

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอีเจคเตอร์ที่ใช้  
สารทำความเย็นที่มีจุดเดือดสูง

PERFORMANCE COMPARISON OF EJECTOR BASED ON REFRIGERATION  
WORKING WITH HIGH BOILING POINT REFRIGERANT



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอีเจคเตอร์ที่ใช้  
สารทำความเย็นที่มีจุดเดือดสูง

PERFORMANCE COMPARISON OF EJECTOR BASED ON REFRIGERATION  
WORKING WITH HIGH BOILING POINT REFRIGERANT



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PERFORMANCE COMPARISON OF EJECTOR BASED ON REFRIGERATION  
WORKING WITH HIGH BOILING POINT REFRIGERANT



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอีเจคเตอร์ที่ใช้สารทำความเย็นที่มีจุดเดือดสูง

นายปรัชญา	อระเอี่ยม	59010808
นายพิชัญญ์	วงศ์วีระสกุล	59010930
นายวัชรพงศ์	ชุมศรี	59011213
ดร.ณัฐวุฒิ	เรืองตระกูล	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2562		

### บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เป็นการทำนายประสิทธิภาพของระบบการทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และโปรแกรมวิเคราะห์เชิงตัวเลข ANSYS (FLUENT) 19 สารทำความเย็นที่ใช้ได้แก่ R141b R245fa และ R1233zd(E) เพื่อเป็นการเปรียบเทียบศักยภาพในการทำความเย็นของสารที่มี ODP และ GWP ต่ำ (R1233zd(E)) กับสารที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน (R141b และ R245fa) และเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์ที่ใช้สาร R1233zd(E) เป็นสารทำความเย็น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ทำนายอยู่บนพื้นฐานของการไหล Choked ของไหลอัดตัวได้ และการเคลื่อนที่ผ่านคลื่นกระแทกตั้งฉาก จากการจำลองโดยใช้สารทำความเย็น R141b, R245fa และ R1233zd(E) ลักษณะการไหลภายในอีเจคเตอร์มีรูปแบบที่คล้ายกัน แต่สภาวะการทำงานและขนาดของอีเจคเตอร์และหัวพ่นภายในอีเจคเตอร์ที่ให้สัมประสิทธิ์การทำความเย็นสำหรับแต่ละสารทำความเย็นมีความแตกต่างกัน โดยในสภาวะที่อัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิเท่ากันได้แก่ 0.018 kg/s, 0.020 kg/s และ 0.022 kg/s เครื่องระเหยทำงานในช่วง 8-16 องศาเซลเซียส สาร R1233zd(E) และ R245fa ให้ค่า Entrainment Ratio ที่ใกล้เคียงกันที่ 0.4-0.6 อีกทั้งอุณหภูมิทำงานของเครื่องควบแน่นใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 31-37 องศาเซลเซียสตามสภาวะการทำงานของระบบ โดยสาร R141b ได้ค่า Entrainment Ratio ในช่วง 0.3-0.4 และอุณหภูมิเครื่องควบแน่นอยู่ในช่วง 31-40 องศาเซลเซียส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่คอคอดของหัวพ่นที่ใช้ในอีเจคเตอร์ของสารขนาดของอีเจคเตอร์และหัวพ่นของสาร R1233zd(E) และ R245fa มีขนาดที่ใกล้เคียงกันและมีขนาดเล็กกว่า R141b

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Performance Comparison of Ejector Based on Refrigeration Working with High Boiling Point Refrigerant

Prachaya Orraeam 59010808

Pasith Wongzeewasakul 59010930

Watcharapong Chumsri 59011213

Dr.Natthawut Ruangtrakoon Advisor

Year 2562

## Abstract

In this paper presents performance prediction of ejector refrigeration system by Mathematical Model and Computational Fluid Dynamics (ANSYS (FLUENT) 19), Refrigerants used in this paper are low-ODP, GWP refrigerant (R1233zd(E)) and current using refrigerants (R141b R245fa), to be a designing-guideline for ejector refrigeration system with R1233zd(E) refrigerant. Compressible flow was applied for mathematical modelling. The simulated results from the mathematical model and computational fluid dynamics (CFD) with R141b R245fa and R1233zd(E) refrigerant and primary fluid mass flow rate were 0.018 kg/s, 0.020 kg/s and 0.022 kg/s which was operated in the range of evaporator between 8-16 degrees Celsius showed that the flow pattern within the ejector for those refrigerants was almost the same. The Entrainment Ratio which implies the coefficient of performance of the system of R1233zd(E) and R245fa was nearly 0.4-0.6 while for the R141b has given The Entrainment Ratio around 0.3-0.4 but on the other hand, R141b performed the highest critical condensing temperature at 31-40 degrees Celsius and for those R1233zd(E) and R245fa have given 31-37 degrees Celsius critical condensing temperature. As the operating condition mentioned above, The size of the ejector and primary nozzle used with R1233zd(E) and R245fa was very close and both had the size of ejector and nozzle smaller than R141b.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้อย่างดีด้วยคำแนะนำตลอดจนการให้คำปรึกษาทางวิชาการ และแนวทางการแก้ไขปัญหิต่าง ๆ ให้ลุล่วงด้วยดีจากอาจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ เรืองตระกูล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ อ.ต้อง ดร.ต้องชนะ ทองทิพย์ ที่คอยชี้แนะแนวทาง ให้ข้อสังเกต และแสดงความคิดเห็นต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง รวมทั้งยังคอยให้คำปรึกษาเสมอมาในการทำปริญญาานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ร่วมกันทำปริญญาานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี รวมทั้งเพื่อนๆ ร่วมสาขาวิศวกรรมเครื่องกลที่ให้การสนับสนุนเรื่องต่าง ๆ และบุคลากรของตึกวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำปริญญาานิพนธ์

สุดท้ายนี้ต้องขอขอบพระคุณ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้ให้ชีวิตและเลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ อีกทั้งยังให้กำลังใจและเอาใจใส่เสมอมาในทุก ๆ ด้าน อันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายปรัชญา อระเอี่ยม

นายพิชิต วังชีวะสกุล

นายวัชรพงศ์ ชุมศรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตัดอ้ออิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
รายการสัญลักษณ์.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา .....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา .....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดหวังว่าจะได้รับ .....	3
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 ระบบทำความเย็นแบบอิมเมอร์ชัน.....	4
2.2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการไหลแบบอัดตัวได้.....	5
2.2.1 สภาวะสแตกเนชัน.....	5
2.2.2 ความเร็วเสียงและเลขมัค .....	7
2.2.3 อิทธิพลของพื้นที่หน้าตัดการไหลต่อความเร็วในการไหลของของไหล.....	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตัด IV อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.4 ความสัมพันธ์ของสมบัติต่าง ๆ สำหรับการไหลแบบไอเซนโทรปิกของแก๊ส อุดมคติ.....	10
2.3 การไหลแบบไอเซนโทรปิกผ่านหัวพ่น.....	11
2.3.1 หัวพ่นลู่อื่น.....	11
2.3.2 หัวพ่นลู่อื่น-ลู่ออก.....	12
2.4 คลื่นกระแทก.....	14
2.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบอัด เตอร์.....	15
2.5.1 แบบจำลองอัดเตอร์.....	16
2.5.2 การทำงานในสภาวะวิกฤติ.....	17
2.5.3 การทำงานในสภาวะต่ำกว่าสภาวะวิกฤติ.....	20
2.5.4 คาสัมประสิทธิ์สมรรถนะ.....	21
2.6 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในโปรแกรมการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ANSYS (FLUENT) 19.....	22
2.7 ขั้นตอนก่อนกระบวนการประมวลผล.....	28
2.8 การเลือกจำนวนกริดที่เหมาะสม.....	28
2.9 ขั้นตอนการแก้ไขปัญหาหรือการจำลอง.....	30
2.10 ขั้นตอนหลังกระบวนการประมวลผล.....	30
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตัดvอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3	วิธีการดำเนินงานวิจัยขั้นต้น.....	33
3.1	การรวบรวมผลการทดลองจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
3.2	การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ .....	37
3.3	การสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19.....	41
3.3.1	การสร้างแบบจำลอง .....	43
3.3.2	การสร้างกริด.....	43
3.3.3	Solver Set-up.....	45
3.3.4	ขอบเขตและเงื่อนไขของการจำลอง.....	45
3.3.5	สารทำงานในระบบ.....	45
3.3.6	เกณฑ์การสู่เข้า.....	46
บทที่ 4	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	47
4.1	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	47
4.2	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19....	49
4.2.1	รูปแบบจำลองอีเจคเตอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้อง.....	49
4.2.2	รูปแบบและจำนวนของกริดที่เหมาะสมในการตรวจสอบความถูกต้อง.....	50
4.3	การอภิปรายผลลัพธ์ของการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	52
บทที่ 5	วิธีการดำเนินงานวิจัยเพื่อเก็บค่าผลการวิจัย.....	56
5.1	การสร้างและออกแบบแบบจำลองของอีเจคเตอร์ของแต่ละสารทำความเย็น.....	56
5.2	รูปร่างและสัดส่วนของอีเจคเตอร์ที่ออกแบบของแต่ละสารทำความเย็น.....	57
5.3	การวิเคราะห์อัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิกับอุณหภูมิกำเนิดไอ..	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตี vi ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 6 ข้อมูลผลการทำนายของแบบจำลองและสรุปผล.....	62
6.1. กล่าวนำ.....	62
6.2. ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้ของมวลของของไหลปฐมภูมิ.....	62
6.3. ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องระเหย.....	65
6.4. ตำแหน่งของคลื่นกระแทกที่ทางออกท่อผสมหน้าตัดคงที่ส่งผลต่ออุณหภูมิวิกฤติของเครื่องควบแน่น.....	69
6.5. สมรรถนะในการทำความเย็นของ R1233zd(E).....	72
6.6. บทสรุป.....	74
เอกสารอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก.....	77
ภาคผนวก ก. ตารางผลการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์และแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19.....	78
ภาคผนวก ข. ตารางผลการหาจำนวนกริดเซลล์ที่เหมาะสมที่ใช้ในแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19.....	81
ภาคผนวก ค. ตารางผลการหาสมการจาก Polynomial Regression Analysis ของสารทำความเย็น R141b, R245fa และ R1233zd(E) จากแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้โดยใช้โปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19.....	83
ภาคผนวก ง. ตารางผลการทำนายของสารทำความเย็น R141b, R245fa และ R1233zd(E) จากแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้โดยใช้โปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	85
ภาคผนวก จ. ตารางแสดงผลการทำนายความดันวิกฤติของเครื่องควบแน่นเมื่อกำหนดให้ pressure lift ratio ใกล้เคียงกันของสารทำความเย็น R141b, R245fa และ R1233zd(E) จากแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้โดยใช้โปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 .....	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตั้ง VI อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ข. ผลการทำนายของแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้โดยแสดงลักษณะการไหลผ่าน คอนทอร์โมโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19.....	95
---	----



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้ง VIII ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 หัวฟันซูปเปอร์โซนิกที่ใช้ในการทดลอง.....	33
3.2 ส่วนพื้นที่หน้าตัดคงที่และรายละเอียดของอีเจคเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง (XX: แบบจำลองอีเจคเตอร์).....	33, 34
3.3 ผลการทดลองของระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์ จาก Huang et al. [1] .....	34, 35, 36
4.1 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่าง Entrainment Ratio และความดันควมแน่นวิกฤตที่สภาวะการทำงานและขนาดของอัตราส่วนขนาดพื้นที่คอคอดระหว่างอีเจคเตอร์และหัวฟัน ที่แตกต่างกัน.....	48
5.1 รูปร่างและสัดส่วนของหัวฟันจากแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19.....	57
5.2 อัตราส่วนของอีเจคเตอร์ .....	57
5.3 มิติและสัดส่วนของอีเจคเตอร์.....	58
5.4 ผลการทำนายอัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 .....	59

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์.....	4
2.2 ภาพแสดงส่วนของอีเจคเตอร์ ในระบบทำความเย็น [4] .....	5, 15, 38
2.3 การไหลแบบคงตัวของของไหลผ่านท่อแอดิยาติก [7].....	6
2.4 สภาวะที่เกิดขึ้นจริง สภาวะสแตกเนชันที่เกิดขึ้นจริงและสภาวะสแตกเนชันไอเซนโทรปิกของของไหลบนกราฟ h-s [7].....	6
2.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดการไหลสำหรับการไหลแบบความเร็วต่ำกว่าความเร็วเสียงและความเร็วเหนือกว่าความเร็วเสียง [7].....	9
2.6 คุณสมบัติของไหลที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหัวพ่น-หัวกระจายหรือหัวพ่นลู่เข้า-ลู่ออก และตำแหน่งคอคอดเป็นสมบัติวิกฤต เมื่อ $Ma_c = 1$ [7].....	10
2.7 ผลกระทบของความดันกลับ ต่อการกระจายความดันตลอดหัวพ่นลู่เข้า [7].....	11
2.8 ผลกระทบของความดันกลับต่อการไหลผ่านหัวพ่นลู่เข้า-ลู่ออก [7].....	12
2.9 การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติการไหลผ่านคลื่นกระแทกตั้งฉากของแก๊สอุดมคติ [7].....	14
2.10 ช่วงการทำงานของอีเจคเตอร์ [4] .....	17
2.11 ลักษณะของความเร็วในการไหลแบบปั่นป่วน.....	23
2.12 the universal law of wall [7].....	25
2.13 ขนาดของกริดบริเวณใกล้ขอบผนังเมื่อใช้ค่า wall $y^+$ ที่ต่างกัน.....	29
3.1 กราฟระหว่าง $T_c$ , $P_c$ กับ Entrainment Ratio จากผลการทดลองของงานวิจัย Huang et al. [1].....	37
3.2 NIST (National Institute of Standards and Technology) .....	37
3.3 The flowchart for implementing the CFD simulation.....	42
3.4 แสดงรูปร่างแบบจำลองแบบสมมาตรตามแนวแกนของ Ejector (2-Dimensionaxis-symmetry).....	43

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 The flowchart for grid independent.....	44
3.6 The flowchart for Grid resolution.....	44
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเอนโทรปี ของสารทำความเย็นจากงานวิจัยของ Mwesigye et al.[4].....	47
4.2 แบบจำลองอีเจคเตอร์ในโปรแกรมANSYS (FLUENT) 19 ที่ใช้ R141b เป็นสารทำความเย็นในระบบ.....	49
4.3 การสร้างกริดสำหรับแบบจำลองอีเจคเตอร์ในโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19.....	50
4.4 ลักษณะของกริดบริเวณขอบผนังของอีเจคเตอร์ที่ให้ค่า wall $y^+$ น้อยกว่า 11.225.....	50
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment Ratio และจำนวนกริดเซลล์ในแบบจำลองในโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19.....	51
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment ratio กับความดันควบแน่นของ AD อีเจคเตอร์ AR 9.41 ที่ $T_{gen} = 95\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $T_{evap} = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ของสารทำความเย็น R141b .....	52
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment ratio กับความดันควบแน่น ของ AD อีเจคเตอร์ AR 9.41 ที่ $T_{gen} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $T_{evap} = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ของสารทำความเย็น R141b .....	52
4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment ratio กับความดันควบแน่น ของ AD อีเจคเตอร์ AR 9.41 ที่ $T_{gen} = 84\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $T_{evap} = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ของสารทำความเย็น R141b .....	53
4.9 กราฟแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง $P_{cc}$ และ $T_{evap}$ โดย Turbulent Model ที่แตกต่างกัน.....	54
4.10 กราฟแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง $\dot{m}_p$ และ $T_{gen}$ .....	54
4.11 กราฟแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment ratio และ $T_{gen}$ .....	55
4.12 กราฟแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment ratio และ $T_{evap}$ .....	55
5.1 ESDU (Engineering Sciences Data Unit) เป็นแหล่งรวบรวมข้อมูลการออกแบบตามหลักวิศวกรรมที่น่าเชื่อถือและได้รับการตรวจสอบแล้ว.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัด XI อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2	แผนผังขั้นตอนการกำหนดหลักเกณฑ์การเก็บค่าผลทำนายประสิทธิภาพของแบบจำลอง.....60
6.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment Ratio และอุณหภูมิเครื่องควบแน่นจากการจำลองที่ $m_p$ เท่ากับ 0.018 kg/s และอุณหภูมิเครื่องระเหยเท่ากับ 12 °C.....63
6.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment Ratio และอุณหภูมิเครื่องควบแน่นจากการจำลองที่ $m_p$ เท่ากับ 0.020 kg/s และอุณหภูมิเครื่องระเหยเท่ากับ 12 °C.....63
6.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment Ratio และอุณหภูมิเครื่องควบแน่นจากการจำลองที่ $m_p$ เท่ากับ 0.022 kg/s และอุณหภูมิเครื่องระเหยเท่ากับ 12 °C.....64
6.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment Ratio และอุณหภูมิเครื่องระเหยจากการจำลองที่ $m_p$ เท่ากับ 0.018 kg/s.....65
6.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment Ratio และอุณหภูมิเครื่องระเหยจากการจำลองที่ $m_p$ เท่ากับ 0.020 kg/s.....65
6.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment Ratio และอุณหภูมิเครื่องระเหยจากการจำลองที่ $m_p$ เท่ากับ 0.022 kg/s.....66
6.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment Ratio ของ R1233zd(E) และอุณหภูมิเครื่องควบแน่นและเครื่องระเหยจากการจำลองที่ $m_p$ เท่ากับ 0.018 kg/s.....66
6.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติของเครื่องควบแน่นและอุณหภูมิเครื่องระเหยจากการจำลองที่ $m_p$ เท่ากับ 0.018 kg/s.....67
6.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันจุด Breakdown และอุณหภูมิเครื่องระเหยจากการจำลองที่ $m_p$ เท่ากับ 0.018 kg/s.....68
6.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment Ratio และ Pressure lift Ratio จากการจำลองที่ $m_p$ เท่ากับ 0.018 kg/s.....68
6.12	ลักษณะการไหลภายในอีเจกเตอร์จากการจำลองของสาร R1233zd(E).....70
6.13	ลักษณะการไหลภายในอีเจกเตอร์จากการจำลองที่ $m_p$ เท่ากับ 0.022 kg/s.....71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตั้ง **XII** อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.14	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของสาร R1233zd(E) และอุณหภูมิทำงานของเครื่องระเหยที่อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอแตกต่างกัน.....73
6.15	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของสารทำความเย็นสัมพันธ์และอุณหภูมิทำงานของเครื่องระเหยที่ $m_p$ เท่ากับ 0.018 kg/s.....73
6.16	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไอและอัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิ.....74



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตี XIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการสัญลักษณ์

$a$	ความเร็วของเสียง, $\text{ms}^{-1}$
$A$	พื้นที่, $\text{m}^2$
$A_3$	พื้นที่หน้าตัดท่อผสมคงที่, $\text{m}^2$
$A_{p1}$	พื้นที่หน้าตัดทางออกของหัวพ่น, $\text{m}^2$
$A_R$ และ $A_r$	อัตราส่วนพื้นที่
$A_t$	พื้นที่คอขวดของหัวพ่น, $\text{m}^2$
$C_p$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่, $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
CFD	พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
COP	ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ
$d$	เส้นผ่านศูนย์กลาง, $\text{m}$
$h_{eo}$	เอนทัลปีที่ทางออกเครื่องระเหย, $\text{J kg}^{-1}$
$h_{ei}$	เอนทัลปีที่ทางเข้าเครื่องระเหย, $\text{J kg}^{-1}$
$h_{gi}$	เอนทัลปีที่ทางเข้าเครื่องกำเนิดไอ, $\text{J kg}^{-1}$
$h_{go}$	เอนทัลปีที่ทางออกเครื่องกำเนิดไอ, $\text{J kg}^{-1}$
$h_{co}$	เอนทัลปีที่ทางออกเครื่องควบแน่น, $\text{J kg}^{-1}$
$k$	อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ
$\dot{m}$	อัตราการไหลของมวล, $\text{kg/s}$
$M$ หรือ $Ma$	เลขมัค
NXP	ตำแหน่งทางออกของหัวพ่น, $\text{mm}$
$P$	ความดัน, $\text{Pa}$
$P_c$	ความดันควบแน่นหรือความดันของเครื่องควบแน่น, $\text{Pa}$
$P_e$ หรือ $P_{\text{evap}}$	ความดันของเครื่องระเหย, $\text{Pa}$
$P_g$ หรือ $P_{\text{gen}}$	ความดันของเครื่องกำเนิดไอ, $\text{Pa}$
$R$	ค่าคงที่ของแก๊ส, $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$R_m$	อัตราส่วนการไหลของมวลทุติยภูมิต่อปฐมภูมิ, Entrainment Ratio
$\dot{Q}_e$	อัตราการถ่ายเทพลังงานความร้อนเครื่องระเหย, $\text{J s}^{-1}$
$\dot{Q}_g$	อัตราการถ่ายเทพลังงานความร้อนเครื่องกำเนิดไอ, $\text{J s}^{-1}$
$T$	อุณหภูมิ, $\text{K}$ หรือ $^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตัด **xiv** ไปถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการสัญลักษณ์(ต่อ)

$u$	ความเร็ว, $m s^{-1}$
$W_p$	กำลังของปั๊ม, J/s
$\phi_p$	สัมประสิทธิ์การสูญเสียระหว่างทางออกหัวพ่นและ ส่วน ห้องการดูด
$\phi_m$	สัมประสิทธิ์การสูญเสียของการผสม
$\phi_{mp}$	สัมประสิทธิ์การสูญเสียของการผสมที่สภาวะbreakdown
$\eta_p$	ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของไหลปฐมภูมิผ่านหัวพ่น
$\eta_s$	ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกไหลทุติยภูมิผ่านอีเจกเตอร์
$\alpha$	มุมมองศกัหวกระจาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัด **xv** ว่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการสัญลักษณ์(ต่อ)

### ตัวห้อย

p	ของไหลปฐมภูมิ
g หรือ gen	เครื่องกำเนิดไอ
t หรือ throat	คอขวด
p1	ทางออกหัวพ่น
2p	ของไหลปฐมภูมิที่ส่วนห้องการดูด
s	ของไหลทุติยภูมิ
e หรือ evap	เครื่องระเหย
ejector	อีเจกเตอร์
2s	ของไหลทุติยภูมิที่ส่วนห้องการดูด
c หรือ con	เครื่องควบแน่น
3	ทางเข้าหัวกระจาย
m	ของไหลผสม
cc	ควบแน่นวิกฤติ, สภาวะวิกฤติ
xp	ของไหลปฐมภูมิที่หน้าตัด x-x
xs	ของไหลทุติยภูมิที่หน้าตัด x-x
m2	ของไหลผสมที่สภาวะ breakdown
32	ทางเข้าหัวกระจายที่สภาวะ breakdown
cb	สภาวะ breakdown
eo	ทางออกเครื่องระเหย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตี **xvi** ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการสัญลักษณ์(ต่อ)

### ตัวห้อย

ei	ทางเข้าเครื่องระเหย
gi	ทางเข้าเครื่องกำเนิดไอ
go	ทางออกเครื่องกำเนิดไอ
co	ทางออกเครื่องควบแน่น
constant-area	ส่วนพื้นที่คงที่
diffuser	หัวกระจาย
suction หรือ suction chamber	ห้องการดูด
nozzle	หัวพ่น

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในยุคปัจจุบันการเห็นคุณค่าของการใช้พลังงาน การประหยัดพลังงานและการเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมนั้นเป็นเรื่องที่ทุกคนในปัจจุบันเห็นถึงความสำคัญอย่างมากทั้งในภาคอุตสาหกรรมและภาคครัวเรือนซึ่งในบริเวณทวีปเอเชียตะวันออกเฉียงใต้นั้นเป็นทวีปที่ตั้งอยู่ในเขตที่มีภูมิอากาศแบบร้อนชื้นหรือเขตร้อน เนื่องจากภูมิภาคนี้ตั้งอยู่ในบริเวณเส้นศูนย์สูตรซึ่งได้รับอิทธิพลอย่างมากจากดวงอาทิตย์จึงทำให้บริเวณภูมิภาคนี้ที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสม่ำเสมอตลอดทั้งปี ฉะนั้นระบบทำความเย็นจึงเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นในการประยุกต์ใช้ให้เข้ากับชีวิตความเป็นอยู่ รวมไปถึงสิ่งจำเป็นต่าง ๆ ในชีวิตประจำวันที่ต้องใช้ระบบทำความเย็นเข้ามาเกี่ยวข้องอีกด้วย ในปัจจุบันระบบทำความเย็นที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือระบบทำความเย็นแบบอัดไอซึ่งเป็นระบบที่ใช้เครื่องอัดไอทางกลในการเพิ่มความดันให้กับสารทำความเย็นในระบบโดยใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนซึ่งเป็นหนึ่งในอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนสูง

ระบบทำความเย็นแบบอิมเมอร์ชัน เป็นระบบที่ใช้ไอเจกเตอร์ในการเพิ่มความดันให้กับสารทำความเย็นในระบบซึ่งตัวอิมเมอร์ชันนี้ไม่ได้ใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนแต่อย่างใด แต่ใช้หลักการจากผลต่างของความเร็วและความดันที่เกิดขึ้นในสารทำความเย็นภายในอิมเมอร์ชัน การเพิ่มความดันและส่งผ่านสารทำความเย็นนั้นเข้าสู่อุปกรณ์ถัดไปซึ่งใช้พลังงานความร้อนผ่านเครื่องกำเนิดไอน้ำในการทำให้เกิดผลต่างของความเร็วและความดันผ่านอิมเมอร์ชัน โดยพลังงานความร้อนที่ใช้นั้นเป็นพลังงานความร้อนที่มาจากแหล่งไหนก็ได้ ตั้งแต่พลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพ พลังงานแสงอาทิตย์ รวมไปถึงพลังงานความร้อนที่เหลือจากกระบวนการสันดาป ทำให้ระบบทำความเย็นแบบอิมเมอร์ชันเป็นระบบที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากตัวอิมเมอร์ชัน ใช้พลังงานความร้อนในการขับเคลื่อนและยังสามารถทำงานกับสารทำความเย็นอื่น ๆ ได้อย่างแพร่หลายด้วย อาทิเช่น R123 R245fa

การที่ระบบสามารถเลือกสารทำความเย็นได้อย่างหลากหลายนั้น เมื่อสารทำความเย็นรั่วไหลออกจากระบบจะก่อให้เกิดปัญหาสภาวะเรือนกระจก เนื่องจากชั้นบรรยากาศของโลกถูกทำลายโดยการเลือกใช้สารทำความเย็นนั้นเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญของการเกิดภาวะโลกร้อน ระบบ steam jet refrigerant system ในสมัยใหม่นั้นจึงเลือกใช้ R1233zd(E) เป็นสารทำความเย็นเนื่องจากมีค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนและค่าระดับการทำลายโอโซนต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีการออกแบบอีเจคเตอร์ เพื่อใช้ในการออกแบบระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์ ที่ใช้งานในสภาวะอากาศร้อนและระบายความร้อนโดยเครื่องควบแน่นโดยผ่านหอทำความเย็นโดยใช้ความสัมพันธ์ในทางอุณหพลศาสตร์สำหรับการไหลแบบอัดตัวได้และวิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางและเป็นที่ยอมรับ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ประกอบด้วย

1. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพต่าง ๆ ของระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์ที่ใช้ R141b R245fa และ R1233zd(E) เป็นสารทำงานในระบบ
2. เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบอีเจคเตอร์ที่ใช้สาร R1233zd(E) เป็นสารทำงาน
3. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลภายในอีเจคเตอร์ ด้วยเทคนิคพลศาสตร์เชิงคำนวณหรือ CFD ที่ใช้สารทำความเย็นต่างชนิดกันเป็นสารทำงานในระบบ

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ใช้สารทำงาน 3 สารในการศึกษาคือสารทำความเย็น R141b R245fa และ R1233zd(E)
2. ช่วงอุณหภูมิทำงานของเครื่องกำเนิดไออยู่ในช่วง 90-110 องศาเซลเซียส
3. ช่วงอุณหภูมิทำงานของเครื่องระเหยอยู่ในช่วง 8-16 องศาเซลเซียส
4. กำหนดให้อัตราส่วนพื้นที่ของอีเจคเตอร์มีค่าเท่ากัน
5. ในส่วนของอีเจคเตอร์ไม่มีการถ่ายเทความร้อนเข้าหรือออกจากระบบ
6. กำหนดความคล้ายคลึงทางพลศาสตร์ของไหลและทางรูปทรงเรขาคณิตของอีเจคเตอร์

## 1.4 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการออกแบบอีเจคเตอร์ ในระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์
2. กำหนดวัตถุประสงค์ ขอบเขต และวางแผนการศึกษาของการวิจัย
3. ศึกษาโปรแกรมการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ANSYS (FLUENT) 19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. กำหนดรูปร่างและสร้างแบบจำลองในโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโปรแกรม Microsoft Excel โดยอ้างอิงจากงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

5. ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองทั้งสองแบบจำลองกับงานวิจัยและผลการทดลองในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

6. ออกแบบรูปร่างและสร้างแบบจำลองในโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโปรแกรม Microsoft Excel ตามขอบเขตของการศึกษาที่กำหนดไว้

6. เก็บผลการศึกษาในช่วงขอบเขตการศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารทำความเย็นที่แตกต่างกัน

7. อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดหวังจะได้รับ

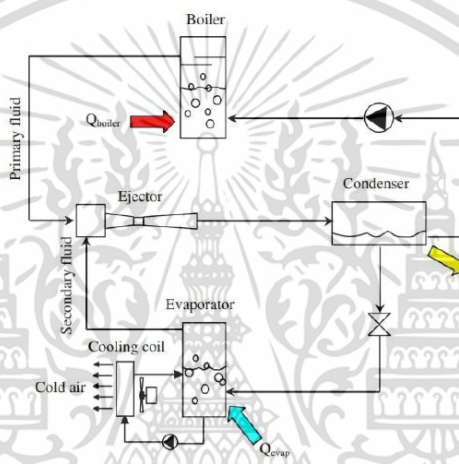
ได้ทราบถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์โดยเปรียบเทียบสารทำความเย็นที่อยู่ในขอบเขตของการศึกษา และสามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่ส่งผลกับประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นภายในอีเจคเตอร์ ผ่านการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19

## บทที่ 2

# งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ระบบทำความเย็นแบบอีเจกเตอร์

ในการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอีเจกเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยใช้อีเจกเตอร์แทนเครื่องอัดไอทางกล ในระบบทำความเย็นแบบดั้งเดิม



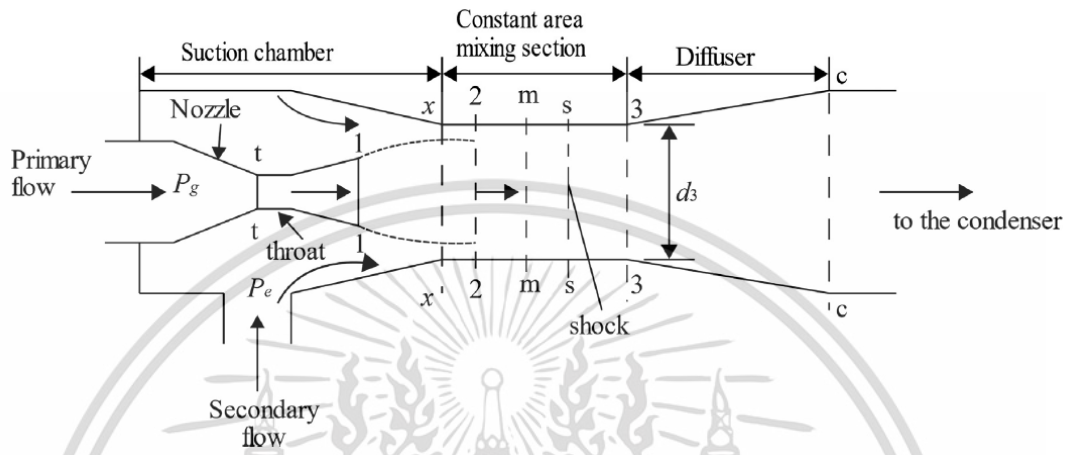
รูปที่ 2.1 ระบบทำความเย็นแบบอีเจกเตอร์

โดยพลังงานความร้อนจะถูกใช้เป็นตัวกำเนิดพลังงานให้กับเครื่องกำเนิดไอเพื่อผลิตไอสารทำความเย็นที่มีความดันสูงและอุณหภูมิสูง หรือเรียกว่าของไหลปฐมภูมิ อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอซึ่งปกติแล้วถูกใช้ในช่วง 70 องศาเซลเซียส ถึง 100 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปทรงอีเจกเตอร์และชนิดของสารทำความเย็นที่ถูกใช้เป็นตัวทำงาน โดยที่ของไหลปฐมภูมิที่ออกจากเครื่องกำเนิดไอนั้นอยู่ในสภาวะไออิ่มตัว ของไหลปฐมภูมิจะไหลผ่านส่วนหัวพ่นที่อยู่ภายในอีเจกเตอร์ ณ ที่ทางออกของหัวพ่น ของไหลปฐมภูมิจะมีความเร็วเหนือเสียงและมีความดันสถิตต่ำ ซึ่งจากความดันสถิตต่ำที่ทางออกหัวพ่นนี้ ทำให้ของไหลทุติยภูมิที่อยู่ภายในเครื่องระเหยระเหยและทำให้ส่วนที่เป็นของเหลวของของไหลทุติยภูมิมีอุณหภูมิลดลง นำไปสู่การทำความเย็น ไอของของไหลทุติยภูมิจะถูกดูดเข้าสู่อีเจกเตอร์

ดังที่แสดงในรูปที่ 2.2 การไหลของของไหลทั้งสองจะรวมกันในส่วนห้องผสมของอีเจกเตอร์และเกิดคลื่นกระแทกตั้งฉาก ณ ส่วนที่เรียกว่าห้องผสมหน้าตัดคงที่ ทำให้หลังผ่านคลื่นกระแทกตั้ง

ฉาก ความดันสถิตและอุณหภูมิสถิตสูงขึ้นอย่างฉับพลันและไหลผ่านหัวกระจายไปยังเครื่องควบแน่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันที่ออกจากตัวกระจายจะเป็นความดันทำงานของเครื่องควบแน่น ของไหลที่มีสภาวะเป็นไอ จะควบแน่นกลับมาเป็นของไหลที่มีสภาวะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิ และถูกนำไปย้อนกลับสู่เครื่องกำเนิดไอน้ำ เพื่อให้เป็นวัฏจักรที่สมบูรณ์ พลังงานที่ถูกขับออกเป็นความร้อนโดยเครื่องควบแน่นยังสามารถนำไปใช้สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิได้อีกด้วย



รูปที่ 2.2 ภาพแสดงส่วนของอีเจคเตอร์ ในระบบทำความเย็น [4]

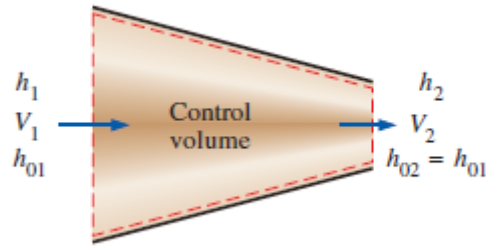
## 2.2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการไหลแบบอัดตัวได้

### 2.2.1 สภาวะสแตกเนชั่น

การศึกษาการไหลแบบอัดตัวได้ด้วยความเร็วสูงซึ่งพบได้ในอุปกรณ์หลายชนิดเช่นในเครื่องบินหรือเครื่องบินไอพ่น จะมีการกำหนดสภาวะอ้างอิงขึ้นมาซึ่งเรียกว่า สภาวะสแตกเนชั่น เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ระบบที่มีลักษณะดังกล่าว ในระบบที่มีการไหลด้วยความเร็วสูงจะต้องมีการพิจารณาพลังงานจลน์ด้วยเสมอ ซึ่งแนวคิดการกำหนดจะมีคล้ายคลึงกับการกำหนดเอนทัลปี กล่าวคือเมื่อมีการพิจารณาพลังงานจลน์ ( $\frac{V^2}{2}$ ) รวมกับเอนทัลปีธรรมดา ( $h$ ) หรือเอนทัลปีสถิตเอนทัลปีสแตกเนชั่น (stagnation enthalpy,  $h_0$ ) จะเป็นดังสมการข้างล่างนี้โดยมีหน่วยเป็น kJ/kg

$$h_0 = h + \frac{V^2}{2} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

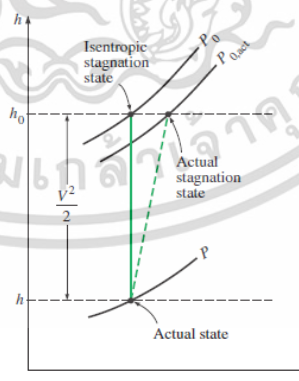


รูปที่ 2.3 การไหลแบบคงตัวของของไหลผ่านท่อแอดิยาติก [7]

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2} = h_2 = h_{02} \quad (2.2)$$

จากรูปที่ 2.3 และสมการ (2.2) เมื่อของไหลถูกทำให้หยุดนิ่ง จะได้ว่าเอนทัลปีแอสติกเนชันเป็นเทอมเอนทัลปีของของไหลเมื่อของไหลถูกให้หยุดนิ่งตามกระบวนการแอดิยาติก พลังงานจลน์ของไหลจะถูกเปลี่ยนเป็นเอนทัลปี ( $u+Pv$ ) ซึ่งจะส่งผลให้อุณหภูมิและความดันของของไหลสูงขึ้น

จากรูปที่ 2.5 โดยทั่วไปกระบวนการสแตกเนชันมีลักษณะใกล้เคียงกับกระบวนการไอเซนโทรปิก จึงสามารถประมาณให้กระบวนการสแตกเนชันเป็นกระบวนการไอเซนโทรปิกได้ และถือได้ว่าสมบัติสแตกเนชันเป็นสมบัติสแตกเนชันไอเซนโทรปิก



รูปที่ 2.4 สถานะที่เกิดขึ้นจริง สถานะสแตกเนชันที่เกิดขึ้นจริงและสถานะสแตกเนชันไอเซนโทรปิกของของไหลบนกราฟ h-s [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับของไหลที่เป็นแก๊สอุดมคติซึ่งมีค่าความร้อนจำเพาะคงที่ (constant specific Heat,  $C_p$ ) ค่าเอนทัลปีของแก๊สจะเท่ากับ  $c_p T$  จะได้ว่า

$$c_p T_0 = c_p T + \frac{V^2}{2} \quad (2.3)$$

หรือ

$$T_0 = T + \frac{V^2}{2c_p} \quad (2.4)$$

โดย  $T_0$  คือ อุณหภูมิสถิต (เคลวิน)

ในทำนองเดียวกันกับอุณหภูมิ เมื่อของไหลถูกทำให้หยุดนิ่งตามกระบวนการไอเซนโทรปิก ความดันสถิต  $P_0$  จะมีความสัมพันธ์กับความดันสถิต  $P$  ดังนี้

$$\frac{P_0}{P} = \left(\frac{T_0}{T}\right)^{k/(k-1)} \quad (2.5)$$

จากความสัมพันธ์ในกระบวนการไอเซนโทรปิกคือ  $PV^k = P_0 V_0^k$  และความสัมพันธ์ทั่วไปคือ  $\rho = 1/v$  จะได้อัตราส่วนของความหนาแน่นสถิตต่อความหนาแน่นสถิต ดังนี้

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left(\frac{T_0}{T}\right)^{1/(k-1)} \quad (2.6)$$

### 2.2.2 ความเร็วเสียงและเลขมัค

ปัจจัยที่มีความสำคัญอีกตัวหนึ่งในการศึกษาการไหลแบบอัดตัวได้คือ ความเร็วของเสียงหรือความเร็วโซนิก

สำหรับสารทำงานที่เป็นแก๊สอุดมคติ จะได้สมการดังนี้

$$c = \sqrt{kRT} \quad (2.7)$$

เนื่องจาก  $k$  เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ  $R$  เป็นค่าคงที่ ดังนั้นความเร็วเสียงของแก๊สอุดมคติจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ

ความเร็วเสียงมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์การไหลแบบอัดตัวได้เพราะมีความเร็วเสียงจะถูกใช้อ้างอิงเพื่อระบุสภาพการไหลของของไหล (หรือการเคลื่อนที่ของวัตถุ) ในเทอมตัวแปรที่เรียกว่า เลขมัค (Mach number,  $Ma$ )

$$Ma = \frac{V}{c} \quad (2.8)$$

### 2.2.3 อิทธิพลของพื้นที่หน้าตัดการไหลต่อความเร็วในการไหลของของไหล

ในระหว่างการไหลของของไหลผ่านอุปกรณ์หลายชนิด เช่น หัวพ่น หัวกระจาย และกังหัน สมบัติของของไหลจะมีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางของการไหลเป็นหลักจึงถือเป็นการไหลแบบไอเซนโทรปิกในหนึ่งมิติได้โดยมีความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้

ความสัมพันธ์ของพื้นที่หน้าตัดการไหลกับสมบัติต่าง ๆ ในระบบที่มีการไหลแบบไอเซนโทรปิกในหนึ่งมิติคือ ความดัน อุณหภูมิ ความหนาแน่น ความเร็วในการไหลและเลขมัค จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

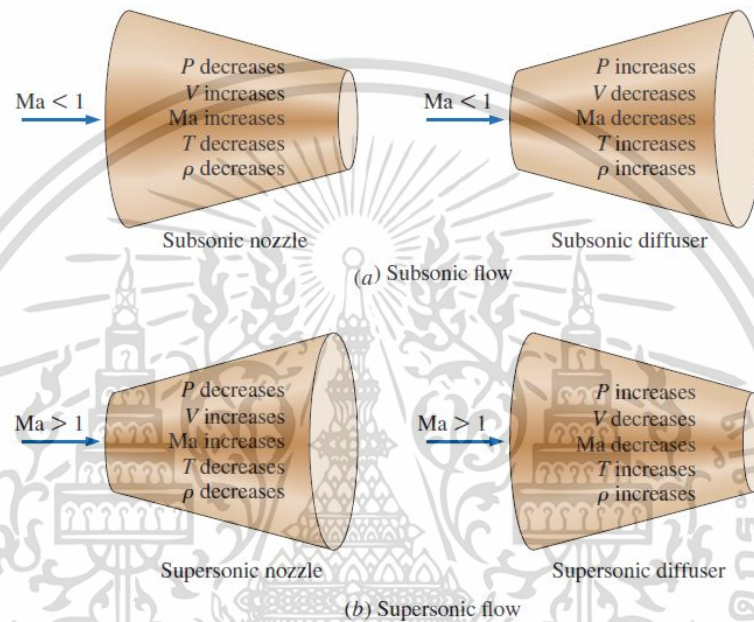
$$\frac{dA}{A} = \frac{dP}{\rho V^2} (1 - Ma^2) \quad (2.9)$$

$$\frac{dA}{A} = -\frac{dV}{V} (1 - Ma^2) \quad (2.10)$$

จากสมการ 2 สมการข้างบน จะเห็นได้ว่า

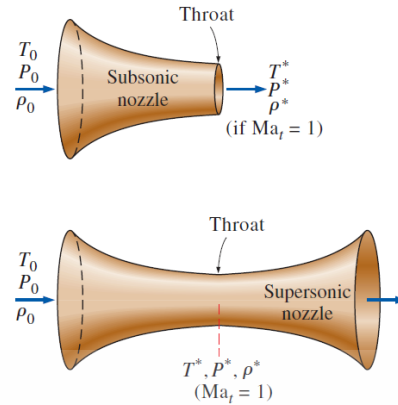
1. สำหรับการไหลที่มีความเร็วต่ำกว่าความเร็วเสียง ( $Ma < 1$ ) หรือความเร็วซัพโซนิค เทอม  $1 - Ma^2$  จะมีเครื่องหมายเป็นบวก การไหลในท่อลู่ออก ( $dA > 0$ ) จะทำให้ความดันเพิ่มขึ้นในขณะที่ความเร็วจะลดลง ในทางตรงกันข้าม การไหลในท่อลู่อเข้า ( $dA < 0$ ) จะทำให้ความดันลดลงในขณะที่ความเร็วจะเพิ่มขึ้น
2. สำหรับการไหลที่มีความเร็วเหนือกว่าความเร็วเสียง ( $Ma > 1$ ) หรือความเร็วซูเปอร์โซนิค เทอม  $1 - Ma^2$  จะมีเครื่องหมายเป็นลบ การไหลในท่อลู่ออก ( $dA > 0$ ) จะทำให้ความดันลดลงในขณะที่ความเร็วจะเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม การไหลในท่อลู่อเข้า ( $dA < 0$ ) จะทำให้ความดันเพิ่มขึ้นในขณะที่ความเร็วจะลดลง

โดยนิยามอุปกรณ์ที่ทำให้ความเร็วในการไหลเพิ่มขึ้นเรียกว่า หัวพ่น ในทางตรงกันข้าม อุปกรณ์ที่ทำให้ความเร็วในการไหลลดลงเรียกว่าหัวกระจาย ผลของการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดการไหลสำหรับการไหลแบบความเร็วต่ำกว่าความเร็วเสียงและความเร็วเหนือกว่าความเร็วเสียง ได้ถูกแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดการไหลสำหรับการไหลแบบความเร็วต่ำกว่าความเร็วเสียงและความเร็วเหนือกว่าความเร็วเสียง [7]

จะเห็นได้ว่าการใช้หัวพ่นเพื่อเพิ่มความเร็วในการไหลจากความเร็วต่ำกว่าความเร็วเสียงให้เป็นความเร็วเหนือกว่าความเร็วเสียงได้นั้น จะต้องมีการติดตั้งหัวกระจายเข้ากับหัวพ่นเป็นหัวพ่น-หัวกระจาย หรือหัวพ่นลู่เข้า-ลู่ออก โดยในช่วงแรกของการไหลจะผ่านช่วงหัวพ่นหรือช่วงลู่เข้า ซึ่งเลขมัคจะเพิ่มขึ้นและจะมีค่าเป็นหนึ่งซึ่งตำแหน่งคอขวดจากนั้นของไหลจะมีความเร็วสูงขึ้นสู่ระดับเหนือกว่าความเร็วเสียงในช่วงหัวกระจายหรือช่วงลู่ออก ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 คุณสมบัติของไหลที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหัวพ่น-หัวกระจายหรือหัวพ่นลู่เข้า-ลู่ออก และตำแหน่งคอขวดเป็นสมบัติวิกฤต เมื่อ  $Ma_t = 1$  [7]

## 2.2.4 ความสัมพันธ์ของสมบัติต่าง ๆ สำหรับการไหลแบบไอเซนโทรปิกของแก๊สอุดมคติ

อุณหภูมิ  $T$  ของแก๊สอุดมคติที่ตำแหน่งใด ๆ มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิสถิตยศาสตร์ดังนี้

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \left(\frac{k-1}{2}\right) Ma^2 \quad (2.11)$$

อัตราส่วนความดันสถิตยศาสตร์ต่อความดันสถิตยศาสตร์มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{P_0}{P} = \left[1 + \left(\frac{k-1}{2}\right) Ma^2\right]^{k/(k-1)} \quad (2.12)$$

อัตราส่วนความหนาแน่นสถิตยศาสตร์ต่อความหนาแน่นสถิตยศาสตร์มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left[1 + \left(\frac{k-1}{2}\right) Ma^2\right]^{1/(k-1)} \quad (2.13)$$

สมบัติของของไหลที่ตำแหน่งเลขมัคเป็นหนึ่ง (ที่คอขวด) เรียกว่าสมบัติวิกฤต เรียกอัตราส่วนของสมบัติที่ตำแหน่งดังกล่าวต่อสมบัติที่สภาวะสถิตยศาสตร์เรียกว่า อัตราส่วนวิกฤต เมื่อกำหนดให้ตัวยก "\*" เป็นสัญลักษณ์แสดงสมบัติที่สภาวะวิกฤตและให้  $Ma=1$  จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{T^*}{T_0} = \frac{2}{k+1} \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{P^*}{P_0} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)} \quad (2.15)$$

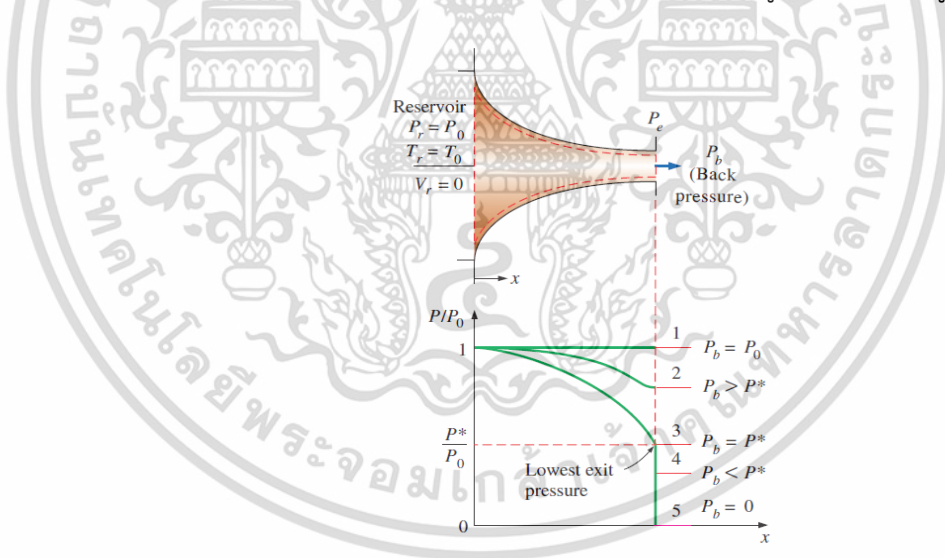
$$\frac{\rho^*}{\rho_0} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)} \quad (2.16)$$

## 2.3 การไหลแบบไอเซนโทรปิกผ่านหัวพ่น

หัวพ่นลู่เข้าหรือหัวพ่นลู่เข้า-ลู่ออก มักถูกประยุกต์ใช้อย่างหลากหลายในทางวิศวกรรมรวมไปถึงกังหันไอและกังหันแก๊ส ระบบแรงขับเคลื่อนในอากาศยานและยานอวกาศ ในส่วนนี้จะมีการพิจารณาผลกระทบของความดันกลับ หรือ ความดันด้านหลังของเขตขาออกของหัวพ่น ต่อความเร็วขาออก อัตราการไหลของมวลและการกระจายตัวของความดันตลอดหัวพ่น

### 2.3.1 หัวพ่นลู่เข้า

พิจารณาการไหลที่มีความเร็วต่ำกว่าความเร็วเสียงที่ผ่านหัวพ่นลู่เข้าดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ผลกระทบของความดันกลับ ต่อการกระจายความดันตลอดหัวพ่นลู่เข้า [7]

ทางเข้าหัวพ่นถูกติดกับแหล่งกักเก็บต้นกำเนิด ที่มีความดัน  $P_r$  และอุณหภูมิ  $T_r$  และสมมติแหล่งกักเก็บนั้นใหญ่เพียงพอ ดังนั้นความเร็วทางเข้าหัวพ่นเมื่อเทียบกับขาออกนั้นมีค่าน้อยมาก ๆ เข้าใกล้ศูนย์และการไหลผ่านหัวพ่นถูกประมาณให้เป็นไอเซนโทรปิก ความดันสแตกเนชันและอุณหภูมิสแตกเนชันของของไหลที่หน้าตัดใด ๆ ผ่านหัวพ่นจะเท่ากับ ความดันและอุณหภูมิแหล่งกักเก็บตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการลดความดันกลับและสังเกตผลกระทบลัพท์บนการกระจายความดันตลอดความยาวของหัวพ่นดังแสดงในรูปที่ 2.7 จะสังเกตได้ว่าเมื่อความดันกลับถูกลดเข้าสู่  $P_3$  ( $P_b=P^*$  คือความดันที่ต้องการเพื่อเพิ่มความเร็วของไหลให้เป็นความเร็วเสียงที่ระนาบทางออกหรือคอขวด) การไหลของมวลจะไปถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่งและการไหลนั้นจะถูกเรียกว่าเกิดโซ้ค

สำหรับการไหลที่ไหลผ่านพื้นที่ที่กำหนดและคุณสมบัติสแตกเนชัน  $T_0$  และ  $P_0$  อัตราการไหลของมวลสูงสุดจะมีค่าเกิดขึ้นเมื่อ  $Ma = 1$  และเกิดขึ้นที่พื้นที่การไหลที่น้อยที่สุดที่คอขวด ( $A^*$ ) จะมีการความสัมพันธ์ดังนี้

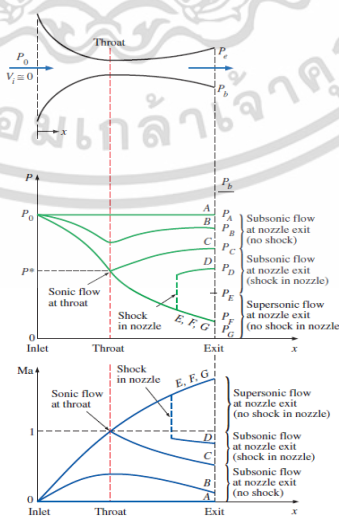
$$\dot{m}_{max} = P_0 \frac{A^*}{\sqrt{T_0}} \sqrt{\frac{k}{R} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/(k-1)}} \quad (2.17)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่การไหลที่ไหลที่หลากหลายผ่านหัวพ่นสัมพันธ์กับพื้นที่คอขวดโดยมีอัตราไหลของมวลและคุณสมบัติสแตกเนชันของไหลเหมือนกันจะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{Ma} \left[ \left( \frac{2}{k+1} \right) \left( 1 + \frac{k-1}{2} Ma^2 \right) \right]^{(k+1)/[2(k-1)]} \quad (2.18)$$

### 2.3.2 หัวพ่นลู่ออก-ลู่ออก

การบังคับให้ของไหลผ่านหัวพ่นลู่ออก-ลู่ออกไม่ได้ยืนยันว่าของไหลจะถูกเร่งเข้าสู่ความเร็วเหนือเสียง ในความจริงของไหลมักจะถูกพบว่ามีความเร็วลดลงในส่วนของลู่ออกแทนที่จะมีความเร็วเพิ่มถ้าความดันกลับนั้นไม่ได้อยู่ในช่วงที่ถูกต้อง เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ พิจารณารูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ผลกระทบของความดันกลับต่อการไหลผ่านหัวพ่นลู่ออก-ลู่ออก [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของไหลไหลเข้าหัวพ่นด้วยความเร็วต่ำที่ความเร็วสแตกเนชัน  $P_0$  เมื่อ  $P_b = P_0$  (กรณี A) จะไม่มีการไหลผ่านหัวพ่น เป็นไปตามหลักการที่ว่า การไหลผ่านหัวพ่นจะถูกขับโดยความต่างของความดันระหว่างขาเข้าและขาออก ต่อไปจะเป็นการอธิบายว่าเกิดอะไรขึ้นเมื่อความดันกลับ ถูกทำให้ต่ำกว่านี้

1. เมื่อ  $P_0 > P_b > P_c$  การไหลจะยังคงเป็นความเร็วซับโซนิคและการไหลของมวลจะต่ำกว่าการไหลที่ความเร็วที่เกิดการไหลโซค ความเร็วของไหลจะเพิ่มในส่วนแรก (ส่วนลู่เข้า) และไปถึงค่าสูงสุดที่คอคอดแต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วจะสูญเสียในส่วนที่สอง (ส่วนลู่ออก) หรือเรียกว่าหัวกระจาย ความดันจะลดลงในส่วนลู่เข้า ถึงจุดต่ำสุดที่คอคอด และเพิ่มขึ้นที่การเสียความเร็วในส่วนลู่ออก
2. เมื่อ  $P_b = P_c$  ความดันที่คอคอดจะมีค่า  $P^*$  และของไหลจะมีค่าความเสี่ยงที่คอคอดแต่ในส่วนของการลู่ออกของหัวพ่นจะทำหน้าที่เหมือนหัวกระจาย ลดความเร็วของไหลไปเป็นความเร็วซับโซนิค อัตราการไหลของมวลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันกลับลดลงจนกระทั่งถึงค่าสูงสุดที่สามารถถึงได้โดยที่  $P_b = P^*$  เป็นความดันต่ำสุดที่สามารถให้ได้ที่คอคอดและความเร็วเสียงคือความเร็วสูงสุดที่สามารถถึงได้เมื่อใช้หัวพ่นลู่เข้า ดังนั้น การลดลงของ  $P_b$  ลงกว่านี้จะไม่ผลกระทบต่ออัตราการไหลของของไหลในส่วนของส่วนลู่เข้าของหัวพ่นหรืออัตราการไหลของมวลผ่านหัวพ่น อย่างไรก็ตามการลดลงนี้จะมีอิทธิพลต่อลักษณะของการไหลในส่วนของการลู่ออกของหัวพ่น
3. เมื่อของไหลมีความเร็วเท่ากับความเร็วเสียง (ความดันมีค่าเท่ากับ  $P^*$ ) ณ ตำแหน่งคอคอดของหัวพ่น ความเร็วจะเพิ่มขึ้นในส่วนลู่ออกของหัวพ่น และจะเกิดคลื่นกระแทกตั้งฉากในช่วงระหว่างคอคอดและทางออกของหัวพ่นทำให้ความเร็วลดลงจนต่ำกว่าเสียงและความดันเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน การไหลผ่านคลื่นกระแทกตั้งฉากเป็นกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ (ไม่สามารถประมาณเป็นกระบวนการไอเซนโทรปิกได้) ตำแหน่งของคลื่นกระแทกตั้งฉากจะเลื่อนไปตามแนวทิศทางการไหลเมื่อความดันของของไหลที่ตำแหน่งทางออกของหัวพ่นลดลงและตำแหน่งของคลื่นกระแทกตั้งฉากจะอยู่ที่ระนาบทางออกของหัวพ่นเมื่อความดัน ณ ทางออกของหัวพ่นมีค่าลดลงจนเท่ากับ  $P_E$  ในกรณีนี้จะสามารถประมาณเป็นกระบวนการไอเซนโทรปิก ได้ แต่อย่างไรก็ตามความเร็วจะลดลงจนต่ำกว่าเสียงเมื่อของไหลไหลออกจากหัวพ่น (เนื่องจากตำแหน่งของคลื่นกระแทกตั้งฉากอยู่ ณ ระนาบทางออกของหัวพ่นในกรณีที่ความดันทางออกเท่ากับ  $P_E$ )
4. เมื่อความดันทางออกลดลงจนต่ำกว่า  $P_E$  การไหลภายในหัวพ่นหลังจากผ่านคอคอดจะเป็นความเร็วเหนือเสียงจนออกจากหัวพ่น และสามารถประมาณได้ว่าเป็นกระบวนการไอเซนโทรปิกเมื่อ

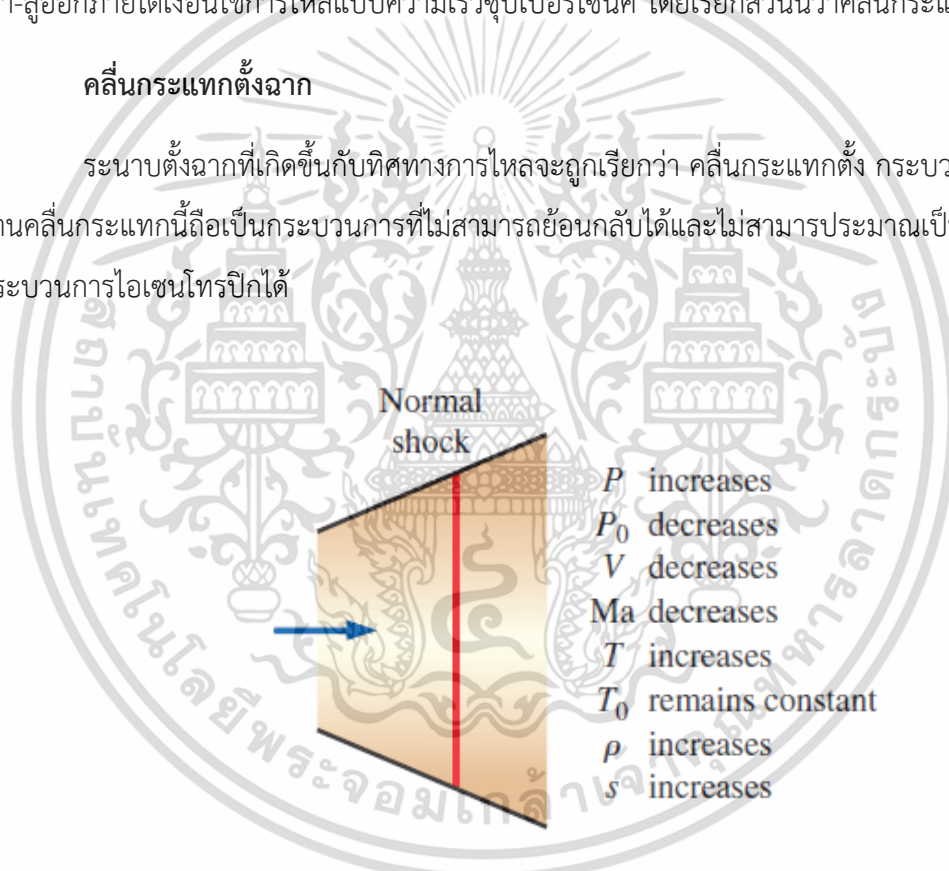
ความดันทางออกมีค่าเท่ากับ  $P_f$  จะเกิด Expansion waves ณ ตำแหน่งทางออกของหัวพ่น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Oblique Shocks

## 2.4 คลื่นกระแทก

คลื่นเสียงถูกทำให้เกิดขึ้นโดยการรบกวนความดันเล็กน้อยที่น้อยมาก ๆ และเดินทางผ่านตัวกลางที่ความเร็วเสียง โดยที่จะมีช่วงความดันกลับบางค่าที่ทำให้เส้นบาง ๆ ที่เกิดขึ้นซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไหลอย่างฉับพลันโดยเกิดขึ้นที่ภายในการไหลของของไหลในหัวพ่นลู่เข้า-ลู่ออกภายใต้เงื่อนไขการไหลแบบความเร็วซูเปอร์โซนิก โดยเรียกส่วนนี้ว่าคลื่นกระแทก

### คลื่นกระแทกตั้งฉาก

ระนาบตั้งฉากที่เกิดขึ้นกับทิศทางการไหลจะถูกเรียกว่า คลื่นกระแทกตั้ง กระบวนการไหลผ่านคลื่นกระแทกนี้ถือเป็นกระบวนการที่ไม่สามารถย้อนกลับได้และไม่สามารถประมาณเป็นกระบวนการไอเซนโทรปิกได้



รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติการไหลผ่านคลื่นกระแทกตั้งฉากของแก๊สอุดมคติ [7]

ดังนั้นจึงมีพัฒนาสมการเพื่อที่จะอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติต่าง ๆ ก่อนและหลังคลื่นกระแทกสำหรับแก๊สอุดมคติที่มีค่าความร้อนจำเพาะคงที่ที่ขึ้นมา โดย ความสัมพันธ์ระหว่าง

อัตราส่วนอุณหภูมิสถิต  $\frac{T_2}{T_1}$  เป็นดังนี้

$$\frac{T_{01}}{T_1} = 1 + \left(\frac{k-1}{2}\right) Ma_1^2 \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{T_{02}}{T_2} = 1 + \left(\frac{k-1}{2}\right) Ma_2^2 \quad (2.20)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{1 + Ma_1^2(k-1)/2}{1 + Ma_2^2(k-1)/2} \quad (2.21)$$

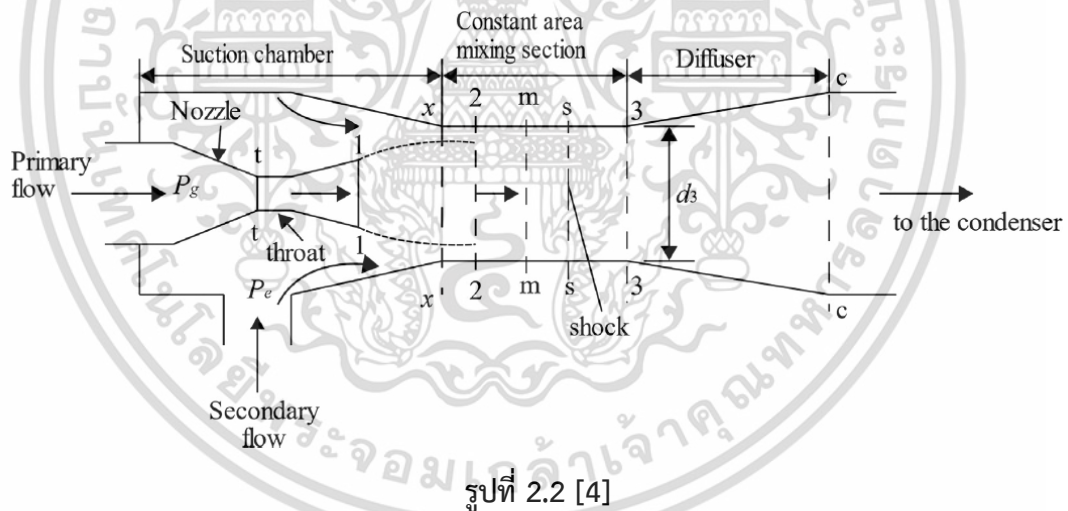
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความดัน  $\frac{P_2}{P_1}$  เป็นดังนี้

$$\frac{P_2}{P_1} = 1 + \frac{2k}{k+1} (Ma_2^2 - 1) \quad (2.22)$$

เลขมัคหลังผ่านคลื่นกระแทกตั้งฉากเป็นดังนี้

$$Ma_2^2 = \frac{1 + \frac{(k-1)}{2} Ma_1^2}{k Ma_1^2 - \frac{(k-1)}{2}} \quad (2.23)$$

## 2.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์



แบบจำลองอีเจคเตอร์ ที่ใช้ในการออกแบบนี้มีพื้นฐานจากทฤษฎีการผสมแบบความดันคงที่ ซึ่งใช้มากในการศึกษาระบบของอีเจคเตอร์ แบบจำลองนี้จะรวมวิธีการที่อยู่ในงานวิจัยของ Huang et al. [1] ที่หาประสิทธิภาพในการทำงานที่โหมตวิฤต และวิธีการที่ใช้โดย Li et al. [2] เพื่อที่จะสร้างแบบจำลองการทำงานในภาวะที่ต่ำกว่าโหมตวิฤต (ความดันของเครื่องควบแน่นสูงกว่าภาวะวิฤต) และหาเงื่อนไขที่ระบบไม่สามารถทำงานได้ (breakdown conditions) พร้อมทั้งทำการหาค่าประสิทธิภาพของอีเจคเตอร์ เพื่อเพิ่มความแม่นยำของแบบจำลอง

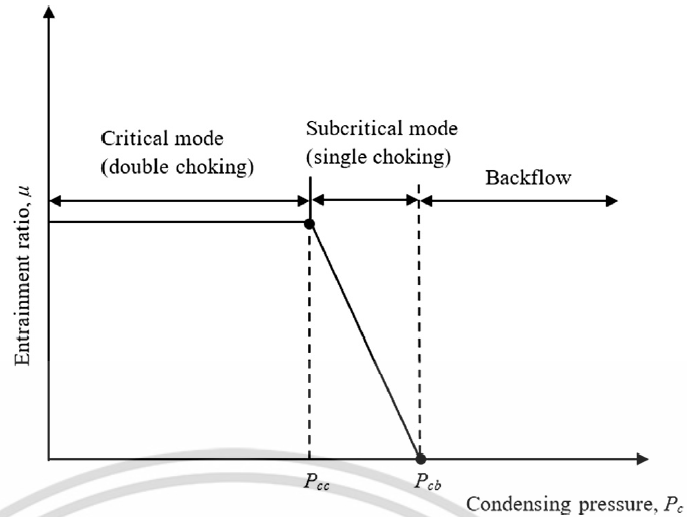
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1 แบบจำลองอีเจคเตอร์

ในกระบวนการผสมระหว่างของไหลปฐมภูมิและของไหลทุติยภูมิ ความเร็วของของไหลปฐมภูมิลดลงเนื่องจากแรงเฉือนระหว่างของไหลปฐมภูมิและของไหลทุติยภูมิ ในขณะเดียวกันความเร็วของของไหลทุติยภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น และเพื่อให้การผสมระหว่างของไหลทั้งสองมีค่าความดันรวมคงที่จึงได้มีการใช้สมมติฐานดังนี้

- i. ของไหลในอีเจคเตอร์ เป็นแก๊สอุดมคติ และค่าความจุความร้อนจำเพาะ ไม่แปรผันตามอุณหภูมิ เนื่องจากความเปลี่ยนแปลงของค่าความจุความร้อนจำเพาะมีค่าน้อยในช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน
- ii. การไหลอยู่ในสภาวะคงตัวและเป็นหนึ่งมิติ (เคลื่อนที่ตามแนวอีเจคเตอร์) ตลอดทั้งระบบ
- iii. ในส่วนของอีเจคเตอร์ ไม่มีการถ่ายเทความร้อนเข้าหรือออกจากระบบ เนื่องจากของไหลของระบบมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง จึงทำให้ระยะเวลาในการถ่ายเทพลังงานความร้อนมีค่าน้อย ส่งผลให้ค่าความร้อนสุทธิที่ถูกถ่ายเทมีค่าน้อย
- iv. ของไหลทั้งสองทำงานอยู่ในสถานะแก๊สอัดตัว
- v. ความเร็วก่อนเข้าหัวพ่นซูเปอร์โซนิก มีค่าน้อยมาก (เป็นศูนย์) เมื่อเทียบกับความเร็วออกจากหัวพ่น
- vi. ในช่วงท่อผสมหน้าตัดคงที่ของอีเจคเตอร์ ความดันมีค่าคงที่ในช่วงการทำงานแบบวิกฤต
- vii. ในแต่ละช่วงของอีเจคเตอร์ ของระบบทำความเย็นเป็น ช่วงปริมาตรควบคุม

การทำงานของ ระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์ ในช่วงการทำงานในสภาวะวิกฤต ค่า Entrainment Ratio มีค่าคงที่และความดันควบแน่น มีค่าต่ำกว่าความดันควบแน่นวิกฤต ในการทำงานแบบต่ำกว่าสภาวะวิกฤต ความดันควบแน่นจะอยู่ระหว่าง ความดันควบแน่นวิกฤต และ Breakdown Pressure ในภาวะการทำงานแบบต่ำกว่าสภาวะวิกฤต ค่า Entrainment Ratio จะลดลงเมื่อความดันควบแน่นสูงขึ้น จนกระทั่งเป็นศูนย์ (เกิดการไหลย้อนกลับของสารทำงาน) ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ช่วงการทำงานของอีเจคเตอร์ [4]

### 2.5.2 การทำงานในสภาวะวิกฤต

ในการทำงานในสภาวะวิกฤต ทั้งและของไหลทุติยภูมิเกิดการไหลแบบ choked และใช้การไหลแบบไอเซนโทรปิก ในการหาประสิทธิภาพ อัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิ ที่ไหลผ่านหัวพ่น สามารถหาค่าได้จาก

$$\dot{m}_p = P_g \frac{A_t}{\sqrt{T_g}} \sqrt{\frac{k}{R} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/(k-1)}} \sqrt{\eta_p} \quad (2.24)$$

$\eta_p$  คือ ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกสำหรับการสูญเสียในการดูดของของไหลปฐมภูมิ เลขมัคที่ตำแหน่งทางออกหัวพ่น ( $M_{p1}$ ) และ ความดันที่ทางออกหัวพ่นจากความสัมพันธ์ไอเซนโทรปิก

$$\left( \frac{A_{p1}}{A_t} \right)^2 \approx \frac{1}{M_{p1}^2} \left( \frac{2}{k+1} \left( 1 + \frac{k-1}{2} M_{p1}^2 \right) \right)^{(k+1)/(k-1)} \quad (2.25)$$

$$\frac{P_g}{P_{p1}} \approx \left( 1 + \frac{k-1}{2} M_{p1}^2 \right)^{k/(k-1)} \quad (2.26)$$

เลขมัคของของไหลปฐมภูมิที่ตำแหน่งทางเข้าท่อผสมหน้าตัดคงที่ ( $M_{2p}$ ) และความดันที่ตำแหน่งหน้าตัดคงที่

$$\frac{P_{2p}}{P_{p1}} \approx \frac{\left( 1 + \frac{(k-1)}{2} M_{p1}^2 \right)^{(k+1)/(k-1)}}{\left( 1 + \frac{(k-1)}{2} M_{2p}^2 \right)^{(k+1)/(k-1)}} \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สมการอนุรักษ์พลังงานมีดังนี้

$$\dot{m}_p \left( c_p T_{2p} + \frac{u_{2p}^2}{2} \right) + \dot{m}_s \left( c_p T_{2s} + \frac{u_{2s}^2}{2} \right) = (\dot{m}_p + \dot{m}_s) \left( c_p T_m + \frac{u_m^2}{2} \right) \quad (2.35)$$

ความเร็วในท่อต่อผสมสามารถหาได้จาก เลขมัคที่หาได้จากสมการที่ผ่านมาโดย

$$u_{2p} = M_{2p} a_{2p} \quad (2.36)$$

$a_{2p}$  คือความเร็วเสียงที่อุณหภูมิ  $T_{2p}$  โดย

$$a_{2p} = \sqrt{kRT_{2p}} \quad (2.37)$$

และสำหรับความเร็วของของไหลทุติยภูมิ สามารถหาได้ในทำนองเดียวกัน

หลังจากของไหลทั้งสองได้ผสมกันแล้ว เกิดคลื่นกระแทกตั้งฉากพร้อมทั้งความดันเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน สามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{P_3}{P_m} = 1 + \frac{2k}{k+1} (M_m^2 - 1) \quad (2.38)$$

และเลขมัค ณ ทางเข้าหัวกระจาย (ตำแหน่ง 3) หาได้จาก

$$M_3^2 = \frac{1 + \frac{(k-1)}{2} M_m^2}{kM_m^2 - \frac{(k-1)}{2}} \quad (2.39)$$

การไหลผ่านหัวกระจายถูกตั้งสมมุติฐานว่าเป็นกระบวนการไอเซนโทรปิกด้วยเหตุนี้จึงสามารถคำนวณหาความดันควบแน่นวิกฤตได้จาก

$$\frac{P_{cc}}{P_3} \approx \left( 1 + \frac{k-1}{2} M_3^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (2.40)$$

จากสมการข้างต้นทั้งหมด ประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นภายใต้ภาวะการทำงานแบบวิกฤตสามารถหาได้ Entrainment Ratio,  $R_m$  เป็นตัวแปรสำคัญของประสิทธิภาพของระบบสามารถหาได้จาก

$$R_{m_{cc}} = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_p} \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.3 การทำงานในภาวะต่ำกว่าสภาวะวิกฤต

ดังรูปที่ 2.10 ได้แสดงให้เห็นว่า Entrainment Ratio มีค่าคงที่ในการทำงานที่ภาวะวิกฤต และเมื่อความดันควบแน่นวิกฤตเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพจะเริ่มลดลงจนถึงสภาวะที่ระบบไม่สามารถทำงานได้ (เนื่องจากความดันสูงกว่าทางเข้าจนทำให้เกิดการไหลย้อนกลับ เรียกความดันค่านี้ว่า Breakdown Pressure) ในช่วงระหว่าง สภาวะวิกฤต และ ต่ำกว่าสภาวะวิกฤต ค่า Entrainment Ratio จะลดลงจนเท่ากับศูนย์ ( ณ Breakdown Pressure) แบบจำลองที่สภาวะ Breakdown ถูกสร้างขึ้นโดย Li et al. [2] และถูกใช้ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Huang et al [1]

ความสัมพันธ์ระหว่างความดันของของไหลปฐมภูมิและเลขมัคที่ทางเข้าท่อผสมหน้าตัดคงที่สามารถหาได้โดย

$$\frac{P_g}{P_{xp}} \approx \left(1 + \frac{k-1}{2} M_{xp}^2\right)^{k/(k-1)} \quad (2.42)$$

โดย  $P_{xp}$  คือความดันของของไหลปฐมภูมิที่บริเวณ  $x$  และ  $M_{xp}$  คือเลขมัคของของไหลปฐมภูมิที่ตำแหน่ง  $x$

ที่จุด Breakdown ค่า Entrainment Ratio เป็นศูนย์แสดงถึงไม่มีของไหลทุติยภูมิ ถูกดูดเข้าสู่อีเจกเตอร์ ดังนั้นอัตราการไหลของมวลของไหลทุติยภูมิ เท่ากับศูนย์ และที่หน้าตัด  $x-x$  มีความดันเท่ากับความดันของเครื่องระเหย ( $P_{xs}=P_e$ )

ดังนั้น

$$P_{xp} = P_{xs} = P_e \quad (2.43)$$

อัตราการไหลของมวลที่ไหลผ่านหัวพ่นในภาวะต่ำกว่าสภาวะวิกฤต มีค่าเท่ากับสมการที่ 2.24 อุณหภูมิและความเร็วของของไหลทุติยภูมิ ที่หน้าตัด  $x-x$  คำนวณได้จาก

$$\frac{T_g}{T_{xp}} = 1 + \frac{(k-1)}{2} M_{xp}^2 \quad (2.44)$$

และ

$$u_{xp} = M_{xp} \sqrt{kRT_{xp}} \quad (2.45)$$

ภายใต้การทำงานในสภาวะต่ำกว่าสภาวะวิกฤต และที่ Breakdown Pressure จากการอนุรักษ์โมเมนตัม จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (2.46)

$$\dot{Q}_{mp}(\dot{m}_p u_{xp} + \dot{m}_s u_{xs}) = (\dot{m}_p + \dot{m}_s) u_{m2}$$

โดย  $u_{m2}$  คือความเร็วของการไหลหลังจากผ่านหน้าตัด m-m ที่จุด Breakdown ไม่มีการดูดของไหลทุติยภูมิ ดังนั้น  $\dot{m}_{xs} = 0, u_{xs} = 0$

$$\dot{m}_p \left( c_p T_{xp} + \frac{u_{xp}^2}{2} \right) + \dot{m}_s \left( c_p T_{xs} + \frac{u_{xs}^2}{2} \right) = (\dot{m}_p + \dot{m}_s) \left( c_p T_{m2} + \frac{u_{m2}^2}{2} \right) \quad (2.47)$$

ที่หน้าตัด m-m

$$u_{m2} = M_{m2} \sqrt{kRT_{m2}} \quad (2.48)$$

จากหน้าตัด m-m ไปถึงทางเข้า Diffuser

$$\frac{P_{32}}{P_{m2}} = 1 + \frac{2k}{k+1} (M_{m2}^2 - 1) \quad (2.49)$$

และ

$$M_{32}^2 = \frac{1 + \frac{(k-1)}{2} M_{m2}^2}{k M_{m2}^2 - \frac{(k-1)}{2}} \quad (2.50)$$

ที่ทางออกของ diffuser ความดัน breakdown,  $P_{cb}$  มีค่า

$$\frac{P_{cb}}{P_{32}} \approx \left( 1 + \frac{k-1}{2} M_{32}^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (2.51)$$

โดยตัวห้อย 2 เพื่อแสดงถึงความแตกต่างจากเทอมในการทำงานในสภาวะวิกฤต

#### 2.5.4 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ

ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of performance ,COP) ของระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g + \dot{W}_p} \quad (2.52)$$

โดย ความสามารถในการทำความเย็นเท่ากับ

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_s (h_{eo} - h_{ei}) \quad (2.53)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$h_{eo}$  และ  $h_{ei}$  คือเอนทัลปีขาออกและขาเข้าเครื่องระเหยตามลำดับอัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องกำเนิดไอเท่ากับ

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_p(h_{go} - h_{gi}) \quad (2.54)$$

$h_{go}$  และ  $h_{gi}$  คือเอนทัลปีขาออกและขาเข้าของเครื่องกำเนิดไอ  
งานของปั๊ม เท่ากับ

$$\dot{W}_p = \dot{m}_p(h_{gi} - h_{co}) \quad (2.55)$$

โดย  $h_{co}$  คือเอนทัลปี ณ ทางออกของเครื่องควบแน่นจะได้

$$COP = Rm \frac{(h_{eo} - h_{ei})}{(h_{go} - h_{co})} \quad (2.56)$$

## 2.6 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในโปรแกรมการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ANSYS (FLUENT) 19

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการไหล

ของไหลคือ สสารที่มีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างต่อเนื่อง เมื่อมีความเค้นเฉือนมากระทำจะทำให้สสารเกิดการเคลื่อนที่และเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ของเหลวและก๊าซจัดว่าเป็นรูปแบบของของไหลชนิดหนึ่ง แต่ก๊าซเป็นของไหลที่อัดตัวได้ ส่วนของเหลวเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ หรือสามารถอัดตัวได้ภายใต้ความดันสูง ของไหลอัดตัวได้เป็นของไหลที่มีความหนาแน่นไม่คงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับหลายๆตัวแปร เช่น ก๊าซที่อยู่ในสภาวะปิดสนิท เมื่อได้รับความร้อนจะทำให้มีความหนาแน่นสูงขึ้น แต่เมื่อสูญเสียความร้อน ความหนาแน่นของก๊าซจะลดลง ในงานวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะของไหลที่อัดตัวได้เนื่องจากสสารที่อยู่ภายในอีเจกเตอร์นั้นมีสถานะเป็นก๊าซทั้งหมด ซึ่งก๊าซเป็นของไหลที่อัดตัวได้

### การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน

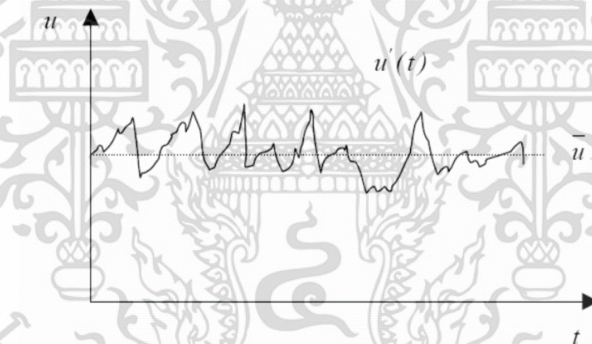
การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วนนั้นพิจารณาจากความเร็วของการไหลของของไหลเป็นหลัก โดยที่ที่ความเร็วของการไหลต่ำจะทำให้ของไหลเกิดการไหลแบบราบเรียบ แต่ถ้าค่าความเร็วสูงจะทำให้ของไหลเกิดการไหลแบบปั่นป่วน อีกทั้งยังสามารถพิจารณาได้จากความหนืดของของไหล ถ้าของไหลมีความหนืดสูง มักจะเกิดการไหลแบบราบเรียบเพราะแรงต้านความเร็วในการไหลมาก ในทางกลับกันถ้าของไหลมีความหนืดต่ำ จะทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนเพราะแรงต้านความเร็วในการไหลน้อย ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การไหลแบบปั่นป่วนเป็นหลักเนื่องจากพฤติกรรม

การไหลของของไหลภายในอีเจกเตอร์นั้นมักเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง อีกทั้งสสารที่อยู่ภายในอีเจกเตอร์ มีสถานะเป็นก๊าซทั้งหมดซึ่งมีค่าความหนืดต่ำ

### สมการควบคุมของการไหลของของไหล

สมการควบคุมของการไหลของของไหล โดยปกติแล้วค่าตัวแปรต่าง ๆ สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนมักมีค่าไม่คงที่ และค่าต่าง ๆ เหล่านี้นั้นจะเป็นสมการความสัมพันธ์ที่ขึ้นกับเวลา กล่าวก็คือค่าเหล่านี้จะเปลี่ยนไปตามเวลาที่เปลี่ยนไป ดังเช่น ตัวอย่างของความเร็ว  $u$  ตามรูปที่ 2.11 ซึ่งปัญหาลักษณะเช่นนี้ทำให้การคำนวณตัวแปรมีความยุ่งยากเพิ่มมากขึ้นเป็นอย่างมาก เพราะฉะนั้นจึงทำการสมมุติว่าคุณสมบัติต่าง ๆ ที่พิจารณาในกรณีการไหลแบบปั่นป่วนนี้ สามารถแบ่งออกเป็นได้ 2 ส่วน โดยใช้หลักการ Reynolds decomposition ได้ดังนี้

1. ส่วนที่ค่าเฉลี่ยไม่ขึ้นกับเวลา
2. ส่วนที่ค่าความผันผวนขึ้นกับเวลา



รูปที่ 2.11 ลักษณะของความเร็วในการไหลแบบปั่นป่วน

สมการพื้นฐานของการไหลแบบปั่นป่วนสำหรับสมการความต่อเนื่อง และสมการโมเมนตัม สามารถเขียนสมการทั้งสองให้อยู่ในรูปของเทนเซอร์ ได้ดังนี้

### สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2.57)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สมการโมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\mu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] \quad (2.58)$$

จาก Reynold decomposition ทุกตัวแปรในการไหลสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนที่เป็นส่วนที่เป็นค่าเฉลี่ยและส่วนที่แทนผลของการสั่น ตัวอย่างเช่น ฟังก์ชัน สามารถแบ่งได้เป็น

$$f = \bar{f} + f' \quad (2.59)$$

จากนั้นทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง (time-averaging) จะได้ว่า

$$\bar{f}(x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(x,t) dt \quad (2.60)$$

ซึ่งเมื่อทำการเฉลี่ยแล้วจะทำให้ค่าเฉลี่ยของส่วนที่แทนผลของค่าผันผวนกับเวลา นั้นมีค่าเป็นศูนย์ ( $\bar{f}' = 0$ ) และจะได้ค่าเฉลี่ยของผลคูณทั้งสองตัวแปรมีค่าเป็น  $\overline{fg} = \bar{f}\bar{g} + \overline{f'g'}$  หากทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่งกับสมการความต่อเนื่องและสมการโมเมนตัมจะได้

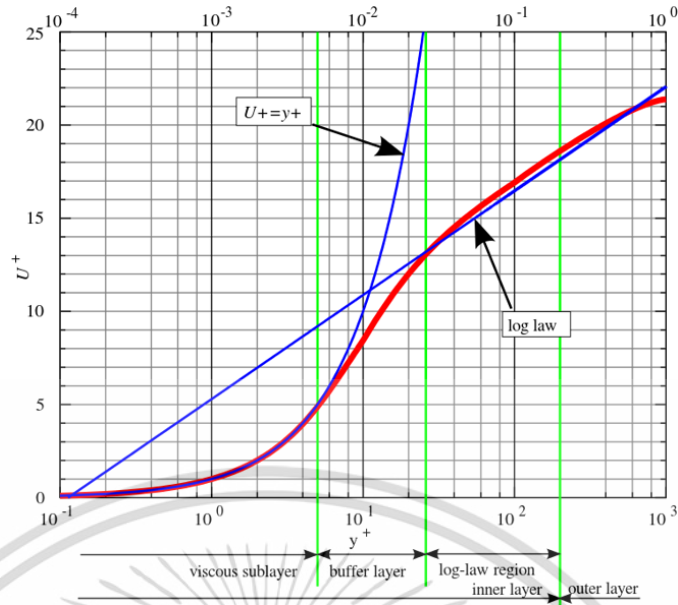
$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.61)$$

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\mu(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i})] + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.62)$$

ซึ่งสมการ 2.61 และ 2.62 นี้ เรียกว่าสมการ Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)

## The universal law of the wall

ในพลศาสตร์ของของไหล กฎสากลของขอบผนัง คือ กฎที่กล่าวว่า ค่าของความเร็วเฉลี่ย ณ จุดหนึ่ง ๆ อันเนื่องมาจากการไหลแบบปั่นป่วน เป็นอัตราส่วนโดยตรงกับฟังก์ชันลอการิทึม ของระยะห่างจากขอบผนังของจุดนั้น ๆ หรือรู้จักกันในอีกชื่อหนึ่งว่าขอบเขตของการไหลของของไหลดัง แสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 the universal law of wall [7]

สูตรลอการิทึมทั่วไป

สูตรลอการิทึมทั่วไป สำหรับกฎสากลของขอบผนังประกอบไปด้วยสูตรสมการต่าง ๆ ดังนี้

u plus

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \tag{2.63}$$

โดยที่  $u^+$  คือ ความเร็วไร้มิติ

$u$  คือ ความเร็วที่ขนานกับผนัง

$u_\tau$  คือ ความเร็วเสียดทาน

y plus

$$y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu} \tag{2.64}$$

โดยที่  $y^+$  คือ พิกัดของผนัง (dimensionless)

$y$  คือ ระยะห่างจากผนัง

$\nu$  คือ kinematic viscosity

$u_\tau$  คือ friction velocity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ สงวนลิขสิทธิ์ หรือเป็นการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การคำนวณของไหลด้วยเทคนิคการคำนวณแบบพลศาสตร์

การคำนวณของไหลด้วยเทคนิคการคำนวณแบบพลศาสตร์ เป็นการคำนวณเพื่อศึกษาและแก้ไขปัญหาของของไหลโดยวิธีการจำลองพฤติกรรมของไหลของของไหลที่ไม่สามารถศึกษาด้วยการสังเกตและการมองเห็น โดยใช้สมการพื้นฐานของวิธีการเชิงตัวเลข ในการคำนวณเพื่อเปลี่ยนจากสมการควบคุมของการไหลของของไหล ต่าง ๆ ซึ่งประกอบไปด้วยสมการการไหลของนาเวียร์-สโตคในรูปแบบของการอนุรักษ์พลังงาน สมการความต่อเนื่อง และสมการการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมไปเป็นสมการทางพีชคณิต เพื่อหาผลลัพธ์ของสมการด้วยวิธีการเชิงตัวเลข ซึ่งการเปลี่ยนจากสมการควบคุมของการไหลของของไหลต่าง ๆ ไปเป็นสมการทางพีชคณิต นั้นทำได้โดยวิธีการจำกัดทางปริมาตร ซึ่งโดยปกติแล้วการคำนวณของไหลด้วยเทคนิคการคำนวณแบบพลศาสตร์จะถูกแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนก่อนกระบวนการประมวลผล (pre-processing step) ขั้นตอนการแก้ไขปัญหาหรือการจำลอง (solver step or simulation) และ ขั้นตอนหลังกระบวนการประมวลผล (post-processing)

### Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation

สมการ Reynold Averaged Navier-stokes Simulation (RANS) เป็นสมการที่ใช้ในการควบคุมค่าปริมาณการไหลเฉลี่ย ในช่วงของการปั่นป่วนที่ถูกจำลอง ซึ่งเป็นสมการที่ช่วยประหยัดเวลาและทรัพยากรในการแก้ปัญหาคำนวณของไหลด้วยเทคนิคการคำนวณแบบพลศาสตร์ ซึ่งถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในวงการวิศวกรรม และมีให้ใช้ในโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 โดยประกอบไปด้วย Spalart-Allmaras,  $k - \epsilon$ ,  $k - \omega$  และ Reynold stress model (RSM) ซึ่งหลักพื้นฐานของสมการ Reynold Averaged Navier-stokes Simulation (RANS) นั้นมักใช้คำนวณของไหลที่มีค่าการไหลขึ้นอยู่กับเวลา

### โมเดลจำลองความปั่นป่วนแบบ Realizable $k - \epsilon$

โมเดลจำลองความปั่นป่วนแบบ Realizable  $k - \epsilon$  คือโมเดลที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่จาก Standard  $k - \epsilon$  โดยมีสิ่งสำคัญที่แตกต่างกันดังนี้

- i. แบบจำลอง Realizable  $k - \epsilon$  ได้มีการเพิ่มสมการความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน
- ii. สมการการถ่ายเท อัตราการแยกสลาย (dissipation rate,  $\epsilon$ ) ถูกใช้จากสมการการถ่ายเทของค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผันผวนกระแสน

คำว่า Realizable หมายถึงแบบจำลองสามารถตอบสนองข้อจำกัดทางคณิตศาสตร์ของความเค้นเรย์โนลด์ส ประกอบกับความคงเส้นคงวาของการภาพการไหลแบบปั่นป่วน ข้อดีของแบบจำลองนี้มีความแม่นยำมากกว่าในการทำนายการแพร่กระจาย ทั้งแบบระนาบและลำเจ็ท

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k \quad (2.65)$$

และ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (2.66)$$

โดยที่

$$C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (2.67)$$

ในแบบจำลอง  $k - \varepsilon$  อีกค่าความหนืดเอ็ดดี สามารถคำนวณได้จาก

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.68)$$

ความแตกต่างระหว่างแบบจำลอง Realizable  $k - \varepsilon$  และแบบจำลอง Standard และแบบจำลอง RNG  $k - \varepsilon$  คือ  $C_\mu$  ไม่เป็นค่าคงที่อีกต่อไป และสามารถคำนวณได้จาก

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{k U^*}{\varepsilon}} \quad (2.69)$$

โดยที่

$$U^* \equiv \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \Omega_{ij} \dot{\Omega}_{ij}} \quad (2.70)$$

และ

$$\dot{\Omega} = \Omega_{ij} - 2 \varepsilon_{ijk} \omega_k \quad (2.71)$$

$$\bar{\Omega}_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k \quad (2.72)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่ของแบบจำลองมีค่าเท่ากับ

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.2$$

## 2.7 ขั้นตอนก่อนกระบวนการประมวลผล

ขั้นตอนก่อนกระบวนการประมวลผลเป็นขั้นตอนที่ใช้ในการระบุขอบเขตทางกายภาพของแบบจำลองซึ่งขอบเขตทางกายภาพ เหล่านั้นจะถูกแบ่งออกเป็นจำนวนก ตามความเหมาะสมด้วยวิธีการเลือกจำนวนกริดที่เหมาะสม

โดยปกติแล้วนั้นขั้นตอนนี้ยังเป็นขั้นตอนสำคัญที่จะกำหนดทิศทางการไหลของของไหลด้วยการระบุรูปแบบของการไหลของของไหลผ่านทางหน้าตัดซึ่งมีวิธีการดังต่อไปนี้

- i การสร้างรูปทรงหรือแบบจำลองที่สนใจ ซึ่งเรียกว่าส่วนการคำนวณหลัก
- ii การสร้างจำนวนกริดที่น้อยที่สุดที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณ ซึ่งสามารถทำได้โดยวิธีการเลือกจำนวนกริดที่เหมาะสม
- iii การเลือกปรากฏการณ์ทางกายภาพหรือทางเคมีที่จำเป็นสำหรับการคำนวณ
- iv การเลือกค่าคุณสมบัติของสารทำงาน
- v การกำหนดค่าและขอบเขตหรือบริเวณที่จะทำการศึกษา

## 2.8 การเลือกจำนวนกริดที่เหมาะสม

การเลือกจำนวนกริดที่เหมาะสม นั้นเกี่ยวข้องกับความแม่นยำและความสมเหตุสมผลของข้อมูลเชิงตัวเลข ที่ได้จากการคำนวณของไหลด้วยเทคนิคคำนวณแบบพลศาสตร์ โดยเงื่อนไขและการคำนวณเพื่อหาจำนวนกริดที่เหมาะสม สามารถทำได้โดยการใช้สูตรสมการทางคณิตศาสตร์ ในการคำนวณเพื่อหาผลลัพธ์ดังกล่าว เพื่อเลือกจำนวนกริดที่เหมาะสม สำหรับการจำลองเชิงตัวเลขในโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19

สำหรับผลลัพธ์ของการเลือกจำนวนกริดที่เหมาะสมที่ได้จากการคำนวณด้วยสูตรสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งก็คือจำนวนกริดที่น้อยที่สุด ที่ต้องการจำลองเชิงตัวเลขนั้นยังสามารถประหยัดเวลาที่ใช้ในการคำนวณของไหลด้วยเทคนิคคำนวณแบบพลศาสตร์ และผลลัพธ์ที่ได้ออกมาแล้วยังมีความแม่นยำและมีความสมเหตุสมผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความผิดพลาดของข้อมูลเชิงตัวเลข (truncation error,  $\varepsilon$ ) ที่เกิดจากการเลือกจำนวนกริดที่เหมาะสมเกิดจากผลต่างระหว่างค่าผลลัพธ์เชิงตัวเลขของจำนวนกริดอิสระ (grid independent result,  $\phi_{grid\ independent}$ ) และค่าผลลัพธ์เชิงตัวเลข ณ ปัจจุบัน (current numerical result,  $\phi$ )

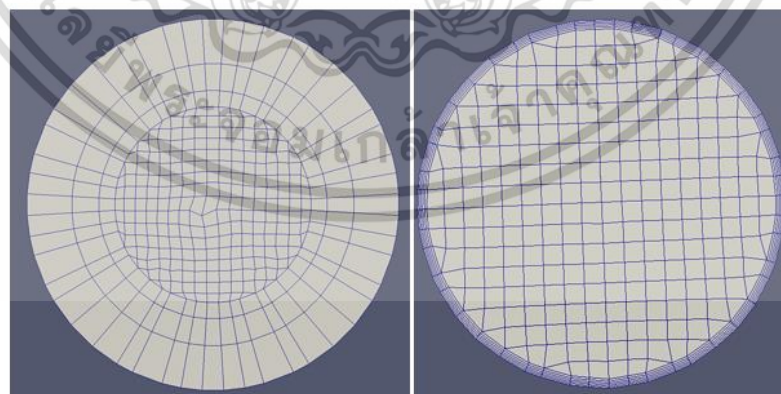
$$\varepsilon = \phi_{grid\ independent} - \phi \quad (2.73)$$

จากผลลัพธ์ที่ได้เมื่อกริดมีจำนวนมากขึ้นค่าความผิดพลาดของข้อมูลเชิงตัวเลขจะมีค่าน้อยลง

### การสร้างกริดที่เหมาะสมบริเวณใกล้ขอบผนัง

การสร้างกริดที่เหมาะสมบริเวณใกล้ขอบผนังเป็นหนึ่งในวิธีการสำคัญสำหรับการแก้ปัญหาการไหลของของไหลด้วยเทคนิคคำนวณแบบพลศาสตร์ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องและมีความแม่นยำมากที่สุด

ซึ่งโดยปกติแล้วโมเดลการจำลองการไหลแบบปั่นป่วน  $k - \varepsilon$  นั้นจะพิจารณาเฉพาะช่วงพื้นที่การไหลแบบปั่นป่วนที่ถูกพัฒนาอย่างเต็มที่แล้วเท่านั้น โดยมีเทคนิคในการสร้างกริดที่เหมาะสมบริเวณใกล้ขอบผนัง ขนาดของกริดที่บริเวณขอบผนังที่เหมาะสมถูกกำหนดโดยค่า  $wall\ y^+$  ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.13 ขนาดของกริดบริเวณใกล้ขอบผนังเมื่อใช้ค่า  $wall\ y^+$  ที่ต่างกัน

ภาพซ้ายมือคือขนาดของกริดสำหรับ  $wall\ y^+$  ประมาณ 30 และภาพขวามือ คือขนาดของกริดที่มี  $wall\ y^+$  ประมาณ 1 [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้ใช้ขนาดของกริดที่เหมาะสมกับ wall  $y^+$  ไม่เกิน 11.225 (Scalable wall function)

## 2.9 ขั้นตอนการแก้ไขปัญหาหรือการจำลอง

ขั้นตอนการแก้ไขปัญหาหรือการจำลอง คือ ขั้นตอนการแก้ไขสมการที่เกี่ยวข้องกับปัญหาของของไหลทั้งหมด และกระบวนการทำซ้ำของการแก้ไขปัญหาเพื่อให้ข้อมูลที่ได้มีความแม่นยำและความน่าเชื่อถือมากที่สุด ซึ่งการแก้พีชคณิตเชิงตัวเลขนั้นประกอบไปด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

- i การรวมสมการควบคุมของของไหลของของไหล ตลอดปริมาตรที่ถูกจำกัด
- ii การจัดแบ่งจำพวกของสมการ discretizing ให้อยู่ในจำพวกเดียวกัน อาทิเช่น สมการการพาความร้อน สมการการแพร่ และสมการต้นกำเนิด
- iii การแก้สมการพีชคณิตด้วยวิธีการทำซ้ำของการแก้ไขปัญหา

## 2.10 ขั้นตอนหลังกระบวนการประมวลผล

ขั้นตอนหลังกระบวนการประมวลผลเป็นขั้นตอนที่ถัดมาจากขั้นตอนการแก้ไขปัญหาหรือการจำลองเพื่อดูผลลัพธ์ที่ต้องการศึกษาซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

- i การเรียกแสดงแบบจำลองต้นแบบ (domain geometry) หรือแสดงหน้าตาต่างของกริด (grid display)
- ii พล็อตเวกเตอร์ (vector plot)
- iii พล็อตคอนทัวร์ (contour plot)
- iv พล็อตหน้าตัดแบบสองมิติและสามมิติ (2D and 3D surface plot)
- v การตรวจจับอนุภาค (particle tracking)
- vi การดูค่าการจัดการต่าง ๆ เช่น การเคลื่อนที่ (translation) การหมุน (rotation) อัตราส่วน (scaling)
- vii การปรับแต่งสีของข้อมูลที่ได้หลังการคำนวณ (color postscript output)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Huang et al.[1] ทำการศึกษาทฤษฎีการออกแบบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยนำการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการทำนายประสิทธิภาพของอีเจคเตอร์ที่การทำงานที่อยู่ในสภาวะวิกฤต การผสมแบบความดันคงที่ถูกสมมุติให้เกิดขึ้นภายในส่วนพื้นที่ท่อผสมหน้าตัดคงที่ของ อีเจคเตอร์ และการไหลที่ถูกดึงมาจากเครื่องระเหยที่เงื่อนไขที่ถูกทำให้เกิดการโซ้ค ได้ทำการทดลองเพื่อนำผลการทดลองมายืนยันกับผลการวิเคราะห์ของการใช้ อีเจคเตอร์ ที่มีรูปทรงแตกต่างกัน และใช้สาร R141b เป็นสารทำงานและนำผลการทดลองมาหา สัมประสิทธิ์  $\eta_p$ ,  $\eta_s$ ,  $\phi_p$  และ  $\phi_m$  ที่ถูกกำหนดไว้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยจับคู่ผลการทดลองกับผลการวิเคราะห์และแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้สัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดลองสามารถทำนายประสิทธิภาพของ อีเจคเตอร์ได้

Li et al.[2] ทำการศึกษาทฤษฎีการออกแบบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยนำการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการทำนายประสิทธิภาพของอีเจคเตอร์ที่การทำงานที่อยู่ในสภาวะวิกฤตและสภาวะต่ำกว่าสภาวะวิกฤต การผสมแบบความดันคงที่ถูกสมมุติให้เกิดขึ้นภายในส่วนพื้นที่ท่อผสมหน้าตัดคงที่ของอีเจคเตอร์ และการไหลที่ถูกดึงมาจากเครื่องระเหยที่เงื่อนไขที่ถูกทำให้เกิดการโซ้ค ได้ทำการทดลองเพื่อนำผลการทดลองมายืนยันกับผลการวิเคราะห์ของการใช้อีเจคเตอร์ที่มีรูปทรงแตกต่างกันและใช้สาร R141b, อากาศ, R245fa เป็นสารทำงานและนำผลการทดลองมาหา สัมประสิทธิ์  $\eta_p$ ,  $\eta_s$ ,  $\phi_p$ ,  $\phi_m$  สำหรับสภาวะวิกฤต และ  $\phi_{mp}$  สำหรับสภาวะต่ำกว่าสภาวะวิกฤต (เพื่อทำนายเงื่อนไขที่ทำให้เกิดการ breakdown ที่อีเจคเตอร์ไม่สามารถทำหน้าที่ที่ได้รับมอบหมายได้) ที่ถูกกำหนดไว้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยจับคู่ผลการทดลองกับผลการวิเคราะห์และพัฒนาแบบจำลองโดยวิธี Sparsity-enhanced optimization และแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาแล้วโดยใช้สัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดลองสามารถทำนายประสิทธิภาพของอีเจคเตอร์ได้ใกล้เคียงมากกว่าแบบจำลองของ Huang et al. [1]

Shestopalov et al.[3] ทำการทดลองโดยแนะนำเทคนิคการทดลองของระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์ โดยใช้สารทำงานเป็นสาร R245fa และรวบรวมผลการทดลองนำมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์เมื่อใช้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์ภายใต้สภาวะการทำงานวิกฤตที่ถูกออกแบบไว้มีค่ามากกว่า 10% ของประสิทธิภาพที่ได้จากทฤษฎีเนื่องจากอีเจคเตอร์ที่ใช้ทำการทดลองมีความเป็นกระบวนการย้อนกลับไม่ได้และมีการสูญเสียพลังงานน้อยกว่าค่าที่สมมติฐานในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Mwesigye et al. [4] ทำการทดลองและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยนำผลการทดลองของระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์ของสารทำความเย็น R141b โดย Huang et al.[1] และผลการทดลองของระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์ของสารทำความเย็น R245fa โดย Li et al.[2] มาพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธี non-linear regression มาทำนายประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์โดยใช้สารทำความเย็นที่มีพฤติกรรมและคุณสมบัติใกล้เคียงกันนั้นคือต้องเป็นสารทำความเย็นแบบแห้งและไอเซนโทรปิก โดยได้ค่าสัมประสิทธิ์เป็นสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\phi_p = 1.139 + 0.01768 \frac{A_3}{A_t} - 0.009797 \frac{P_g}{P_e} - 1.08\bar{R} \quad (2.74)$$

$$\phi_m = 0.8264 - 0.01254 \frac{A_3}{A_t} - 0.005804 \frac{P_g}{P_e} + 0.4589\bar{R} \quad (2.75)$$

$$\phi_{mp} = 0.8802 - 0.09023 \frac{A_r}{A_{rt}} + 0.00158 \left( \frac{P_g}{P_e} \right)^k \quad (2.76)$$

โดย  $\bar{R}$  คืออัตราส่วนค่าคงที่แก๊สของสารทำความเย็นต่อค่าคงที่แก๊สของอากาศ,  $A_{rt}$  คืออัตราส่วนพื้นที่ขาออกของอีเจคเตอร์ ต่อ พื้นที่คอคอดของหัวพ่นซูเปอร์โซนิก ได้ค่าประสิทธิภาพจากการทำนายของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใกล้เคียงมากขึ้นและสามารถใช้ทำนายสารทำความเย็นสารอื่น ๆ ที่ใกล้เคียงกับ 2 สารที่ใช้พัฒนาแบบจำลองได้ เช่นสารทำความเย็น R1233zd(E)

Thongtip et al.[5] ใช้ CFD ในการทำนายประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์ โดยใช้สารทำความเย็น R141b และทำการทดสอบระบบทำความเย็นสำหรับใช้งานสำหรับปรับอากาศในประเทศไทย โดยระบบลูกออกแบบให้มีความสามารถในการทำความเย็นได้ถึง 4500 วัตต์ ใช้เครื่องกำเนิดไออุณหภูมิในช่วง 90 ถึง 98 องศาเซลเซียส ใช้ 2 วิธีการในการทดสอบ 1) ใช้เครื่องทำความร้อนไฟฟ้าเป็นภาระในการทำความเย็น 2) ใช้งานปรับอากาศภายในห้อง หลังจากการทดสอบพบว่า ระบบทำความเย็นแบบ อีเจคเตอร์โดยใช้ R141b เป็นสารทำความเย็นสามารถทำงานได้ในเงื่อนไขการทำงานในประเทศไทยโดยสามารถรองรับภาระในการทำความเย็นได้ถึง 4500 วัตต์

Pianthong et al.[6] ใช้เทคนิค CFD ในการหาลักษณะการไหลของของไหลภายในอีเจคเตอร์ ลักษณะการไหลภายในอีเจคเตอร์มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์โดยในการวิจัยนี้เปรียบเทียบค่าผลการทำนายจากรูปแบบสมมาตรตามแนวแกนกับรูปแบบสามมิติ เมื่อใช้สารทำความเย็นในระบบเป็นน้ำ ที่ทำงานในช่วงอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ ที่ 120 ถึง 140 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเครื่องระเหย 5 ถึง 15 องศาเซลเซียส พบว่าผลลัพธ์ของรูปแบบสมมาตรตามแนวแกนนั้นมีค่าใกล้เคียงกับรูปแบบสามมิติจึงใช้รูปแบบสมมาตรตามแนวแกนก็เพียงพอที่จะทำนายผลการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงานวิจัยขั้นต้น

เนื่องจากการดำเนินงานวิจัยนั้นมีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามทฤษฎีของของไหล, อุณหพลศาสตร์และโปรแกรมการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ANSYS (FLUENT) 19 ต้องมีการทดสอบความถูกต้องโดยการรวบรวมผลการทดลองที่ทำการทดลองจริงจากงานวิจัยต่าง ๆ เพื่อยืนยันว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้นเชื่อถือได้และสามารถทำนายประสิทธิภาพได้

### 3.1 การรวบรวมผลการทดลองจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลการทดลองของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์โดยใช้สารทำความเย็น R141b จาก Huang et al.[1]

ตารางที่ 3.1 หัวพ่นซูเปอร์โซนิกที่ใช้ในการทดลอง

หัวพ่น	throat diameter, $d_t$ (mm)	Exit diameter, $d_{p1}$ (mm)	$A_{p1}/A_t$
A	2.64	4.5	2.905
E	2.82	5.1	3.271

ตารางที่ 3.2 ส่วนพื้นที่หน้าตัดคงที่และรายละเอียดของอีเจคเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง (XX: แบบจำลองอีเจคเตอร์)

ส่วนพื้นที่หน้าตัดคงที่

serial No.	$d_3$ (mm)	Inlet converging angle, ( $^\circ$ )
A	6.70	68
B	6.98	60
G	7.34	60
C	7.60	67
D	8.10	68
E	8.54	67
F	8.84	67
H	9.20	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ส่วนพื้นที่หน้าตัดคงที่และรายละเอียดของอีเจกเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง (XX: แบบจำลองอีเจกเตอร์) (ต่อ)

แบบจำลองอีเจกเตอร์

Ejector model	$A_3/A_t$ (ของหัวพ่น A)	Ejector model	$A_3/A_t$ (ของหัวพ่น E)
AA	6.44	EG	6.77
AB	6.99	EC	7.26
AG	7.83	ED	8.25
AC	8.29	EE	9.17
AD	9.41	EF	9.83
		EH	10.64

ตารางที่ 3.3 ผลการทดลองของระบบทำความเย็นแบบอีเจกเตอร์จาก Huang et al. [1]

หัวพ่น	$T_{gen}(^{\circ}C)$	$T_{evap}(^{\circ}C)$	Experiment $T_{cc}(^{\circ}C)$	Experiment Entrainment ratio, $R_m$
AA $A_r = 6.44$	95	8	42.1	0.1859
	90	8	38.9	0.2246
	84	8	35.5	0.288
	78	8	32.5	0.3257
	95	12	42.5	0.235
	90	12	39.5	0.2946
	84	12	36	0.339
AB $A_r = 6.99$	90	8	37.5	0.2718
	84	8	33.6	0.3117
	78	8	29.5	0.3922

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ผลการทดลองของระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์จาก Huang et al. [1] (ต่อ)

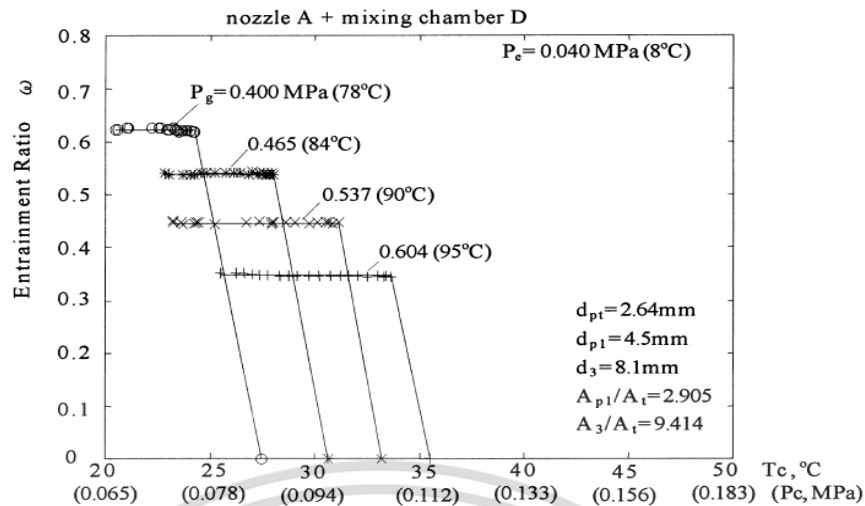
หัวพ่น	$T_{gen}(^{\circ}C)$	$T_{evap}(^{\circ}C)$	Experiment $T_{cc}(^{\circ}C)$	Experiment Entrainment ratio, $R_m$
AG $A_r = 7.73$	95	8	38.6	0.2552
	90	8	36.7	0.304
	84	8	32.3	0.3883
	78	8	29.1	0.4609
	95	12	38.7	0.3503
	90	12	36	0.4034
	84	12	32.4	0.479
	78	21	29.2	0.6132
AC $A_r = 8.29$	95	8	36.3	0.2814
	90	8	33.8	0.3472
	84	8	30.5	0.4241
	78	8	26.9	0.4889
AD $A_r = 9.41$	95	8	33.6	0.3457
	90	8	31.5	0.4446
	84	8	28	0.5387
	78	8	24.4	0.625
	95	12	34.5	0.4541
	90	12	32	0.5422
	84	12	28.9	0.635
	78	21	25.7	0.7412

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ผลการทดลองของระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์จาก Huang et al. [1] (ต่อ)

หัวพ่น	$T_g(^{\circ}\text{C})$	$T_e(^{\circ}\text{C})$	Experiment $T_{cc}(^{\circ}\text{C})$	Experiment Entrainment ratio, $R_m$
EG $A_r = 6.77$	95	8	41	0.2043
EC $A_r = 7.26$	95	8	38.8	0.2273
	95	12	39.3	0.304
ED $A_r = 8.25$	95	8	37.1	0.2902
EE $A_r = 9.17$	95	8	34.2	0.3505
	95	12	34.2	0.4048
EF $A_r = 9.83$	95	8	33	0.3937
	95	12	33.1	0.4989
EH $A_r = 10.64$	95	8	31.3	0.4377

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

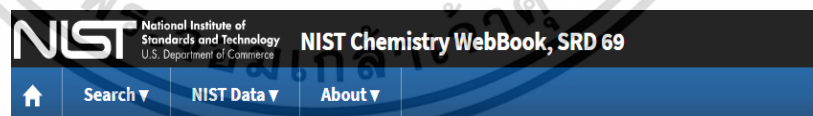


รูปที่ 3.1 กราฟระหว่าง  $T_c$ ,  $P_c$  กับ Entrainment Ratio จากผลการทดลองของงานวิจัย Huang et al. [1]

### 3.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากบทที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบอีเจค จากงานวิจัยของ Mwesigye et al [4] จะถูกสร้างในรูปแบบตารางการคำนวณ โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel ในการช่วยคำนวณ และอ้างอิงข้อมูลคุณสมบัติของสารทำความเย็นจากแหล่งข้อมูลที่น่าเชื่อถือ

ในงานวิจัยนี้เราอ้างอิงคุณสมบัติต่าง ๆ ของสารทำความเย็นจาก NIST (National Institute of Standards and Technology)



## Thermophysical Properties of Fluid Systems

Accurate thermophysical properties are available for several fluids. These data include the following:

- Density
- $C_p$
- Enthalpy
- Internal energy
- Viscosity
- Joule-Thomson coefficient
- Specific volume
- $C_v$
- Entropy
- Speed of Sound
- Thermal conductivity
- Surface tension (saturation curve only)

### รูปที่ 3.2 NIST (National Institute of Standards and Technology)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในภาวะการทำงานในภาวะต่ำกว่าวิกฤต

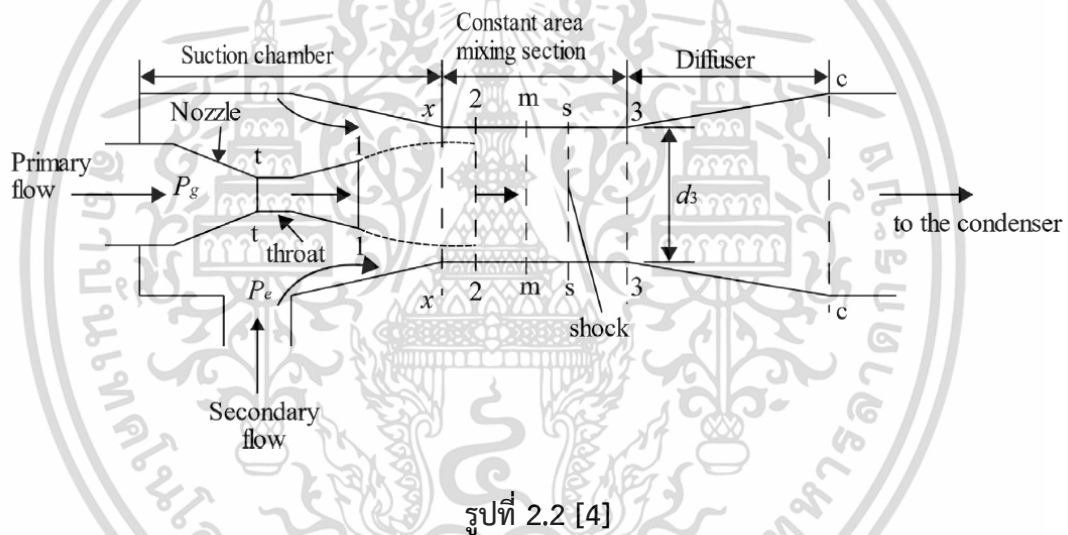
ในตัวอย่างที่จะยกมาแสดงนั้น จะใช้มิติตามแบบจำลองอีเจคเตอร์ AD ตามงานวิจัย Huang et al [1] ดังแสดงในตารางที่ 1 ถึง ตารางที่ 3 โดยใช้อุณหภูมิตั้งต้นของเครื่องกำเนิดไอ 95 °C เครื่องระเหย 8 °C และสารทำงานในระบบคือ สาร R141b

ที่อุณหภูมิ 300 K , มวลโมเลกุลเท่ากับ 116.95 kg/kmol

ค่าคงที่แก๊ส  $R = 71.0904 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,  $C_p=798.5 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,  $k = 1.1241$ ,  $R^* = 0.2477$

แบบจำลองอีเจคเตอร์ AD :  $d_t = 2.64 \text{ mm}$ ,  $A_{p1}/A_t = 2.905$  ,  $d_3 = 8.10 \text{ mm}$ ,  $A_3/A_t = 9.41$

เงื่อนไขการทำงาน :  $T_g = 95^\circ\text{C}$  ,  $T_e = 8^\circ\text{C}$  ,  $P_g = 604.786 \text{ kPa}$  ,  $P_e = 39.973 \text{ kPa}$



ตามสมการที่ 2.24 หาอัตราการไหลของของไหลปฐมภูมิโดยกำหนด  $\eta_p = 0.95$  ตามผลงานวิจัย Huang et al. [1] จะได้

$$\dot{m}_p = P_g \frac{A_t}{\sqrt{T_g}} \sqrt{\frac{k}{R} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/(k-1)}} \sqrt{\eta_p} \tag{2.24}$$

$$\dot{m}_p = 0.01264 \text{ kg/s}$$

ตามสมการที่ 2.25-2.26 แก่สมการหาเลขมัคของของไหลทุติยภูมิที่ตำแหน่งทางออกหัวพ่น,  $M_{p1}$  และ ความดันที่ทางออกหัวพ่น,  $P_{p1}$  จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left(\frac{A_{p1}}{A_t}\right)^2 \approx \frac{1}{M_{p1}^2} \left( \frac{2}{k+1} \left( 1 + \frac{k-1}{2} M_{p1}^2 \right) \right)^{(k+1)/(k-1)} \quad (2.25)$$

$$M_{p1} \approx 2.28949$$

$$\frac{P_g}{P_{p1}} \approx \left( 1 + \frac{k-1}{2} M_{p1}^2 \right)^{k/(k-1)} \quad (2.26)$$

$$P_{p1} = 47.186 \text{ kPa}$$

ตามสมการที่ 2.29 แก้สมการหาความดันของของไหลทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมื่อตั้งสมมติฐานว่าเกิดการ choked  $M_{2s} = 1$  จะได้

$$\frac{P_e}{P_{2s}} \approx \left( 1 + \frac{k-1}{2} M_{2s}^2 \right)^{k/(k-1)} \quad (2.29)$$

$$P_{2s} = 23.171 \text{ kPa}$$

ในช่วงการผสมกันที่ส่วนพื้นที่หน้าตัดผสมคงที่กำหนดให้ความดันคงที่เริ่มตั้งแต่ ตำแหน่งที่ 2

$$P_{2p} = P_{2s} = P_m$$

ตามสมการที่ 2.27-2.28 และ 2.74 แก้สมการหาเลขมัคของปลูมภูมิที่ตำแหน่งทางเข้าท่อผสมหน้าตัดคงที่,  $M_{2p}$  และพื้นที่ตั้งฉากของการไหลของของไหลปลูมภูมิที่ตำแหน่งหน้าตัดคงที่,  $A_{2p}$

$$\frac{P_{2p}}{P_{p1}} \approx \frac{\left( 1 + \frac{(k-1)}{2} M_{p1}^2 \right)^{(k+1)/(k-1)}}{\left( 1 + \frac{(k-1)}{2} M_{2p}^2 \right)^{(k+1)/(k-1)}} \quad (2.27)$$

$$M_{2p} \approx 2.6432$$

$$\phi_p = 1.139 + 0.01768 \frac{A_3}{A_t} - 0.009797 \frac{P_g}{P_e} - 1.08R \quad (2.74)$$

$$\frac{A_{2p}}{A_{p1}} \approx \frac{\left( \frac{\phi_p}{M_{2p}} \right) \left( \frac{2}{k+1} \left( 1 + \frac{(k-1)}{2} M_{2p}^2 \right) \right)^{(k+1)/(2(k-1))}}{\left( \frac{1}{M_{p1}} \right) \left( \frac{2}{k+1} \left( 1 + \frac{(k-1)}{2} M_{p1}^2 \right) \right)^{(k+1)/(2(k-1))}} \quad (2.28)$$

$$A_{2p} \approx 2.3993 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

ตามสมการที่ 2.30-2.31 แก้สมการหาอัตราการไหลของมวลของของไหลทุติยภูมิโดยกำหนด  $\eta_s = 0.85$  ตามผลงานวิจัย Huang et al. [1]

$$\dot{m}_s = P_e \frac{A_{2s}}{\sqrt{T_e}} \sqrt{\frac{k}{R} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/(k-1)}} \sqrt{\eta_s} \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_{2p} + A_{2s} = A_3 \quad (2.31)$$

$$A_{2s} = 2.75 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$\dot{m}_s = 0.004544 \text{ kg/s}$$

จะได้ Entrainment Ratio,  $R_m$  ตามสมการ 2.41 จะได้

$$Rm_{cc} = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_p} \quad (2.41)$$

$$Rm_{cc} = 0.3596$$

ตามสมการที่ 2.32-2.38 แก้สมการหาความดันหลังของไหลทั้งสองได้ผสมและผ่านคลื่นกระแทกตั้งฉาก

$$\frac{T_g}{T_{2p}} = 1 + \frac{(k-1)}{2} M_{2p}^2 \quad (2.32)$$

$$\frac{T_e}{T_{2s}} = 1 + \frac{(k-1)}{2} M_{2s}^2 \quad (2.33)$$

$$\phi_m (\dot{m}_p u_{2p} + \dot{m}_s u_{2s}) = (\dot{m}_p + \dot{m}_s) u_m \quad (2.34)$$

$$\phi_m = 0.8264 - 0.01254 \frac{A_3}{A_t} - 0.005804 \frac{P_g}{P_e} + 0.4589 \tilde{r} \quad (2.75)$$

$$\dot{m}_p \left( c_p T_{2p} + \frac{u_{2p}^2}{2} \right) + \dot{m}_s \left( c_p T_{2s} + \frac{u_{2s}^2}{2} \right) = (\dot{m}_p + \dot{m}_s) \left( c_p T_m + \frac{u_m^2}{2} \right) \quad (2.35)$$

$$u_{2p} = M_{2p} a_{2p} \quad (2.36)$$

$$a_{2p} = \sqrt{kRT_{2p}} \quad (2.37)$$

$$\frac{P_3}{P_m} = 1 + \frac{2k}{k+1} (M_m^2 - 1) \quad (2.38)$$

$$P_3 = 91.0151 \text{ kPa}$$

ตามสมการที่ 2.39-2.40 แก้สมการหาความดันคืบแน่นวิกฤต,  $P_{cc}$  แล้วหาอุณหภูมิคืบแน่นวิกฤต,  $T_{cc}$  ได้

$$M_3^2 = \frac{1 + \frac{(k-1)}{2} M_m^2}{kM_m^2 - \frac{(k-1)}{2}} \quad (2.39)$$

$$\frac{P_{cc}}{P_3} \approx \left( 1 + \frac{k-1}{2} M_3^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (2.40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{cc} = 107.31 \text{ kPa} = 1.073 \text{ bar}$$

$$T_{cc} \approx 33 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

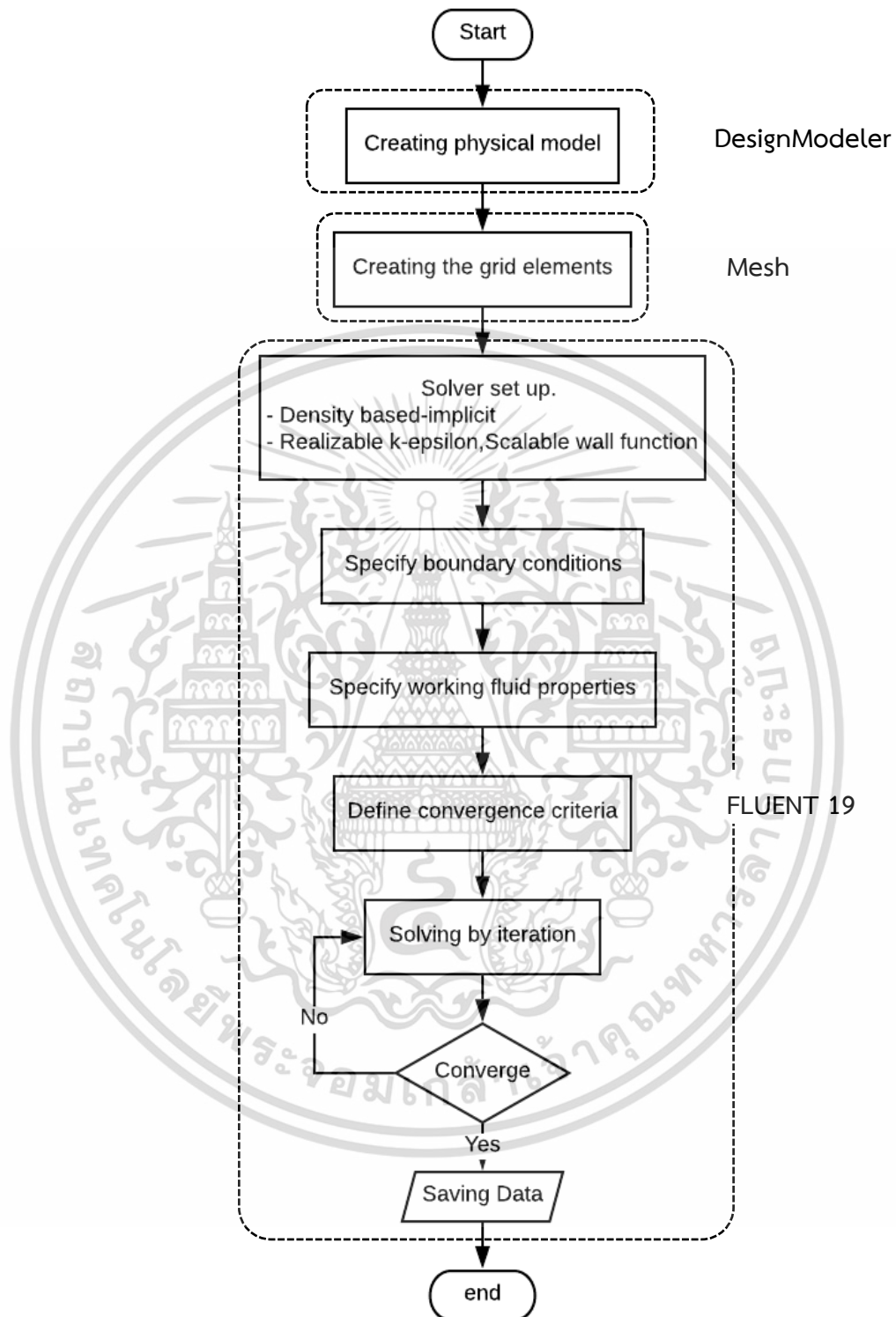
### 3.3 การสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19

ในปัจจุบันการวิเคราะห์ปัญหาการไหลของของไหลด้วยเทคนิคการคำนวณของไหลแบบพลศาสตร์มีไว้เพื่อจำลองพฤติกรรมการไหลของของไหลทั้งสองส่วนโดยประกอบไปด้วยของไหลปฐมภูมิและของไหลทุติยภูมิ ที่เคลื่อนที่ภายในอีเจคเตอร์ซึ่งมีเป้าหมายสำคัญในการทำนายประสิทธิภาพของอีเจคเตอร์ ที่ใช้ R141b, R245fa และ R1233zd(E) เป็นสารทำความเย็นในระบบ (ในรูปแบบของ Entrainment ratio, ความดันควบแน่นวิกฤตและ Break down pressure) และศึกษาพฤติกรรมการไหลของของไหลภายในอีเจคเตอร์ที่ใช้สารทำความเย็นต่างชนิดกันและเงื่อนไขในการทำงานต่างกัน

ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 ในการแก้ปัญหาการไหลของของไหลซึ่งแบ่งโปรแกรมออกเป็น 3 ส่วนในการทำงาน คือ

- i. DesignModeler ทำหน้าที่ในการสร้างในการสร้างแบบจำลองอีเจคเตอร์
- ii. Mesh ทำหน้าที่ในการสร้างกริดให้กับแบบจำลองอีเจคเตอร์
- iii. FLUENT 19 ทำหน้าที่ในการกำหนดโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมเพื่อการจำลองพฤติกรรมการไหลของของไหลผ่านทางกระบวนการทำซ้ำเพื่อให้ได้คำตอบที่ถูกต้องและแม่นยำมากที่สุด

จากส่วนการทำงานสุดท้าย FLUENT 19 สามารถทราบประสิทธิภาพของอีเจคเตอร์และพฤติกรรมการไหลของของไหลภายในอีเจคเตอร์ ได้โดยการสังเกตจากกราฟคอนทัวร์ ซึ่งขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 นั้นสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.3



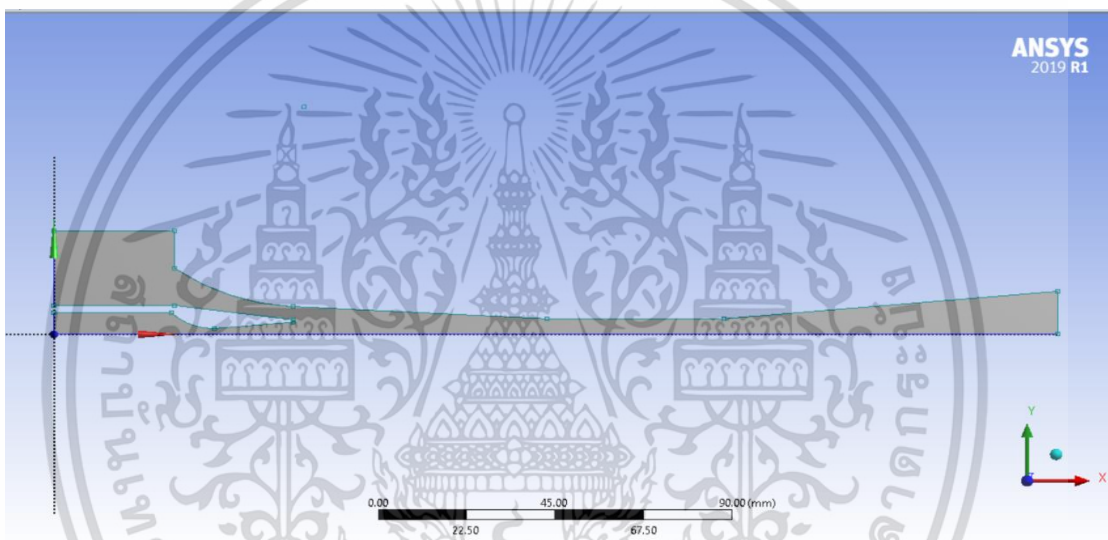
รูปที่ 3.3 The flowchart for implementing the CFD simulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.1 การสร้างแบบจำลอง

สำหรับงานวิจัยนี้แบบจำลองอีเจคเตอร์จะถูกสร้างในรูปแบบที่เป็นสองมิติและมีรูปร่างสมมาตรตามแนวแกน จาก Pianthong et al.[7] เปรียบเทียบระหว่าง รูปแบบ 3 มิติและ 2 มิติพบว่าผลลัพธ์ที่ได้ใกล้เคียงกันโดยที่รูปร่าง 2 มิติใช้เวลาน้อยกว่า รูปทรงของอีเจคเตอร์ประกอบไปด้วย รัศมีความโค้งช่วงลู่อู่เข้า 55.814 มิลลิเมตร และมุมมองศกัหวกระจาย 5 องศา เส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 9 มิลลิเมตร (EJ9.0)

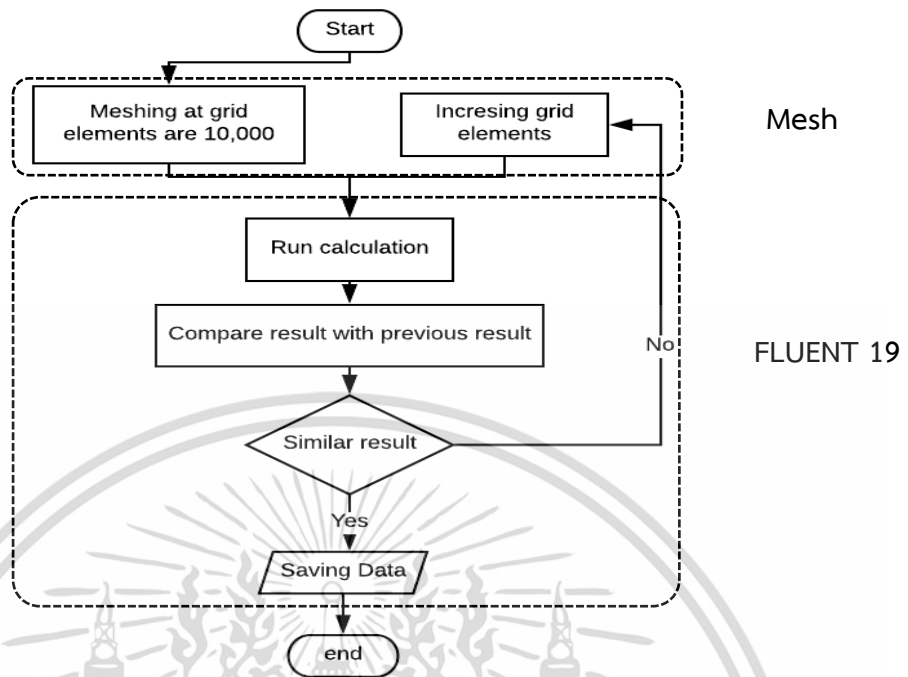
ระยะห่างการวางหัวพ่นกับส่วนลู่อู่เข้าของท่อผสมหน้าตัดคงที่ +30 มิลลิเมตร (Nozzle Exit Position, NXP)



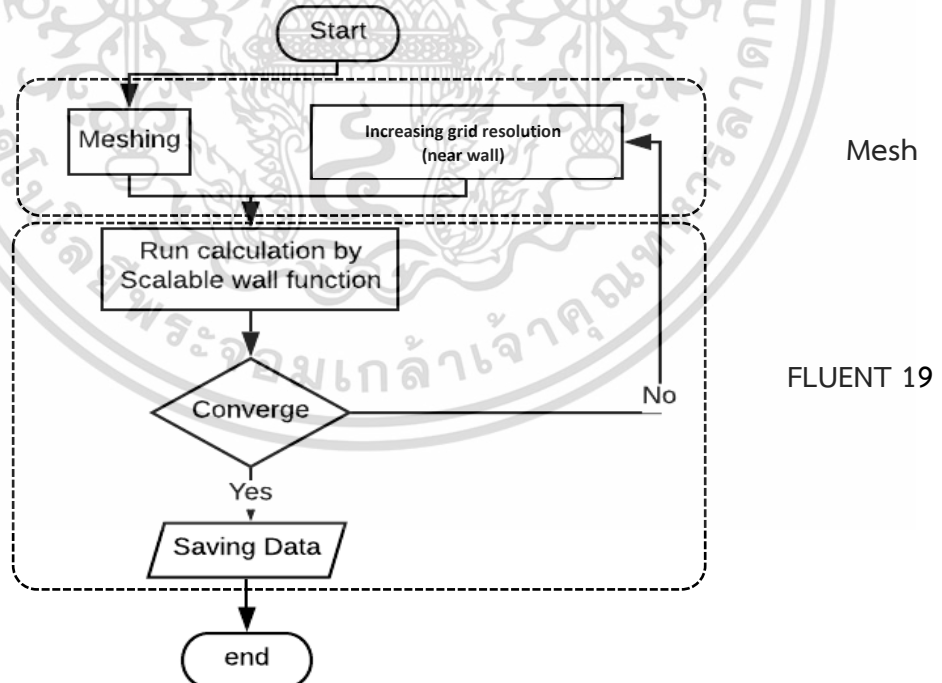
รูปที่ 3.4 แสดงรูปร่างแบบจำลองแบบ 2 มิติแบบสมมาตรตามแนวแกนของอีเจคเตอร์

### 3.3.2 การสร้างกริด

กริดที่สร้างนั้นเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม (quadrilateral grid) เพราะว่ากริดลักษณะนี้นั้นเหมาะสมในงานจำลองด้านการไหลที่มีความเร็วเหนือเสียง เพื่อให้ได้ค่าที่ได้จากการจำลองมีความแม่นยำและความถูกต้องมากที่สุด ในการหาจำนวนกริดที่เหมาะสมใช้กระบวนการที่เรียกว่า การทำ grid independent ดังรูปที่ 3.5 และความละเอียดบริเวณขอบผนังของอีเจคเตอร์ มีค่า  $y^+$  น้อยกว่า 11.225 (Scalable wall function) ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 The flowchart for grid independent



รูปที่ 3.6 The flowchart for Grid resolution

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 Solver Set-up

เงื่อนไขการคำนวณเป็น Density-based Implicit เนื่องจากคุณสมบัติของของไหล เป็นของไหลแบบอัดตัวได้ ค่าความหนาแน่นจะเปลี่ยนแปลงได้ และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเหนือเสียง ด้วยเหตุนี้ลักษณะการไหลภายในอีเจกเตอร์จะเป็นแบบชั้น Laminar เพียงในช่วง Viscous Sublayer หรือช่วงที่ติดกับผนัง และไหลในลักษณะปั่นป่วน Turbulent Fluctuation ในช่วงที่เหลือ จึงใช้ Turbulence Model แบบ Realizable k- $\epsilon$  โดยแบบจำลองนี้ถูกใช้งานอย่างกว้างขวางในการจำลองการไหลภายในอีเจกเตอร์ และ wall function ที่ใช้ในการจำลองการไหลติดกับผนังคือ Scalable Wall Function เนื่องจากค่า wall  $y^+$  ของการไหลมีค่า 11.225

### 3.3.4 ขอบเขตและเงื่อนไขของการจำลอง

ขอบเขตและเงื่อนไขของการจำลอง สำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ ต้นน้ำด้านทางเข้าของของไหล (upstream) ที่หัวพ่นหลัก และส่วนห้องการดูด ให้อยู่ในรูปแบบของความดันทางเข้า (pressure-inlet type) ในขณะที่ส่วนปลายน้ำด้านทางออกของของไหล (downstream) ที่ตัวกระจาย ให้อยู่ในรูปแบบของความดันขาออก (pressure-outlet type)

ที่ความเข้มข้นของการปั่นป่วน ที่ upstream ซึ่งประกอบด้วยของไหลปฐมภูมิและทุติยภูมิ มีค่าเป็นร้อยละ 5 ในขณะที่ความเข้มข้นของการปั่นป่วนที่ชั้นปลายน้ำให้มีค่า อยู่ที่ ร้อยละ 10 ค่าอัตราส่วนความหนืดของการปั่นป่วน (turbulent viscosity ratio) ให้มีค่าอยู่ที่ 10 ทั้งด้าน upstream และ downstream

### 3.3.5 สารทำงานในระบบ

สำหรับสารทำงานในระบบทำความเย็นแบบอีเจกเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้สารทำความเย็นอยู่ 3 ชนิด ได้แก่ HCFC-141b (R141b), HFC-245fa (R245fa) และ HFO-1233zd (R1233zd(E)) ซึ่งถูกจัดอยู่ในชนิดของสารทำความเย็นแบบแห้ง อีกทั้งยังใช้ค่าความหนาแน่นของสารทำความเย็นเป็นค่าในแบบจำลองแก๊สอุดมคติ เนื่องจากการใช้ค่าความหนาแน่นแบบจำลองแก๊สจริงในการแก้ปัญหาของไหล มีความยากและซับซ้อนเกินไปซึ่งใช้เวลาอย่างมากในการจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการไหลภายในอีเจกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.6 เกณฑ์การลู่เข้า

สำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดเกณฑ์การลู่เข้าสำหรับการจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหล และแก้ปัญหาของของไหลภายในอีเจคเตอร์ โดยแบ่งออกเป็นสองหลักเกณฑ์ใหญ่ ๆ ดังนี้

i. ให้ผลรวมของอัตราการไหลของมวลระหว่างด้านพื้นที่ทางเข้าและทางออกมีค่าเป็นศูนย์ นั่นหมายความว่า การไหลลักษณะดังกล่าวอยู่ภายใต้กฎการอนุรักษ์มวล โดยเกณฑ์การลู่เข้าของผลรวมของอัตราการไหลของมวลต้องมีค่าน้อยกว่า  $10^{-7}$

ii. การคำนวณค่าตกค้างหรือค่า Residual ของสัมประสิทธิ์ค่านัยสำคัญ ต้องมีค่าน้อยกว่า  $10^{-7}$  เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและสมเหตุสมผล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

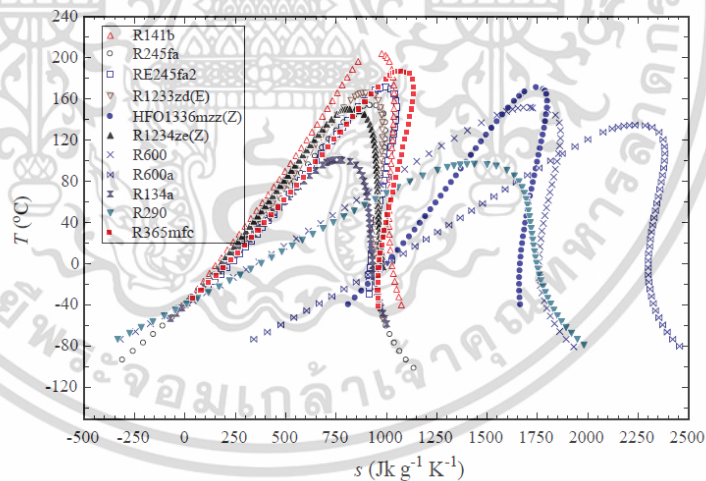
## บทที่ 4

### การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงเรื่องการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลจากงานวิจัยที่มีผลการทดลองที่สามารถหาได้และนำมารวบรวมอภิปรายผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และแบบจำลองจากโปรแกรมANSYS (FLUENT) 19 ต่อไป

#### 4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการตรวจสอบความถูกต้องใช้ สารทำความเย็นชนิด R141b จากผลการทดลองของ Huang et al. [1] ซึ่งสารทำความเย็น R141b จัดเป็นสารทำความเย็นประเภทแห้งซึ่งเป็นสารกลุ่มเดียวกับ R245fa และ R1233zd(E)



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเอนโทรปี ของสารทำความเย็นจากงานวิจัยของ Mwesigye et al.[4]

โดยในการทดสอบความถูกต้องได้ใช้อัตราส่วนขนาดพื้นที่คือคอดระหว่างอีเจคเตอร์และ หัวพ่น (AR), อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ และอุณหภูมิเครื่องระเหย ที่แตกต่างกัน เปรียบเทียบกันระหว่าง Entrainment Ratio ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะและความดันควบแน่นวิกฤต ซึ่งเกี่ยวข้องกับการทำงานของเครื่องควบแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบข้อมูลระหว่าง Entrainment Ratio และความดันควบแน่นวิกฤตที่สภาวะการทำงานและขนาดของอัตราส่วนขนาดพื้นที่คอคอดระหว่างอีเจคเตอร์และหัวพ่นที่แตกต่างกัน

	$T_{gen}(^{\circ}C)$	$T_{evap}(^{\circ}C)$	Rm		% Error	$P_{cc}$ (bar)		% Error
			exp	model		exp	model	
AR 6.44	84	12	0.339	0.351046	3.55327	1.1619	1.15251	-0.8079
	90	12	0.2946	0.278097	-5.6019	1.29173	1.3072	-1.1835
	95	12	0.235	0.227496	-3.19631	1.41833	1.4426	-1.6823
	78	8	0.3257	0.340859	4.65425	1.0295	0.98809	-4.0219
	84	8	0.288	0.266963	-7.3045	1.1422	1.11262	-2.5894
	90	8	0.2246	0.206943	-7.8614	1.2813	1.25008	-2.4368
	95	8	0.1859	0.16567	-10.882	1.4239	1.37491	-3.4406
AR 8.29	95	8	0.2814	0.2865	1.81221	1.1738	1.17138	-0.2064
	90	8	0.3472	0.342888	-1.242	1.0772	1.06368	-1.2552
	84	8	0.4241	0.424166	0.01551	0.95939	0.94646	-1.3479
AR 9.41	95	8	0.3457	0.35965	4.03542	1.0698	1.07311	0.30979
	90	8	0.4446	0.42519	-4.3658	0.98003	0.97452	-0.5621
	84	8	0.5387	0.51934	-3.5944	0.87704	0.86788	-1.0447

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนายผลเทียบกับการทดลองมีความแม่นยำ โดยเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมากที่สุดประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์ ( $T_{gen}=95^{\circ}C$ ,  $T_{evap}=8^{\circ}C$ , AR=6.44 )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

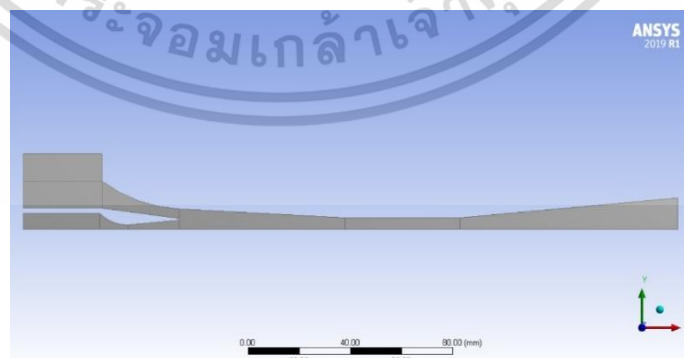
## 4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19

### 4.2.1 รูปแบบจำลองอีเจคเตอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้อง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองอีเจคเตอร์แบบสองมิติที่ใช้สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องกับงานวิจัย Huang et al. [1] และ Thongtip et al.[5] ซึ่งใช้สารทำความเย็น R141b เป็นสารทำความเย็นในระบบ โดยได้กำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ และออกแบบตามมาตรฐาน ESDU ดังนี้

- i. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวพ่นด้านทางเข้า ( $D_{\text{nozzle inlet}}$ ) = 12 mm
- ii. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวพ่นบริเวณคอคอด ( $D_{\text{nozzle throat}}$ ) = 3.2 mm
- iii. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวพ่นด้านทางออก ( $D_{\text{nozzle exit}}$ ) = 6.8 mm
- iv. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอีเจคเตอร์ส่วนการดูด ( $D_{\text{suction chamber}}$ ) = 37 mm
- v. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอีเจคเตอร์ส่วนพื้นที่คงที่ ( $D_{\text{constant area}}$ ) = 9 mm
- vi. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอีเจคเตอร์ส่วนหัวกระจาย ( $D_{\text{diffuser}}$ ) = 42 mm
- vii. ขนาดความยาวของส่วนห้องการดูด ( $L_{\text{suction chamber}}$ ) = 95 mm
- viii. ขนาดความยาวของส่วนพื้นที่คงที่ ( $L_{\text{constant area}}$ ) = 45 mm
- ix. ขนาดความยาวของส่วนหัวกระจาย ( $L_{\text{diffuser}}$ ) = 85 mm
- x. Nozzle Exit Position (NXP) = +30 mm
- xi. องศาของหัวกระจายด้านทางออก ( $\alpha$ ) =  $5^\circ$

โดยแบบจำลองอีเจคเตอร์จะถูกสร้างในรูปแบบที่เป็นสองมิติและมีรูปร่างสมมาตรตามแนวแกนเพื่อให้ประหยัดเวลาในการแก้ปัญหของของไหลในโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 ดังรูปที่ 4.2

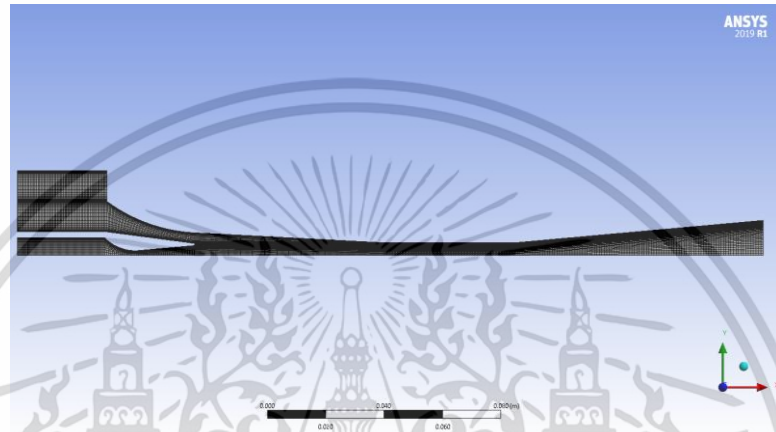


รูปที่ 4.2 แบบจำลองอีเจคเตอร์ในโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 ที่ใช้ R141b เป็นสารทำความเย็นในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 รูปแบบและจำนวนของกริดที่เหมาะสมในการตรวจสอบความถูกต้อง

รูปแบบกริดที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้นั้นจะใช้กริดที่มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมโดยที่กริดเซลล์ ที่บริเวณผนังของอีเจคเตอร์จะมีความหนาแน่นโดยกำหนดให้มีค่า  $wall\ y^+$  จากการสร้างกริดให้มีค่าน้อยกว่า 11.225 (scalable wall function) ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.3 การสร้างกริดสำหรับแบบจำลองอีเจคเตอร์ในโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19

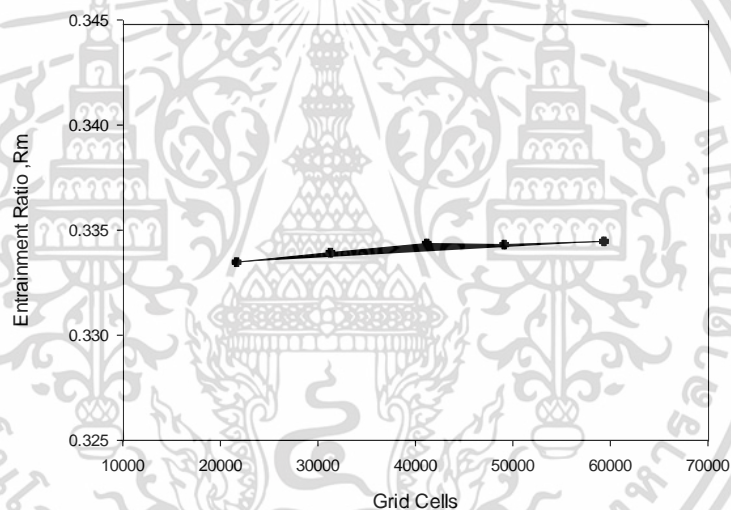


รูปที่ 4.4 ลักษณะของกริดบริเวณขอบผนังของอีเจคเตอร์ที่ให้ค่า  $wall\ y^+$  น้อยกว่า 11.225

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนการตรวจสอบจำนวนกริดเซลล์ที่เหมาะสมนั้นทำได้โดยการหาจำนวนกริดเซลล์ที่มีผลต่อค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของของไหลทุติยภูมิกับอัตราการไหลของของไหลปฐมภูมิหรือค่า Entrainment Ratio ที่คำนวณผลมาจากจำนวนกริดเซลล์ต่างกันทั้งหมด 5 ช่วงได้แก่ 20,000, 30,000, 40,000 และ 50,000 โดยค่าอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอและอุณหภูมิของเครื่องระเหยมีค่าเท่ากับ 95 °C และ 8 °C ตามลำดับ พิจารณาจากความคลาดเคลื่อนของ Entrainment ratio ต้องมีร้อยละความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 1

ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกระบวนการเลือกจำนวนกริดที่เหมาะสมแล้วนั้นสำหรับงานวิจัยนี้จะสร้างกริดให้โมเดลอีเจคเตอร์โดยจำนวนกริดที่สร้างมีค่าอยู่ที่ 40,000 กริด และไม่จำเป็นต้องสร้างจำนวนกริดให้มากกว่านั้น เพื่อลดภาระในการคำนวณของโปรแกรมให้น้อยลงโดยค่าที่ได้จากจำนวนกริดที่มีความละเอียดสูงกว่ามีค่าไม่ต่างกับจำนวนกริดที่ใช้ในการวิจัย ดังรูปที่ 4.5

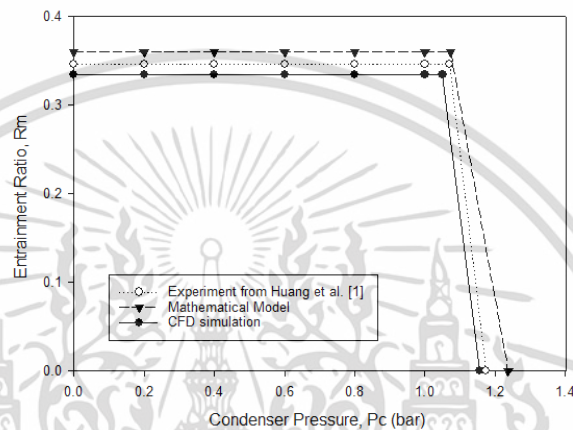


รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment Ratio และ จำนวนกริดเซลล์ในแบบจำลองในโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19

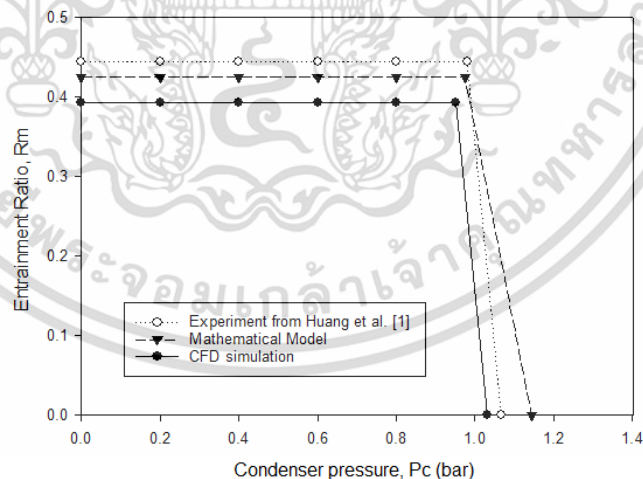
โดยคุณภาพของจำนวนกริดที่สร้างในแต่ละครั้งของกระบวนการหาจำนวนกริดที่เหมาะสมต้องมีคุณภาพหรือลักษณะใกล้เคียงกัน ดังนี้ Maximum skewness below ต้องมีค่าใกล้เคียงกับ 0.497 Orthogonal quality ต้องมีค่าใกล้เคียงกับ 0.990 และ Maximum growth rate ต้องมีค่าเท่ากับร้อยละ 12

### 4.3 การอภิปรายผลลัพธ์ของการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ในงานวิจัยนี้จะแสดงตัวอย่างผลลัพธ์การตรวจสอบความถูกต้องที่ได้จากการศึกษาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์, แบบจำลองโดยโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 เทียบกับผลการทดลองของหัวพ่นซูเปอร์โซนิก A และส่วนพื้นที่หน้าตัดผสมคงที่ D จากงานวิจัย Huang et al. [1] โดยใช้สารทำความเย็น R141b มาอภิปราย โดยนำผลลัพธ์ที่ได้มาพลอตแสดงในกราฟที่ 4.6, 4.7 และ 4.8 และผลลัพธ์เทียบกับงานวิจัยของ Thongtip et al. [5] แสดงในกราฟ 4.9 ถึง 4.12 ดังนี้

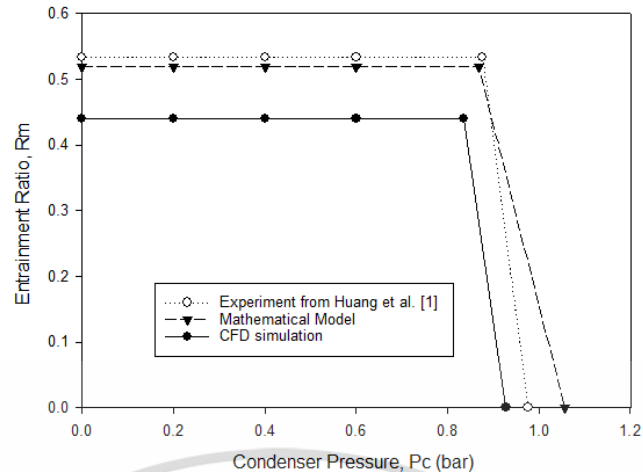


รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment ratio กับความดันควบแน่นของ AD อีเจคเตอร์ AR 9.41 ที่  $T_{gen} = 95\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $T_{evap} = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$  ของสารทำความเย็น R141b



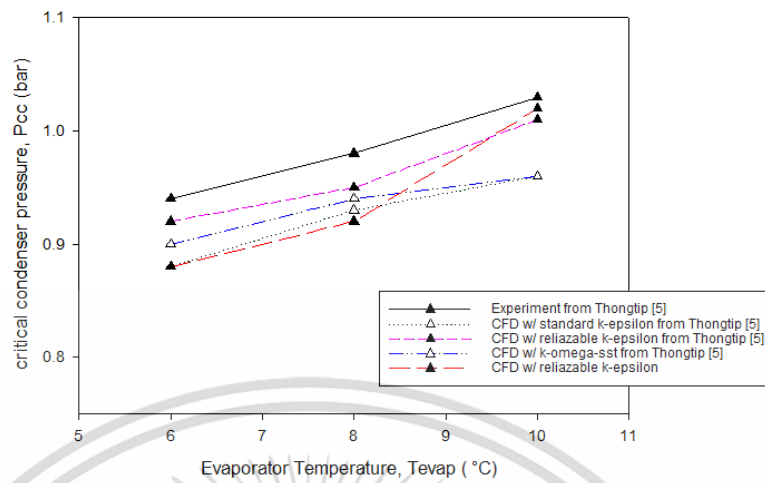
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment ratio กับความดันควบแน่น ของ AD อีเจคเตอร์ AR 9.41 ที่  $T_{gen} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $T_{evap} = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$  ของสารทำความเย็น R141b

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

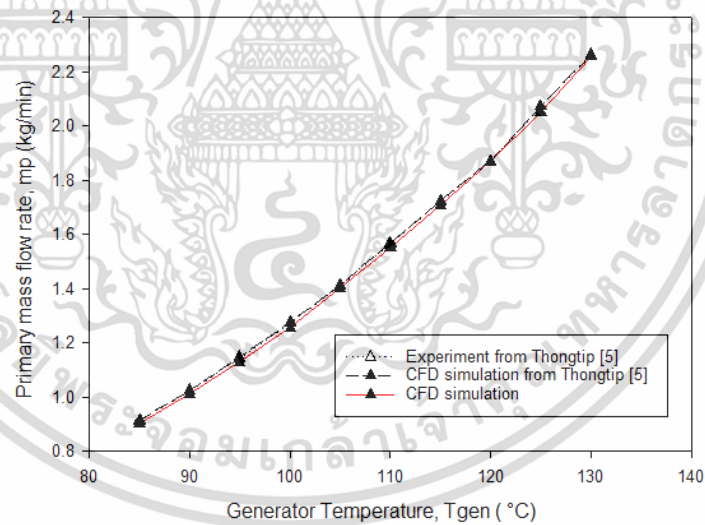


รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment ratio กับ ความดันควบแน่น ของ AD อี เจคเตอร์ AR 9.41 ที่  $T_{gen} = 84\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $T_{evap} = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$  ของสารทำความเย็น R141b

จากรูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8 ได้แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment ratio กับความดันควบแน่นของ AD อีเจคเตอร์ ที่อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอแตกต่างกันแต่อุณหภูมิเครื่องระเหยมีค่า  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$  เหมือนกันเมื่อนำค่า Entrainment ratio ที่สภาวะการทำงานวิกฤติที่ความดันควบแน่นวิกฤตและ Break down pressure,  $P_{cb}$  ของแบบจำลองทั้งสองแบบจำลองกับผลการทดลองได้เส้นกราฟทั้ง 3 เส้น ผลลัพธ์ที่ได้จากผลการทดลอง, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และ ANSYS (FLUENT) 19 ค่า Entrainment ratio และความดันควบแน่นวิกฤตจะมีค่าสอดคล้องใกล้เคียงกันมากที่สุดที่รูปที่ 4.3 เมื่อเทียบกราฟทั้ง 3 กราฟ เมื่ออุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอเท่ากับ  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$  และจะใกล้เคียงกันน้อยลงเมื่ออุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอน้อยลงตามลำดับโดยยังอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ โดยที่ Break down pressure,  $P_{cb}$  นั้นจะมีค่าแตกต่างกันมากทุกกราฟเนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาแล้วจากงานวิจัย Mwesigye et al. [4] ได้นำมาสร้างนั้นยากที่จะทำนายได้เนื่องจากข้อจำกัดในการหาข้อมูลผลการทดลองมาพัฒนาแบบจำลอง

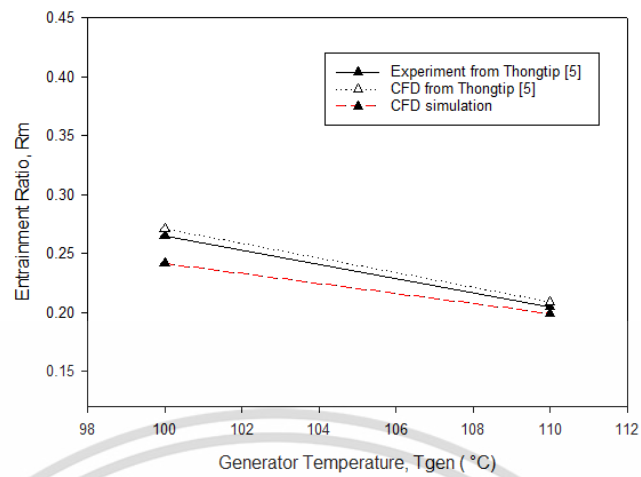


รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $P_{cc}$  และ  $T_{evap}$  โดย Turbulent Model ที่แตกต่างกัน

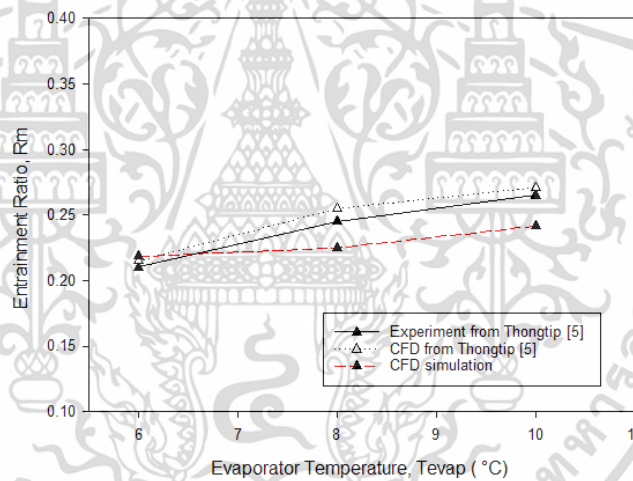


รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $m_p$  และ  $T_{gen}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment ratio และ  $T_{gen}$



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment ratio และ  $T_{evap}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# วิธีการดำเนินงานวิจัยเพื่อเก็บค่าผลการวิจัย

### 5.1 การสร้างและออกแบบแบบจำลองของอีเจคเตอร์ของแต่ละสารทำความเย็น

การดำเนินงานวิจัยเพื่อเก็บค่าผลการวิจัย ขั้นตอนต้นก่อนเริ่มการเก็บผลการวิจัยเพื่อความน่าเชื่อถือและเป็นไปตามแนวทางของงานวิจัย เราต้องกำหนดสมมติฐานเริ่มต้นของการออกแบบแบบจำลองก่อนเพื่อให้สอดคล้องและเป็นไปตามหลักวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับของไหลและรูปทรงเรขาคณิตของอีเจคเตอร์

#### การออกแบบแบบจำลองอีเจคเตอร์

ในบทก่อนหน้าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นสามารถเป็นแนวทางในการออกแบบสัดส่วนของอีเจคเตอร์ได้และสามารถทำนายประสิทธิภาพได้เช่นกัน แต่ก็พบว่ามีคลาดเคลื่อนอยู่มากเมื่อใช้ทำนายประสิทธิภาพของสารทำความเย็น R245fa และ R1233zd(E) เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ไม่ได้จากการวิเคราะห์ Non-linear regression กับผลการทดลองที่งานวิจัยก่อนหน้านี้ที่มีผลการทดลองที่เปิดเผยในงานวิจัยและนำมาสร้างแบบจำลองดังนั้นจึงเป็นข้อจำกัดทางข้อมูลในการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายประสิทธิภาพของสารทำความเย็นสารอื่น

ฉะนั้นแบบจำลองที่จะใช้ในการดำเนินงานวิจัยต่อไปนั้น จะออกแบบโดยใช้โปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 กับมิติของแบบจำลองอีเจคเตอร์ขอสารทำความเย็น R141b จากงานวิจัย Thongtip et al. [5] ตามหลักการความคล้ายคลึงดังต่อไปนี้

#### 1. ความคล้ายคลึงทางจลศาสตร์ของของไหลปฐมภูมิ

การออกแบบอีเจคเตอร์ในส่วนของหัวพ่นของแบบจำลองนั้น จะกำหนดเลขมัคที่ออกจากหัวพ่นให้เท่ากัน โดยในงานวิจัยนี้จะกำหนดเลขมัคทางออกหัวพ่นเท่ากับ 2.5 มัค ทั้ง 3 สารทำความเย็น เพื่อความคล้ายคลึงทางจลศาสตร์ของของไหลที่จะไหลออกมาจากหัวพ่นจากเลขมัครวมถึงโมเมนตัมในการรวมกันกับของไหลทุติยภูมิภายในอีเจคเตอร์ของทั้ง 3 สารทำความเย็นในงานวิจัย

## 2. ความคล้ายคลึงทางรูปทรงเรขาคณิตของอีเจคเตอร์

การออกแบบอีเจคเตอร์ ในส่วนของหัวพ่น, ห้องการดูด, ส่วนพื้นที่หน้าตัดคงที่และส่วนหัวกระจาย โดยใช้โปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 นั้นจะถูกออกแบบโดยกำหนดให้อัตราส่วนพื้นที่ของอีเจคเตอร์และหัวพ่นคงที่ (Area Ratio, AR) เท่ากัน ดังนี้

$$AR_{ejector}=(D_{throat,ejector}/D_{throat,nozzle})^2, AR_{nozzle}=(D_{exit,nozzle}/D_{throat,nozzle})^2$$

และอาศัยความคล้ายคลึงทางรูปทรงเรขาคณิตของอีเจคเตอร์เพื่อออกแบบอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดและความยาวต่าง ๆ ของอีเจคเตอร์ให้มีค่าใกล้เคียงและคล้ายคลึงกับอัตราส่วนที่ได้จากแบบจำลองของแบบจำลองของสารทำความเย็น R141b จากงานวิจัย Thongtip et al.[5] ซึ่งได้ถูกออกแบบมาก่อนแล้วตามมาตรฐาน ESDU ซึ่งเป็นมาตรฐานการออกแบบของตัวอีเจคเตอร์

## 5.2 รูปร่างและสัดส่วนของอีเจคเตอร์ที่ออกแบบของแต่ละสารทำความเย็น

ตารางที่ 5.1 รูปร่างและสัดส่วนของหัวพ่นจากแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19

Nozzle Spec	Working fluid	R141b	R245fa	R1233zd(E)
ANSYS (FLUENT) 19	$D_{exit}$ (mm)	6.8	5.1	5.525
	$D_{th}$ (mm)	3.2	2.4	2.6
	$L_{throat}$ (mm)	10.851	11.351	12.64
	AR,nozzle	4.515625	4.515625	4.515625
	AR,ejector	7.910156	7.910156	7.910156
	M	2.5	2.5	2.5

ตารางที่ 5.2 อัตราส่วนของอีเจคเตอร์

Ratio\Working fluid	R141b	R245fa	R1233zd
$L_{suction}/D_{throat}$	10.55556	10.55556	10.55951
$D_{suction}/D_{throat}$	4.111111	4.111111	4.112175
$D_{diffuser}/D_{throat}$	2.666667	2.666667	2.667579

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในแวดวงวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น ๆ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางที่ 5.3 มิติและสัดส่วนของอีเจคเตอร์

Ejector Spec.	Millimeter, mm						Degree, °
	D <sub>suction</sub>	L <sub>suction</sub>	D <sub>throat</sub>	L <sub>throat</sub>	D <sub>diffuser</sub>	L <sub>diffuser</sub>	$\alpha$
R141b	37	95	9	45	24	85	5
R245fa	27.75	71.25	6.75	33.75	18	63.75	5
R1233zd	30.06	77.19	7.31	36.56	19.5	69.07	5



รูปที่ 5.1 ESDU (Engineering Sciences Data Unit) เป็นแหล่งรวบรวมข้อมูลการออกแบบตามหลักวิศวกรรมที่น่าเชื่อถือและได้รับการตรวจสอบแล้ว

### 5.3 การวิเคราะห์อัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิกับอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ

ในงานวิจัยนี้เราจะกำหนดอัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิที่จะออกจากหัวพ่นของแต่ละอีเจคเตอร์เท่ากันทั้ง 3 สารทำความเย็น จึงต้องรวบรวมข้อมูลผลการทำนายอัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิทั้ง 3 สารก่อน โดยในงานวิจัยนี้จะรวบรวมข้อมูลผลการทำนายโดยกำหนดเงื่อนไขการทำงานของแบบจำลองอีเจคเตอร์ที่ได้ออกแบบไว้ดังนี้

1. อุณหภูมิเครื่องระเหยคงที่เท่ากับ 8 °C
2. อุณหภูมิเครื่องกำเนิดในช่วงอุณหภูมิ 85 °C - 130 °C

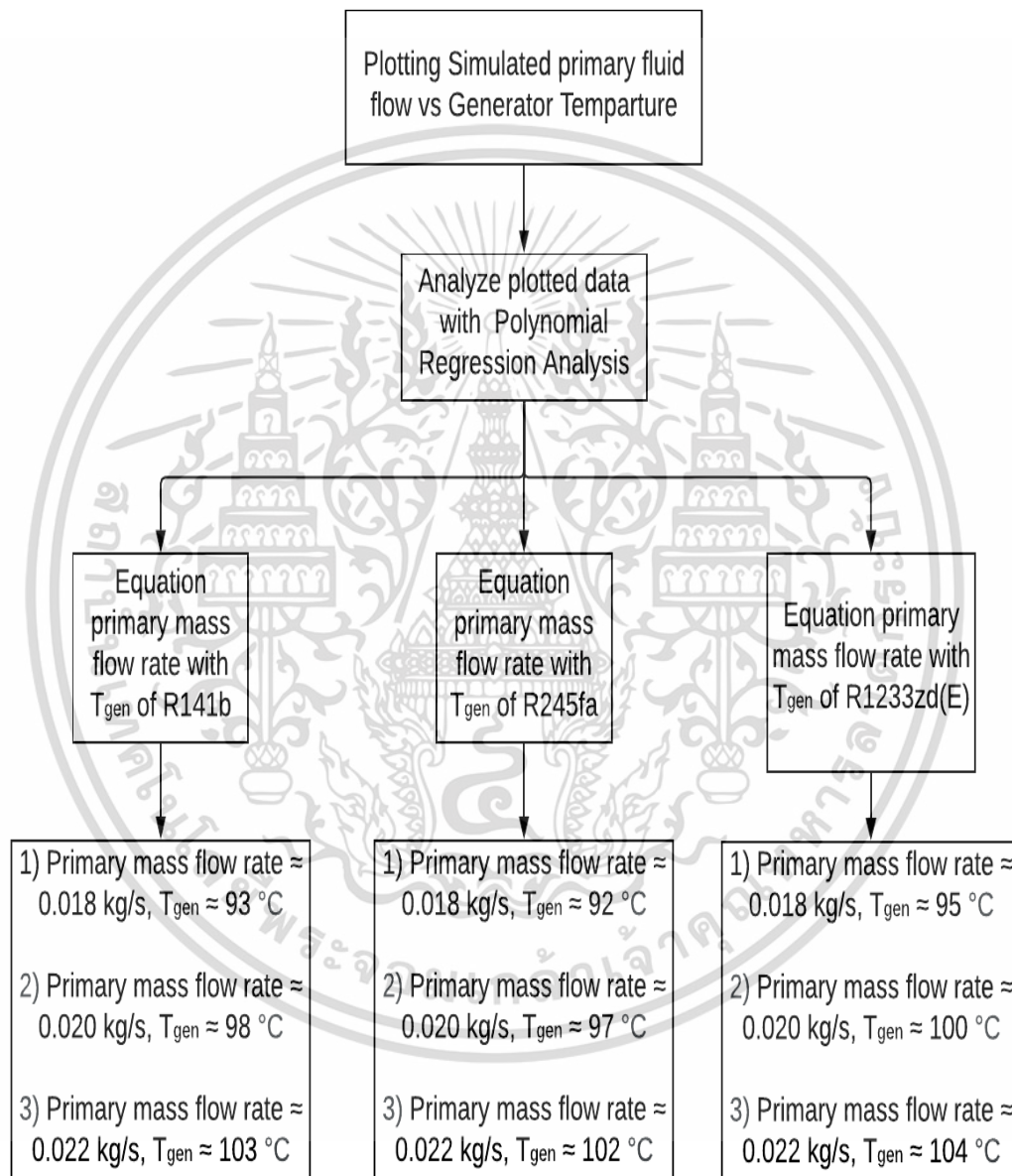
ผลการทำนายอัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิแสดงในตารางที่ 5.4 โดยได้นำมาเปรียบเทียบกับอัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากหัวพ่นซึ่งยังทำนายได้ใกล้เคียงอยู่เนื่องจากแบบจำลองนั้นสร้างจากการรวบรวมผลการทดลองผ่านหัวพ่นเพียงอย่างเดียวซึ่งไม่ได้ซับซ้อนเกินไปที่จะควบคุมเงื่อนไขการทดลองจึงส่งผลให้ผลการทำนายจากแบบจำลองทั้งสองได้ผลใกล้เคียงกันในเงื่อนไขการทำงานโดยมี ร้อยละความแตกต่างมากที่สุดที่ร้อยละ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 ผลการทำนายอัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19

Primary mass flow rate, (Kg/s)										
T <sub>evap</sub> (°C)	T <sub>gen</sub> (°C)	R141b			R245fa			R1233zd(E)		
		CFD simulation	Math Model	% difference	CFD simulation	Math Model	% difference	CFD simulation	Math Model	% difference
8	85	0.0150	0.0149	1.16%	0.0154	0.0167	8.30%	0.0147	0.0160	8.61%
	90	0.0168	0.0166	1.17%	0.0173	0.0187	7.81%	0.0164	0.0179	8.59%
	95	0.0188	0.0186	1.18%	0.0193	0.0208	7.80%	0.0183	0.0199	8.58%
	100	0.0209	0.0207	1.19%	0.0214	0.0232	7.79%	0.0203	0.0221	8.56%
	105	0.0232	0.0229	1.21%	0.0237	0.0257	7.77%	0.0224	0.0244	8.55%
	110	0.0256	0.0253	1.22%	0.0262	0.0284	7.76%	0.0247	0.0269	8.53%
	115	0.0283	0.0279	1.23%	0.0289	0.0313	7.75%	0.0272	0.0296	8.52%
	120	0.0311	0.0307	1.30%	0.0318	0.0344	7.74%	0.0298	0.0325	8.51%
	125	0.0341	0.0337	1.25%	0.0349	0.0377	7.73%	0.0327	0.0356	8.50%
	130	0.0373	0.0368	1.26%	0.0382	0.0413	7.72%	0.0357	0.0389	8.49%

ขั้นตอนต่อไปคือการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิ และอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอโดยใช้การวิเคราะห์แบบ Polynomial Regression เพื่อที่จะหาอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอของแต่ละสารทำความเย็นที่จะใช้ในแบบจำลองในโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 ตามขั้นตอนรูปที่ 5.2 โดยสมการที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงไว้ในหมวดของภาคผนวก



รูปที่ 5.2 แผนผังขั้นตอนการกำหนดหลักเกณฑ์การเก็บค่าผลทำนายประสิทธิภาพของแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.2 ได้แสดงขั้นตอนไว้ให้เห็นเป็นขั้นตอนโดยละเอียดดังนี้

1. พลอทกราฟระหว่างอัตราการไหลของของไหลปฐมภูมิกับอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอจากผลการทำนายอัตราการไหลของของไหลปฐมภูมิของแบบจำลองโดยใช้ โปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19

2. ใช้หลักการ Polynomial Regression Analysis เพื่อช่วยวิเคราะห์สร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของของไหลปฐมภูมิกับอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอของสารทำความเย็น R141b, R245fa และ R1233zd(E) ซึ่งจะถูกแสดงไว้ในหมวดของภาคผนวก

3. ใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของของไหลปฐมภูมิกับอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอหาอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอที่จะใช้ในการเปรียบเทียบในงานวิจัยนี้ โดยกำหนดอัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิของแต่ละสารทำความเย็นโดยประมาณเท่ากับ 0.018 kg/s, 0.020 kg/s และ 0.022 kg/s เพื่อให้มีความคล้ายคลึงทางจลศาสตร์และอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอให้อยู่ในขอบเขตงานวิจัยแล้วจึงนำอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอที่ได้มาของแต่ละสารทำความเย็นมาใช้เป็นเงื่อนไขการทำงานของเครื่องกำเนิดไอในแบบจำลองของแบบจำลองของแต่ละสารทำความเย็นเพื่อหาผลการทำนายประสิทธิภาพจากโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 ในบทถัดไป

## บทที่ 6

# ข้อมูลผลการทำนายของแบบจำลองและสรุปผล

### 6.1. กล่าวนำ

จากทฤษฎีข้างต้น ในการเปรียบเทียบสมรรถภาพของระบบทำความเย็นจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถภาพ ซึ่งในระบอบทำความเย็นแบบไอजेคเตอร์ ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถภาพจะแปรผันตรงกับค่า Entrainment Ratio จากการจำลองโดยใช้อุณหภูมิของเครื่องระเหยในช่วง 8-16 °C และอัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิที่แตกต่างกันซึ่งอยู่บนพื้นฐานของความคล้ายคลึงทางจลศาสตร์และรูปทรงเรขาคณิตของสารทำความเย็นทั้ง 3 สาร ประกอบไปด้วย R141b R245fa และ R1233zd(E) โดยที่มี อัตราส่วนพื้นที่ของไอजेคเตอร์คงที่ เป็น 7.91 และมี Nozzle Area Ratio เป็น 4.515 เลขมัคที่ทางออกของหัวพ่นเป็น 2.5 มัค เห็นได้ว่าอุณหภูมิของเครื่องระเหยและอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอส่งผลต่อ Entrainment Ratio ของสารทำความเย็นทั้ง 3 สารอย่างมาก นอกจากนี้ยังส่งผลต่ออุณหภูมิวิกฤติของเครื่องควบแน่นซึ่งบ่งบอกถึงสภาวะการทำงานของระบบทำความเย็นโดยเมื่ออุณหภูมิของบรรยากาศสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติของเครื่องควบแน่นจะส่งผลให้ Entrainment Ratio ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จนกระทั่งระบบไม่สามารถทำความเย็นได้ ค่า Entrainment Ratio จะถูกนำมาเปรียบเทียบกันจากทั้ง 3 สารที่ทำงานในสภาวะที่ได้กล่าวมาข้างต้น

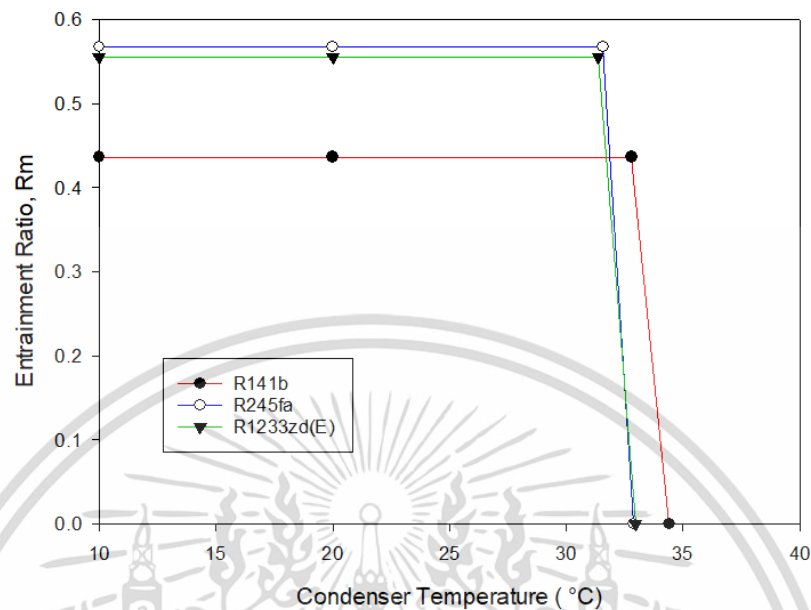
### 6.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิ

ในการจำลองนี้ได้มีการใช้อัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิที่แตกต่างกันได้แก่ 0.018 kg/s 0.020 kg/s และ 0.022 kg/s โดยมีความเร็วทางออกหัวพ่นเป็น 2.5 มัคทั้ง 3 อัตราการไหล เพื่อเป็นเงื่อนไขที่แสดงถึงโมเมนตัมที่ใกล้เคียงกัน โดยให้ที่อัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิหนึ่ง ๆ ทำงานอยู่ในช่วงอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอที่ใกล้เคียงกันของทั้ง 3 สารในขณะที่อัตราส่วนพื้นที่ของหัวพ่นและไอजेคเตอร์ยังคงเท่ากัน

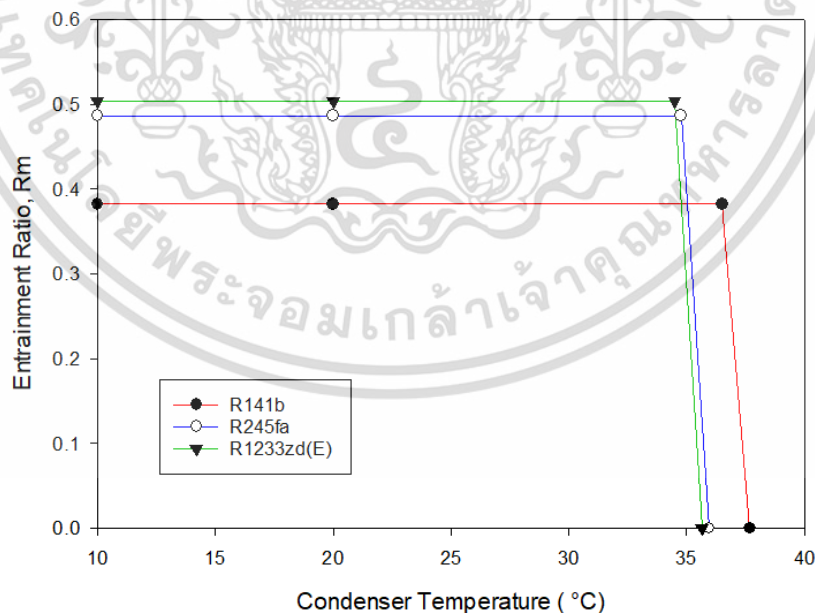
อุณหภูมิของเครื่องควบแน่น ณ จุดสุดท้ายที่ทำให้ Entrainment Ratio มีค่าคงที่ เรียกว่า อุณหภูมิวิกฤติของเครื่องควบแน่น หรือ ความดันวิกฤติของเครื่องควบแน่น (ความดันและอุณหภูมิของเครื่องควบแน่นสัมพันธ์กันตามคุณสมบัติของสารนั้น ๆ จึงสามารถอ่านค่าได้เมื่อมีค่าใดค่าหนึ่ง)

เมื่ออุณหภูมิของเครื่องควบแน่นสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติของเครื่องควบแน่น จะเห็นได้ว่าค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Entrainment Ratio จะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงสภาวะหนึ่งที่ Entrainment Ratio มีค่าเป็นศูนย์ เรียกว่าจุด Breakdown

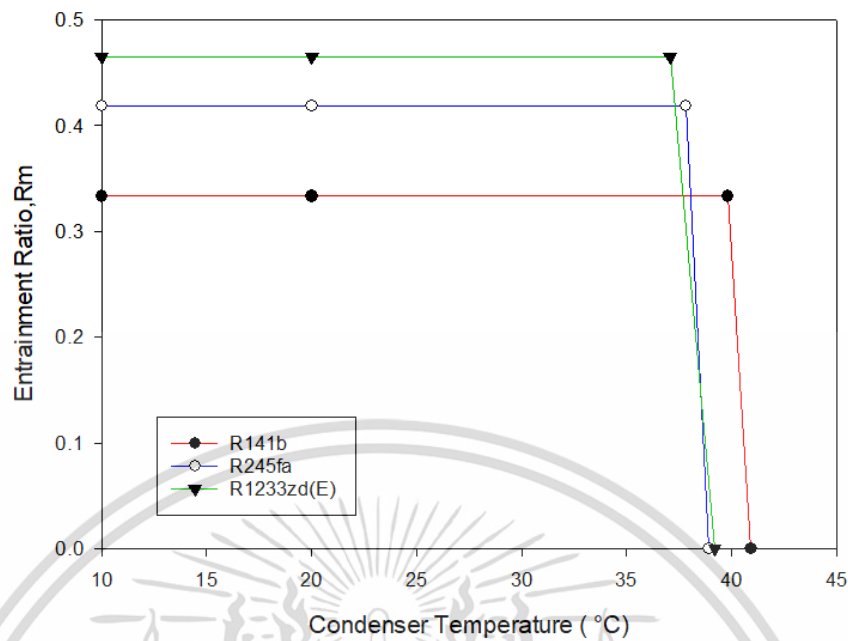


รูปที่ 6.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment Ratio และอุณหภูมิเครื่องควบแน่นจากการจำลองที่  $\dot{m}_p$  เท่ากับ 0.018 kg/s และอุณหภูมิเครื่องระเหยเท่ากับ 12 °C



รูปที่ 6.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment Ratio และอุณหภูมิเครื่องควบแน่นจากการจำลองที่  $\dot{m}_p$  เท่ากับ 0.020 kg/s และอุณหภูมิเครื่องระเหยเท่ากับ 12 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment Ratio และอุณหภูมิเครื่องควบแน่นจากการจำลองที่  $m_p$  เท่ากับ 0.022 kg/s และอุณหภูมิเครื่องระเหยเท่ากับ 12 °C

จากรูปที่ 6.1-6.3 เห็นได้ว่าเมื่ออัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิเพิ่มขึ้นค่า Entrainment Ratio ของทุกสารจะมีค่าลดลงหรือสามารถสื่อได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นลดลงเมื่ออัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิมีค่าสูงขึ้น แต่ในทางกลับกันเมื่ออัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิมีค่าสูงขึ้น จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิวิกฤติของเครื่องควบแน่นและจุด Breakdown มีค่าสูงขึ้น ทำให้ระบบสามารถดำเนินการทำความเย็นได้ที่อุณหภูมิแวดล้อมที่สูงขึ้น

การที่เพิ่มอัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิในระบบสูงขึ้นทำให้ค่า Entrainment Ratio ลดลงดังที่ได้กล่าวไปข้างต้นแต่ทำให้ระบบสามารถทำงานได้ที่สภาวะแวดล้อมเครื่องควบแน่นสูงขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าเป็นการลดสมรรถภาพการทำความเย็นของระบบเพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้ในบรรยากาศเขตร้อน

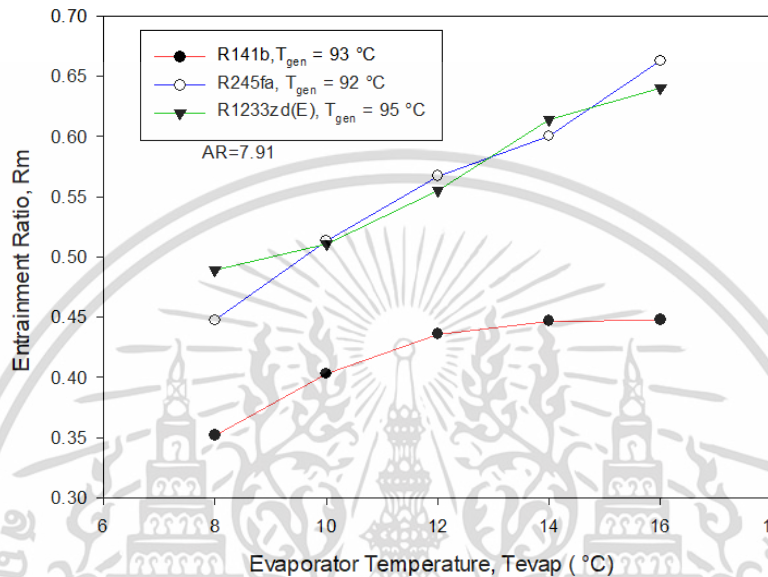
จากรูปที่ 6.1-6.3 ค่า Entrainment Ratio ของสาร R245fa และ R1233zd(E) มีค่าใกล้เคียงกันจากทั้ง 3 สภาวะของอัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิ เมื่อพิจารณาอุณหภูมิ

วิกฤติของเครื่องควบแน่น R141b จะมีค่าสูงที่สุด

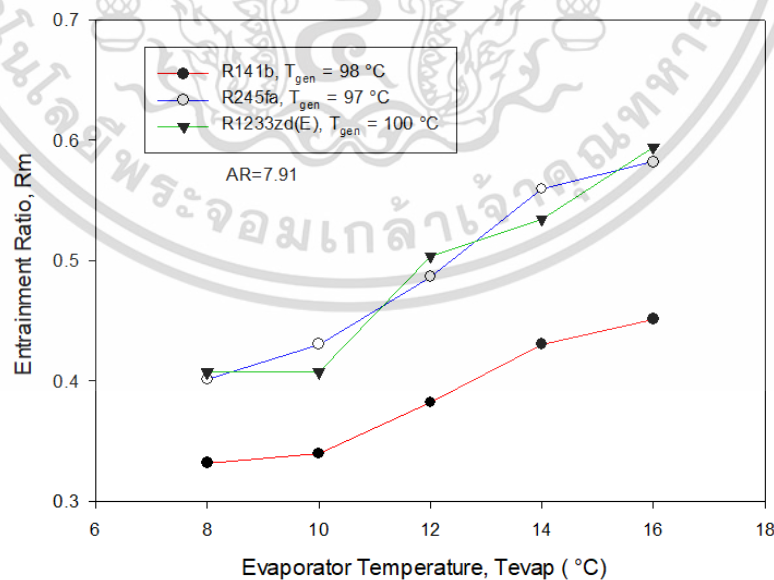
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องระเหย

จากการจำลองที่อุณหภูมิของเครื่องระเหยในช่วง 8-16 °C ให้ผลของ Entrainment Ratio และอุณหภูมิวิกฤติของเครื่องควบแน่นที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 6.5-6.7

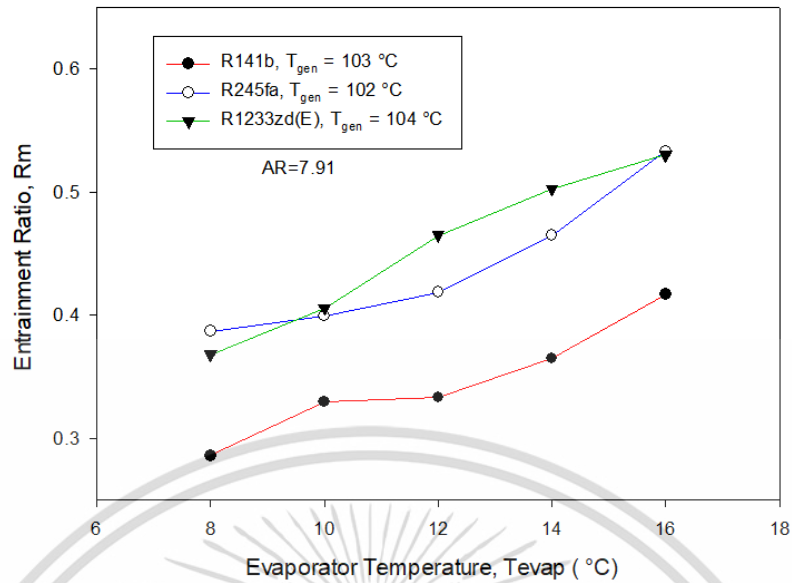


รูปที่ 6.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment Ratio และอุณหภูมิเครื่องระเหยจากการจำลองที่  $\dot{m}_p$  เท่ากับ 0.018 kg/s

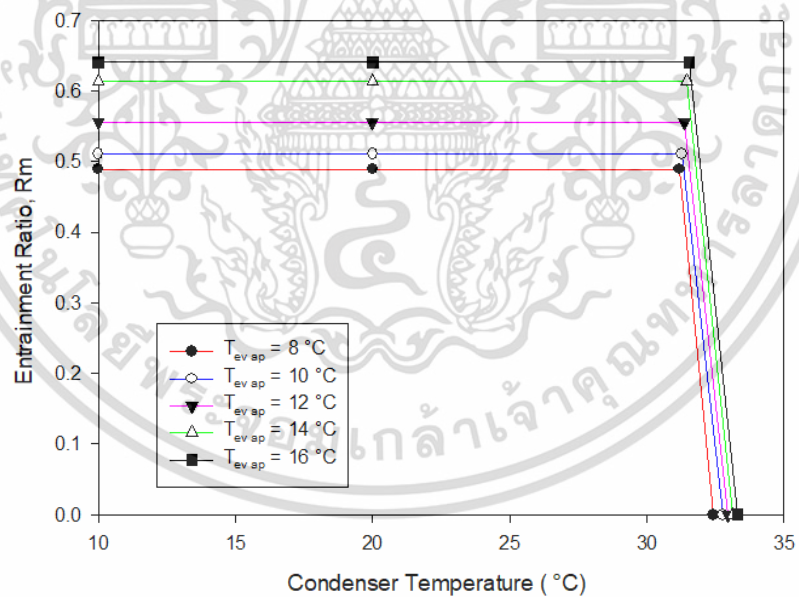


รูปที่ 6.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment Ratio และอุณหภูมิเครื่องระเหยจากการจำลองที่  $\dot{m}_p$  เท่ากับ 0.020 kg/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment Ratio และอุณหภูมิเครื่องระเหยจากการจำลองที่  $\dot{m}_p$  เท่ากับ 0.022 kg/s

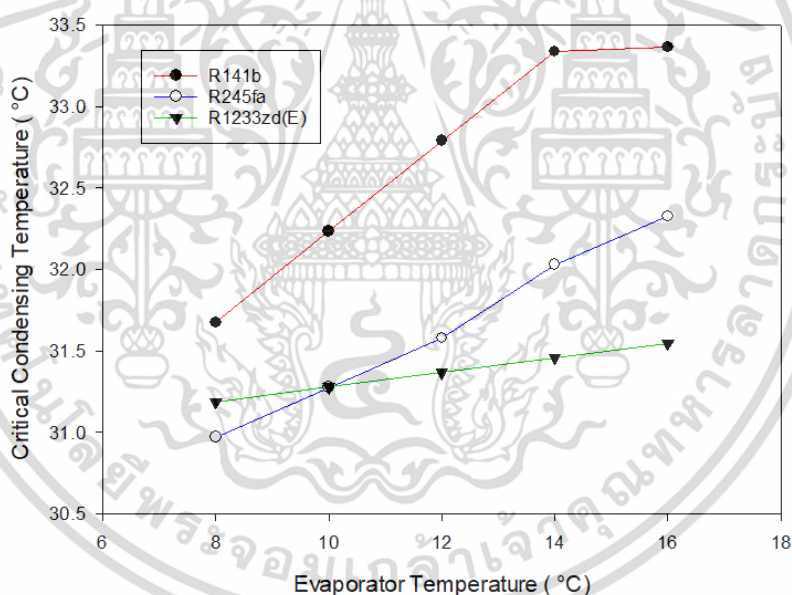


รูปที่ 6.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment Ratio ของ R1233zd(E) และอุณหภูมิเครื่องควบแน่นและเครื่องระเหยจากการจำลองที่  $\dot{m}_p$  เท่ากับ 0.018 kg/s

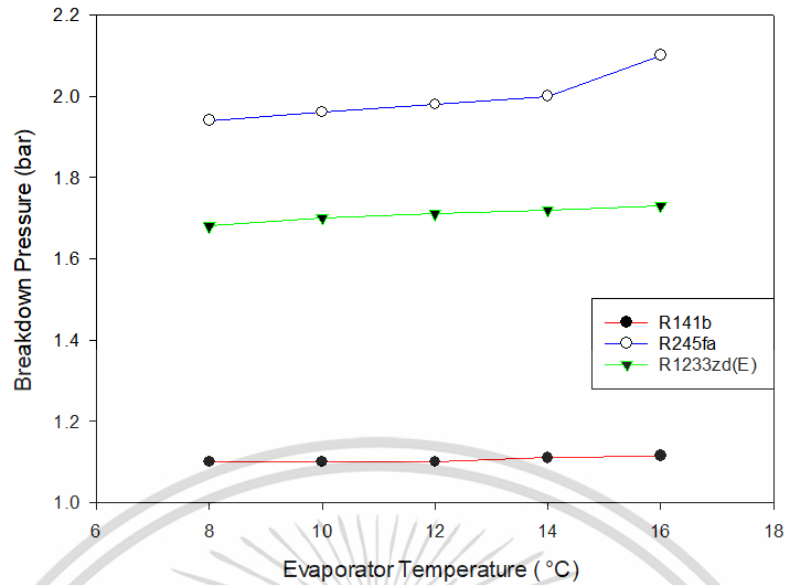
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นที่สังเกตว่าเมื่อระบบทำงานที่อุณหภูมิของเครื่องระเหยสูงขึ้น แนวนอนของค่า Entrainment Ratio จะมีแนวโน้มสูงขึ้น สาร R245fa และ R1233zd(E) ยังคงให้ค่า Entrainment Ratio ที่ใกล้เคียงกันและการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิยังคงมีผลต่อ Entrainment Ratio โดยเป็นการลดน้อยลงของ Entrainment Ratio ในทุกอุณหภูมิของเครื่องระเหย

จากกรณีการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิ หรือกล่าวได้อีกความหมายหนึ่งว่าเป็นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำงานของเครื่องกำเนิดไอ ส่งผลต่ออุณหภูมิวิกฤติของเครื่องควบแน่นและจุด Breakdown การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำงานของเครื่องระเหยยังคงมีผลต่ออุณหภูมิวิกฤติของเครื่องควบแน่นและจุด Breakdown ดังแสดงในภาพที่ 6.9 และ 6.10

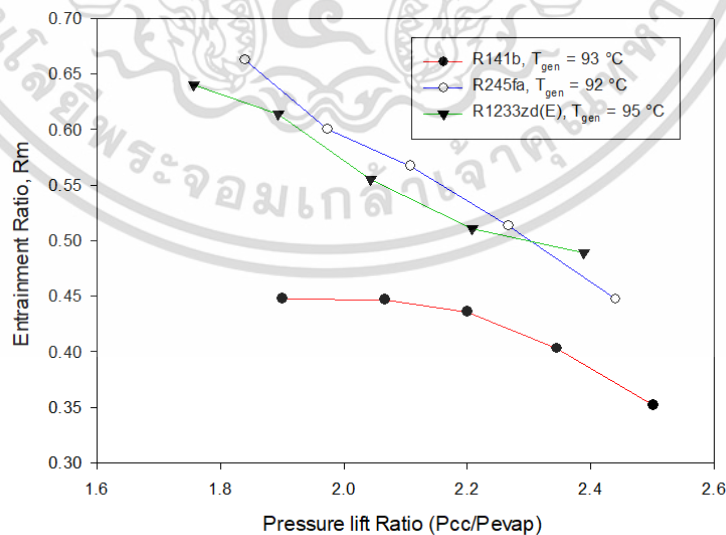


รูปที่ 6.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติของเครื่องควบแน่นและอุณหภูมิเครื่องระเหย จากการจำลองที่  $m_p$  เท่ากับ 0.018 kg/s



รูปที่ 6.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันจุด Breakdown และอุณหภูมิเครื่องระเหยจากการจำลองที่  $\dot{m}_p$  เท่ากับ 0.018 kg/s

รูปที่ 6.9 และ 6.10 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของเครื่องระเหยสัมพันธ์กับอุณหภูมิวิกฤติของเครื่องควบแน่นและความดันจุด Breakdown การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำงานของเครื่องระเหยมีผลให้อุณหภูมิวิกฤติของเครื่องควบแน่นและความดันจุด Breakdown สูงขึ้น โดยอุณหภูมิเครื่องระเหยที่สูงขึ้นหมายถึงความดันของอุณหภูมิเครื่องระเหยซึ่งเป็นความดันผลักดันของไหลทุติยภูมิทางขาเข้าของอีเจกเตอร์สูงขึ้นอันทำให้อัตราการไหลของมวลของของไหลทุติยภูมิที่ไหลเข้าสู่อีเจกเตอร์สูงขึ้น



รูปที่ 6.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Entrainment Ratio และ Pressure lift Ratio จากการจำลองที่  $\dot{m}_p$  เท่ากับ 0.018 kg/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

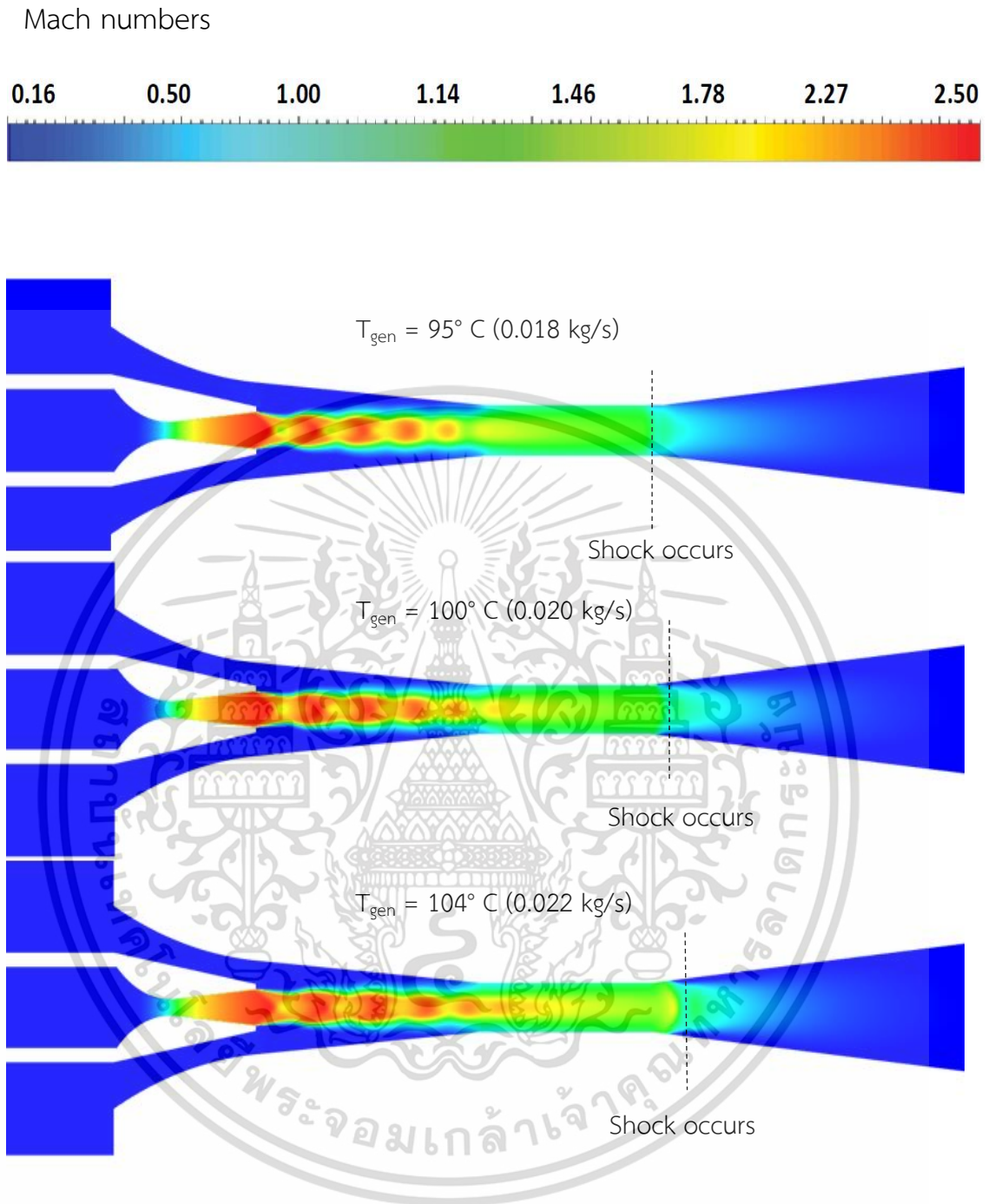
จากรูปที่ 6.11 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างความดันควบแน่นกับความดันเครื่องระเหยหรือ Pressure lift Ratio สูงขึ้นจะทำให้ความดันที่ทางออกของอีเจคเตอร์ (ความดันเครื่องควบแน่น) ด้านการไหลของของไหลทุติยภูมิที่ไหลเข้าสู่อีเจคเตอร์ส่งผลให้อัตราการไหลของมวลของไหลทุติยภูมิมีค่าลดลง จึงส่งผลต่อค่า Entrainment Ratio ของระบบทำความเย็นลดลง ในทางกลับกันเมื่อความดันเครื่องระเหยสูงขึ้นส่งผลทำให้ Pressure lift Ratio ลดลงและทำให้ของไหลทุติยภูมิไหลเข้าสู่อีเจคเตอร์ได้มากขึ้นส่งผลให้ Entrainment Ratio ของระบบสูงขึ้น

#### 6.4 ตำแหน่งของคลื่นกระแทกที่ทางออกท่อผสมหน้าตัดคงที่ ส่งผลต่ออุณหภูมิจุดเดือดของเครื่องควบแน่น

จากการจำลองเมื่ออัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิมีค่าเป็น 0.018 kg/s, 0.020 kg/s และ 0.022 kg/s จากรูปที่ 6.12 จะเห็นได้ว่าตำแหน่งของคลื่นกระแทกที่บริเวณทางออกของท่อผสมหน้าตัดคงที่จะเลื่อนออกไป ซึ่งเกิดจากเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิเป็นการเพิ่มความดันของเครื่องกำเนิดไอ ทำให้ความดันผลักดันที่ทางเข้าของอีเจคเตอร์สูงขึ้นและส่งผลต่ออุณหภูมิจุดเดือดของเครื่องควบแน่นดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 6.3

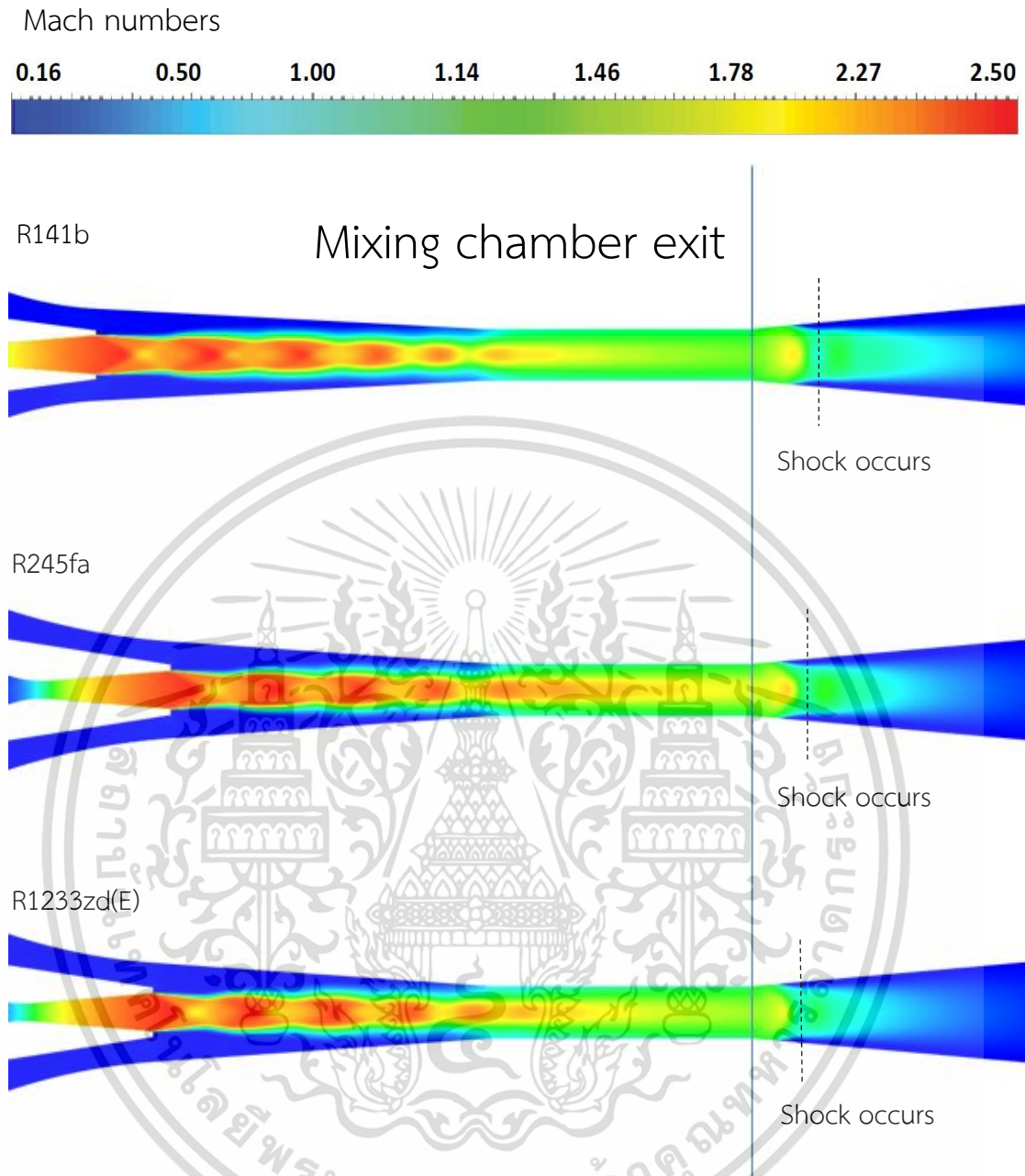
เมื่อทำการจำลองเพื่อศึกษาลักษณะการไหลเมื่อกำหนดให้มี Pressure lift Ratio มีค่าเท่ากันเป็น 2 ทั้งสามสารทำความเย็นเพื่อเป็นเงื่อนไขที่ว่าแรงผลักดันที่เข้าสู่อีเจคเตอร์ของทั้ง 3 สารทำความเย็นมีค่าเท่ากันและทำงานที่อุณหภูมิเครื่องระเหยเดียวกัน ดังภาพที่ 6.13

จากรูปที่ 6.13 เห็นได้ว่าตำแหน่งการเกิดคลื่นกระแทกของสาร R245fa และ R1233zd(E) เกิดขึ้นใกล้เคียงกัน ในขณะที่ตำแหน่งของคลื่นกระแทกของสาร R141b เกิดในตำแหน่งไกลจาก R245fa และ R1233zd(E) เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 6.3 ซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิจุดเดือดของเครื่องควบแน่นที่สถานะเดียวกัน จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิจุดเดือดของเครื่องควบแน่นของสาร R1233zd(E) มีค่าน้อยที่สุดแต่ใกล้เคียงกับสาร R245fa และสาร R141b มีค่ามากที่สุด เป็นสิ่งที่ทำให้เห็นได้ว่าตำแหน่งของการเกิดคลื่นกระแทกนี้ส่งผลต่ออุณหภูมิจุดเดือดของเครื่องควบแน่นอย่างมีอาจปฏิเสธได้



รูปที่ 6.12 ลักษณะการไหลภายในอีเจกเตอร์จากการจำลองของสาร R1233zd(E)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.13 ลักษณะการไหลภายในอีเจคเตอร์จากการจำลองที่  $\dot{m}_p$  เท่ากับ 0.022 kg/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.5 สมรรถนะในการทำความเย็นของ R1233zd(E)

ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการทำความเย็นเทียบกับพลังที่จำเป็นต้องใช้ในการขับเคลื่อนระบบทำความเย็น ซึ่งในระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์นี้ ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะแปรผันไปตามค่า Entrainment Ratio กล่าวคือระบบทำความเย็นที่ใช้กับสารทำความเย็นหนึ่ง ๆ ที่ให้ค่า Entrainment Ratio ที่สูง จะให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะที่สูงในการทำงานเดียวกันด้วย

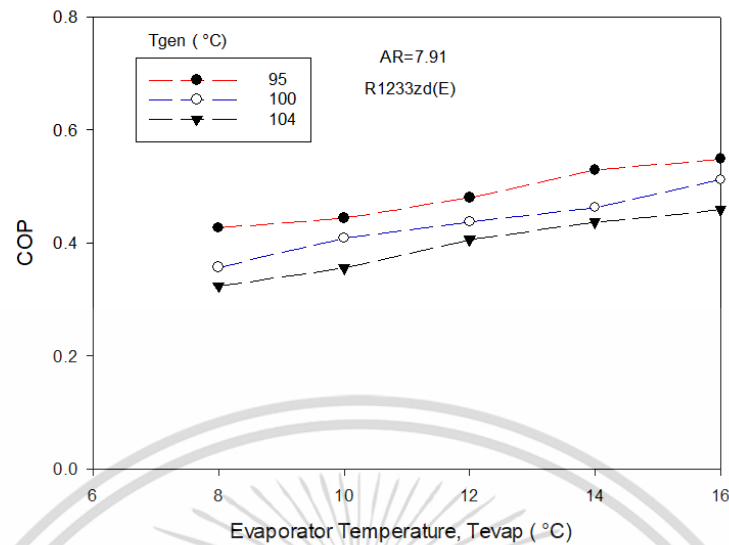
จากบทที่ 1 ที่กล่าวถึงการใช้ระบบทำความเย็นด้วยสารทำความเย็นชนิดต่าง ๆ ส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ สารทำความเย็น R1233zd(E) จึงถูกออกแบบมาเพื่อลดปัจจัยเสี่ยงเมื่อมีการรั่วไหลจากระบบทำความเย็นออกสู่ภายนอก โดยสาร R1233zd(E) เป็นสารที่จัดว่าเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

เนื่องจากการเป็นสารที่จะถูกนำมาทดแทนและเป็นสารใหม่ การทำนายประสิทธิภาพเมื่อถูกนำมาใช้ในระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์เป็นสิ่งสำคัญและเป็นหัวใจของปริญญานิพนธ์นี้

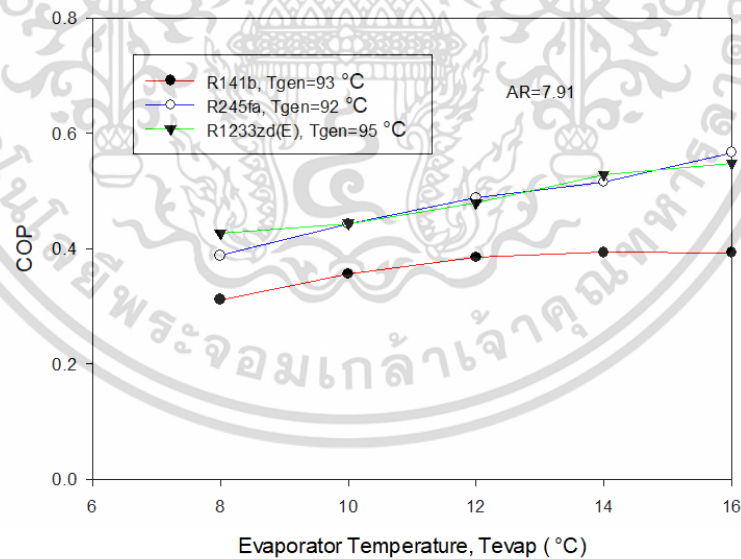
จากการจำลองเพื่อทำนายสมรรถภาพในการทำความเย็นของสาร R1233zd(E) โดยมี เส้นผ่านศูนย์กลางคอคอดของหัวพ่นขนาด 2.6 มิลลิเมตร มีอัตราส่วนพื้นที่ของหัวพ่นเป็น 4.5156 และ มีอัตราส่วนพื้นที่ของอีเจคเตอร์เป็น 7.91 เลขมัคที่ทางออกของหัวพ่นเป็น 2.5 ในส่วนของอีเจคเตอร์มีเส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนห้องการดูดเป็น 30.06 มิลลิเมตร ความยาวของส่วนห้องการดูดเป็น 77.19 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อผสมหน้าตัดคงที่เป็น 7.31 มิลลิเมตรมีความยาวเป็น 36.56 มิลลิเมตร ในส่วนของหัวกระจายมีเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกเป็น 19.5 มิลลิเมตรและมีความยาวเป็น 69.07 มิลลิเมตร จำลองโดยใช้อัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิและอนุภูมิทำงานของเครื่องระเหยที่แตกต่างกันดังที่กล่าวไปในหัวข้อ 6.2 และ 6.3

จากรูปที่ 6.14 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะเป็นไปตามค่า Entrainment Ratio เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 6.5-6.7 และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะกับสารทำความเย็น R141b และ R245fa ดังรูปที่ 6.15 จากรูปที่ 6.16 ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไอของสาร R141b มีค่าสูงที่สุดและสาร R1233zd(E) มีค่าน้อยที่สุด จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของสาร R1233zd(E) สูงกว่าสาร R141b และมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับสาร R245fa ได้แก่ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ อนุภูมิวิกฤติของเครื่องควบแน่น และความดันที่จุด Breakdown

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

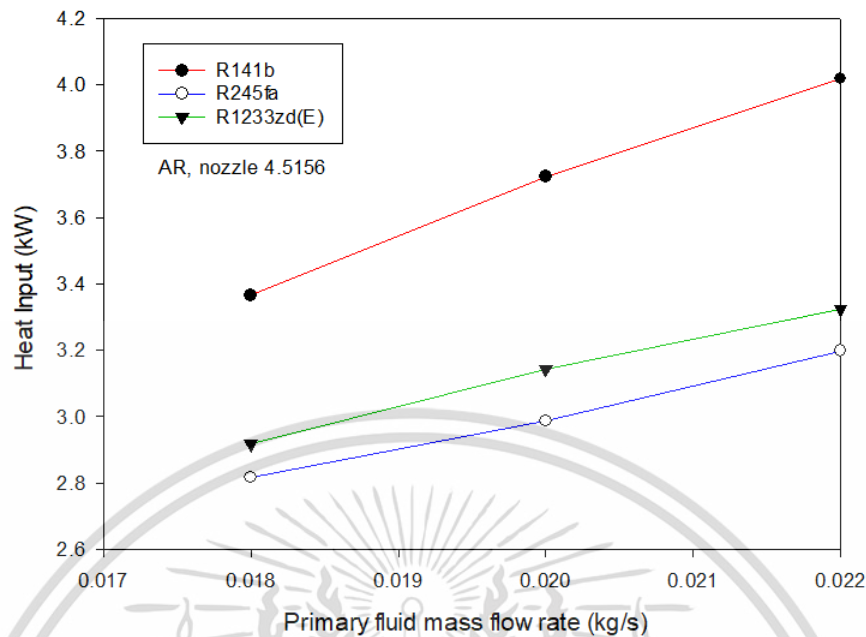


รูปที่ 6.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของสาร R1233zd(E) และ อุณหภูมิทำงานของเครื่องระเหยที่อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอแตกต่างกัน



รูปที่ 6.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของสารทำความเย็นและอุณหภูมิทำงานของเครื่องระเหยที่  $m_p$  เท่ากับ 0.018 kg/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไอและอัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิ

## 6.6 บทสรุป

จากการจำลองโดยใช้พื้นฐานของ ความเหมือนทางจลศาสตร์และรูปทรงเรขาคณิตโดยใช้ อัตราการไหลมวลของของไหลปฐมภูมิ 3 ค่าประกอบไปด้วย 0.018 kg/s, 0.020 kg/s และ 0.022 kg/s ที่ช่วงการทำงานของเครื่องกำเนิดไออยู่ที่ 92-104 °C , อัตราส่วนพื้นที่ของอีเจคเตอร์เท่ากับ 7.91 เลขมัคทางออกหัวพ่นเท่ากับ 2.5 มัค โดยเก็บค่าในรูปของ Entrainment Ratio, ความดันควบแน่นวิกฤตหรือความดันวิกฤตของเครื่องควบแน่น และ Breakdown Pressure อีกทั้งลักษณะการไหลภายในอีเจคเตอร์ในรูปคอนทัวร์ของเลขมัค เพื่อทำนายสมรรถภาพของสารทำความเย็นที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม R1233zd(E)และเปรียบเทียบกับสารทำความเย็นที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน R141b และ R245fa โดยมีขนาดของหัวพ่นและอีเจคเตอร์ที่ให้อัตราการไหลของของไหลปฐมภูมิเท่ากันมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวพ่นใกล้เคียงกัน โดยที่ R141b มีขนาด 3.2 มิลลิเมตร R245fa มีขนาด 2.4 มิลลิเมตร และ R1233zd(E) มีขนาด 2.6 มิลลิเมตร ในส่วนของอีเจคเตอร์ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อผสมหน้าตัดคงที่ เพื่อให้อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของอีเจคเตอร์มีค่าเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R141b มีขนาด 9 มิลลิเมตร R245fa มีขนาด 6.75 มิลลิเมตร และ R1233zd(E) มีขนาด 7.31 มิลลิเมตร

จากการจำลอง สารทำความเย็น R1233zd(E) ให้ค่า Entrainment Ratio สูงกว่า R141b และ R245fa เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถภาพ สารR1233zd(E) ให้สัมประสิทธิ์สมรรถภาพที่ใกล้เคียงกับสาร R245fa และสูงกว่าสาร R141b แต่อุณหภูมิทำงานของเครื่องควบแน่นของสาร R1233zd(E) มีค่าต่ำที่สุดในทั้ง 3 สาร กล่าวคือ สารR1233zd(E)แม้ว่าจะมีค่า COP ที่สูงกว่าสารอื่น ๆ แต่จำเป็นต้องทำงานที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ต่ำกว่าสารอื่น ๆ เมื่อดูลักษณะการไหลภายในอีเจคเตอร์จึงพบว่า การเกิดคลื่นกระแทกที่บริเวณทางออกของท่อผสมหน้าตัดคงที่ โดยตำแหน่งของการเกิดคลื่นกระแทกนี้ส่งผลต่อความดันวิกฤติของเครื่องควบแน่น สารR1233zd(E) เกิดคลื่นกระแทกใกล้กับทางออกของท่อผสมหน้าตัดคงที่จึงทำให้ความดันวิกฤติของเครื่องควบแน่นของสาร R1233zd(E) มีค่าน้อยกว่า R141b และ R245fa

จากการจำลองทั้งหมดโดยเงื่อนไขที่ตั้งไว้ได้กล่าวไปข้างต้น แสดงให้เห็นว่าสาร R1233zd(E) มีแนวโน้มที่จะสามารถทดแทนสารที่ใช้ในปัจจุบันได้แก่ R141b และ R245fa ได้ ด้วยขนาดของอีเจคเตอร์และหัวพ่นที่ใกล้เคียงกับสารปัจจุบันและยังสามารถให้ค่า Entrainment Ratio ที่สูงกว่าสาร R141b และ ใกล้เคียงกับสาร R245 fa ด้วยปริมาณความร้อนที่ใช้สูระบบน้อยกว่า R141b

## เอกสารอ้างอิง

- [1] B.J. Huang, J.M. Chang. A 1-D analysis of ejector performance. **International Journal of Refrigeration** 1999;22:354-64.
- [2] Li F, Tian Q, Wu C, Wang X, Lee J. Ejector performance prediction at critical and subcritical operational modes. **Applied thermal Engineering** 2017;115:444–54.
- [3] Shestopalov KO, Huang BJ, Petrenko VO, Volovyk OS. Investigation of an experimental ejector refrigeration machine operating with refrigerant R245fa at design and of design working conditions. Part 2. Theoretical and experimental results. **International Journal of Refrigeration** 2015;55:212–23.
- [4] Aggrey Mwesigye, Seth B. Dworkin. Performance analysis and optimization of an ejector refrigeration system using alternative working fluids under critical and subcritical operation modes. **Energy Conversion and Management** 2018;176:209-26.
- [5] Tongchana Thongtip. (2016). **Development of the jet refrigeration system to be used with waste heat**. PhD thesis, Sirindhorn international institute of technology Thammasat University, Thailand.
- [6] K. Pianthong, W. Seehanam , M. Behnia, T. Sriveerakul, S. Aphornratana. Investigation and improvement of ejector refrigeration system using computational fluid dynamics technique. **Energy Conversion and Management** 2007;48:2556-64.
- [7] YUNUS A. CENGEL and MICHAEL A. BOLES. **Thermodynamics An Engineering Approach**. 8th Edition. McGraw-Hill, New York, NY.
- [8] jousefm 2018, **What is y+ (yplus)?**, SimScale CAE Forum, viewed 27 November 2018, <<https://www.simscale.com/forum/t/what-is-y-plus/82394>>

## ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก



ตารางผลการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์  
และแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 ผลการทำนายของอัตราการไหลของมวลของไหลปฐมภูมิกับงานวิจัย Thongtip et al. [5] เมื่อใช้สารทำความเย็นคือ R141b

D3.2M2.5		via : Realizable k-epsilon,scable wall function				
Primary mass flow rate, (Kg/min)						
T <sub>gen</sub> (°C)	Experimental data [5]	CFD simulation Thesis [5]	CFD simulation		Error	
			kg/s	kg/min	Experimental	CFD
85	0.913	0.915	0.015046591	0.90279546	1.1177	1.3338
90	1.023	1.026	0.016854409	1.01126454	1.1472	1.4362
95	1.144	1.148	0.01881778	1.1290668	1.3053	1.6492
100	1.272	1.276	0.020934951	1.25609706	1.2502	1.5598
105	1.412	1.413	0.023368289	1.40209734	0.7013	0.7716
110	1.565	1.568	0.025836462	1.55018772	0.9465	1.1360
115	1.723	1.724	0.028484036	1.70904216	0.8101	0.8676
120	1.87	1.871	0.03111911	1.8671466	0.1526	0.2060
125	2.072	2.073	0.034149335	2.0489601	1.1120	1.1597
130	2.262	2.264	0.037595069	2.25570414	0.2783	0.3664
AVG					0.88212	1.04863

ตารางที่ ก-2 ผลการทำนายของความดันควบแน่นวิกฤต(bar)กับงานวิจัย Thongtip et al. [5] โดยเปรียบเทียบแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนที่ต่างกัน เมื่อใช้สารทำความเย็นคือ R141b

D3.2M2.5		Experimental Data [5]	CFD simulation Thesis [5]			CFD simulation	Error			
T <sub>gen</sub> (°C)	T <sub>evap</sub> (°C)		standard k-ε	realizable k-ε	k-ω-sst		standard k-ε	Experiment	standard k-ε	realizable k-ε
100	6	0.94	0.88	0.92	0.9	0.88	6.383	0.000	4.348	2.222
	8	0.98	0.93	0.95	0.94	0.92	6.122	1.075	3.158	2.128
	10	1.03	0.96	1.01	0.96	1.02	0.971	6.250	0.990	6.250
AVG							4.492	2.442	2.832	3.533
100	10	1.03	0.93	1.01	0.9	1.02	0.971	9.677	0.990	13.333
110		1.1	1.04	1.06	1.02	1.01	8.182	2.885	4.717	0.980
120		1.21	1.1	1.18	1.1	1.2	0.826	9.091	1.695	9.091
AVG							3.326	7.218	2.467	7.802

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3 ผลการทำนายของ Entrainment Ratio กับงานวิจัย Thongtip et al.[5] เมื่อใช้  
สารทำความเย็น R141b

via: Realizable k-epsilon,scable wall function

D3.2M2.5		Experimental data [5]	CFD simulation Thesis [5]	CFD simulation			Error	
$T_{gen}$ (°C)	$T_{evap}$ (°C)	Rm	Rm	Primary Fluid (kg/s)	Secondary Fluid (kg/s)	Rm	Experimental data	CFD
100	6	0.21	0.215	0.0209	0.0046	0.2183	3.9695	1.5516
	8	0.245	0.255	0.0209	0.0047	0.2248	8.2476	11.8457
	10	0.265	0.271	0.0209	0.0050	0.2416	8.8424	10.8607
						AVG	7.0198	8.0860
100	10	0.265	0.271	0.0209	0.0050	0.2416	8.8424	10.8607
110		0.205	0.209	0.0256	0.0051	0.1991	2.8630	4.7221
						AVG	5.8527	7.7914

ตารางที่ ก-4 ผลการทำนายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และแบบจำลองโดยใช้ ANSYS (FLUENT) 19 กับงานวิจัย Huang et al. [1] เมื่อใช้สารทำความเย็น R141b และแบบจำลองอีเจคเตอร์ AD

$\phi_{mp}$	Operating condition		Experimental data [1]			Math Model		
	$T_{gen}$ (°C)	$T_{evap}$ (°C)	$P_{cc}$ (bar)	$P_{cb}$ (bar)	Rm	$P_{cc}$ (bar)	$P_{cb}$ (bar)	Rm
0.68	95	8	1.0698	1.1738	0.3457	1.0731	1.2369	0.3597
0.65	90		0.9800	1.0661	0.4446	0.9745	1.1435	0.4252
0.62	84		0.8770	0.9766	0.5329	0.8679	1.0565	0.5193

Operating condition		Computational Fluid Dynamic					Error		
$T_{gen}$ (°C)	$T_{evap}$ (°C)	$P_{cc}$ (bar)	$P_{cb}$ (bar)	$\dot{m}_p$ (kg/s)	$\dot{m}_s$ (kg/s)	Rm	Rm	$P_{cc}$	$P_{cb}$
95	8	1.0500	1.1550	0.0188	0.0063	0.3344	3.2778	1.8508	1.6016
90		0.9500	1.0300	0.0168	0.0066	0.3932	11.5668	3.0642	3.3862
84		0.8350	0.9280	0.0147	0.0064	0.4391	17.5929	4.7934	4.9726
						AVG	10.8125	3.2361	3.3201

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

ตารางผลการหาจำนวนกริดเซลล์ที่เหมาะสมที่ใช้ในแบบจำลอง  
โดยใช้โปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข ผลการทำนายอัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิ, อัตราการไหลของมวลของของไหลทุติยภูมิและ Entrainment ratio ของสารทำความเย็น R141b โดยใช้จำนวนกริดเซลล์ที่แตกต่างกันในการทำนาย

via : Realizable k-epsilon, scable wall function

Number of grid cells		CFD simulation					
Target	Actual test	Primary Fluid (kg/s)	Error	Secondary Fluid (kg/s)	Error	Rm	Error
10000	-	-	-	-	-	-	-
20000	21668	0.018847198	0	0.006285123	0	0.333477841	0
30000	31288	0.018785056	0.329715	0.006272812	0.195875	0.333925643	0.134282
40000	41172	0.018784677	0.002018	0.006281005	0.130614	0.334368544	0.132635
50000	49110	0.018783378	0.006915	0.006279586	0.022601	0.334316091	0.015687
60000	59340	0.018783378	0	0.006282426	0.045231	0.334467304	0.045231

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค



ตารางผลการหาสมการจาก Polynomial Regression  
Analysis ของสารทำความเย็น R141b, R245fa และ  
R1233zd(E) จากแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้โดยใช้โปรแกรม  
ANSYS (FLUENT) 19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-1 ผลการทำนายอัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิเมื่อใช้แบบจำลองที่ได้  
ออกแบบของแต่ละสารทำความเย็นโดยใช้โปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19


Primary mass flow rate, (Kg/s)							
T <sub>evap</sub> (°C)	T <sub>gen</sub> (°C)	R141b		R245fa		R1233zd(E)	
		CFD simulation	Math Model[4]	CFD simulation	Math Model[4]	CFD simulation	Math Model[4]
8	85	0.015023209	0.01485	0.015357133	0.016687676	0.014702716	0.016025653
	90	0.016828407	0.016633	0.017271028	0.018675528	0.016411163	0.017884699
	95	0.018784553	0.018564	0.019265608	0.020829172	0.018258825	0.01989501
	100	0.020898508	0.0206504	0.021421496	0.02315678	0.020252382	0.022063864
	105	0.023177073	0.022898	0.02374664	0.025666882	0.022398811	0.024398786
	110	0.025626246	0.025316	0.026249402	0.028368487	0.024705307	0.026907604
	115	0.028255375	0.027909	0.028938747	0.031271252	0.027179423	0.029598527
	120	0.031085175	0.030685	0.031824465	0.034385712	0.029829223	0.032480244
	125	0.034074747	0.0336505	0.034917462	0.037723627	0.032663218	0.035562062
	130	0.037279972	0.0368122	0.038230274	0.041298504	0.035690794	0.038854098

ตารางที่ ค-2 สมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิกับอุณหภูมิ  
เครื่องกำเนิดไอจากผลการทำนาย CFD โดยใช้วิธี polynomial regression analysis

Regression	Equation	R-Square
R141b	$y = -28586x^2 + 3493.7x + 39.258$	0.9998
R245fa	$y = -27919x^2 + 3449.7x + 38.704$	0.9998
R1233zd(E)	$y = -32129x^2 + 3740x + 37.233$	0.9999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง



ตารางผลการทำนายของสารทำความเย็น R141b, R245fa และ R1233zd(E) จากแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้โดยใช้โปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตารางที่ ง-1ก แสดงผลการทำนายของแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ของสารทำความเย็น R141b ,R245fa และ R1233zd(E) โดยโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อกำหนดอัตราการไหลของมวลของไหลปฐมภูมิเท่ากับ 0.018 kg/s

T <sub>evap</sub> (°C)	Working Fluid	Primary mass flow rate (kg/s)		Secondary mass flow rate (kg/s)		Entrainment Ratio	
		CFD	Math model	CFD	Math model	CFD	Math model
8	R141b	0.017983564	0.017773733	0.006323118	0.005017711	0.351605388	0.282310475
	R245fa	0.017964553	0.019947304	0.008036147	0.005564196	0.44733353	0.278944764
	R1233zd(E)	0.018258825	0.01989501	0.008929534	0.005775585	0.489053058	0.290303197
10	R141b	0.017983564	0.017773733	0.007247112	0.005727078	0.402985309	0.322221449
	R245fa	0.017964553	0.019947304	0.009221225	0.005952049	0.513301099	0.298388644
	R1233zd(E)	0.018258825	0.01989501	0.009325761	0.006568188	0.5107536	0.330142483
12	R141b	0.017983564	0.017773733	0.007839522	0.006500357	0.435927067	0.365728291
	R245fa	0.017964553	0.019947304	0.010190541	0.006559398	0.567258256	0.328836318
	R1233zd(E)	0.018258825	0.01989501	0.010133424	0.007017051	0.554987739	0.35270407
14	R141b	0.017983564	0.017773733	0.008034563	0.007339534	0.446772586	0.41294274
	R245fa	0.017964553	0.019947304	0.010783086	0.00701536	0.600242377	0.351694645
	R1233zd(E)	0.018258825	0.01989501	0.011209061	0.00843422	0.613898266	0.423936454
16	R141b	0.017983564	0.017773733	0.008046717	0.008246638	0.447448387	0.463978951
	R245fa	0.017964553	0.019947304	0.011907223	0.007499946	0.662817661	0.375987953
	R1233zd(E)	0.018258825	0.01989501	0.011693356	0.009365352	0.640422152	0.470738743

ตารางที่ ง-1ก แสดงผลการทำนายของแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ของสารทำความเย็น R141b ,R245fa และ R1233zd(E) โดยโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อกำหนดอัตราการไหลของมวลของไหลปฐมภูมิเท่ากับ 0.018 kg/s (ต่อ)

T <sub>evap</sub> (°C)	Working Fluid	Critical condensing pressure (bar)		Breakdown pressure (bar)		Evaporator pressure (bar)
		CFD	Math model	CFD	Math model	
8	R141b	1	1.116209	1.1	1.314311	0.39972
	R245fa	1.84	2.09	1.94	2.67	0.75384
	R1233zd(E)	1.61	1.86	1.68	2.34	0.67385
10	R141b	1.02	1.180752	1.1	1.419731	0.43495
	R245fa	1.86	2.21	1.96	2.88	0.82044
	R1233zd(E)	1.615	1.89	1.7	2.47	0.73136
12	R141b	1.04	1.2000729	1.1	1.53263704	0.47263
	R245fa	1.88	2.29	1.98	2.98	0.89165
	R1233zd(E)	1.62	1.899	1.71	2.66	0.79268
14	R141b	1.06	1.2202021	1.11	1.556743	0.51287
	R245fa	1.91	2.42	2	3.22	0.96769
	R1233zd(E)	1.625	1.9	1.72	2.72	0.85799
16	R141b	1.061	1.24131	1.115	1.63549	0.5558
	R245fa	1.93	2.55	2.1	3.47	1.048778
	R1233zd(E)	1.63	2	1.73	2.93	0.92746

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-1ก แสดงผลการทำนายของแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ของสารทำความเย็น R141b ,R245fa และ R1233zd(E) โดยโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อกำหนดอัตราการไหลของมวลของไหลปฐมภูมิเท่ากับ 0.018 kg/s (ต่อ)

T <sub>evap</sub> (°C)	Working Fluid	Entrainment Ratio		Critical condensing temperature (°C)		Pressure lift ratio	
		CFD	Math model	CFD	Math model	CFD	Math model
8	R141b	0.351605388	0.282310475	31.6713	34.8234	2.501751226	2.792477234
	R245fa	0.44733353	0.278944764	30.9683	34.6238	2.440836252	2.772471612
	R1233zd(E)	0.489053058	0.290303197	31.1837	35.4761	2.389255769	2.760258218
10	R141b	0.402985309	0.322221449	32.2345	36.4542	2.345097138	2.714684446
	R245fa	0.513301099	0.298388644	31.2745	36.2588	2.267076203	2.693676564
	R1233zd(E)	0.5107536	0.330142483	31.2744	35.9607	2.208214833	2.584226646
12	R141b	0.435927067	0.365728291	32.7891	36.9497	2.200452785	2.539138227
	R245fa	0.567258256	0.328836318	31.5781	37.311	2.108450625	2.568272304
	R1233zd(E)	0.554987739	0.35270407	31.3649	36.1049	2.043699854	2.395670384
14	R141b	0.446772586	0.41294274	33.3354	37.4388	2.066800554	2.379164506
	R245fa	0.600242377	0.351694645	32.0289	38.9618	1.973772592	2.500800876
	R1233zd(E)	0.613898266	0.423936454	31.4552	36.1209	1.893961468	2.214478024
16	R141b	0.447448387	0.463978951	33.3625	37.9216	1.908960058	2.233375315
	R245fa	0.662817661	0.375987953	32.3264	40.5455	1.840236923	2.431401116
	R1233zd(E)	0.640422152	0.470738743	31.5453	37.6883	1.757488194	2.156427231

ตารางที่ ง-1ข ตารางแสดงอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ, พลังงานที่ใส่เข้าไปเพื่อให้สารทำความเย็นระเหยและความดันของเครื่องกำเนิดไอเมื่อกำหนดอัตราการไหลของมวลของไหลปฐมภูมิเท่ากับ 0.018 kg/s

Regression	Equation	R-Square	$\dot{m}_p$ (kg/s)	T <sub>gen</sub> (°C)	Heat Input	Generator Pressure	
R141b	$y = -28586x^2 + 3493.7x + 39.258$	0.9998	0.018	92.88274	≈ 93	3.365722 kW	5.77457 bar
R245fa	$y = -27919x^2 + 3449.7x + 38.704$	0.9998	0.018	91.75284	≈ 92	2.816364 kW	10.7903 bar
R1233zd	$y = -32129x^2 + 3740x + 37.233$	0.9999	0.018	94.1432	≈ 95	2.916943 kW	9.33618 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-2ก ผลการทำนายของแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ของสารทำความเย็น R141b ,R245fa และ R1233zd(E) โดยโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อกำหนดอัตราการไหลของมวลของไหลปฐมภูมิเท่ากับ 0.020 kg/s

T <sub>evap</sub> (°C)	Working Fluid	Primary mass flow rate (kg/s)		Secondary mass flow rate (kg/s)		Entrainment Ratio	
		CFD	Math model	CFD	Math model	CFD	Math model
8	R141b	0.020033543	0.01979686	0.006651486	0.004637127	0.332017477	0.23423548
	R245fa	0.020013002	0.021738871	0.008028324	0.00501649	0.401155419	0.230761294
	R1233zd(E)	0.020252381	0.022063864	0.008249646	0.005197041	0.407342006	0.23554537
10	R141b	0.020033543	0.01979686	0.006806434	0.005328839	0.33975189	0.26917597
	R245fa	0.020013002	0.021738871	0.008616073	0.005335971	0.430523762	0.245457595
	R1233zd(E)	0.020252381	0.022063864	0.009488477	0.006124298	0.468511693	0.277571417
12	R141b	0.020033543	0.01979686	0.007655761	0.006037271	0.382147142	0.304961039
	R245fa	0.020013002	0.021738871	0.009736558	0.006436824	0.486511639	0.296097438
	R1233zd(E)	0.020252381	0.022063864	0.010195612	0.007123829	0.503427819	0.322873138
14	R141b	0.020033543	0.01979686	0.008624142	0.00691107	0.430485122	0.349099302
	R245fa	0.020013002	0.021738871	0.011197602	0.007127234	0.559516358	0.327856677
	R1233zd(E)	0.020252381	0.02263864	0.010825172	0.007599826	0.534513547	0.335701526
16	R141b	0.020033543	0.01979686	0.009042546	0.007755027	0.451370289	0.391730153
	R245fa	0.020013002	0.021738871	0.011646112	0.007611431	0.581927289	0.350130004
	R1233zd(E)	0.020252381	0.022063864	0.012026564	0.008104414	0.593834572	0.367316169

ตารางที่ ง-2ก ผลการทำนายของแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ของสารทำความเย็น R141b ,R245fa และ R1233zd(E) โดยโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อกำหนดอัตราการไหลของมวลของไหลปฐมภูมิเท่ากับ 0.020 kg/s (ต่อ)

T <sub>evap</sub> (°C)	Working Fluid	Critical condensing pressure (bar)		Breakdown pressure (bar)		Evaporator pressure (bar)
		CFD	Math model	CFD	Math model	
8	R141b	1.17	1.278	1.21	1.409	0.39972
	R245fa	2.06	2.32	2.2	2.83	0.75384
	R1233zd(E)	1.77	2.06	1.87	2.47	0.67385
10	R141b	1.18	1.296	1.22	1.479	0.43495
	R245fa	2.08	2.43	2.2	3.06	0.82044
	R1233zd(E)	1.78	2.065	1.87	2.61	0.73136
12	R141b	1.182	1.322	1.23	1.551	0.47263
	R245fa	2.1	2.45	2.2	3.11	0.89165
	R1233zd(E)	1.8	2.07	1.87	2.72	0.79268
14	R141b	1.183	1.335	1.24	1.63	0.51287
	R245fa	2.12	2.52	2.3	3.27	0.96769
	R1233zd(E)	1.81	2.079	1.89	2.82	0.85799
16	R141b	1.184	1.36	1.24	1.71	0.5558
	R245fa	2.13	2.65	2.3	3.52	1.048778
	R1233zd(E)	1.82	2.18	1.91	3.03	0.92746

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-2ก ผลการทำนายของแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ของสารทำความเย็น R141b ,R245fa และ R1233zd(E) โดยโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อกำหนดอัตราการไหลของมวลของไหลปฐมภูมิเท่ากับ 0.020 kg/s (ต่อ)

T <sub>evap</sub> (°C)	Working Fluid	Entrainment Ratio		Critical condensing temperature (°C)		Pressure lift ratio	
		CFD	Math model	CFD	Math model	CFD	Math model
8	R141b	0.332017477	0.23423548	36.204	38.8226	2.927048934	3.197238067
	R245fa	0.401155419	0.230761294	34.2037	37.6983	2.732675369	3.077576143
	R1233zd(E)	0.407342006	0.23554537	33.9852	38.6001	2.626697336	3.057060177
10	R141b	0.33975189	0.26917597	36.4542	39.2421	2.712955512	2.979652834
	R245fa	0.430523762	0.245457595	34.4842	39.0859	2.535225001	2.961825362
	R1233zd(E)	0.468511693	0.277571417	34.1537	38.6001	2.433821921	2.823506891
12	R141b	0.382147142	0.304961039	36.5041	39.8402	2.500899223	2.797114022
	R245fa	0.486511639	0.296097438	34.7628	39.333	2.355184209	2.747714911
	R1233zd(E)	0.503427819	0.322873138	34.4886	38.6751	2.270777615	2.611394257
14	R141b	0.430485122	0.349099302	36.529	40.1358	2.30662741	2.602998811
	R245fa	0.559516358	0.327856677	35.0392	40.1857	2.190784239	2.604139756
	R1233zd(E)	0.534513547	0.335701526	34.6549	38.8845	2.109581697	2.423105164
16	R141b	0.451370289	0.391730153	36.5538	40.698	2.130262684	2.446923354
	R245fa	0.581927289	0.350130004	35.1767	41.7218	2.03093505	2.52675018
	R1233zd(E)	0.593834572	0.367316169	34.8205	40.3639	1.962348781	2.350505682

ตารางที่ ง-2ข ตารางแสดงอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ, พลังงานที่ใส่เข้าไปเพื่อให้สารทำความเย็นระเหยและความดันของเครื่องกำเนิดไอเมื่อกำหนดอัตราการไหลของมวลของไหลปฐมภูมิเท่ากับ 0.020 กิโลกรัมต่อวินาที

Regression	Equation	R-Square	$\dot{m}_p$ (kg/s)	T <sub>gen</sub> (°C)		Heat Input		Generator Pressure	
R141b	$y = -28586x^2 + 3493.7x + 39.258$	0.9998	0.02	97.6976	≈ 98	3.368494	kW	6.47565	bar
R245fa	$y = -27919x^2 + 3449.7x + 38.704$	0.9998	0.02	96.5304	≈ 97	2.98723	kW	11.82352	bar
R1233zd	$y = -32129x^2 + 3740x + 37.233$	0.9999	0.02	99.1814	≈ 100	3.143242	kW	10.42406	bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-3ก ผลการทำนายของแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ของสารทำความเย็น R141b ,R245fa และ R1233zd(E) โดยโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อกำหนดอัตราการไหลของมวลของไหลปฐมภูมิเท่ากับ 0.022 kg/s

T <sub>evap</sub> (°C)	Working Fluid	Primary mass flow rate (kg/s)		Secondary mass flow rate (kg/s)		Entrainment Ratio	
		CFD	Math model	CFD	Math model	CFD	Math model
8	R141b	0.022245462	0.021979595	0.006359801	0.004286379	0.285892044	0.195016287
	R245fa	0.022225128	0.024138429	0.008598463	0.004584879	0.386880224	0.189941069
	R1233zd	0.021956942	0.023918146	0.008079171	0.004952676	0.367955196	0.207067722
10	R141b	0.022245462	0.021979595	0.007328813	0.004906672	0.329452056	0.223237598
	R245fa	0.022225128	0.024138429	0.008870082	0.005230598	0.399101512	0.216691733
	R1233zd	0.021956942	0.023918146	0.00890492	0.005626043	0.405562842	0.235220698
12	R141b	0.022245462	0.021979595	0.00741034	0.005645069	0.333116943	0.256832257
	R245fa	0.022225128	0.024138429	0.009302618	0.005546574	0.418563083	0.229781897
	R1233zd	0.021956942	0.023918146	0.010205565	0.006621109	0.464799014	0.276823672
14	R141b	0.022245462	0.021979595	0.008116229	0.006452923	0.364848768	0.293586984
	R245fa	0.022225128	0.024138429	0.010329313	0.006996076	0.464758313	0.289831455
	R1233zd	0.021956942	0.023918146	0.011035457	0.007439265	0.502595352	0.311030169
16	R141b	0.022245462	0.021979595	0.009271188	0.007332078	0.416767613	0.333585673
	R245fa	0.022225128	0.024138429	0.011840266	0.007456511	0.532742309	0.308906226
	R1233zd	0.021956942	0.023918146	0.011638804	0.007921162	0.530073997	0.331177927

ตารางที่ ง-3ก ผลการทำนายของแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ของสารทำความเย็น R141b ,R245fa และ R1233zd(E) โดยโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อกำหนดอัตราการไหลของมวลของไหลปฐมภูมิเท่ากับ 0.022 kg/s (ต่อ)

T <sub>evap</sub> (°C)	Working Fluid	Critical condensing pressure (bar)		Breakdown pressure (bar)		Evaporator pressure (bar)
		CFD	Math model	CFD	Math model	
8	R141b	1.3	1.4	1.37	1.4758	0.39972
	R245fa	2.3	2.54	2.4	2.94	0.75384
	R1233zd	1.92	2.19	2	2.55	0.67385
10	R141b	1.32	1.4258	1.37	1.548686	0.43495
	R245fa	2.31	2.6	2.41	3.15	0.82044
	R1233zd	1.94	2.23	2.1	2.69	0.73136
12	R141b	1.321	1.4446	1.37	1.62708	0.47263
	R245fa	2.33	2.67	2.43	3.24	0.89165
	R1233zd	1.96	2.24	2.1	2.83	0.79268
14	R141b	1.325	1.464	1.37	1.7093	0.51287
	R245fa	2.35	2.74	2.44	3.38	0.96769
	R1233zd	1.968	2.29	2.1	2.95	0.85799
16	R141b	1.33	1.484	1.38	1.793	0.5558
	R245fa	2.37	2.81	2.47	3.64	1.048778
	R1233zd	1.98	2.41	2.1	3.07	0.92746

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-3ก ผลการทำนายของแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ของสารทำความเย็น R141b ,R245fa และ R1233zd(E) โดยโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อกำหนดอัตราการไหลของมวลของไหลปฐมภูมิเท่ากับ 0.022 kg/s (ต่อ)


T <sub>evap</sub> (°C)	Working Fluid	Entrainment Ratio		Critical condensing temperature (°C)		Pressure lift ratio	
		CFD	Math model	CFD	Math model	CFD	Math model
8	R141b	0.285892044	0.195016287	39.3348	41.5812	3.252276594	3.502451716
	R245fa	0.386880224	0.189941069	37.4406	40.4259	3.051045315	3.369415261
	R1233zd	0.367955196	0.207067722	36.4394	40.5075	2.849298805	3.24998145
10	R141b	0.329452056	0.223237598	39.7945	42.1405	3.03483159	3.27807794
	R245fa	0.399101512	0.216691733	37.5696	41.138	2.815562381	3.169031252
	R1233zd	0.405562842	0.235220698	36.7553	41.0769	2.652592431	3.049113979
12	R141b	0.333116943	0.256832257	39.8174	42.5431	2.794998202	3.056513552
	R245fa	0.418563083	0.229781897	37.8265	41.953	2.613132956	2.994448494
	R1233zd	0.464799014	0.276823672	37.0688	41.2181	2.472624514	2.825856588
14	R141b	0.364848768	0.293586984	39.9086	42.9543	2.583500692	2.854524538
	R245fa	0.464758313	0.289831455	38.0817	42.7517	2.428463661	2.83148529
	R1233zd	0.502595352	0.311030169	37.1935	41.9165	2.293733027	2.669028777
16	R141b	0.416767613	0.333585673	40.0224	43.3739	2.392947103	2.670025189
	R245fa	0.532742309	0.308906226	38.3352	43.5348	2.259772802	2.679308681
	R1233zd	0.530073997	0.331177927	37.3798	43.5463	2.134862959	2.598494814

ตารางที่ ง-3ข ตารางแสดงอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ, พลังงานที่ใส่เข้าไปเพื่อให้สารทำความเย็นระเหยและความดันของเครื่องกำเนิดไอ เมื่อกำหนดอัตราการไหลของมวลของไหลปฐมภูมิเท่ากับ 0.022 kg/s

Regression	Equation	R-Square	$\dot{m}_p$ (kg/s)	T <sub>gen</sub> (°C)	Heat Input	Generator Pressure	
R141b	$y = -28586x^2 + 3493.7x + 39.258$	0.9998	0.022	102.2838	≈ 103	4.017988 kW	7.23792 bar
R245fa	$y = -27919x^2 + 3449.7x + 38.704$	0.9998	0.022	101.0846	≈ 102	3.197386 kW	13.21702 bar
R1233zd	$y = -32129x^2 + 3740x + 37.233$	0.9999	0.022	103.9626	≈ 104	3.324331 kW	11.36054 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ



ตารางแสดงผลการทำนายความดันวิกฤตของเครื่องควบแน่นเมื่อ  
กำหนดให้ pressure lift ratio ใกล้เคียงกันของสารทำความ  
เย็น R141b, R245fa และ R1233zd(E) จากแบบจำลองที่ได้  
ออกแบบไว้โดยใช้โปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19

ตารางที่ จ-1 ผลการทำนายความดันวิกฤตที่เกิดขึ้นที่เครื่องควบแน่นเปรียบเทียบเมื่อกำหนดให้อัตราส่วนความดันระหว่างความดันเครื่องควบแน่นและความดันเครื่องระเหยใกล้เคียงเท่ากับ 2 กับแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้โดยใช้โปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 เมื่ออัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิเท่ากับ 0.018 kg/s

Refrigerant	T <sub>evap</sub> (°C)	T <sub>gen</sub> (°C)	Evaporator Pressure (bar)	Fixed	Condensing Pressure (bar)	Critical Condensing Pressure from CFD		OPE
				Pressure lift ratio		Pressure lift ratio @ cc	Pressure (bar)	
R141b	12	93	0.47263	2	0.94526	2.200452785	1.04	CHOKED FLOW
R245fa		92	0.89165		1.7833	2.108450625	1.88	CHOKED FLOW
R1233zd		95	0.79268		1.58536	2.043699854	1.62	CHOKED FLOW

ตารางที่ จ-2 ผลการทำนายความดันวิกฤตที่เกิดขึ้นที่เครื่องควบแน่นเปรียบเทียบเมื่อกำหนดให้อัตราส่วนความดันระหว่างความดันเครื่องควบแน่นและความดันเครื่องระเหยใกล้เคียงเท่ากับ 2 กับแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้โดยใช้โปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 เมื่ออัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิเท่ากับ 0.020 kg/s

Refrigerant	T <sub>evap</sub> (°C)	T <sub>gen</sub> (°C)	Evaporator Pressure (bar)	Fixed	Condensing Pressure (bar)	Critical Condensing Pressure from CFD		OPE
				Pressure lift ratio		Pressure lift ratio @ cc	Pressure (bar)	
R141b	12	98	0.47263	2	0.94526	2.500899223	1.182	CHOKED FLOW
R245fa		97	0.89165		1.7833	2.355184209	2.1	CHOKED FLOW
R1233zd		100	0.79268		1.58536	2.270777615	1.8	CHOKED FLOW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-3 ผลการทำนายความดันวิกฤตที่เกิดขึ้นที่เครื่องควบแน่นเปรียบเทียบเมื่อกำหนดให้อัตราส่วนความดันระหว่างความดันเครื่องควบแน่นและความดันเครื่องระเหยใกล้เคียงเท่ากับ 2 กับแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้โดยใช้โปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 เมื่ออัตราการไหลของมวลของของไหลปฐมภูมิเท่ากับ 0.022 kg/s

Refrigerant	T <sub>evap</sub> (°C)	T <sub>gen</sub> (°C)	Evaporator Pressure (bar)	Fixed	Condensing Pressure (bar)	Critical Condensing Pressure from CFD		OPE
				Pressure lift ratio		Pressure lift ratio @ cc	Pressure (bar)	
R141b	12	103	0.47263	2	0.94526	2.794998202	1.321	CHOKED FLOW
R245fa		102	0.89165		1.7833	2.613132956	2.33	CHOKED FLOW
R1233zd		104	0.79268		1.58536	2.472624514	1.96	CHOKED FLOW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

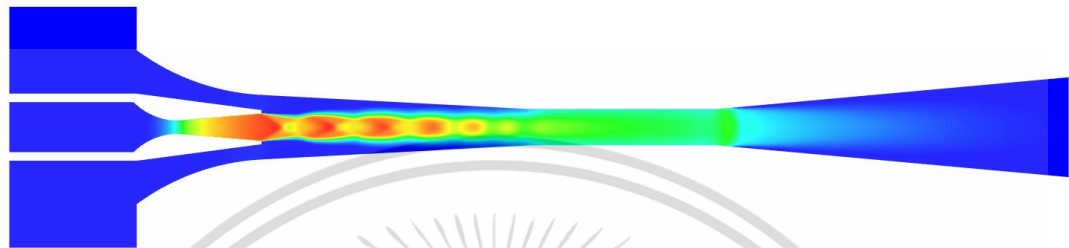
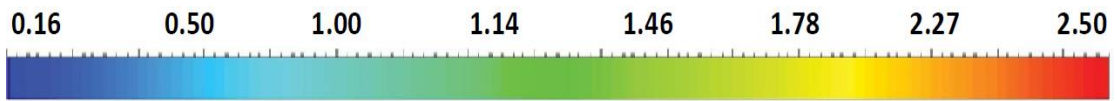
## ภาคผนวก ข



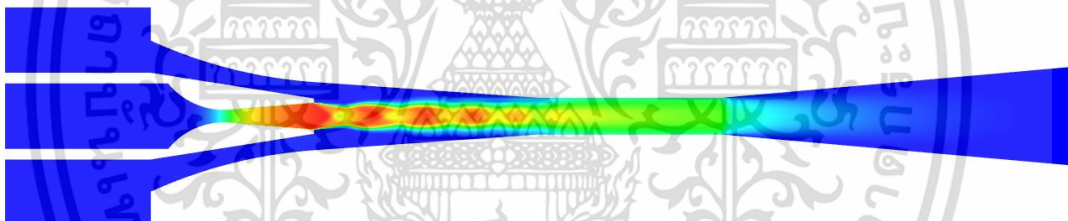
ผลการทำนายของแบบจำลองที่ได้ ออกแบบไว้โดยแสดงลักษณะ  
การไหลผ่านคอนทอร์ในโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

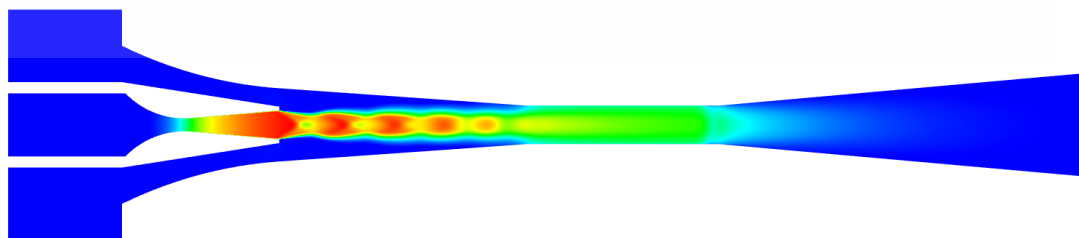
Mach number



รูปที่ ข-1ก แสดงลักษณะการไหลของสารทำความเย็น R141b ในแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ โดยอัตราการไหลของมวลของไหลปฐมภูมิเท่ากับ 0.018 kg/s



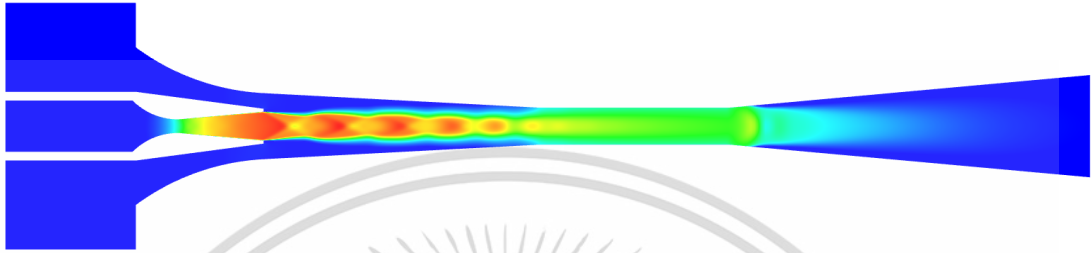
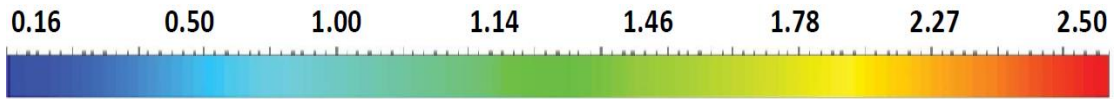
รูปที่ ข-1ข แสดงลักษณะการไหลของสารทำความเย็น R245fa ในแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ โดยอัตราการไหลของมวลของไหลปฐมภูมิเท่ากับ 0.018 kg/s



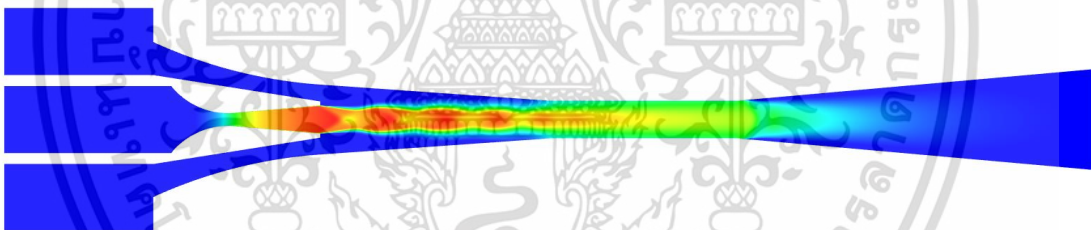
รูปที่ ข-1ค แสดงลักษณะการไหลของสารทำความเย็น R1233zd(E) ในแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ โดยอัตราการไหลของมวลของไหลปฐมภูมิเท่ากับ 0.018 kg/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

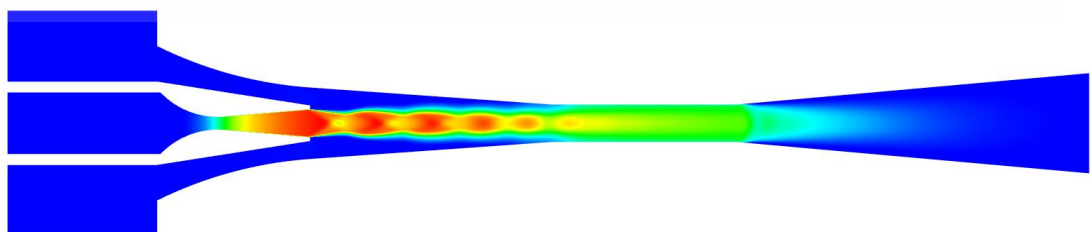
Mach number



รูปที่ ข-2ก แสดงลักษณะการไหลของสารทำความเย็น R141b ในแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ โดยอัตราการไหลของมวลของไหลปฐมภูมิเท่ากับ 0.020 kg/s



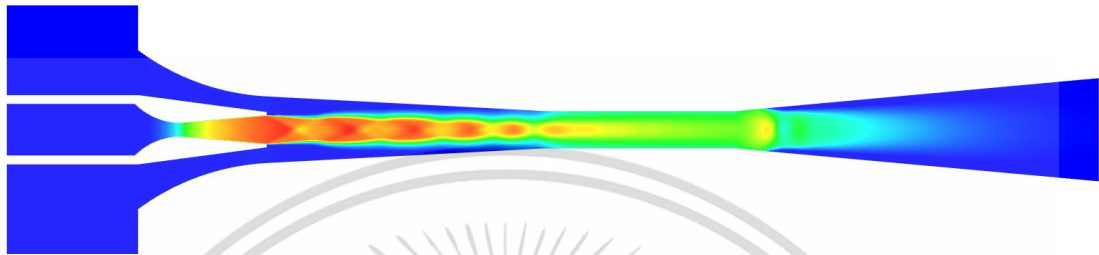
รูปที่ ข-2ข แสดงลักษณะการไหลของสารทำความเย็น R245fa ในแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ โดยอัตราการไหลของมวลของไหลปฐมภูมิเท่ากับ 0.020 kg/s



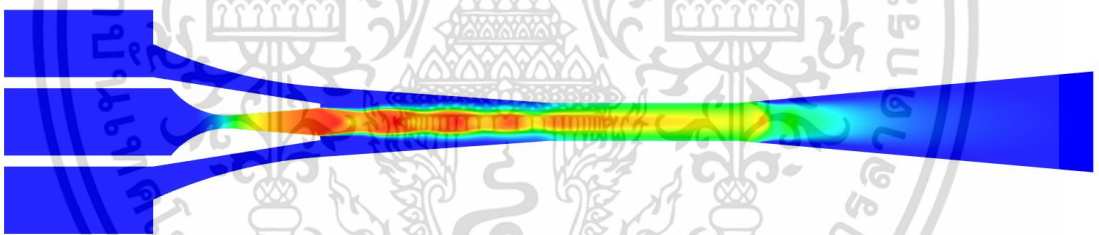
รูปที่ ข-2ค แสดงลักษณะการไหลของสารทำความเย็น R1233zd(E) ในแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ โดยอัตราการไหลของมวลของไหลปฐมภูมิเท่ากับ 0.020 kg/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

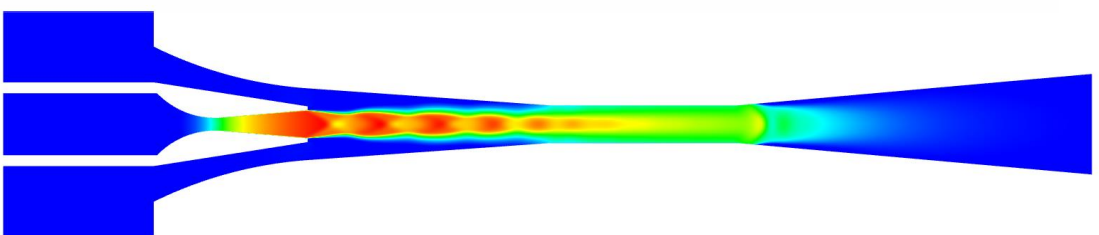
Mach number



รูปที่ ข-3ก แสดงลักษณะการไหลของสารทำความเย็น R141b ในแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ โดยอัตราการไหลของมวลของไหลปฐมภูมิเท่ากับ 0.022 kg/s



รูปที่ ข-2ข แสดงลักษณะการไหลของสารทำความเย็น R245fa ในแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ โดยอัตราการไหลของมวลของไหลปฐมภูมิเท่ากับ 0.022 kg/s



รูปที่ ข-2ค แสดงลักษณะการไหลของสารทำความเย็น R1233zd(E) ในแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ โดยอัตราการไหลของมวลของไหลปฐมภูมิเท่ากับ 0.022 kg/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้