

การศึกษาสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้ในงานระบบทำความเย็นโดย
แปรผันตามการใช้งานกับสารทำความเย็นที่มีจุดเดือดสูงต่างๆ

THE STUDY OF PERFORMANCE OF AN EJECTOR USED IN
REFRIGERATION APPLICATION INFLUENCED BY VARYING
HIGH BOILING POINT REFRIGERANTS



ภารดา อัมพิทักษ์
สพล คงเจริญ
สิริเชษฐ์ วีระปรียากร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้ในงานระบบทำความเย็นโดย
แปรผันตามการใช้งานกับสารทำความเย็นที่มีจุดเดือดสูงต่างๆ

THE STUDY OF PERFORMANCE OF AN EJECTOR USED IN
REFRIGERATION APPLICATION INFLUENCED BY VARYING
HIGH BOILING POINT REFRIGERANTS



ภารดา อิมพิทักษ์
สพล คงเจริญ
สิริเชษฐ์ วีระปรียากร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF PERFORMANCE OF AN EJECTOR USED IN
REFRIGERATION APPLICATION INFLUENCED BY VARYING
HIGH BOILING POINT REFRIGERANTS

The seal of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang is a large, circular emblem. It features a central sunburst with rays emanating from a central point. Below the sunburst are two traditional Thai stupas (chedis) flanking a central, more ornate structure. The entire emblem is surrounded by a decorative border with Thai script. The text 'PARADA IMPITHUK SAPHON KONGCHAROEN SIRICHED WIRAPRIYAKUN' is overlaid on the seal.

PARADA IMPITHUK
SAPHON KONGCHAROEN
SIRICHED WIRAPRIYAKUN

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

2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


ปริญญาโทปีการศึกษา 2564
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้ในงานระบบทำความเย็นโดยแปรผันตามการใช้งานกับสารทำความเย็นที่มีจุดเดือดสูงต่างๆ

The study of the performance of an ejector used in refrigeration application influenced by varying high boiling point refrigerants

ผู้จัดทำ

- | | | |
|------------------|-------------|----------|
| 1. นางสาว ภารดา | อิมพิทักษ์ | 61010816 |
| 2. นาย สพล | คงเจริญ | 61011065 |
| 3. นาย สิริเชษฐ์ | วีระปรียากร | 61011118 |


อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร. ณัฐวุฒิ เรืองตระกูล)

การศึกษาสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้ในงานระบบทำความเย็นโดยแปรผันตามการใช้งานกับสารทำความเย็นที่มีจุดเดือดสูงต่างๆ

นางสาว ภารดา อิ่มพิทักษ์ 61010816

นาย สพล คงเจริญ 61011065

นาย สิริเชษฐ์ วีระปรียากร 61011118

ดร.ณัฐวุฒิ เรืองตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2564

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เป็นการทำนายประสิทธิภาพของระบบการทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของสารทำความเย็นได้แก่ R141b R245fa และ R1244yd(z) โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และโปรแกรมวิเคราะห์เชิงตัวเลข ANSYS (FLUENT) 2D โดยการกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้มีลักษณะเดียวกัน การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพซึ่งสามารถพิจารณาได้จาก Entrainment Ratio สามารถทำนายได้จากการจำลอง

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยตัวแปรไร้มิติ อัตราส่วนความดัน ความดันวิกฤตและค่าประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ในการเปรียบเทียบสมรรถนะในการทำงานของสารทำความเย็นชนิดต่างๆ

สารทำความเย็น R1244yd(z) ให้ค่า Entrainment Ratio สูงกว่า R141b และ R245fa แต่ค่าของประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ (Ejector efficiency) และค่าของ Critical discharge pressure นั้น ค่าของสารทำความเย็น R245fa มีค่ามากกว่าสารทำเย็น R141b และ R1224yd(z) แต่ถึงอย่างนั้น ค่าของ R1224yd(z) ก็มีค่าใกล้เคียงกับสารทำความเย็น R245fa และทั้ง 3 สารทำความเย็นในช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา อุณหภูมิของหม้อไอน้ำที่ทำให้มีสมรรถนะสูงสุดอยู่ที่ 90.5 องศาเซลเซียส

จากการจำลองแสดงให้เห็นว่าสารทำความเย็น R1244yd(z) ที่มีแนวโน้มที่จะสามารถทดแทนสารทำความเย็นที่ใช้ในปัจจุบันอย่าง R141b และ R245fa ได้ อีกทั้งยังมีค่าศักยภาพในการทำให้เกิดโลกร้อน (Global Warming Potential: GWP) มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสารทำความเย็น R141b และ R245fa

The study of the performance of an ejector used in refrigeration application influenced by varying high boiling point refrigerants

Parada Impithuk 61010816

Saphon Kongcharoen 61011065

Siriched Wirapriyakun 61011118

Dr.Natthawut Ruangtrakoon Advisor

Year 2564

Abstract

In this research, the efficiency of the ejector cooling system was predicted using a mathematical model and numerical analysis program ANSYS (FLUENT) 20 R2 to compare the performance of refrigerants R141b, R245fa, and R1224yd(z) by defining characteristics of mathematical models to be the same. The performance comparison that can be determined from the Entrainment Ratio was predicted from the simulation.

Therefore, it is necessary to have dimensionless variables – Pressure Life Ratio Critical discharge pressure and Ejector efficiency for performance comparison in each refrigerants.

The refrigerant R1224yd(z) has a higher Entrainment Ratio than R141b and R245fa, while R245fa has a higher Ejector efficiency and Critical discharge pressure value than R141b and R1224yd(z). However, the ejector efficiency of R1224yd(z) was close to R245fa and the optimal boiler temperature in three refrigerants are 90.5 degrees Celsius.

Simulations display that R1224yd(z) may be a substitute for R141b and R245fa. Furthermore, as compared to R141b and R245fa refrigerants, it has a very low Global Warming Potential (GWP).

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปด้วยดีเนื่องจาก ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ เรืองตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษา
ปริญญาานิพนธ์ผู้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ที่เป็นประโยชน์แก่ปริญญา
นิพนธ์ ให้ความช่วยเหลือและรวมทั้งแก้ไขปัญหามาทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ และขอขอบคุณ
อาจารย์เอกราช บำรุงไทยชัยชาญและดร. ต้องชนะ ทองทิพย์ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำตลอดการทำ
ปริญญาานิพนธ์ รวมถึงเพื่อนที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการวิจัยในครั้งนี้ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือเป็น
อย่างดีตลอดมา และกราบขอบคุณบิดา มารดา และญาติที่สนับสนุนและเป็นกำลังใจตลอดการทำ
ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ทางคณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูง

คุณงามความดีที่เกิดจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ทางคณะผู้วิจัยขอมอบให้บิดา มารดา และญาติอัน
เป็นที่รักและเคารพ และ ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ เรืองตระกูล รวมถึงอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่มอบความวิชา
ความรู้ที่ดีให้แก่ทางคณะผู้วิจัย

| | |
|---------------|-------------|
| นางสาว ภารดา | อิมพิทักษ์ |
| นาย สพล | คงเจริญ |
| นาย สิริเชษฐ์ | วีระปรียากร |

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญรูป..... | VII |
| สารบัญตาราง..... | X |
| รายการคำย่อและสัญลักษณ์..... | XII |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ..... | 1 |
| 1.2 ความมุ่งหมายและจุดประสงค์ของการศึกษา..... | 1 |
| 1.3 สมมติฐานของการศึกษา..... | 2 |
| 1.4 ขอบเขตการวิจัย..... | 2 |
| 1.5 ขั้นตอนการของการศึกษา..... | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 3 |
| 2.1 บทนำ..... | 3 |
| 2.2 หลักการทำงานในระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ (Ejector refrigeration system)..... | 3 |
| 2.3 หลักการทำงานของอีเจ็คเตอร์ในระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ (Ejector refrigeration system)..... | 4 |
| 2.4 หลักการเปรียบเทียบการทำงานและประสิทธิภาพของสารทำความเย็นแต่ละชนิด..... | 6 |
| 2.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... | 7 |
| 2.5.1 การทำงานของสารทำความเย็น..... | 7 |
| 2.5.2 อัตราการไหลของมวล (mass flow rate) | 7 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 2.5.3 สมการ Stagnation..... | 8 |
| 2.5.4 เลขมัค (Mach number , Ma) | 9 |
| 2.5.5 การจัดการการไหลของเหลวภายในท่อที่มีลักษณะหน้าตัดการไหลไม่ใช่วงกลม..... | 9 |
| 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 10 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน..... | 12 |
| 3.1 การเลือกใช้ geometry ของอุปกรณ์อีเจ็คเตอร์..... | 12 |
| 3.2 การสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม ANSYS 2020 R2..... | 13 |
| 3.2.1 การออกแบบโดยใช้งานผ่านโปรแกรม ANSYS Workbench 2020 R2..... | 13 |
| 3.2.1.1 การวาด geometry แบบสมมาตรตามแนวแกน | 13 |
| 3.2.1.2 การสร้าง Meshing..... | 14 |
| 3.2.1.3 จำนวนกริดของความละเอียดที่เหมาะสม..... | 16 |
| 3.2.2 การตั้งค่ารูปแบบการจำลอง ผ่านโปรแกรม ANSYS FLUENT 2020 R2..... | 17 |
| 3.2.2.1 คุณสมบัติของสารทำความเย็น..... | 17 |
| 3.2.2.2 การกำหนด Boundary condition ของสารทำความเย็นในการจำลอง..... | 18 |
| 3.3 วิธีการดำเนินการจำลองผ่านโปรแกรม ANSYS FLUENT 20 R2..... | 20 |
| 3.4 ขอบเขตและเงื่อนไขของการจำลอง..... | 25 |
| 3.4.1 สารทำความเย็น..... | 25 |
| 3.4.2 ขอบเขต boundary condition ของการจำลอง..... | 25 |
| 3.4.3 การจำลองผลของ The Critical discharge pressure (P_{cri}) และช่วงอุณหภูมิที่ ศึกษา..... | 25 |
| 3.5 เกณฑ์การลู่เข้า..... | 26 |
| บทที่ 4 ผลการทดลอง..... | 27 |
| 4.1 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง..... | 27 |
| 4.1.1 การตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลอง..... | 27 |
| 4.1.2 การตรวจสอบความแม่นยำของทฤษฎีในการคำนวณ..... | 27 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 4.2 การศึกษาผลลัพธ์ของสารทำความเย็นที่มีผลต่ออีเจ็คเตอร์ (Ejector)..... | 28 |
| 4.2.1 การเพิ่มของความดันภายในอีเจ็คเตอร์ (Ejector)..... | 28 |
| 4.2.2 ผลการจำลองเลขมัคส่งผลต่ออุณหภูมิวิกฤติของเครื่องควบแน่น (Condenser)..... | 30 |
| 4.3 แสดงผลการหาค่า The Critical discharge pressure (P_{cri}) ของสารทำความเย็น R141b R245fa และ R1224yd(z) ที่อีเจ็คเตอร์ (Ejector)..... | 31 |
| 4.3.1 แสดงผลค่า The Critical discharge pressure (P_{cri}) ของสารทำความเย็น R141b..... | 31 |
| 4.3.2 แสดงผลค่า The Critical discharge pressure (P_{cri}) ของสารทำความเย็น R245fa..... | 32 |
| 4.3.3 แสดงผลค่า The Critical discharge pressure (P_{cri}) ของสารทำความเย็น R1224yd(z)..... | 34 |
| 4.3.4 แสดงผลค่าอัตราส่วนความดัน (Pressure lift ratio) ของสารทำความเย็น R141b , R245fa และ R1224yd(z)..... | 36 |
| 4.4 วิเคราะห์ผลประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ (Ejector Efficiency)..... | 39 |
| 4.5 แสดงผลการหาค่า The optimal vale of the generator temperature (T_{opt}) ของสารทำความเย็น R141b , R245fa และ R1224yd(z) ที่หม้อไอน้ำ (Boiler)..... | 42 |
| 4.5.1 แสดงผลค่า The optimal vale of the generator temperature (T_{opt}) ของสารทำความเย็น R141b..... | 42 |
| 4.5.2 แสดงผลค่า The optimal vale of the generator temperature (T_{opt}) ของสารทำความเย็น R245fa..... | 44 |
| 4.5.3 แสดงผลค่า The optimal vale of the generator temperature (T_{opt}) ของสารทำความเย็น R1224yd(z)..... | 46 |
| บทที่ 5 บทสรุปการจำลองผล..... | 48 |
| ภาคผนวก..... | 49 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 58 |

สารบัญรูป

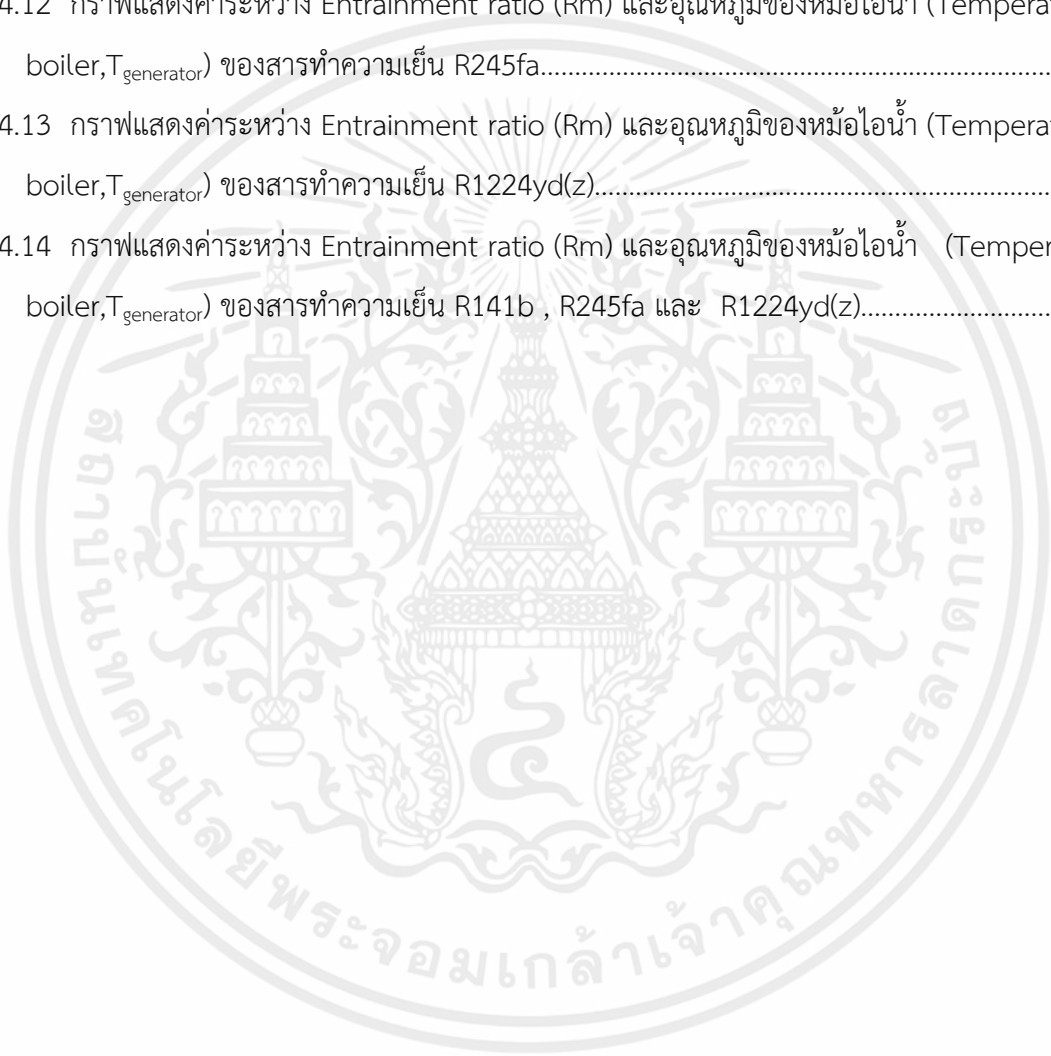
| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ภาพแผนผังของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์..... | 5 |
| 2.2 ภาพส่วนประกอบภายในของอุปกรณ์อีเจ็คเตอร์ (Ejector)..... | 6 |
| 2.3 วิธีการวัด static pressure และ stagnation..... | 8 |
| 2.4 ภาพลักษณะท่อแบบวงแหวน..... | 10 |
| 3.1 แสดงรายละเอียดของ geometry ที่ใช้ในการศึกษา..... | 13 |
| 3.2 การสร้าง Geometry และการแบ่ง Partition..... | 14 |
| 3.3 การสร้าง mesh ในส่วนของ Primary nozzle..... | 14 |
| 3.4 การสร้าง mesh ในส่วนของ Secondary nozzle..... | 14 |
| 3.5 การสร้าง mesh ในส่วนของ Mixing chamber..... | 15 |
| 3.6 การสร้าง mesh ในส่วนของ Throat..... | 15 |
| 3.7 การสร้าง mesh ในส่วนของ Diffuser..... | 16 |
| 3.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ทางออก (Pressure outlet) และ Entrainment ratio (Rm) | 17 |
| 3.9 หน้าเว็บไซต์ของ NIST (National Institute of Standards and Technology) | 18 |
| 3.10 ภาพแสดงลักษณะการจำลองการไหลของของไหลในโปรแกรม ANSYS FLUENT 20 R2..... | 18 |
| 3.11 แสดงลักษณะรายละเอียด Wall Y Plus ของ geometry..... | 21 |
| 3.12 ตัวอย่างการตั้งค่าคุณสมบัติของสารทำความเย็น R141b ในการใช้จำลอง..... | 21 |
| 3.13 การตั้งค่า Specific Heat แบบ Polynomial..... | 22 |
| 3.14 การตั้งค่า Thermal Conductivity แบบ Polynomial..... | 22 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 3.15 การตั้งค่า Viscosity แบบ Polynomial..... | 23 |
| 3.16 ตัวอย่างการตั้งค่าทางเข้าของไหลปฐมภูมิ (Primary Inlet)..... | 23 |
| 3.17 ตัวอย่างการตั้งค่าทางเข้าของไหลทุติยภูมิ (Secondary Inlet) | 24 |
| 3.18 ตัวอย่างการตั้งค่าความดันที่ทางออก (Pressure Outlet)..... | 24 |
| 4.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ Static pressure ภายในอีเจ็คเตอร์ (Ejector) ของสารทำความเย็น R141b..... | 28 |
| 4.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ Static pressure ภายในอีเจ็คเตอร์ (Ejector) ของสารทำความเย็น R245fa..... | 29 |
| 4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ Static pressure ภายในอีเจ็คเตอร์ (Ejector) ของสารทำความเย็น R1224yd(z)..... | 29 |
| 4.4 คอนทัวร์เลขมัทของสารทำความเย็นแต่ละชนิดที่ไหลภายในอีเจ็คเตอร์ (Ejector)..... | 30 |
| 4.5 กราฟแสดงค่าระหว่าง Entrainment ratio (R_m) และความดันที่ทางออก (Pressure outlet) ของสารทำความเย็น R141b..... | 32 |
| 4.6 กราฟแสดงค่าระหว่าง Entrainment ratio (R_m) และความดันที่ทางออก (Pressure outlet) ของสารทำความเย็น R245fa..... | 34 |
| 4.7 กราฟแสดงค่าระหว่าง Entrainment ratio (R_m) และความดันที่ทางออก (Pressure outlet) ของน้ำยา R1224yd(z)..... | 36 |
| 4.8 กราฟแสดงค่าระหว่าง Entrainment ratio (R_m) และอัตราส่วนความดัน (Pressure lift ratio) ของน้ำยา R141b , R245fa และ R1224yd(z)..... | 38 |
| 4.9 กราฟแสดงค่าระหว่างอุณหภูมิที่จุด The Critical discharge pressure (P_{cri}) และ Entrainment ratio (R_m) ของสารทำความเย็น R141b , R245fa และ R1224yd(z)..... | 38 |
| 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของหม้อไอน้ำ (Temperature boiler, $T_{generator}$) และ Ejector Efficiency โดยเปรียบเทียบสารทำความเย็นทั้ง 3 ชนิด..... | 42 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.11 กราฟแสดงค่าระหว่าง Entrainment ratio (R_m) และอุณหภูมิของหม้อไอน้ำ (Temperature boiler, $T_{generator}$) ของสารทำความเย็น R141b..... | 43 |
| 4.12 กราฟแสดงค่าระหว่าง Entrainment ratio (R_m) และอุณหภูมิของหม้อไอน้ำ (Temperature boiler, $T_{generator}$) ของสารทำความเย็น R245fa..... | 45 |
| 4.13 กราฟแสดงค่าระหว่าง Entrainment ratio (R_m) และอุณหภูมิของหม้อไอน้ำ (Temperature boiler, $T_{generator}$) ของสารทำความเย็น R1224yd(z)..... | 46 |
| 4.14 กราฟแสดงค่าระหว่าง Entrainment ratio (R_m) และอุณหภูมิของหม้อไอน้ำ (Temperature boiler, $T_{generator}$) ของสารทำความเย็น R141b , R245fa และ R1224yd(z)..... | 47 |



สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 3.1 จำนวนกริดของความละเอียดที่เหมาะสม..... | 16 |
| 3.2 แสดงผล Entrainment ratio (Rm) แต่ละลักษณะกริด..... | 16 |
| 3.3 ลักษณะคุณสมบัติของสารทำความเย็นที่ใช้ในการจำลอง..... | 17 |
| 3.4 แสดง Boundary condition ของทางเข้าของไหลปฐมภูมิ (Primary inlet) สารทำความเย็น R141b..... | 18 |
| 3.5 แสดง Boundary condition ของทางเข้าของไหลทุติยภูมิ (Secondary inlet) สารทำความเย็น R141b..... | 19 |
| 4.1 แสดงการเปรียบเทียบผลระหว่างการทดลองและการใช้แบบจำลองในการจำลองผล..... | 27 |
| 4.2 แสดงผลการตรวจสอบอัตราการไหลเชิงมวลปฐมภูมิ (Primary Mass Flow Rate) ในการทดลองกับ ทฤษฎี..... | 28 |
| 4.3 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลปฐมภูมิ (Primary Mass Flow Rate) ระหว่างทฤษฎี 1-DIMENSIONAL กับ การจำลองผ่านโปรแกรม Ansys Fluent ของสารทำความเย็น R245fa และ R1224yd(z)..... | 28 |
| 4.4 แสดงผลค่าของของไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) ในส่วนของทางเข้าของไหลปฐมภูมิ (Primary inlet) และ ทางเข้าของไหลทุติยภูมิ (Secondary inlet) ที่ความดันต่างๆ ของสารทำความเย็น R141b | 31 |
| 4.5 แสดงผลค่าของอัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) ในส่วนของทางเข้าของไหลปฐมภูมิ (Primary inlet) และทางเข้าของไหลทุติยภูมิ (Secondary inlet) ที่ความดันต่างๆ ของสารทำความ เย็น R245fa..... | 33 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.6 แสดงผลค่าของอัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) ในส่วนของทางเข้าของไหลปฐมภูมิ (Primary inlet) และทางเข้าของไหลทุติยภูมิ (Secondary inlet) ที่ความดันต่างๆ ของสารทำความเย็น R1224yd(z)..... | 35 |
| 4.7 แสดงค่าอัตราส่วนความดัน (Pressure lift ratio) ของสารทำความเย็น R141b..... | 36 |
| 4.8 แสดงค่าอัตราส่วนความดัน (Pressure lift ratio) ของสารทำความเย็น R245fa..... | 36 |
| 4.9 แสดงค่าอัตราส่วนความดัน (Pressure lift ratio) ของสารทำความเย็น R1224yd(z)..... | 37 |
| 4.10 แสดงผลค่าประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ (Ejector Efficiency) ที่สูงสุดของแต่ละสารทำความเย็น | 39 |
| 4.11 ประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ (Ejector Efficiency) ของสารทำความเย็น R141b ที่แปรผันตาม อุณหภูมิของหม้อไอน้ำ (Boiler)..... | 39 |
| 4.12 ประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ (Ejector Efficiency) ของสารทำความเย็น R245fa ที่แปรผันตาม อุณหภูมิของหม้อไอน้ำ (Boiler)..... | 39 |
| 4.13 ประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ (Ejector Efficiency) ของสารทำความเย็น R1224yd(z) ที่แปรผัน ตามอุณหภูมิของหม้อไอน้ำ (Boiler)..... | 41 |
| 4.14 แสดงผลค่าของอัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) ในส่วนของอัตราการไหลเชิงมวลปฐมภูมิ (Primary inlet) และอัตราการไหลเชิงมวลทุติยภูมิ (Secondary inlet) ที่อุณหภูมิต่างๆ ของสารทำ ความเย็น R141b..... | 42 |
| 4.15 แสดงผลค่าของอัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) ในส่วนของอัตราการไหลเชิงมวลปฐมภูมิ (Primary inlet) และอัตราการไหลเชิงมวลทุติยภูมิ (Secondary inlet) ที่อุณหภูมิต่างๆ ของสารทำ ความเย็น R245fa..... | 44 |
| 4.16 แสดงผลค่าของอัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) ในส่วนของอัตราการไหลเชิงมวลปฐมภูมิ (Primary inlet) และอัตราการไหลเชิงมวลทุติยภูมิ (Secondary inlet) ที่อุณหภูมิต่างๆ ของสารทำ ความเย็น R245fa..... | 45 |

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

| | |
|--|---|
| Coefficient of performance, COP | ค่าประสิทธิภาพ |
| The entrainment ratio , Rm | อัตราส่วนการไหลของของไหล |
| Pressure lift ratio, PLR | อัตราส่วนความดัน |
| Mach number , Ma | อัตราส่วนระหว่างความเร็วต่อความเร็วเสียง |
| C | ความเร็วเสียง |
| P | ความดัน |
| T | อุณหภูมิ |
| h | เอนทาลปี (enthalpy) |
| μ | ความหนืดพลวัต |
| \dot{m} | อัตราการไหลของมวล |
| \dot{m}_p | อัตราการไหลของของไหลปฐมภูมิ |
| ρ | ความหนาแน่น |
| A | พื้นที่หน้าตัด |
| V | ความเร็วของการไหล |
| D_h | hydraulic diameter |
| r_o | รัศมีของวงกลมภายนอก |
| r_i | รัศมีของวงกลมภายใน |
| C_p | ความร้อนจำเพาะโดยความดันคงที่ |
| C_v | ความร้อนจำเพาะโดยปริมาตรสารคงที่ |
| The Critical discharge pressure, P_{cri} | จุดวิกฤตของความดันที่ทางออก |
| The optimal vale of the generator - temperature (T_{opt}) | จุดที่อุณหภูมิของเครื่องมีค่า Rm ที่เหมาะสมที่สุด |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในกระบวนการอุตสาหกรรมต่างๆ จะมีระบบทำความเย็นเพื่อเป็นระบบที่จะลดหรือควบคุมอุณหภูมิภายในกระบวนการอุตสาหกรรมให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม โดยหน้าที่หลักของสารทำความเย็นนี้คือการทำให้อุณหภูมิของสารตัวกลาง เช่น อากาศหรือน้ำ เย็นตัวลงตามที่ต้องการ

การเลือกใช้สารทำความเย็นควรคำนึงถึงระบบการทำความเย็นเป็นหลักเพราะสารทำความเย็นแต่ละชนิดนั้นมีอุณหภูมิจุดเดือดแตกต่างกัน จึงต้องเลือกใช้สารทำความเย็นที่ตอบสนองประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็นมากที่สุด

ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ทางคณะผู้ศึกษาจึงได้ทำการจำลองการไหลและประสิทธิภาพของสารทำความเย็นแต่ละชนิดที่มีจุดเดือดสูงต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบหาประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้ในงานระบบทำความเย็นนี้โดยแปรผันตามการใช้งานกับสารทำความเย็นชนิดต่างๆ ที่มีจุดเดือดสูงต่างๆ

1.2 ความมุ่งหมายและจุดประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาผลลัพธ์ของสารทำความเย็นที่มีต่ออีเจ็คเตอร์
2. เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์จากผลการจำลองการไหลของสารทำความเย็นที่มีจุดเดือดสูงต่างๆ

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. ทราบถึงประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้งานในระบบทำความเย็นที่มีต่อสารทำความเย็นที่มีจุดเดือดสูงต่างๆ
2. ผลลัพธ์จากการศึกษาประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้งานในระบบทำความเย็นที่มีต่อสารทำความเย็นที่มีจุดเดือดสูงต่างๆ สามารถนำมาปรับเปลี่ยนอีเจ็คเตอร์ให้เหมาะสมกับสารทำความเย็น

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. การศึกษาโดยวิธีการจำลอง (Simulation studies)
2. ศึกษาการทำงานของอีเจ็คเตอร์แบบรูปร่างเดียว ที่ใช้งานในระบบทำความเย็น
3. ศึกษาผลลัพธ์ของสารทำความเย็นที่มีต่ออีเจ็คเตอร์ และประสิทธิภาพในการทำงานของอีเจ็คเตอร์ (Ejector)

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับอีเจ็คเตอร์และสารทำความเย็น
2. ศึกษาการใช้โปรแกรม ANSYS เพื่อใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ที่มีต่อสารทำความเย็น
3. กำหนดวัตถุประสงค์ขอบเขตและวางแผนการศึกษาของการวิจัย
4. ออกแบบการจำลองสารทำความเย็นที่มีจุดเดือดสูงต่างๆ
5. เก็บผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลองของสารทำความเย็นที่มีจุดเดือดสูงต่างๆ ที่มีผลต่ออีเจ็คเตอร์ (Ejector)
6. สรุปผลการศึกษาและจัดทำรูปเล่ม

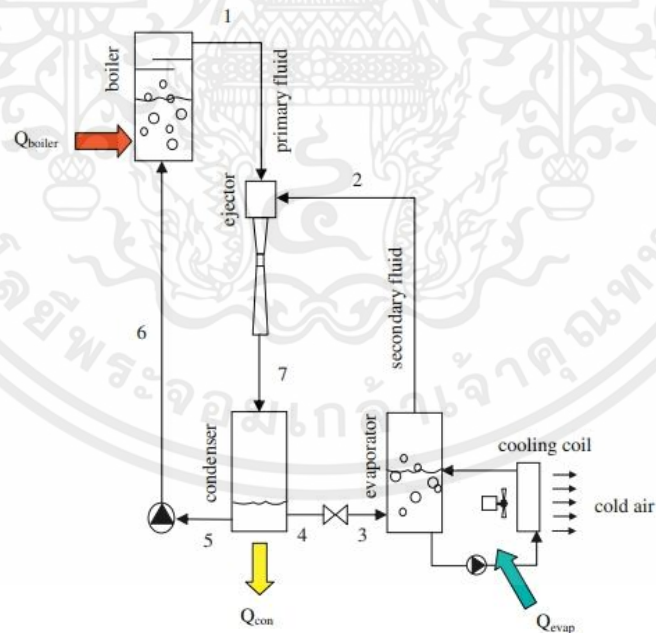
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาอีเจ็คเตอร์ที่ใช้ในงานระบบทำความเย็นและสารทำความเย็นโดยใช้โปรแกรม Ansys ในการศึกษาผลของประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ในระบบสารทำความเย็นที่มีต่อสารทำความเย็นที่มีจุดเดือดสูงต่างๆ และใช้โปรแกรม Microsoft Excel มาช่วยในการคำนวณเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่าตามทฤษฎีกับค่าจากการใช้โปรแกรม Ansys ในการศึกษา

2.2 หลักการทำงานในระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ (Ejector refrigeration system)



รูปที่ 2.1 ภาพแผนผังของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.1 ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ (Ejector refrigeration system) ประกอบด้วย หม้อไอน้ำ (Boiler) , เครื่องระเหย (Evaporator) , เครื่องควบแน่น (Condenser) , คอยล์ทำความเย็น (Cooling coil) และอีเจ็คเตอร์ (Ejector) โดยระบบเริ่มต้นจากสารทำความเย็นที่มีสถานะเป็นของเหลวได้รับ ความร้อนจากหม้อไอน้ำ ทำให้อุณหภูมิและความดันเพิ่มสูงขึ้น เมื่อออกจากหม้อไอน้ำ (Boiler) หรือตรงจุดที่ 1 จะเรียกว่า ของไหลปฐมภูมิ (Primary fluid) และเข้าสู่อีเจ็คเตอร์ (Ejector) นอกจากนี้ยังมีไอสารทำความเย็นที่มีความดันต่ำที่ได้จากเครื่องระเหย (Evaporator) เรียกว่า ของไหลทุติยภูมิเข้าสู่อีเจ็คเตอร์ (Ejector) ด้วยเช่นกัน เมื่อของเหลว 2 ชนิดไหลผ่านหัวฉีด (Nozzle) และผสมกันที่ ห้องผสม (Mixing chamber) จากนั้นก็จะเข้าสู่เครื่องควบแน่น (Condenser) โดยจะทำให้ไอสารทำความเย็นมีอุณหภูมิลดลงและควบแน่นจนเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวทำให้เครื่องควบแน่น (Condenser) ระบายความร้อนไปยังสภาพแวดล้อม ($Q_{\text{condenser}}$) และสารทำความเย็นที่มีสถานะเป็นของเหลวบางส่วนถูกส่งกลับไปยังหม้อไอน้ำ (Boiler) และอีกส่วนถูกส่งไปยังเครื่องระเหย (Evaporator)

2.3 หลักการทำงานของอีเจ็คเตอร์ในระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ (Ejector refrigeration system)

จากรูปที่ 2.2 ภายในอุปกรณ์อีเจ็คเตอร์จะมีส่วนประกอบ ได้แก่

1. หัวฉีด (nozzle) ซึ่งภายในจะประกอบไปด้วยของไหลที่มาจากหม้อไอน้ำ (boiler) เข้าสู่ทางเข้าของไหลปฐมภูมิ (Primary Inlet) ซึ่งจะเรียกของไหลชนิดนี้ว่า ของไหลปฐมภูมิ (Primary fluid) และของไหลที่มาจากเครื่องระเหย (evaporator) เข้าสู่ทางเข้าของไหลทุติยภูมิ (Secondary Inlet) ซึ่งเรียกของไหลชนิดนี้ว่า ของไหลทุติยภูมิ (Secondary fluid)
2. บริเวณห้องผสม (mixing chamber) จะเป็นบริเวณที่ของไหลทั้งสองชนิดจากทั้งสองทางเข้าถูกฉีดออกมาผสมกันที่ห้องผสมนี้
3. ท่อตรง (throat)
4. บริเวณทางออกหัวฉีด diffuser

โดยอีเจ็คเตอร์ (Ejector) อาศัยหลักการเหนี่ยวนำของของไหล เมื่อของไหลชนิดหนึ่งที่มีความเร็วสูงไหลผ่านของไหลที่มีความเร็วต่ำจะเกิดการดูดและทำให้ของไหลที่มีความเร็วต่ำไหลตามกัน ดังนั้นเมื่อกลางถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์อีเจ็คเตอร์ (Ejector) สามารถพิจารณาได้จาก

$$\text{C.O.P} = R_m \frac{h_{g\text{-evap}} - h_{f\text{-con}}}{h_{g\text{-boiler}} - h_{f\text{-con}}} \quad (2.1)$$

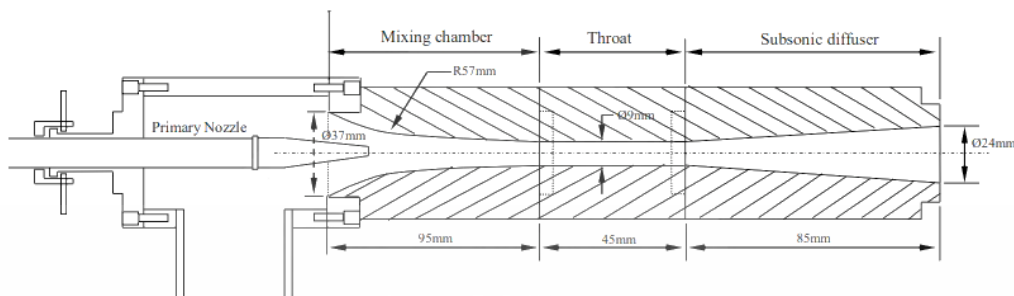
จากสมการข้างต้น พบว่าเมื่อพิจารณาค่า เอนทาลปี (enthalpy) ที่บริเวณหม้อไอน้ำ (boiler) และที่เครื่องไอรเหย (evaporator) มีค่าต่างกันเล็กน้อย ดังนั้นจึงสมมติให้ค่าประสิทธิภาพ มีค่าประมาณ entrainment ratio (R_m) สามารถหาค่าได้จาก

$$R_m = \frac{\text{การไหลของมวลของของไหลทุติยภูมิ}}{\text{การไหลของของไหลปฐมภูมิ}} \quad (2.2)$$

ดังนั้น ค่าประสิทธิภาพจึงมีความสัมพันธ์กับการไหลของทั้ง ของไหลปฐมภูมิ (Primary fluid) และของไหลทุติยภูมิ (Secondary fluid) ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาถึงการไหลของทั้งของไหลปฐมภูมิ (Primary fluid) และ ของไหลทุติยภูมิ (Secondary fluid) โดยเมื่อต้องการศึกษาถึงสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ (Ejector) จึงสามารถพิจารณาได้จากสมการประสิทธิภาพอีเจ็คเตอร์ (Ejector Efficiency) ดังสมการข้างล่าง ซึ่งถูกรับรองจาก งานวิจัยของ TONGCHANA THONGTIP [1]

$$\eta_{ej} = \frac{\dot{m}_s \frac{1}{(P_{evap}/P_{con})^{\frac{k-1}{k}}}}{\dot{m}_p \frac{1}{(P_{gen}/P_{con})^{\frac{k-1}{k}} - 1}} \quad (2.3)$$

| | | | |
|-------------|------------|-----|------------------------------------|
| โดยกำหนดให้ | P_{gen} | คือ | ความดันที่เครื่องกำเนิดไอ (Pa) |
| | P_{evap} | คือ | ความดันที่เครื่องระเหย (Pa) |
| | P_{con} | คือ | ความดันวิกฤตของเครื่องควบแน่น (Pa) |
| | k | คือ | specific heat ratio |



รูปที่ 2.2 ภาพส่วนประกอบภายในของอุปกรณ์อีเจ็คเตอร์ (Ejector)

2.4 หลักการเปรียบเทียบการทำงานและประสิทธิภาพของสารทำความเย็นแต่ละชนิด

เมื่อเราต้องการนำคุณสมบัติการไหลของสารทำความเย็นแต่ละชนิดมาเปรียบเทียบเพื่อสรุปหาสารทำความเย็นที่มีการทำงานและประสิทธิภาพสูงสุด สามารถวิเคราะห์ได้จาก entrainment ratio (R_m) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่าง อัตราการไหลของของไหลทุติยภูมิ (mass flow of the secondary fluid) กับ ของไหลปฐมภูมิ (mass flow of the primary fluid) ดังสมการที่ 2.2 และมีข้อจำกัดในการใช้งานคือความดันวิกฤติ (pressure critical) แต่สำหรับคุณสมบัตินี้ ไม่สามารถเปรียบเทียบกันโดยตรงได้ ดังนั้นในการศึกษาจึงมักใช้อัตราส่วนความดัน (Pressure lift ratio) ดังสมการที่ 2.3 ในการเปรียบเทียบข้อจำกัดของสารทำความเย็นแต่ละชนิด

$$\text{Pressure lift ratio} = \frac{\text{static pressure at diffuser exit}}{\text{static pressure of secondary flow}} \quad (2.4)$$

2.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 การทำงานของสารทำความเย็น

สารทำความเย็น (Refrigerants) เป็นสารของเหลวที่มีคุณสมบัติสามารถเปลี่ยนสถานะในการทำงานอยู่ 2 สถานะ คือ ของเหลวและแก๊ส ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนของระบบทำความเย็น โดยเมื่อสารทำความเย็นมีสถานะเป็นแก๊ส จะดูดความร้อนจากบริเวณต่างๆ ทำให้อุณหภูมิบริเวณนั้นลดลง และสารทำความเย็นจะนำพาความร้อนมายังเครื่องควบแน่น (condenser) จะคายความร้อนออกจากระบบและควบแน่นกลับไปเป็นสถานะของเหลวและวนกลับไปทำงานภายในระบบเช่นเดิม

สารทำความเย็นในกระบวนการอุตสาหกรรมมีหลากหลายชนิด โดยสารแต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบคุณสมบัติและข้อจำกัดของสารที่แตกต่างกันไป ดังนั้นการเลือกใช้สารทำความเย็นจะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงานที่จะนำไปใช้เพื่อให้ได้สารทำความเย็นที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

2.5.2 อัตราการไหลของมวล (mass flow rate)

Entrainment ratio (Rm) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของสารทำความเย็นภายในเครื่องอีเจ็คเตอร์ (ejector) จากสมการที่ 2.2 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของสัดส่วนอัตราการไหลของมวล (mass flow rate) ดังนั้นสามารถคำนวณอัตราการไหลเชิงมวล (mass flow rate) ได้ดังสมการที่ 2.4

$$\text{mass flow rate} = \rho AV \quad (2.5)$$

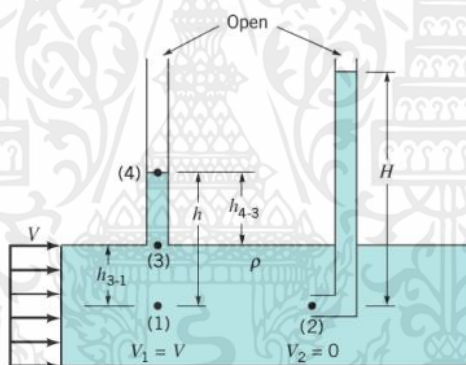
- ρ = ความหนาแน่นของมวลไหลต่อ 1 หน่วยปริมาตร
- A = พื้นที่หน้าตัดที่ของไหลไหลผ่าน
- V = ความเร็วของการไหล

2.5.3 สมการ Stagnation

จากสมการเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation)

$$p + \frac{1}{2} \rho V^2 + \gamma z = \text{constant} \quad (2.6)$$

จะได้ว่าในพจน์แรก ความดันจริงของของไหลในของไหลที่มีการไหล การวัดความดันนี้ต้องเคลื่อนที่ไปพร้อมกับของไหลหรือการวัดต้องอยู่กับที่เมื่อเทียบกับของไหล จึงเรียกว่า ความดันสถัติกส์ (static pressure) สามารถวัดได้จาก



รูปที่ 2.3 วิธีการวัด static pressure และ stagnation

Stagnation pressure หาได้จากการวัดความดันเมื่อของไหลถูกลดความเร็วจนเป็นศูนย์ โดยกระบวนการไร้ความเสียดทานหรือความหนืดในการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation) สามารถใช้ในการหาความสัมพันธ์ ของความเร็วและความดันตามแนวกระแส

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} = \text{const} \quad (2.7)$$

ดังนั้นจากสมการ Stagnation pressure จึงสรุปได้ว่าในช่วง Stagnation จะเป็นการอ้างอิงเกี่ยวกับการไหลที่มีความเร็วด้วยเสมอ การวิเคราะห์ค่าต่างๆ ในช่วงนี้จึงต้องมีการพิจารณาพจน์พลังงานพจน์ด้วยเสมอ

2.5.4 เลขมัค (Mach number , Ma)

คืออัตราส่วนระหว่างความเร็วต่อความเร็วเสียง โดยในการศึกษาด้านของไหลมักนิยมนำมาอ้างอิงในการพิจารณาลักษณะการไหล สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.7

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

สำหรับการศึกษาเกี่ยวกับสารที่เป็นแก๊สในอุดมคติสามารถคำนวณความเร็วของเสียง (C) ได้ดังสมการ 2.8 โดยที่ k เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและ R เป็นค่าคงที่ ดังนั้นความเร็วเสียงของแก๊สอุดมคติจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ

$$C = \sqrt{kRT} \quad (2.9)$$

2.5.5 การจัดการการไหลของเหลวภายในท่อที่มีลักษณะหน้าตัดการไหลไม่ใช่วงกลม

จากหัวข้อ 2.5.2 อัตราการไหลเชิงมวล (mass flow rate) มีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่หน้าตัดการไหลของของไหล ดังสมการที่ 2.4 เมื่อลักษณะท่อการไหลของของไหลไม่เป็นแบบวงกลมเราจึงไม่สามารถนำเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนั้นๆ มาคำนวณได้ จึงได้มีการนำค่า hydraulic diameter (D_h) มาใช้คำนวณแทนเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง สามารถคำนวณได้ดังนี้

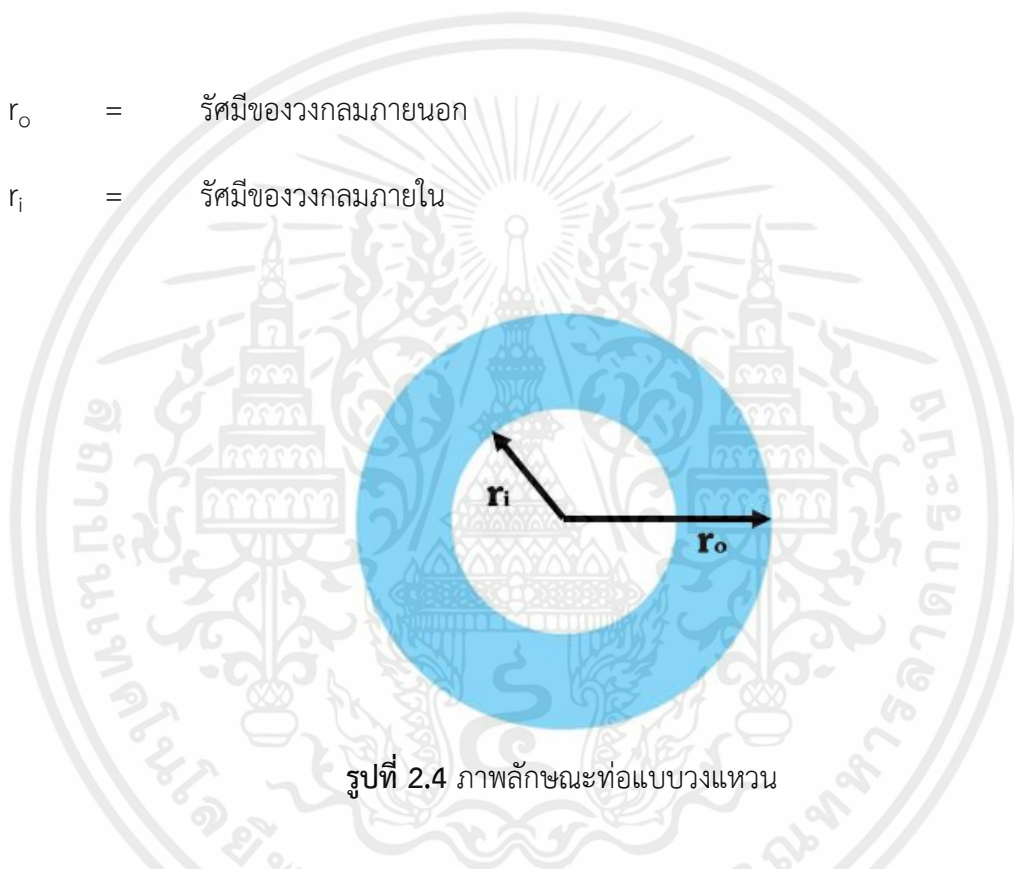
$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (2.10)$$

จากการศึกษานี้ลักษณะท่อที่สนใจ มีลักษณะเป็นวงแหวน โดยสามารถคำนวณหา hydraulic diameter (D_h) แบบวงแหวน ได้ดังนี้

$$\text{hydraulic diameter } (D_h) = 2 (r_o - r_i) \quad (2.11)$$

r_o = รัศมีของวงกลมภายนอก

r_i = รัศมีของวงกลมภายใน



รูปที่ 2.4 ภาพลักษณะท่อแบบวงแหวน

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี พ.ศ. 2559 TONGCHANA THONGTIP [1] ได้ทำการศึกษาการพัฒนาระบบทำความเย็นแบบเจ็ทที่ใช้กับความร้อนเหลือทิ้งโดยทำการจำลอง CFD ของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์โดยใช้สารทำความเย็น R141b และทำการพัฒนาและทดสอบระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์โดยใช้สารทำความเย็น R141b ต้นแบบ สำหรับใช้งานจริง

การจำลอง CFD เพื่อที่จะกำหนดเกณฑ์ในการออกแบบและนำไปสู่การพัฒนากระบวนการทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ต้นแบบให้สามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพ โดยการใช้การจำลอง CFD จะทำให้ทราบถึงกระบวนการไหลภายในตัวอีเจ็คเตอร์และใช้ในการทำนายประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปี พ.ศ.2553 ญัตติ เรื่องตระกูลและคณะ [2] ได้ศึกษาการทำความเย็นในระบบสตรีมเจ็ทโดยทดสอบโดยใช้เครื่องทำความเย็นขนาด 1 กิโลวัตต์ กำหนดให้อุณหภูมิของหม้อไอน้ำอยู่ระหว่าง 110 ถึง 150 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิของเครื่องระเหยคงที่ที่ 7.5 องศาเซลเซียส ใช้หัวฉีดปฐมภูมิ 8 หัวที่มีรูปทรงต่างกัน ผลการทดลองทำให้ทราบว่า รูปทรงที่แตกต่างกันของหัวฉีดมีผลต่อประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์และอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (COP) ของระบบ

ปี พ.ศ.2561 ญัตติ เรื่องตระกูลและคณะ [3] ได้ทำการออกแบบเครื่องพ่นไอน้ำในแอปพลิเคชันทำความเย็นโดยอิงตามการวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ สารทำความเย็นจะกำหนดให้เป็นสารในอุดมคติ ผลการทดลองทำให้ทราบว่า เมื่อตรวจสอบผลทางทฤษฎีแสดงให้เห็นว่า วิธีการคำนวณนี้สามารถใช้ในการออกแบบอีเจ็คเตอร์ (Ejector) ได้



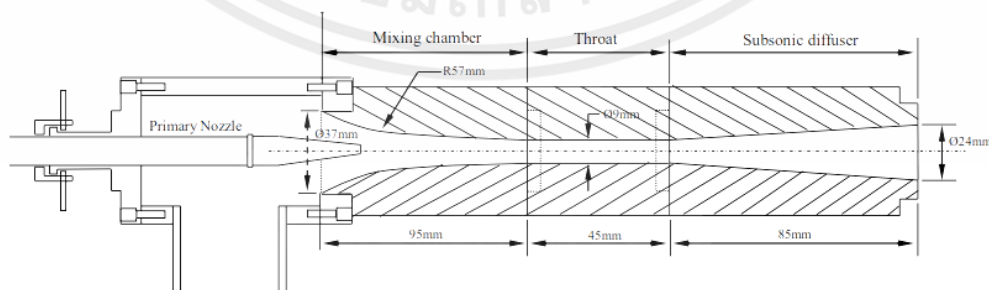
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ในการศึกษาการศึกษาประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ (Ejector) ที่ใช้ในงานระบบทำความเย็น โดยแปรผันตามการใช้งานกับสารทำความเย็นที่มีจุดเดือดสูงต่างๆ เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบความเหมาะสมในการเลือกใช้งานของสารทำความเย็นที่มีจุดเดือดสูงต่างๆ โดยได้ดำเนินงานแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 เป็นการหาขอบเขตของการวิเคราะห์การใช้งานที่เหมาะสมต่อลักษณะรูปร่างของอีเจ็คเตอร์ (Ejector) ที่นำมาศึกษา ส่วนที่ 2 คือการจำลองการไหลของสารทำความเย็นที่มีจุดเดือดที่สูงต่างๆ ภายในอีเจ็คเตอร์ (Ejector) จำนวน 3 ชนิด ซึ่งได้แก่ 1,1-Dichloro-1-fluor ethane (R141b) , pentafluoro propane (R245fa) และ (Z)-1-Chloro-2,3,3,3-Tetrafluoropropane (R1224yd(z)) โดยดำเนินงานวิจัยนี้ใช้การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามทฤษฎีของของไหล , อุณหพลศาสตร์และโปรแกรมการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ANSYS (FLUENT) 20 เป็นหลัก

3.1 การเลือกใช้ geometry ของอุปกรณ์อีเจ็คเตอร์ (Ejector)

จากการศึกษาวิจัยของ TONGCHANA THONGTIP [1] เอกสารอ้างอิง (DEVELOPMENT OF THE JET REFRIGERATION SYSTEM TO BE USED WITH WASTE HEAT, 2559 : 43-44) พบว่า geometry ได้ทำการออกแบบตามทฤษฎีของ Keenan (The classical Keenan's 1-D theory) เพื่อง่ายและเหมาะสมต่อการศึกษา จึงได้ geometry ดังนี้



รูปที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของ geometry ที่ใช้ในการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม ANSYS 2020 R2

เนื่องจากการศึกษานี้อาศัยการวิเคราะห์การจำลองการไหลของสารทำความเย็นที่เคลื่อนที่ภายในอีเจ็คเตอร์ (Ejector) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ทำนายประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ที่มีสารทำความเย็นดังนี้ R141b , R245fa และ R1224yd(z) โดยทำการวิเคราะห์ผ่านค่า Entrainment ratio (R_m) และ Critical discharge pressure (P_{cri}) อาศัยโปรแกรม ANSYS FLUENT 20 R2

ในการศึกษาด้วยโปรแกรม ANSYS 2020 R2 แบ่งขั้นตอนในการทำงานออกเป็น 2 ส่วนที่สำคัญและเชื่อมต่อกันของข้อมูลตามภาพที่ 3.1 ดังนี้

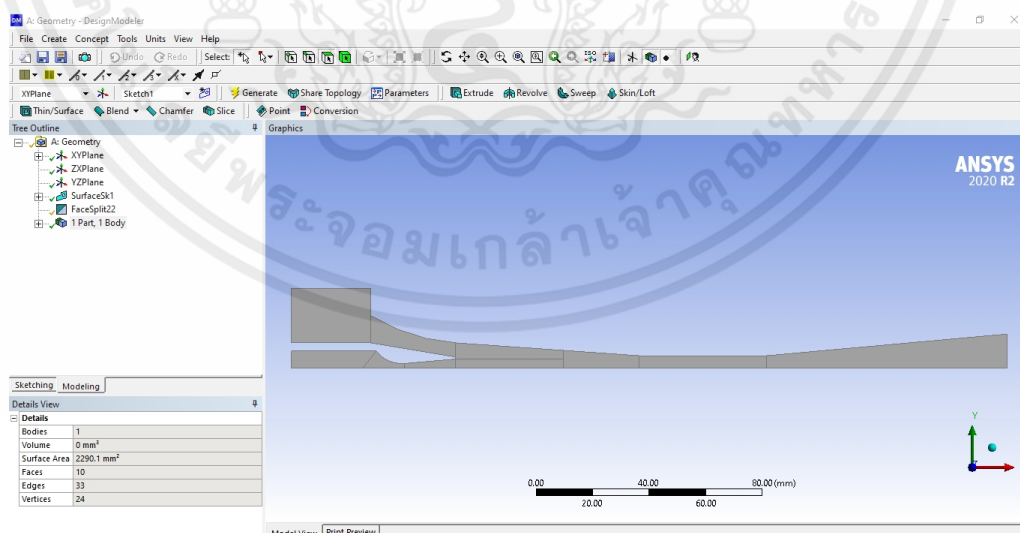
1. การออกแบบโดยใช้งานผ่านโปรแกรม ANSYS Workbench 2020 R2
2. การจำลองการไหลของของไหลผ่านโปรแกรม ANSYS FLUENT 20 R2

3.2.1 การออกแบบโดยใช้งานผ่านโปรแกรม ANSYS Workbench 2020 R2

การทำงานในส่วนโปรแกรม ANSYS Workbench 2020 R2 จะเป็นการทำงานในด้าน geometry ประกอบไปด้วย 2 ส่วน ได้แก่

3.2.1.1 การวาด geometry แบบสมมาตรตามแนวแกน

โดยอ้างอิงลักษณะ geometry มาจากหัวข้อที่ 3.1 ทั้งนี้ต้องมีการวิเคราะห์ถึงการแบ่ง Partition ภายใน geometry ให้เหมาะสมต่อการจำลอง ดังรูปภาพประกอบต่อไปนี้

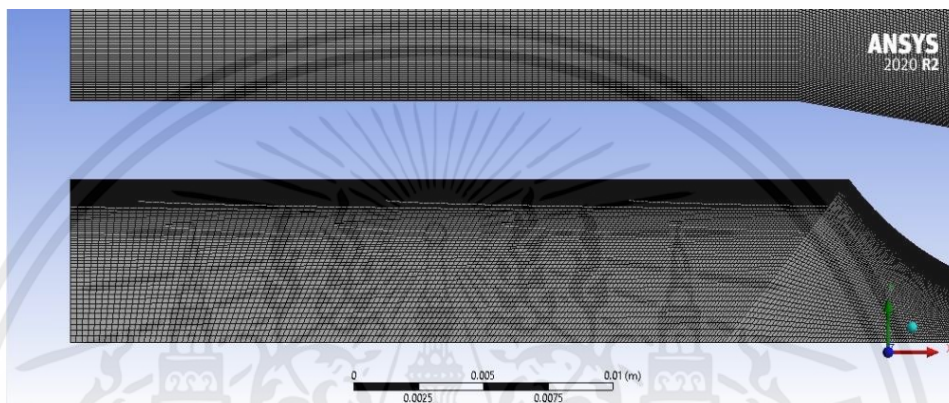


รูปที่ 3.2 การสร้าง geometry และการแบ่ง Partition

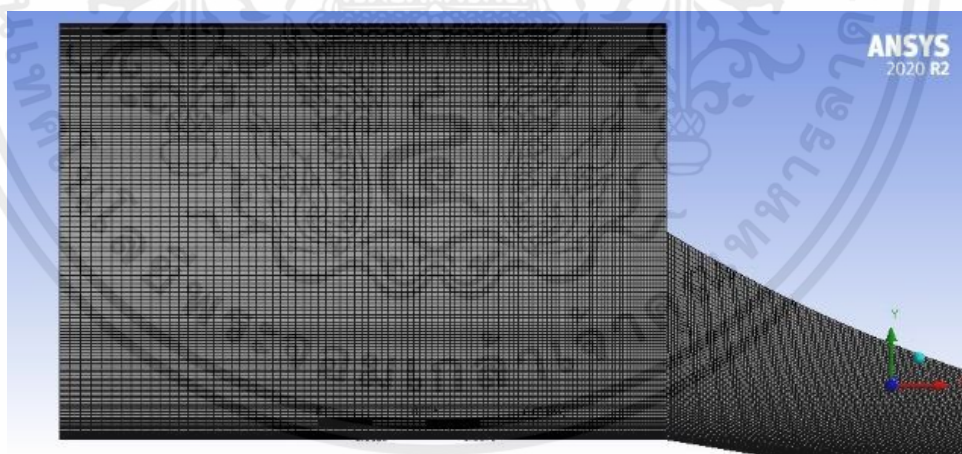
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.2 การสร้าง Meshing

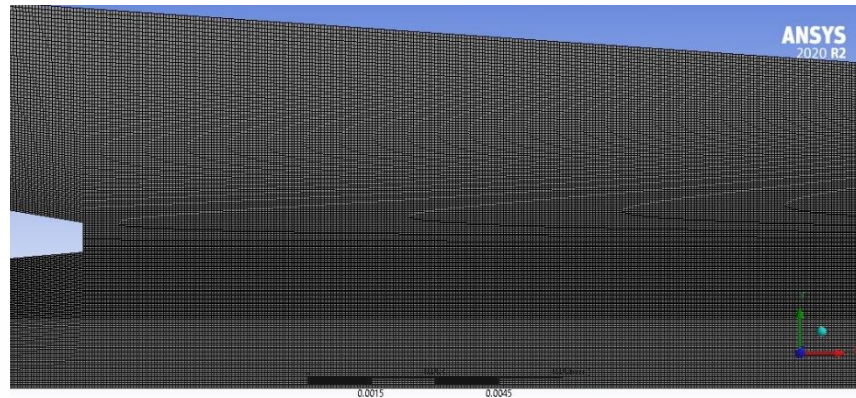
เพื่อกำหนดลักษณะของกริด (grid Elements) ภายใน geometry เนื่องจากลักษณะของกริดมีผลต่อความถูกต้องและแม่นยำของการจำลองเป็นอย่างมาก โดยการศึกษาี้เลือกใช้กริดที่เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม (quadrilateral grid) เนื่องจากกริดลักษณะนี้มีความเหมาะสมต่อลักษณะการจำลอง และมีความถูกต้องแม่นยำมากที่สุด ดังรูปภาพประกอบต่อไปนี้



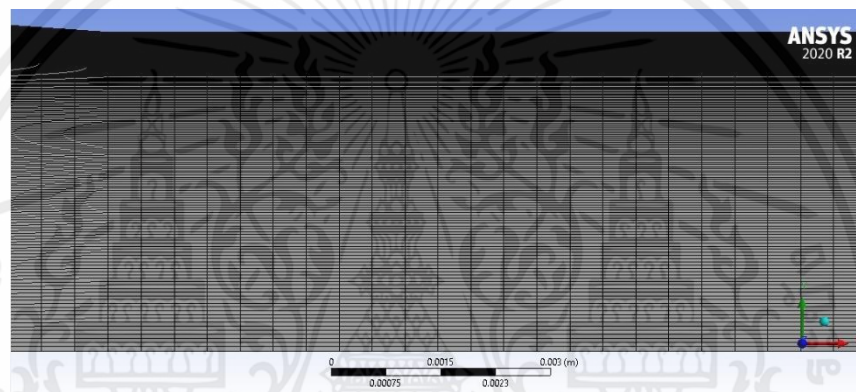
รูปที่ 3.3 การสร้าง mesh ในส่วนของ Primary nozzle



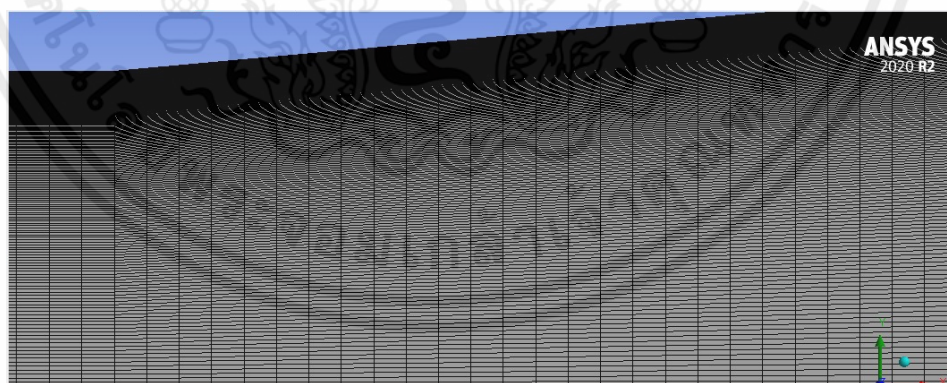
รูปที่ 3.4 การสร้าง mesh ในส่วนของ Secondary nozzle



รูปที่ 3.5 การสร้าง mesh ในส่วนของ Mixing chamber



รูปที่ 3.6 การสร้าง mesh ในส่วนของ Throat



รูปที่ 3.7 การสร้าง mesh ในส่วนของ Diffuser

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.3 จำนวนกริดของความละเอียดที่เหมาะสม

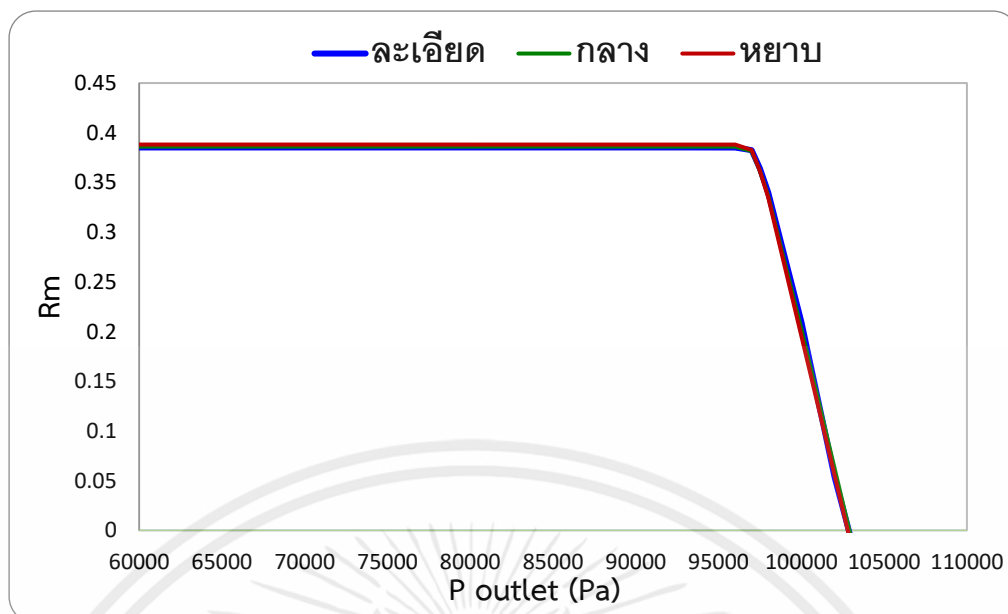
กำหนดจำนวนกริดของความละเอียดแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ ดังนี้ แบบหยาบ, แบบปานกลาง และแบบละเอียดที่สุด โดยอ้างอิงผลการจำลองเพื่อหา Entrainment ratio (Rm) จากงานวิจัยของ TONGCHANA THONGTIP [1] เอกสารอ้างอิง (DEVELOPMENT OF THE JET REFRIGERATION SYSTEM TO BE USED WITH WASTE HEAT, 2559) ซึ่งผลของ Entrainment ratio (Rm) ให้ผลที่ไม่ต่างกัน ดังนั้นจึงได้เลือกใช้แบบจำลองที่มีลักษณะกริดแบบละเอียด เพื่อลดโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดในการจำลองการไหลให้น้อยลง

ตารางที่ 3.1 แสดงจำนวนกริดแต่ละลักษณะ

| ความละเอียดของกริด | จำนวนกริด |
|--------------------|-----------|
| แบบหยาบ | 110,179 |
| แบบกลาง | 195,675 |
| แบบละเอียด | 347,600 |

ตารางที่ 3.2 แสดงผล Entrainment ratio (Rm) แต่ละลักษณะกริด

| ความละเอียดของกริด | Pressure critical (Pa) | Temperature outlet (K) | Rm |
|--------------------|------------------------|------------------------|-------------|
| แบบหยาบ | 97,500 | 304.1 | 0.361430055 |
| แบบกลาง | 97,500 | 304.1 | 0.361586345 |
| แบบละเอียด | 97,500 | 304.1 | 0.364001473 |



รูปที่ 3.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ทางออก (Pressure outlet) และ Entrainment ratio (Rm)

3.2.2 การตั้งค่ารูปแบบการจำลอง ผ่านโปรแกรม ANSYS FLUENT 2020 R2

ในหัวข้อที่ 3.2.1 จะได้รูปแบบของ geometry และ Meshing ของกริดภายใน geometry ที่เหมาะสมแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นจะเป็นการวิเคราะห์การไหลของสารทำความเย็นภายใน geometry เพื่อทำนายถึงประสิทธิภาพการทำงานของอีเจ็คเตอร์ผ่านโปรแกรม ANSYS FLUENT 2020 R2

3.2.2.1 คุณสมบัติของสารทำความเย็น

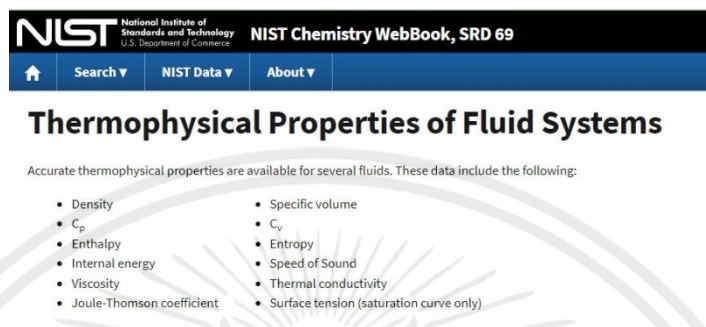
สารทำความเย็นที่ใช้ในการจำลองประกอบไปด้วย R141b , R245fa และ R1224yd(z) โดยกำหนดลักษณะของคุณสมบัติดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.3 ลักษณะคุณสมบัติของสารทำความเย็นที่ใช้ในการจำลอง

| | |
|----------------------|------------|
| Density | Ideal gas |
| Specific heat | Polynomial |
| Thermal conductivity | Polynomial |
| Viscosity | Polynomial |

ในการศึกษานี้ได้อ้างอิงคุณสมบัติจากหน่วยงานหนึ่งในสังกัดของกระทรวงพาณิชย์ สหรัฐอเมริกา ที่มีชื่อว่า NIST (National Institute of Standards and Technology) สามารถศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของสารทำความเย็น ได้จากเว็บไซต์

<https://www.webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>



The screenshot shows the NIST Chemistry WebBook interface. The header includes the NIST logo and the text 'National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce' and 'NIST Chemistry WebBook, SRD 69'. Below the header is a navigation bar with 'Search', 'NIST Data', and 'About' options. The main title is 'Thermophysical Properties of Fluid Systems'. A sub-header states: 'Accurate thermophysical properties are available for several fluids. These data include the following:'. Below this, there are two columns of bulleted properties: Density, Cp, Enthalpy, Internal energy, Viscosity, Joule-Thomson coefficient, Specific volume, Cv, Entropy, Speed of Sound, Thermal conductivity, and Surface tension (saturation curve only).

รูปที่ 3.9 หน้าเว็บไซต์ของ NIST (National Institute of Standards and Technology)

3.2.2.2 การกำหนด Boundary condition ของสารทำความเย็นในการจำลอง

การกำหนด Boundary condition เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของการจำลองการไหลโดยจะเป็นข้อกำหนดในการศึกษาในแต่ละกรณีศึกษา ตัวอย่างแสดง Boundary condition ดังตาราง

ตารางที่ 3.4 แสดง Boundary condition ของทางเข้าของไหลปฐมภูมิ (Primary inlet) สารทำความเย็น R141b

| Nozzle | Values | Unit | ที่มา |
|-------------------------------|--------------|-------------------|------------------------------------|
| Static Temp | 90.00000 | C | ค่าจากการกำหนด |
| Static Pressure | 538250.00000 | Pa | |
| Density | 23.68050 | kg/m ³ | www.webbook.nist.gov |
| kinematic viscosity (ν) | 4.77E-07 | m ² /s | Prop. ของสารทำความเย็น ที่ 90 C |
| dynamic viscosity (μ) | 1.13E-05 | kg/ms | |
| Cp | 9.68E-01 | kJ/kg k | |
| Cv | 8.31E-01 | kJ/kg k | |
| γ | 1.163820063 | - | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 (ต่อ) แสดง Boundary condition ของทางเข้าของไหลปฐมภูมิ (Primary inlet) สารทำความเย็น R141b

| Nozzle | Values | Unit | ที่มา |
|------------------|-------------|-----------|-----------------------|
| Diameter | 0.00320 | m | Dimension |
| Average Velocity | 89.63252352 | m/s | Mass flow จากการคำนวณ |
| Speed of sound | 385.00 | m/s | สมการความเร็วเสียง |
| Mach number | 0.232811749 | - | |
| Total Pressure | 555458.3427 | Pa | สมการ stagnation |
| Total Temp | 90.39956679 | C | |
| | 363.3995668 | K | |
| Average Velocity | 89.63252352 | m/s | Mass flow จากการทดลอง |
| Intensity | 0.05 | - | ค่าคงที่จากโมเดล |
| C_{μ} | 0.09 | - | |
| TKE | 30.12745977 | m^2/s^2 | สมการ TKE |
| Omega | 44737.59276 | $1/s^2$ | สมการ Omega |

ตารางที่ 3.5 แสดง Boundary condition ของทางเข้าของไหลทุติยภูมิ (Secondary inlet) สารทำความเย็น R141b

| Nozzle | Values | Unit | ที่มา |
|-------------------------------|-------------|----------|----------------------|
| Static Temp | 10.00000 | C | ค่าจากการกำหนด |
| Static Pressure | 43564.00000 | Pa | www.webbook.nist.gov |
| Density | 2.21229 | kg/m^3 | |
| kinematic viscosity (ν) | 3.99E-06 | m^2/s | Prop. ของ R141b |
| dynamic viscosity (μ) | 8.82E-06 | kg/ms | |
| Cp | 7.67E-01 | kJ/kg k | |
| Cv | 6.77E-01 | kJ/kg k | |
| γ | 1.133185514 | - | |

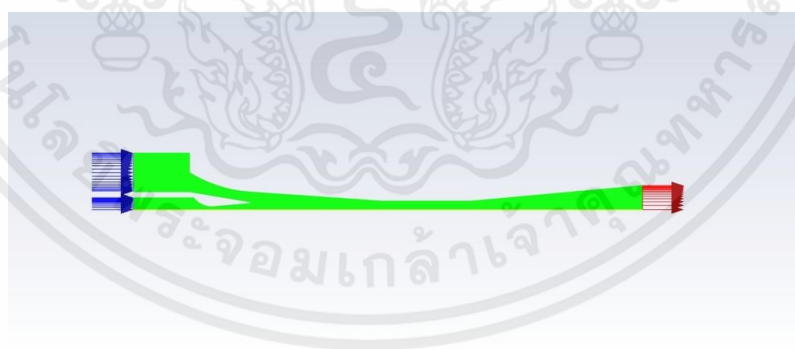
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 (ต่อ) แสดง Boundary condition ของทางเข้าของไหลทุติยภูมิ (Secondary inlet) สาร ทำความเย็น R141b

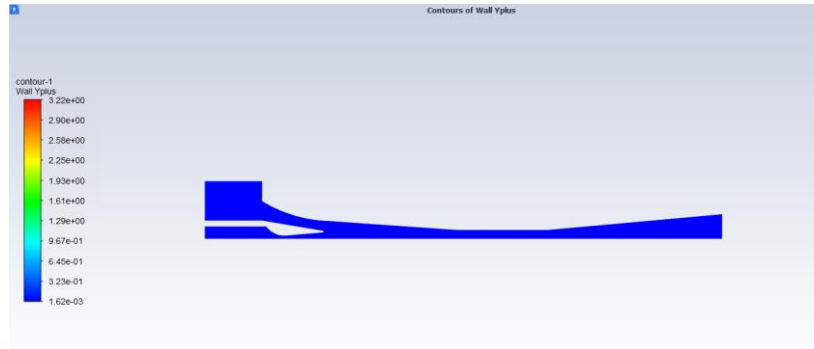
| Nozzle | Values | Unit | ที่มา |
|------------------|-------------|------|-----------------------|
| Diameter | 0.03841 | m | hydraulic diameter |
| Average Velocity | 1.282292594 | m/s | Mass flow จากการคำนวณ |
| Speed of sound | 337.00 | m/s | สมการความเร็วเสียง |
| Mach number | 0.003805023 | - | |
| Total Pressure | 43564.35737 | Pa | สมการ stagnation |
| Total Temp | 10.00000964 | C | |
| | 283.0000096 | K | |

3.3 วิธีการดำเนินการจำลองผ่านโปรแกรม ANSYS FLUENT 20 R2

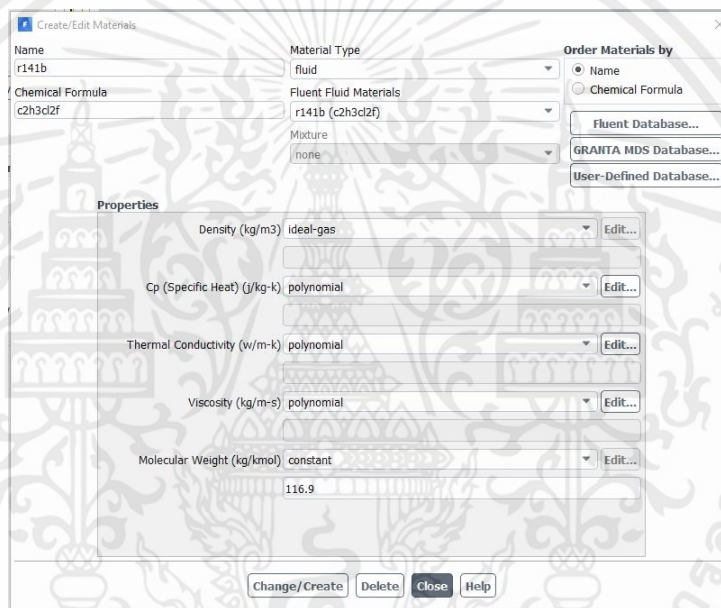
เมื่อสร้างแบบจำลองและกำหนด Boundary condition ในการจำลองตามหัวข้อที่ 3.2 แล้วต่อไปจะเป็นการดำเนินงานส่วนที่เป็นการจำลองโดยอาศัยการจำลองผ่านโปรแกรม ANSYS FLUENT 20 R2 สามารถศึกษาข้อมูลจากตัวอย่างการจำลอง ดังนี้



รูปที่ 3.10 ภาพแสดงลักษณะการจำลองการไหลของของไหลในโปรแกรม ANSYS FLUENT 20 R2

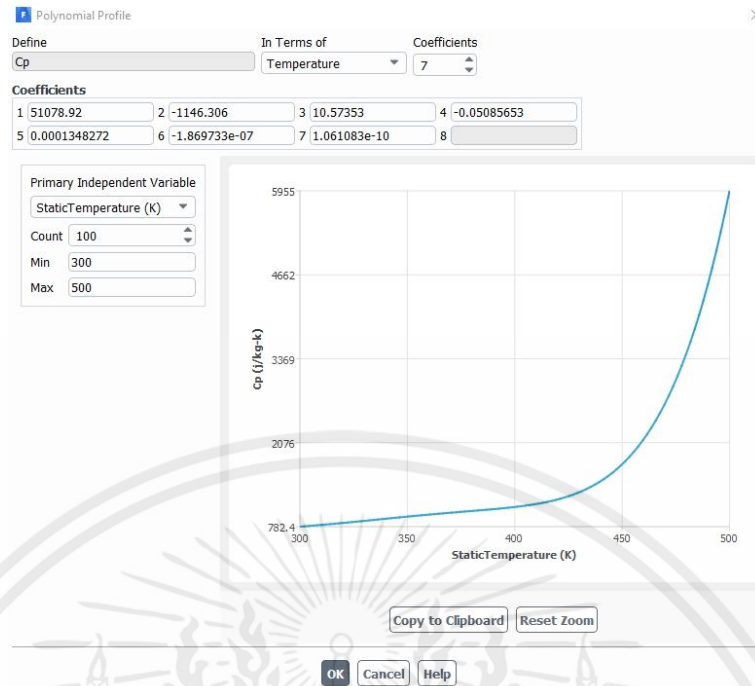


รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะรายละเอียด Wall Y Plus ของ geometry

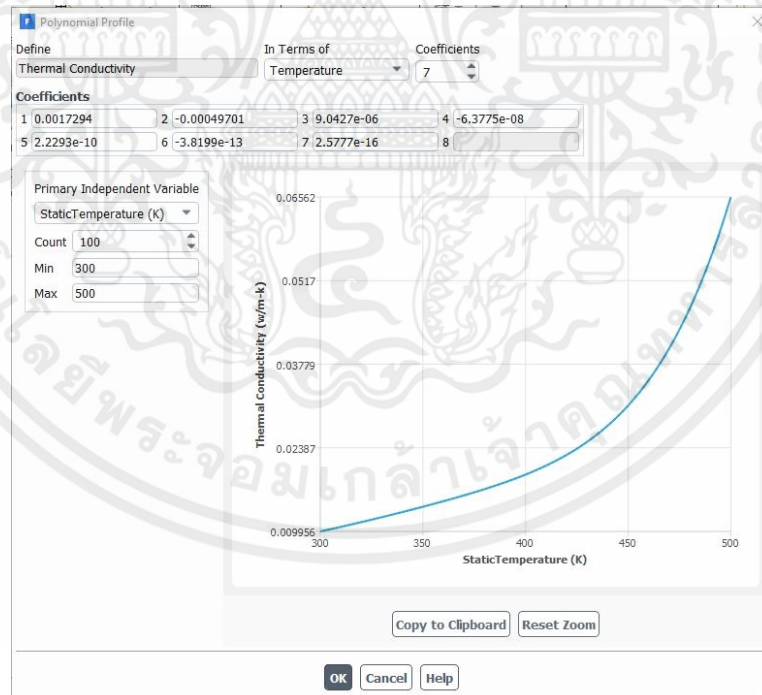


รูปที่ 3.12 ตัวอย่างการตั้งค่าคุณสมบัติของสารทำความเย็น R141b ในการใช้จำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

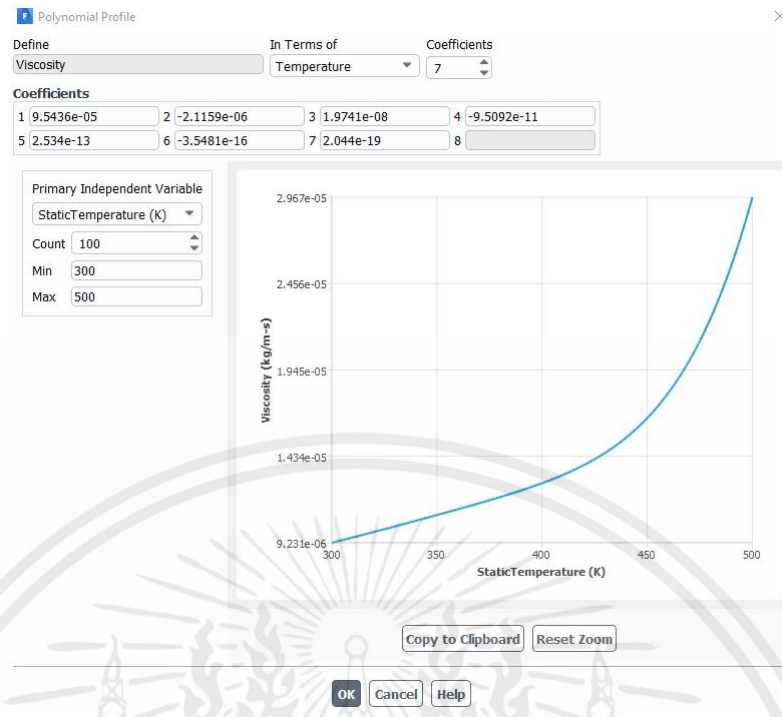


รูปที่ 3.13 การตั้งค่า Specific Heat แบบ Polynomial



รูปที่ 3.14 การตั้งค่า Thermal Conductivity แบบ Polynomial

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 การตั้งค่า Viscosity แบบ Polynomial

รูปที่ 3.16 ตัวอย่างการตั้งค่าทางเข้าของไหลปฐมภูมิ (Primary Inlet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pressure Inlet ×

Zone Name
secondary_inlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS

Reference Frame Absolute

Gauge Total Pressure (pascal) 43564.35737

Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal) 43564

Direction Specification Method Normal to Boundary

Prevent Reverse Flow

Turbulence

Specification Method K and Omega

Turbulent Kinetic Energy (m2/s2) 0.006166029

Specific Dissipation Rate (1/s) 53.32118509

Apply **Close** **Help**

รูปที่ 3.17 ตัวอย่างการตั้งค่าทางเข้าของไหลทุติยภูมิ (Secondary Inlet)

Pressure Outlet ×

Zone Name
outlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS

Backflow Reference Frame Absolute

Gauge Pressure (pascal) 83000

Pressure Profile Multiplier 1

Backflow Direction Specification Method Normal to Boundary

Backflow Pressure Specification Total Pressure

Prevent Reverse Flow

Average Pressure Specification

Target Mass Flow Rate

Turbulence

Specification Method Intensity and Hydraulic Diameter

Backflow Turbulent Intensity (%) 5

Backflow Hydraulic Diameter (m) 0.024

Apply **Close** **Help**

รูปที่ 3.18 ตัวอย่างการตั้งค่าความดันที่ทางออก (Pressure Outlet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ขอบเขตและเงื่อนไขของการจำลอง

3.4.1 สารทำความเย็น

การจำลองการไหลของสารทำความเย็นภายในมีจุดเดือดสูงต่างๆ จำนวน 3 ชนิด ซึ่งได้แก่ 1,1-Dichloro-1-fluor ethane (R141b) , pentafluoro propane (R245fa) และ (Z)-1-Chloro-2,3,3,3-Tetrafluoropropane (R1224yd(z)) ซึ่งมีคุณสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกันแต่มีลักษณะที่คล้ายกัน โดยสารทั้ง 3 ชนิด มีลักษณะเป็น High Pressure Control

3.4.2 กำหนด Boundary condition ในการจำลอง

สำหรับงานวิจัยนี้ได้มีการกำหนดให้ ทางเข้าของของไหลปฐมภูมิ (Primary fluid) และ ทางเข้าของของไหลทุติยภูมิ (Secondary fluid) ให้อยู่ในรูปแบบของความดันทางเข้า (Pressure inlet) ในส่วนของทางออกของของไหลให้อยู่ในรูปแบบของ ความดันทางออก (Pressure outlet)

ที่ความเข้มข้นของการปั่นป่วน (Turbulent intensity) ที่ทางเข้าของไหลปฐมภูมิ (Primary fluid) ได้ตั้งค่าให้ป้องกันการไหลปั่นป่วนย้อนกลับ (Prevent Reverse Flow) ขณะที่ทางเข้าของของไหลทุติยภูมิ (Secondary fluid) มีวิธีการกำหนดค่าความปั่นป่วนที่โดยอาศัยรูปแบบของ K and Omega ในส่วนของทางออกได้วิธีการกำหนดค่าความปั่นป่วนที่โดยอาศัยรูปแบบของ Intensity and Hydraulic Diameter โดยกำหนดค่าความปั่นป่วนของกระแสไหลย้อนกลับ (Backflow Turbulent Intensity) มีค่าอยู่ที่ 5% และคำนวณ Hydraulic Diameter ของทางออกอยู่ที่ 0.024 เมตร

3.4.3 การจำลองผลของ Critical discharge pressure และ ช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา

เพื่อหาจุด Critical discharge pressure (P_{cri}) ของสารทำความเย็น R141b , R245fa และ R1224yd(z) โดยในการศึกษานี้กำหนดให้อุณหภูมิที่หม้อไอน้ำ (Boiler) มีอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส (C) และกำหนดให้ที่เครื่องระเหย (Evaporator) มีอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส

เมื่อทราบผลของ Critical discharge pressure (P_{cri}) ของสารทำความเย็นแต่ละชนิดแล้ว ทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่หม้อไอน้ำ (Boiler) เพื่อศึกษาจุดเดือดของสารที่มีผลต่อ Entrainment ratio (Rm) กำหนดช่วงอุณหภูมิมองอยู่ที่ 84 ถึง 100 องศาเซลเซียส (C)

3.5 เกณฑ์การลู่เข้า (convergence criteria)

สำหรับงานวิจัยนี้ได้มีการกำหนดเพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลและประสิทธิภาพของสารทำความเย็นที่มีต่ออีเจ็คเตอร์ (Ejector) โดยให้ค่าที่มีผลต่อการศึกษาที่มีลักษณะลู่เข้าค่าใดค่าหนึ่ง หรือเรียกได้ว่ามีลักษณะกราฟคงที่ และมีค่าตกค้าง (residual) ของสัมประสิทธิ์ค่านัยสำคัญ (significant coefficient) น้อยที่สุดที่ทำให้กราฟมีลักษณะคงที่ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและสมเหตุสมผล



บทที่ 4

ข้อมูลผลการทำนายของแบบจำลอง

4.1 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

4.1.1 การตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลอง

จากงานวิจัยของ TONGCHANA THONGTIP [1] เอกสารอ้างอิง (DEVELOPMENT OF THE JET REFRIGERATION SYSTEM TO BE USED WITH WASTE HEAT, 2559) แสดงให้เห็นผลต่างระหว่างการทดลองและการใช้การจำลองผล ซึ่งผลต่างเมื่อเปรียบเทียบผลของ Pressure critical มีความผิดพลาดเท่ากับ 14.47% และ Entrainment ratio (Rm) มีความผิดพลาด 3.70% ดังนั้นจึงสามารถใช้แบบจำลองนี้ในการศึกษาได้เนื่องจากมีความแม่นยำที่เหมาะสมต่อการจำลอง

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบผลระหว่างการทดลองและการใช้แบบจำลองในการจำลองผล

| | การทดลอง | การจำลองผล | ความผิดพลาด |
|------------------------|----------|------------|-------------|
| Pressure critical (Pa) | 83000 | 97500 | 14.47% |
| Rm | 0.351 | 0.364 | 3.70% |

4.1.2 การตรวจสอบความแม่นยำของทฤษฎีในการคำนวณ

จากทฤษฎี 1-DIMENSIONAL เพื่อนำมาคำนวณ หาอัตราการไหลเชิงมวลปฐมภูมิ (Primary Mass Flow Rate) ได้มีการตรวจสอบผลของทฤษฎีโดยเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลปฐมภูมิ (Primary Mass Flow Rate) ในการทดลองกับทฤษฎี ซึ่งให้ผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการตรวจสอบอัตราการไหลเชิงมวลปฐมภูมิ (Primary Mass Flow Rate) ในการทดลองกับทฤษฎี

| | การทดลอง | 1-DIMENSIONAL | ความผิดพลาด |
|----------------------------------|-----------|---------------|-------------|
| อัตราการไหลเชิงมวลปฐมภูมิ (kg/s) | 0.0170667 | 0.0170729 | 0.036% |

ดังนั้นสารทำความเย็นในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลปฐมภูมิ (Primary Mass Flow Rate) โดยใช้ทฤษฎี 1-DIMENSIONAL ซึ่งมีค่าความผิดพลาดแสดงดังตาราง 4.3

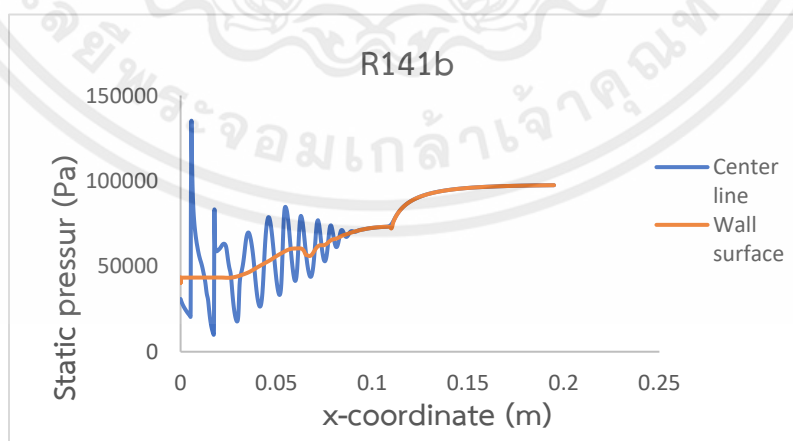
ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลปฐมภูมิ (Primary Mass Flow Rate) ระหว่างทฤษฎี 1-DIMENSIONAL กับ การจำลองผ่านโปรแกรม Ansys Fluent ของสารทำความเย็น R245fa และ R1224yd(z)

| | สารทำความเย็น | 1-D | Ansys Fluent | ความผิดพลาด |
|----------------------------------|---------------|----------|--------------|-------------|
| อัตราการไหลเชิงมวลปฐมภูมิ (kg/s) | R245fa | 0.034882 | 0.032064 | 8.08% |
| อัตราการไหลเชิงมวลปฐมภูมิ (kg/s) | R1224yd(z) | 0.032506 | 0.031109 | 4.30% |

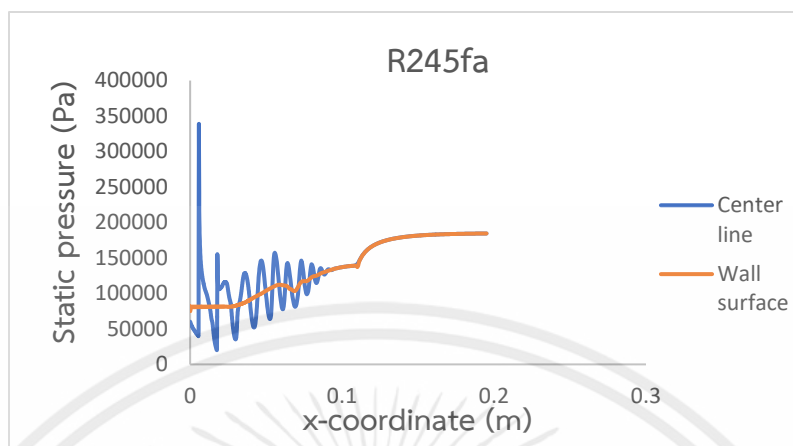
4.2 การศึกษาผลลัพธ์ของสารทำความเย็นที่มีผลต่ออีเจ็คเตอร์ (Ejector)

4.2.1 การเพิ่มของความดันภายในอีเจ็คเตอร์ (Ejector)

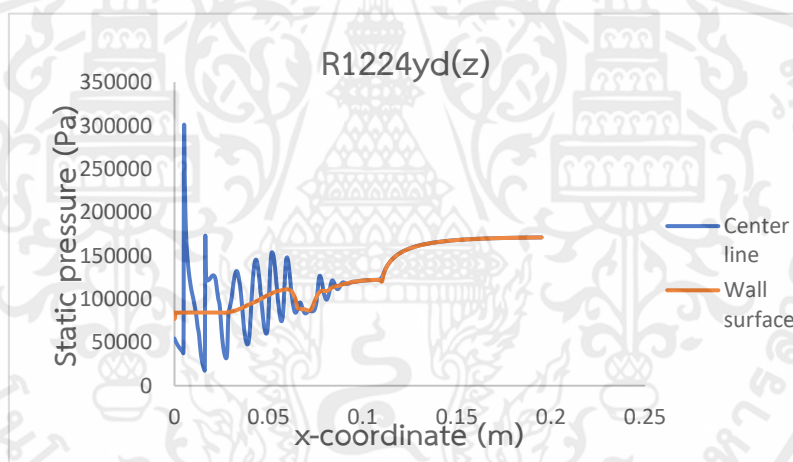
กำหนด center line และ wall surface ในการจำลองผลโดยศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความดันภายในอีเจ็คเตอร์ (Ejector) มีผลเป็นไปตามการทำงานของอีเจ็คเตอร์ (Ejector) ซึ่งจะมีการเพิ่มความดันของไหลจาก Nozzle Inlet (x-coordinate 0 m) ให้มีความดันที่สูงขึ้นและส่งออกทางช่องทาง Outlet (x-coordinate 0.25306 m)



รูปที่ 4.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ Static pressure ภายในอีเจ็คเตอร์ (Ejector) ของสารทำความเย็น R141b



รูปที่ 4.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ Static pressure ภายในอีเจ็คเตอร์ (Ejector) ของสารทำความเย็น R245fa

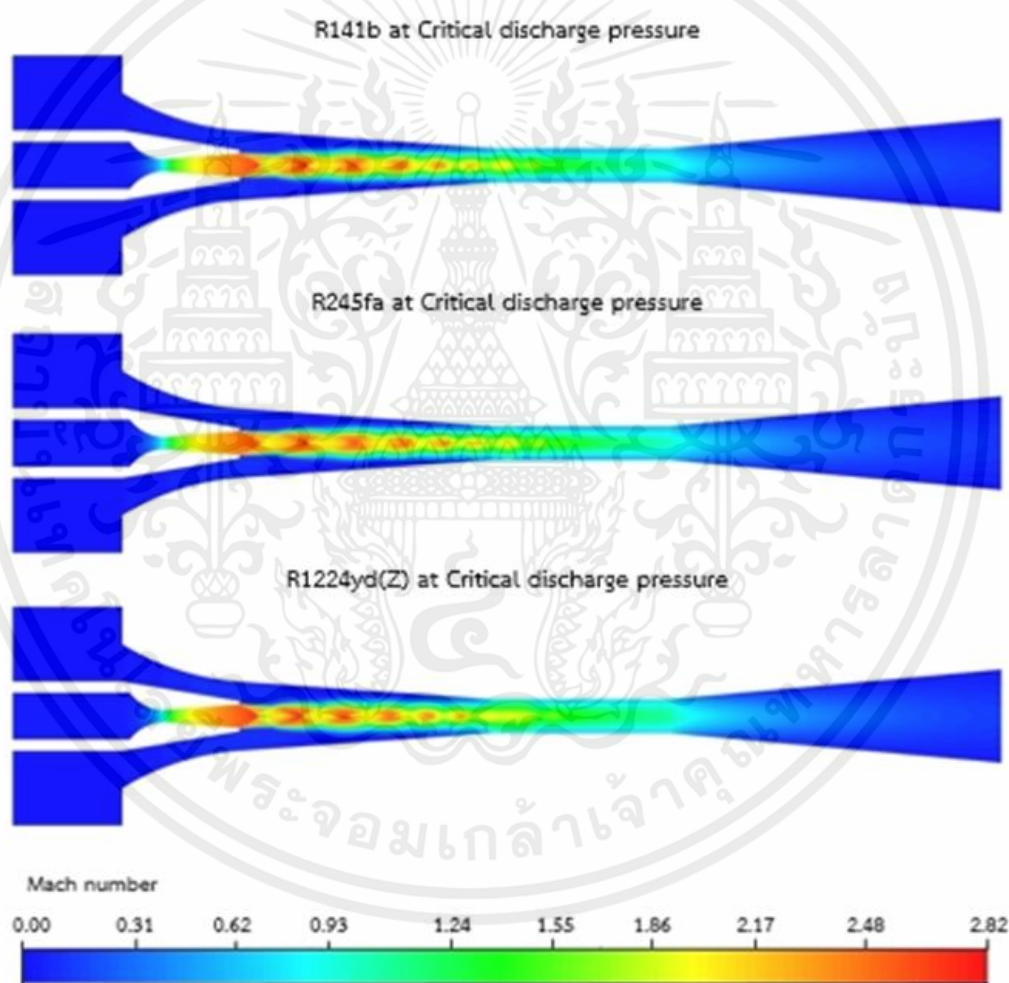


รูปที่ 4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ Static pressure ภายในอีเจ็คเตอร์ (Ejector) ของสารทำความเย็น R1224yd(z)

4.2.2 ผลการจำลองเลขมัคส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิวิกฤติของเครื่องควบแน่น (Condenser)

จากการจำลองการไหลภายในอีเจ็คเตอร์ (Ejector) เพื่อศึกษาลักษณะการไหลเมื่อเปรียบเทียบกับกันที่จุด The Critical discharge pressure (P_{cri}) ของทั้ง 3 สารทำความเย็นและทำงานที่อุณหภูมิเครื่องระเหย (Evaporator) เดียวกัน (90 องศาเซลเซียส)

จากรูปที่ 4.4 เห็นได้ว่าตำแหน่งและขนาดการเกิดคลื่นกระแทกของสารทำความเย็น R141b และ R245fa มีลักษณะใกล้เคียงกัน ในขณะที่ตำแหน่งของคลื่นกระแทกของสารทำความเย็น R1224yd(z) มีลักษณะแตกต่างออกไป เกิดในตำแหน่งไกลจากสารทำความเย็น R141b และ R245fa เมื่อพิจารณาจากข้อมูลในหัวข้อที่ 4.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิวิกฤติของเครื่องควบแน่นของสารทำความเย็น R245fa มีค่ามากที่สุดแต่ใกล้เคียงกับสารทำความเย็น R141b และ R1224yd(z) มีค่าน้อยที่สุด เป็นสิ่งที่ทำให้เห็นได้ว่าผลของเลขมัคและตำแหน่งของการเกิดคลื่นกระแทกนี้ส่งผลต่ออุณหภูมิวิกฤติของเครื่องควบแน่น (Condenser) อย่างมีอากาปฏิกิริยาได้



รูปที่ 4.4 คอนทัวร์เลขมัคของสารทำความเย็นแต่ละชนิดที่ไหลภายในอีเจ็คเตอร์ (Ejector)

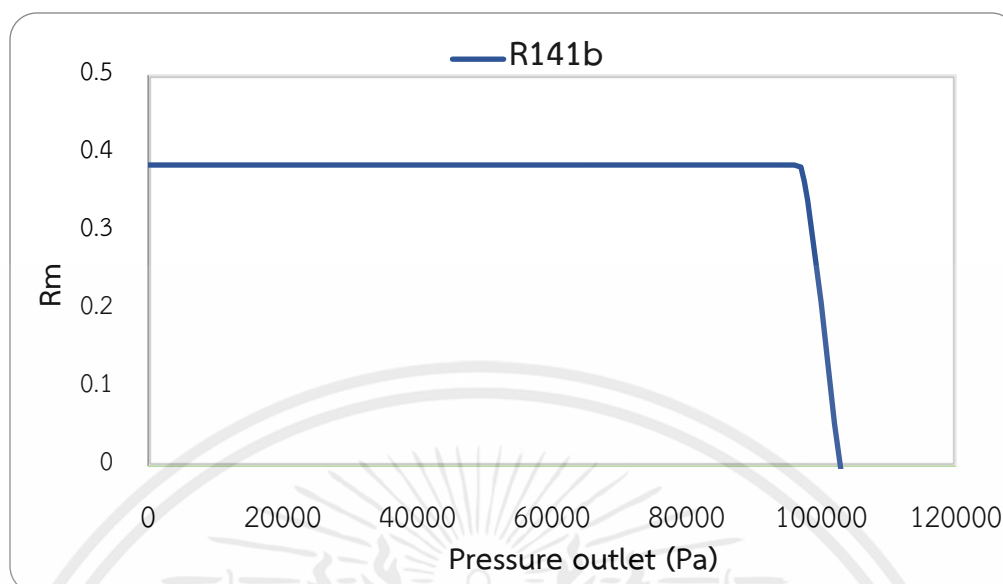
4.3 แสดงผลการหาค่า The Critical discharge pressure (P_{cri}) ของสารทำความเย็น R141b , R245fa และ R1224yd(z) ที่อีเจ็คเตอร์ (Ejector)

แสดงข้อมูลการใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 2020 R2 ในการคิดค่าอัตราการไหลเชิงมวลปฐมภูมิ (Primary Mass Flow Rate) และ อัตราการไหลเชิงมวลทุติยภูมิ (Secondary Mass Flow Rate) และนำไปคำนวณค่า Entrainment ratio (Rm) เพื่อหาจุด The Critical discharge pressure (P_{cri}) ของสารทำความเย็น R141b , R245fa และ R1224yd(z) โดยกำหนดให้อุณหภูมิที่หม้อไอน้ำ (Boiler) มีอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสและกำหนดให้ที่เครื่องระเหย (Evaporator) มีอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส (C)

4.3.1 แสดงผลค่า The Critical discharge pressure (P_{cri}) ของสารทำความเย็น R141b

ตารางที่ 4.4 แสดงผลค่าของของไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) ในส่วนของทางเข้าของไหลปฐมภูมิ (Primary inlet) และ ทางเข้าของไหลทุติยภูมิ (Secondary inlet) ที่ความดันต่างๆ ของสารทำความเย็น R141b

| P outlet (Pa) | P outlet (Bar) | T outlet (K) | Primary Mass Flow Rate (kg/s) | Secondary Mass Flow Rate (kg/s) | Entrainment ratio |
|---------------|----------------|--------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| 83,000 | 0.830 | 299.64 | 0.016307423 | 0.00628064620 | 0.38514032540 |
| 92,000 | 0.920 | 302.48 | 0.016307423 | 0.00628063920 | 0.38513989610 |
| 93,000 | 0.930 | 302.78 | 0.016307423 | 0.00628062000 | 0.38513871870 |
| 96,000 | 0.960 | 303.67 | 0.016307423 | 0.00628064730 | 0.38514039280 |
| 97,000 | 0.970 | 303.96 | 0.016307423 | 0.00623827720 | 0.38254218340 |
| 97,500 | 0.975 | 304.10 | 0.016307423 | 0.00593592600 | 0.36400147340 |
| 98,000 | 0.980 | 304.25 | 0.016307423 | 0.00553972580 | 0.33970577690 |
| 100,000 | 1.000 | 304.82 | 0.016307423 | 0.00341769770 | 0.20957926340 |
| 102,000 | 1.020 | 305.38 | 0.016307423 | 0.00087466277 | 0.05363586693 |
| 104,000 | 1.040 | 305.94 | 0.016307423 | -0.00115163630 | -0.07062037331 |



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าระหว่าง Entrainment ratio (Rm) และความดันที่ทางออก (Pressure outlet) ของสารทำความเย็น R141b

จากค่าในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 แสดงผลค่า Entrainment ratio (Rm) เริ่มมีค่าลดลงที่ความดัน 97,500 Pa ทำให้ทราบได้ว่า The Critical discharge pressure (P_{cr}) ของสารทำความเย็น R141b อยู่ที่ความดัน 97,500 Pa และจากการตรวจสอบค่าของอัตราการไหลเชิงมวลปฐมภูมิ (Primary Mass Flow Rate) จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีค่าอัตราการไหลเชิงมวลปฐมภูมิ (Primary Mass Flow Rate) มีความคลาดเคลื่อนจากงานวิจัยอยู่ 4.47 เปอร์เซ็นต์

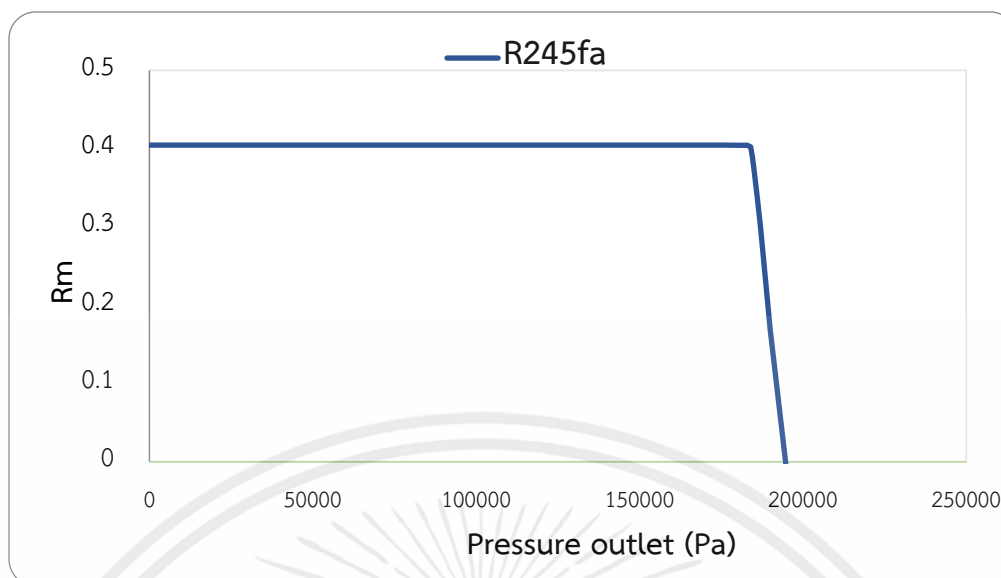
4.3.2 แสดงผลค่า The Critical discharge pressure (P_{cr}) ของสารทำความเย็น R245fa

ตารางที่ 4.5 แสดงผลค่าของอัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) ในส่วนของทางเข้าของไหลปฐมภูมิ (Primary inlet) และทางเข้าของไหลทุติยภูมิ (Secondary inlet) ที่ความดันต่างๆ ของสารทำความเย็น R245fa

| P outlet (Pa) | P outlet (Bar) | T outlet (K) | Primary Mass Flow Rate (kg/s) | Secondary Mass Flow Rate (kg/s) | Entrainment ratio |
|---------------|----------------|--------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| 83,000 | 0.830 | 283.32 | 0.032063555 | 0.012970408 | 0.404521832 |
| 96,000 | 0.960 | 286.86 | 0.032063555 | 0.012970087 | 0.404511820 |

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) แสดงผลค่าของอัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) ในส่วนของทางเข้าของไหลปฐมภูมิ (Primary inlet) และทางเข้าของไหลทุติยภูมิ (Secondary inlet) ที่ความดันต่างๆ ของสารทำความเย็น R245fa

| P outlet (Pa) | P outlet (Bar) | T outlet (K) | Primary Mass Flow Rate (kg/s) | Secondary Mass Flow Rate (kg/s) | Entrainment ratio |
|---------------|----------------|--------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| 124,000 | 1.240 | 293.35 | 0.032063555 | 0.012970082 | 0.404511664 |
| 176,000 | 1.760 | 302.82 | 0.032063555 | 0.012969996 | 0.404508982 |
| 180,000 | 1.800 | 303.45 | 0.032063555 | 0.012967198 | 0.404421718 |
| 182,000 | 1.820 | 303.76 | 0.032063555 | 0.012967182 | 0.404421219 |
| 183,000 | 1.830 | 303.92 | 0.032063555 | 0.012967204 | 0.404421905 |
| 184,000 | 1.840 | 304.07 | 0.032063555 | 0.012898732 | 0.402286397 |
| 184,500 | 1.845 | 304.15 | 0.032063555 | 0.012510747 | 0.390185898 |
| 185,000 | 1.850 | 304.23 | 0.032063555 | 0.012015973 | 0.374754858 |
| 187,000 | 1.870 | 304.53 | 0.032063555 | 0.009646387 | 0.300852070 |
| 190,000 | 1.900 | 304.99 | 0.032063555 | 0.005417601 | 0.168964436 |
| 200,000 | 2.000 | 306.49 | 0.032063555 | -0.006091855 | -0.189993112 |



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าระหว่าง Entrainment ratio (R_m) และความดันที่ทางออก (Pressure outlet) ของสารทำความเย็น R245fa

จากค่าในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 แสดงผลค่า Entrainment ratio (R_m) เริ่มมีค่าลดลงที่ความดัน 184,500 Pa ทำให้ทราบได้ว่า The Critical discharge pressure (P_{cri}) ของสารทำความเย็น R245fa อยู่ที่ความดัน 184,500 Pa และจากการตรวจสอบค่าของอัตราการไหลเชิงมวลปฐมภูมิ (Primary Mass Flow Rate) จากการคำนวณทางทฤษฎี พบว่ามีค่าอัตราการไหลเชิงมวลปฐมภูมิ (Primary Mass Flow Rate) มีความคลาดเคลื่อนจากงานวิจัยอยู่ 8.08 เปอร์เซ็นต์

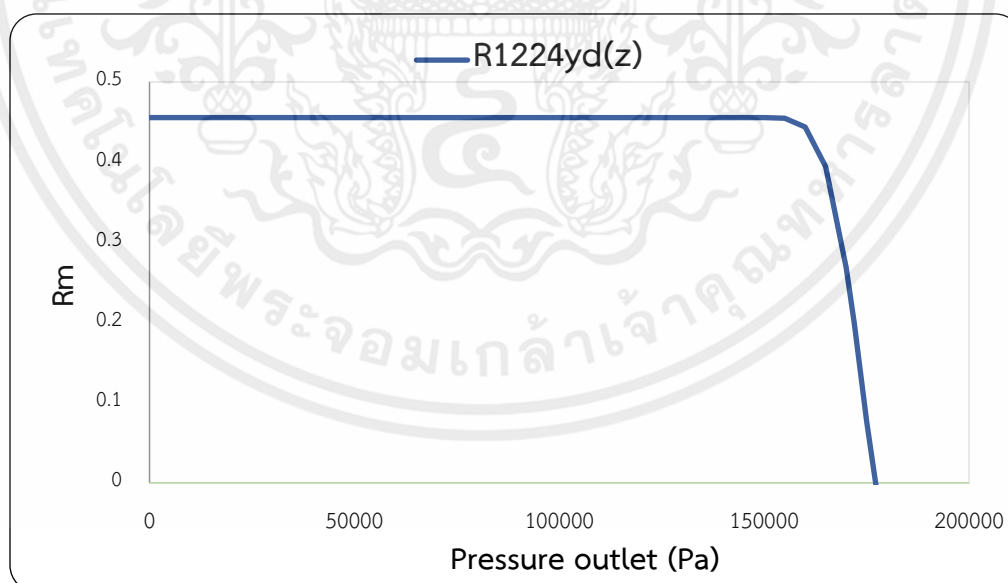
4.3.3 แสดงผลค่า The Critical discharge pressure (P_{cri}) ของสารทำความเย็น R1224yd(z)

ตารางที่ 4.6 แสดงผลค่าของอัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) ในส่วนของทางเข้าของไหลปฐมภูมิ (Primary inlet) และทางเข้าของไหลทุติยภูมิ (Secondary inlet) ที่ความดันต่างๆ ของสารทำความเย็น R1224yd(z)

| P outlet (Pa) | P outlet (Bar) | T outlet (K) | Primary Mass Flow Rate (kg/s) | Secondary Mass Flow Rate (kg/s) | Entrainment ratio |
|---------------|----------------|--------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| 135,000 | 1.35 | 294.9800 | 0.027223135 | 0.012399376 | 0.455472009 |
| 140,000 | 1.40 | 296.0800 | 0.027223135 | 0.012399466 | 0.455475315 |
| 145,000 | 1.45 | 297.1800 | 0.027223135 | 0.012399416 | 0.455473479 |

ตารางที่ 4.6 (ต่อ) แสดงผลค่าของอัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) ในส่วนของทางเข้าของไหลปฐมภูมิ (Primary inlet) และทางเข้าของไหลทุติยภูมิ (Secondary inlet) ที่ความดันต่างๆ ของสารทำความเย็น R1224yd(z)

| P outlet (Pa) | P outlet (Bar) | T outlet (K) | Primary Mass Flow Rate (kg/s) | Secondary Mass Flow Rate (kg/s) | Entrainment ratio |
|---------------|----------------|--------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| 150,000 | 1.50 | 298.2800 | 0.027223135 | 0.012398593 | 0.455443247 |
| 155,000 | 1.55 | 299.1230 | 0.027223135 | 0.012378803 | 0.454716292 |
| 160,000 | 1.60 | 299.9660 | 0.027223135 | 0.012082420 | 0.443829118 |
| 165,000 | 1.65 | 300.8090 | 0.027223135 | 0.01073442 | 0.394312411 |
| 170,000 | 1.70 | 301.6520 | 0.027223135 | 0.007311599 | 0.26858036 |
| 172,000 | 1.72 | 301.9892 | 0.027223135 | 0.005408224 | 0.198662773 |
| 175,000 | 1.75 | 302.4950 | 0.027223135 | 0.002092348 | 0.076859201 |
| 180,000 | 1.80 | 303.3380 | 0.027223135 | -0.002692232 | -0.098894988 |



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าระหว่าง Entrainment ratio (Rm) และความดันที่ทางออก (Pressure outlet) ของสารทำความเย็น R1224yd(z)

จากค่าในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 แสดงผลค่า Entrainment ratio (R_m) เริ่มมีค่าลดลง ที่ความดัน 160,000 Pa ทำให้ทราบได้ว่า The Critical discharge pressure (P_{cri}) ของสารทำความเย็น R1224yd(z) อยู่ที่ความดัน 160,000 Pa และจากการตรวจสอบค่าของอัตราการไหลเชิงมวลปฐมภูมิ (Primary Mass Flow Rate) จากการคำนวณทางทฤษฎี พบว่ามีค่าอัตราการไหลเชิงมวล (Primary Mass Flow Rate) มีความคลาดเคลื่อนจากงานวิจัยอยู่ 16.25 เปอร์เซ็นต์

4.3.4 แสดงผลค่าอัตราส่วนความดัน (Pressure lift ratio) ของสารทำความเย็น R141b , R245fa และ R1224yd(z)

หาค่าอัตราส่วนความดัน (Pressure lift ratio) ของสารทำความเย็น R141b , R245fa และ R1224yd(z) โดยอ้างอิงจากสมการที่กล่าวถึงไปในบทที่ 2 แสดงผลดังตาราง

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าอัตราส่วนความดัน (Pressure lift ratio) ของสารทำความเย็น R141b

| Pressure outlet (Pa) | Pressure secondary (Pa) | Pressure lift ratio |
|----------------------|-------------------------|---------------------|
| 83,000 | 43,564 | 1.905242861 |
| 92,000 | 43,564 | 2.111835460 |
| 93,000 | 43,564 | 2.134790194 |
| 96,000 | 43,564 | 2.203654394 |
| 97,000 | 43,564 | 2.226609127 |
| 97,500 | 43,564 | 2.238086493 |
| 98,000 | 43,564 | 2.249563860 |
| 100,000 | 43,564 | 2.295473327 |
| 102,000 | 43,564 | 2.341382793 |
| 104,000 | 43,564 | 2.387292260 |

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าอัตราส่วนความดัน (Pressure lift ratio) ของสารทำความเย็น R245fa

| Pressure outlet (Pa) | Pressure secondary (Pa) | Pressure lift ratio |
|----------------------|-------------------------|---------------------|
| 83,000 | 81,673 | 1.016247720 |
| 96,000 | 81,673 | 1.175419049 |

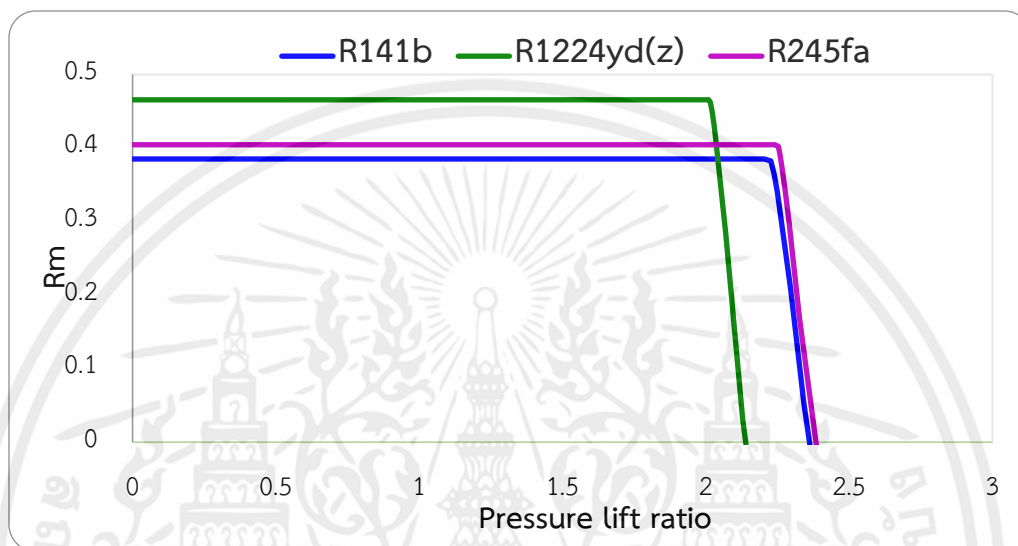
ตารางที่ 4.8 (ต่อ) แสดงค่าอัตราส่วนความดัน (Pressure lift ratio) ของสารทำความเย็น R245fa

| Pressure outlet (Pa) | Pressure secondary (Pa) | Pressure lift ratio |
|----------------------|-------------------------|---------------------|
| 124,000 | 81,673 | 1.518249605 |
| 176,000 | 81,673 | 2.154934923 |
| 180,000 | 81,673 | 2.203910717 |
| 182,000 | 81,673 | 2.228398614 |
| 183,000 | 81,673 | 2.240642562 |
| 184,000 | 81,673 | 2.252886511 |
| 184,500 | 81,673 | 2.259008485 |
| 185,000 | 81,673 | 2.265130459 |
| 186,000 | 81,673 | 2.277374408 |
| 187,000 | 81,673 | 2.289618356 |
| 190,000 | 81,673 | 2.326350201 |
| 200,000 | 81,673 | 2.448789686 |

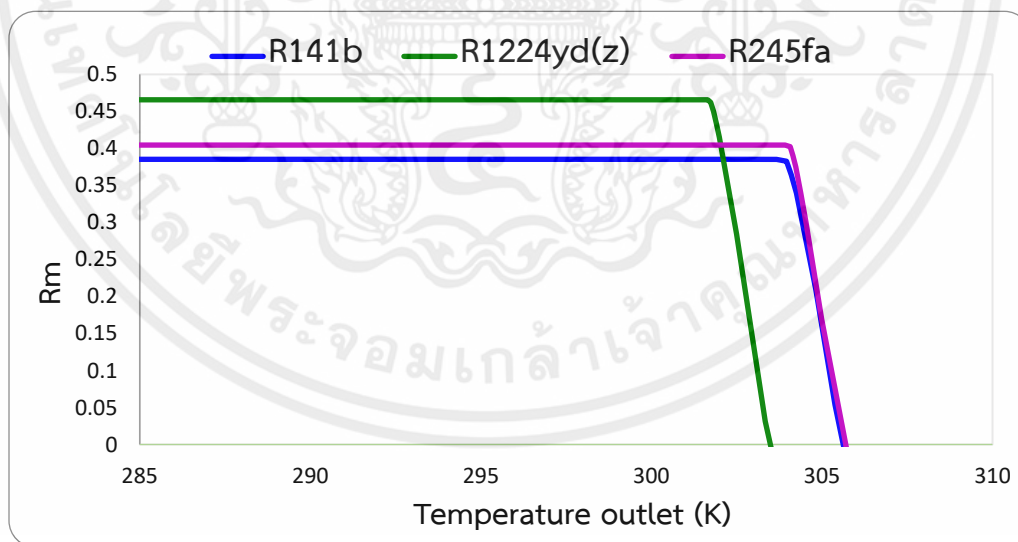
ตารางที่ 4.9 แสดงค่าอัตราส่วนความดัน (Pressure lift ratio) ของสารทำความเย็น R1224yd(z)

| Pressure outlet (Pa) | Pressure secondary (Pa) | Pressure lift ratio |
|----------------------|-------------------------|---------------------|
| 135,000 | 84,580 | 1.596122015 |
| 140,000 | 84,580 | 1.655237645 |
| 145,000 | 84,580 | 1.714353275 |
| 150,000 | 84,580 | 1.773468905 |
| 155,000 | 84,580 | 1.832584535 |
| 160,000 | 84,580 | 1.891700166 |
| 165,000 | 84,580 | 1.950815796 |
| 170,000 | 84,580 | 2.009931426 |
| 172,000 | 84,580 | 2.033577678 |
| 175,000 | 84,580 | 2.069047056 |
| 180,000 | 84,580 | 2.128162686 |

จากตารางที่ 4.7 , 4.8 และ 4.9 การหาค่าอัตราส่วนความดัน (Pressure lift ratio) นั้นจะทำให้สามารถสร้างกราฟเพื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลของสารทำความเย็น R141b , R245fa และ R1224yd(z) โดยจะต้องใช้ค่า Entrainment ratio (R_m) และอัตราส่วนความดัน (Pressure lift ratio) เนื่องจากไม่สามารถเปรียบเทียบค่าของสารทำความเย็นแต่ละตัวได้โดยตรงได้



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าระหว่างอัตราส่วนความดัน (Pressure lift ratio) และ Entrainment ratio (R_m) ของสารทำความเย็น R141b , R245fa และ R1224yd(z)



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าระหว่างอุณหภูมิที่จุด The Critical discharge pressure (P_{cr}) และ Entrainment ratio (R_m) ของสารทำความเย็น R141b , R245fa และ R1224yd(z)

จากข้อมูลทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่าที่จุด Entrainment ratio (R_m) ของทั้งสามสารทำความเย็นมีค่าความดันที่แตกต่างกัน แต่มีอุณหภูมิใกล้เคียงกันนั่นคือสารทำความเย็น R141b มีอุณหภูมิอยู่ที่ 304.10 เคลวิน (K) หรือ 31.1 องศาเซลเซียส (C) ที่สารทำความเย็น R245fa มีอุณหภูมิอยู่ที่ 304.15 เคลวิน (K) หรือ 31.15 องศาเซลเซียส (C) และสารทำความเย็น R1224yd(z) มีอุณหภูมิอยู่ที่ 301.8206 เคลวิน (K) หรือ 28.8206 องศาเซลเซียส (C)

4.4 วิเคราะห์ผลประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ (Ejector Efficiency)

ตารางที่ 4.10 แสดงผลค่าประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ (Ejector Efficiency) ที่สูงสุดของแต่ละสารทำความเย็น

| Refrigerant | Ejector Efficiency |
|-------------|--------------------|
| R141b | 14.95% |
| R245fa | 15.28% |
| R1224yd(z) | 15.25% |

ตารางที่ 4.11 ประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ (Ejector Efficiency) ของสารทำความเย็น R141b ที่แปรผันตามอุณหภูมิของหม้อไอน้ำ (Boiler)

| T_{gen} (°C) | T_{gen} (K) | Ejector Efficiency |
|----------------|---------------|--------------------|
| 84.0 | 357.0 | 0% |
| 86.0 | 359.0 | 0% |
| 88.0 | 361.0 | 3.82% |
| 89.0 | 362.0 | 10.09% |
| 90.0 | 363.0 | 14.35% |
| 90.5 | 363.5 | 14.95% |
| 91.0 | 364.0 | 14.75% |
| 92.0 | 365.0 | 14.44% |
| 94.0 | 367.0 | 13.42% |

ตารางที่ 4.11 (ต่อ) ประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ (Ejector Efficiency) ของสารทำความเย็น R141b ที่แปรผันตามอุณหภูมิของหม้อไอน้ำ (Boiler)

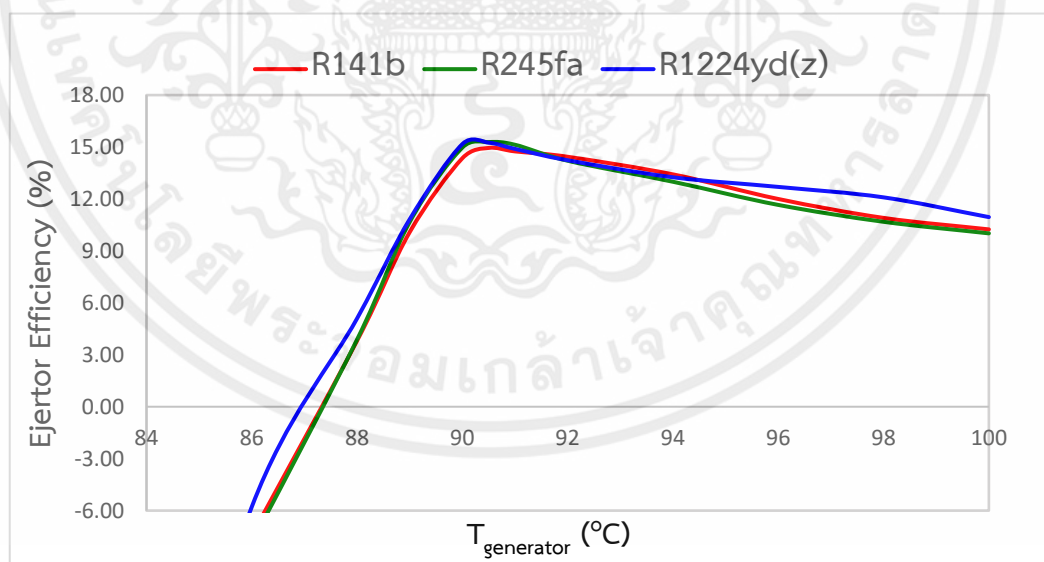
| T_{gen} (°C) | T_{gen} (K) | Ejector Efficiency |
|----------------|---------------|--------------------|
| 96.0 | 369.0 | 12.00% |
| 98.0 | 371.0 | 10.91% |
| 100.0 | 373.0 | 10.24% |

ตารางที่ 4.12 ประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ (Ejector Efficiency) ของสารทำความเย็น R245fa ที่แปรผันตามอุณหภูมิของหม้อไอน้ำ (Boiler)

| T_{gen} (°C) | T_{gen} (K) | Ejector Efficiency |
|----------------|---------------|--------------------|
| 84.0 | 357.0 | 0% |
| 86.0 | 359.0 | 0% |
| 88.0 | 361.0 | 3.89% |
| 89.0 | 362.0 | 10.68% |
| 90.0 | 363.0 | 14.97% |
| 90.5 | 363.5 | 15.28% |
| 91.0 | 364.0 | 15.13% |
| 92.0 | 365.0 | 14.21% |
| 94.0 | 367.0 | 12.99% |
| 96.0 | 369.0 | 11.66% |
| 98.0 | 371.0 | 10.68% |
| 100.0 | 373.0 | 10.01% |

ตารางที่ 4.13 ประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ (Ejector Efficiency) ของสารทำความเย็น R1224yd(z) ที่แปรผันตามอุณหภูมิของหม้อไอน้ำ (Boiler)

| T_{gen} (°C) | T_{gen} (K) | Ejector Efficiency |
|----------------|---------------|--------------------|
| 84.0 | 357.0 | 0% |
| 86.0 | 359.0 | 0% |
| 88.0 | 361.0 | 5.10% |
| 89.0 | 362.0 | 10.83% |
| 90.0 | 363.0 | 15.17% |
| 90.5 | 363.5 | 15.25% |
| 91.0 | 364.0 | 14.89% |
| 92.0 | 365.0 | 14.24% |
| 94.0 | 367.0 | 13.25% |
| 96.0 | 369.0 | 12.70% |
| 98.0 | 371.0 | 12.09% |
| 100.0 | 373.0 | 10.95% |



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของหม้อไอน้ำ (Temperature boiler, $T_{generator}$) และ Ejector Efficiency โดยเปรียบเทียบสารทำความเย็นทั้ง 3 ชนิด

4.5 แสดงผลการหาค่า The optimal value of the generator temperature (T_{opt}) ของสารทำความเย็น R141b , R245fa และ R1224yd(z) ที่หม้อไอน้ำ (Boiler)

แสดงข้อมูลการใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 2020 R2 ในการหาค่าของอัตราการไหลเชิงมวลปฐมภูมิ (Primary Mass Flow Rate) และ อัตราการไหลเชิงมวลทุติยภูมิ (Secondary Mass Flow Rate) และนำไปคำนวณค่า Entrainment ratio (R_m) เพื่อหาจุด The optimal value of the generator temperature (T_{opt}) ของสารทำความเย็น R141b , R245fa และ R1224yd(z) โดยกำหนดให้อุณหภูมิที่หม้อไอน้ำ (Boiler) มีการเปลี่ยนแปลงเพื่อหาจุด The optimal value of the generator temperature (T_{opt}) และกำหนดให้ความดันและอุณหภูมิที่ทางออกไปเครื่องระเหย (Condenser) มีค่าเท่ากับจุดที่เป็น The Critical discharge pressure (P_{cr}) ของแต่ละสารทำความเย็น

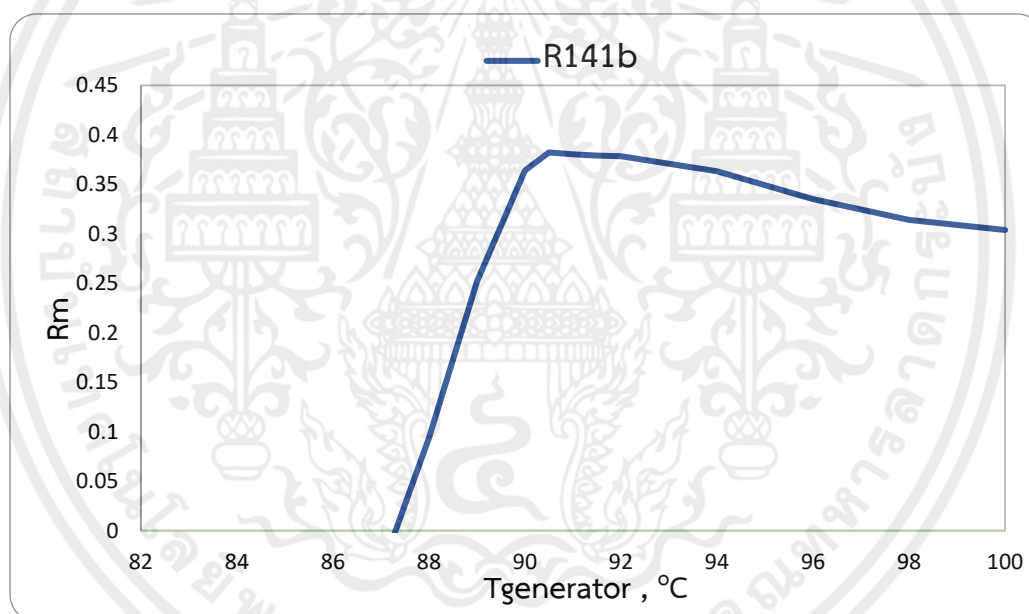
4.5.1 แสดงผลการหาค่า The optimal value of the generator temperature (T_{opt}) ของสารทำความเย็น R141b

ตารางที่ 4.14 แสดงผลค่าของอัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) ในส่วนของอัตราการไหลเชิงมวลปฐมภูมิ (Primary inlet) และอัตราการไหลเชิงมวลทุติยภูมิ (Secondary inlet) ที่อุณหภูมิต่างๆ ของสารทำความเย็น R141b

| T (C) | T (K) | Primary Mass Flow Rate (kg/s) | Secondary Mass Flow Rate (kg/s) | Entrainment ratio |
|-------|-------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| 84.0 | 357.0 | 0.014251090 | -0.006044266 | -0.424126562 |
| 86.0 | 359.0 | 0.014918074 | -0.002621187 | -0.175705436 |
| 88.0 | 361.0 | 0.015606760 | 0.001460090 | 0.093554966 |
| 89.0 | 362.0 | 0.015959627 | 0.004014401 | 0.251534732 |
| 90.0 | 363.0 | 0.016307423 | 0.005935926 | 0.364001473 |
| 90.5 | 363.5 | 0.016499743 | 0.006306644 | 0.382226826 |
| 91.0 | 364.0 | 0.016682696 | 0.006343567 | 0.380248336 |
| 91.5 | 364.5 | 0.016866844 | 0.006392178 | 0.378978925 |
| 92.0 | 365.0 | 0.017052554 | 0.006451458 | 0.378327956 |

ตารางที่ 4.14 (ต่อ) แสดงผลค่าของอัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) ในส่วนของอัตราการไหลเชิงมวลปฐมภูมิ (Primary inlet) และอัตราการไหลเชิงมวลทุติยภูมิ (Secondary inlet) ที่อุณหภูมิต่างๆ ของสารทำความเย็น R141b

| T (C) | T (K) | Primary Mass Flow Rate (kg/s) | Secondary Mass Flow Rate (kg/s) | Entrainment ratio |
|-------|-------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| 94.0 | 367.0 | 0.017810205 | 0.006468162 | 0.363171698 |
| 96.0 | 369.0 | 0.018591585 | 0.006228422 | 0.335012986 |
| 98.0 | 371.0 | 0.019397276 | 0.006090357 | 0.313980009 |
| 100.0 | 373.0 | 0.020022747 | 0.006083727 | 0.303840786 |



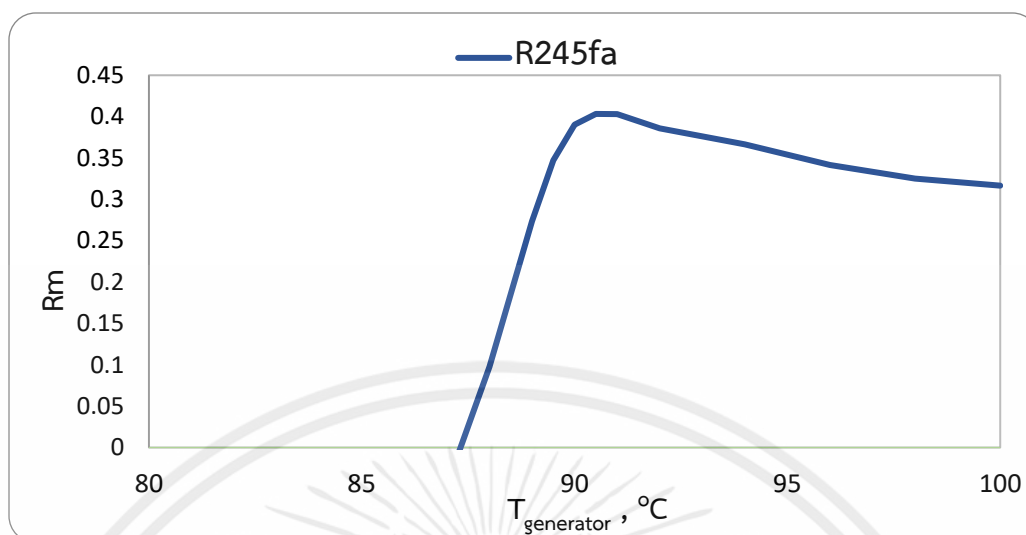
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าระหว่าง Entrainment ratio (R_m) และอุณหภูมิของหม้อไอน้ำ (Temperature boiler, $T_{generator}$) ของสารทำความเย็น R141b

จากค่าในตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.11 แสดงผลค่า Entrainment ratio (R_m) มีค่ามากที่สุดที่อุณหภูมิ 363.5 เคลวิน (K) หรือ 90.5 องศาเซลเซียส (C) ทำให้ทราบได้ว่าจุด The optimal vale of the generator temperature (T_{opt}) ของสารทำความเย็น R141b อยู่ที่อุณหภูมิ 90.5 องศาเซลเซียส (C)

4.5.2 แสดงผลค่า The optimal value of the generator temperature (T_{opt}) ของสารทำความเย็น R245fa

ตารางที่ 4.15 แสดงผลค่าของอัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) ในส่วนของอัตราการไหลเชิงมวลปฐมภูมิ (Primary inlet) และอัตราการไหลเชิงมวลทุติยภูมิ (Secondary inlet) ที่อุณหภูมิต่างๆ ของสารทำความเย็น R245fa

| T (C) | T (K) | Primary Mass Flow Rate (kg/s) | Secondary Mass Flow Rate (kg/s) | Entrainment ratio |
|-------|-------|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| 84.0 | 357.0 | 0.028094339 | -0.012476459 | -0.444091566 |
| 86.0 | 359.0 | 0.029409853 | -0.005574622 | -0.189549479 |
| 88.0 | 361.0 | 0.030770831 | 0.003005396 | 0.097670274 |
| 89.0 | 362.0 | 0.031468297 | 0.008613937 | 0.273733806 |
| 90.0 | 363.0 | 0.032063555 | 0.012510747 | 0.390185898 |
| 90.5 | 363.5 | 0.032530362 | 0.01311874 | 0.403276791 |
| 91.0 | 364.0 | 0.032893437 | 0.013259068 | 0.403091595 |
| 92.0 | 365.0 | 0.034625287 | 0.013357455 | 0.385771676 |
| 94.0 | 367.0 | 0.035123503 | 0.01287492 | 0.366561388 |
| 96.0 | 369.0 | 0.036667142 | 0.01252224 | 0.341511209 |
| 98.0 | 371.0 | 0.038262525 | 0.012438367 | 0.325079618 |
| 100.0 | 373.0 | 0.039905255 | 0.012630036 | 0.316500571 |



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าระหว่าง Entrainment ratio (R_m) และอุณหภูมิของหม้อไอน้ำ (Temperature boiler, $T_{generator}$) ของสารทำความเย็น R245fa

จากค่าในตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.7 แสดงผลค่า Entrainment ratio (R_m) มีค่ามากที่สุดที่อุณหภูมิ 363 เคลวิน (K) หรือ 90 องศาเซลเซียส (C) ทำให้ทราบได้ว่าจุด The optimal vale of the generator temperature (T_{opt}) ของสารทำความเย็น R245fa อยู่ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส (C)

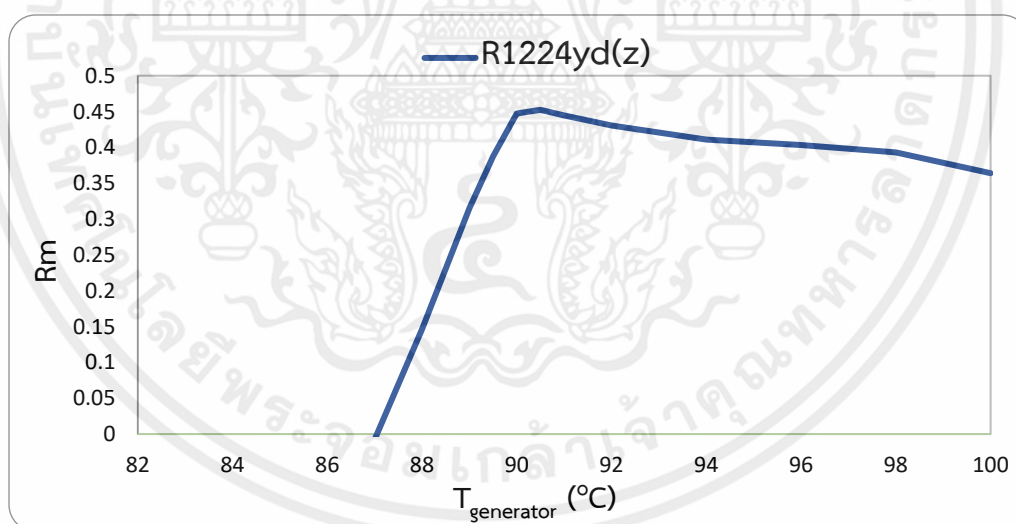
4.5.3 แสดงผลค่า The optimal value of the generator temperature (T_{opt}) ของสารทำความเย็น R1224yd(z)

ตารางที่ 4.16 แสดงผลค่าของอัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) ในส่วนของทางเข้าของไหลปฐมภูมิ (Primary inlet) และทางเข้าของไหลทุติยภูมิ (Secondary inlet) ที่อุณหภูมิต่างๆ ของสารทำความเย็น R1224yd(z)

| T (C) | T (K) | Primary Mass Flow Rate (kg/s) | Secondary Mass Flow Rate (kg/s) | Entrainment ratio |
|-------|-------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| 84 | 357 | 0.026152583 | -0.018911261 | -0.723112551 |
| 86 | 359 | 0.028552957 | -0.004603771 | -0.161236229 |
| 88 | 361 | 0.02981148 | 0.004364006 | 0.146386744 |
| 89 | 362 | 0.03046139 | 0.009598495 | 0.315103651 |
| 90 | 363 | 0.031109595 | 0.013910538 | 0.447146226 |

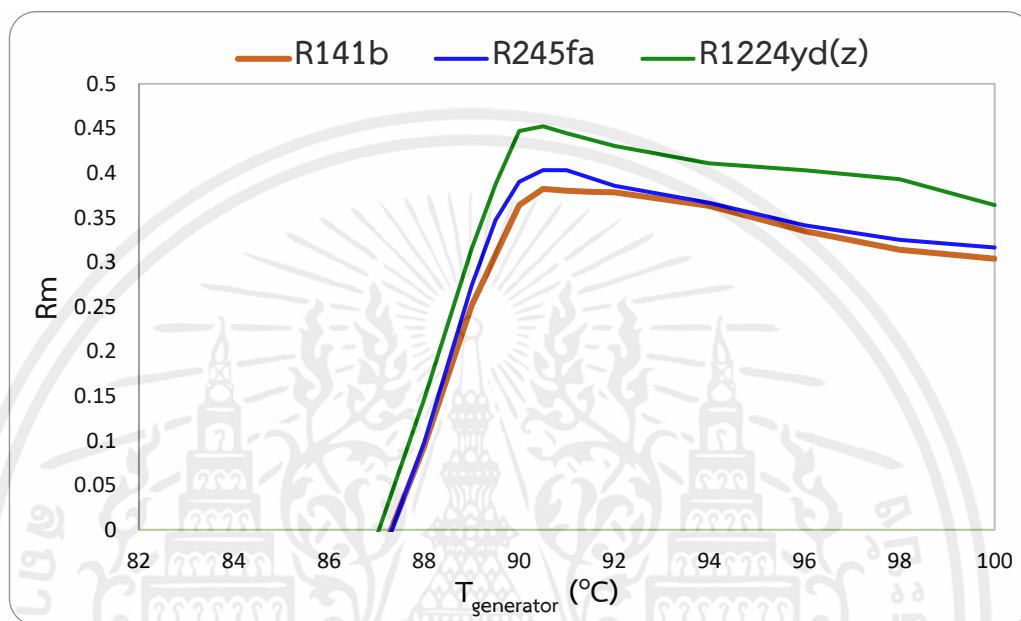
ตารางที่ 4.16 (ต่อ) แสดงผลค่าของอัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) ในส่วนของทางเข้าของไหลปฐมภูมิ (Primary inlet) และทางเข้าของไหลทุติยภูมิ (Secondary inlet) ที่อุณหภูมิต่างๆ ของสารทำความเย็น R1224yd(z)

| T (C) | T (K) | Primary Mass Flow Rate (kg/s) | Secondary Mass Flow Rate (kg/s) | Entrainment ratio |
|-------|-------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| 90.5 | 363.5 | 0.031445448 | 0.014226004 | 0.45240265 |
| 91 | 364 | 0.031780863 | 0.014131066 | 0.444640726 |
| 92 | 365 | 0.032450371 | 0.013969475 | 0.430487374 |
| 94 | 367 | 0.033836855 | 0.013903495 | 0.410897969 |
| 96 | 369 | 0.035258272 | 0.014215776 | 0.40318981 |
| 100 | 373 | 0.03673816 | 0.014439722 | 0.393044235 |



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าระหว่าง Entrainment ratio (R_m) และอุณหภูมิของหม้อไอน้ำ (Temperature boiler, $T_{generator}$) ของสารทำความเย็น R1224yd(z)

จากค่าในตารางที่ 4.16 และรูปที่ 4.13 แสดงผลค่า Entrainment ratio (R_m) มีค่ามากที่สุดที่ อุณหภูมิ 363.5 เคลวิน (K) หรือ 90.5 องศาเซลเซียส (C) ทำให้ทราบได้ว่าจุด The optimal vale of the generator temperature (T_{opt}) ของสารทำความเย็น R1224yd(z) อยู่ที่อุณหภูมิ 90.5 องศาเซลเซียส (C)



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าระหว่าง Entrainment ratio (R_m) และอุณหภูมิของหม้อไอน้ำ (Temperature boiler, $T_{generator}$) ของสารทำความเย็น R141b , R245fa และ R1224yd(z)

จากรูปที่ 4.14 จะเป็นการแสดงการเปรียบเทียบข้อมูลของสารทำความเย็นต่างๆ และจากข้อมูลในหัวข้อ 4.5.1 , 4.5.2 และ 4.5.3 ตามที่ได้กล่าวไปข้างต้นนั้น สารทำความเย็นมีค่า Entrainment ratio (R_m) ใกล้เคียงกันมากโดยทั้ง 3 สารทำความเย็น R141b , R245fa และ R1224yd(z) มีค่า 90.5 องศาเซลเซียส (°C)

บทที่ 5

บทสรุปการจำลองผล

จากการจำลองการไหลของสารทำความเย็นภายในอีเจ็คเตอร์ (Ejector) กำหนดช่วงการทำงานของหม้อไอน้ำอยู่ที่ 84-100 องศาเซลเซียส, Ejector Area Ratio เท่ากับ 7.9 และเลขมัคทางออกหัวพ่นเท่ากับ 2.5 โดยเก็บค่าในรูปของ Entrainment Ratio (Rm), Critical discharge pressure และประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ (Ejector efficiency) แสดงให้เห็นว่า ค่าของประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ (Ejector efficiency) และค่าของ Critical discharge pressure นั้น ค่าของสารทำความเย็น R245fa มีค่ามากกว่าสารทำความเย็น R141b และ R1224yd(z) แต่ถึงอย่างนั้น ค่าของ R1224yd(z) ก็มีค่าใกล้เคียงกับสารทำความเย็น R245fa และในส่วนของค่า Entrainment Ratio (Rm) นั้น สารทำความเย็น R1224yd(z) มีค่ามากกว่าสารทำความเย็น R141b และ R245fa สิ่งที่น่าสนใจของสารทำความเย็น R1224yd(z) มีค่าศักยภาพในการทำให้เกิดโลกร้อน (Global Warming Potential: GWP) มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสารทำความเย็น R141b และ R245fa

จากการจำลองทั้งหมดโดยเงื่อนไขดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น แสดงให้เห็นว่าสาร R1224yd(z) มีแนวโน้มที่จะสามารถทดแทนสารที่ใช้ในปัจจุบันได้ แต่ถึงอย่างนั้นก็ยังมียังมีปัจจัยหลายอย่างที่ประกอบการตัดสินใจการเลือกใช้สารทำความเย็นให้เหมาะสมกับการใช้งาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ต้นแบบขนาดและรูปแบบของอีเจ็คเตอร์ (Ejector)

ต้นแบบขนาดและรูปแบบของอีเจ็คเตอร์ (Ejector) ที่ทำการจำลองผล จากการศึกษา งานวิจัยของ TONGCHANA THONGTIP [1] เอกสารอ้างอิง (DEVELOPMENT OF THE JET REFRIGERATION SYSTEM TO BE USED WITH WASTE HEAT, 2559 : 43-44)

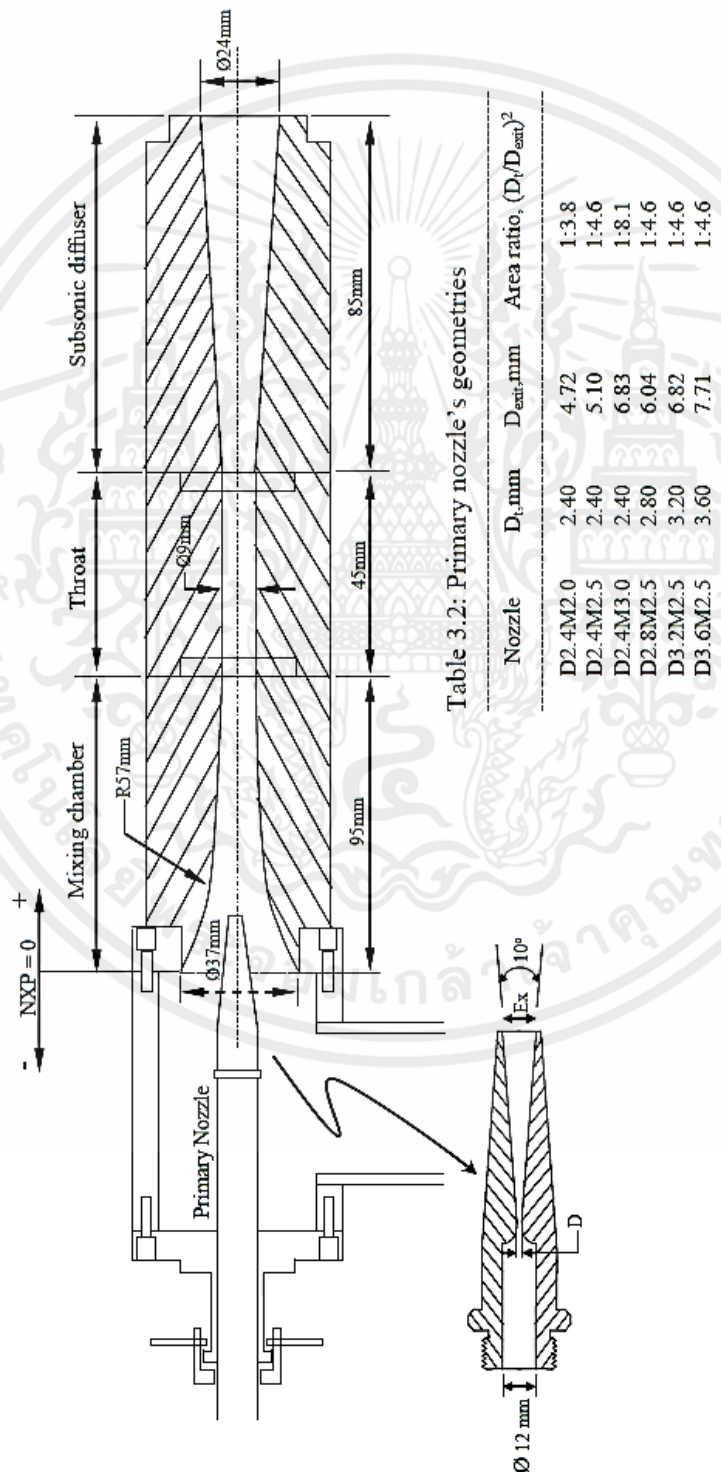


Figure 3.3 The geometries of an experimental ejector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

Boundary condition ของสารทำความเย็น

Boundary condition ของ Primary inlet สารทำความเย็นชนิด R141b

| Nozzle | Values | Unit | ที่มา |
|-------------------------------|--------------|--------------------------------|------------------------------------|
| Static Temp | 90.00000 | C | ค่าจากการกำหนด |
| Static Pressure | 538250.00000 | Pa | www.webbook.nist.gov |
| Density | 23.68050 | kg/m ³ | |
| kinematic viscosity (ν) | 4.77E-07 | m ² /s | Prop. ของสารทำความเย็น ที่ 90 C |
| dynamic viscosity (μ) | 1.13E-05 | kg/ms | |
| Cp | 9.68E-01 | kJ/kgK | |
| Cv | 8.31E-01 | kJ/kgK | |
| γ | 1.163820063 | - | |
| Diameter | 0.00320 | m | Dimension |
| Average Velocity | 89.63252352 | m/s | Mass flow จากการ คำนวณ |
| Speed of sound | 385.00 | m/s | สมการความเร็วเสียง |
| Mach number | 0.232811749 | - | |
| Total Pressure | 555458.3427 | Pa | สมการ stagnation |
| Total Temp | 90.39956679 | C | |
| | 363.3995668 | K | |
| Average Velocity | 89.63252352 | m/s | Mass flow จากการ ทดลอง |
| Intensity | 0.05 | - | ค่าคงที่จากโมเดล |
| $C\mu$ | 0.09 | - | |
| TKE | 30.12745977 | m ² /s ² | สมการ TKE |
| Omega | 44737.59276 | 1/s ² | สมการ Omega |

Boundary condition ของ Secondary inlet สารทำความเย็นชนิด R141b

| Nozzle | Values | Unit | ที่มา |
|-------------------------------|-------------|-------------------|---------------------------|
| Static Temp | 10.00000 | C | ค่าจากการกำหนด |
| Static Pressure | 43564.00000 | Pa | www.webbook.nist.gov |
| Density | 2.21229 | kg/m ³ | |
| kinematic viscosity (ν) | 3.99E-06 | m ² /s | Prop. ของ R141b |
| dynamic viscosity (μ) | 8.82E-06 | kg/ms | |
| Cp | 7.67E-01 | kJ/kgK | |
| Cv | 6.77E-01 | kJ/kgK | |
| γ | 1.133185514 | - | |
| Diameter | 0.03841 | m | hydraulic diameter |
| Average Velocity | 1.282292594 | m/s | Mass flow จากการ คำนวณ |
| Speed of sound | 337.00 | m/s | สมการความเร็วเสียง |
| Mach number | 0.003805023 | - | |
| Total Pressure | 43564.35737 | Pa | สมการ stagnation |
| Total Temp | 10.00000964 | C | |
| | 283.0000096 | K | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Boundary condition ของ Primary inlet สารทำความเย็นชนิด R245fa

| Nozzle | Values | Unit | ที่มา |
|-------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------------------|
| Static Temp | 90.00000 | C | ค่าจากการทดลอง |
| Static Pressure | 81673.00000 | Pa | ตาราง Thermodynamics |
| Density | 56.15000 | kg/m ³ | |
| kinematic viscosity (ν) | 2.29E-07 | m ² /s | Prop. ของไอน้ำที่ 130 C |
| dynamic viscosity (μ) | 1.29E-05 | kg/ms | |
| Cp | 1.19E+00 | kJ/kgK | |
| Cv | 9.89E-01 | kJ/kgK | |
| γ | 1.21E+00 | - | |
| Diameter | 0.00320 | m | Dimension |
| Average Velocity | 77.28264969 | m/s | Mass flow จากการทดลอง |
| Speed of sound | 385.00 | m/s | สมการความเร็วเสียง |
| Mach number | 0.200734155 | - | |
| Total Pressure | 83676.81444 | Pa | สมการ stagnation |
| Total Temp | 9.04E+01 | C | |
| | 3.63E+02 | K | |
| Average Velocity | 77.28264969 | m/s | Mass flow จากการทดลอง |
| Intensity | 0.05 | - | ค่าคงที่จากโมเดล |
| C μ | 0.09 | - | |
| TKE | 22.39727979 | m ² /s ² | สมการ TKE |
| Omega | 38573.49513 | 1/s ² | สมการ Omega |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Boundary condition ของ Secondary inlet สารทำความเย็นชนิด R245fa

| Nozzle | Values | Unit | ที่มา |
|-------------------------------|-------------|-------------------|--------------------------|
| Static Temp | 10.00000 | C | ค่าจากการทดลอง |
| Static Pressure | 82417.00000 | Pa | ตาราง Thermodynamics |
| Density | 4.78100 | kg/m ³ | |
| kinematic viscosity (ν) | 1.18E-06 | m ² /s | Prop. ของไอน้ำที่ 130 C |
| dynamic viscosity (μ) | 6.47E-06 | kg/ms | |
| Cp | 7.11E-01 | kJ/kgK | |
| Cv | 6.96E-01 | kJ/kgK | |
| γ | 1.02E+00 | - | |
| Diameter | 0.03841 | m | Dimension |
| Average Velocity | 0 | m/s | Mass flow จากการทดลอง |
| Speed of sound | 337.00 | m/s | สมการความเร็วเสียง |
| Mach number | 0 | - | |
| Total Pressure | 82458.2085 | Pa | Static Pressure x 1.0005 |
| Total Temp | 1.00E+01 | C | |
| | 2.83E+02 | K | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Boundary condition ของ Primary inlet สารทำความเย็นชนิด R1224yd(z)

| Nozzle | Values | Unit | ที่มา |
|-------------------------------|--------------|--------------------------------|-------------------------|
| Static Temp | 90.00000 | C | ค่าจากการทดลอง |
| Static Pressure | 931200.00000 | Pa | ตาราง Thermodynamics |
| Density | 58.33000 | kg/m ³ | |
| kinematic viscosity (ν) | 1.78E-07 | m ² /s | Prop. ของไอน้ำที่ 130 C |
| dynamic viscosity (μ) | 1.33E-05 | kg/ms | |
| Cp | 1.0465E+00 | kJ/kgK | |
| Cv | 9.91E-01 | kJ/kgK | |
| γ | 1.06E+00 | - | |
| Diameter | 0.00320 | m | Dimension |
| Average Velocity | 69.32763793 | m/s | Mass flow จากการทดลอง |
| Speed of sound | 385.00 | m/s | สมการความเร็วเสียง |
| Mach number | 0.1800717868 | - | |
| Total Pressure | 947280.7997 | Pa | สมการ stagnation |
| Total Temp | 9.01E+01 | C | |
| | 3.63E+02 | K | |
| Average Velocity | 69.32763793 | m/s | Mass flow จากการทดลอง |
| Intensity | 0.05 | - | ค่าคงที่จากโมเดล |
| C μ | 0.09 | - | |
| TKE | 18.02370518 | m ² /s ² | สมการ TKE |
| Omega | 34602.97124 | 1/s ² | สมการ Omega |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Boundary condition ของ Secondary inlet สารทำความเย็นชนิด R1224yd(z)

| Nozzle | Values | Unit | ที่มา |
|-------------------------------|-------------|-------------------|-------------------------|
| Static Temp | 10.00000 | C | ค่าจากการทดลอง |
| Static Pressure | 84580.00000 | Pa | ตาราง Thermodynamics |
| Density | 5.56470 | kg/m ³ | |
| kinematic viscosity (ν) | 1.23E-06 | m ² /s | Prop. ของไอน้ำที่ 130 C |
| dynamic viscosity (μ) | 6.85E-06 | kg/ms | |
| Cp | 7.32E-01 | kJ/kgK | |
| Cv | 6.76E-01 | kJ/kgK | |
| γ | 1.08E+00 | - | |
| Diameter | 0.03841 | m | Dimension |
| Average Velocity | 0 | m/s | Mass flow จากการทดลอง |
| Speed of sound | 337.00 | m/s | สมการความเร็วเสียง |
| Mach number | 0 | - | |
| Total Pressure | 84622.29 | Pa | สมการ stagnation |
| Total Temp | 1.00E+01 | C | |
| | 2.83E+02 | K | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการคำนวณ Primary mass flow late ตามทฤษฎีของ Keenan (The classical Keenan's 1-D theory) อ้างอิงจากงานวิจัยของ TONGCHANA THONGTIP [1] เอกสารอ้างอิง (DEVELOPMENT OF THE JET REFRIGERATION SYSTEM TO BE USED WITH WASTE HEAT, 2559 : 40) ดังรูป

$$\dot{m}_p = A * P_o \sqrt{\frac{k}{RT_o} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/[2(k-1)]}}$$

Where, \dot{m}_p is the primary fluid mass flow rate (kg sec^{-1})

A is the throat's area of the primary nozzle (m^2)

P_o is the generator pressure (kPa)

T_o is the generator temperature (K)

R is the ideal gas constant (for R141b is $0.0543 \text{ kJ kg.K}^{-1}$)

k is the specific heat ratio (for R141b is 1.07)

เอกสารอ้างอิง

[1] Chunnanond K., & Aphornratana S. (2004). An experimental investigation of a steam ejector refrigerator: the analysis of the pressure profile along the ejector. Applied Thermal Engineering, 24(2), 311–322.

[2] Chunnanond K., Aphornratana S. (2004). Ejectors: applications in refrigeration technology. Renewable and sustainable energy reviews, 8(2), 129–155.

[3] TONGCHANA THONGTIP (2016). SIRINDHORN INTERNATIONAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY THAMMASAT UNIVERSITY ACADEMIC , THAILAND

[4] Natthawut Ruangtrakoon (2011) , Experimental studies of a steam jet refrigeration cycle: Effect of the primary nozzle geometries to system performance , Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University, PO Box 22, Thammasat Rangsit Post Office, Patumthani 12121, Thailand