cold Fluid)		
μ	k	
At T600K,P637.62kPa	306.1584133	48.15445
At T700K,P637.62kPa	339.1584133	51.80264
At T678.107K,P637.62kPa	331.9337233	51.00394
	kg/m-s	W/m-K

Exhaust Gas (Hot Fluid)		
μ	k	
At T800K,P106.9525kPa	369.8038625	57.31159
At T900K,P106.9525kPa	398.10309	N/A
At T811.224K,P106.9525kPa	372.9801678	57.31159
	kg/m-s	W/m-K

ตารางที่ ก.5 การคำนวณค่า Mach Number

Mach Number Calculation		
Parameter	Air	Exhaust Gas
gas constant of Air ( R )	0.287 kJ/kg-K	0.287 kJ/kg-K
specific heat ratio ( k ), at Temp.	1.4	1.4
Mass flow rate	0.3919 kg/s	0.4076 kg/s
OD(Outside Diameter)	0.8368 m	0.7328 m
ID(Inside Diameter)	0.7368 m	0.5828 m
Area(Cross sesction)	0.123590255 m <sup>2</sup>	0.154990474 m <sup>2</sup>
Desity of Air (Rho)	3.275715323 kg/m <sup>3</sup>	0.459295932 kg/m <sup>3</sup>
Temperature	581.237 K	904.137 K
Air Velocity V=m/(Rho*A)	0.968021232 m/s	5.725805237 m/s
Speed of sound...( c ), c=(kRT) <sup>1/2</sup>	483.2608267 m/s	602.7289993 m/s
Mach Number, Ma=V/c	0.002003103	0.0094998
	(Ma<0.3) Incompressible Flow	(Ma<0.3) Incompressible Flow

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือใช้

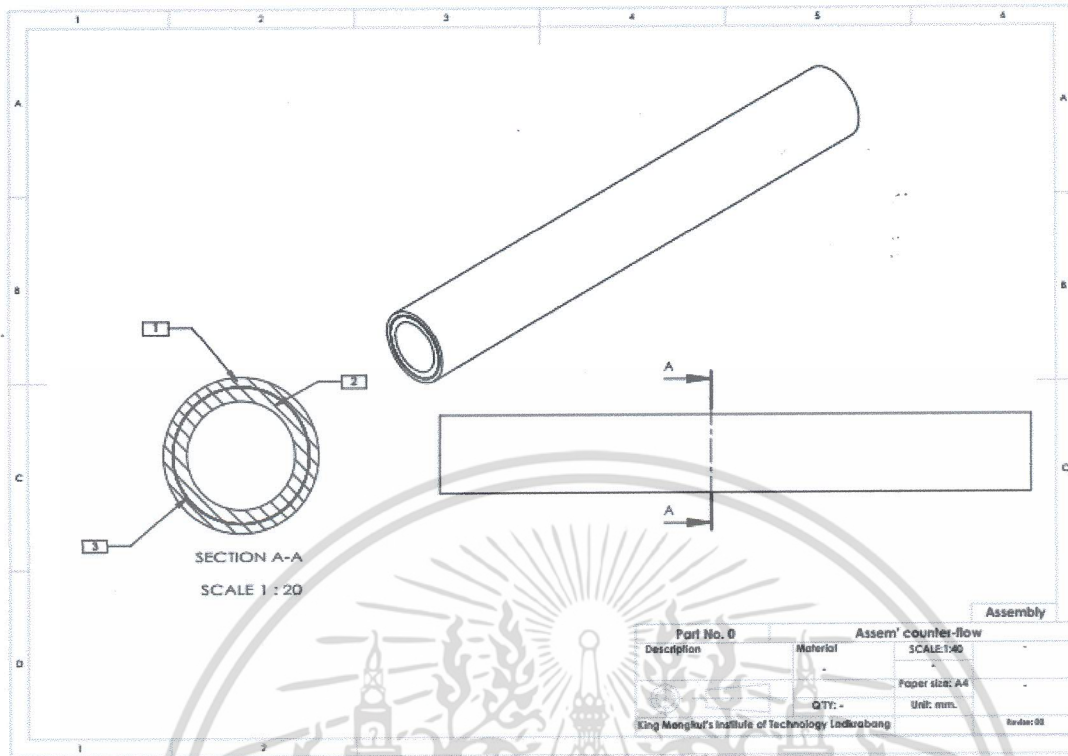
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



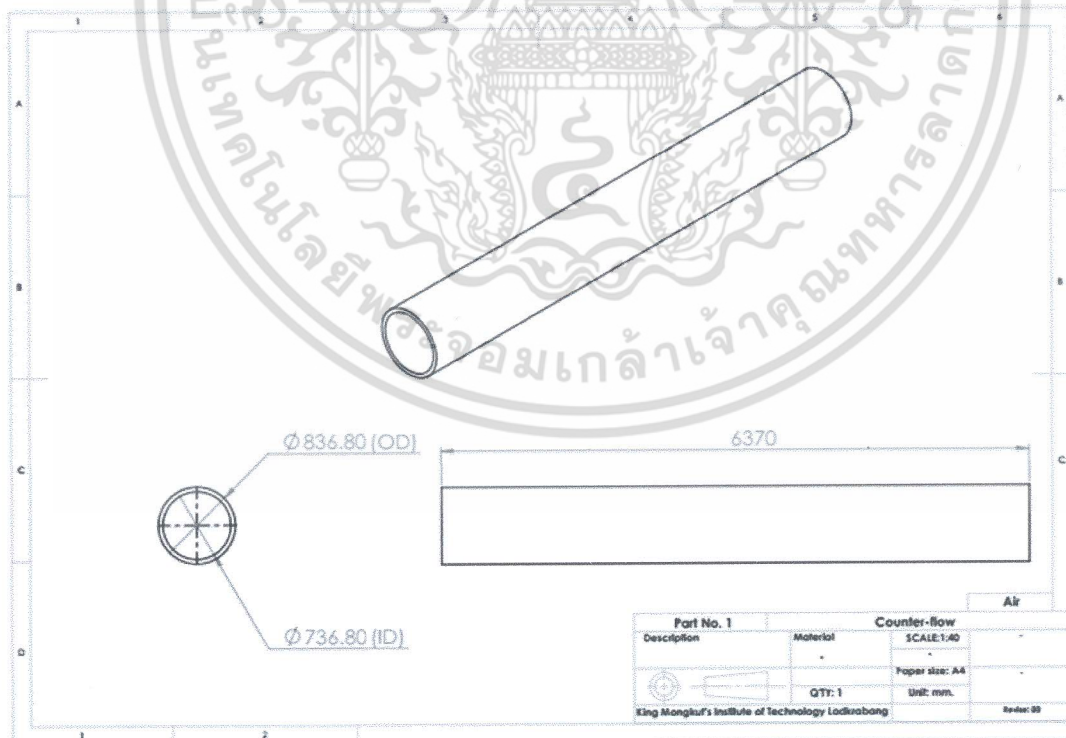
ภาคผนวก ข.

แบบ Drawing ของช่องการไหลที่ใช้ในการทำแบบจำลองสำหรับวิเคราะห์อุปกรณ์  
แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีลักษณะรูปแบบพื้นฐานซึ่งมีการไหลแบบสวนทางกัน  
(Counter-Flow)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

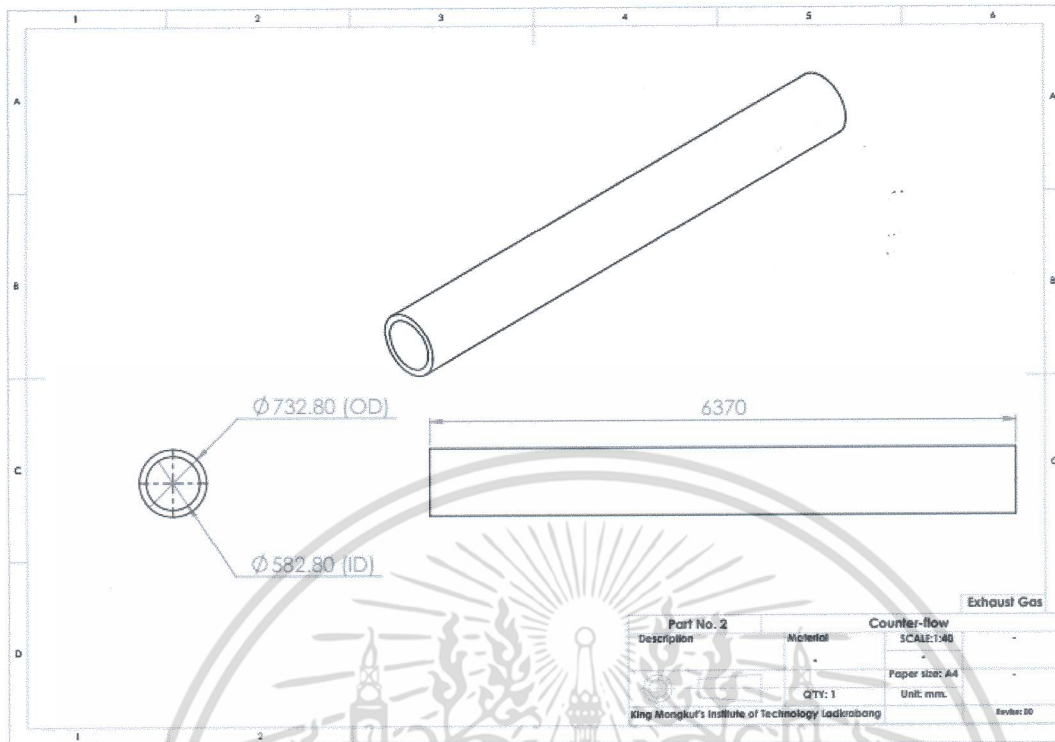


ภาพที่ ข.1 แบบ Drawing ที่ประกอบเข้าด้วยกันของ (1) ช่องการไหลของอากาศดี (2) ช่องการไหลของก๊าซไอเสีย (3) ตัวกลางสแตนเลสแผ่น ที่มีการไหลแบบสวนทางกัน Counter-Flow ที่เป็นรูปทรงพื้นฐาน

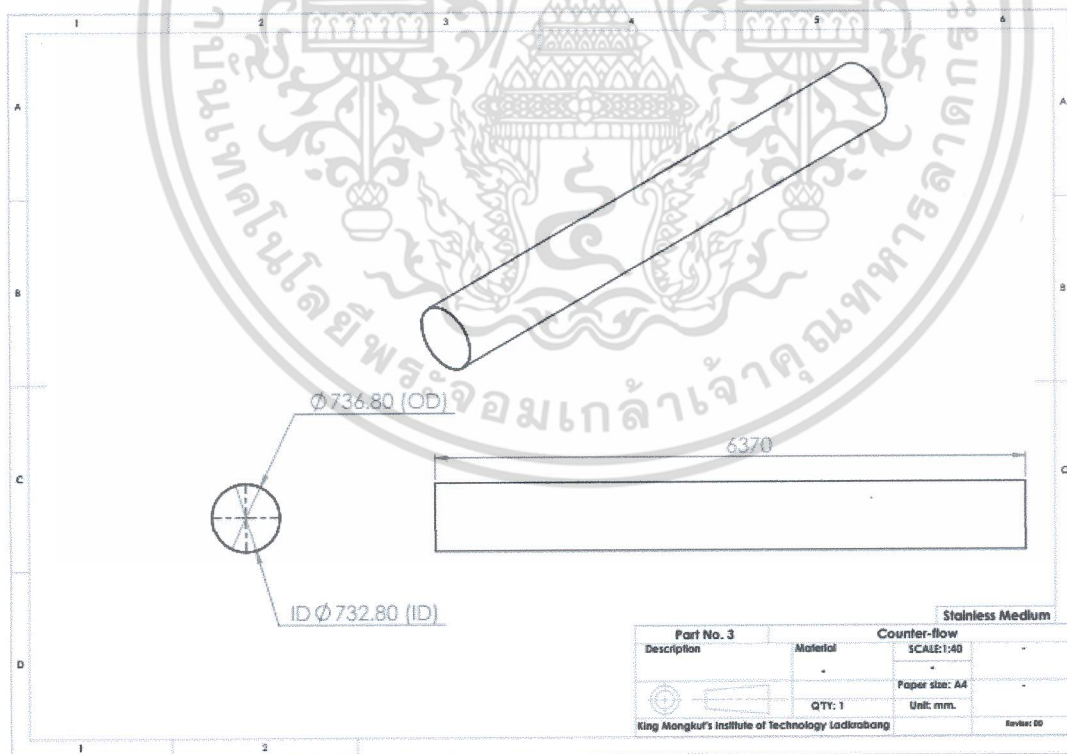


ภาพที่ ข.2 แบบ Drawing ของส่วนที่เป็นช่องการไหลของของไหลอากาศดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ข.3 แบบ Drawing ของส่วนที่เป็นช่องการไหลของของไหลก๊าซไอเสีย



ภาพที่ ข.4 แบบ Drawing ของส่วนที่เป็นตัวกลางสแตนเลสแผ่น

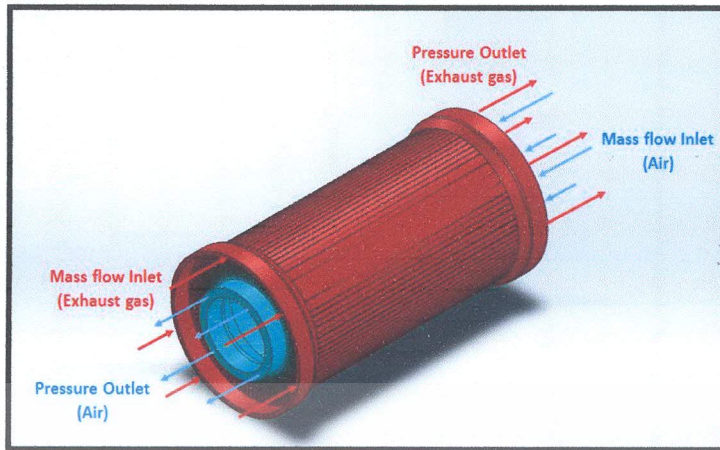
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค.

แบบ Drawing อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการไหลแบบสวนทางกัน  
(Counter-Flow) ซึ่งถูกออกแบบสำหรับการทำแบบจำลองไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

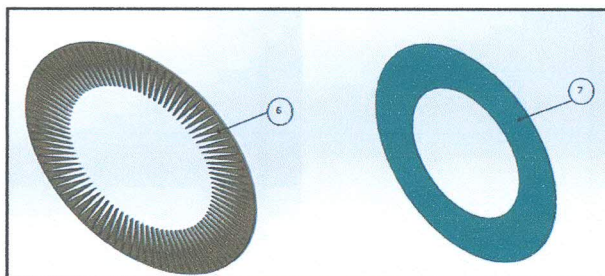


ภาพที่ ค.1 รูปทรงของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ไหลแบบสวนทางกัน (Counter-Flow) โดยตัวกลางกลางสแตนเลสมีรูปทรงเป็นแผ่นพับ ประกอบไปด้วย 3 ส่วนประกอบหลักดังนี้ 1. ช่องการไหลของอากาศดี 2. ตัวกลางสแตนเลสแผ่นพับ 3. ช่องการไหลของก๊าซไอเสีย

แบบส่วนประกอบของออกแบบรูปทรงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ได้มีการออกแบบส่วนประกอบย่อยของแต่ละส่วนของช่องการไหลรวมถึงลักษณะของแผ่นตัวกลางด้วย โดยส่วนประกอบย่อยของทั้งช่องการไหลด้านอากาศดีและก๊าซไอเสียนั้นจะประกอบไปด้วยส่วยประกอบหลักๆ คือ ทางเข้าของช่องการไหล หน้าแปลนของช่องการไหล ช่องการไหลส่วนภายในระหว่างอากาศร้อนและก๊าซไอเสียซึ่งเป็นช่วงที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน ทางออกของช่องการไหล ส่วนตัวกลางสแตนเลสก็จะถูกออกแบบโดยการพับขึ้นรูป ดังภาพที่ ค.2 ถึง ค.5



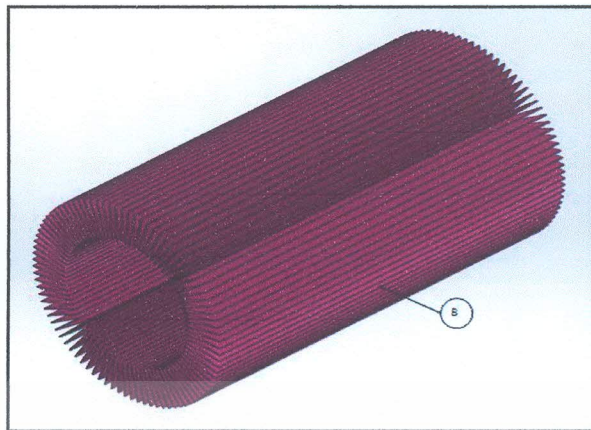
ภาพที่ ค.2 ส่วนประกอบย่อยของช่องการไหลด้านอากาศดี



ภาพที่ ค.3 ส่วนประกอบย่อยของหน้าแปลนทั้งด้านช่องการไหลอากาศดีและก๊าซไอเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ค.4 ตัวกลางสแตนเลสที่ขึ้นรูปทรงโดยการพับ

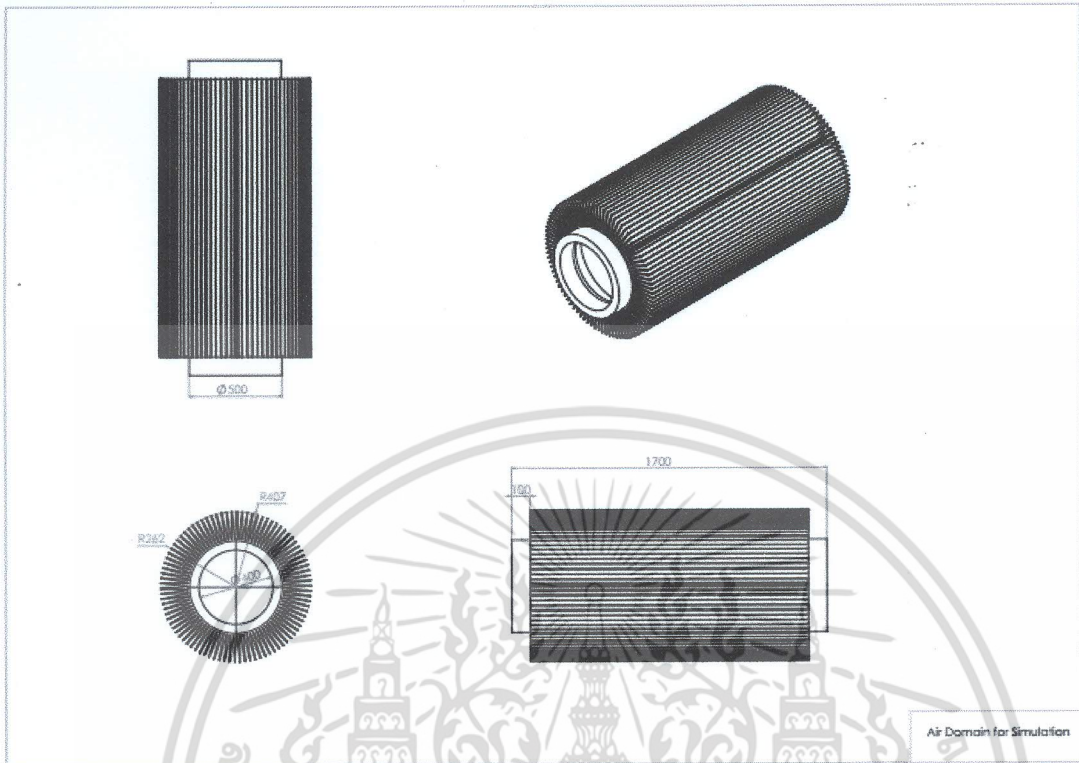


ภาพที่ ค.5 ส่วนประกอบย่อยของช่องการไหลด้านก๊าซไอเสีย

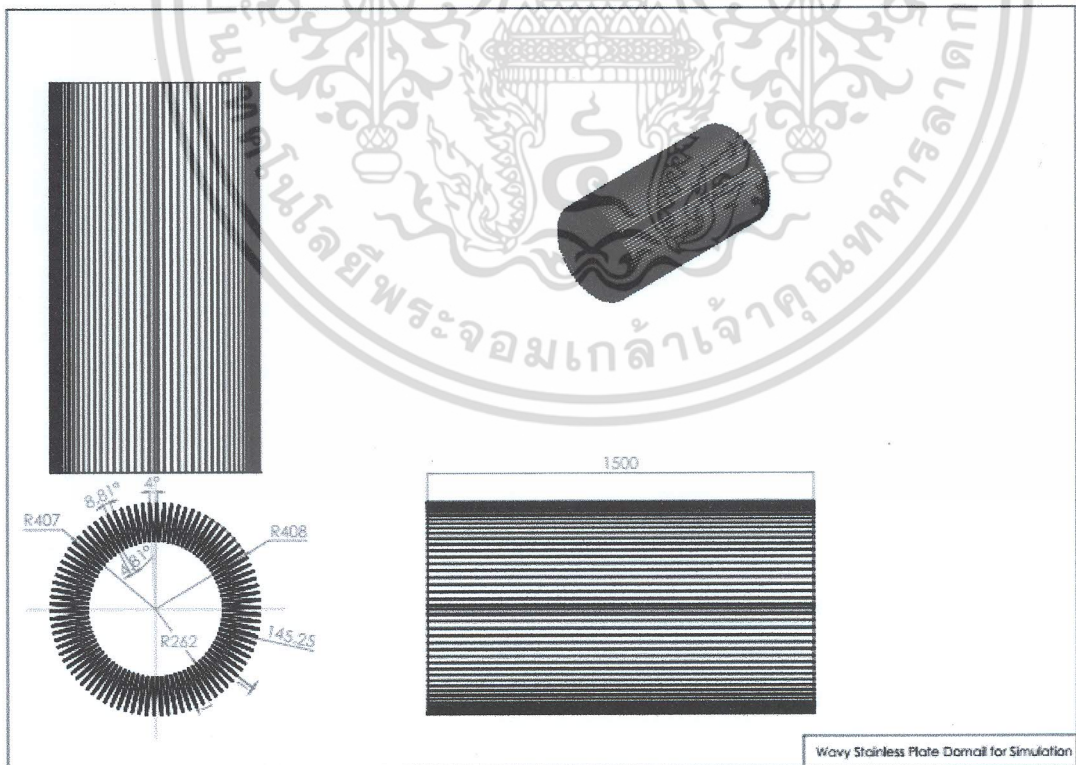
ตารางที่ ค.1 รายการชื่อส่วนประกอบย่อยของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั้งส่วนของช่องการไหลด้านอากาศดี ก๊าซไอเสียและตัวกลางสแตนเลส

ลำดับที่	ส่วนประกอบ
1	ช่องการไหลนอก ทางเข้าด้านอากาศดี (Outside diameter Inlet Channel of Air)
2	ช่องการไหลใน ทางเข้าด้านอากาศดี (Inside diameter Inlet Channel of Air)
3	ช่องการไหลช่วงที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนภายในช่องการไหลด้านอากาศดี
4	ช่องการไหลนอก ทางออกด้านอากาศดี (Outside diameter Inlet Channel of Air)
5	ช่องการไหลนอก ทางเข้าด้านอากาศดี (Outside diameter Inlet Channel of Air)
6	ตัวยึดหน้าแปลน (Jaw Flange)
7	แผ่นหน้าแปลน (Plate flange)
8	ตัวกลางสแตนเลส (Stainless Wavy Plate)
9	ช่องการไหลนอก ทางเข้าด้านก๊าซไอเสีย (Outside diameter Inlet Channel of Exhaust gas)
10	ช่องการไหลใน ทางเข้าด้านก๊าซไอเสีย (Inside diameter Inlet Channel of Exhaust gas)
11	ช่องการไหลช่วงที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนภายในช่องการไหลด้านอากาศดี
12	ช่องการไหลนอก ทางออกด้านก๊าซไอเสีย (Outside diameter Inlet Channel of Exhaust gas)
13	ช่องการไหลนอก ทางเข้าด้านก๊าซไอเสีย (Outside diameter Inlet Channel of Exhaust gas)

แบบ Drawing ของโดเมนทั้ง 3 ส่วน ที่จะนำไปใช้ในการทำแบบจำลองการไหลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบสวนทางกัน (Counter-Flow) ซึ่งแสดงดังรูปข้างล่างดังต่อไปนี้

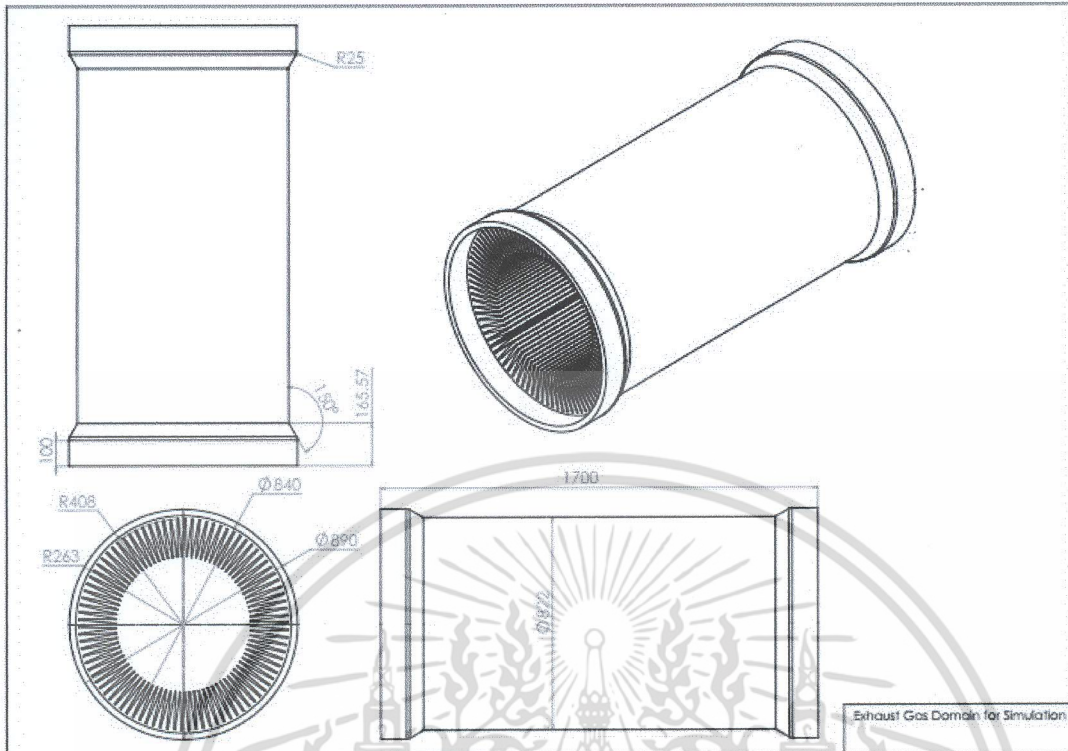


ภาพที่ ค.6 แบบ Drawing ของส่วนโดเมนการไหลของของไหลอากาศดีที่ใช้สำหรับทำแบบจำลอง



ภาพที่ ค.7 แบบ Drawing ของส่วนโดเมนตัวกลางสแตนเลสที่ขึ้นรูปทรงโดยการพับที่ใช้สำหรับทำแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ค.8 แบบ Drawing ของส่วนโดเมนการไหลของของไหลก๊าซไอเสียที่ใช้สำหรับทำแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



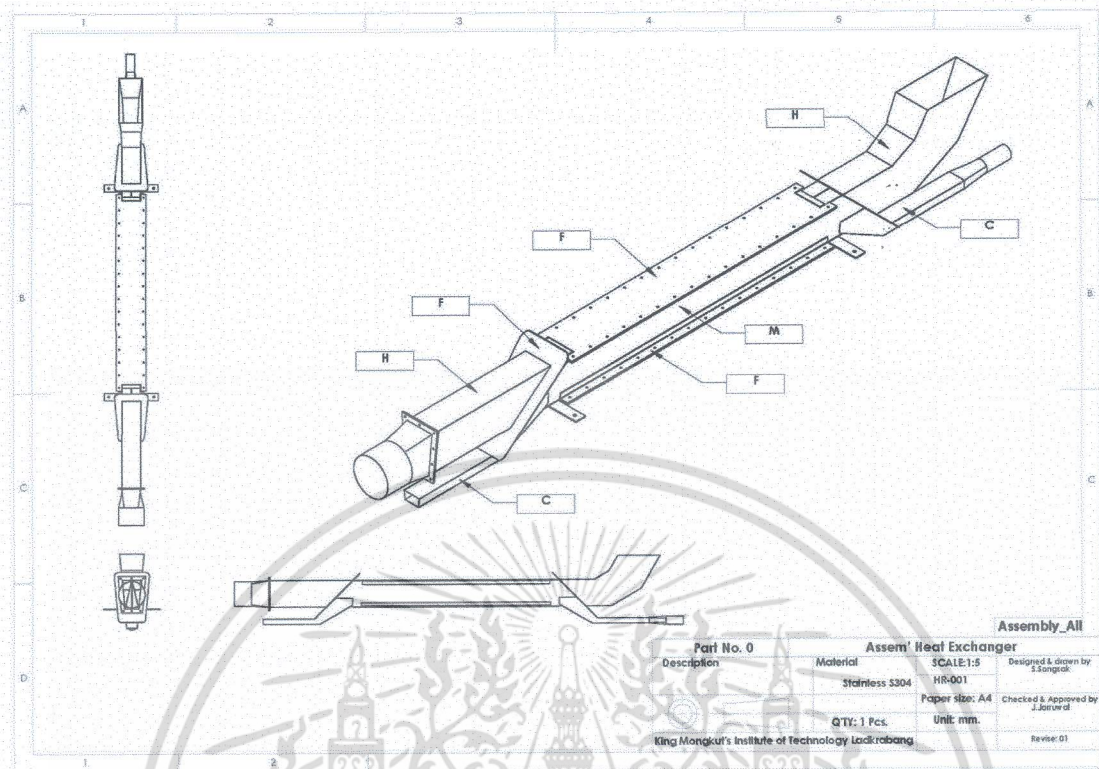
ภาคผนวก ง.  
แบบสั่งผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

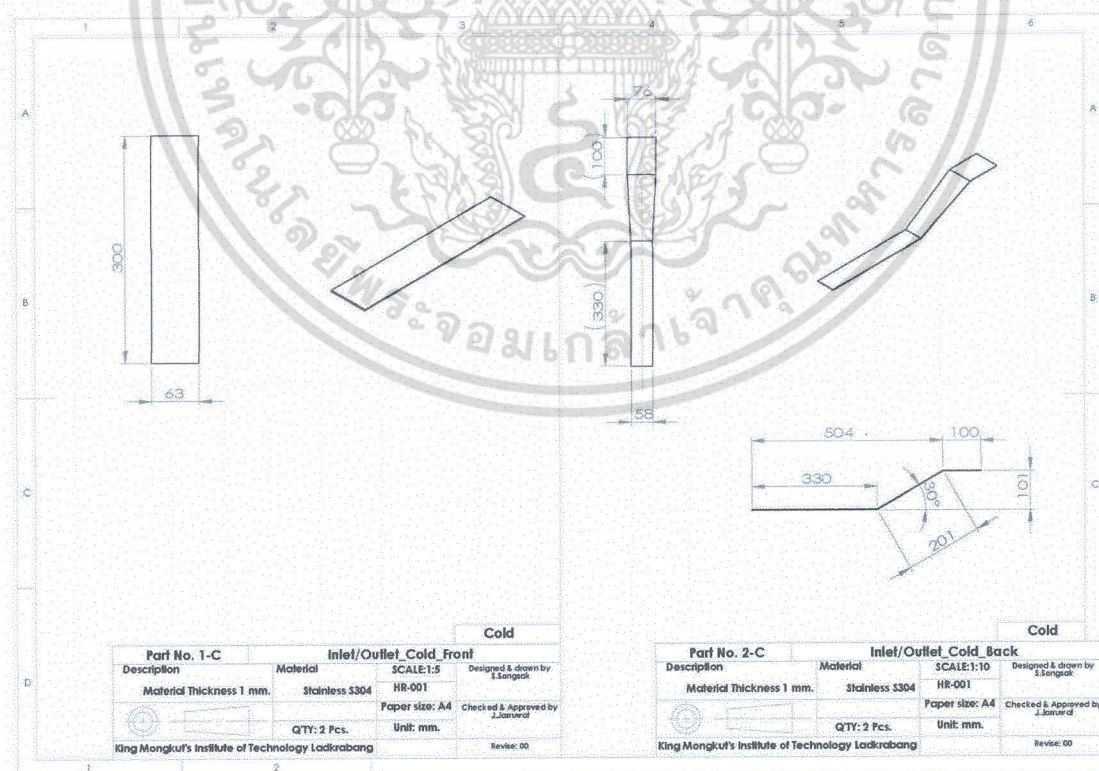


ภาคผนวก ง1.  
ชิ้นส่วนแบบสั่งผลิตเครื่องต้นแบบของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

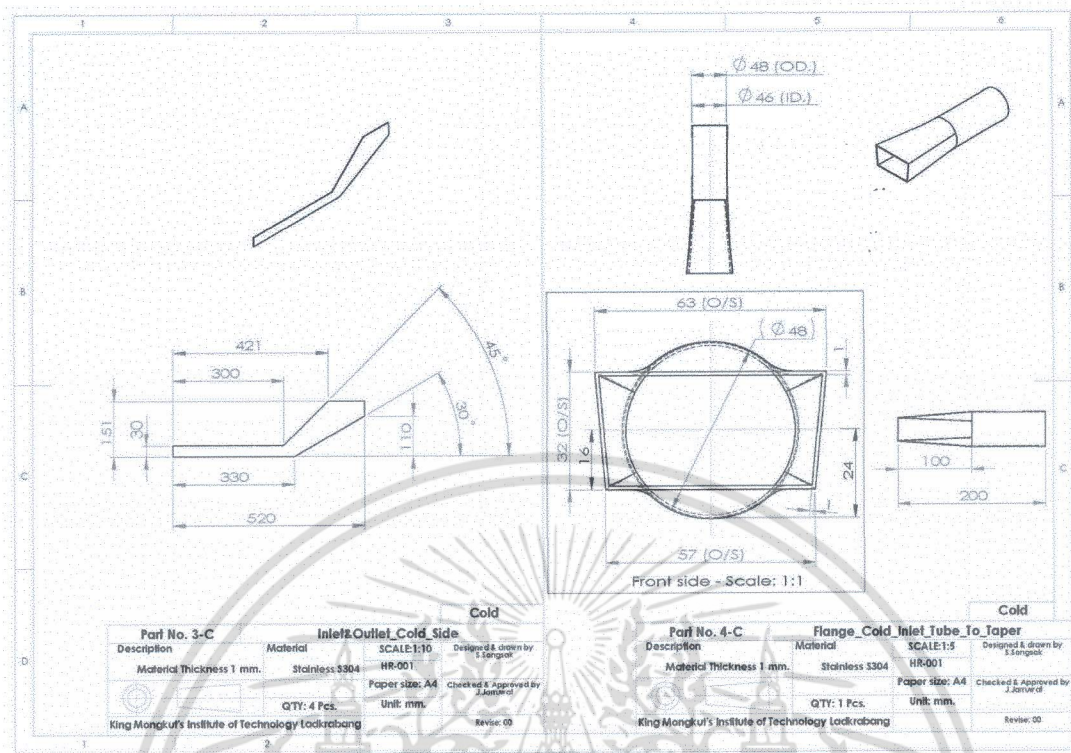


ภาพที่ ง1.1 ส่วนประกอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

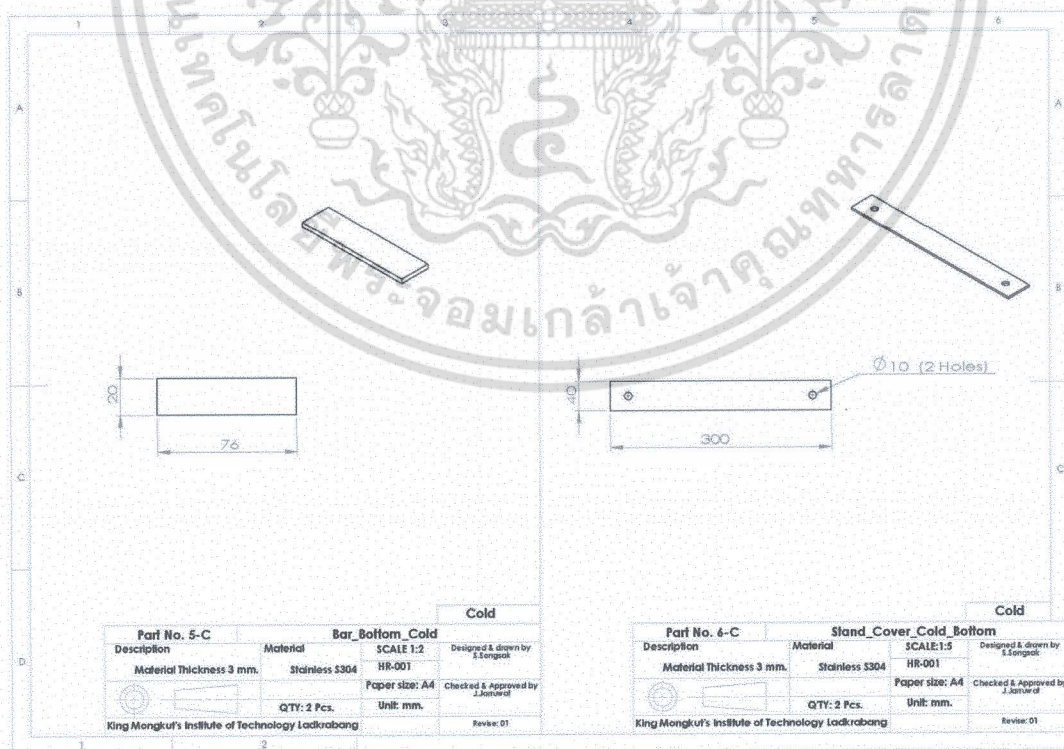


ภาพที่ ง1.2 รายละเอียดของชิ้นส่วนหมายเลข 1-C: Inlet/Outlet Cold Front, 2-C: Inlet/Outlet Cold Back

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

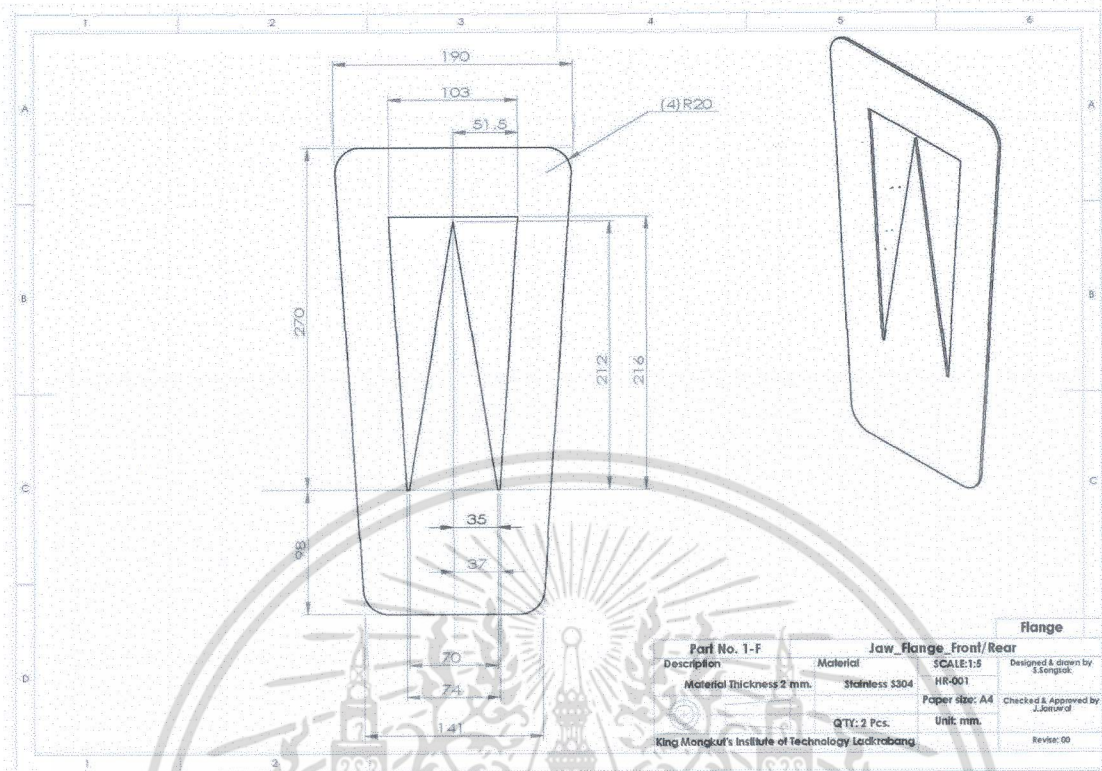


ภาพที่ ง1.3 รายละเอียดของชิ้นส่วนหมายเลข 3-C: Inlet & Outlet Cold Side, 4-C: Flange Cold Inlet Tube To Taper

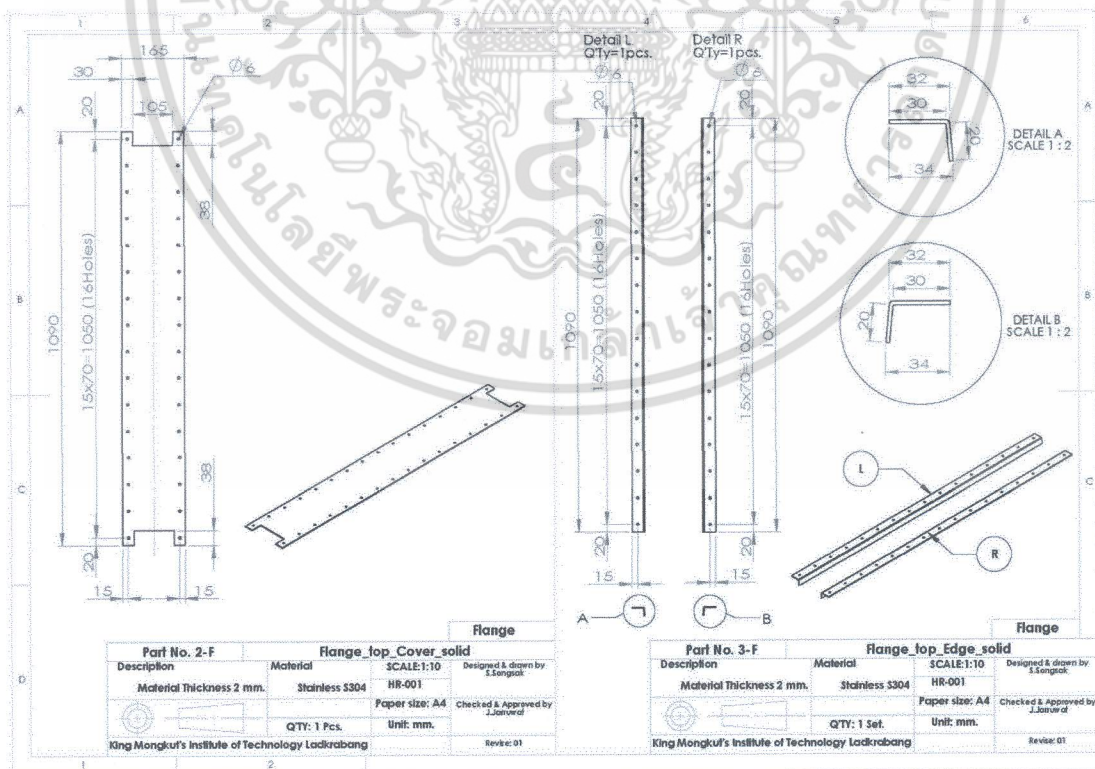


ภาพที่ ง1.4 รายละเอียดของชิ้นส่วนหมายเลข 5-C: Bar Bottom Cold, 6-C: Stand Cover Cold Bottom

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

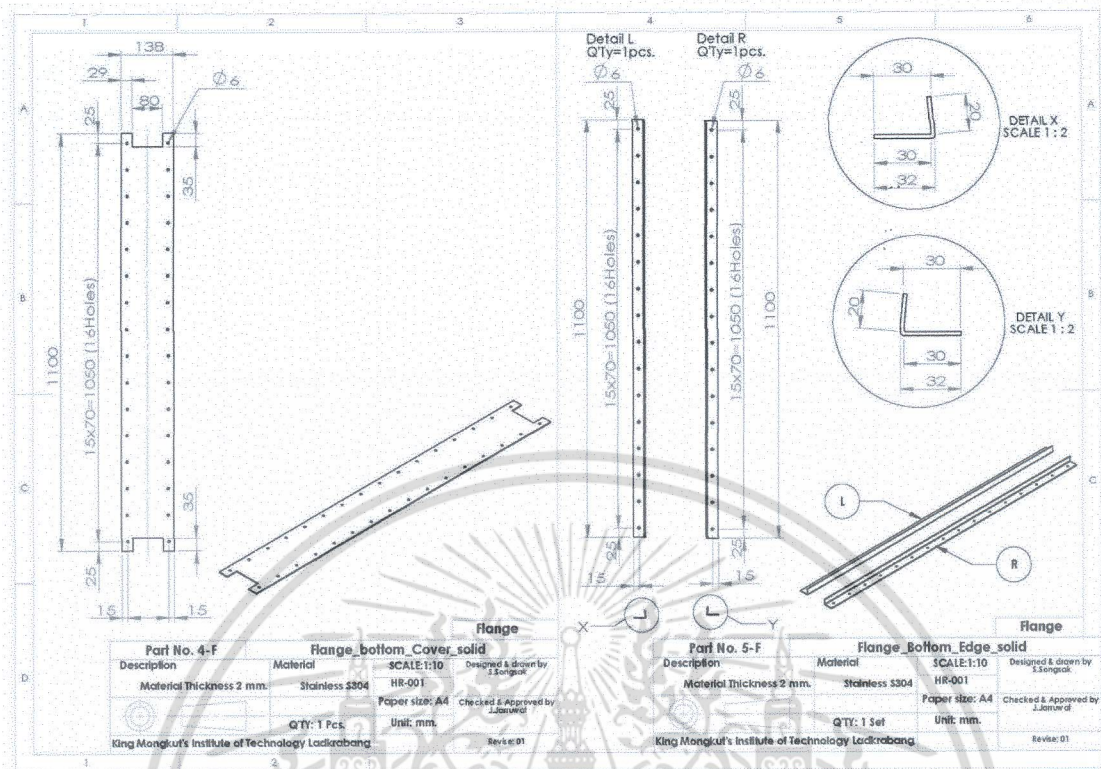


ภาพที่ ง1.5 รายละเอียดของชิ้นส่วนหมายเลข 1-F: Flange Front/Rear

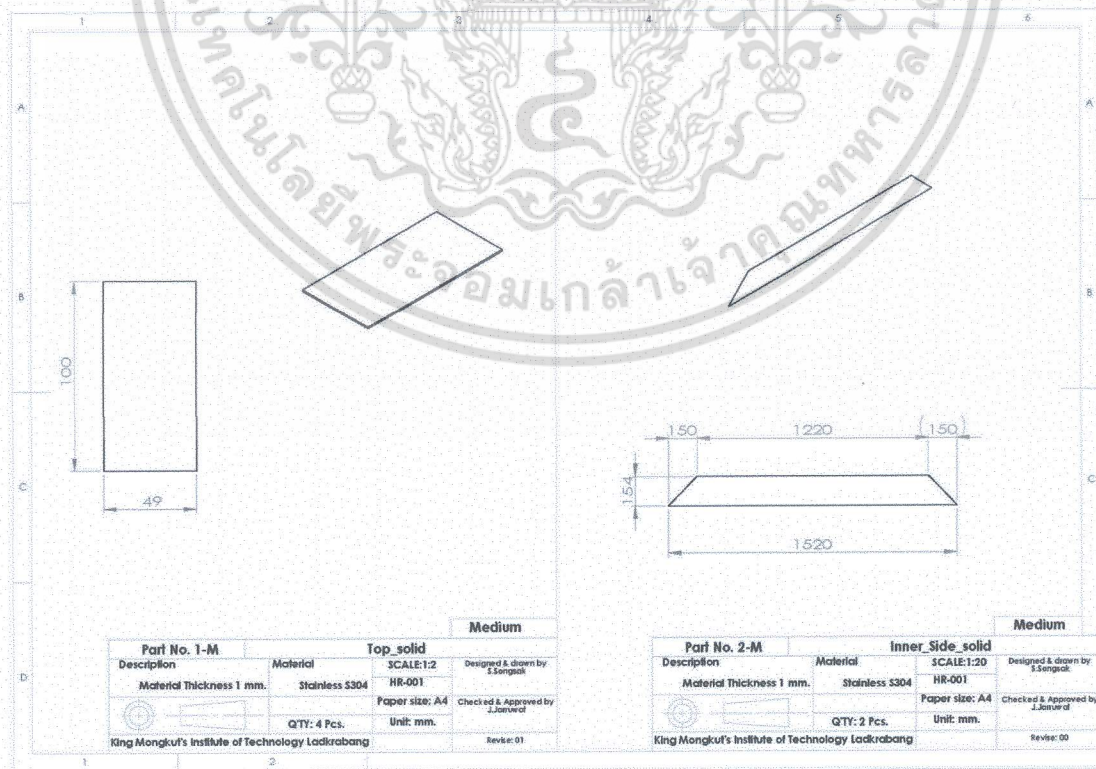


ภาพที่ ง1.6 รายละเอียดของชิ้นส่วนหมายเลข 2-F: Flange Top Cover Solid, 3-F: Flange Top Edge

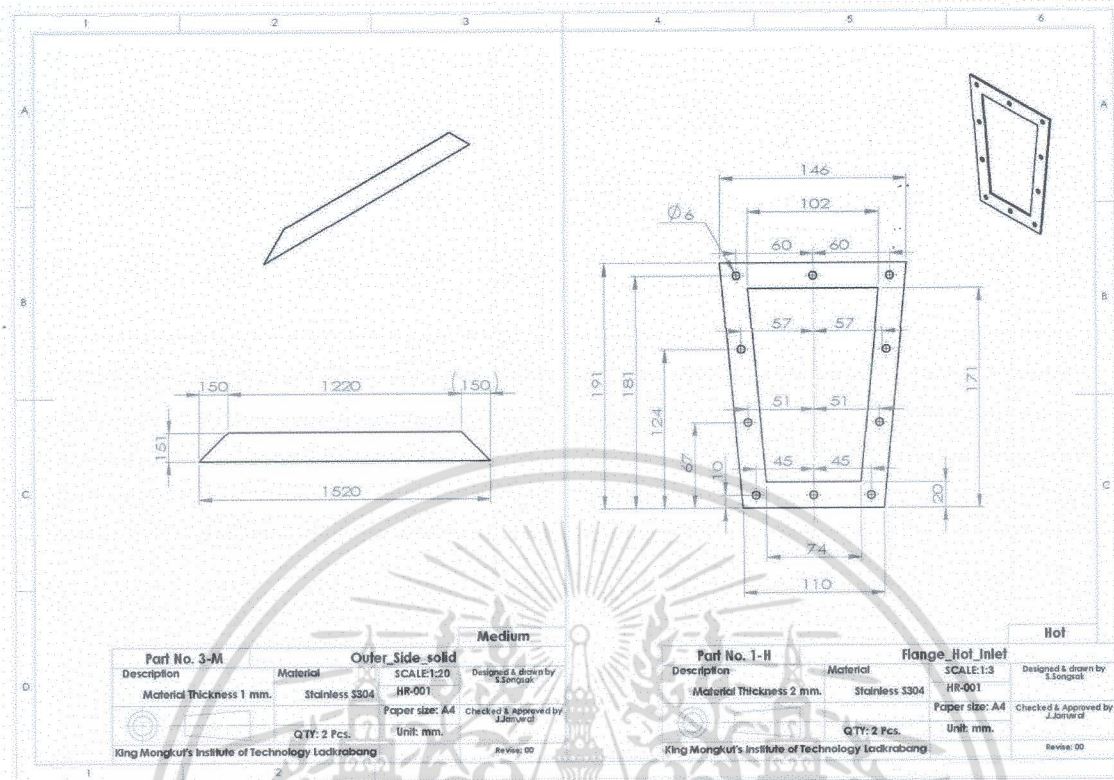
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



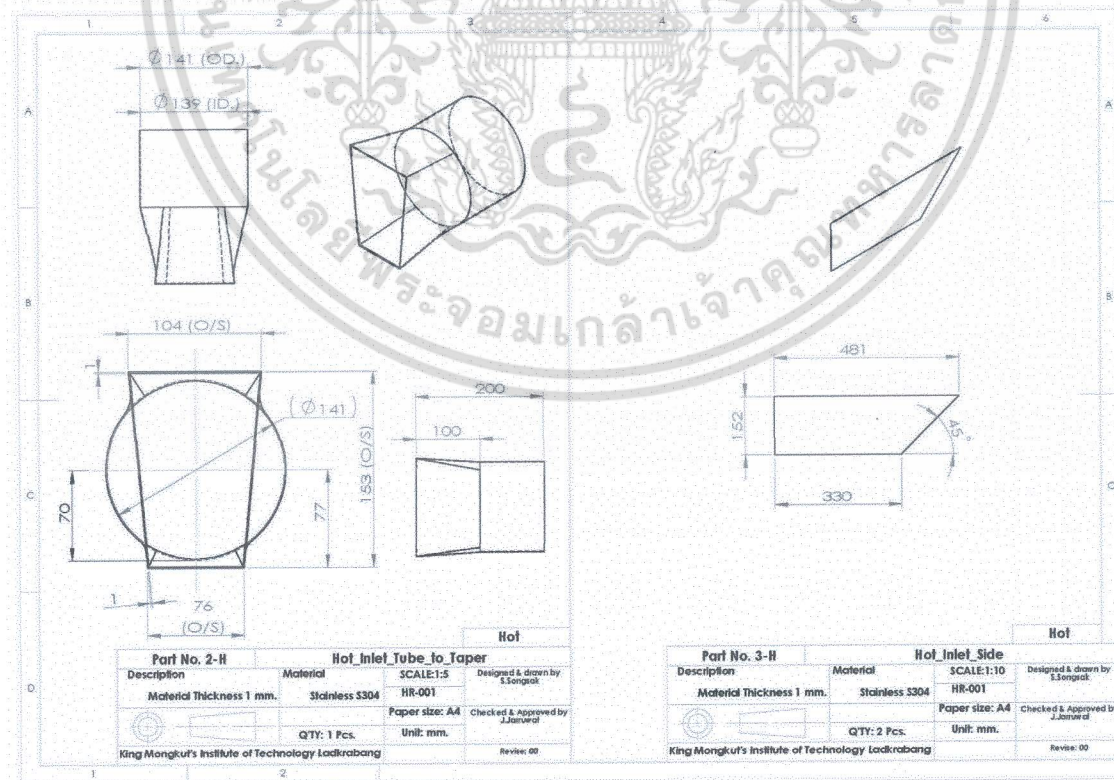
ภาพที่ 1.7 รายละเอียดของชิ้นส่วนหมายเลข 4-F: Flange Bottom Cover Solid, 5-F: Flange Bottom Edge Solid



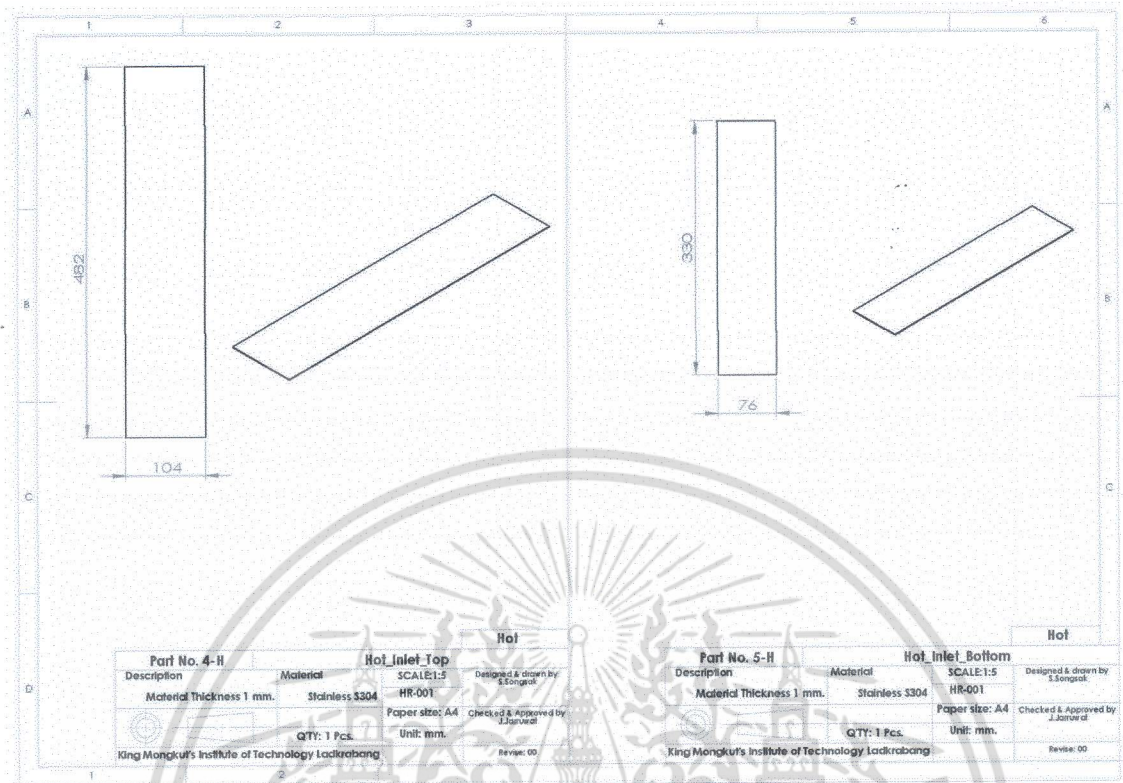
ภาพที่ 1.8 รายละเอียดของชิ้นส่วนหมายเลข 1-M: Top Solid, 2-M: Inner Side Solid เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อนำมาใช้เพื่อประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



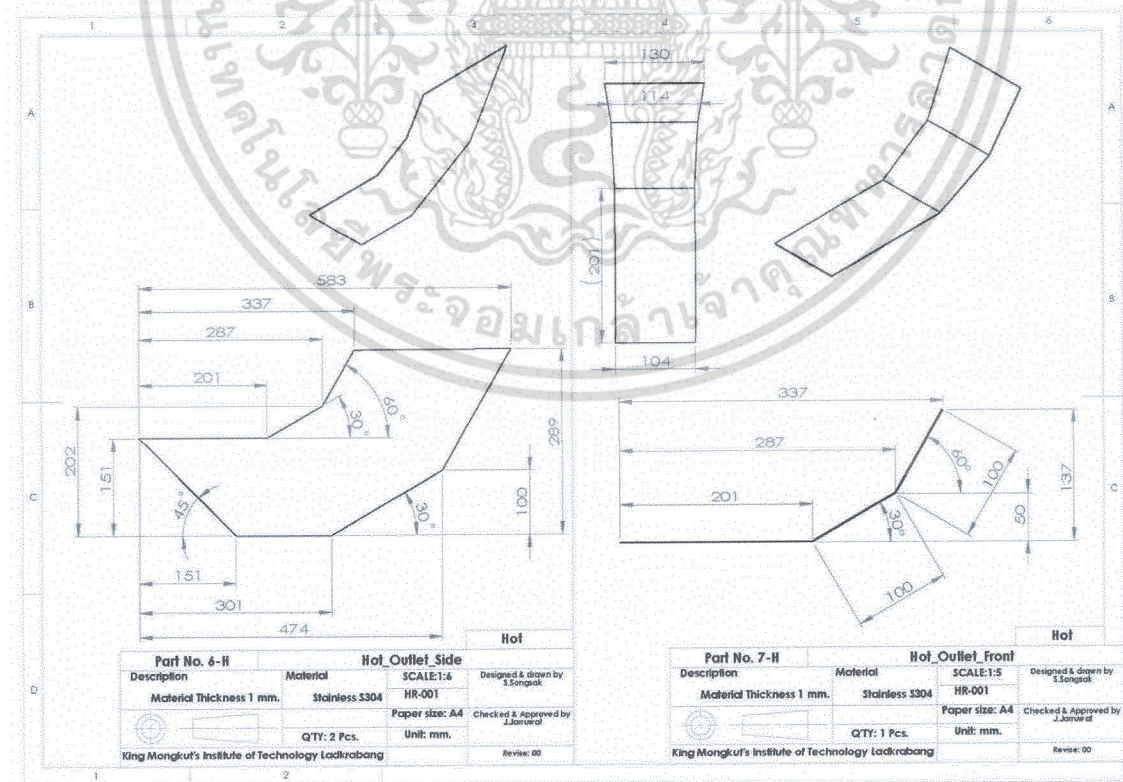
ภาพที่ 1.9 รายละเอียดของชิ้นส่วนหมายเลข 3-M: Outer Side Solid, 1-H: Flange Hot Inlet



ภาพที่ 1.10 รายละเอียดของชิ้นส่วนหมายเลข 2-H: Hot Inlet Tube to Taper, 3-H: Hot Inlet Side เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

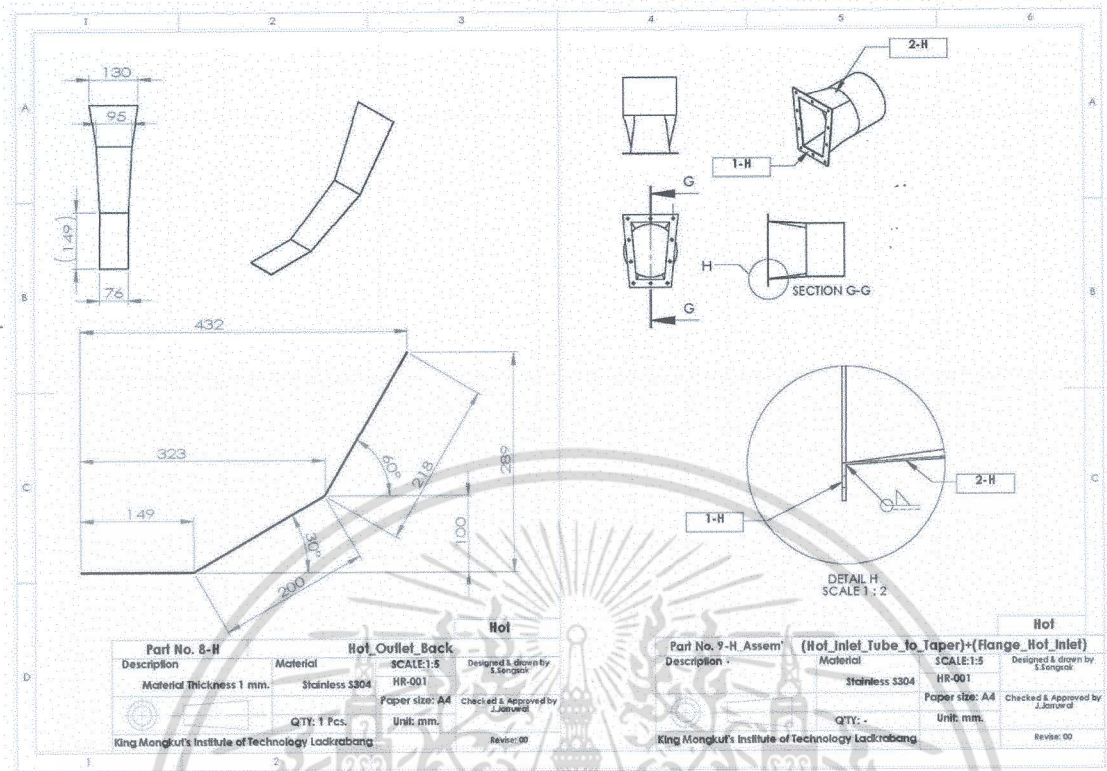


ภาพที่ ง1.11 รายละเอียดของชิ้นส่วนหมายเลข 4-H: Hot Inlet Top, 5-H: Hot Inlet Bottom

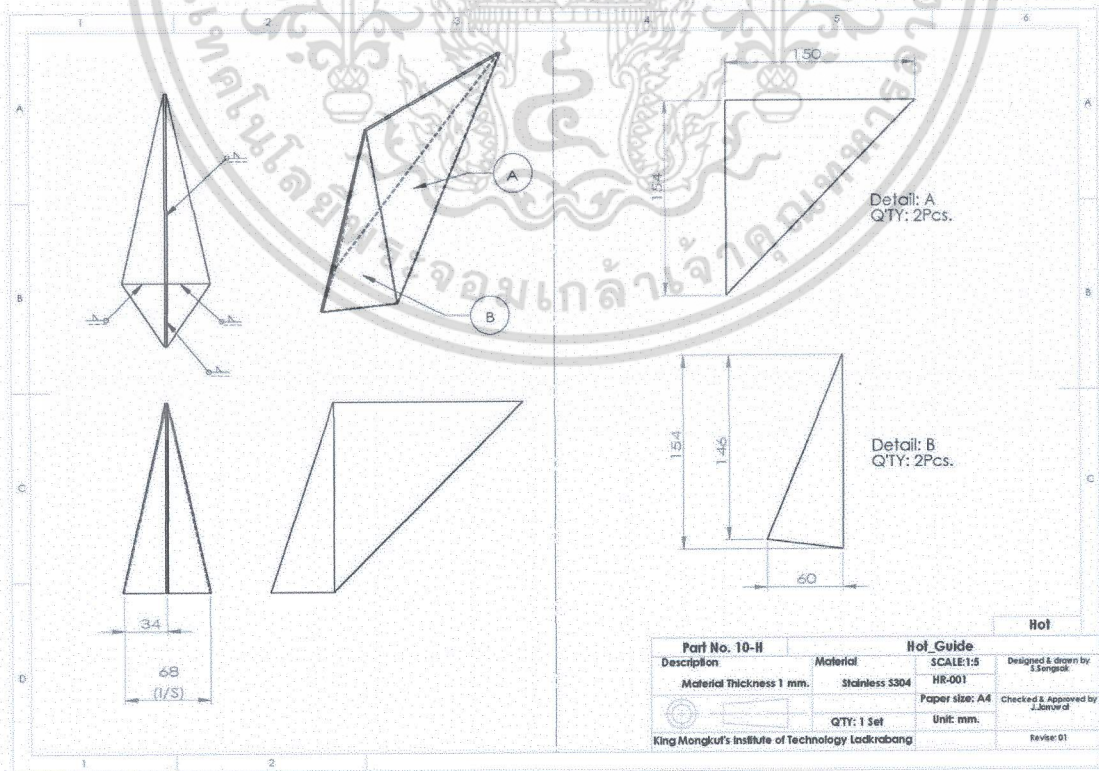


ภาพที่ ง1.12 รายละเอียดของชิ้นส่วนหมายเลข 6-H: Hot Outlet Side, 7-H: Hot Outlet Front

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

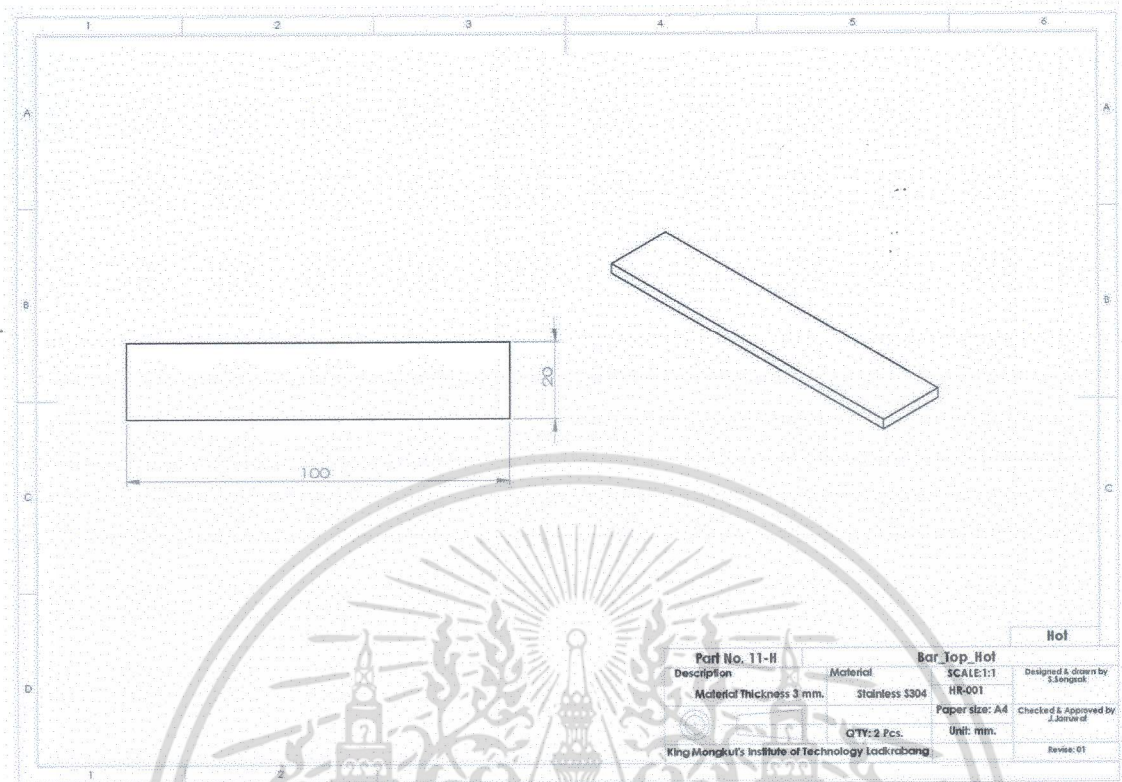


ภาพที่ ง1.13 รายละเอียดของชิ้นส่วนหมายเลข 8-H: Hot Outlet Back, 9-H: (Hot Inlet Tube to Taper)+(Flange Hot Inlet)



ภาพที่ ง1.14 รายละเอียดของชิ้นส่วนหมายเลข 10-H: Hot Guide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



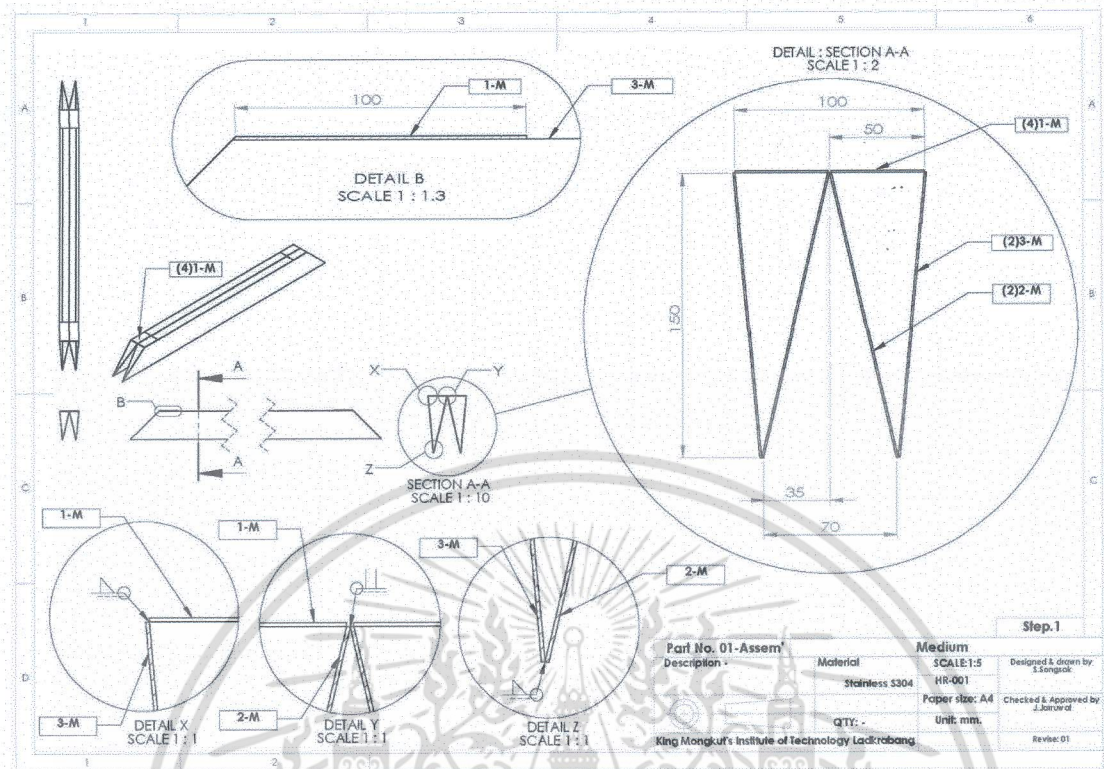
ภาพที่ ง1.15 รายละเอียดของชิ้นส่วนหมายเลข 11-H: Bar Top Hot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

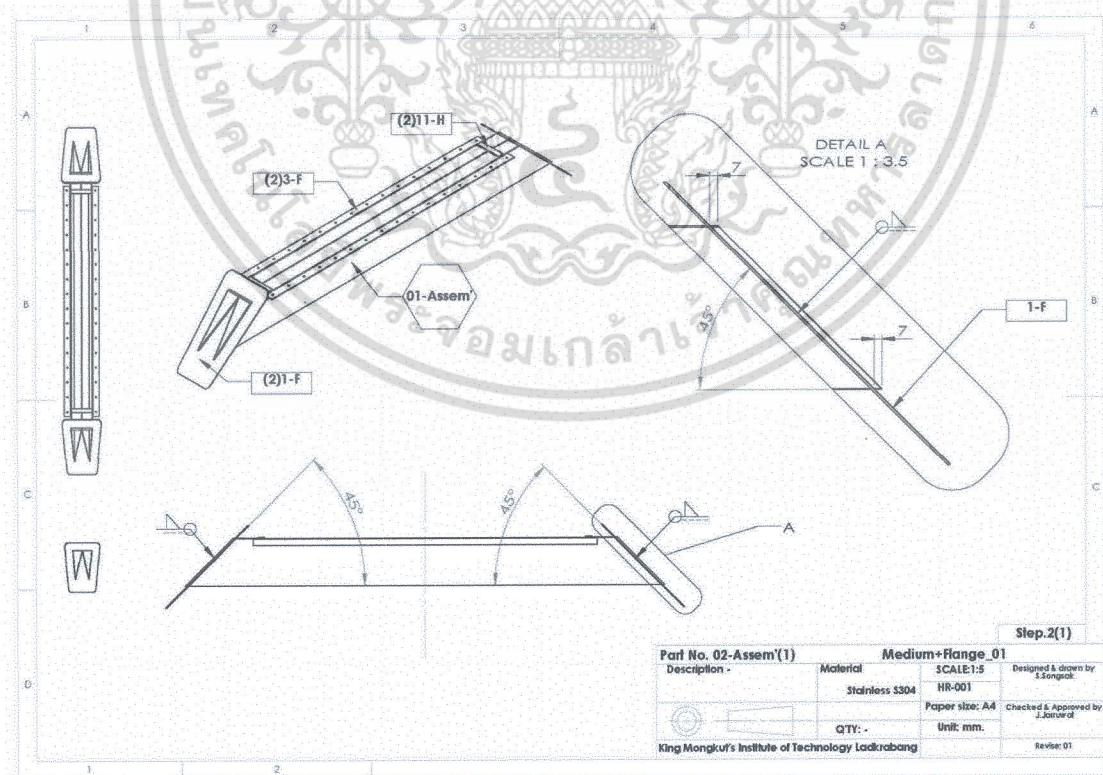


ภาคผนวก ง2.  
ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นส่วนแบบสังผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

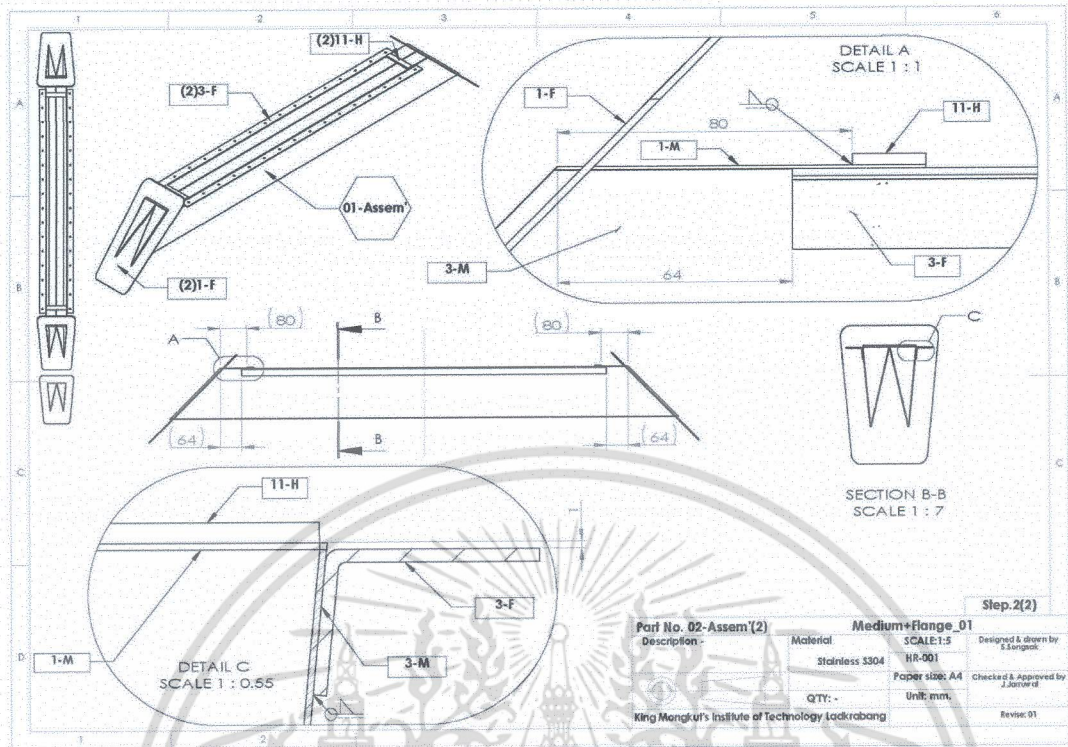


ภาพที่ 2.1 ขั้นตอนการเชื่อมชิ้นส่วนของตัวกลางระหว่างช่องการไหล 01-Assem': Medium

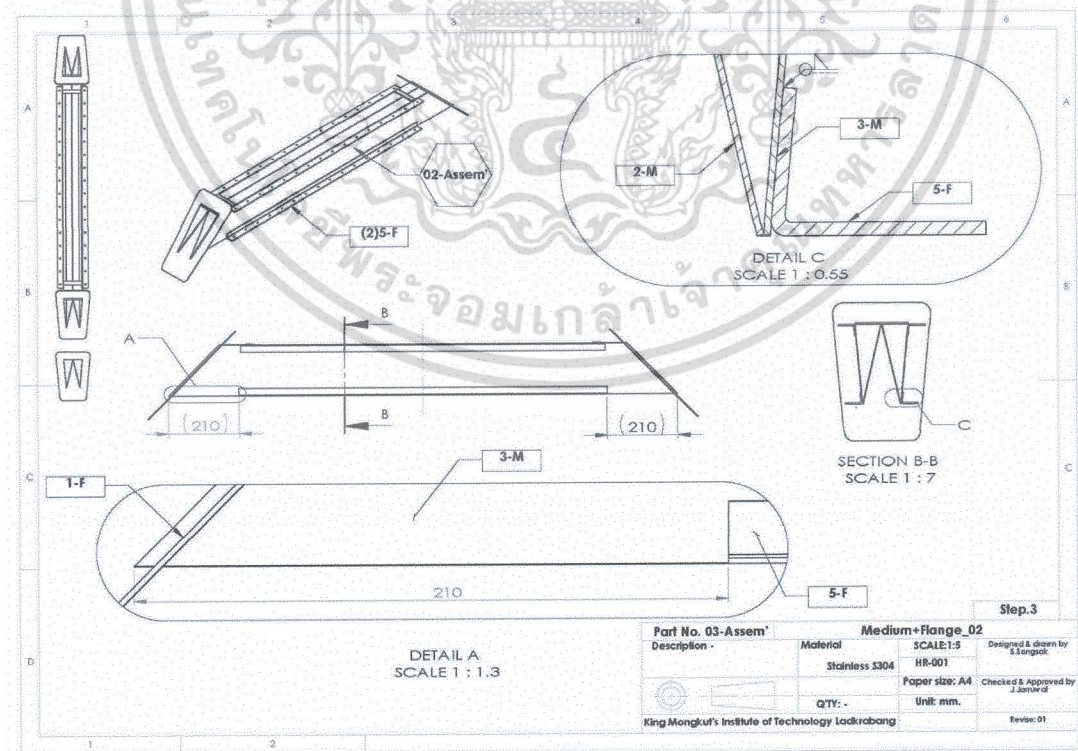


ภาพที่ 2.2 ขั้นตอนการเชื่อมชิ้นส่วนของตัวกลางระหว่างช่องการไหลกับหน้าแปลน 02-Assem'(1): Medium + Flange 01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



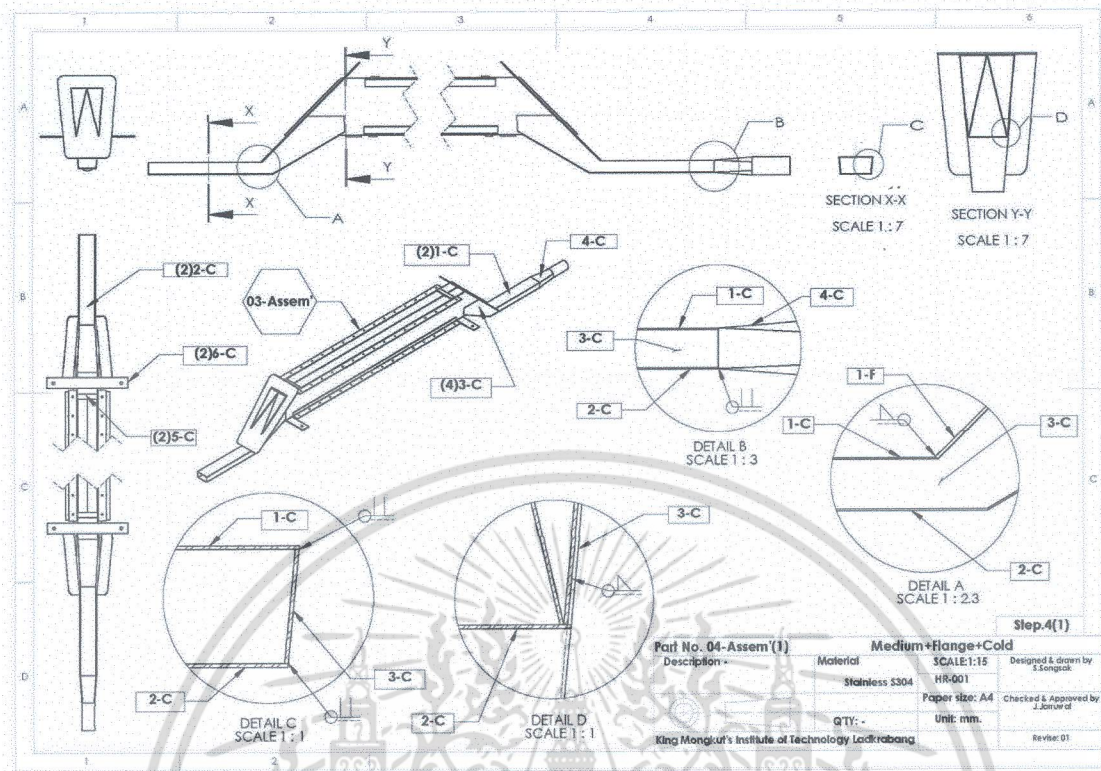
ภาพที่ ง2.3 ขั้นตอนการเชื่อมชิ้นรูปส่วนของตัวกลางระหว่างช่องการไหลกับหน้าแปลน (ต่อ) 02-Assem'(2): Medium + Flange\_01



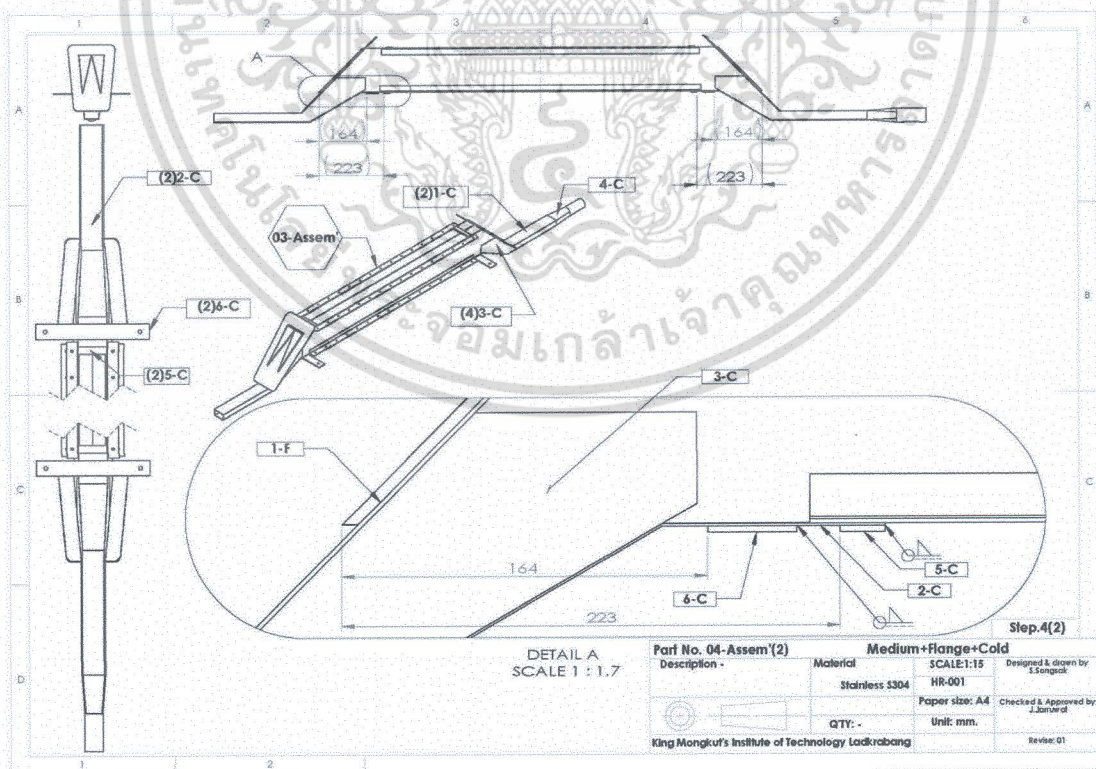
ภาพที่ ง2.4 ขั้นตอนการเชื่อมชิ้นรูปส่วนของตัวกลางระหว่างช่องการไหลกับหน้าแปลน (ต่อ 1)

03-Assem': Medium + Flange\_02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

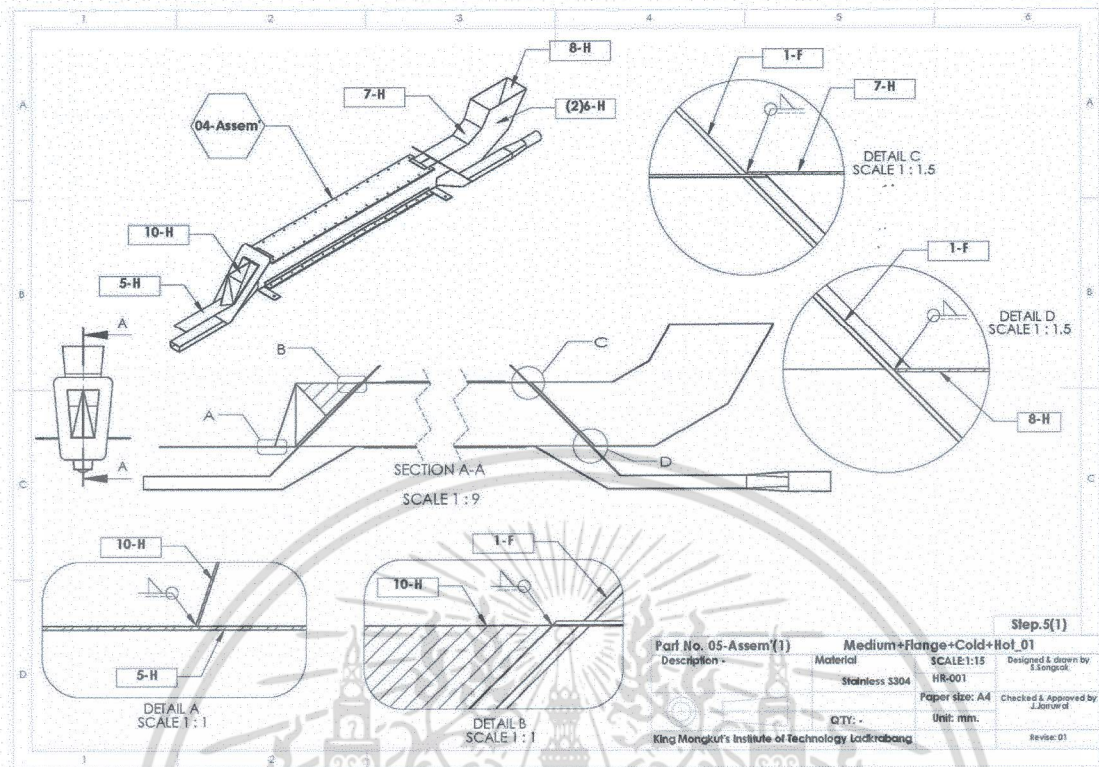


ภาพที่ 2.5 ขั้นตอนการเชื่อมชิ้นส่วนของตัวกลางระหว่างช่องการไหลกับหน้าแปลนและช่องอากาศดี  
04-Assem'(1): Medium + Flange + Cold

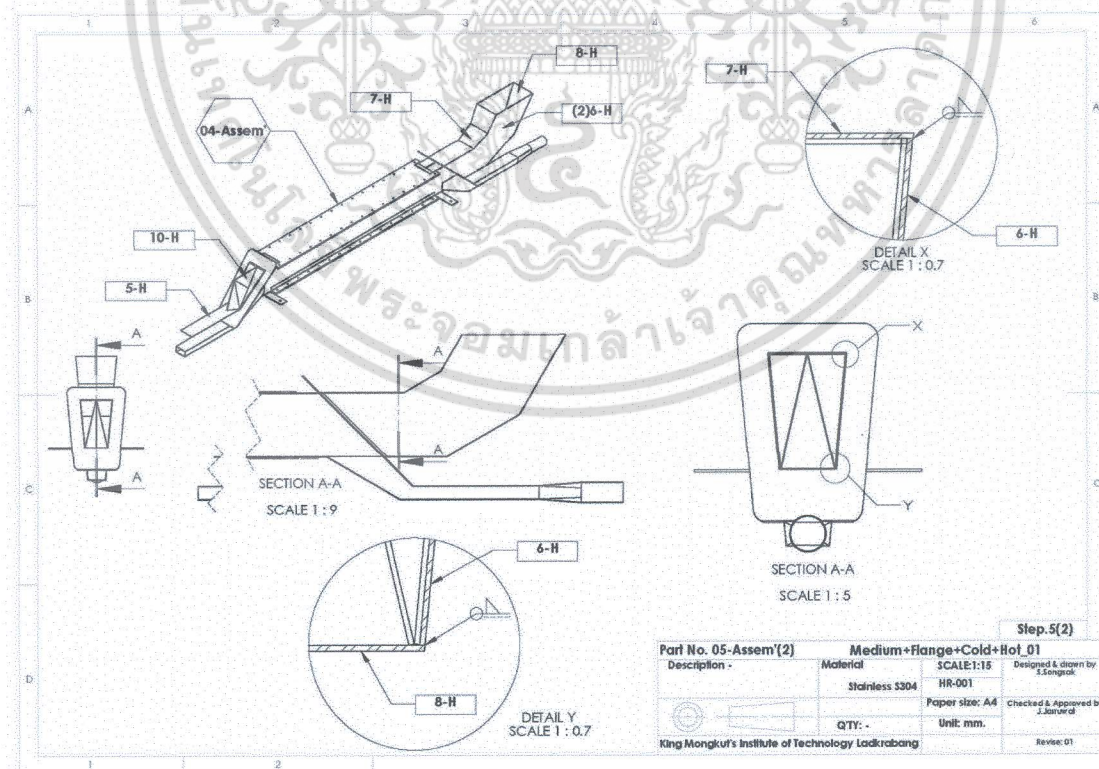


ภาพที่ 2.6 ขั้นตอนการเชื่อมชิ้นส่วนของตัวกลางระหว่างช่องการไหลกับหน้าแปลนและช่องอากาศดี  
(ต่อ) 04-Assem'(2): Medium + Flange + Cold

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

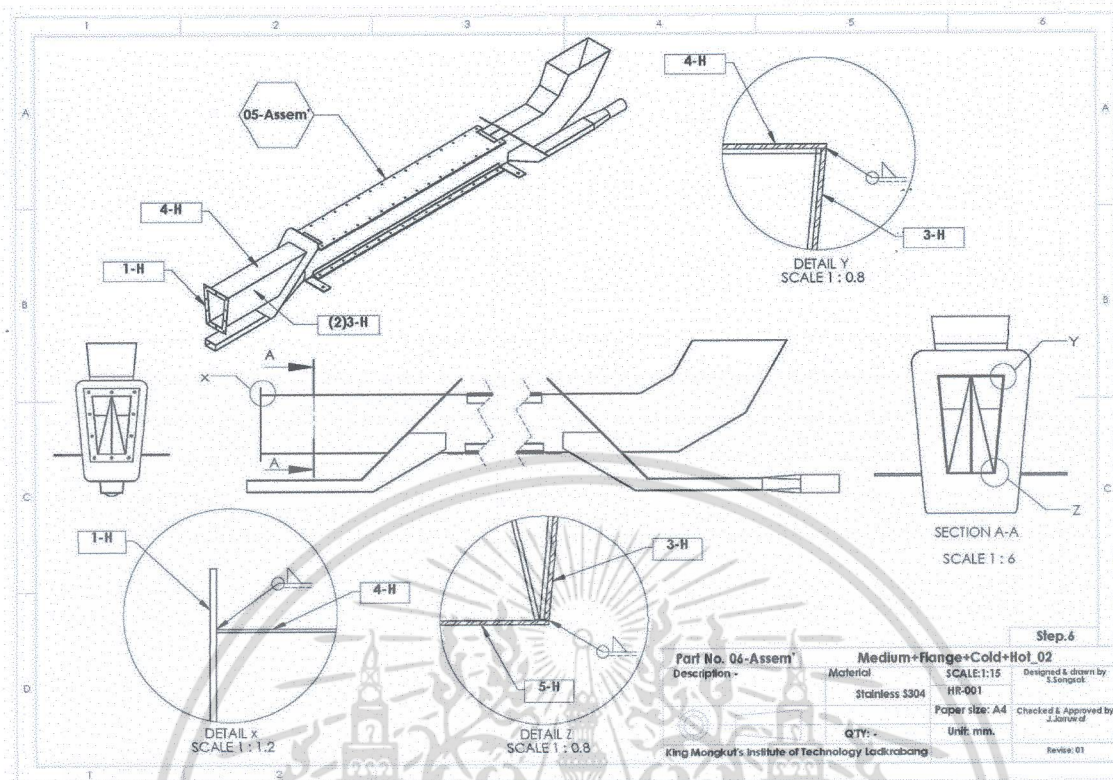


ภาพที่ ๖2.7 ขั้นตอนการเชื่อมขึ้นรูปส่วนของตัวกลางระหว่างช่องการไหลกับหน้าแปลนกับช่องอากาศดี และก๊าซไอเสีย 05-Assem'(1): Medium + Flange + Cold + Hot\_01



ภาพที่ ๖2.8 ขั้นตอนการเชื่อมขึ้นรูปส่วนของตัวกลางระหว่างช่องการไหลกับหน้าแปลนกับช่องอากาศดี และก๊าซไอเสีย (ต่อ) 05-Assem'(2): Medium + Flange + Cold + Hot\_01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูงานเท่านั้น เมื่อนำมาใช้เพื่อประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ง2.9 ขั้นตอนการเชื่อมชิ้นรูปส่วนของตัวกลางระหว่างช่องกรไหลกับหน้าแปลนกับช่องอากาศดีและก๊าซไอเสีย (ต่อ 1) 06-Assem'(2): Medium + Flange + Cold + Hot\_02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก จ.  
สรุปการใช้จ่ายเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า, ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**งบบุคลากรสำคัญจ่าย**  
**คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ขอเบิกเงิน รายได้ หมวด เงินอุดหนุน**  
**รวมใบสำคัญ 6 ฉบับ**

ลำดับที่	รายการ	ชื่อผู้ถูกหักภาษี	จำนวน ใบสำคัญ	จำนวนที่ หักภาษี	จำนวนเงินที่ ขอเบิก
	งานวิจัยพัฒนาและถ่ายทอดเทคโนโลยี ค่าใช้จ่ายในโครงการวิจัย ของ รศ.ดร. จารุวัตร เจริญสุข เรื่อง การพัฒนาสมรรถนะอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อดึงความร้อน ทิ้งกลับมาใช้งานในเครื่องยนต์กังหันก๊าซ ขนาดเล็กเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าจาก เชื้อเพลิงความร้อนต่ำ				
	งบดำเนินงาน(ค่าวัสดุ)				
1	ใบเสร็จรับเงิน เลขที่ 2557-01262		1		642.00
2	ใบเสร็จรับเงิน เลขที่ 090/4494		1		695.50
3	ใบเสร็จรับเงิน เลขที่ IV5701930		1		23,379.50
4	ใบเสร็จรับเงิน เลขที่ IV5701997		1		20,009.00
5	ใบเสร็จรับเงิน เลขที่ CS5707-040		1		13,910.00
6	ใบเสร็จรับเงิน เลขที่ 2098/104897		1		1,364.00
	(หกหมื่นบาทถ้วน)		6	เงินสด	60,000.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

### หัวหน้าโครงการวิจัย

#### ประวัติส่วนตัว

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) : รศ.ดร. จารุวัตร เจริญสุข

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) : Assoc. Prof. Dr. Jaruwat Charoensuk

ตำแหน่งปัจจุบัน : รองศาสตราจารย์

หน่วยงานและสถานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก :

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โทรศัพท์/โทรสาร : 02-329-8351 / 02-329-8352

e-mail : kcjaruw@kmitl.ac.th

#### ประวัติการศึกษา

ปริญญาตรี : วิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาเอก : Ph.D. Thermo-fluids, Imperial College University of London

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) :

การเผาไหม้, Computational Fluid Dynamics

#### ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

โครงการวิจัย และการบริการวิชาการ :

- หัวหน้าโครงการ : การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการก่อตัวของก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์ จาก การเผาไหม้ถ่านหินผง สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย ในปี 2540 ถึง 2542

- หัวหน้าโครงการ : โครงการ พัฒนาเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก เพื่อเป็นต้นกำลังงานกล สำหรับห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล สนับสนุนงานวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ในปี 2543 ถึง ปี พ.ศ. 2545

- หัวหน้าโครงการ : โครงการ การพัฒนาหัวเผ้าน้ำมันพืชใช้แล้วสำหรับผู้ประกอบการอาหารทอด สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย ในปี พ.ศ. 2545 ถึง พ.ศ. 2547

- หัวหน้าโครงการ : โครงการ การประยุกต์ใช้น้ำมันพืชใช้แล้วในเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก คณะวิศวกรรมศาสตร์ ปังบประมาณ 2553

- หัวหน้าโครงการ : โครงการการพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตด้วยวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมแบบไร้ระเบียบ รหัสโครงการ MT-B-52-MAC-22-189-G ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2552-2553

- หัวหน้าโครงการ : โครงการถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตหม้อน้ำ สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม (ภายใต้ค่าใช้จ่ายในการศึกษาและพัฒนากระบวนการบริหารจัดการโรงงาน) ปีงบประมาณ 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่ปรึกษาโครงการ : โครงการพัฒนาประสิทธิภาพโรงงานน้ำตาลด้านต้นกำลังหม้อน้ำ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย กระทรวงอุตสาหกรรม

- นักวิจัย โครงการ การพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ตั้งแต่ปี พ.ศ.2544 - 2549

- นักวิจัย โครงการ การพัฒนาระบบประกอบห่อเซลล์ การจัดการทางความร้อนและ ไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง ในปี พ.ศ. 2549 ถึงปี พ.ศ. 2552

### งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

- การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการก่อตัวของก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์จาก การเผาไหม้ถ่านหินผง สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย ในปี 2540 ถึงปี พ.ศ. 2542

- การพัฒนาเครื่องยัดกักหินก๊าซขนาดเล็ก เพื่อเป็นต้นกำลังงานกล สำหรับห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล สนับสนุนสนุนวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.ในปี พ.ศ. 2543 ถึง ปี พ.ศ. 2545

- การพัฒนาหัวเผา น้ำมันพีซใช้แล้วสำหรับผู้ประกอบการอาหารทอด สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย ในปี พ.ศ. 2545 ถึง พ.ศ. 2547

- โครงการ การพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ตั้งแต่ปี พ.ศ.2544 ถึง พ.ศ. 2549

- โครงการ การพัฒนาระบบประกอบห่อเซลล์ การจัดการทางความร้อนและ ไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งในปี พ.ศ. 2549 ถึงปี พ.ศ. 2552

- โครงการการพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตด้วยวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมแบบไร้ระเบียบ รหัสโครงการ MT-B-52-MAC-22-189-G ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2552-2553

- การปรับปรุงสภาพเอทานอลชีวภาพสำหรับเป็นเชื้อเพลิงในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (พ.ศ. 2549-2555)

- การพัฒนาข้อมูลสัมประสิทธิ์ทางอากาศพลศาสตร์ของกระสุนปืนใหญ่ขนาด 105 mm. ด้วยการจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

- การพัฒนาสิ่งประดิษฐ์หัวเผาน้ำมันพีซใช้แล้ว สำหรับวิสาหกิจชุมชนยะลา

### ผลงานวิชาการ

#### ระหว่างศึกษาระดับปริญญาเอก

1. Charoensuk J., Godoy S. and Lockwood F.C., Partical segregation by size towards low Nox burner design, EPRI/EPA 1995, Joint Symposium on Stationary Combustion Nox control, Kansas City, Missouri, 1995
2. Charoensuk J. and Lockwood F.C., Effect of scale on combustion and Nox formation characteristics in Coal-Fired furnance, 3rd International Conference on combustion, 1995

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Abbas T., Charoensuk J., Costen P. and Lockwood F. C., The Performance of pulverised-coal frame in a simulated combined cycle unit , Combustion and Frame, Vol. 3, No. 1,p.111-123,1997

#### ผลงานเพื่อขอเข้าสู่ตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์

4. ขนิษฐา สุตพันธ์, จารุวัตร เจริญสุข, สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ, ธันวาคม 2541,โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อออกแบบ ระบบสูบน้ำ ในงานระบายน้ำ , วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 หน้า 52 สิงหาคม 2541
5. Jaruwat Charoensuk, “Dimensional analysis of flow , combustion and heat transfer in industrial combustors”, งานสัมมนาวิชาการ วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 12 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย., พฤศจิกายน 2541
6. จารุวัตร เจริญสุข, วิภู ศรีสืบสาย, “การแก้ปัญหาการไหลแบบราบเรียบภายในท่อกลม ด้วยวิธีไฟไนต์วอลุ่ม”, งานสัมมนาวิชาการ วิศวกรรมเครื่องกล ครั้งที่ 12 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พฤศจิกายน 2541
7. จารุวัตร เจริญสุข, ปัญญา แดงวิไลลักษณ์, “ การประยุกต์ วิธี Finite Volume กับการจำลองการไหลในท่อขยายอย่างฉับพลัน”, งานสัมมนาวิชาการวิศวกรรมเครื่องกล ครั้งที่ 12 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พฤศจิกายน 2541
8. จารุวัตร เจริญสุข, ปัญญา แดงวิไลลักษณ์, “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของการเกิดออกไซด์ของกำมะถันจากการเผาไหม้ของถ่านหินผง”, วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 16 ฉบับที่ 3 กันยายน 2542

#### ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ จำนวน 9 ฉบับ

9. N. Punbusayakul, J. Charoensuk, B. Fungtammasarn, Modified Sulfation Model for Simulation of Pulverized Coal Combustion, Energy Conversion and Management 47 (2006) 253–272\_ Elsevier Ltd. All rights reserved.  
doi:10.1016/j.enconman.2005.03.006
10. M. Masomtop, K.Wongtida, J. Charoensuk, S. Charojrochkul, Improved Electrical Conducting Wires for SOFCs, Advanced Materials Research Vols. 55-57, October 2008, p 797-800.
11. M. Masomtop, K. Wongtida, K. Hanamura, J. Charoensuk and S. Charojrochkul, “High Temperature Behaviour of Contact Interface for Ag and Au with Stainless Steel 316L”, Journal of Metals, Materials and Minerals, 18[2] (2008) 71-75
12. N. Punbusayakul, W. Wongklang, K.Wongtida, J. Charoensuk, S. Charojrochkul, Behavior of Various Glass Seal For Planar Solid Oxide Fuel Cell, Vols. 55-57, October 2008, p 817-820.
13. Passakorn Vessakosol, Jaruwat Charonsuk, Numerical analysis of heat transfer and flow field around cross-flow heat exchanger tube with fouling, Applied Thermal Engineering, February, 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. **Jarrewat Charoensuk**, Passakorn Vessakosol, A higher order Finite Element Procedure for Transient Heat Conduction Analysis of Functionally Graded Material, Heat and Mass Transfer, doi 10.1007/s00231-010-0649-8, December 2010, Volume 46, Numbers 11-12, Pages 1261-1276
15. **Jarrewat Charoensuk**, Passakorn Vessakosol, Numerical solutions for functionally graded solids under thermal and mechanical loads using a high-order control volume finite element method, Applied Thermal Engineering, 2011, Volume 31, Page 213-227, doi:10.1016/j.applthermaleng.2010.09.0001
16. **Jarrewat Charoensuk**, Arwut Lapiroattanukul, "On flame stability, temperature distribution and burnout of air-staged porous media combustor firing LPG with different porosity and excess air", Applied Thermal Engineering, 2011 (May 2011) doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.04.042 Key: citeulike:9373703
17. Nitinai Punbusayakul, Krisada Boonsiri, Sumittra Charojrochkul, Bundit Fungtammasan, **Jarrewat Charoensuk**, "Assessment on Hermetic Property and Mechanical Compatibility of Various Groove-Gasket Sealing Designs for Solid Oxide Fuel Cell Stack", Journal of Power Sources, 2012, doi:10.1016/j.jpowsour.2012.04.01

**ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ จำนวน 16 ฉบับ**

18. Wassachol Wattana, Niwat Nakayothinsakul, Sumittra Charojrochkul, **Jarrewat Charoensuk**, "Experimental and Modeling Study on Flow Behavior in a Fuel Cell Stack", The 15<sup>th</sup> International Symposium on Transport Phenomena, Bangkok 10-12 May 2004
19. Niwat Nakayothinsakul, Wassachol Wattana, **Jarrewat Charoensuk**, Sumittra Charojrochkul, "Modeling of Manifold aerodynamics for Solid Oxide Fuel Cells" The International Conference with Exhibition, Lucerne Fuel Cell Forum 2004, 28<sup>th</sup> June – 2<sup>nd</sup> July 2004, Lucerne Switzerland
20. W. Wattana, **J. Charoensuk**, N. Phoocharoen and S. Charojrochkul, Non-reacting Flow Distributions under Various SOFC Stack Configurations" Solid Oxide Fuel Cells 10, The Electrochemical Society. The Tenth International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells (SOFC-X), Nara, Japan, June 3-8, 2007.
21. P. Vessakosol , **J. Chareonsuk** , Thavee Teschareon, A finite volume method for an analysis of transient heat conduction in functionally graded materials, International Conference on Computational & Experimental Engineering and Science 2009, ICCES-09 Phuket Thailand , 8-13 April 2009
22. Winit jaiboon, Niwat Phoocharoen, Seiji Okawa, **Jarrewat Chareonsuk**, Simulation of Flow Aerodynamics and Heat Transfer in a Plate-Fin Radiator, 13<sup>th</sup> Annual Symposium on Computational Science and Engineering (ANSCSE 13)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

23. Keerasut Suttanarak, Nirut Naksuk and **Jarrewat Charoensuk**, Effect of Co and Counter Flow to Transport Phenomena for Proton Exchange Membrane Fuel Cell by Numerical Simulation, 13<sup>th</sup> Annual Symposium on Computational Science and Engineering (ANSCSE 13)
24. Keerasut Suttanarak, Nirut Naksuk and **Jarrewat Charoensuk**, Numerical Investigation on Water and Heat Generation in Proton Exchange Membrane Fuel Cell, The 2<sup>nd</sup> Thammasat University International Conference on Chemical, Environmental and Energy Engineering (TU-ChEEE2009)
25. Winit jaiboon, Niwat Phoocharoen, Seiji Okawa, **Jarrewat Chareonsuk**, Numerical investigation of fluid flow and heat transfer in a plate-fin radiator, International Conference on Computational & Experimental Engineering and Science 2009, ICCES-09 Phuket Thailand , 8-13 April 2009
26. P. Vessakosol , **J. Chareonsuk** , Thavee Teschareon, A finite volume method for an analysis of transient heat conduction in functionally graded materials, International Conference on Computational & Experimental Engineering and Science 2009, ICCES-09 Phuket Thailand , 8-13 April 2009
27. Arwut Lapidattanakul, Kasemsil Onthong and **Jarrewat Charoensuk**, Development of Used Vegetable Oil Burner using Porous Media, World Renewable Energy Congress 2009 –Asia The 3<sup>rd</sup> International Conference on “Sustainable Energy and Environment (SEE 2009) 18-23 May 2009, Bangkok Thailand
28. G. Pomsopin, N. Punbusayakul, T. Uttamote, K. Hanamura, S. Charojrochkul, and **J. Charoensuk**, “Study Behaviour of CO<sub>2</sub> Absorption in Packed Bed Column from Synthesis Biogas to Produce Hydrogen for SOFC Operation” The International Conference on Green and Sustainable Innovation 2009, December 2 – 4, 2009, Chiang Rai
29. Niwat Suksam, Sumittra Charojrochkul and **Jarrewat Charoensuk** “Numerical Simulation of a Segmented-Cell-in-Series Planar SOFC” The International Conference on Green and Sustainable Innovation 2009, December 2 – 4, 2009, Chiang Rai
30. Punbusayakul N., Charojrochkul S., **Charoensuk J.**, and Fungtammasan B., “Effect of Load Distribution Patterns on a Non-Rigid-Body Interconnector Under Loading Condition of Planar Solid Oxide Fuel Cell” FC09 The International Conference on Green and Sustainable Innovation 2009, December 2 – 4, 2009, Chiang Rai
31. Vuthipong Junkree and **Jarrewat Charoensuk** “The Mathematical model for optimization condition to prevent H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> condensation in heat recovery equipments of natural gas fired power plant” The International Conference on Green and Sustainable Innovation 2009, December 2 – 4, 2009, Chiang Rai

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

32. Vuthipong Junkree and Jaruwat Charoensuk, "H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Acid Dew Point Temperature Estimation To Avoid Corrosion On Heat Recovery Equipments In A Natural Gas Fired Power Plant", Proceedings of the 11th International Colloquium on Environmentally Preferred Advanced Power Generation, February 8-10, 2011, Costa Mesa, California, USA
33. Dachdanai Boonchaay, Kittipass Wasinarom, Monthol Chamsab and Jaruwat Charoensuk, "Computational investigation of quantitative entropy generation in centrifugal compressors with different exit beta angle" The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering, 19-21 October, 2011, Krabi

**ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารที่ประชุมระดับชาติ จำนวน 43 ฉบับ**

34. ขนิษฐา สุตพันธ์, จารุวัตร เจริญสุข, สมชัย นรเศรษฐ์ไศภณ, ธันวาคม 2541,โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อออกแบบ ระบบสูบน้ำ ในงานระบายน้ำ, วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 หน้า 52 สิงหาคม 2541
35. Jaruwat Charoensuk, "Dimensional analysis of flow, combustion and heat transfer in industrial combustors", งานสัมมนาวิชาการ วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 12 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พฤศจิกายน 2541
36. จารุวัตร เจริญสุข, วิภู ศรีสืบสาย, "การแก้ปัญหาการไหลแบบราบเรียบภายในท่อกลม ด้วยวิธีไฟไนต์วอลุ่ม", งานสัมมนาวิชาการ วิศวกรรมเครื่องกล ครั้งที่ 12 จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, พฤศจิกายน 2541
37. จารุวัตร เจริญสุข, ปัญญา แดงวิไลลักษณ์, " การประยุกต์ วิธี Finite Volume กับการจำลองการไหลในท่อขยายอย่างฉับพลัน", งานสัมมนาวิชาการ วิศวกรรมเครื่องกล ครั้งที่ 12 จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย , พฤศจิกายน 2541
38. จารุวัตร เจริญสุข, ปัญญา แดงวิไลลักษณ์, "แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของการเกิดออกไซด์ของกำมะถันจากการเผาไหม้ ของถ่านหินผง", วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 16 ฉบับที่ 3 กันยายน 2542
39. จารุวัตร เจริญสุข, วิภู ศรีสืบสาย, "แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแคลเซียมออกไซด์", งานสัมมนาวิชาการวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ธันวาคม 2542
40. จารุวัตร เจริญสุข, กนกอร รจนากิจ "อิทธิพลของอุณหภูมิและความดันในการกัดต่อการไหลของพลาสติกโพลีเอซีต", งานสัมมนาวิชาการวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ธันวาคม 2542
41. จารุวัตร เจริญสุข, เมธี ไบงาม "แบบจำลองการกัดพลาสติกใสภาวะของเหลว", งานสัมมนาวิชาการวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, ธันวาคม 2543
42. จารุวัตร เจริญสุข, ออกนิษฐ์ สอนตระกูล "การจำลองการไหลและถ่ายเทความร้อนสำหรับการทำนายการหดตัวและการบิดงอของพลาสติกในแม่พิมพ์พลาสติกแบบฉีด", งานสัมมนาวิชาการ วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, ธันวาคม 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

43. จารุวัตร เจริญสุข, อรรถนพ ผาบเพ็ง, “โปรแกรมคำนวณการไหลเบื้องต้นโดยวิธีการปริมาตรสี่เหลี่ยม”, วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 17 ฉบับที่ 3 กันยายน 2543
44. นิตินัย ปัญญ์บุศยกุล, จารุวัตร เจริญสุข, “การจำลองผลของตำแหน่งฉีดต่อเส้นทางเดินอนุภาคในขบวนการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์”, วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 17 ฉบับที่ 3 กันยายน 2543
45. สนธยา มิเสียง, จารุวัตร เจริญสุข การศึกษาผลกระทบของขนาดต่อเส้นทางเดินของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตในห้องเผาไหม้ถ่านหินผง, วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 17 ฉบับที่ 3 กันยายน 2543
46. นิวัฒน์ นาคะโยธินสกุล, จารุวัตร เจริญสุข ผลกระทบของสภาวะที่ทางเข้าต่อการผสมแบบปั่นป่วนในเตาเผาทรงกระบอก, วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 17 ฉบับที่ 4 ธันวาคม 2543
47. ภาสกร เวสสะโกศล, จารุวัตร เจริญสุข, “การประยุกต์วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์รูปร่างสี่เหลี่ยมสำหรับปัญหาการไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อน”, วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 18 ฉบับที่ 2 มิถุนายน 2544
48. ภาณุมาศ อรุณเดชาวัฒน์, จารุวัตร เจริญสุข “การปรับปรุงห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซชนิดส่วนผสมอากาศเชื้อเพลิงหนา-บางสำหรับเชื้อเพลิงก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำ”, วิศวกรรมสาร มก. ฉบับที่ 50, สิงหาคม-พฤศจิกายน 2546
49. จารุวัตร เจริญสุข, อรรถนพ ผาบเพ็ง “การประยุกต์ใช้หัวเผาน้ำมันพีซในเชิงอุตสาหกรรมโดยใช้วัสดุพูน” วิศวกรรม ลาดกระบัง ปีที่ 20 ฉบับที่ 2 เดือน มิถุนายน 2546
50. จารุวัตร เจริญสุข, สนธยา มิเสียง “การศึกษาผลกระทบสัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงด้านสมรรถนะของหัวเผาน้ำมันมะพร้าว” วิศวกรรม ลาดกระบัง ปีที่ 19 ฉบับที่ 2 เดือน มิถุนายน 2545
51. สุรชัย จึงจตุพรชัย, จารุวัตร เจริญสุข, “การเปรียบเทียบสมรรถนะของหัวเผาน้ำมันพีซเพื่อการนำไปใช้ประโยชน์ในครัวเรือน” วิศวกรรม ลาดกระบัง ปีที่ 19 ฉบับที่ 2 เดือน มิถุนายน 2545
52. สมัชชา โชคชัยวิวัฒน์ จารุวัตร เจริญสุข และ ยุทธนา ธนุศร “การศึกษาการแก้ปัญหาของการเกิด Weld line และ Sink Mark ในการขึ้นรูปพลาสติกแบบฉีดโดยใช้โปรแกรม Moldex” การประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16, 14-16 ตุลาคม 2545 จังหวัดภูเก็ต
53. จารุวัตร เจริญสุข, นิวัฒน์ นาคะโยธินสกุล, นิวัฒน์ ภูเจริญ “การจำลอง การถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำรถยนต์ด้วยเทคนิควัสดุพูน” การประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17, 15-17 ตุลาคม 2546 จังหวัด ปราจีนบุรี
54. จารุวัตร เจริญสุข, นิวัฒน์ นาคะโยธินสกุล, นิวัฒน์ ภูเจริญ “การจำลองการไหลของอากาศผ่านใบพัดหม้อน้ำด้วยวิธีหลายแกน”, การประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17, 15-17 ตุลาคม 2546 จังหวัด ปราจีนบุรี
55. กฤษณ์ เรืองพยุงค์ศักดิ์, จารุวัตร เจริญสุข, “การใช้น้ำมันชีวภาพที่สกัดจากกากของเสียในเครื่องยนต์ดีเซล” การประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17, 15-17 ตุลาคม 2546 จังหวัด ปราจีนบุรี
56. วิษรสรณ์ โชคชัยวิวัฒน์, จารุวัตร เจริญสุข, “อิทธิพลของเงื่อนไขการทำงานต่อการเกิดรอยประสานและรอยยุบในการขึ้นรูปพลาสติกแบบฉีด” วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 20 ฉบับที่ 3 กันยายน 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

57. นิตินัย ปัญญาบุศยกุล, จารุวัตร เจริญสุข, “ผลกระทบของ residence time ของอนุภาคเคลเซียมคาร์บอเนตต่อกระบวนการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์”, วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 20 ฉบับที่ 3 กันยายน 2546
58. นิตินัย ปัญญาบุศยกุล, จารุวัตร เจริญสุข, “อิทธิพลของตำแหน่งฉีดอนุภาค  $\text{CaCO}_3$  และ Bluff Body ต่อ Residence Time ของกระบวนการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์”, วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่ 15 ฉบับที่ 1 พ.ศ. 2547
59. ภาณุมาศ อรุณเดชาวัฒน์, จารุวัตร เจริญสุข, “การศึกษาเชิงทดลอง ของการไหลหมุนวนเป็นเกลียวภายในบริเวณปฐมภูมิของแบบจำลองห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ” การประชุมและการสัมมนาทางวิชาการ องค์กรเครือข่ายวิศวกรรมการบินและอวกาศ ครั้งที่ 2 ประจำปี 2547, 18-19 สิงหาคม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
60. จารุวัตร เจริญสุข, สุรพันธ์ ธงไชยยะ, “หัวเผาแบบพรมเผาไหม้น้ำมันพืช” วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 ประจำเดือน สิงหาคม 2548
61. Jaruwat Charoensuk, Wee Chabthanom, “Computation of Isothermal Swirling Flows in a Combustor Using Modified Dissipation Equation k- $\epsilon$  Models” The 19th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand 19-21 October 2005, Phuket, Thailand
62. มานพ มาสมทบ, จารุวัตร เจริญสุข, วิภา เจียรระไนวชิระ, แสง เกิดประทุม, “ผลกระทบของรูปทรงใบพัดที่มีผลต่อการเติมอากาศใต้น้ำ”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19, 19-21 ตุลาคม 2548 จังหวัดภูเก็ต
63. นาทยา เจริญสุข, จารุวัตร เจริญสุข, “การพัฒนาชุดอุณหภูมิลบแบบหัวเผาสำหรับน้ำมันปาล์ม”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19, 19-21 ตุลาคม 2548 จังหวัดภูเก็ต
64. บุญส่ง เพ็ชรน้อย, จารุวัตร เจริญสุข, “การพัฒนาและประเมินสมรรถนะหัวเผาน้ำมันปาล์มชนิดผสมอากาศก่อนเผาไหม้”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19, 19-21 ตุลาคม 2548 จังหวัดภูเก็ต
65. นิตินัย ปัญญาบุศยกุล, มานพ มาสมทบ, ปฏิวัติ อ่อนพุทธา, จารุวัตร เจริญสุข, สุมิตรา จรสโรจน์กุล “อิทธิพลของความดันทางเข้าของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตรอน”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, 15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จังหวัดปทุมธานี
66. อารุณ ฤทธิธนากุล, จารุวัตร เจริญสุข “เตาเผาไหม้วัสดุพรมกับเตาเผาไหม้แบบหมุนวน (part1)”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, 15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จังหวัดปทุมธานี
67. อารุณ ฤทธิธนากุล, จารุวัตร เจริญสุข, “เตาเผาไหม้วัสดุพรม part 2 : อิทธิพลของอากาศส่วนเกิน” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, 15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จังหวัดปทุมธานี
68. นิวัฒน์ ภูเจริญ, ทวี เทศเจริญ และ จารุวัตร เจริญสุข “การจำลองเชิงตัวเลขของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งแบบโลหะรองรับ” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, 15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จังหวัดปทุมธานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

69. นิวัฒน์ สุกสาม, สมิตรา จรสโรจน์กุล, จารุวัตร เจริญสุข, “การจำลองเชิงตัวเลขสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งแบบแผ่น” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 5, 29 เมษายน-1 พฤษภาคม 2552 มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก
70. อาวุธ ลภีรัตน์ากุล, เกษมศิลป์ อ่อนทอง และจารุวัตร เจริญสุข “การพัฒนาหัวเผา น้ำมันปาล์มใช้แล้วด้วยเทคนิควัสดุพูน” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 5, 29 เมษายน-1 พฤษภาคม 2552 มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก
71. กิตติภาส วศินารมณ, นิวัฒน์ ภูเจริญ และ จารุวัตร เจริญสุข “การวิเคราะห์ทางความร้อนและการประเมินสมรรถนะเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, 4-7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่
72. อาวุธ ลภีรัตน์ากุล, จารุวัตร เจริญสุข “หัวเผาวัสดุพูนแบบจ่ายของผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นชั้นและหัวเผาวัสดุพูนแบบจ่ายอากาศเป็นชั้น” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, 4 - 7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่
73. กันตภณ อุดมโชคปิติ, จำลอง ปราบแก้ว, จารุวัตร เจริญสุข “การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในการประยุกต์เพื่อพัฒนาเจ็ทปั๊มสำหรับการขนถ่ายอนุภาคถ่านหินผง” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, 4 - 7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่
74. นิตินัย ปัญญาบุคคกุลวิทยา วงษ์กลางสมิตรา จรสโรจน์สกุลจารุวัตร เจริญสุขและ บัณฑิต พงษ์ธรรมสาร “การออกแบบและพัฒนาจุดเชื่อมต่อของอินเทอร์คอนเน็กเตอร์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งแบบแผ่น” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, 4 - 7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่
75. เกษมศิลป์ อ่อนทอง, ทวี เทศเจริญ และ จารุวัตร เจริญสุข “อิทธิพลรูปทรงของวัสดุสร้างความพูนที่ส่งผลต่อสมรรถนะหัวเผาน้ำมันปาล์มใช้แล้ว” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, 4 - 7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่
76. อรรถสิทธิ์ สวนจันทร์, ดำริห์ จันทร์แสงสุข, จารุวัตร เจริญสุข “อิทธิพลของจำนวนใบเบลด ต่อสมรรถนะปั๊มน้ำหอยโข่ง” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, 4 - 7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่
77. ภรณ์เพ็ญ ลภีรัตน์ากุล, จารุวัตร เจริญสุข "การพัฒนาาระบบหัวฉีดของหัวเผาก๊าซแอลพีจีในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ : Part 1" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25 (ME-NETT 25), 19 ตุลาคม 2554, รหัสบทความ AEC 18
78. อาวุธ ลภีรัตน์ากุล, จารุวัตร เจริญสุข "การศึกษาความสามารถในการหรี่งเชื้อเพลิงของหัวเผาแอลพีจีแบบกึ่งอัตโนมัติที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ : Part 2" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25 (ME-NETT 25), 20 ตุลาคม 2554, รหัสบทความ AEC 39
79. นิตินัย ปัญญาบุคคกุล, กฤษณา บุญศิริ, จารุวัตร เจริญสุข, สมิตรา จรสโรจน์กุล "การศึกษาการผืนักด้วยแรงกดด้วยคอนดักทีฟซิลเวอร์เพนท์และไมก้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งแบบแผ่น" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25 (ME-NETT 25), 20 ตุลาคม 2554, รหัสบทความ ETM 63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

80. กฤษฎา บุญศิริ, นิตินัย ปัญญาบุศยกุล, จารุวัตร เจริญสุข, สุมิตรา จรสโรจน์กุล "การศึกษาพฤติกรรมของวัสดุพีนิกเชิงประกอบแก้วแบบเสริมเส้นใยสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25 (ME-NETT 25), 20 ตุลาคม 2554, รหัสบทความ ETM 67
81. มณฑล ฉ่ำทรัพย์, เดชดนัย บุญช่วย, กิตติภาส วศินารมณ, จารุวัตร เจริญสุข "มุมมองทางเข้าที่ส่งผลต่อสมรรถนะกังหันแก๊สแนวรัศมี", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25 (ME-NETT 25), 19 ตุลาคม 2554, รหัสบทความ TSF 17
82. เดชดนัย บุญช่วย, กิตติภาส วศินารมณ, มณฑล ฉ่ำทรัพย์, จารุวัตร เจริญสุข "อิทธิพลความยาวของ Splitter Blade ในคอมเพรสเซอร์แบบแรงเหวี่ยงสำหรับเครื่องยนต์กังหันแก๊สขนาดเล็ก", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25 (ME-NETT 25), 20 ตุลาคม 2554, รหัสบทความ TSF 19
83. พงศธร ปูย่า, จารุวัตร เจริญสุข, การทดสอบหาตัวเลขสแควร์ของเครื่องกำเนิดกระแสหมนวนสำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงผง", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25 (ME-NETT 25), 20 ตุลาคม 2554, รหัสบทความ TSF 46

#### ผลงานทางวิชาการในลักษณะอื่นๆ

84. สิ่งประดิษฐ์ “เครื่องแยกผลปาล์มจากทะเลลาย ชนิดถังกลมและฐานหมุน” จำลอง ปราบแก้ว, จารุวัตร เจริญสุข และ ปัญญา แดงวิไลลักษณ์ “ผลงานดีเด่น สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ประจำปี พ.ศ.2545 ได้รับอนุสิทธิบัตร เลขที่ 1339 เมื่อวันที่ 19 พฤษภาคม 2546 และได้เผยแพร่ใน วารสารสมาคมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, ปีที่ 2 เล่มที่ 3 ประจำเดือนกุมภาพันธ์- มีนาคม 2546 , วารสาร UP DATE, ปีที่ 18 ฉบับที่ 185 ประจำเดือนมกราคม 2546. และจดหมายข่าว ปาล์มน้ำมัน ปีที่ 3 ฉบับที่ 4 เดือน ธันวาคม 2545 – กุมภาพันธ์ 2546
85. สิ่งประดิษฐ์ “หัวเผาน้ำมันพีซีใช้แล้วสำหรับครัวเรือน” จารุวัตร เจริญสุข และ บุญส่ง เพ็ชรน้อย, อยู่ระหว่างการยื่นขออนุสิทธิบัตร และได้เผยแพร่ออกอากาศในรายการ “รอบเรื่องเมืองไทย” ทางโทรทัศน์ ช่อง 11 วันที่ 10 กันยายน 2548 และตีพิมพ์ ในวารสาร Popular Mechanics ฉบับประจำเดือน กันยายน 2548

#### สิทธิบัตร ระดับชาติ

86. "แผ่นเชื่อมต่อทางไฟฟ้า" ตัวแทน นายเกรียงศักดิ์ ก้อนทอง นายชาญชัย นีรพัฒน์กุล นางสาวอรุณศรี ศรีธนะอิทธิพล ผู้ประดิษฐ์/ออกแบบ นางสาวสุมิตรา จรสโรจน์กุล **นายจารุวัตร เจริญสุข** นางสาววราพรชวล วัฒนะ นายสมประสงค์ ศรีชัย Design of Interconnector for SOFC, Application form No. 0602003205, Thailand Patent office เลขที่ประกาศ 88908 เลขที่สิทธิบัตร 29021 วันที่ 26/10/2553
87. "แผ่นเชื่อมต่อทางไฟฟ้า" ตัวแทน นายเกรียงศักดิ์ ก้อนทอง นายชาญชัย นีรพัฒน์กุล นางสาวอรุณศรี ศรีธนะอิทธิพล ผู้ประดิษฐ์/ออกแบบ นางสาวสุมิตรา จรสโรจน์กุล **นายจารุวัตร เจริญสุข** นางสาววราพรชวล วัฒนะ นายสมประสงค์ศรีชัย Design of Interconnector for SOFC,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Application form No. 0602003206, Thailand Patent office เลขที่ประกาศ 88909 เลขที่ สิทธิบัตร 29020 วันที่ 26/10/2553

88. "แผ่นเชื่อมต่อทางไฟฟ้า" ตัวแทน นายเกรียงศักดิ์ ก้อนทอง นายชาญชัย นีร์พัฒนกุล นางสาวอรุณ ศรี ศรีธนะอิทธิพล ผู้ประดิษฐ์/ออกแบบ นางสาวสุมิตรา จรสโรจน์กุล **นายจาร์วัตร เจริญสุข** นางสาววรรษชล วัฒนะ นายสมประสงค์ศรีชัย Design of Interconnector for SOFC, Application form No. 0602003207, Thailand Patent office เลขที่ประกาศ 88910 เลขที่ สิทธิบัตร 29019 วันที่ 26/10/2553
89. "ท่อปฏิรูปเชื้อเพลิงสำหรับปฏิรูปไฮโดรเจนจากเชื้อเพลิงแก๊สไฮโดรคาร์บอน" ตัวแทน นางสาวอรุณศรี ศรีธนะอิทธิพล นายชาญชัย นีร์พัฒนกุล นางสาวอรกนก พรรณรักษา ผู้ประดิษฐ์/ออกแบบ นางสาวสุมิตรา จรสโรจน์กุล **นายจาร์วัตร เจริญสุข** นายมานพ มาสมทบ นายปฏิวัติ อ่อนพุธา นายชาติศักดิ์ เชษฐาพงษ์พันธ์ และนายวิทยา วงษ์กลาง Application form No. 1001001527 วันที่ 30/09/2553, Thailand Patent office เลขที่ประกาศ 113065 วันที่ 20/03/2555
90. "ชุดควบคุมแรงเชิงกลแบบแรงกระจายด้วยความสัมพันธ์ของแรงตามแนวแกน X-Y สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งแบบแผ่น" นายนิตินัย ปัญญาบุศยกุล นายวิทยา วงษ์กลาง **นายจาร์วัตร เจริญสุข** นางสาวสุมิตรา จรสโรจน์กุล Application form No. 1001000930, Thailand Patent office

ผลงานวิจัยที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

หัวเผื่อน้ำมันพืช

ผลงานอื่นๆ เช่น ตำรา บทความ สิทธิบัตร ฯลฯ

อยู่ในระหว่างการยื่นขอจดสิทธิบัตร หัวเผื่อน้ำมันพืชใช้แล้ว

ผู้ร่วมวิจัย

#### ประวัติส่วนตัว

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) : นายทรงศักดิ์ สอนนา

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) : Mr. Songsak Sonna

หน่วยงานและสถานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก :

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โทรศัพท์ 0-2326-4197 โทรศัพท์มือถือ 08-2862-0330 โทรสาร 0-2326-4198

E-mail sonna.songsak@gmail.com

#### ประวัติการศึกษา

ปริญญาตรี: วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2548

ปัจจุบันกำลังศึกษา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้