

การวิเคราะห์ผลกระทบเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้นต่อการส่งผ่านความร้อนในเครื่อง  
แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์  
INFLUENCE ANALYSIS OF PERCENTAGE BAFFLE CUT ON HEAT TRANSFER  
IN SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER BY USING FINITE ELEMENT  
METHOD

นายเต็ดดวง วงศ์วิริยชาติ รหัสนิต 51380675  
นายประสงค์ พิทักษ์ทองกุล รหัสนิต 51380767  
นายไพฑูรย์ ไชยวรรณ รหัสนิต 51380798

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร  
ปีการศึกษา 2554

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... 10 ก.ค. 2555
เลขทะเบียน..... 16008331
เลขเรียกหนังสือ..... มร.
มหาวิทยาลัยนเรศวร ๑๘๖๒ ๑๒

2554



## ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อโครงการ : การวิเคราะห์ผลกระทบเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น ต่อการส่งผ่าน  
ความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ โดยใช้  
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์  
Influence Analysis of Percentage Baffle Cut on Heat Transfer  
in Shell and Tube Heat Exchanger by using Finite Element  
Method

ผู้ดำเนินโครงการ : นายเด็ดดวง วงศ์วิริยชาติ รหัสสนิสิต 51380675  
นายประสงค์ พิทักษ์ทองกุล รหัสสนิสิต 51380767  
นายไพฑูรย์ ไชยวรรณ รหัสสนิสิต 51380798

อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์นพรัตน์ สีหะวงษ์  
ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล  
ปีการศึกษา : 2554

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

.....ที่ปรึกษาโครงการ  
(อาจารย์นพรัตน์ สีหะวงษ์)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณ)

.....กรรมการ  
(อาจารย์นินนาท ราชประดิษฐ์)

หัวข้อโครงการ	การวิเคราะห์ผลกระทบเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น ต่อการส่งผ่านความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายเด็ดดวง	วงศ์วิริยชาติ	รหัสนิสิต 51380675
	นายประสงค์	พิทักษ์ทองกุล	รหัสนิสิต 51380767
	นายไพฑูรย์	ไชยวรรณ	รหัสนิสิต 51380798
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์นพรัตน์ สีหะวงษ์		
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ปีการศึกษา	2554		

### บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้นที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ค่าความดันลด และค่าประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้นที่ทำการศึกษาประกอบด้วย 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40% และ 45% โดยกำหนดให้อุณหภูมิทางเข้าของกระแสน้ำเป็น 350.68 K อุณหภูมิทางเข้าของกระแสน้ำมันเป็น 304.72 K อัตราการไหลเชิงปริมาตรของกระแสน้ำเป็น  $8.33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  อัตราการไหลเชิงปริมาตรของกระแสน้ำมันเป็น  $2.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  และความดันที่ทางออกของทั้งสองกระแสเป็น 1 atm จากผลการวิเคราะห์ที่ได้พบว่าที่เปอร์เซ็นต์การตัด 35% ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะมีค่าสูงสุดที่เท่ากับ  $385.98 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  การเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้นจะส่งผลให้ค่าความดันลดมีค่าลดลงและจะไม่ส่งผลกระทบต่อค่าประสิทธิผล

**Project Title** : Influence Analysis of Percentage Baffle Cut on Heat Transfer  
in Shell and Tube Heat Exchanger by Using Finite Element  
Method

**Name** : Mr.Detduang Wongwiriachat  
Mr.Prasong Phithakthongkun  
Mr.Paitoon Chaiyawan

**Project Advisor** : Mr.Nopparat Seehawong

**Academic Year** : 2011

---

### Abstract

The purpose of this research is to analysis an influence of baffles percentage on overall heat transfer coefficient, Pressure drop and effectiveness of shell and tube heat exchanger by using finite element method. In this research, there are 7 models with 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40% and 45% percentage baffle cut and inlet hot fluid temperature is 350.68 K, Inlet cold fluid temperature is 304.72 K, Volume flow rate hot fluid temperature is  $8.33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ , Volume flow rate cold fluid temperature is  $2.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  and pressure outlet both fluids are 1 atm. The result shows that the maximum overall heat transfer coefficient at percentage baffle cut 35%, effectiveness no effect at another percentage baffle cut and shows that the maximum Pressure drop at percentage baffle cut 15%. It s value decrease when percentage baffle cut is increase.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมเครื่องกลฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทางคณะผู้ดำเนินงาน ต้องขอขอบพระคุณอาจารย์นพรัตน์ สีหะวงษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่กรุณาให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการดำเนินโครงการ ตลอดจนติดตามประเมินผลการดำเนินโครงการมาโดยตลอด ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ทุกท่าน ที่อบรมสั่งสอน และให้ความรู้แก่ผู้ดำเนินงาน

ขอขอบพระคุณฝ่ายเลขานุการ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการดำเนินโครงการ

ขอขอบพระคุณบิดามารดา ที่ให้การอุปการะเลี้ยงดูและสั่งสอนจนกระทั่งสามารถเติบโตมาจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนช่วยอุปการะทางการเงินและคอยให้กำลังใจ จนกระทั่งโครงการนี้สำเร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ ผู้ดำเนินงานขอขอบคุณงามความดีที่เกิดขึ้นจากโครงการนี้ แต่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และถ้าเกิดข้อผิดพลาดประการใดจากโครงการนี้ ผู้ดำเนินงานต้องกราบขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นายเด็ดดวง วงศ์วิริยชาติ

นายประสงค์ พิทักษ์ทองกุล

นายไพฑูรย์ ไชยวรรณ

# สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
สารบัญกราฟ.....	ญ
ลำดับสัญลักษณ์.....	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	4
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.6 งบประมาณที่ใช้.....	5
<b>บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี</b>	
2.1 ทฤษฎีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	6
2.2 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน.....	7
2.3 สมการที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.4 ค่าความคลาเคลื่อน.....	9
2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน</b>	
3.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูล.....	12
3.2 สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	12

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 กำหนดคุณสมบัติและสภาวะเงื่อนไขของแบบจำลอง.....	14
3.4 วิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	16
3.5 ทำการทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ.....	17
(รุ่น WL 110.03) ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล	
3.6 เปรียบเทียบประสิทธิผลที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลอง.....	18
3.7 ปรับเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกันและวิเคราะห์ผล.....	18
<b>บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์</b>	
4.1 ผลจากการทดลอง.....	19
4.2 ผลจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	20
4.3 การเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	21
4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม.....	22
4.5 ค่าความดันลด.....	23
4.6 ค่าประสิทธิผล.....	25
<b>บทที่ 5 บทสรุป</b>	
5.1 บทสรุป.....	27
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	28
รายการเอกสารอ้างอิง.....	29
บรรณานุกรม.....	30
<b>ภาคผนวก</b>	
ภาคผนวก ก ผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	32
ภาคผนวก ข วิธีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	44
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ค่าความดันลดและค่าประสิทธิผล	.62
ภาคผนวก ง ตารางแสดงคุณสมบัติของน้ำ.....	66
ประวัติผู้จัดทำโครงการ.....	68

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงาน.....	4
3.2 แสดงคุณสมบัติของวัสดุต่าง ๆ ในแบบจำลอง.....	14
3.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของเหลวและแก๊ส.....	15
4.4 แสดงผลของอุณหภูมิจากการทดลอง.....	19
4.5 แสดงผลของอุณหภูมิจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	20
4.6 แสดงผลความคลาดเคลื่อนสะสมของประสิทธิผลจากการทดลอง.....	21
4.7 แสดงผลต่างของประสิทธิผลระหว่างแบบจำลองกับการทดลอง.....	21
4.8 แสดงผลสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	22
4.9 แสดงผลความดันลดจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	24
4.10 แสดงผลของประสิทธิผลจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	26
ข.11 แสดงคุณสมบัติของน้ำ.....	40





## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ.....	1
2.2 การแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์เล็ก ๆ โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	6
3.3 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน.....	11
3.4.เปลือก.....	12
3.5 ท่อ.....	12
3.6 แผ่นกั้นที่เปอร์เซ็นต์การตัด 15.19%.....	13
3.7 Tube sheet.....	13
3.8 Tubeside Flow.....	13
3.9 แบบจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ.....	14
3.10 กำหนดสถานะเงื่อนไขขอบที่ใช้ในกานวิเคราะห์.....	16
3.11 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล.....	17
3.12 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล.....	18
4.13 แสดงผลการวิเคราะห์ของอุณหภูมิจากการทดลอง.....	19
4.14 แสดงผลการวิเคราะห์ของอุณหภูมิด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่เปอร์เซ็นต์การตัด 15.91%.....	20
4.15 แสดงค่าความดันลดจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เปอร์เซ็นต์การตัด 15%.....	24
ก.16 แสดงค่าความดันที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น 15%.....	32
ก.17 แสดงค่าอุณหภูมิที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น 15%.....	32
ก.18 แสดงทิศทางการไหลที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น 15%.....	33
ก.19 แสดงค่าความดันที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น 20%.....	33
ก.20 แสดงค่าอุณหภูมิที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น 20%.....	34
ก.21 แสดงทิศทางการไหลที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น 20%.....	34
ก.22 แสดงค่าความดันที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น 25%.....	35
ก.23 แสดงค่าอุณหภูมิที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น 25%.....	35

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.24 แสดงทิศทางการไหลที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 25%.....	36
ก.25 แสดงค่าความดันที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 30%.....	36
ก.26 แสดงค่าอุณหภูมิที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 30%.....	37
ก.27 แสดงทิศทางการไหลที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 30%.....	37
ก.28 แสดงค่าความดันที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 35%.....	38
ก.29 แสดงค่าอุณหภูมิที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 35%.....	38
ก.30 แสดงทิศทางการไหลที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 35%.....	39
ก.31 แสดงค่าความดันที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 40%.....	39
ก.32 แสดงค่าอุณหภูมิที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 40%.....	40
ก.33 แสดงทิศทางการไหลที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 40%.....	40
ก.34 แสดงค่าความดันที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 45%.....	41
ก.35 แสดงค่าอุณหภูมิที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 45%.....	41
ก.36 แสดงทิศทางการไหลที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 45%.....	42

## สารบัญกราฟ

กราฟที่	หน้า
4.1 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม.....	23
4.2 กราฟแสดงค่าความดันลด.....	25
4.3 กราฟแสดงค่าประสิทธิผล.....	26



## ลำดับสัญลักษณ์

$A$	พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน
$c_p$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ
$d$	เมตริกซ์การเสีรูปของแต่ละโนด
$D$	ผลรวมของการเสีรูปของแต่ละโนด
$E$	ค่าประสิทธิผลที่ได้จากการวัด
$f$	เมตริกซ์ของแรงที่กระทำแต่ละโนด
$F$	ผลรวมเมตริกซ์ของแรงที่กระทำแต่ละโนด
$h$	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน
$k$	สทิพเนสเมตริกซ์ของเอลิเมนต์
$k$	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน
$K$	ผลรวมสทิพเนสเมตริกซ์ของเอลิเมนต์
$\dot{m}$	อัตราการไหลเชิงมวล
$M$	ค่าประสิทธิผลที่คำนวณได้จากแบบจำลอง
$Q$	ความร้อนที่แลกเปลี่ยน
$\Delta T$	ผลต่างของอุณหภูมิ
$\Delta T_{lm}$	ผลต่างของอุณหภูมิเชิงล็อก
$T_{cold,in}$	อุณหภูมิทางเข้าของกระแสเย็น
$T_{cold,out}$	อุณหภูมิทางออกของกระแสเย็น
$T_{hot,in}$	อุณหภูมิทางเข้าของกระแสร้อน
$T_{hot,out}$	อุณหภูมิทางออกของกระแสร้อน
$T_s$	อุณหภูมิพื้นผิว
$U$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม
$x$	ความหนาของวัสดุที่นำความร้อน
$\varepsilon$	การแผ่รังสีความร้อนของพื้นผิวโดยเปรียบเทียบกับวัตถุดำ
$\sigma$	ค่าคงที่ของ Stefan Boltzmann
$\varepsilon$	ค่าประสิทธิผล

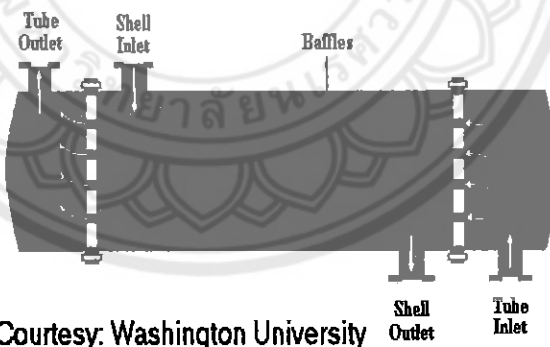
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเนื่องจากในงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ มีระบบการทำงานของอุปกรณ์หลายระบบที่ เมื่อเริ่มทำงานแล้วเกิดสภาวะอุณหภูมิสูงเกินไป ซึ่งอาจทำให้อุปกรณ์เหล่านั้นเกิดความเสียหายได้รวมไปถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์เหล่านั้นลดลงอีกด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมาแลกเปลี่ยนความร้อนเหล่านั้นออกไป เพื่อป้องกันอุปกรณ์เหล่านั้นไม่ให้เกิดความเสียหายและสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

การแบ่งประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แบ่งตามสภาวะของของไหลและแบ่งตามลักษณะการใช้งาน โครงการนี้จะทำศึกษาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ ที่มีสภาวะของของไหลเป็นแบบของเหลวกับของเหลว



รูปที่ 1.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ  
[ที่มา [www.cheresources.com](http://www.cheresources.com)]

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ ดังนี้

1.1.1 เปลือก (Shell) คือ ส่วนที่เป็นส่วนประกอบนอกสุดที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ทำหน้าที่ส่งผ่านของไหลที่ 1

1.1.2 ท่อ (Tube) คือ ท่อทรงกระบอกขนาดเล็กที่บรรจุอยู่ในเปลือก ทำหน้าที่ส่งผ่านของไหลที่ 2 ในการแลกเปลี่ยนความร้อน

1.1.3 แผ่นกั้น (Baffle) คือ ตัวบังคับทิศทางของไหลของของไหลที่ 1 และป้องกันการสั้นสะท้อนของท่อ

ประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมและค่าความดันลดของของไหลภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งอุปกรณ์หลักที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยตรงอย่างหนึ่งคือ แผ่นกั้น เนื่องจากแผ่นกั้นจะทำหน้าที่บังคับทิศทางของไหลของกระแสน้ำของของไหลที่มาแลกเปลี่ยนความร้อน คือ ถ้าแผ่นกั้นสามารถบังคับให้กระแสน้ำของของไหลที่มาแลกเปลี่ยนความร้อนกัน ไหลตั้งฉากกันมากก็จะทำให้ประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อนมากตามไปด้วย

โครงการนี้จะทำการศึกษาถึงผลกระทบของเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้นที่ส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ค่าความดันลด และค่าประสิทธิผลของการแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะทำการศึกษาที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้นที่ 15% ถึง 45% โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบของเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น ที่มีผลต่อค่าความดันลดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ

1.2.3 เพื่อศึกษาผลกระทบของเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น ที่มีผลต่อค่าประสิทธิผลของการแลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 เป็นการวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง

1.3.2 เป็นการศึกษาเฉพาะผลกระทบของแผ่นกั้นที่เปอร์เซ็นต์การตัด 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40% และ 45%

1.3.3 วัสดุในแบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีลักษณะเป็น Isotropic Material และ Homogeneous Material

1.3.4 เป็นการศึกษาการส่งผ่านความร้อนในสภาวะคงตัว

1.3.5 ค่าความดันลดเป็นการศึกษาเฉพาะของไหลภายในเปลือก







## 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้แบบจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ ที่สามารถวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้วิเคราะห์ตัวแปรอื่นๆ ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ค่าความดันลด และค่าประสิทธิผลของการแลกเปลี่ยนความร้อน ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ

1.5.2 ทราบถึงเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน ที่เหมาะสม ซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบ เพื่อการใช้งานที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

## 1.6 งบประมาณที่ใช้

1.6.1 กระดาษ 500 บาท

1.6.2 จัดทำรูปเล่ม 2,000 บาท

1.6.3 ค่าอุปกรณ์อื่นๆ 500 บาท

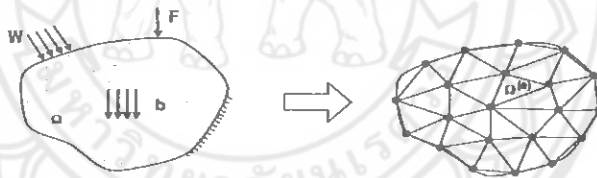


## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎี

#### 2.1 ทฤษฎีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เนื่องจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อนั้นมีรูปร่างที่ซับซ้อน ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ได้โดยง่ายและสะดวกรวดเร็วในการวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลข มีแนวความคิดที่ว่าวัตถุที่มีรูปร่างซับซ้อนใดๆ จะสามารถแบ่งออกเป็นชิ้นเล็กๆ ได้โดยแต่ละชิ้นเล็กๆ เหล่านั้นสามารถพิจารณาแยกกันอย่างอิสระและสามารถประกอบเข้ากันเป็นวัตถุรูปเดิมได้ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เหมาะกับปัญหาที่ยุ่งยากซับซ้อน ซึ่งไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำได้จากสมการเชิงอนุพันธ์ โดยจะแก้ปัญหาคำให้อยู่ในรูปฟังก์ชันพีชคณิตแล้วใช้คอมพิวเตอร์คำนวณหาผลลัพธ์ มีหลักการและลำดับขั้นตอนดังนี้คือ



รูปที่ 2.2 การแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์เล็กๆ โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.1.1 แบ่งวัตถุที่พิจารณาออกเป็นชิ้นเล็กๆ เรียกว่า Element และเชื่อมต่อกันด้วย Node

2.1.2 สร้างสมการความสัมพันธ์ของปริมาณทางฟิสิกส์ของแต่ละ Element ซึ่งจะทำให้ได้ Local Equations ของแต่ละ Element

$$[k]\{d\} = \{f\} \quad (1)$$

เมื่อ  $[k]$  คือ สทิตเพนเมตริกซ์ของเอลิเมนต์ แทนด้วย คุณสมบัติ (ค่าการนำความร้อนของวัสดุและค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำในเปลือก)

$\{d\}$  คือ เมตริกซ์การเสียรูปของแต่ละโนด แทนด้วย ตัวแปรที่เราต้องการหา (อุณหภูมิ, ความดัน, ฯลฯ)

$\{f\}$  คือ เมทริกซ์ของแรงที่กระทำแต่ละโนด แทนด้วย ภาระกระทำต่างๆ (อัตราการใช้, อุณหภูมิทางเข้าและ ความดันทางออกของน้ำทั้งสองกระแส)

2.1.3 ประกอบ Element เข้าด้วยกันโดยใช้หมายเลข Node เป็นตัวเชื่อม จะทำให้ได้ระบบสมการของทั้งวัตถุที่พิจารณา

$$[K]\{D\} = \{F\} \quad (2)$$

2.1.4 แก่ระบบสมการเพื่อหาค่าตัวแปรที่ Node ต่างๆ  $\{D\}$  โดยการนำเงื่อนไขขอบเข้าช่วยในการพิจารณาระบบสมการดังกล่าวเพื่อลดจำนวนตัวแปร

2.1.5 คำนวณหาค่าอื่นๆ ที่ต้องการจากค่าตัวแปรที่ได้จากคำนวณในข้อ 2.1.4 เช่น ความเค้น ความเครียด อุณหภูมิ และความดัน [1]

## 2.2 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อน มี 3 แบบ คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน มีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 การนำความร้อน (Conduction) คือ การถ่ายเทความร้อนภายในวัตถุจากอะตอมหนึ่งไปยังอีกอะตอมหนึ่ง โดยจะต้องอาศัยตัวกลางในการนำความร้อน ซึ่งความร้อนจะถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนแบบนี้เป็นไปตามกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier's law of heat conduction) ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$Q = \frac{kA\Delta T}{x} \quad (3)$$

2.2.2 การพาความร้อน (Convection) คือ การถ่ายเทความร้อนเมื่อของไหลไปสัมผัสกับผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างจากของไหลจึงทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้น โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนแบบนี้เป็นไปตาม กฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$Q = hA\Delta T \quad (4)$$

ซึ่งการพาความร้อนถูกจำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.2.2.1 การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural Convection) คือ การเคลื่อนไหวของของไหลเป็นผลของแรงลอยตัวซึ่งเกิดจากผลการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น อันเกิดจากมีผลต่างของอุณหภูมิของของไหลใน 2 บริเวณ

2.2.2.2 การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection) คือ การเคลื่อนไหวของของ

ไหลที่เป็นผลมาจากแรงกระทำภายนอก เช่น เครื่องสูบ เครื่องเป่าลม เป็นต้น

2.2.3 การแผ่รังสี (Radiation) คือ การถ่ายเทความร้อนโดยไม่อาศัยตัวกลาง พลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีจะเคลื่อนที่ไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนแบบนี้เป็นไปตาม กฎของสเตฟาน-โบลทซ์มันน์ (Stefan-Boltzmann law) ซึ่งเป็นไปตามสมการ [2]

$$Q = \varepsilon \sigma AT_s^4 \quad (5)$$

โครงการนี้จะศึกษาการถ่ายเทความร้อนเฉพาะการนำความร้อนและการพาความร้อนเท่านั้น ส่วนการถ่ายเทความร้อนแบบการแผ่รังสีจะไม่คำนึงถึง

## 2.3 สมการที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat,  $c_p$ ) เป็นปริมาณของพลังงานความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิที่ให้ต่อสารใดๆ เพิ่มขึ้น  $1^\circ\text{C}$  ต่อหน่วยมวล ถ้าปริมาณความร้อน  $Q$  หน่วย ถูกถ่ายเทให้กับมวล  $m$  แล้วทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนไป  $\Delta T$  สามารถเขียนปริมาณความร้อนได้สมการดังนี้

$$Q = mc_p \Delta T \quad (6)$$

2.3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Heat Transfer Coefficient,  $U$ ) เป็นค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของการถ่ายเทแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้น สามารถเขียนปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นได้ว่า

$$Q = UA\Delta T_{lm} \quad (7)$$

โดย

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{hot,in} - T_{cold,out}) - (T_{hot,out} - T_{cold,in})}{\ln\left(\frac{T_{hot,in} - T_{cold,out}}{T_{hot,out} - T_{cold,in}}\right)} \quad (8)$$

2.3.3 ค่าประสิทธิผล (Effectiveness) เป็นค่าประสิทธิผลประมาณจากอัตราส่วนของความร้อนที่ทำได้จริงต่อความร้อนที่เป็นไปได้สูงสุด เป็นไปตามสมการ [2]

$$\varepsilon = \frac{T_{hot,in} - T_{hot,out}}{T_{hot,in} - T_{cold,in}} \times 100\% \quad (9)$$

## 2.4 ค่าความคลาดเคลื่อน

2.3.1 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Absolute Error) ของเครื่องมือวัด เป็นค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่แท้จริง (Expected Value : E) กับค่าที่ได้จากการวัด (Measured Value : M) ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$\text{Absolute Error} = E - M \quad (10)$$

การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสะสมของตัวแปรตามเมื่อทราบความคลาดเคลื่อนของตัวแปรต้นสามารถทำได้ด้วยวิธี Step by Step โดยอาศัยความสัมพันธ์ของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ด้วย

$$\text{ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์} = \frac{\text{ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์} \times 100\%}{\text{ค่าที่วัดได้}} \quad (11)$$

2.4.2 Root Mean Square Error (RMSE) เป็นรากค่าตอบของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนนี้ใช้วัดความแปรปรวนระหว่างผลจากแบบจำลอง (พยากรณ์) และผลที่ได้จากการทดลอง (การวัดจริง) หากผิดพลาดมากค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนจะสูงขึ้นเพราะเป็นค่ายกกำลังสอง โดยปกติ RMSE จะถูกใช้เป็นค่าประเมินค่าเบี่ยงเบนของความคลาดเคลื่อนสามารถหาได้จาก

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M - E)^2}{N}} \quad (12)$$

2.4.3 Mean Bias Difference (MBD) เป็นค่าความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยที่ได้จากผลจากแบบจำลอง และผลที่ได้จากการทดลอง สามารถหาได้จาก

$$MBD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M - E) \quad (13)$$

ค่า RMSE และค่า MBD เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนสะสมสัมบูรณ์ที่เกิดขึ้นจริง ถ้ามีค่าน้อยกว่าสามารถสรุปได้ว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการทดลองมีค่า

ความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แต่ถ้ามีค่ามากกว่าสามารถสรุปได้ว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าความคลาดเคลื่อนกันอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับไม่ได้ [3]

## 2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

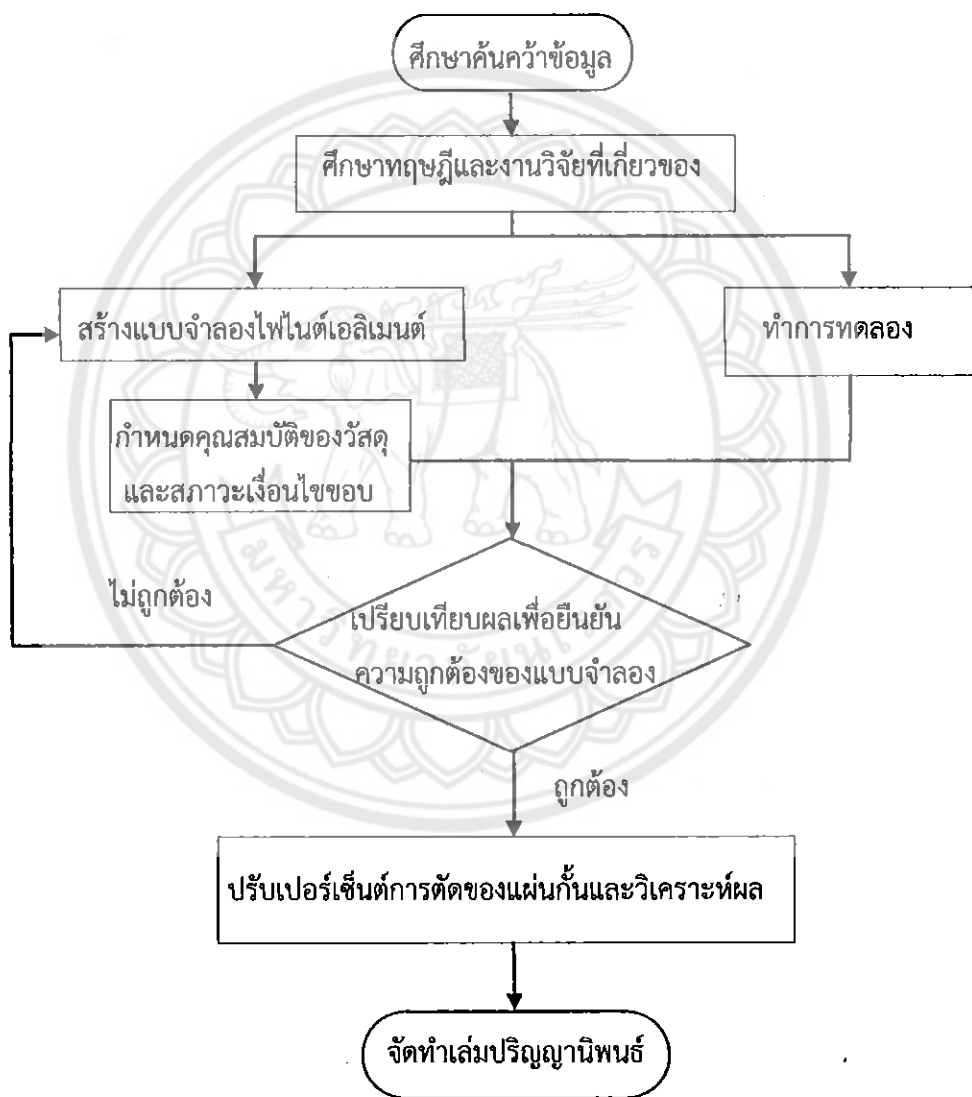
Ender Ozden และ Ilker Tari ได้ทำการศึกษาผลกระทบของระยะห่างของแผ่นกันเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเปลือก ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าความดันลดที่เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ โดยใช้โปรแกรม CFD คำนวณ แล้วนำผลการคำนวณไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณของ Kern method และ Bell Delaware method โดยปรับค่าระยะห่างของแผ่นกัน ระยะเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน อัตราการไหลเชิงมวล และ กำหนดให้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง และค่าความยาวของเปลือกและจำนวนท่อ มีค่าคงที่ จากผลการทดลองค่าที่คำนวณจากโปรแกรม CFD มีค่าใกล้เคียงกับผลคำนวณของ Kern method และ Bell- Delaware method ค่าที่คำนวณได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดคือ ระยะเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน ที่ 36% และจำนวนแผ่นกัน 12 แผ่น ที่ความยาวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 0.6 เมตร และอัตราการไหลเชิงมวล 0.5 kg/s [4]

Huadong Li และ Volker Kottke ได้ทำการศึกษาผลกระทบของระยะแผ่นกันที่มีผลต่อค่าความดันลดและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ ซึ่งทำการศึกษาโดยการทดลองโดยกำหนดระยะห่างระหว่างแผ่นกันที่ค่า 113 mm, 144 mm และ 175 mm ผลจากการทดลองพบว่า การเพิ่มระยะห่างของแผ่นกันจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน และค่าความดันลด มีค่าน้อยลง [5]

จากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าความดันลดที่เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ ตัวแปรหลัก คือ แผ่นกัน ทั้งเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน และระยะห่างของแผ่นกัน ซึ่งโครงการนี้จะทำการศึกษาเฉพาะเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกันที่เปอร์เซ็นต์การตัด 15% ถึง 45% เท่านั้น ส่วนระยะห่างของแผ่นกันนั้นจะกำหนดให้มีค่าคงที่

### บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนวิธีดำเนินงานของโครงการนี้เป็นไปตามแผนภูมิการดำเนินงานดังนี้



รูปที่ 3.3 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

### 3.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูล

3.1.1 ศึกษาข้อมูลและรายละเอียดต่างๆ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ รวมถึงเอกสารงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงงานนี้

3.1.1.1 ทฤษฎีและสมการการถ่ายโอนความร้อน

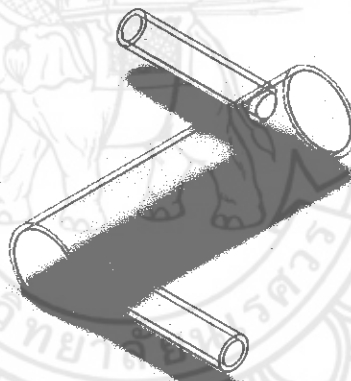
3.1.1.2 ทฤษฎีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1.1.3 ส่วนประกอบและการใช้งานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ

3.1.1.4 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ

### 3.2 สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

3.2.1 เปลือก ทำจากแก้ว (Glass) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50 mm ยาว 190 mm หนา 3 mm



รูปที่ 3.4 เปลือก

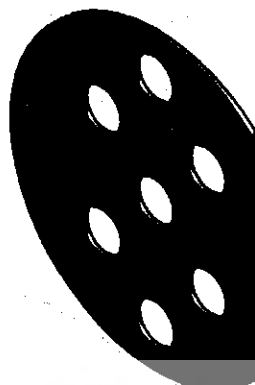
3.2.2 ท่อ ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel 321) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 6 mm ยาว 190 mm หนา 1 mm



รูปที่ 3.5 ท่อ



3.2.3 แผ่นกั้น ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม หนา 0.75 mm



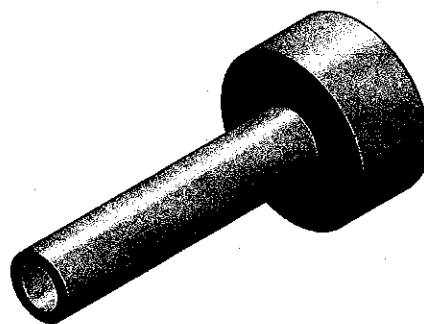
รูปที่ 3.6 แผ่นกั้นที่เปอร์เซ็นต์การตัด 15.19%

3.2.4 Tube Sheet ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม หนา 2 mm



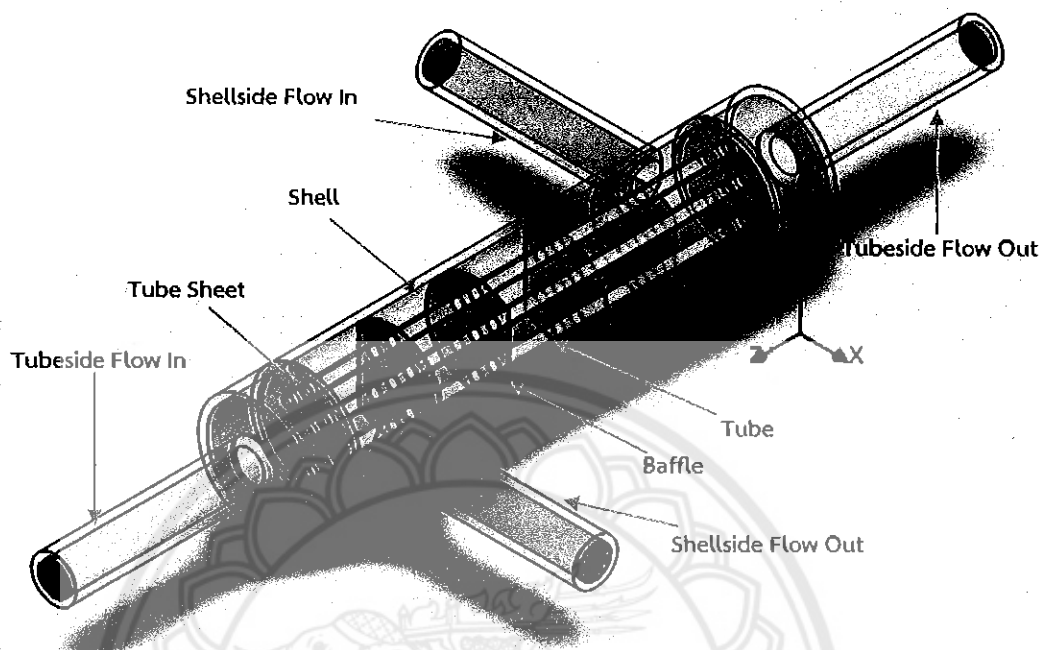
รูปที่ 3.7 Tube sheet

3.2.5 Tubeside Flow ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม หนา 3 mm



รูปที่ 3.8 Tubeside Flow

### 3.2.6 ประกอบได้แบบจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แบบจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ

### 3.3 กำหนดคุณสมบัติและสภาวะเงื่อนไขขอบของแบบจำลอง

3.3.1 คุณสมบัติของวัสดุต่างๆ ของแบบจำลองเป็นไปตามในตารางที่ 3.2  
ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ ในแบบจำลอง

วัสดุ	Thermal conductivity (W/m·K)	Specific heat (J/kg·K)	Mass density (kg/m <sup>3</sup> )
Stainless steel 321	16.1	500	8,000
Glass	1.4	835	2,225

ที่มา : Dewitt Bergmann Lavine (2007)

### 3.3.2 กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของเหลว ในแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของเหลวและแก๊ส

Process	$h$ ( $W/m^2 \cdot K$ )
Free convection	
Gases	2-25
Liquids	50-1,000
Forced convection	
Gases	25-250
Liquids	100-20,000
Convection with phase change	
Boiling or condensation	2,500-100,000

ที่มา : Dewitt Bergmann Lavine (2007)

ในแบบจำลองของไหลภายในเปลือกเป็นการไหลแบบบังคับ สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้จากการทดลอง โดยคำนวณจาก

$$Q = mc_p \Delta T$$

โดยที่  $Q$  คือ ปริมาณความร้อนที่กระแสน้ำของไหลเย็นรับไปจากกระแสน้ำของไหลร้อน  
 $m$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลกระแสน้ำเย็น  
 $c_p$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะเปิดตารางที่ ข.11 ที่อุณหภูมิ 34.07 °C  
 $\Delta T$  คือ ผลต่างของอุณหภูมิของของไหลกระแสน้ำเย็น

แทนค่า  $Q = 0.02486 \times 4178 \times (309.71 - 304.72) = 518.29 \text{ W}$

และจาก  $Q = hA\Delta T$

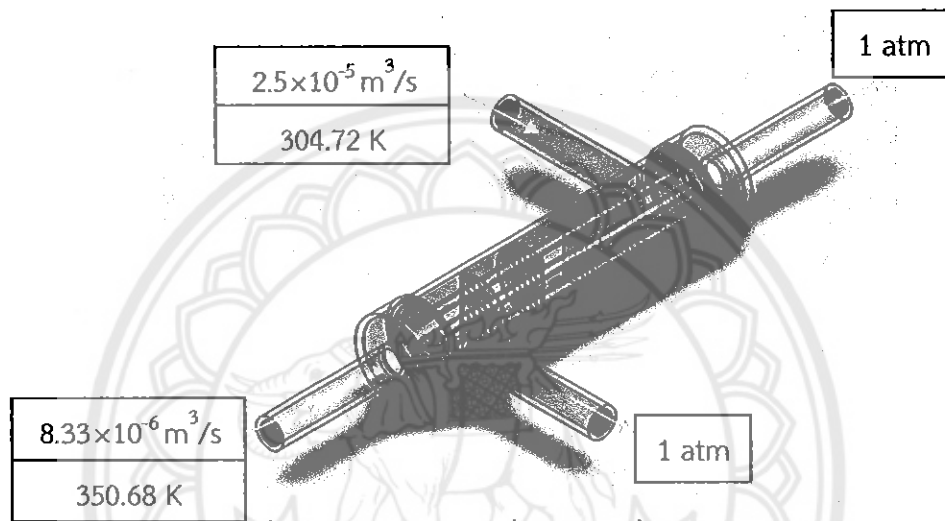
โดยที่  $Q$  คือ ปริมาณความร้อนที่กระแสน้ำของไหลเย็นรับไปจากกระแสน้ำของไหลร้อน  
 $h$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลกระแสน้ำเย็น  
 $A$  คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนคิดจากพื้นที่ผิวภายนอกของท่อทั้งหมด  
 $\Delta T$  คือ ผลต่างของอุณหภูมิของของไหลกระแสน้ำเย็น

แทนค่า  $518.29 = h \times 0.02507 \times (309.71 - 304.72)$

$$h = 4,143 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์การพาของของไหลภายในเปลือกเท่ากับ  $4,143 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  เพื่อนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของแบบจำลองที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกันต่างๆ

### 3.3.3 กำหนดสภาวะเงื่อนไขขอบที่ใช้การวิเคราะห์



รูปที่ 3.10 กำหนดสภาวะเงื่อนไขขอบที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.3.3.1 กำหนดอุณหภูมิทางเข้าของของไหลกระแสร้อนและกระแสเย็นเป็น  $350.68 \text{ K}$  และ  $304.72 \text{ K}$  ตามลำดับ

3.3.3.2 กำหนดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหลกระแสร้อนและกระแสเย็นเป็น  $8.33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  และ  $2.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  ตามลำดับ

3.3.3.3 กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลในเปลือกเป็น  $4,143 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

3.3.3.4 กำหนดค่าความดันทางออกของทั้ง 2 กระแส เป็น  $1 \text{ atm}$

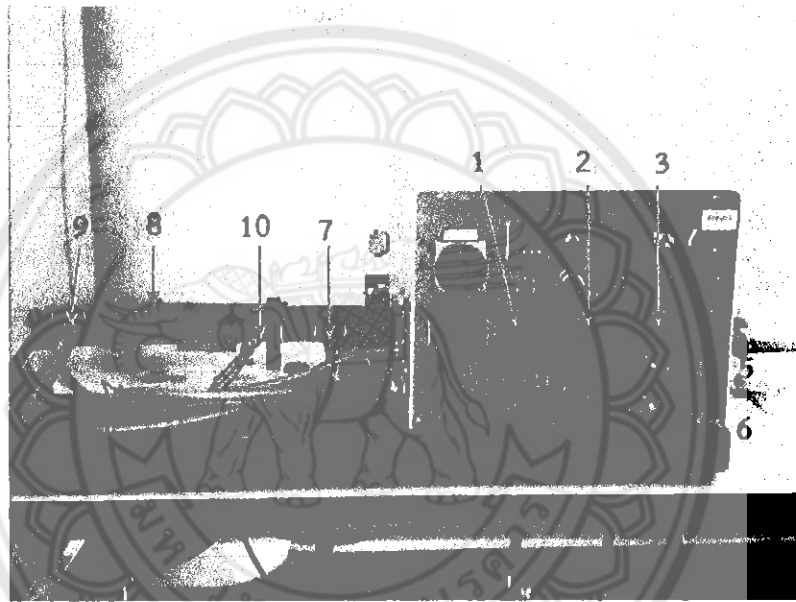
## 3.4 วิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ทำการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แล้วนำผลของอุณหภูมิที่ได้ไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพ เพื่อนำผลไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง

### 3.5 ทำการทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ (รุ่น WL 110.03) ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล

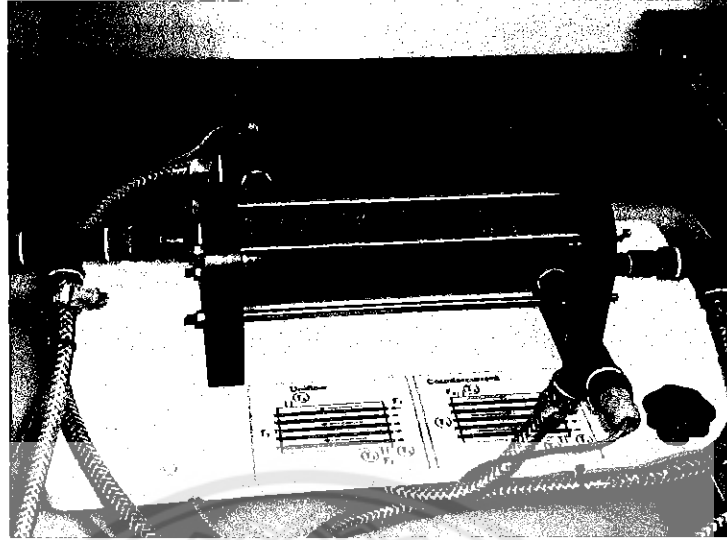
3.5.1 กำหนดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหลกระแสน้ำร้อนและกระแสน้ำเย็นเป็น  $8.33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  และ  $2.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  ตามลำดับ

3.5.2 ทำการทดลอง 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิแล้วนำไปคำนวณเป็นค่าประสิทธิภาพเพื่อนำผลไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 3.11 ชุดการทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อในห้องปฏิบัติการ

- เมื่อ
- 1 คือ อุณหภูมิทางเข้า
  - 2 คือ อุณหภูมิทางออก
  - 3 คือ อัตราการไหล
  - 4 คือ ปรับเพื่ออ่านค่าอุณหภูมิทางเข้าทางออกของกระแสน้ำร้อนและกระแสน้ำเย็น
  - 5 คือ ปรับอัตราการไหลกระแสน้ำร้อน
  - 6 คือ ปรับอัตราการไหลกระแสน้ำเย็น
  - 7 คือ ทางเข้ากระแสน้ำร้อน
  - 8 คือ ทางเข้ากระแสน้ำเย็น
  - 9 คือ ทางออกกระแสน้ำร้อน
  - 10 คือ ทางออกกระแสน้ำเย็น



รูปที่ 3.12 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล

### 3.6 เปรียบเทียบประสิทธิผลที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลอง

นำค่าประสิทธิผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และจากการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบว่าผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่ เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง สามารถพิสูจน์ได้โดยนำค่าความคลาดเคลื่อนสะสมของค่าประสิทธิผลจากการทดลองนำไปเปรียบเทียบกับ ค่า RMSE และ ค่า MBD ถ้าค่า RMSE และ ค่า MBD มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนสะสมของประสิทธิผลจากการทดลองจะถือว่าแบบจำลองมีความถูกต้อง

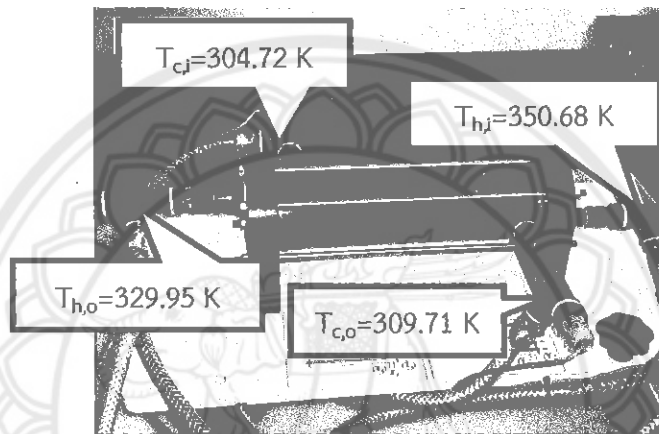
### 3.7 ปรับเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้นและวิเคราะห์ผล

เมื่อได้แบบจำลองที่มีความถูกต้องแล้วจะทำการปรับเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น 7 ค่า คือ ที่เปอร์เซ็นต์การตัด 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40% และ 45% ตามลำดับ เพื่อวิเคราะห์ค่าประสิทธิผล ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม และค่าความดันลดที่เกิดขึ้น

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์

#### 4.1 ผลจากการทดลอง



รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ของอุณหภูมิจากการทดลอง

จากการทดลองสามารถวัดค่าอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของกระแสน้ำร้อนและกระแสน้ำเย็นได้ตามตารางตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงผลของอุณหภูมิจากการทดลอง

จำนวนครั้ง	$T_{hot,in} (K)$	$T_{hot,out} (K)$	$T_{cold,in} (K)$	$T_{cold,out} (K)$	$\epsilon$ (%)
1	350.58	329.85	304.38	309.65	44.87
2	350.75	329.95	304.72	309.65	45.18
3	350.75	330.05	305.05	309.85	45.29
ค่าเฉลี่ย	350.68	329.95	304.72	309.71	45.10

จากตารางการทดลองทำให้ทราบค่าอุณหภูมิ และสามารถนำค่าเหล่านั้นไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ โดยหาได้จาก

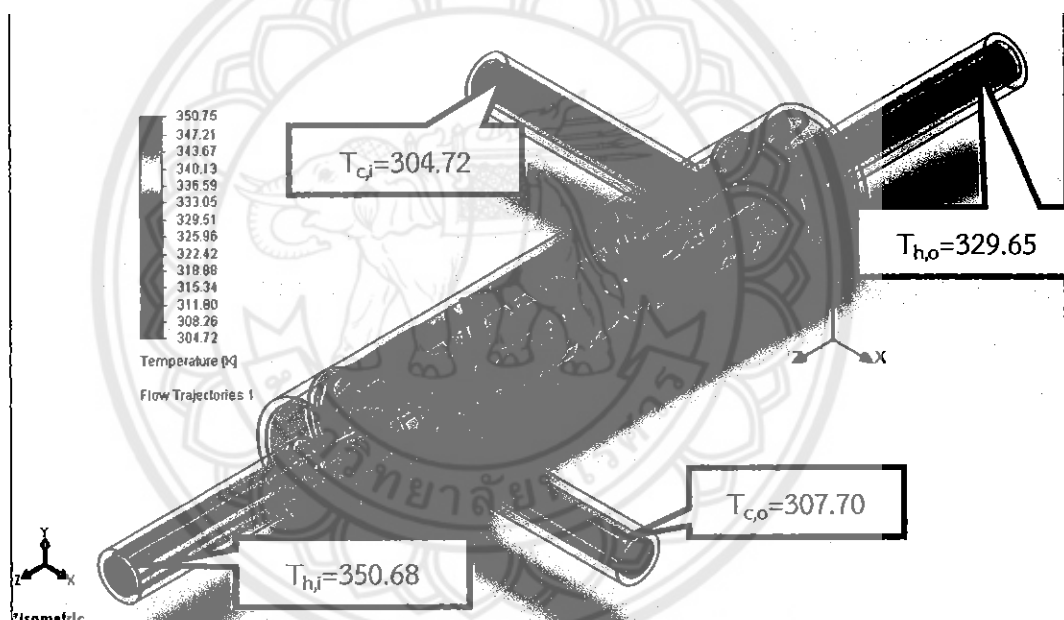
$$\varepsilon = \frac{T_{hot,in} - T_{hot,out}}{T_{hot,in} - T_{cold,in}} \times 100\%$$

แทนค่า

$$\varepsilon = \frac{350.68 - 329.95}{350.68 - 304.72} \times 100\% = 45.10\%$$

ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ 45.10%

#### 4.2 ผลจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ของอุณหภูมิด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เปอร์เซ็นต์การตัด 15.91%

จากผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้ผลของอุณหภูมิ ดังตารางที่ 4.5 ตารางที่ 4.5 แสดงผลของอุณหภูมิจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จำนวนครั้ง	$T_{hot,in}$ (K)	$T_{hot,out}$ (K)	$T_{cold,in}$ (K)	$T_{cold,out}$ (K)	$\varepsilon$ (%)
1	350.58	329.44	304.38	307.37	45.76
2	350.75	329.71	304.72	307.71	45.71
3	350.75	329.8	305.05	308.03	45.84
ค่าเฉลี่ย	350.68	329.65	304.72	307.70	45.76



จากตารางการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถคำนวณหาค่าประสิทธิผลของการแลกเปลี่ยนความร้อนได้จาก

$$\varepsilon = \frac{T_{hot,in} - T_{hot,out}}{T_{hot,in} - T_{cold,in}} \times 100\%$$

แทนค่า

$$\varepsilon = \frac{350.68 - 329.65}{350.68 - 304.72} \times 100\% = 45.76\%$$

ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าประสิทธิผลของการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ 45.76%

#### 4.3 การเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง

การเปรียบเทียบความถูกต้องผลของแบบจำลองกับผลของการทดลองสามารถพิสูจน์ได้โดยนำค่าความคลาดเคลื่อนสะสมของค่าประสิทธิผลจากการทดลอง ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดเท่ากับ  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  [6] นำไปเปรียบเทียบกับ ค่า RMSE และ ค่า MBD ถ้าค่า RMSE และ ค่า MBD มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนสะสมของค่าประสิทธิผลจากการทดลองจะถือว่าแบบจำลองมีความถูกต้อง มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยผลการคำนวณแสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.6 แสดงผลความคลาดเคลื่อนสะสมของค่าประสิทธิผลจากการทดลอง

ลำดับ	ค่าประสิทธิผล (%)	ค่าความคลาดเคลื่อนสะสม (%)
1	45.44	3.36
2	45.38	3.37
3	45.38	3.40
เฉลี่ย	45.40	3.38

ตารางที่ 4.7 แสดงผลต่างของค่าประสิทธิผลระหว่างแบบจำลองกับการทดลอง

ลำดับ	$\varepsilon$ แบบจำลอง (M, %)	$\varepsilon$ การทดลอง (E, %)	M-E (%)	(M-E) <sup>2</sup> (%)
1	45.76	44.87	0.89	0.7921
2	45.71	45.18	0.53	0.2709
3	45.84	45.29	0.55	0.3025
รวม	137.31	137.34	1.97	1.3755

จากตารางที่ 4.7 สามารถคำนวณค่า RMSE ได้จาก

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M - E)^2}{N}}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1.3755}{3}} = 0.677\%$$

และจากตารางที่ 4.7 สามารถคำนวณค่า MBD ได้จาก

$$MBD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M - E)$$

$$MBD = \frac{1}{3} \times 1.97 = 0.657\%$$

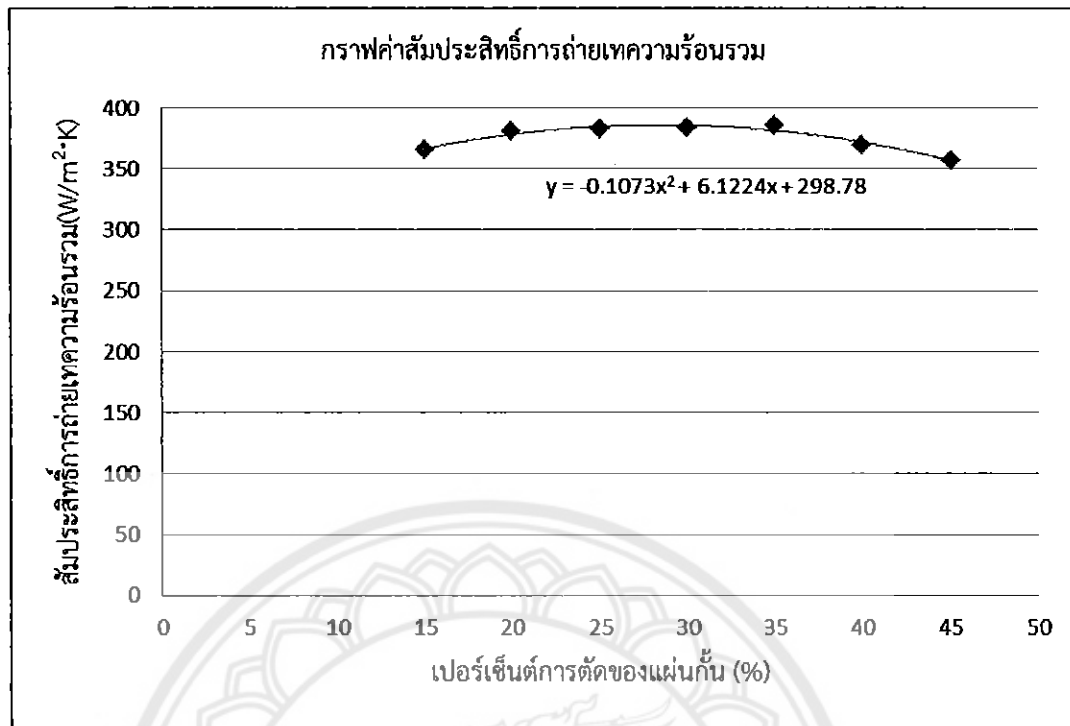
เมื่อได้ค่า RMSE เท่ากับ 0.677% และค่า MBD เท่ากับ 0.657% แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนสะสมของประสิทธิผลจากการทดลองซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.38% ปรากฏว่ามีค่าน้อยกว่า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองมีความถูกต้อง มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

#### 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลองที่เปลี่ยนเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน ทำให้ทราบผลต่างของอุณหภูมิ และนำผลต่างของอุณหภูมิที่ได้ไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมได้ดังตารางที่ 4.8 และสามารถเขียนเป็นกราฟได้ดังกราฟที่ 4.1

ตารางที่ 4.8 แสดงผลสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน (%)	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U,W/m <sup>2</sup> ·K)
15	365.68
20	380.75
25	383.17
30	383.35
35	385.98
40	369.52
45	357.41

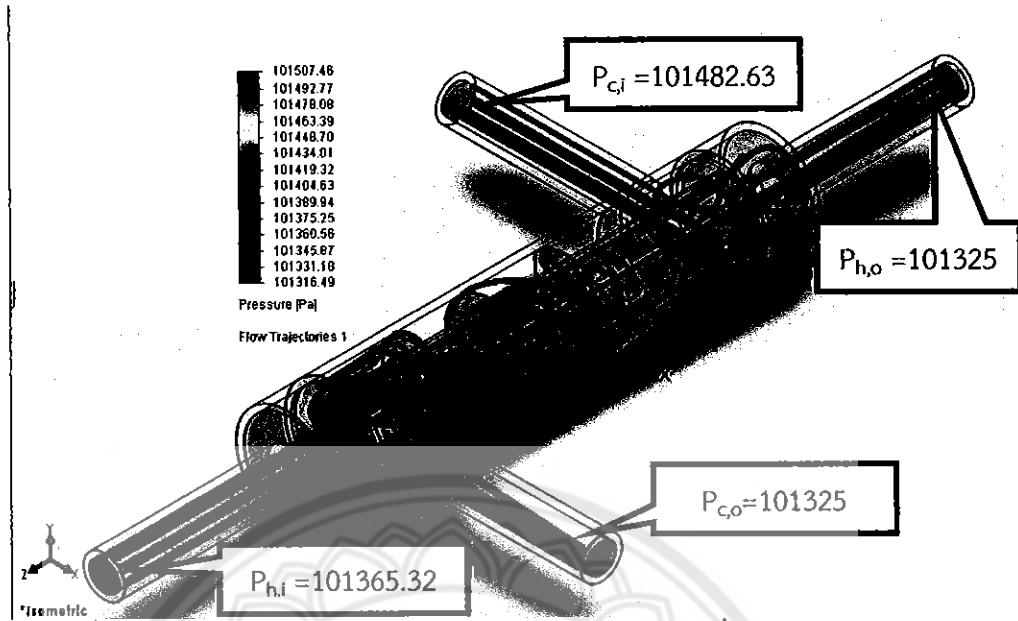


กราฟที่ 4.1 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

จากกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลองที่ปรับเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน จะพบว่ากราฟค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมีลักษณะเป็นพาราโบลาคว่ำ จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ  $385.98 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  ที่เปอร์เซ็นต์การตัด 35% และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ  $357.42 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  ที่เปอร์เซ็นต์การตัด 45 % แตกต่างกัน  $28.56 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกัน 7.4% จากลักษณะของกราฟที่ได้จะพบว่าแนวโน้มของกราฟในช่วงเปอร์เซ็นต์การตัด 20% ถึง 35% การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะเกิดขึ้นในช่วงแคบๆ ระหว่าง 380 ถึง  $385 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  โดยประมาณ หลังจากนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะมีค่าลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกันเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาในส่วน of ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกันที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 20% ถึง 35%

#### 4.5 ค่าความดันลด

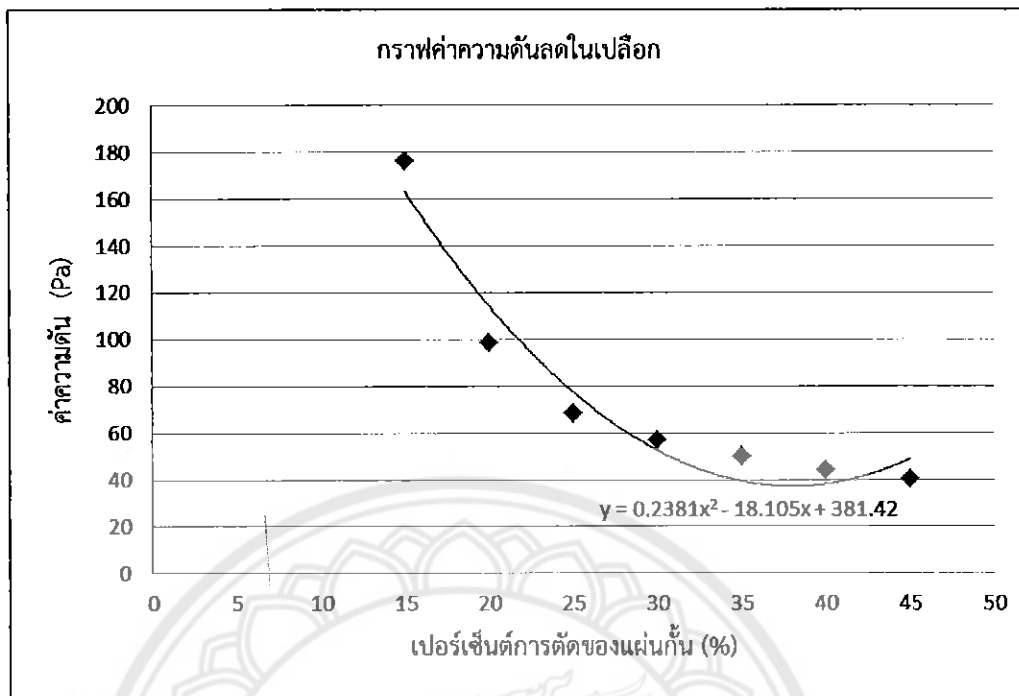
จากผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลองที่เปลี่ยนเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน ที่มีการเปลี่ยนระยะเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกันจะเห็นว่า มีการเปลี่ยนความดันดังแสดงในรูปที่ 4.15 ได้ผลการคำนวณค่าความดันลดในตารางที่ 4.19 และเขียนกราฟได้ดังกราฟที่ 4.2



รูปที่ 4.15 แสดงค่าความดันลดจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เปอร์เซ็นต์การตัด15%

ตารางที่ 4.9 แสดงผลความดันลดจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน (%)	ค่าความดันลด (Pa)
15	176.27
20	98.39
25	68.51
30	56.90
35	49.93
40	44.26
45	40.31



จากกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลองที่เปลี่ยนเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น พบว่าที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้นเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดค่าความดันลดน้อยลง โดยที่ค่าความดันลดสูงสุดเท่ากับ 176.27 Pa ที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น 15% และค่าความดันลดต่ำสุดเท่ากับ 40.31 Pa ที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น 45% ค่าความดันลดแตกต่างกัน 135.96 Pa คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง 77.13% จากลักษณะของกราฟสามารถแบ่งกราฟออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงเปอร์เซ็นต์การตัดที่ 15% ถึง 25% พบว่ากราฟมีความชันมาก ค่าความดันลดจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้นมีขนาดลดลง จาก 68.51 Pa ที่เปอร์เซ็นต์การตัด 25% เป็น 176.27 Pa ที่เปอร์เซ็นต์การตัด 25% และช่วงเปอร์เซ็นต์การตัดที่ 25% ถึง 45% พบว่ากราฟมีความชันน้อย การเพิ่มขึ้นของค่าความดันลดจะเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนที่น้อยกว่ากราฟช่วงแรกอย่างชัดเจน ดังนั้นเมื่อพิจารณาในส่วนของค่าความดันลดจะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้นที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 25% ถึง 45%

#### 4.6 ค่าประสิทธิผล

จากผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลองที่เปลี่ยนเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น สามารถคำนวณค่าประสิทธิผลได้ค่าดังตารางที่ 4.10 และเขียนกราฟได้ดังกราฟที่ 4.3 ตารางที่ 4.10 แสดงผลของประสิทธิผลจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

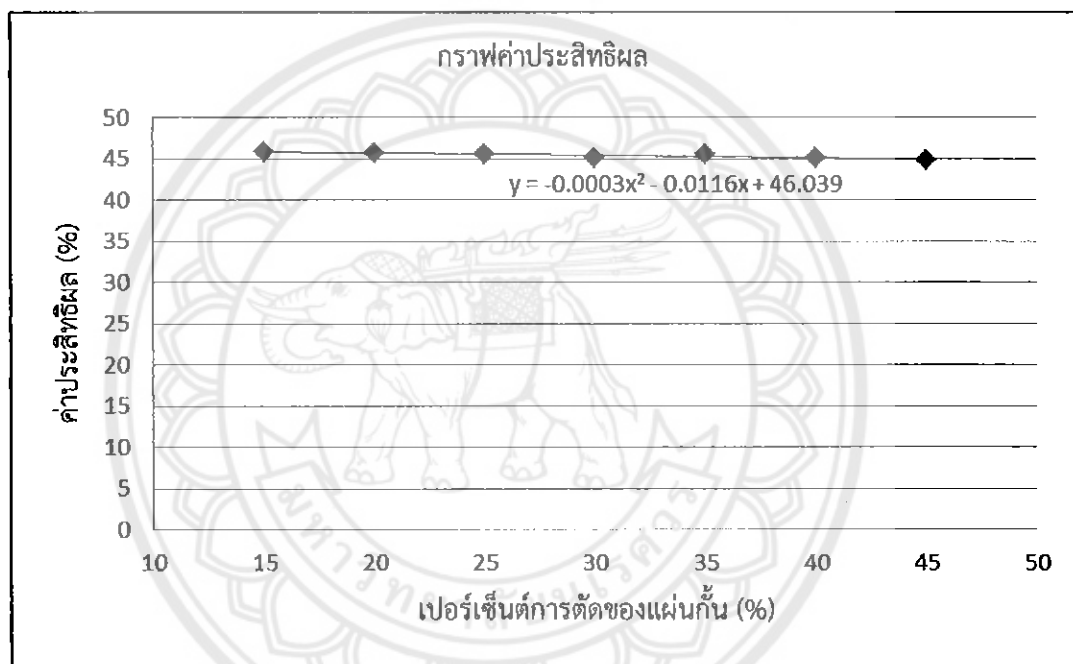
16008331

ป.ร.

๓๘๖๒๑

๒๕๖๔

เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น (%)	ค่าประสิทธิภาพ ( $\epsilon$ )
15	45.80
20	45.72
25	45.54
30	45.12
35	45.48
40	45.10
45	44.77



กราฟที่ 4.3 กราฟแสดงค่าประสิทธิผล

จากกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลองที่เปลี่ยนเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น จะพบค่าประสิทธิผลเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมากโดยมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้นเพิ่มขึ้น มีค่าประสิทธิผลสูงสุดเท่ากับ 45.80% ที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น 15% และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 44.77% ที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น 45% แตกต่างกันเพียง 1.03%

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

การวิเคราะห์แบบจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีขั้นตอนการดำเนินงานที่ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือ ขั้นตอนการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดลอง ขั้นตอนที่สองคือ การปรับเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกันเพื่อศึกษาความแตกต่างของค่าประสิทธิภาพ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม และค่าความดันลด ซึ่งสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังนี้

##### 5.1.1 การยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดลอง

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทดลองและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ RMSE มีค่าเท่ากับ 0.677% และ MBD มีค่าเท่ากับ 0.657% เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนสะสมของค่าประสิทธิภาพจากการทดลองซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.39% พบว่าค่า RMSE และ MBD มีค่าน้อยกว่า ดังนั้นแบบจำลองจึงมีความถูกต้อง มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

##### 5.1.2 การปรับเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกันเพื่อวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ค่าความดันลด และค่าประสิทธิภาพ

##### 5.1.2.1 ผลกระทบของเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกันต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

จากผลการวิเคราะห์ เมื่อพิจารณาในส่วน of ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกันที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 20% ถึง 35% เนื่องจากแนวโน้มของกราฟในช่วงเปอร์เซ็นต์การตัด 20% ถึง 35% ค่าความชันของกราฟมีค่าน้อย ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วงแคบๆ และเป็นช่วงที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูง

### 5.1.2.2 ผลกระทบของเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้นต่อค่าความดันลด

จากผลการวิเคราะห์ พบว่าค่าความดันลดมีค่าลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้นเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาในส่วนของค่าความดันลด จากลักษณะของกราฟที่ได้ จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้นที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 25% ถึง 45% เนื่องจากในช่วงเปอร์เซ็นต์การตัดดังกล่าวการลดลงของค่าความดันลดเมื่อเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้นเพิ่มขึ้น จะเกิดขึ้นในสัดส่วนที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้นที่ 15% ถึง 25%

### 5.1.2.3 ผลกระทบของเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้นต่อค่าประสิทธิผลการแลกเปลี่ยนความร้อนรวม

จากผลการวิเคราะห์ พบว่าการปรับเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้นจะส่งผลต่อค่าประสิทธิผลน้อยมาก โดยจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้นมีขนาดเพิ่มขึ้น ค่าประสิทธิผลสูงสุดเท่ากับ 45.80% ที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น 15% และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 44.77% ที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น 45% แตกต่างกันเพียง 1.03%

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 คอมพิวเตอร์ควรมีสมรรถนะสูงสำหรับวิเคราะห์แบบจำลอง เพื่อความถูกต้องของคำตอบ

5.2.2 ควรมีการเปลี่ยนของไหลในการแลกเปลี่ยนความร้อนให้อยู่ในสถานะอื่นๆ เช่น ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับก๊าซ เพื่อศึกษาความสามารถของการแลกเปลี่ยนความร้อน



## รายการอ้างอิง

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. คู่มือการเสนอวิทยานิพนธ์. กรุงเทพมหานคร :

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยนเรศวร. คู่มือการเขียนรายงาน วิชา

302499 ครงงานวิศวกรรมเครื่องกล. พิษณุโลก : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย

นเรศวร, 2542. (อัดสำเนา)



## บรรณานุกรม

- [1] อนุชา พรหมวังษา. เอกสารประกอบการสอนวิชาไฟไนต์เอลิเมนต์, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2544
- [2] Frank P. Incropera, David P. Dewitt and Adrienne S. Lavine. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. (6nd ed.). Hoboken : John Wiley & sons (asia) Plte ltd, 2007
- [3] John R. Taylor. An Introduction to Error Analysis, Second Edition, University Science Book, California, USA
- [4] Ender Ozden and Ilker Tari (2010). Shell side CFD analysis of a small shell-and-tube heat exchanger. *The Journal of Energy Conversion and Managment*. 51, 1004-1014
- [5] Huadong Li and Volker Kottke (1997). Effect of baffle spacing on pressure drop and local heat transfer in shell-and-tube heat exchangers for staggered tube arrangement. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 41, 1303-1311
- [6] Thermocouple Specification Criteria วิธีสืบค้นวัสดุสารสนเทศ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.smartsensors.com/spectherm.pdf> วันที่ค้นข้อมูล : 12 กุมภาพันธ์ (2546)
- [7] Yunus A. Cengel and Afshin J. Ghajar. Heat and mass transfer Fundamentals and Application, (Fourth Edition). New York : Mc Graw-Hill companies, (2011)

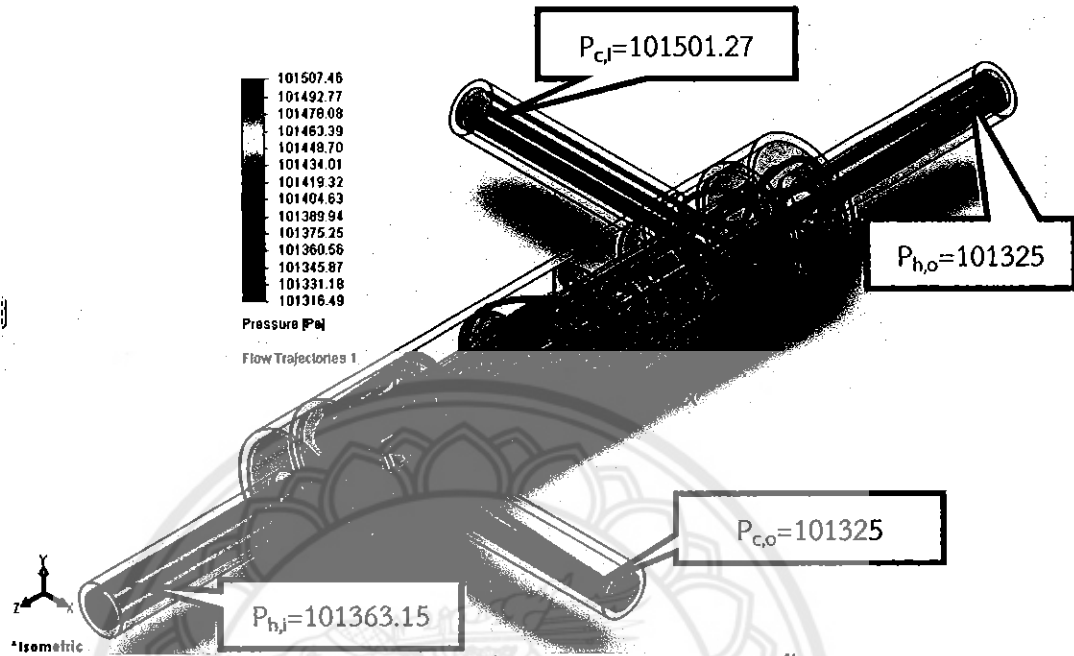


ภาคผนวก ก

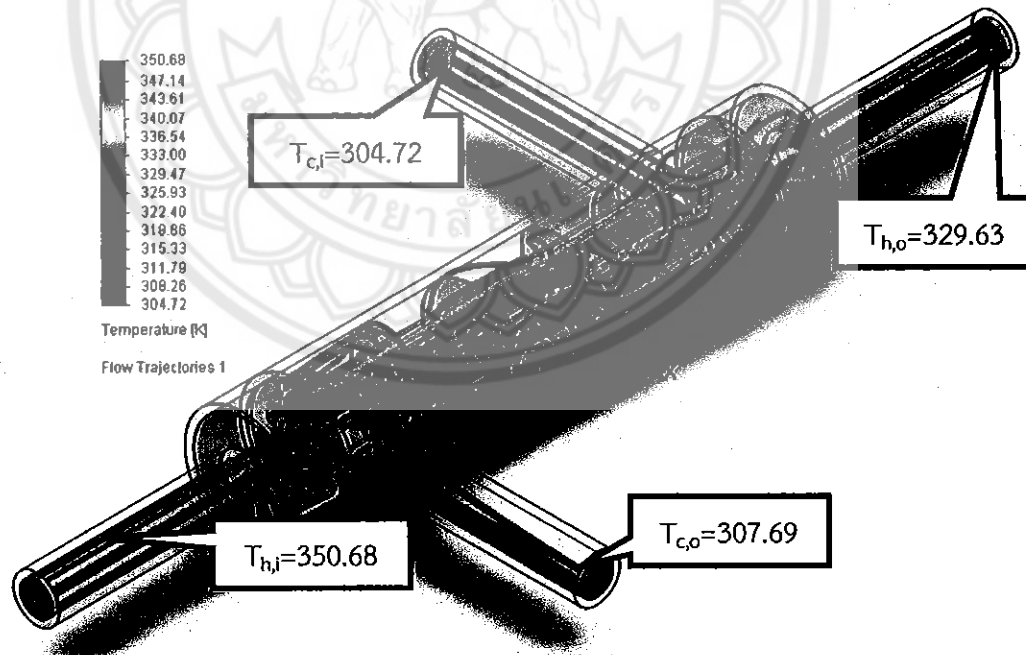
ผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



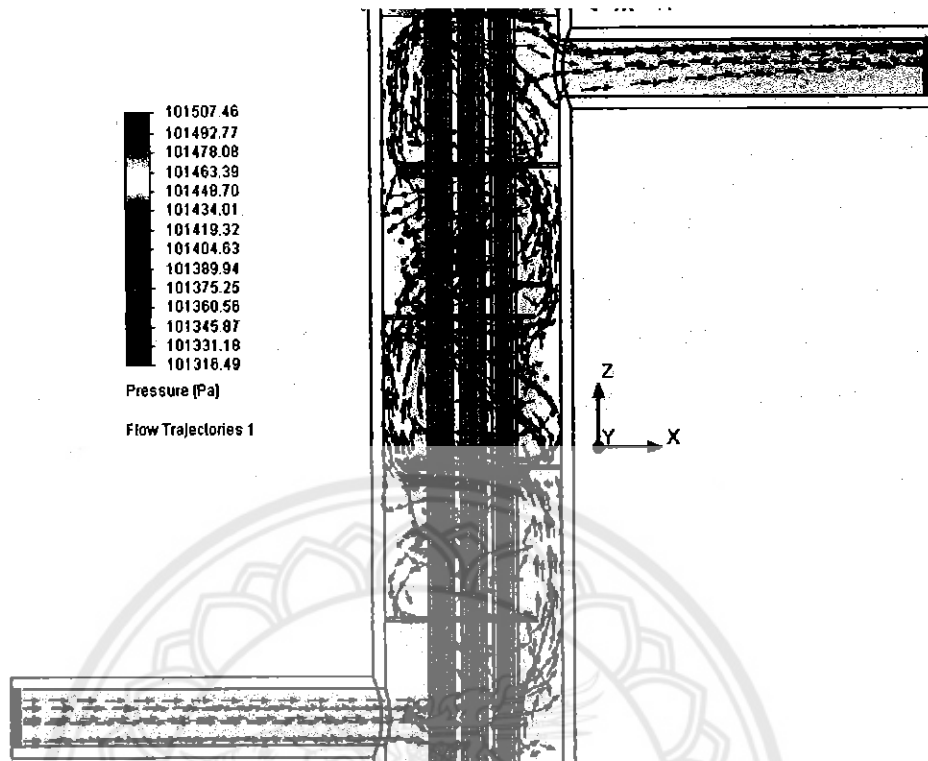
ค่าอุณหภูมิ, ค่าความดันและทิศทางการไหลที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 15%



รูปที่ ก.16 แสดงค่าความดันที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 15%

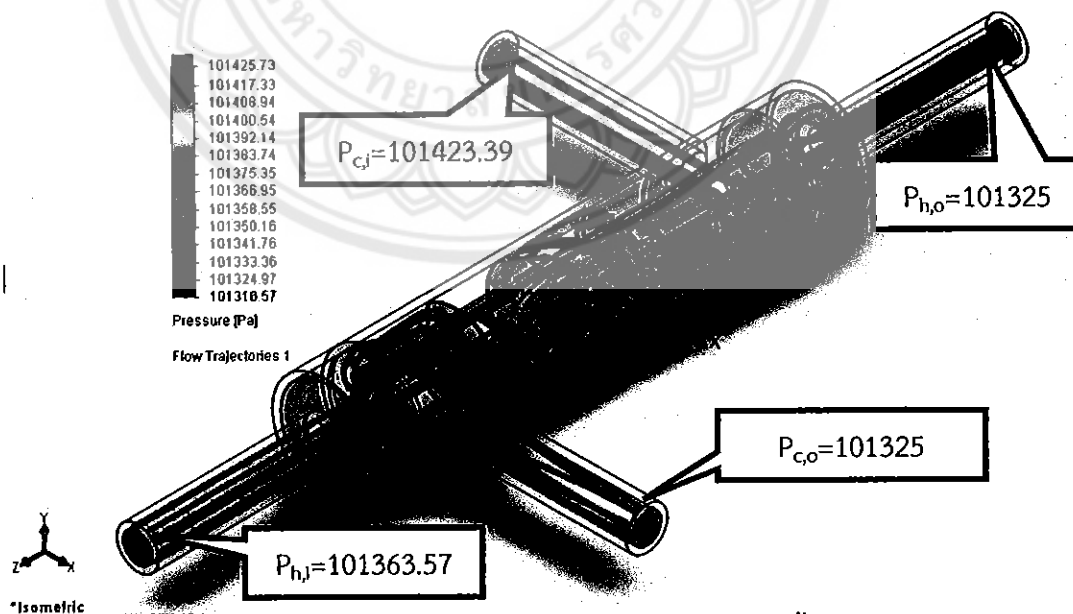


รูปที่ ก.17 แสดงค่าอุณหภูมิที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 15%

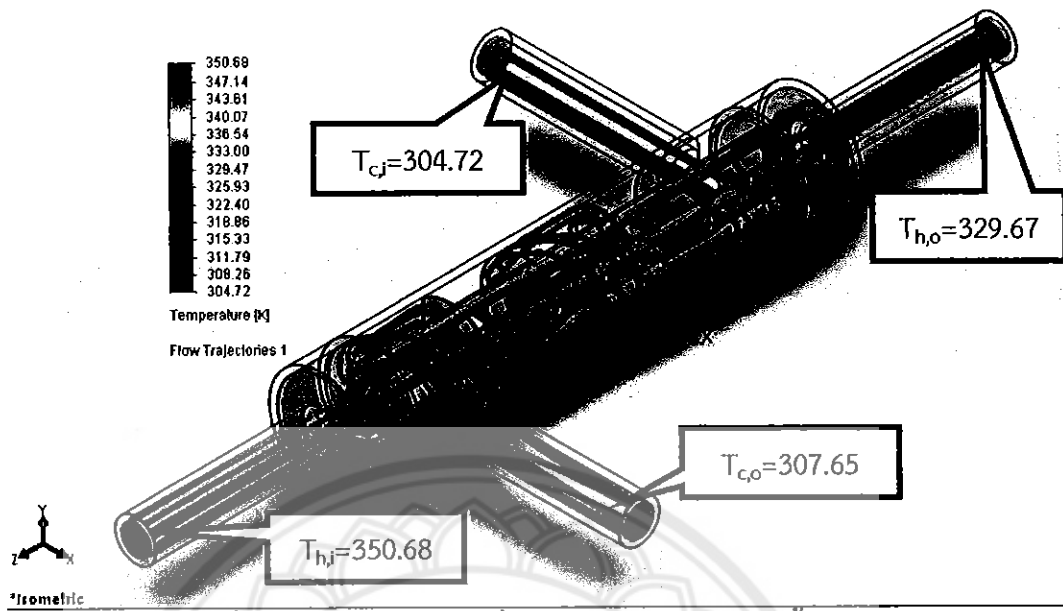


รูปที่ ก.18 แสดงทิศทางการไหลที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 15%

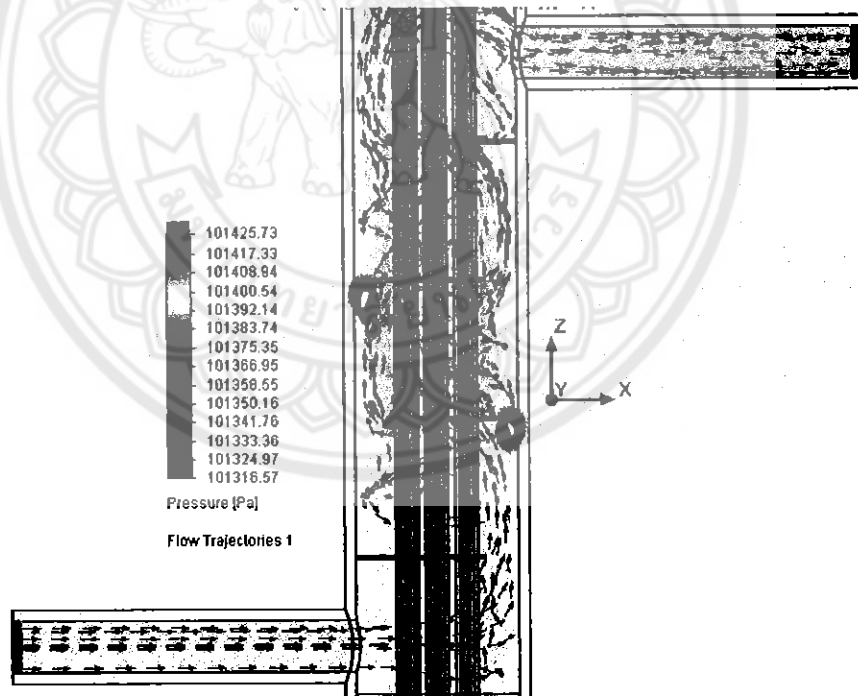
ค่าอุณหภูมิ, ค่าความดันและทิศทางการไหลที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 20%



รูปที่ ก.19 แสดงค่าความดันที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 20%

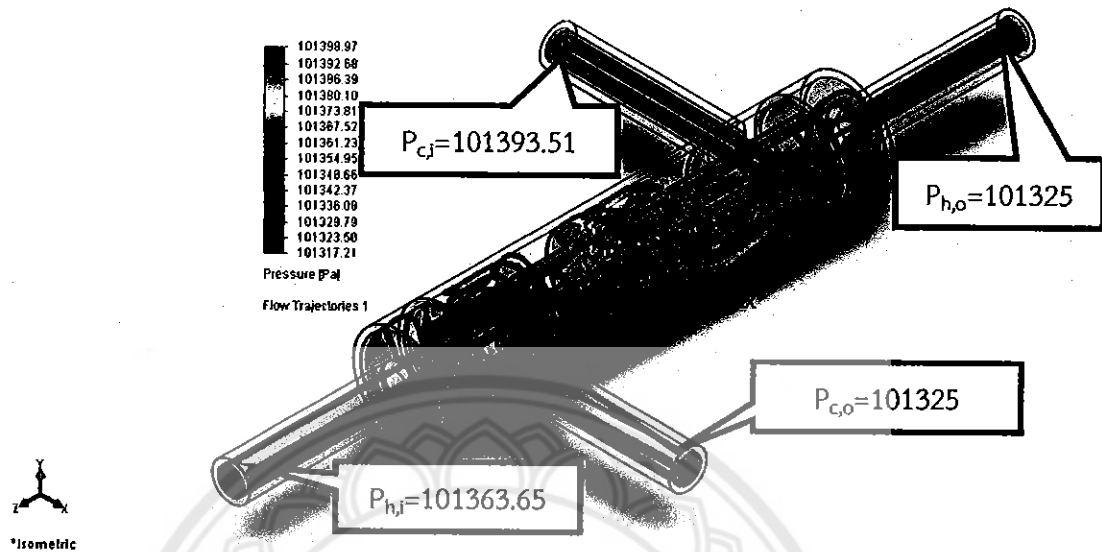


รูปที่ ก.20 แสดงค่าอุณหภูมิที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 20%

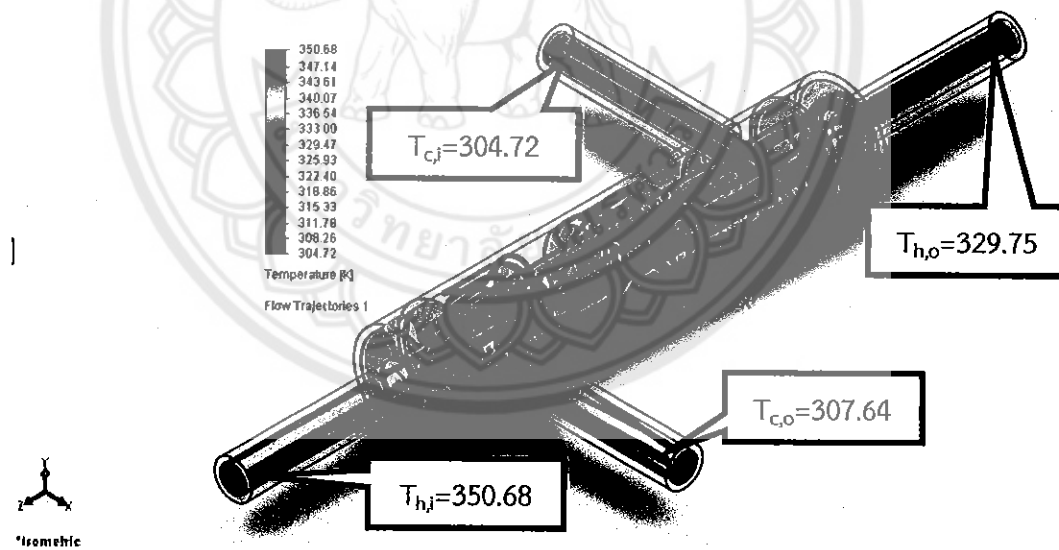


รูปที่ ก.21 แสดงทิศทางการไหลที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 20%

ค่าอุณหภูมิ, ค่าความดันและทิศทางการไหลที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น 25%

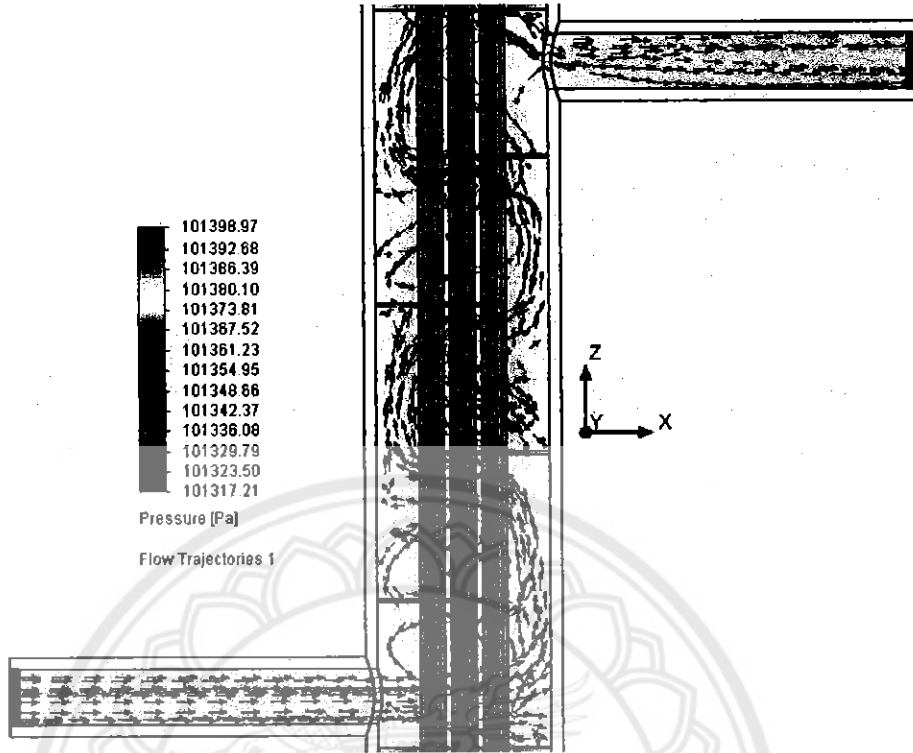


รูปที่ ก.22 แสดงค่าความดันที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น 25%



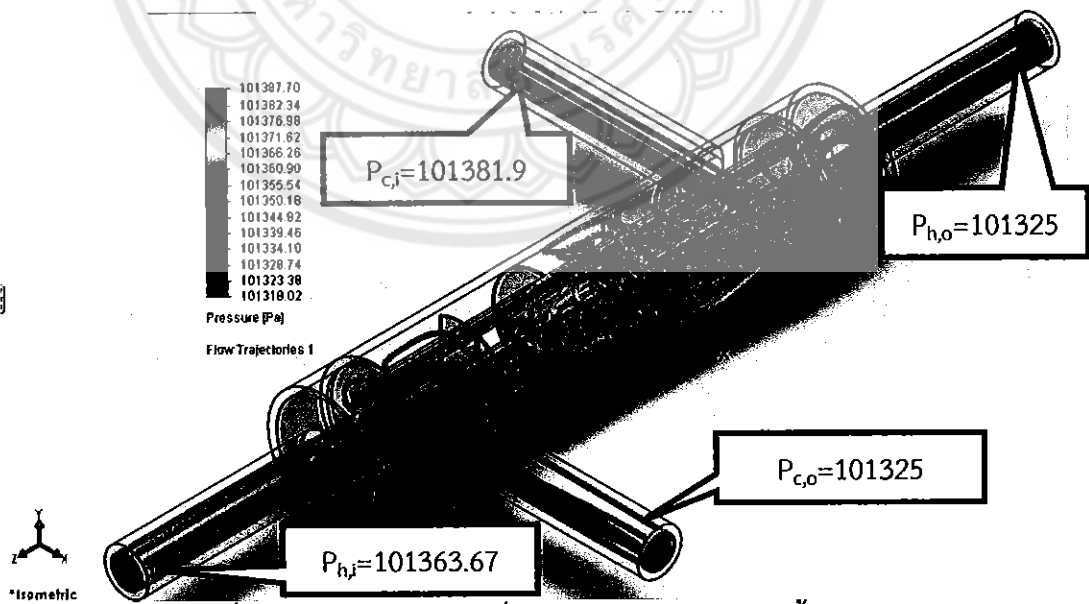
รูปที่ ก.23 แสดงค่าอุณหภูมิที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น 25%



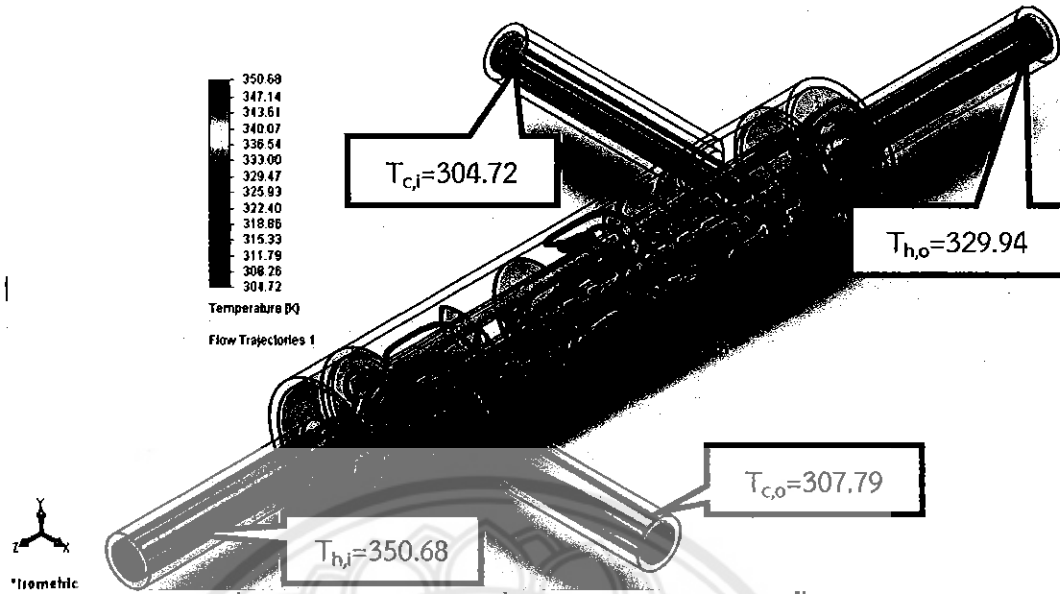


รูปที่ ก.24 แสดงทิศทางการไหลที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น 25%

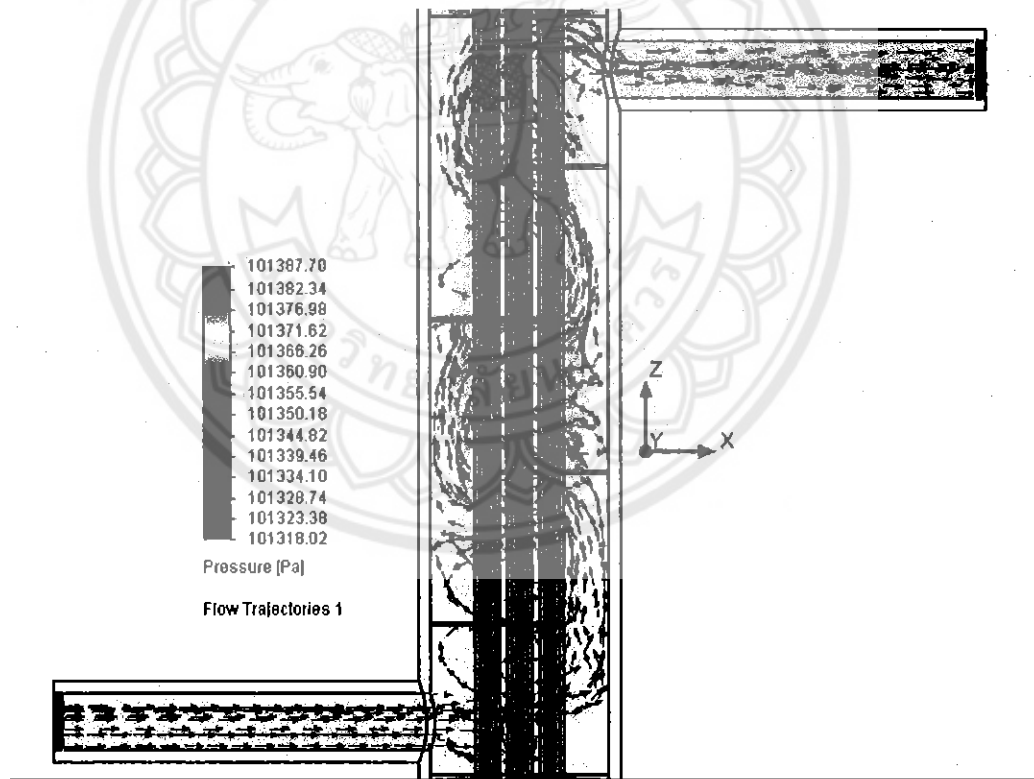
ค่าอุณหภูมิ, ค่าความดันและทิศทางการไหลที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น 30%



รูปที่ ก.25 แสดงค่าความดันที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น 30%

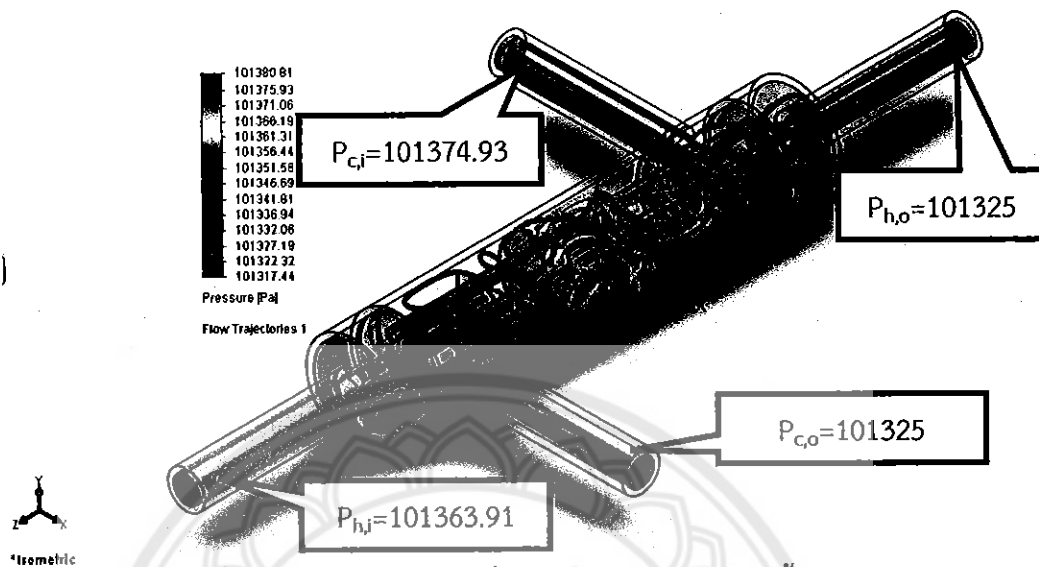


รูปที่ ก.26 แสดงค่าอุณหภูมิที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น 30%

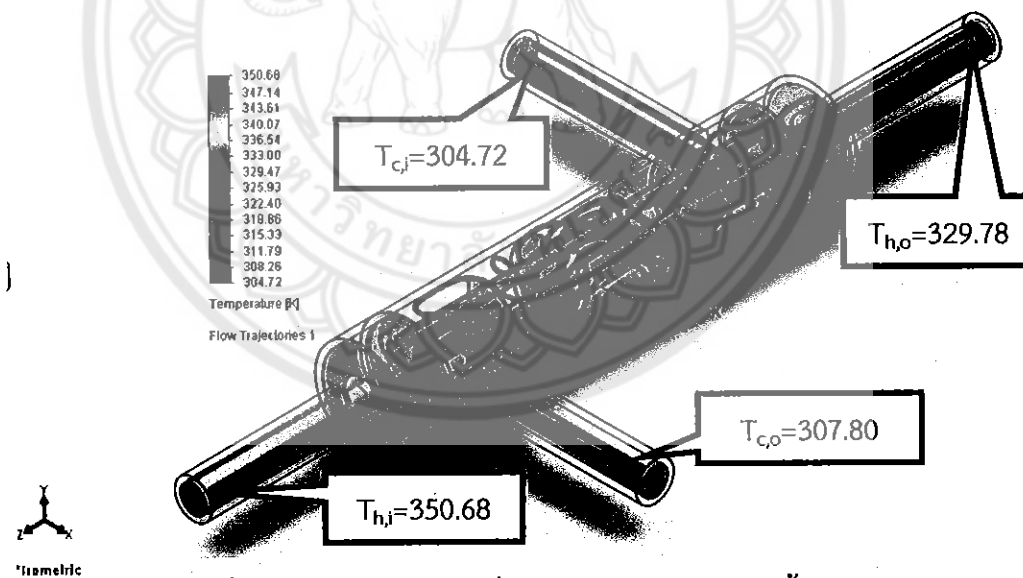


รูปที่ ก.27 แสดงทิศทางการไหลที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น 30%

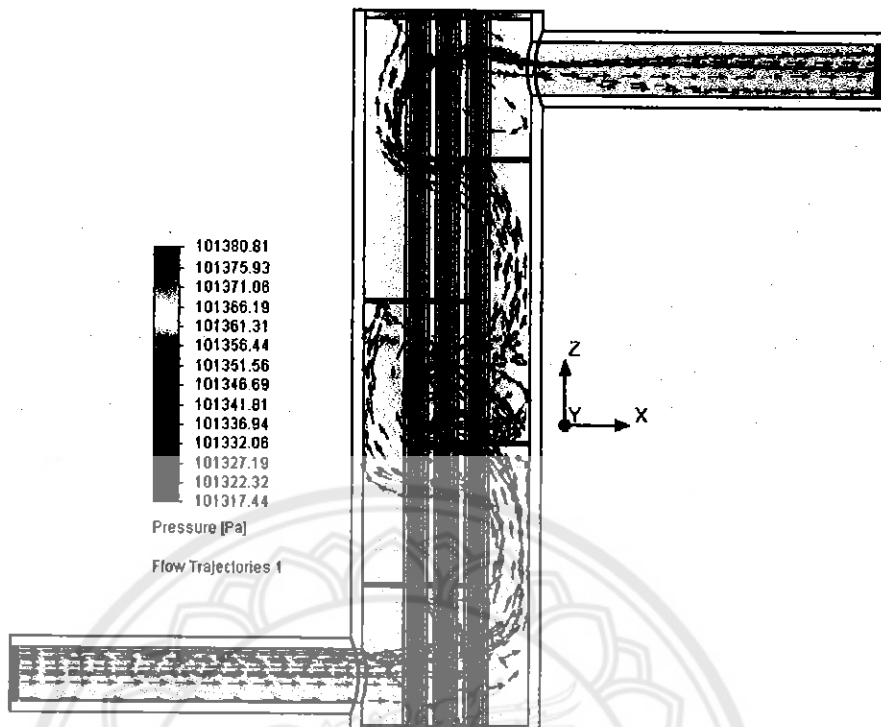
ค่าอุณหภูมิ, ค่าความดันและทิศทางการไหลที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 35%



รูปที่ ก.28 แสดงค่าความดันที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 35%

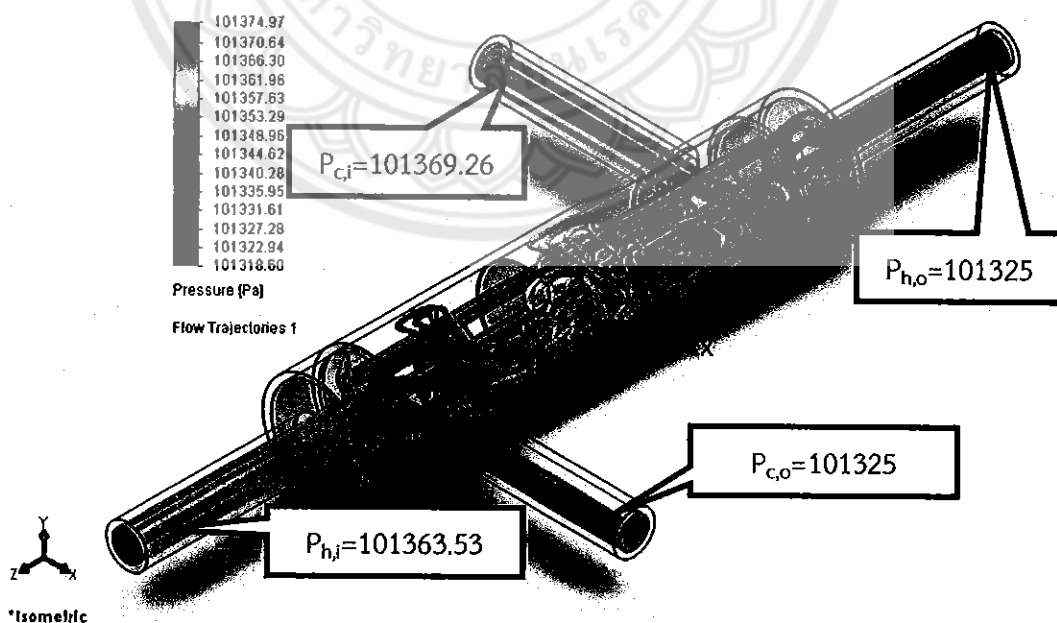


รูปที่ ก.29 แสดงค่าอุณหภูมิที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 35%

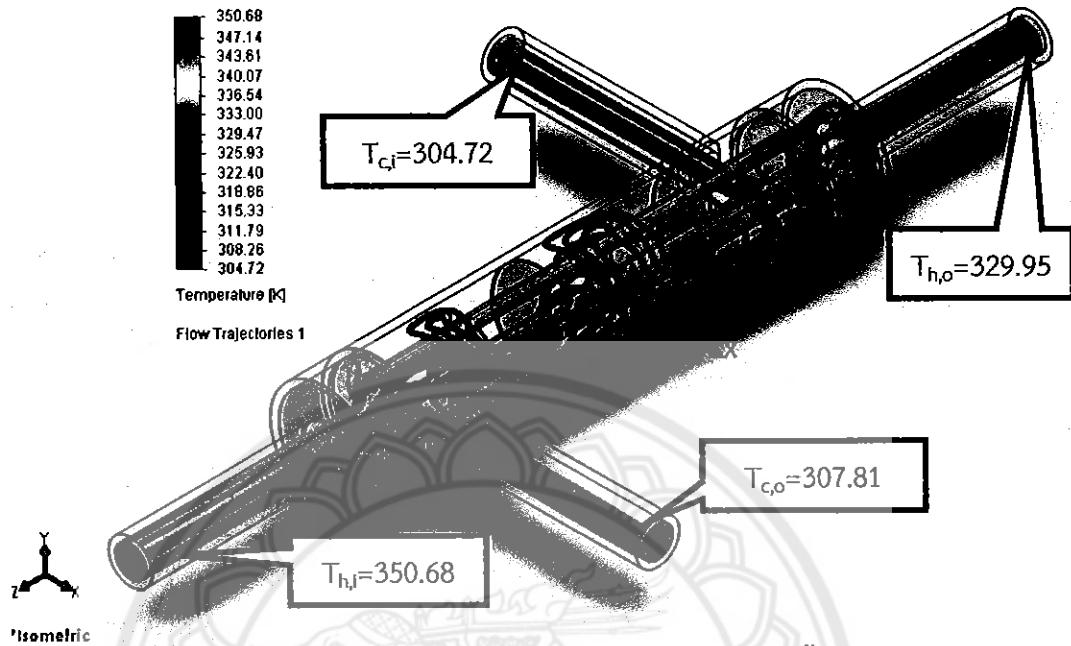


รูปที่ ก.30 แสดงทิศทางการไหลที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 35%

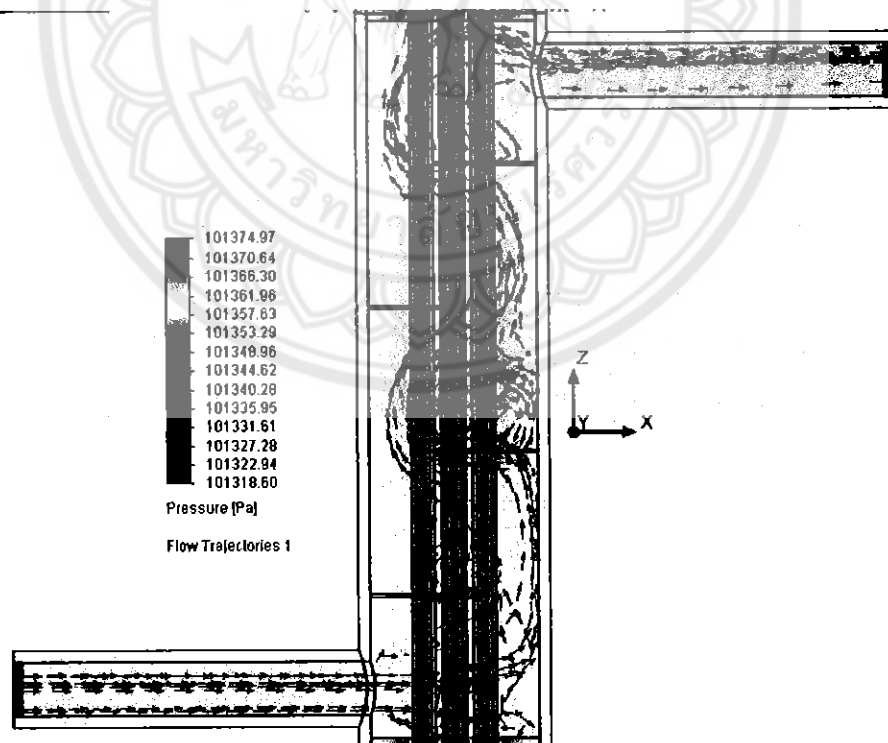
ค่าอุณหภูมิ, ค่าความดันและทิศทางการไหลที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 40%



รูปที่ ก.31 แสดงค่าความดันที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 40%

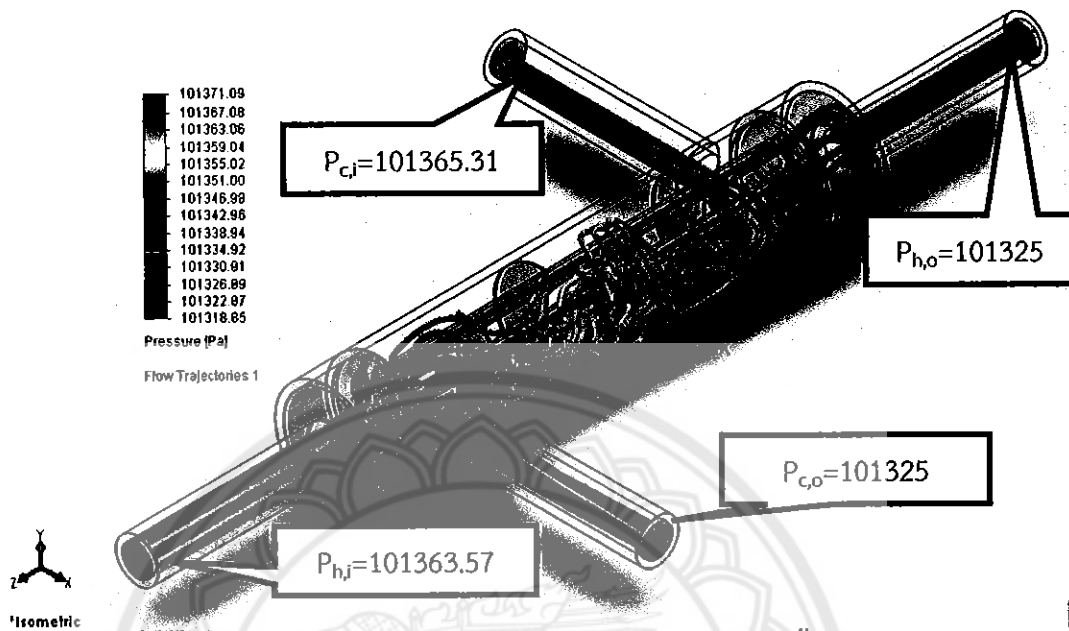


รูปที่ ก.32 แสดงค่าอุณหภูมิที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น 40%

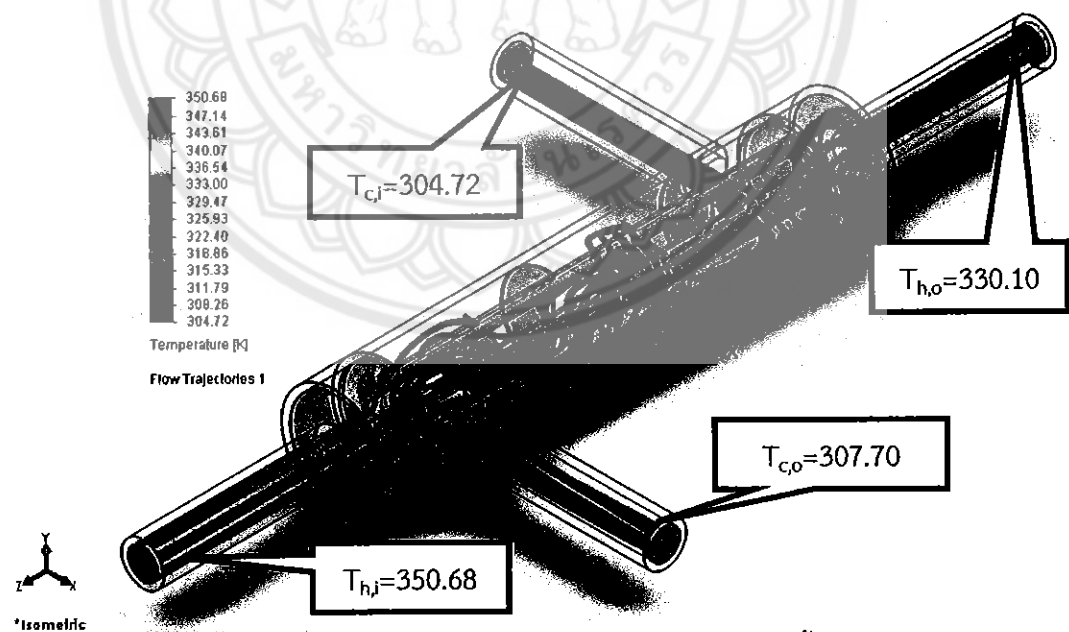


รูปที่ ก.33 แสดงทิศทางการไหลที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น 40%

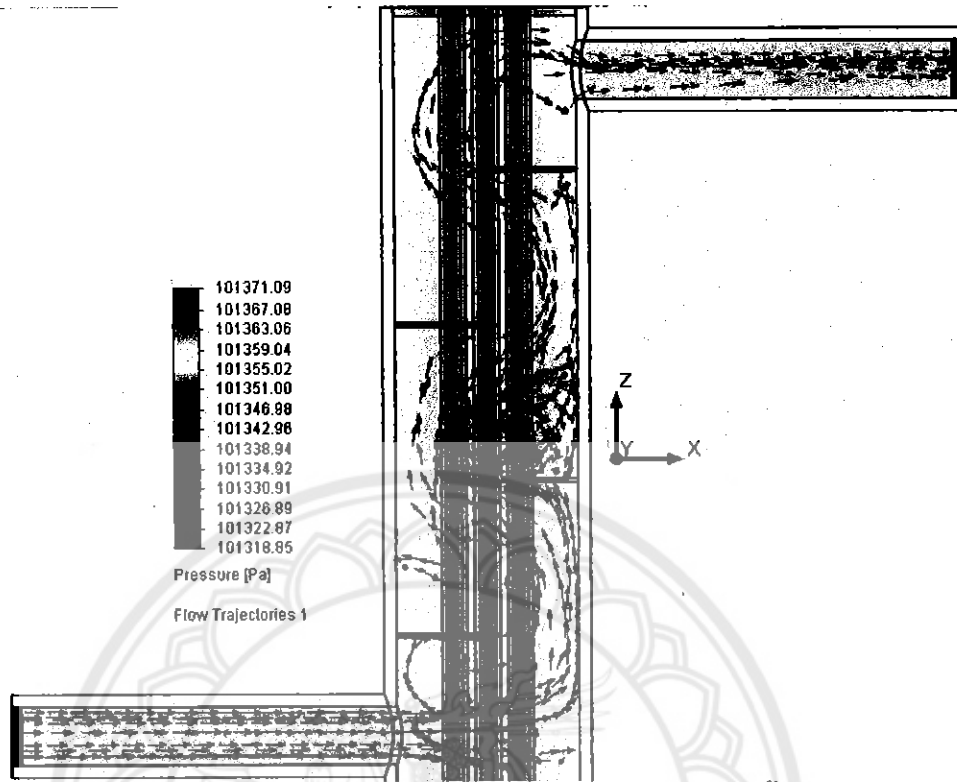
ค่าอุณหภูมิ, ค่าความดันและทิศทางการไหลที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 45%



รูปที่ ก.34 แสดงค่าความดันที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 45%



รูปที่ ก.35 แสดงค่าอุณหภูมิที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกัน 45%



รูปที่ ก.36 แสดงทิศทางการไหลที่เปอร์เซ็นต์การตัดของแผ่นกั้น 45%



ภาคผนวก ข

วิธีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

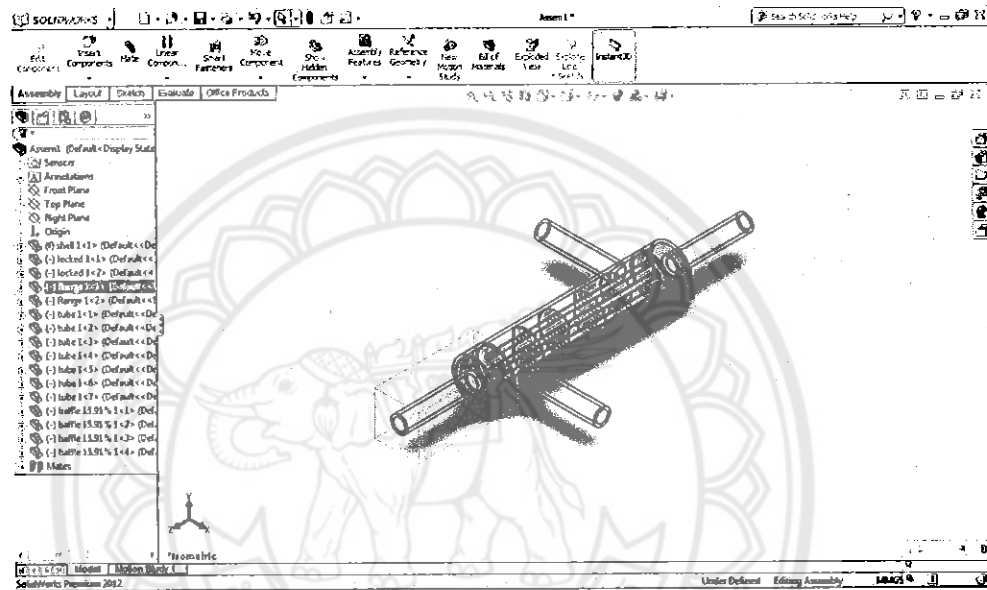




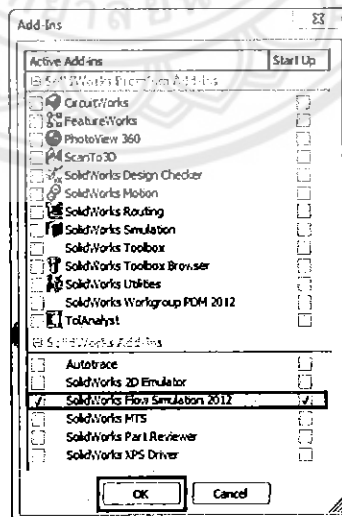
## วิธีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

### 1. การ Add Solid works flow simulation

#### 1.1 เปิดแบบจำลองขึ้นมา

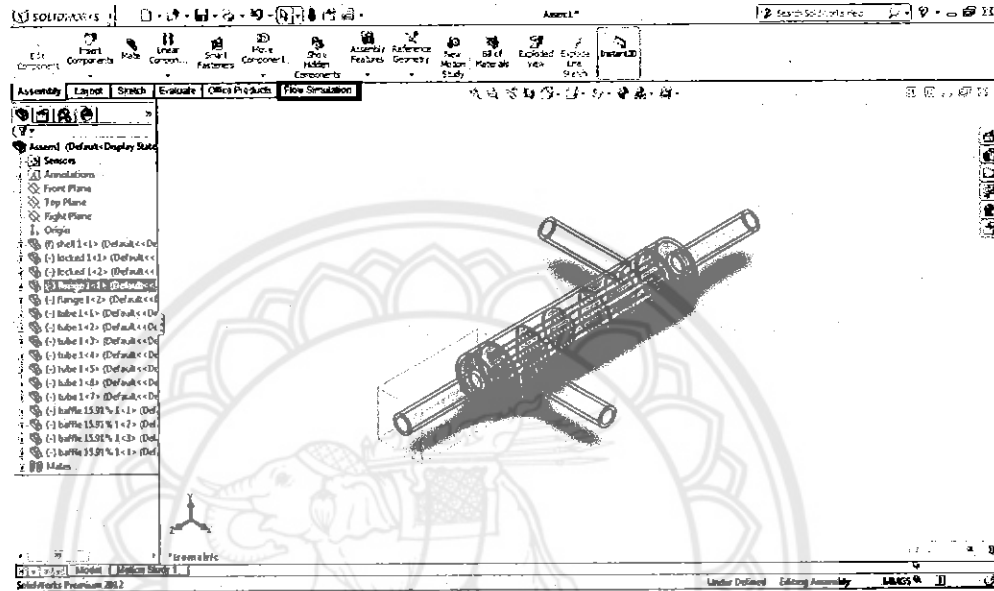


#### 1.2 คลิกที่เมนูบาร์ลูกศรทางด้านขวา หลังจากนั้นคลิก Add-Ins...



1.3 หลังจากนั้นจะมีเมนู Add-Ins ขึ้นแล้วให้คลิกถูกที่ Solidworks Flow Simulation 2012  
 ดังรูปด้านล่าง หลังจากนั้นก็คลิก OK

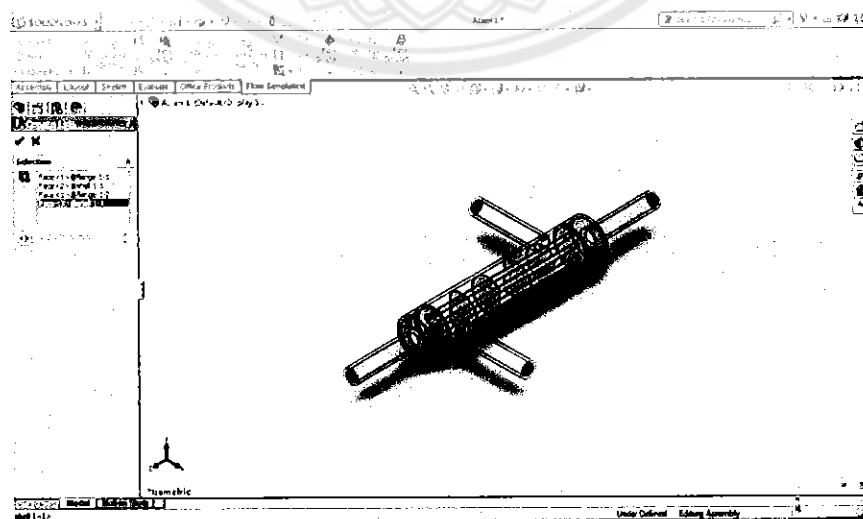
1.4 หลังจากนั้นจะมีแถบเครื่องมือ Flow Simulation ปรากฏขึ้นดังรูปด้านล่าง



## 2. การสร้าง Lids ที่ทางเข้าและทางออกของของไหล

2.1 คลิก create lids  เพื่อสร้าง lids เพื่อใช้ปิดทางเข้าและออกของของไหล

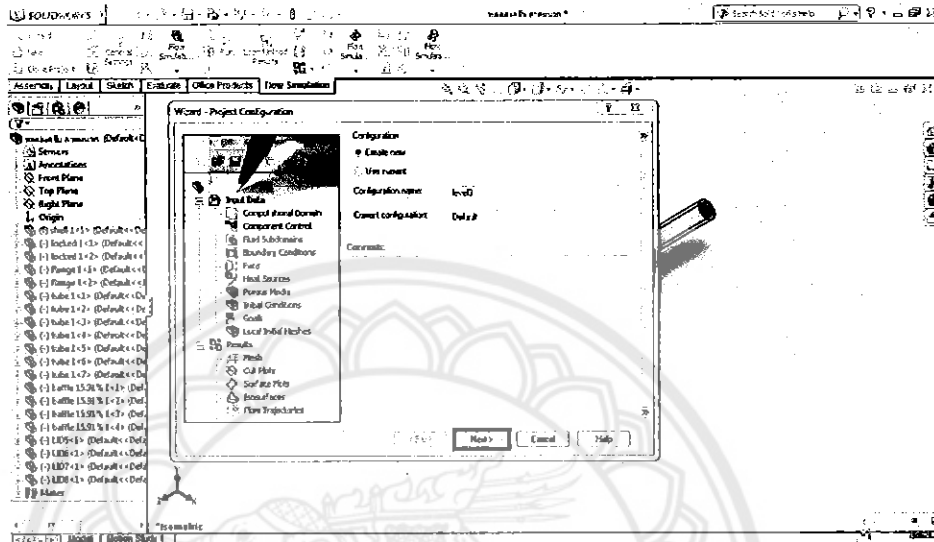
2.2 คลิกที่หน้าต่างของทางเข้าและทางออกทั้งหมดหลังจากนั้นให้คลิก 



### 3. การใส่คุณสมบัติต่างๆในแบบจำลอง

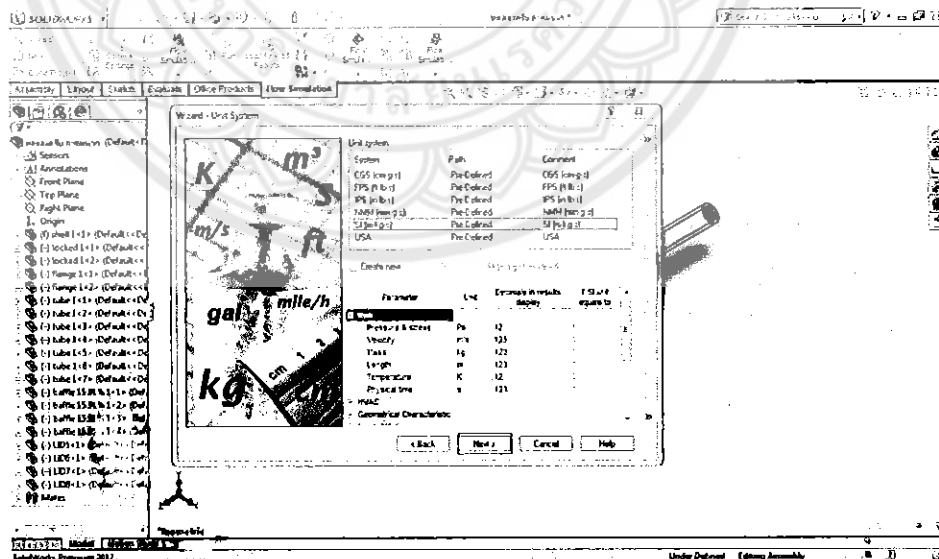
3.1 คลิก ( Wizard ) ซึ่งอยู่ในแถบเครื่องมือ Flow Simulation

3.2 จะมีหน้าต่างให้ใส่คุณสมบัติต่างๆของแบบจำลองขึ้นมา



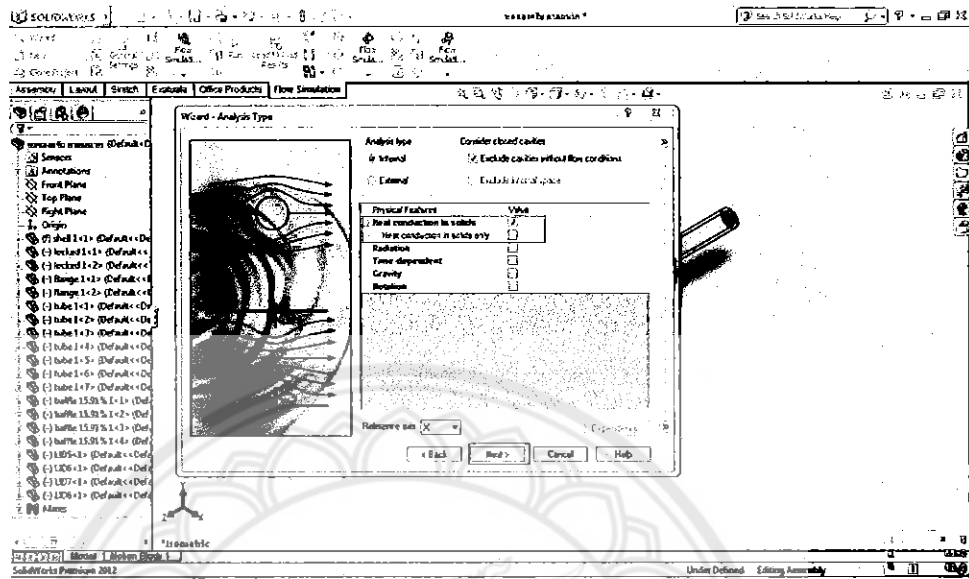
3.3 คลิกที่ Next

3.4 ขั้นตอนต่อไปเป็นการกำหนดหน่วยที่ใช้ ในที่นี้เลือกใช้หน่วย SI คลิก SI หลังจากนั้นคลิก Next ดังรูป



3.5 คลิกเครื่องหมายถูกที่ด้านขวาของ Heat conduction in solids หลังจากนั้นก็คลิก

Next

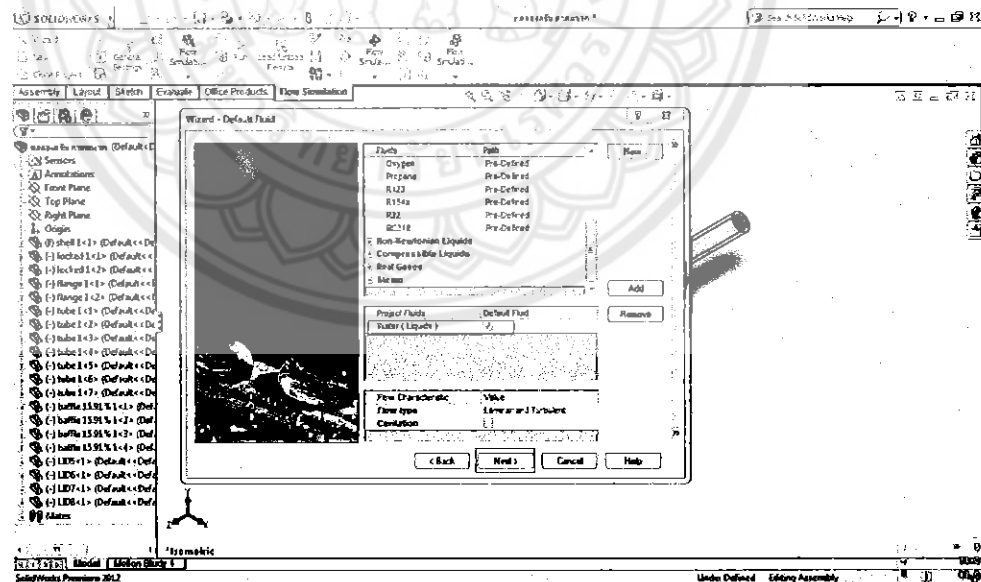


3.6 กำหนดวัสดุที่เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งในการศึกษานี้จะเป็นน้ำ

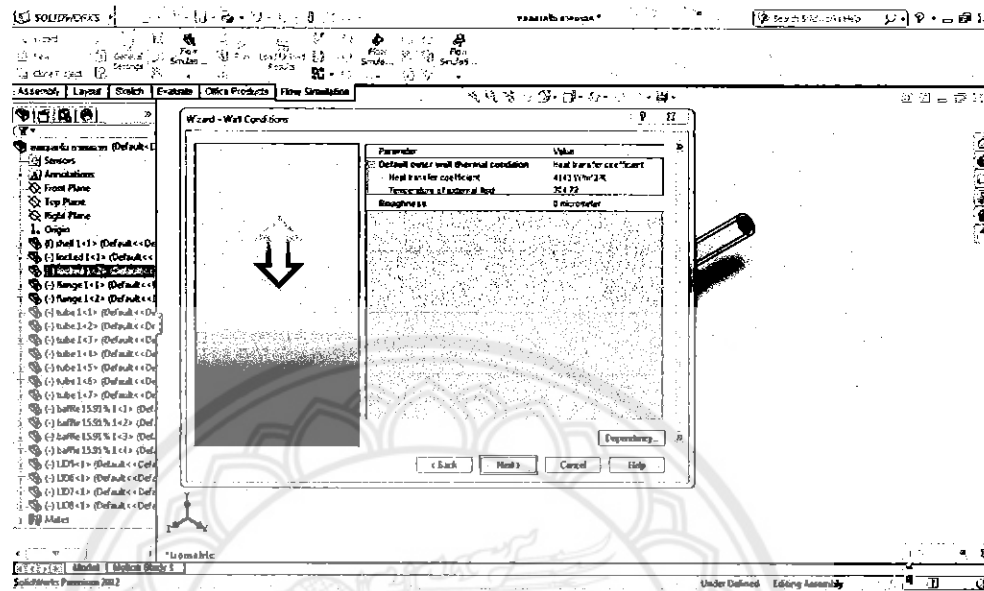
3.6.1 คลิกเครื่องหมาย + ด้านหน้า Liquid แล้ว คลิก Water หลังจากนั้นคลิก

Add

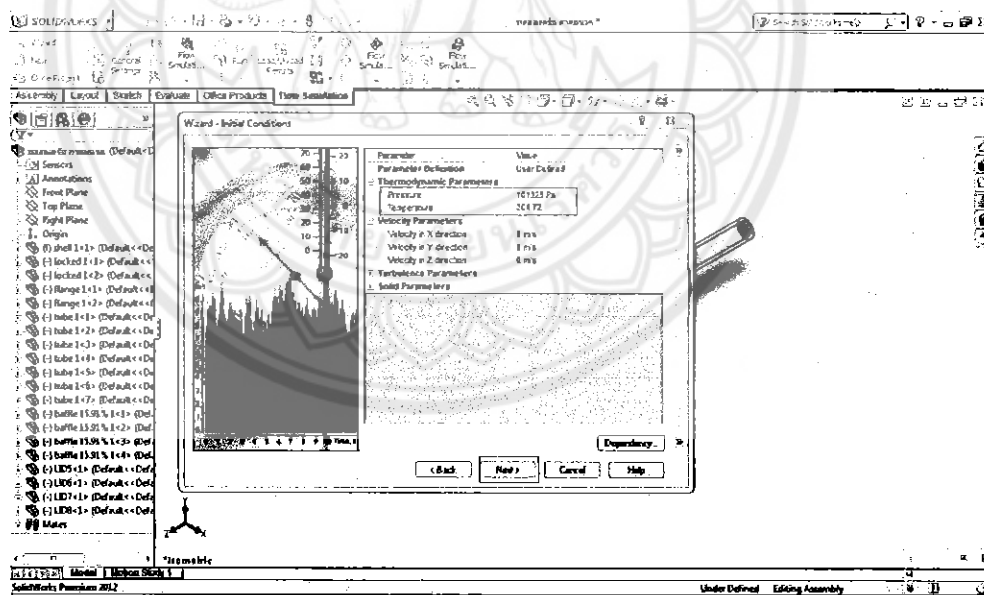
และคลิก Next



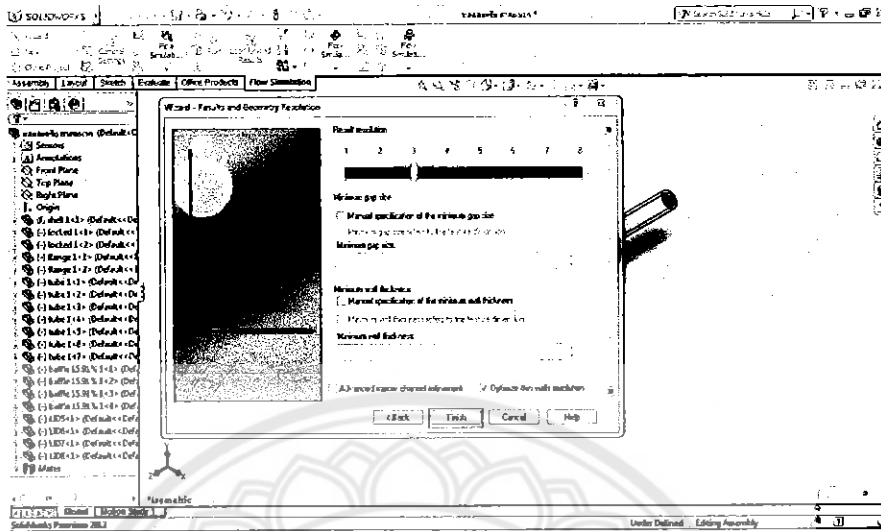
3.7 กำหนดค่า heat transfer coefficient เท่ากับ  $4143 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  และ temperature of external fluid  $304.72 \text{ K}$  แล้วหลังจากนั้นก็คลิก Next ดังรูปด้านล่าง



3.8 กำหนดค่าความดันสถิตที่ทางออกของน้ำทั้งสองกระแสเท่ากับ 1 atm



### 3.9 คลิก Finish ตั้งรูปด้านล่าง




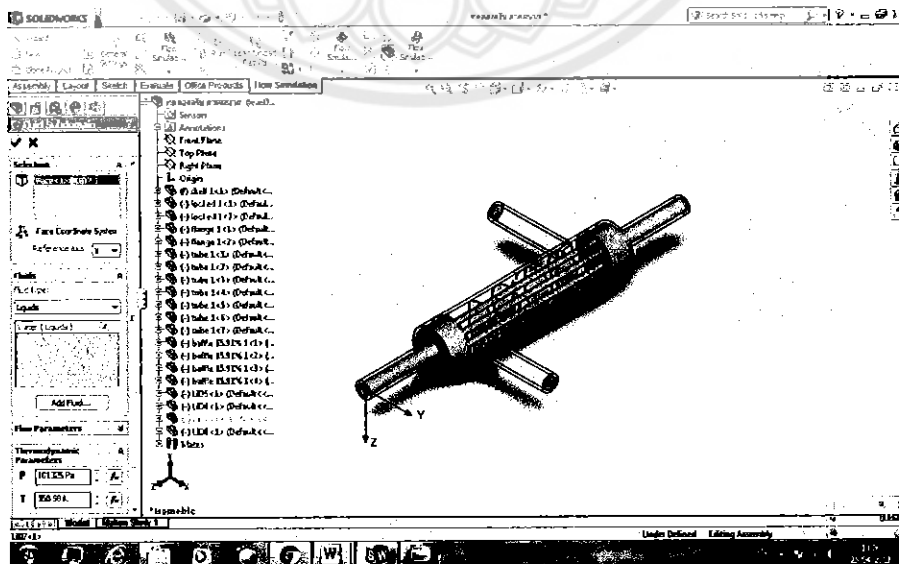
## 4. การใส่ค่าอัตราการไหลและอุณหภูมิของแบบจำลอง


4.1 คลิกขวาที่  Computational Domain หลังจากนั้นคลิกซ้ายที่ Hide ตั้งรูป

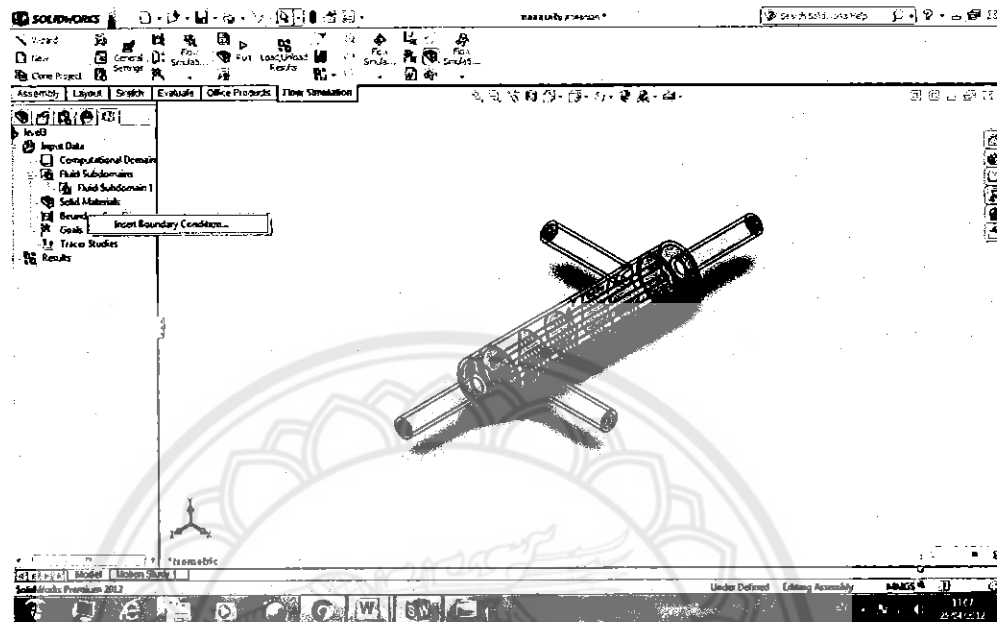
4.2 คลิกขวาที่  Fluid Subdomains หลังจากนั้นคลิกซ้ายที่ Insert Fluid Subdomain

ตั้งรูป

4.3 คลิกด้านในของ Lids ที่น้ำกระแสน้ำเข้าตั้งรูป และกำหนดอุณหภูมิของทางเข้ากระแสน้ำ 350.68 K ตั้งรูป แล้วหลังจากนั้นคลิก 



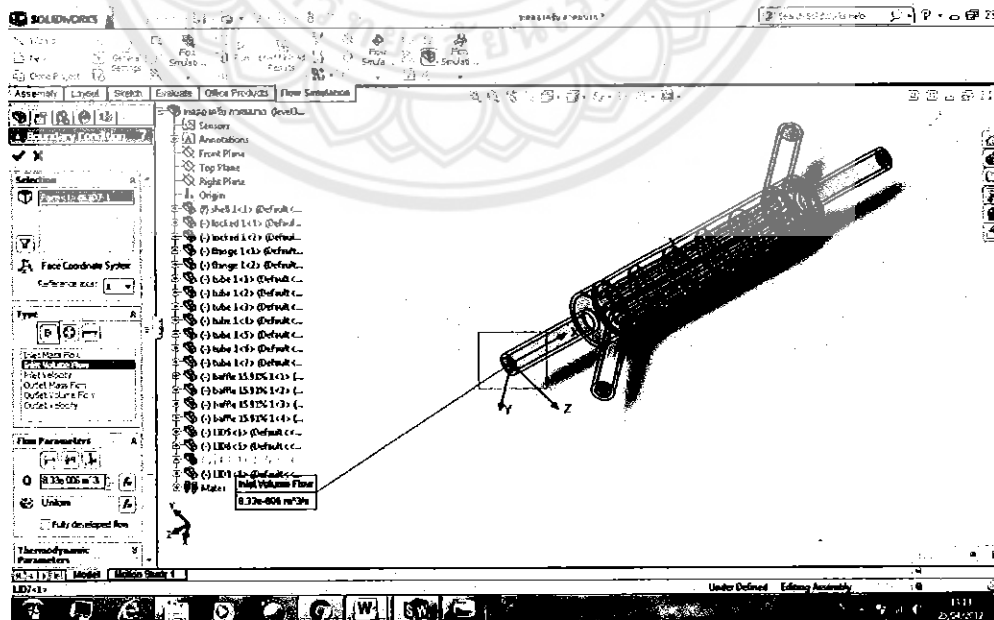
4.4 คลิกขวาที่  Boundary Conditions หลังจากนั้นก็คลิกซ้ายที่ Insert Boundary Conditions ดังรูป




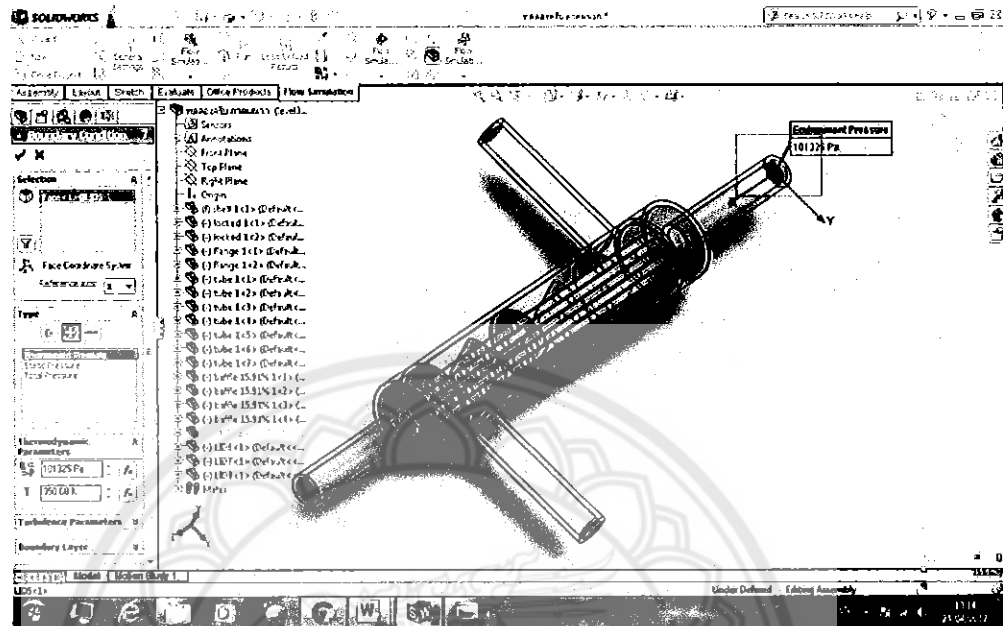
4.5 คลิกที่  หลังจากนั้นคลิก Inlet Volume Flow

4.5.1 ใส่อัตราการไหลของน้ำร้อนทางเข้าเท่ากับ  $8.33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

4.5.2 ใส่อุณหภูมิของน้ำร้อนทางเข้าเท่ากับ 350.68 K หลังจากนั้นคลิก 



4.6 คลิกที่ด้านใน Lids ของทางออกน้ำร้อน คลิกที่  หลังจากนั้นคลิก Environment Pressure กำหนดความดันเท่ากับ 1 atm

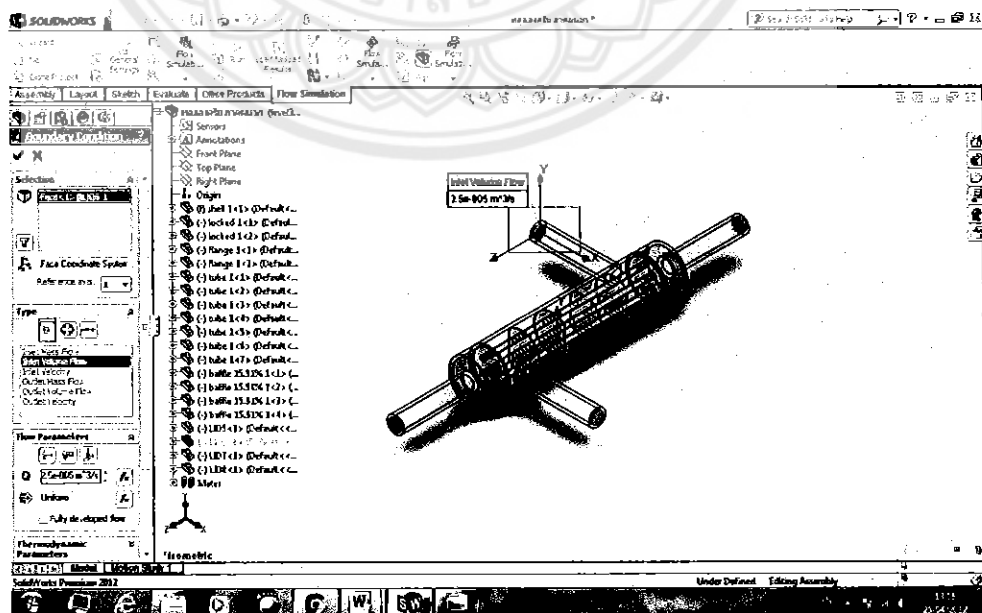


4.7 คลิกขวาที่  Boundary Conditions หลังจากนั้นก็คลิกที่ Insert Boundary Conditions


4.7.1 คลิกที่  หลังจากนั้นคลิก Inlet Volume Flow

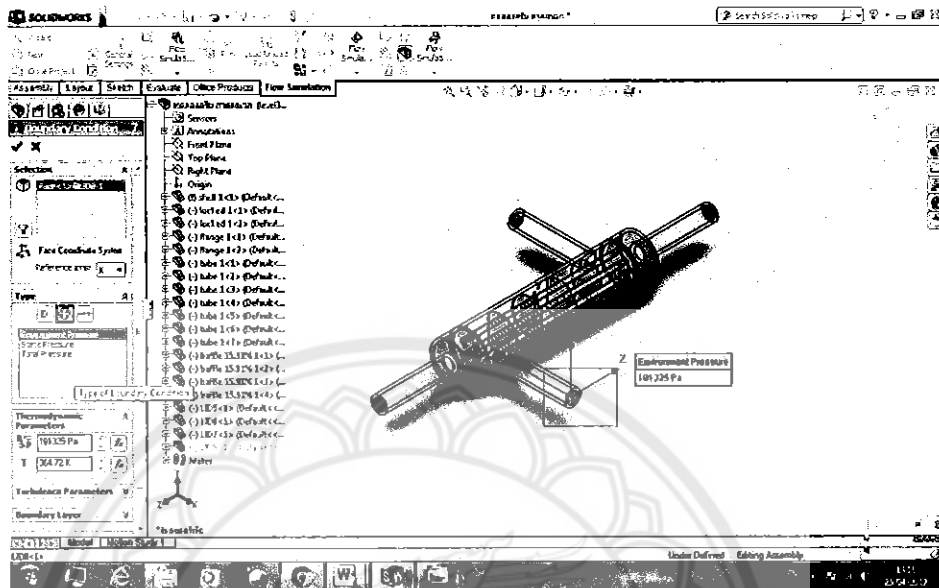
4.7.2 ใส่อัตราการไหลของน้ำร้อนทางเข้าเท่ากับ  $2.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$

4.7.3 ใส่อุณหภูมิของน้ำเย็นขาเข้าเท่ากับ 304.72 K หลังจากนั้นคลิก 






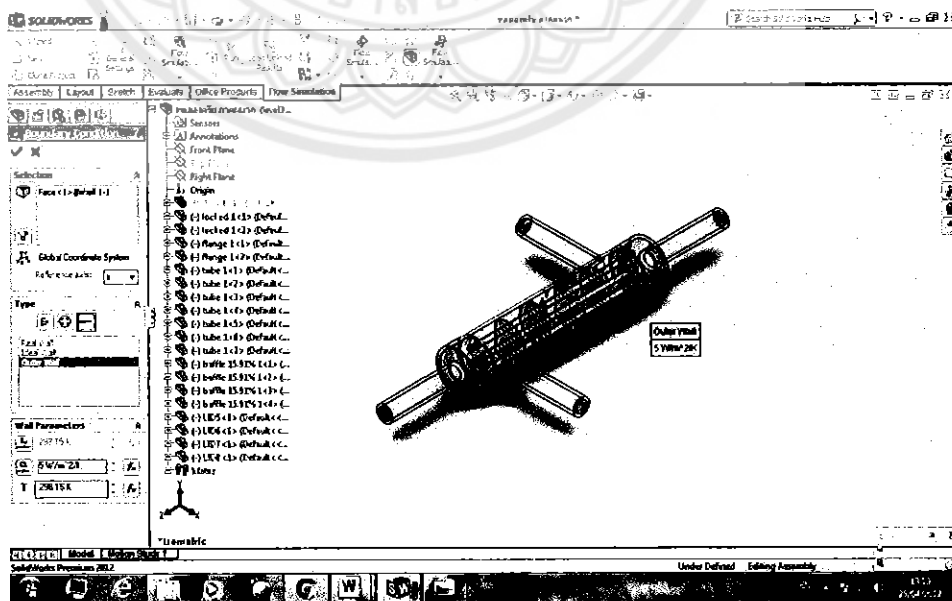
4.8 คลิกที่ด้านใน Lids ของทางออกน้ำเย็น คลิกที่  หลังจากนั้นคลิก Environment Pressure กำหนดความดันเท่ากับ 1 atm




4.9 คลิกขวาที่  Boundary Conditions หลังจากนั้นก็คลิกซ้ายที่ Insert Boundary Conditions

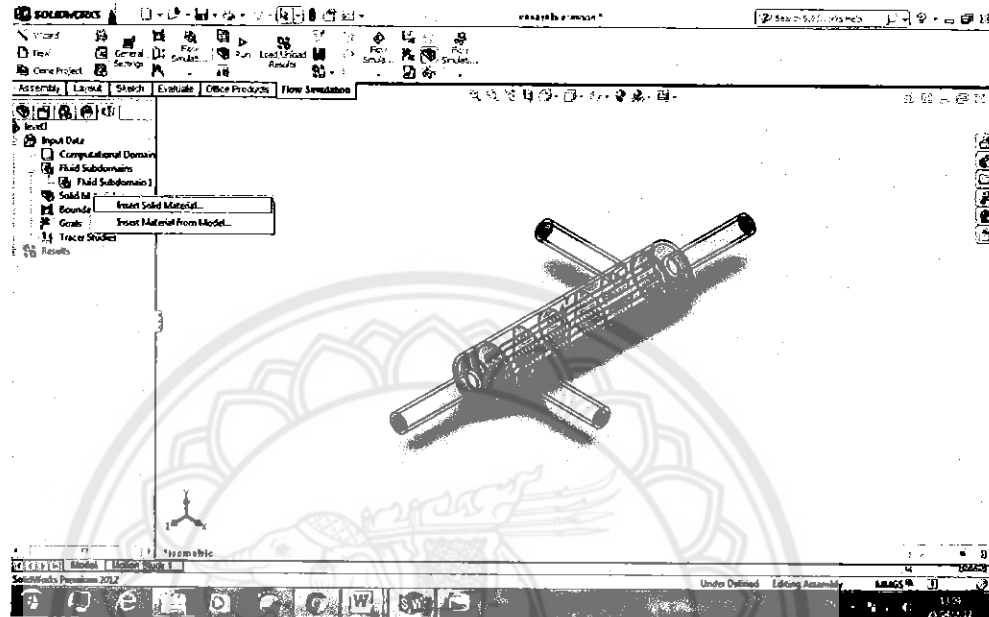
4.9.1 คลิกที่ผิวของ Shell

4.9.2 คลิกที่  แล้วใส่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกของเปลือกเท่ากับ  $5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  และ อุณหภูมิเท่ากับ 298.15 K หลังจากนั้นคลิก 

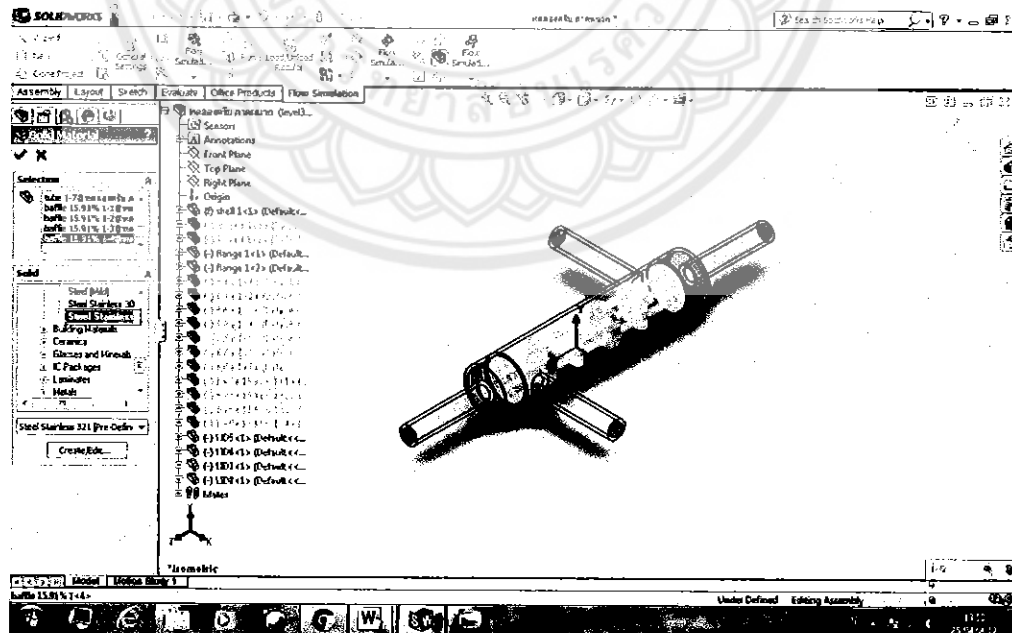


## 5. การใส่ค่าวัสดุให้แก่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ


5.1 คลิกขวาที่  Solid Materials หลังจากนั้นคลิกซ้ายที่ Insert Solid material



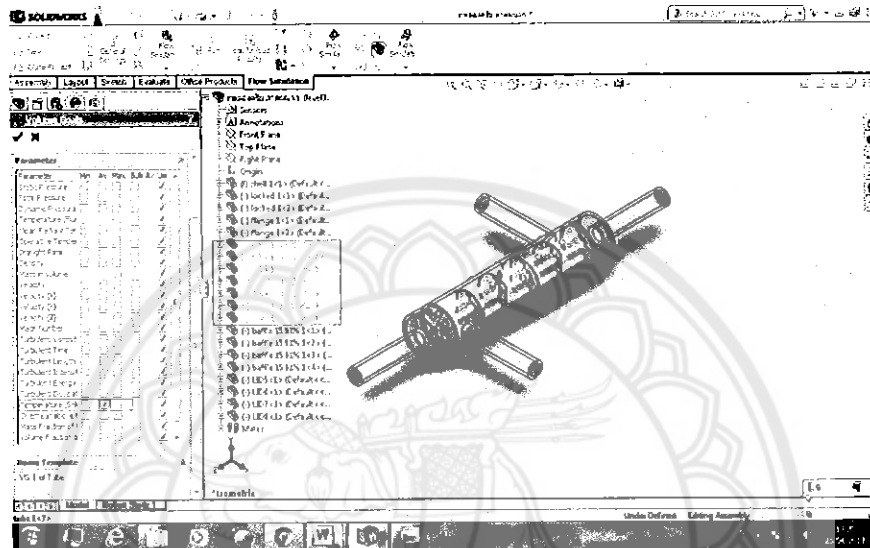
5.2 เลือกท่อ, แผ่นกั้นและ Tube sheet เป็นวัสดุ steel stainless 321 ดังรูป



## 6. การเลือกให้โปรแกรมวิเคราะห์ผล

6.1 คลิกขวาที่  Goals หลังจากนั้นคลิกที่ Insert Volume Goals

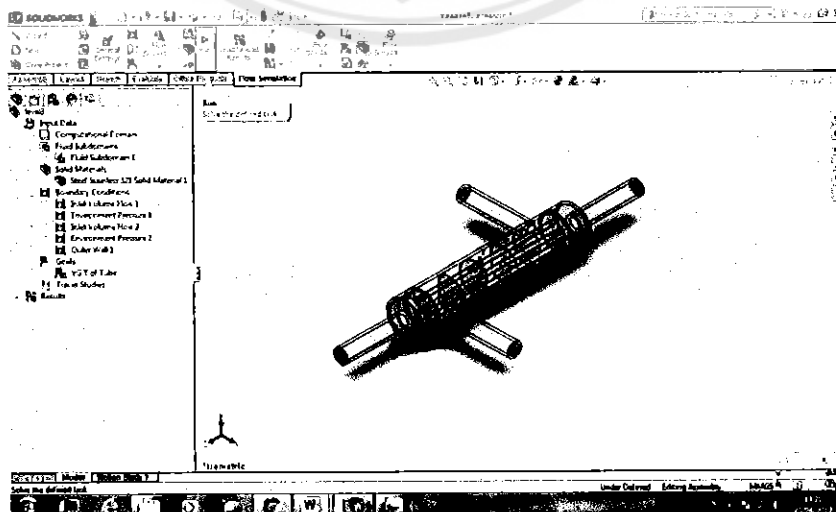
6.2 คลิกที่ Tube 1-7 และคลิกเครื่องหมายถูกที่ temperature of solid เลือกที่ช่อง Average ดังรูป



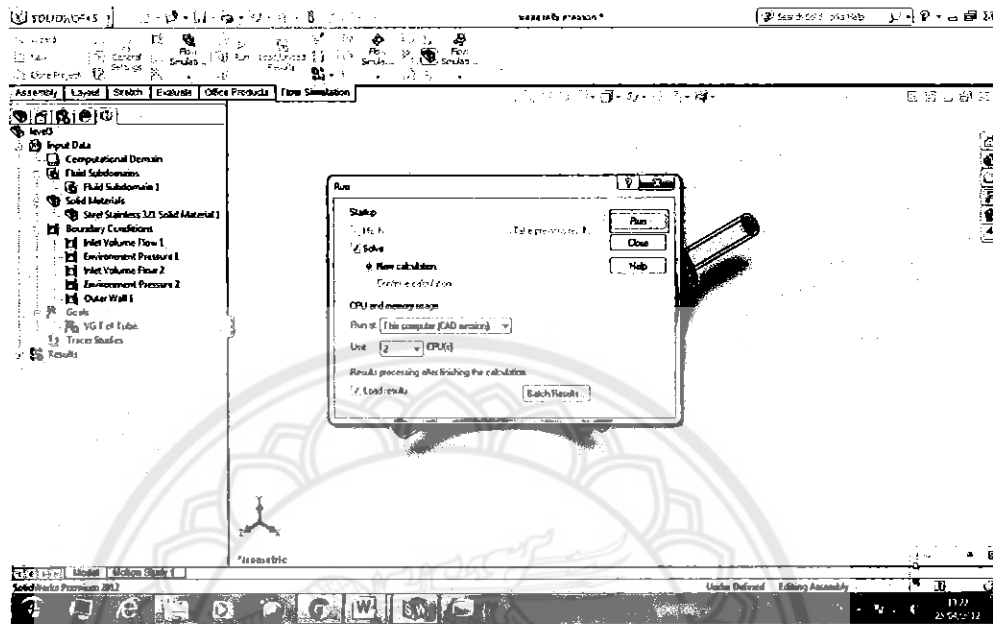
6.3 หลังจากนั้นก็คลิก 

## 7. การ Run Model

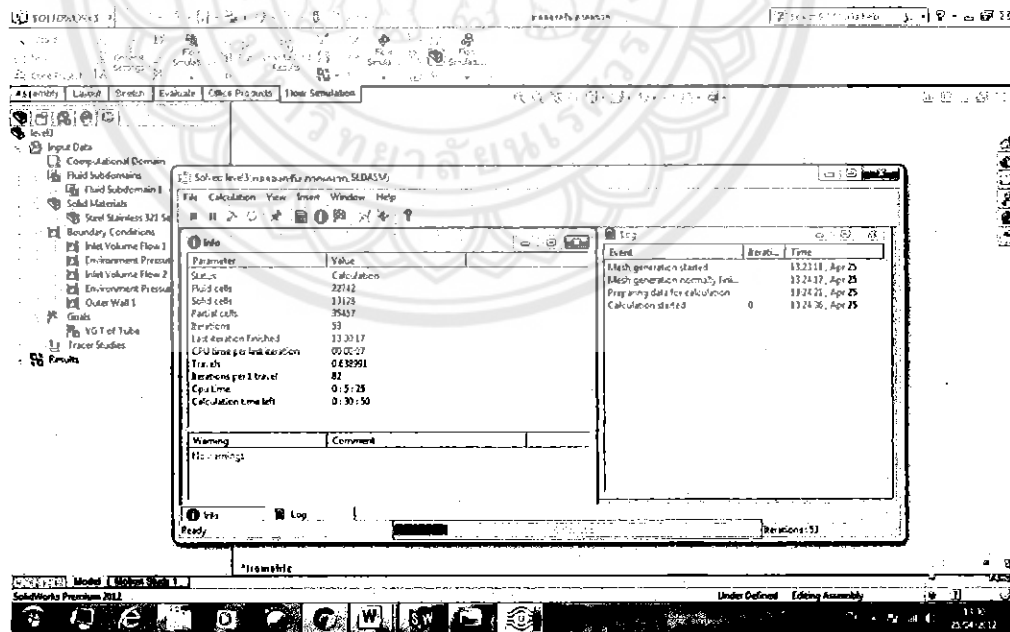
7.1 คลิกที่ 



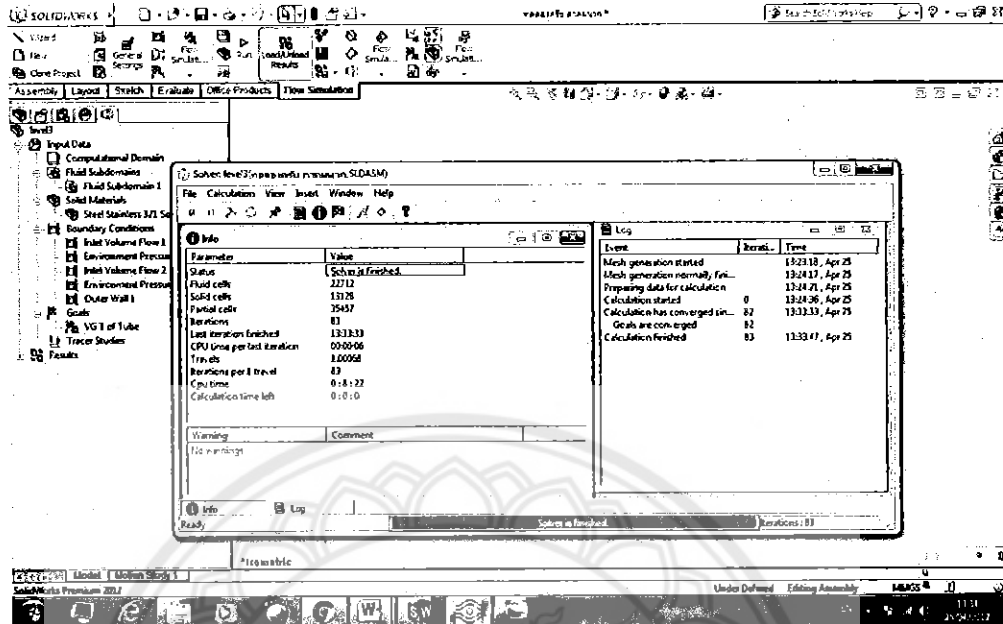
### 7.2 คลิกที่ Run



### 7.3 รอมผลการรันโปรแกรม



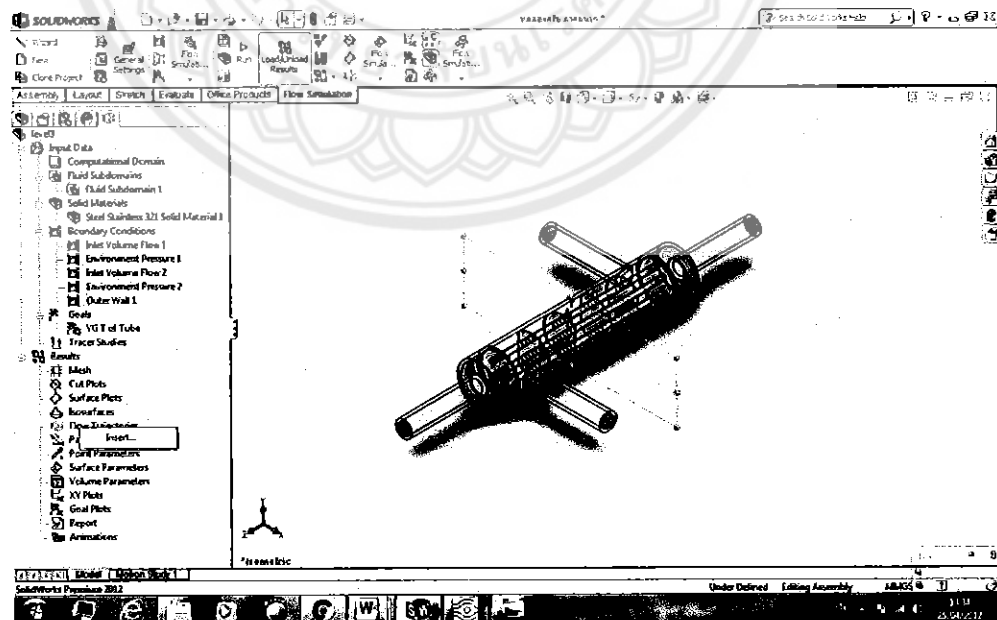
## 7.4 การรันโปรแกรมเสร็จสิ้น จะมีข้อความบอกว่า Solve Finished



## 6. การแสดงผลที่ได้จากวิเคราะห์ที่ไฟไนต์เอลิเมนต์

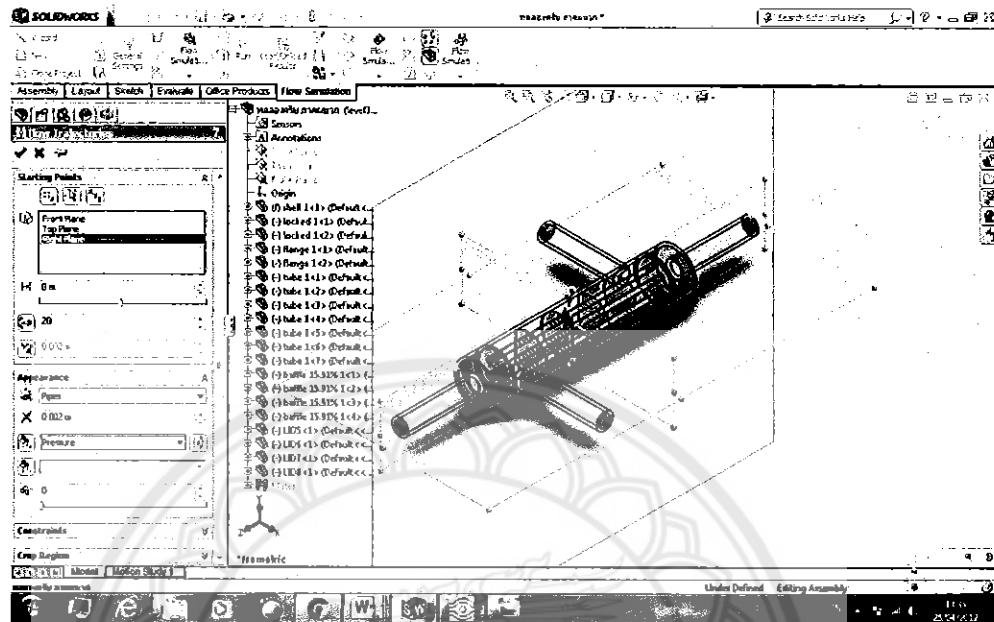
6.1 การแสดงผลการวิเคราะห์แบบ Flow Trajectories คลิกขวาที่  Flow Trajectories

6.2 คลิกที่ Insert ดังรูป



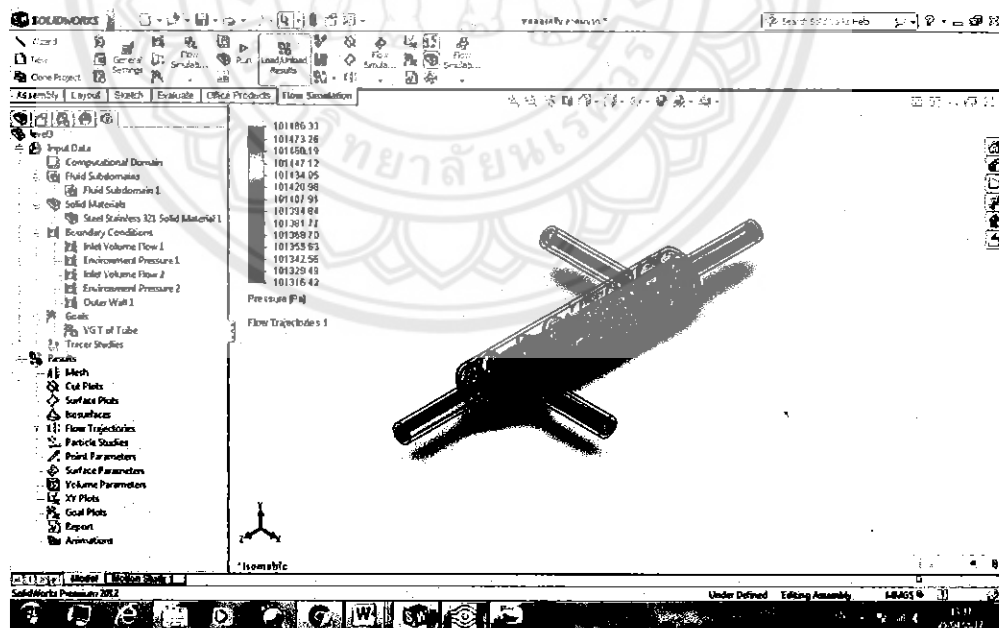
### 6.3 คลิกเลือก Top Plane, Front Plane, Right Plane แล้วหลังจากนั้นคลิกที่ Pressure

ดังรูป

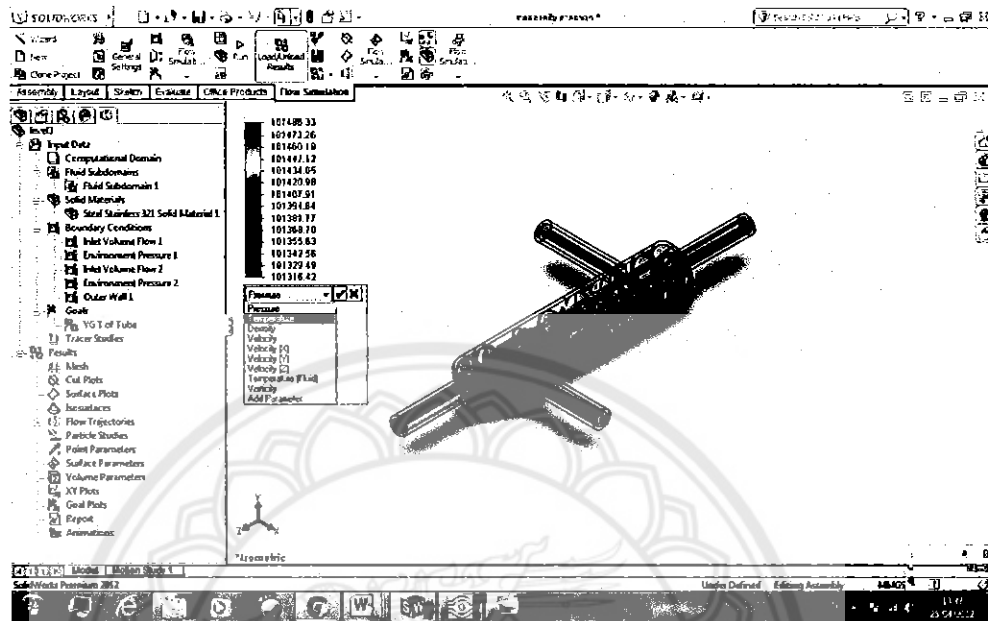


### 6.4 คลิก ✓

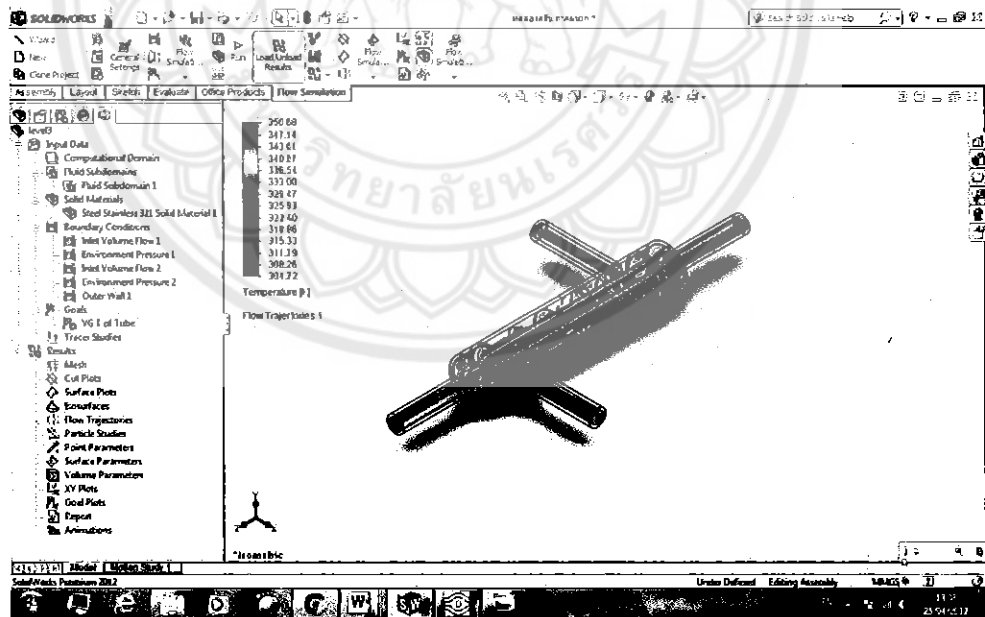
### 6.5 ผลการ Run



6.6 แสดงรูปในอุณหภูมิกคลิก Pressure แล้วคลิกเปลี่ยนเป็นอุณหภูมิกแล้วคลิก



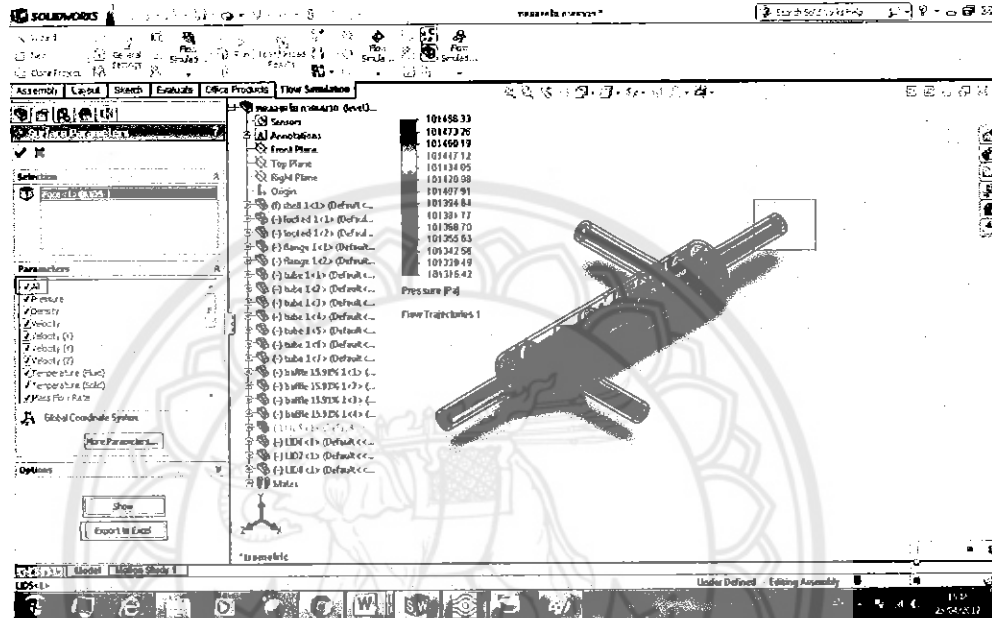
6.7 ผลการ Run



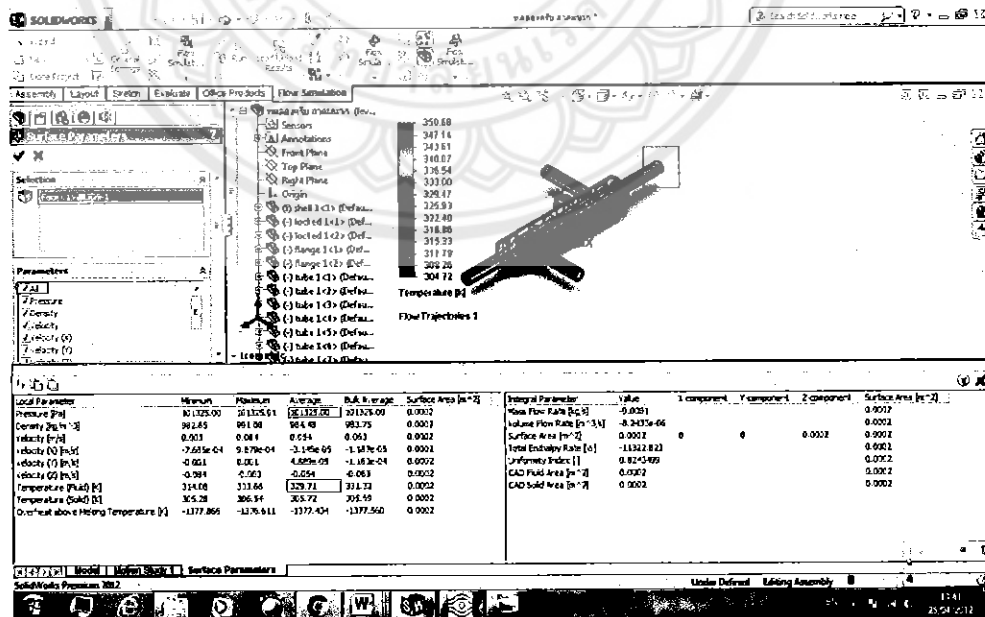
## 7. ผลการวิเคราะห์ของโปรแกรม

7.1 คลิกขวาที่  Surface Parameters จากนั้นคลิกซ้ายที่ Insert

7.2 คลิกเลือกที่ละด้านใน Lids ที่ทางเข้าของกระแสน้ำทั้งสองกระแสน้ำ แล้วเลือก All แล้วคลิก Show หรือคลิก Export to Excel ก็ได้จะแสดงผลเป็นตาราง Excel ดังรูป



### 7.3 คลิก Show ผลการแสดงผล





## 7.4 คลิก Export to Excel แสดงผล

Surface Parameters1 (Compatibility Mode) - Microsoft Excel

Surface Parameters 1[level3]

Face1=GLCS-1

Check Coordinate System

Iteration 1)

Local parameters						Integral parameters					
Parameter	Minimum	Maximum	Average	Sub-Average	Surface Area [m <sup>2</sup> ]	Parameter	Value	K-component	V-component	L-component	Surface Area [m <sup>2</sup> ]
Mass [kg]	1E+12	1.012E+11	3.122E+07	1.11E+07	0.00211981	Mass [kg]	-4.80E+09				0.00211981
Center of Mass [m]	562.847977	991.872151	664.481864	663.751264	0.00211981	Volume Fr. Rate [m <sup>3</sup> /s]	-2.2429E-02				0.00211981
Velocity [m/s]	0.002967211	0.002772276	0.074296754	0.063379812	0.00211981	Surface Area [m <sup>2</sup> ]	0.00211981	0	0	0.00211981	0.00211981
Velocity [m/s]	-0.000768123	0.000673663	-3.1449E-05	1.18170E-05	0.00211981	Time Entropy Rate [W]	-1.12E+03				0.00211981
Velocity [m/s]	-0.002145214	0.001537121	4.4612E-05	-2.00211E-05	0.00211981	Convexity Index [1]	0.01242928				0.00211981
Velocity [m/s]	-0.002766285	-0.002692523	-3.27E-05	-2.56337E-05	0.00211981	CAD Face Area [m <sup>2</sup> ]	0.00211981				0.00211981
Temperature [K]	314.678241	313.061926	326.720952	311.322173	0.00211981	CAD Solid Area [m <sup>2</sup> ]	0.00211981				0.00211981
Temperature [K]	309.264767	306.030644	309.946553	306.390409	0.00211981						
Density of Air at Std. Conditions [kg/m <sup>3</sup> ]	-1377.86203	-1378.61126	-1377.43331	-1377.55919	0.00211981						

Ready

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ค่าความดันลด  
และค่าประสิทธิผล ที่เปอร์เซ็นต์การตัด 15%



## ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

จากตารางที่ 4.8 แสดงผลสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คำนวณได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเท่ากับ  $365.68 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  มีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

1. คำนวณหาปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำทั้งสองกระแสจาก

$$Q = \dot{m} c_p \Delta T$$

เมื่อ  $Q$  คือ ปริมาณความร้อน

$\dot{m}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวล โดย  $\dot{m} = \rho Q$  เมื่อ  $Q$  คือ อัตราการไหล,  $\rho$  คือความ

หนาแน่นของน้ำ และเปิด  $\rho$  จากตารางคุณสมบัติของน้ำ ใช้ที่อุณหภูมิเฉลี่ย

$c_p$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะ เปิดจากตารางคุณสมบัติของน้ำ ใช้ที่อุณหภูมิเฉลี่ย

$\Delta T$  คือ ผลต่างของอุณหภูมิน้ำกระแสเย็น ดูจากรูปที่ ก.17 ภาคผนวก ก

จะได้ว่า  $\dot{m} = 0.248 \text{ kg/s}$

$$c_p = 4178 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

$$\Delta T = 2.93 \text{ K}$$

ดังนั้น  $Q = 0.248 \times 4178 \times 2.93 = 303.926 \text{ J}$

2. คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจาก

$$Q = UA \Delta T_{lm}$$

เมื่อ  $Q$  คือ ปริมาณความร้อน

$U$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

$A$  คือ พื้นที่ผิวภายนอกท่อทั้งหมด

$\Delta T_{lm}$  คือ ผลต่างของอุณหภูมิเชิงล็อก เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดการแลกเปลี่ยนความร้อน

หาจาก

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})}{\ln\left(\frac{T_{h,i} - T_{c,o}}{T_{h,o} - T_{c,i}}\right)}$$

เมื่อ  $T_{h,i}$  คือ อุณหภูมิน้ำร้อนทางเข้า

$T_{h,o}$  คือ อุณหภูมิน้ำร้อนทางออก

$T_{c,i}$  คือ อุณหภูมิน้ำเย็นทางเข้า

$T_{c,o}$  คือ อุณหภูมิน้ำเย็นทางออก

ค่าของอุณหภูมิดูจากรูปที่ ก.17 ภาคผนวก ก

จะได้ว่า  $Q = 303.926 \text{ J}$   
 $A = 0.02507 \text{ m}^2$   
 $\Delta T_{lm} = 33.152 \text{ K}$   
 ดังนั้น  $U = 303.926 / (0.02507 \times 33.152) = 365.68 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

### ตัวอย่างการคำนวณค่าความดันตก

จากตารางที่ 4.9 แสดงผลความดันตกจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คำนวณได้ค่าความดันตกเท่ากับ 176.27 Pa มีขั้นตอนการคำนวณดังนี้ จาก

$$\Delta P = P_{in} - P_{out}$$

เมื่อ  $\Delta P$  คือ ค่าความดันตก  
 $P_{in}$  คือ ค่าความดันดันท่ำร้อนทางเข้า  
 $P_{out}$  คือ ค่าความดันดันท่ำร้อนทางออก

ค่าความดันที่ทางเข้าและทางออกดูจากรูปที่ ก.16 ภาคผนวก ก

จะได้ว่า  $P_{in} = 101481.02 \text{ Pa}$   
 $P_{out} = 101325 \text{ Pa}$   
 ดังนั้น  $\Delta P = 101501.27 - 101325 = 176.27 \text{ Pa}$

### ตัวอย่างการคำนวณค่าประสิทธิผล

จากตารางที่ 4.10 แสดงผลของประสิทธิผลจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คำนวณได้ค่าประสิทธิผลเท่ากับ 45.80% มีขั้นตอนการคำนวณดังนี้ จาก

$$\varepsilon = \frac{T_{hot,in} - T_{hot,out}}{T_{hot,in} - T_{cold,in}} \times 100\%$$

เมื่อ  $\varepsilon$  คือ ค่าประสิทธิผล

$T_{hot,in}$  คือ อุณหภูมิน้ำร้อนทางเข้า

$T_{hot,out}$  คือ อุณหภูมิน้ำร้อนทางออก

$T_{cold,in}$  คือ อุณหภูมิน้ำเย็นทางเข้า

ค่าของอุณหภูมิทางเข้าและทางออกจากรูปที่ ก.17 ภาคผนวก ก

จะได้ว่า  $T_{hot,in} = 350.68 \text{ K}$

$T_{hot,out} = 329.633 \text{ K}$

$T_{cold,in} = 304.72 \text{ K}$

ดังนั้น  $\varepsilon = ((350.68 - 329.633) / (350.68 - 304.72)) \times 100\% = 45.80\%$

ภาคผนวก ง

ตารางคุณสมบัติของน้ำ



ตารางที่ ข.11 แสดงคุณสมบัติของน้ำ [7]

878  
APPENDIX

TABLE A-9

Properties of saturated water

Temp. T, °C	Saturation Pressure P <sub>sat</sub> , kPa	Density ρ, kg/m <sup>3</sup>		Enthalpy of Vaporization h <sub>fg</sub> , kJ/kg		Specific Heat c <sub>p</sub> , J/kg·K		Thermal Conductivity k, W/m·K		Dynamic Viscosity μ, kg/m·s		Prandtl Number Pr		Volume Expansion Coefficient β, 1/K
		Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2501	4217	1854	0.561	0.0171	1.792 × 10 <sup>-3</sup>	0.922 × 10 <sup>-5</sup>	13.5	1.00	-0.068 × 10 <sup>-3</sup>	
5	0.8721	999.9	0.0068	2490	4205	1857	0.571	0.0173	1.519 × 10 <sup>-3</sup>	0.934 × 10 <sup>-5</sup>	11.2	1.00	0.015 × 10 <sup>-3</sup>	
10	1.2276	999.7	0.0094	2478	4194	1862	0.580	0.0176	1.307 × 10 <sup>-3</sup>	0.946 × 10 <sup>-5</sup>	9.45	1.00	0.733 × 10 <sup>-3</sup>	
15	1.7051	999.1	0.0128	2466	4185	1863	0.589	0.0179	1.138 × 10 <sup>-3</sup>	0.959 × 10 <sup>-5</sup>	8.09	1.00	0.138 × 10 <sup>-3</sup>	
20	2.339	998.0	0.0173	2454	4182	1867	0.598	0.0182	1.002 × 10 <sup>-3</sup>	0.973 × 10 <sup>-5</sup>	7.01	1.00	0.195 × 10 <sup>-3</sup>	
25	3.169	997.0	0.0231	2442	4180	1870	0.607	0.0186	0.891 × 10 <sup>-3</sup>	0.987 × 10 <sup>-5</sup>	6.14	1.00	0.247 × 10 <sup>-3</sup>	
30	4.246	996.0	0.0304	2431	4178	1876	0.615	0.0189	0.798 × 10 <sup>-3</sup>	1.001 × 10 <sup>-5</sup>	5.42	1.00	0.294 × 10 <sup>-3</sup>	
35	5.628	994.0	0.0397	2419	4178	1880	0.623	0.0192	0.720 × 10 <sup>-3</sup>	1.016 × 10 <sup>-5</sup>	4.83	1.00	0.337 × 10 <sup>-3</sup>	
40	7.384	992.1	0.0512	2407	4179	1885	0.631	0.0196	0.653 × 10 <sup>-3</sup>	1.031 × 10 <sup>-5</sup>	4.32	1.00	0.377 × 10 <sup>-3</sup>	
45	9.593	990.1	0.0655	2395	4180	1892	0.637	0.0200	0.596 × 10 <sup>-3</sup>	1.046 × 10 <sup>-5</sup>	3.91	1.00	0.415 × 10 <sup>-3</sup>	
50	12.35	988.1	0.0831	2383	4181	1900	0.644	0.0204	0.547 × 10 <sup>-3</sup>	1.062 × 10 <sup>-5</sup>	3.55	1.00	0.451 × 10 <sup>-3</sup>	
55	15.76	985.2	0.1045	2371	4183	1908	0.649	0.0208	0.504 × 10 <sup>-3</sup>	1.077 × 10 <sup>-5</sup>	3.25	1.00	0.484 × 10 <sup>-3</sup>	
60	19.94	983.3	0.1304	2359	4185	1916	0.654	0.0212	0.467 × 10 <sup>-3</sup>	1.093 × 10 <sup>-5</sup>	2.99	1.00	0.517 × 10 <sup>-3</sup>	
65	25.03	980.4	0.1614	2346	4187	1926	0.659	0.0216	0.433 × 10 <sup>-3</sup>	1.110 × 10 <sup>-5</sup>	2.75	1.00	0.548 × 10 <sup>-3</sup>	
70	31.19	977.6	0.1983	2334	4190	1936	0.663	0.0221	0.404 × 10 <sup>-3</sup>	1.126 × 10 <sup>-5</sup>	2.55	1.00	0.578 × 10 <sup>-3</sup>	
75	38.58	974.7	0.2421	2321	4193	1948	0.667	0.0225	0.378 × 10 <sup>-3</sup>	1.142 × 10 <sup>-5</sup>	2.38	1.00	0.607 × 10 <sup>-3</sup>	
80	47.39	971.8	0.2935	2309	4197	1962	0.670	0.0230	0.355 × 10 <sup>-3</sup>	1.159 × 10 <sup>-5</sup>	2.22	1.00	0.653 × 10 <sup>-3</sup>	
85	57.83	968.1	0.3536	2296	4201	1977	0.673	0.0235	0.333 × 10 <sup>-3</sup>	1.176 × 10 <sup>-5</sup>	2.08	1.00	0.670 × 10 <sup>-3</sup>	
90	70.14	965.3	0.4235	2283	4206	1993	0.675	0.0240	0.315 × 10 <sup>-3</sup>	1.193 × 10 <sup>-5</sup>	1.96	1.00	0.702 × 10 <sup>-3</sup>	
95	84.55	961.5	0.5045	2270	4212	2010	0.677	0.0246	0.297 × 10 <sup>-3</sup>	1.210 × 10 <sup>-5</sup>	1.85	1.00	0.716 × 10 <sup>-3</sup>	
100	101.33	957.9	0.5978	2257	4217	2029	0.679	0.0251	0.282 × 10 <sup>-3</sup>	1.227 × 10 <sup>-5</sup>	1.75	1.00	0.750 × 10 <sup>-3</sup>	
110	143.27	950.6	0.8263	2230	4229	2071	0.682	0.0262	0.255 × 10 <sup>-3</sup>	1.261 × 10 <sup>-5</sup>	1.58	1.00	0.798 × 10 <sup>-3</sup>	
120	198.53	943.4	1.121	2203	4244	2120	0.683	0.0275	0.232 × 10 <sup>-3</sup>	1.296 × 10 <sup>-5</sup>	1.44	1.00	0.858 × 10 <sup>-3</sup>	
130	270.1	934.6	1.496	2174	4263	2177	0.684	0.0288	0.213 × 10 <sup>-3</sup>	1.330 × 10 <sup>-5</sup>	1.33	1.01	0.913 × 10 <sup>-3</sup>	
140	361.3	921.7	1.965	2145	4286	2244	0.683	0.0301	0.197 × 10 <sup>-3</sup>	1.365 × 10 <sup>-5</sup>	1.24	1.02	0.970 × 10 <sup>-3</sup>	
150	475.8	916.6	2.546	2114	4311	2314	0.682	0.0316	0.183 × 10 <sup>-3</sup>	1.399 × 10 <sup>-5</sup>	1.16	1.02	1.025 × 10 <sup>-3</sup>	
160	617.8	907.4	3.256	2083	4340	2420	0.680	0.0331	0.170 × 10 <sup>-3</sup>	1.434 × 10 <sup>-5</sup>	1.09	1.05	1.145 × 10 <sup>-3</sup>	
170	791.7	897.7	4.119	2050	4370	2490	0.677	0.0347	0.160 × 10 <sup>-3</sup>	1.468 × 10 <sup>-5</sup>	1.03	1.05	1.178 × 10 <sup>-3</sup>	
180	1,002.1	887.3	5.153	2015	4410	2590	0.673	0.0364	0.150 × 10 <sup>-3</sup>	1.502 × 10 <sup>-5</sup>	0.983	1.07	1.210 × 10 <sup>-3</sup>	
190	1,254.4	876.4	6.388	1979	4460	2710	0.669	0.0382	0.142 × 10 <sup>-3</sup>	1.537 × 10 <sup>-5</sup>	0.947	1.09	1.280 × 10 <sup>-3</sup>	
200	1,553.8	864.3	7.852	1941	4500	2840	0.663	0.0401	0.134 × 10 <sup>-3</sup>	1.571 × 10 <sup>-5</sup>	0.910	1.11	1.350 × 10 <sup>-3</sup>	
220	2,318	840.3	11.60	1859	4610	3110	0.650	0.0442	0.122 × 10 <sup>-3</sup>	1.641 × 10 <sup>-5</sup>	0.865	1.15	1.520 × 10 <sup>-3</sup>	
240	3,344	813.7	16.73	1767	4760	3520	0.632	0.0487	0.111 × 10 <sup>-3</sup>	1.712 × 10 <sup>-5</sup>	0.836	1.24	1.720 × 10 <sup>-3</sup>	
260	4,688	783.7	23.69	1663	4970	4070	0.609	0.0540	0.102 × 10 <sup>-3</sup>	1.788 × 10 <sup>-5</sup>	0.832	1.35	2.000 × 10 <sup>-3</sup>	
280	6,412	750.8	33.15	1544	5280	4835	0.581	0.0605	0.094 × 10 <sup>-3</sup>	1.870 × 10 <sup>-5</sup>	0.854	1.49	2.380 × 10 <sup>-3</sup>	
300	8,581	713.8	46.15	1405	5790	5980	0.548	0.0695	0.086 × 10 <sup>-3</sup>	1.965 × 10 <sup>-5</sup>	0.902	1.69	2.950 × 10 <sup>-3</sup>	
320	11,274	667.1	64.57	1239	6540	7900	0.509	0.0836	0.078 × 10 <sup>-3</sup>	2.084 × 10 <sup>-5</sup>	1.00	1.97		
340	14,586	610.5	92.62	1028	8240	11,870	0.469	0.110	0.070 × 10 <sup>-3</sup>	2.255 × 10 <sup>-5</sup>	1.23	2.43		
360	18,651	528.3	144.0	720	14,690	25,800	0.427	0.178	0.060 × 10 <sup>-3</sup>	2.571 × 10 <sup>-5</sup>	2.06	3.73		
374.14	22,090	317.0	317.0	0	—	—	—	—	0.043 × 10 <sup>-3</sup>	4.313 × 10 <sup>-5</sup>				

Note 1: Kinematic viscosity  $\nu$  and thermal diffusivity  $\alpha$  can be calculated from their definitions,  $\nu = \mu/\rho$  and  $\alpha = k/\rho c_p = \nu/Pr$ . The temperatures 0.01°C, 100°C, and 374.14°C are the triple-, boiling-, and critical-point temperatures of water, respectively. The properties listed above (except the vapor density) can be used at any pressure with negligible error except at temperatures near the critical-point value.

Note 2: The unit kJ/kg·°C for specific heat is equivalent to kJ/kg·K, and the unit W/m·°C for thermal conductivity is equivalent to W/m·K.

Source: Viscosity and thermal conductivity data are from J. V. Sengers and J. T. R. Watson, *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 15 (1986), pp. 1291–1322. Other data are obtained from various sources or calculated.

## ประวัติผู้จัดทำโครงการ



ชื่อ นายเด็ตดวง วงศ์วีริยชาติ  
ภูมิลำเนา 27 หมู่ 15 ต.นาบัว อ.นครไทย จ.พิษณุโลก  
ประวัติการศึกษา  
- จบการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียน  
แคมป์สนวิทยาคม  
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4  
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยนเรศวร  
E-mail: enan\_j@hotmail.com



ชื่อ นายประสงค์ พิทักษ์ทองกุล  
ภูมิลำเนา 57 หมู่ 10 ต.เข็กน้อย อ.เขาค้อ จ.เพชรบูรณ์  
ประวัติการศึกษา  
- จบการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียน  
แคมป์สนวิทยาคม  
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4  
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยนเรศวร  
E-mail: nung\_me@hotmail.com



ชื่อ นายไพฑูรย์ ไชยวรรณ  
ภูมิลำเนา 123/1 หมู่ 14 ต.ตลุกคู่ อ.ทัพทัน จ.อุทัยธานี  
ประวัติการศึกษา  
- จบการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียน  
ตลุกคู่วิทยาคม  
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4  
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยนเรศวร  
E-mail: paitoon51@hotmail.com