

การศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพอีเจ็คเตอร์ในรูปแบบต่าง ๆ
โดยใช้อากาศเป็นของไหลทำงานโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
THE NUMERICAL STUDIES ON THE PERFORMANCES OF
VARIOUS EJECTORS USING AIR AS A WORKING FLUID



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2566

การศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพอีเจ็คเตอร์ในรูปแบบต่าง ๆ
โดยใช้อากาศเป็นของไหลทำงานโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
THE NUMERICAL STUDIES ON THE PERFORMANCES OF
VARIOUS EJECTORS USING AIR AS A WORKING FLUID



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE NUMERICAL STUDIES ON THE PERFORMANCES OF
VARIOUS EJECTORS USING AIR AS A WORKING FLUID



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2023

ปริญญาโทปีการศึกษา 2566

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพอีเจ็คเตอร์ในรูปแบบต่างๆ โดยใช้อากาศเป็นของไหลทำงาน โดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

The numerical studies on performance of various ejectors using air as a working fluid

ผู้จัดทำ

1. นางสาว ธมลวรรณ ปาทะกาญจน์ รหัสประจำตัว 63010444
2. นาย ศุภณัฐ ดำเพชร รหัสประจำตัว 63010934
3. นาย ศุภากร ลิมพ์พิทักษ์พร รหัสประจำตัว 63010940

(ดร. ณัฐวุฒิ เรืองตระกูล)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพอีเจ็คเตอร์ฝรูปร่างต่าง ๆ โดยใช้อากาศเป็นของไหลทำงาน โดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

นางสาว ฉมลวรรณ ปาทะกาญจน์ 63010444
 นาย ศุภณัฐ คำเพชร 63010934
 นาย ศุภากร ลิมพ์พิทักษ์พร 63010940
 ดร. ณัฐวุฒิ เรืองตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษา
 ดร. เอกราช บำรุงไทยชัยชาญ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
 ผศ.ดร.ต้องชนะ ทองทิพย์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
 ปีการศึกษา 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเปรียบเทียบสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ผ่านการศึกษาคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และโปรแกรมวิเคราะห์เชิงตัวเลข ANSYS (FLUENT) 2023 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้อากาศเป็นสารทำงาน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ในจำลองอยู่บนพื้นฐานของการไหล แบบ Choked โดยเกิดขึ้นเมื่อของไหลไหลในผ่านคอขวด และการเคลื่อนที่ผ่านคลื่นกระแทกที่ตั้งฉากกับการไหล โดยพิจารณาได้จาก Entrainment Ratio ซึ่งเป็นผลลัพธ์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และทำการศึกษอีเจ็คเตอร์จากรูปทรงต่าง ๆ ซึ่งได้ทำการออกแบบขึ้นมาจากเงื่อนไขธรรมชาติของอากาศ และเป็นของไหลที่อัดตัวได้ โดยเป็นแบบจำลองในการศึกษาผลกระทบของคุณสมบัติต่างๆ ของสารทำงานที่เป็นอากาศ

ในการศึกษานี้เราสรุปว่า CPM Ejector ให้ค่า Entrainment ratio สูงกว่า CRMC Ejector และการเพิ่มขึ้นของ Critical outlet pressure จะส่งผลให้เกิดการไหลย้อนกลับ เมื่อเพิ่มความดันวิกฤต แล้วคงที่ความดันปฐมภูมิและทุติยภูมิไว้ ผลปรากฏว่าทั้งสองโมเดลให้ค่า R_m คงที่ค่านึง เมื่อเพิ่มความดันวิกฤตไปเรื่อย ๆ ถึงจุดนึ่งทั้งสองโมเดลจะให้ค่า R_m ที่ลดลง จนให้ค่าเป็นลบ นั่นคือเกิดการไหลย้อนกลับ จากการศึกษาพบว่าค่า R_m ของ CRMC จะลดลงเร็วกว่า CPM และค่าความดันวิกฤตก่อนเกิดการไหลย้อนกลับของ CPM สูงกว่า CRMC

คำสำคัญ : อีเจ็คเตอร์, อากาศ, พลศาสตร์ของไหล, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, ประสิทธิภาพ, Entrainment Ratio

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The numerical studies on performance of various ejectors using air as a working fluid.

Thamolwan	Pathakan	63010444
Suphanat	Dumphet	63010934
Supakorn	Limpitakphon	63010940
Dr. Natthawut	Ruangtrakoon	Advisor
Dr. Eakarach Bumrunghthaichaichan		Co.Advisor
Asst. Prof. Dr. Tongchana Thongtip.		Co.Advisor
Year 2023		

ABSTRACT

This research study aims to compare the performance of ejectors by studying the fluid dynamics through mathematical modeling and numerical analysis using ANSYS (FLUENT) 2023. The focus is on evaluating the efficacy of air-operated ejectors. Mathematical models based on Choked flow are utilized to simulate the flow, considering entrainment ratio as a key metric. Various ejector geometries are examined, designed based on natural conditions of air and compressibility.

The study reveals that CPM ejectors exhibit higher entrainment ratios compared to CRMC ejectors. Additionally, an increase in critical outlet pressure results in flow reversal when pressure is raised while maintaining upstream and downstream pressures constant. It is observed that both models initially maintain a constant entrainment ratio (R_m) with increasing pressure until reaching a critical point, beyond which R_m decreases, indicating flow reversal. CRMC ejectors demonstrate a faster decrease in R_m compared to CPM ejectors, and the critical pressure for flow reversal is higher in CPM than in CRMC ejectors.

Keywords: Ejector, Air, Fluid Dynamics, Mathematical Model, Efficiency, Entrainment Ratio

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก อาจารย์ ญัฐวุฒิ เรืองตระกูล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์นี้ ที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษา ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์ ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ต้องชนะ ทองทิพย์ และ ดร. เอกราช บำรุงไทยชัยชาญ ที่ได้ชี้แนะแนวทาง และข้อคิดเห็นต่าง ๆ โดยตลอดมา รวมถึงคอยให้คำปรึกษาแก่การทำปริญญาานิพนธ์นี้ จนทำให้งานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ที่ร่วมกันทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จ รวมถึงเพื่อน ๆ ภายในคณะวิศวกรรมเครื่องกลทุกคน ที่คอยให้การสนับสนุนในเรื่องต่าง ๆ และบุคคลากรภายในตึกวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และสถานที่ในการทำปริญญาานิพนธ์

อนึ่งผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่น้อย จึงขอมอบส่วนดีทั้งหมดนี้ให้แก่เหล่าคณาจารย์ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาจนทำให้ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้อง ขอมอบความกตัญญูตเวทิตาคุณ แต่บิดา มารดา และ ผู้มีพระคุณทุกท่าน ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและความปรารถนาดีของทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงกราบขอบพระคุณและขอบคุณไว้ในโอกาสนี้

นางสาว ฌมลวรรณ ปาทะกาญจน์

นาย ศุภณัฐ ดำเพชร

นาย ศุภากร ลิมพ์พิทักษ์พร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญรูป(ต่อ).....	VIII
สารบัญรูป(ต่อ).....	IX
สารบัญตาราง	X
หน้า.....	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดหวังว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 อีเจ็คเตอร์ (Ejector).....	4
2.2 ระบบการทำงานของ Ejector	5
2.3 ทฤษฎีพื้นฐานของการไหลแบบอัดตัวได้.....	7
2.3.1 สภาวะสแตกเนชั่น (Stagnation).....	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.2 ความเร็วเสียงและเลขมัค (Speed of sound and Mach number).....	9
2.3.4 ความสัมพันธ์ของสมบัติต่าง ๆ สำหรับการไหลแบบไอเซนโทรปิกของแก๊สอุดมคติ	12
2.3.5 การไหลแบบไอเซนโทรปิกผ่านหัวพ่น.....	13
2.4 Computational Fluid dynamics (CFD).....	14
2.4.1 Ejector model.....	15
2.4.2 การทำงานในสภาวะวิกฤต	16
2.4.3 การทำงานภายใต้สภาวะต่ำกว่าสภาวะวิกฤต.....	19
2.4.4 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ	21
2.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในโปรแกรมการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ANSYS (FLUENT).....	21
2.5.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการไหล.....	21
2.5.2 การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน	22
2.5.3 The universal law of the wall.....	22
2.5.4 สูตรลอการิทึมทั่วไป	23
2.5.5 การคำนวณของไหลด้วยเทคนิคการคำนวณแบบพลศาสตร์.....	23
2.5.6 Reynold Averaged Navier-Stokes Simulation.....	24
2.5.7 โมเดลจำลองความปั่นป่วนแบบ Realizable k- ω	24
2.6 ขั้นตอนการประมวลผล.....	25
2.7 การเลือกจำนวนกริดที่เหมาะสม.....	25
2.8 ขั้นตอนหลังกระบวนการประมวล.....	26
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	27
3.1 ผลการทดลองจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
3.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้อากาศเป็นสารทำงาน.....	27
3.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอีเจ็คเตอร์	29

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 การสร้างแบบจำลองการทดลองด้วยโปรแกรม ANSYS (FLUENT).....	33
3.2.1 การสร้างแบบจำลองเชิงกายภาพ (Geometry).....	34
3.2.2 การสร้างเมช (Meshing).....	35
3.2.3 Solver Set-Up.....	36
3.2.4 ขอบเขตและเงื่อนไขการจำลอง.....	37
3.2.5 สารทำงานในระบบ.....	37
3.2.6 การหาผลลัพธ์.....	37
บทที่ 4 ผลการจำลองและวิเคราะห์ผล.....	38
4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	38
4.2 การเปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงตัวเลข.....	40
4.2.1 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไขความดัน ปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 80 kPa.....	40
4.2.3 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไขความดัน ปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 84 kPa.....	42
4.2.4 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไขความดัน ปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 86 kPa.....	44
4.2.5 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไขความดัน ปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 88 kPa.....	45
4.3 แนวโน้มของผลการจำลองระหว่างอีเจ็คเตอร์ประเภทต่างๆ.....	47
4.4 การเปรียบเทียบพฤติกรรมการไหลภายในอีเจ็คเตอร์.....	50
บทที่ 5 สรุปการจำลองผล.....	60
เอกสารอ้างอิง.....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของอีเจ็คเตอร์ที่ความแปรผันความดันและความเร็ว	4
รูปที่ 2.2 รูปแสดงส่วนประกอบของอีเจ็คเตอร์.....	5
รูปที่ 2.3 การไหลแบบคงตัวของของไหลผ่านท่อแอดิยาติก.....	7
รูปที่ 2.4 สภาวะที่เกิดขึ้นจริง สภาวะสแตกเนชันที่เกิดขึ้นจริงและสภาวะสแตกเนชันไอเซนโทรปิก ของของไหล บนกราฟ h-s.....	8
รูปที่ 2.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงหน้าการไหลสำหรับการไหลแบบความเร็วต่ำกว่าความเร็วเสียง และความเร็ว เหนือกว่าความเร็วเสียง	11
รูปที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติของไหลที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหัวพ่น-หัวกระจาย หรือหัวพ่นลู่เข้า-ลู่ออกและตำแหน่งคอ คอตเป็นสมบัติวิกฤต เมื่อ $Ma_t = 1$	11
รูปที่ 2.7 ผลกระทบของความดันกลับ (back pressure) ต่อการไหลผ่านหัวพ่นลู่เข้า-ลู่ออก	13
รูปที่ 2.8 แสดงช่วงการทำงานของ Ejector	16
รูปที่ 2.9 The universal law of wall	22
รูปที่ 3.1 ความร้อนสำหรับส่วนประกอบอากาศแห้งที่ความชื้นสัมพัทธ์ 60%	27
รูปที่ 3.2 ความร้อนจำเพาะสำหรับอากาศแห้งและชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 10%	28
รูปที่ 3.3 ความร้อนจำเพาะสำหรับอากาศแห้งและชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90%.....	28
รูปที่ 3.4 ผลกระทบของอัตราส่วนพื้นที่ต่ออัตราส่วนการกักเก็บ.....	29
รูปที่ 3.5 ปรัชญาการไหลย้อนกลับเป็นปัญหาสำคัญในตัวเป่า ซึ่งพื้นที่การไหลของของไหลทุติยภูมิได้รับ ..	30
รูปที่ 3.6 ผลกระทบของ NXP ต่อทางเข้าของอีเจ็คเตอร์	31
รูปที่ 3.7 เวกเตอร์ความเร็วในห้องดูด (a) $\Delta NXP = 6$ มม. (b) $\Delta NXP = -2$ มม.....	32
รูปที่ 3.8 ผลกระทบของ NXP ต่อสนามความเร็ว (a) $\Delta NXP = -2$ มม. (ข) $\Delta NXP = -6$ มม.	32
รูปที่ 3.9 Flow Chart for the CFD simulation.....	33
รูปที่ 3.10 CPM Ejector ในหน่วยมิลลิเมตร	34
รูปที่ 3.11 CRMC Ejector ในหน่วยมิลลิเมตร	34
รูปที่ 3.12 รูปร่างแบบจำลอง 2 มิติ และมีรูปร่างสมมาตรตามแนวแกนของ Ejector	35
รูปที่ 3.13 Grid ที่บริเวณ Primary Inlet และ Secondary Inlet	35

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.14 Grid ที่บริเวณทางเชื่อมของของไหล	36
รูปที่ 3.15 Grid ที่บริเวณ Diffuser	36
รูปที่ 3.16 กราฟคอนทัวร์แสดงความเร็วของของไหลภายในอีเจ็คเตอร์.....	37
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Primary mass flow rate ที่ได้จากการทดลอง และ Primary mass flow rate ที่ได้จากการจำลองผล	38
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ค่า Secondary mass flow rate ที่ได้จากการทดลอง และ Secondary mass flow rate ที่ได้จากการจำลองผล	39
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Rm และความดันที่ทางออกของอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไขความดันปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 80 kPa.....	41
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Rm และความดันที่ทางออกของอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไขความดันปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 82 kPa.....	42
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Rm และความดันที่ทางออกของอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไขความดันปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 84 kPa.....	43
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Rm และความดันที่ทางออกของอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไขความดันปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 86 kPa.....	45
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Rm และความดันที่ทางออกของอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไขความดันปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 88 kPa.....	46
รูปที่ 4.8 CPM Ejector.....	47
รูปที่ 4.9 CRMC Ejector	47
รูปที่ 4.10 CPM + CRMC Ejector.....	47
รูปที่ 4.11 CRMC + CPM Ejector.....	47
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันวิกฤต ค่าความดันทุติยภูมิและค่า Entrainment Ratio ของอีเจ็คเตอร์ประเภทต่าง ๆ	49
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันวิกฤต ค่าความดันปฐมภูมิและค่า Entrainment Ratio ของอีเจ็คเตอร์ประเภทต่าง ๆ	50

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.14 กราฟคอนทัวร์แสดงค่าความเร็วของอีเจ็คเตอร์ประเภทต่าง ๆ ที่เงื่อนไขความดันปฐมนุ้มี 700 kPa ความดันทุติยภูมิ 80 kPa และความดันทางออก 101.325 kPa.....	51
รูปที่ 4.15 กราฟคอนทัวร์แสดงค่าความเร็วของอีเจ็คเตอร์ประเภทต่าง ๆ ที่เงื่อนไขความดันปฐมนุ้มี 700 kPa ความดันทุติยภูมิ 82 kPa และความดันทางออก 103.325 kPa.....	52
รูปที่ 4.16 กราฟคอนทัวร์แสดงค่าความเร็วของอีเจ็คเตอร์ประเภทต่าง ๆ ที่เงื่อนไขความดันปฐมนุ้มี 700 kPa ความดันทุติยภูมิ 84 kPa และความดันทางออก 105.325 kPa.....	53
รูปที่ 4.17 กราฟคอนทัวร์แสดงค่าความเร็วของอีเจ็คเตอร์ประเภทต่าง ๆ ที่เงื่อนไขความดันปฐมนุ้มี 700 kPa ความดันทุติยภูมิ 86 kPa และความดันทางออก 107.325 kPa.....	54
รูปที่ 4.18 กราฟคอนทัวร์แสดงค่าความเร็วของอีเจ็คเตอร์ประเภทต่าง ๆ ที่เงื่อนไขความดันปฐมนุ้มี 700 kPa ความดันทุติยภูมิ 88 kPa และความดันทางออก 109.325 kPa.....	55
รูปที่ 4.19 กราฟคอนทัวร์แสดงค่าความเร็วของอีเจ็คเตอร์ประเภทต่าง ๆ ที่เงื่อนไขความดันปฐมนุ้มี 400 kPa ความดันทุติยภูมิ 80 kPa และความดันทางออก 103.325 kPa.....	56
รูปที่ 4.20 กราฟคอนทัวร์แสดงค่าความเร็วของอีเจ็คเตอร์ประเภทต่าง ๆ ที่เงื่อนไขความดันปฐมนุ้มี 500 kPa ความดันทุติยภูมิ 80 kPa และความดันทางออก 105.325 kPa.....	57
รูปที่ 4.21 กราฟคอนทัวร์แสดงค่าความเร็วของอีเจ็คเตอร์ประเภทต่าง ๆ ที่เงื่อนไขความดันปฐมนุ้มี 600 kPa ความดันทุติยภูมิ 80 kPa และความดันทางออก 107.325 kPa.....	58
รูปที่ 4.22 กราฟคอนทัวร์แสดงค่าความเร็วของอีเจ็คเตอร์ประเภทต่าง ๆ ที่เงื่อนไขความดันปฐมนุ้มี 700 kPa ความดันทุติยภูมิ 80 kPa และความดันทางออก 109.325 kPa.....	59

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบค่า Primary mass flow rate ที่ได้จากการทดลอง และ Primary mass flow rate ที่ได้จากการจำลองผล	38
ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบค่า Secondary mass flow rate ที่ได้จากการทดลอง และ Secondary mass flow rate ที่ได้จากการจำลองผล.....	39
ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไข ความดันปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 80 kPa	40
ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไข ความดันปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 82 kPa	41
ตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไข ความดันปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 84 kPa	43
ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไข ความดันปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 86 kPa	44
ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไข ความดันปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 88 kPa	46
ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความดันวิกฤตและ Entrainment Ratio ระหว่างอีเจ็คเตอร์ประเภทต่างๆ เมื่อกำหนดให้ ความดันปฐมภูมิคงที่ที่ 700 kPa	48
ตารางที่ 4.9 แสดงค่าความดันวิกฤตและ Entrainment Ratio ระหว่างอีเจ็คเตอร์ประเภทต่างๆ เมื่อกำหนดให้ ความดันทุติยภูมิคงที่ที่ 80 kPa	48

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา (Statement and Significance of The Problems)

เนื่องจากอีเจ็คเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรม อีเจ็คเตอร์จะใช้ในการสร้างสถานะสุญญากาศภายในระบบต่างๆ โดยข้อดีของอีเจ็คเตอร์ มีหลายประการ เช่น ต้นทุนต่ำ การติดตั้งและการบำรุงรักษาง่าย โดยปรกติจะใช้พลังงานจากไอน้ำความดันที่สูงที่ได้จากหม้อไอน้ำ(Boiler) และสามารถนำความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตมาใช้ในการขับเคลื่อนระบบได้ อีเจ็คเตอร์สามารถใช้แทนระบบทำความเย็นแบบอัดไอ(Compressor) โดยใช้พลังงานความร้อนเกรดต่ำโดยมีการเติมไฟฟ้าเข้าไปเล็กน้อยที่จำเป็นในการหมุนเวียนของเหลวทำงาน (Working Fluid) ซึ่งระบบทำความเย็นมี 2 แบบ คือ ระบบทำความเย็นแบบดูดซึมและแบบระบบทำความเย็นแบบเจ็ท ซึ่งแบบเจ็ทยังเป็นระบบทำความเย็นเพียงระบบเดียวที่สามารถใช้น้ำซึ่งเป็นสารทำความเย็นที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและราคาถูกที่สุด

อีเจ็คเตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักของระบบนี้ถูกประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกโดยวิศวกรชื่อว่า Sir Charles Parsons เป็นชาวอังกฤษ ถูกคิดค้นในช่วงปี ค.ศ. 1901 เพื่อที่จะใช้ในการสร้างสถานะสุญญากาศภายในเครื่องควบแน่นเป็นเครื่องยนต์กังหันไอน้ำ และในปี ค.ศ. 1910 วิศวกรชาวฝรั่งเศส ชื่อว่า Maurice Leblanc ได้นำเอาอีเจ็คเตอร์มาใช้กับระบบเครื่องทำความเย็นโดยใช้น้ำเป็นสารทำงานชิ้นครั้งแรก ระบบเครื่องทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานได้ถูกนำมาใช้กับระบบปรับอากาศสำหรับอาคารใหญ่ระบบนี้ได้รับความนิยมจนถึงช่วงคริสต์ทศวรรษที่ 40 หลังจากความนิยมของระบบเครื่องทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ก็ลดลงเนื่องจากถูกแทนที่โดยระบบเครื่องทำความเย็นแบบอัดไอซึ่งได้ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพดีกว่าหลังจากการมีค้นพบสารทำความเย็นประเภทคลอโรฟลูโอโรคาร์บอน(chlorofluorocarbons หรือ CFC) และการพัฒนาของเครื่องอัดไอที่มีประสิทธิภาพ

ในการศึกษาปรากฏการณ์การไหลภายในอีเจ็คเตอร์มีการเลือกใช้เทคนิคการคำนวณและการใช้โปรแกรมในการทำแบบจำลองเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะของสารผสม และใช้ในการอธิบายลักษณะของของไหลเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ผ่านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เพื่อช่วงในการลดต้นทุนในการผลิตและได้สร้างแบบจำลอง 2 มิติเพื่อให้ได้ผลทดลองที่มีความแม่นยำมากที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา (Goal and Objective)

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาทฤษฎีการออกแบบอีเจ็คเตอร์ และปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์อีเจ็คเตอร์ เพื่อใช้ในการออกแบบและพัฒนาประสิทธิภาพระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ โดยใช้ความสัมพันธ์ในทางอุณหพลศาสตร์ สำหรับการไหลแบบอัดตัวได้ ร่วมกับโปรแกรมวิเคราะห์เชิงตัวเลข ANSYS (FLUENT) 2023 โดยโปรแกรมดังกล่าวมีการใช้งานอย่างกว้างขวางและเป็นที่ยอมรับ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ประกอบด้วย

1. เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบอีเจ็คเตอร์ ที่ใช้อากาศเป็นสารทำความเย็นในการทำงาน
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศอัดในอีเจ็คเตอร์ประเภทต่างๆ
3. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ประเภทต่างๆ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย (Scope or Limitation of the study)

1. ใช้อากาศเป็นสารทำความเย็นในระบบ
2. กำหนดให้อุณหภูมิของของไหลปฐมภูมิที่มาจากเครื่องอัดอากาศมีอุณหภูมิคงที่ 32 องศาเซลเซียส
3. กำหนดให้อุณหภูมิของของไหลทุติยภูมิที่มาจากถังสุญญากาศมีอุณหภูมิคงที่ 32 องศาเซลเซียส
4. ความดันจากเครื่องอัดอากาศอยู่ในช่วง 400 - 700 kPa
5. ความดันจากถังสุญญากาศอยู่ในช่วง 80 ถึง 88 kPa
6. ในส่วนของ Ejector ไม่มีการถ่ายเทความร้อนเข้าหรือออกจากระบบ
7. กำหนดความคล้ายคลึงทางจลศาสตร์ของไหลและทางรูปทรงเรขาคณิตของ Ejector

1.4 ขั้นตอนการศึกษา (Process of The study)

1. ศึกษางานวิจัย บทความ วรรณกรรมหรือทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ และการออกแบบอีเจ็คเตอร์
2. กำหนดวัตถุประสงค์ ขอบเขตและเนื้อหาของโครงการ
3. ศึกษาการใช้งานโปรแกรมวิเคราะห์เชิงตัวเลข ANSYS(FLUENT) 2023 ที่จะทำการสร้างแบบจำลองสถานการณ์การทำงานของอีเจ็คเตอร์
4. สร้างแบบจำลองของหัวฉีดหลักและอีเจ็คเตอร์ในโปรแกรมANSYS(FLUENT) 2023 และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโปรแกรม Microsoft Excel ตามขอบเขตการศึกษาที่ได้กำหนดไว้
5. จำลองสถานการณ์การทำงานของอีเจ็คเตอร์ เพื่อเก็บผลการศึกษาในช่วงขอบเขตที่ได้กำหนดไว้
6. คำนวณหาค่าประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์โดยการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ตัมคังที่และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารทำความเย็นที่แตกต่างกัน
7. วิเคราะห์ผลที่ได้ สรุปผลวิจัยและเสนอแนะ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

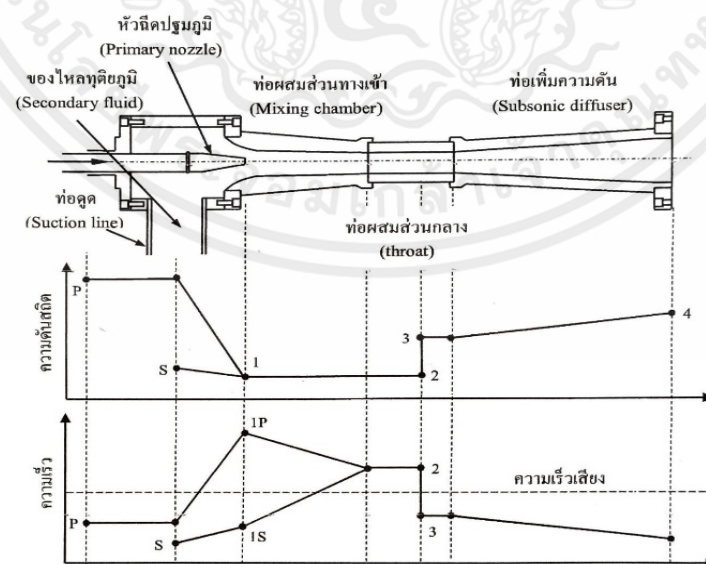
สามารถพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของ Ejector ที่ใช้สารทำความเย็นเป็นอากาศได้ดีขึ้น สามารถหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของระบบทำความเย็นด้วย Ejector โดยมีการเปรียบเทียบของสารทำความเย็นที่อยู่ในขอบเขตของการศึกษา และสามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่ส่งผลกับประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์ผ่านการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 อีเจ็คเตอร์ (Ejector)

อีเจ็คเตอร์ คือ อุปกรณ์หลักที่ถูกประดิษฐ์เป็นครั้งแรกโดยวิศวกรชาวอังกฤษ (Sir Charles Parsons) ในช่วง ค.ศ. 1901 เพื่อที่จะใช้สร้างสภาวะสุญญากาศภายในเครื่องควบแน่นของเครื่องยนต์กังหันไอน้ำ และใน ค.ศ. 1910 วิศวกรชาวฝรั่งเศส (Maurice Leblanc) ได้นำเอาอีเจ็คเตอร์มาใช้กับระบบเครื่องทำความเย็น โดยน้ำเป็นสารทำงานขึ้นเป็นครั้งแรก ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ที่ใช้ไอน้ำเป็นสารทำงานได้นำมาใช้ในระบบปรับอากาศสำหรับอาคารขนาดใหญ่ ระบบนี้ได้รับความนิยมจนถึงคริสต์ทศวรรษที่ 40 หลังจากนั้นถูกแทนที่ด้วยระบบทำความเย็นแบบอัดไอซึ่งได้ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า หลังจากที่เรารู้จักค้นพบสารทำความเย็นประเภทฟลูออโรคาร์บอน (chlorofluorocarbons หรือ CFC) ในปัจจุบันนี้ปัญหาด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมได้รับความสนใจในทุกภาคส่วน ระบบทำความเย็นเป็นการนำพลังงานความร้อนคุณภาพต่ำซึ่งมีราคาถูกพลังงานความร้อนที่ทิ้งในระบบต่างๆ นำมาใช้ในการขับเคลื่อนในระบบทำความเย็นและยังมีการพัฒนาสารทำความเย็นชนิดใหม่ๆ ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมระบบเครื่องทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ก็ยังคงเป็นระบบที่ได้รับความสนใจ เช่นเดียวกับระบบเครื่องทำความเย็นแบบดูดซึมแต่มีความแต่เรียบง่ายกว่ามาก คือ ใช้สารเดียวกันแต่ไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นภายในระบบ และยังเป็นระบบเครื่องทำความเย็นชนิดเดียวที่สามารถใช้น้ำเพียงอย่างเดียวที่เป็นสารทำงาน



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของอีเจ็คเตอร์ที่ความแปรผันความดันและความเร็ว

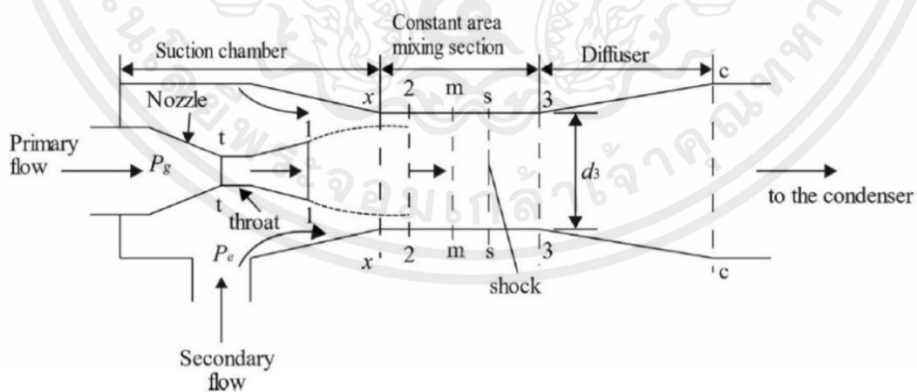
2.2 ระบบการทำงานของ Ejector

ไอน้ำแรงดันสูงจากหม้อไอน้ำ เรียกว่าของไหลปฐมภูมิ (Primary fluid) จะขยายตัวและเร่งความเร็วผ่านหัวฉีดหลักซึ่งทำให้เกิดความเร็วเหนือเสียงซึ่งทำให้บริเวณนั้นมีความดันต่ำและบริเวณที่มีความดันต่ำก็ดึงของไหลทุติยภูมิ (Secondary fluid) ที่ได้จากเครื่องระเหย (evaporator) ซึ่งเป็นที่ที่ทำความเย็นเข้าไปในห้องผสม (Mixing Chamber) หลังจากนั้นของเหลวทั้ง 2 ผสมกันที่ห้องผสมกันที่ห้องผสมของไหลปฐมภูมิที่มีความเร็วเหนือเสียง ความเร็วของของไหลที่ผสมจะต่ำกว่าความเร็วของของไหลปฐมภูมิที่ออกมาจากหัวฉีด แต่ยังมีความเร็วมากกว่าความเร็วของเสียงหลังจากนั้นก็ไหลเข้าสู่ท่อเพิ่มความดัน (Subsonic diffuser) เพื่อลดความเร็วให้ต่ำลงจนเกือบอยู่ในสภาวะหยุดนิ่ง (Stagnation state) เมื่อของไหลมีความดันสูงขึ้นที่ทางออกท่อเพิ่มความดันเป็นอันสิ้นสุดกระบวนการเพิ่มความดันหรือกระบวนการอัดไอของอีเจ็คเตอร์

โดยประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์จะนิยามโดยอัตราส่วนเชิงมวล (mass entrainment ratio) คือ ค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิต่ออัตราการไหลเชิงมวลของของไหลปฐมภูมิ

$$Rm = \frac{\text{อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิ} (\dot{m}_s)}{\text{อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลปฐมภูมิ} (\dot{m}_p)} \quad 2.1$$

อัตราส่วนเชิงมวลของอีเจ็คเตอร์เป็นดัชนีที่สำคัญในการบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์และจะเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นของระบบเครื่องทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์



รูปที่ 2.2 รูปแสดงส่วนประกอบของอีเจ็คเตอร์

ค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นของระบบเครื่องทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์จะสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$COP = \frac{|\dot{Q}_{evap}|}{|\dot{Q}_{boiler}| - |\dot{W}_{pump}|} \quad 2.2$$

โดยที่ \dot{Q}_{evap} คือค่าภาระการทำความเย็นที่ถ่ายเทให้กับเครื่องระเหย(kW)

\dot{Q}_{boiler} คือ ค่าพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับเครื่องกำเนิดไอ(kW)

\dot{W}_{pump} คือค่าพลังงานกลที่ใช้ในการขับเคลื่อนปั๊ม(kW)

ค่าภาระการทำความเย็นที่ถ่ายเทให้กับเครื่องระเหยจะสามารถคำนวณได้จาก

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_s \cdot (h_{g@T_{evap}} - h_{f@T_{con}}) \quad 2.3$$

ค่าพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับเครื่องกำเนิดไอสามารถคำนวณได้จาก

$$\dot{Q}_{boiler} = \dot{m}_p \cdot (h_{g@T_{boiler}} - h_{f@T_{con}}) \quad 2.4$$

โดยที่ $h_{g@T_{boiler}}$ คือเอนทัลปีของไอสารทำงานปฐมภูมิ ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าของไออิ่มตัวที่อุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ (kJ/kg)

$h_{g@T_{evap}}$ คือเอนทัลปีของไอสารทำงานทุติยภูมิซึ่งมีค่าเท่ากับค่าของไออิ่มตัวที่อุณหภูมิของเครื่องระเหย(kJ/kg)

$h_{f@T_{con}}$ เอนทัลปีของสารทำงานที่ทางเข้าเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหยซึ่งมีค่าเท่ากับค่าของเหลวอิ่มตัวที่อุณหภูมิเครื่องควบแน่น(kJ/kg)

โดยปรกติแล้วค่าพลังงานกลที่ใช้การขับเคลื่อนปั๊มหมุนเวียนสารทำงานจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับเครื่องกำเนิดไอและที่เครื่องระเหย ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นจึงสามารถคำนวณจาก

$$COP = Rm \cdot \frac{(h_{g@T_{evap}} - h_{f@T_{con}})}{(h_{g@T_{boiler}} - h_{f@T_{con}})} \quad 2.5$$

ในช่วงอุณหภูมิทำงานของระบบเครื่องทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์นั้นสามารถอนุมานได้ว่า

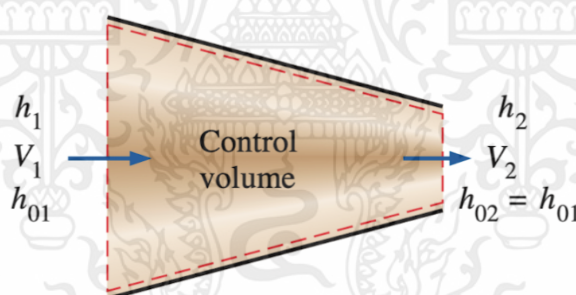
$$h_{g@T_{boiler}} \approx h_{g@T_{evap}} \quad \text{ดังนั้น} \quad COP \approx R_m$$

2.3 ทฤษฎีพื้นฐานของการไหลแบบอัดตัวได้

2.3.1 สภาวะสแตกเนชัน (Stagnation)

การไหลแบบอัดตัวได้ด้วยความเร็วสูง พบได้ในอุปกรณ์หลายชนิด เช่น เครื่องบิน หรือ เครื่องบินไอพ่น โดยมีการกำหนดสภาวะอ้างอิงที่เรียกว่า สภาวะสแตกเนชัน เพื่อให้การวิเคราะห์มีความสะดวกมากยิ่งขึ้น ในระบบจำเป็นต้องมีการพิจารณาพลังงานจลน์เนื่องมีการไหลด้วยความเร็วสูง กล่าวคือ เมื่อมีการพิจารณาพลังงานจลน์ ($\frac{v^2}{2}$) รวมกับ Static Enthalpy (h) เท่ากับ Stagnation enthalpy (h_0) จะเป็นดังสมการข้างล่างนี้ โดยมีหน่วยเป็น kJ/kg

$$h_0 = h + \frac{v^2}{2} \quad 2.6$$

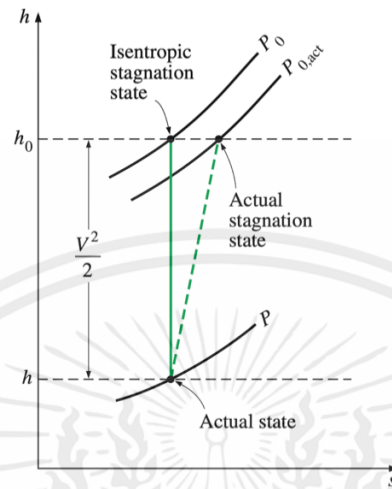


รูปที่ 2.3 การไหลแบบคงตัวของของไหลผ่านท่อแอเดียบาติก

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2} = h_2 = h_1 \quad 2.7$$

จากรูปที่ 2.3 และสมการ 2.7 เมื่อของไหลถูกทำให้หยุดนิ่ง จะได้ว่า Stagnation enthalpy เป็นเทอมเอนทัลปีของของไหลเมื่อของไหลถูกให้หยุดนิ่งตามกระบวนการ Adiabatic พลังงานจลน์ของไหลจะถูกเปลี่ยนเป็นเอนทัลปี ($u+Pv$) ซึ่งจะส่งผลให้อุณหภูมิและความดันของของไหลสูงขึ้น โดยทั่วไปกระบวนการสแตกเนชัน

มีลักษณะใกล้เคียงกับกระบวนการไอเซนโทรปิก จึงสามารถประมาณให้กระบวนการสแตกเนชันเป็นกระบวนการไอเซนโทรปิกได้ และถือได้ว่าสมบัติสแตกเนชันเป็นสมบัติสแตกเนชันไอเซนโทรปิกตามดังที่แสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สภาวะที่เกิดขึ้นจริง สภาวะสแตกเนชันที่เกิดขึ้นจริงและสภาวะสแตกเนชันไอเซนโทรปิกของของไหลบนกราฟ h-s

เมื่อของไหลที่เป็นแก๊สอุดมคติมีค่าความร้อนจำเพาะคงที่ (constant specific Heat, C_p) ค่าเอนทัลปีของแก๊สจะเท่ากับ $C_p T$ จะได้

$$C_p T_0 = C_p T + \frac{V^2}{2} \quad 2.8$$

หรือ

$$T_0 = T + \frac{V^2}{2C_p} \quad 2.9$$

โดย T_0 คือ อุณหภูมิสแตกเนชัน มีหน่วยเป็น Kelvin (K)

ในทำนองเดียวกันกับอุณหภูมิ เมื่อของไหลถูกทำให้หยุดนิ่งตามกระบวนการไอเซนโทรปิก ความดันสแตกเนชัน P_0 จะมีความสัมพันธ์กับความดันสถิต P ดังนี้

$$\frac{P_0}{P} = \left(\frac{T_0}{T} \right)^{k/(k-1)} \quad 2.10$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ในการะบวนการไอเซนโทรปิกคือ $PV^k = P_0V_0^k$ และความสัมพันธ์ทั่วไปคือ $\rho = 1/v$ จะได้อัตราส่วนของความหนาแน่นสแตกเนชันต่อความหนาแน่นสถิต ดังนี้

$$\frac{P_0}{P} = \left(\frac{T_0}{T} \right)^{1/(k-1)} \quad 2.11$$

2.3.2 ความเร็วเสียงและเลขมัค (Speed of sound and Mach number)

ในการศึกษาการไหลแบบอัดตัวได้คือ ความเร็วของเสียงหรือ ความเร็วโซนิก (velocity of sound or sonic speed) สำหรับสารทำงานที่เป็นแก๊สอุดมคติ จะได้สมการดังนี้

$$c = \sqrt{kRT} \quad 2.12$$

เนื่องจาก R เป็นค่าคงที่ ส่วน k เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ดังนั้นความเร็วเสียงของแก๊สอุดมคติจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ

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

$$Ma = \frac{v}{c} \quad 2.13$$

2.3.3 อิทธิพลของพื้นที่หน้าตัดการไหลต่อความเร็วในการไหลของของไหล (Variation of fluid velocity with flow area)

ในระหว่างการไหลของของไหลผ่านอุปกรณ์หลายชนิด เช่น หัวพ่น หัวกระจาย และกังหัน สมบัติของของไหลจะมีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางของการไหลเป็นหลักจึงถือเป็นการไหลแบบไอเซนโทรปิกในหนึ่งมิติได้ โดยมีความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้

ความสัมพันธ์ของพื้นที่หน้าตัดการไหลกับสมบัติต่าง ๆ ในระบบที่มีการไหลแบบไอเซนโทรปิกในหนึ่งมิติ คือ ความดัน อุณหภูมิ ความหนาแน่น ความเร็วในการไหลและเลขมัคจะมีความสัมพันธ์ดังนี้

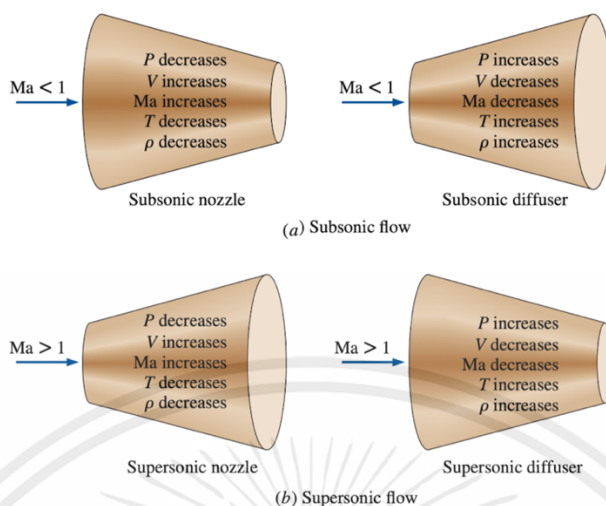
$$\frac{dA}{A} = \frac{dP}{pV^2} (1 - Ma^2) \quad 2.14$$

$$\frac{dA}{A} = -\frac{dP}{V^2} (1 - Ma^2) \quad 2.15$$

จากทั้ง 2 สมการ จะเห็นได้ว่า

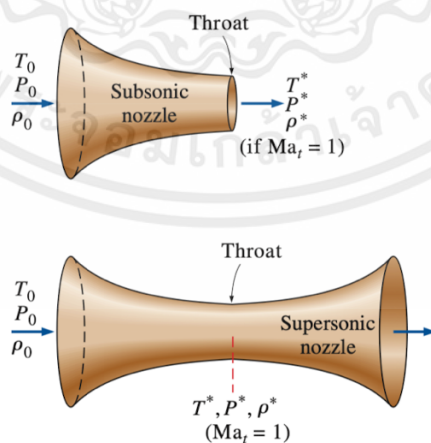
1. การไหลที่มีความเร็วต่ำกว่าความเร็วเสียง ($Ma < 1$) หรือ Subsonic flow เทอม $1 - Ma^2$ จะมีเครื่องหมายเป็นบวก การไหลในท่อลู่ออก ($dA > 0$) จะทำให้ความดันเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเร็วจะลดลง ในทางตรงกันข้าม การไหลในท่อลู่เข้า ($dA < 0$) จะทำให้ความดันลดลง ในขณะที่ความเร็วจะเพิ่มขึ้น
2. สำหรับการไหลที่มีความเร็วสูงกว่าความเร็วเสียง ($Ma > 1$) หรือ Supersonic flow เทอม $1 - Ma^2$ จะมีเครื่องหมายเป็นลบ การไหลในท่อลู่ออก ($dA > 0$) จะทำให้ความดัน ลดลงในขณะที่ความเร็วจะเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม การไหลในท่อลู่เข้า ($dA < 0$) จะ ทำให้ความดันเพิ่มขึ้นในขณะที่ความเร็วจะลดลง

โดยนิยามแล้ว อุปกรณ์ที่เพิ่มความเร็วในการไหลเรียกว่า หัวพ่น (Nozzle) และอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตรงกันข้ามคือลดความเร็วในการไหลเรียกว่า หัวกระจาย (Diffuser) ผลของการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดการไหลสำหรับการไหลแบบความเร็วต่ำกว่าความเร็วเสียงและความเร็วเหนือกว่าความเร็วเสียง ได้ถูกแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงหน้าการไหลสำหรับการไหลแบบความเร็วต่ำกว่าความเร็วเสียง และความเร็วเหนือกว่าความเร็วเสียง

จะเห็นได้ว่าการใช้หัวพ่นเพื่อเพิ่มความเร็วในการไหลจากความเร็วต่ำกว่าความเร็วเสียงให้เป็นความเร็วเหนือกว่าความเร็วเสียง จำเป็นจะต้องมีการติดตั้งหัวกระจายเข้ากับหัวพ่น เป็นหัวพ่น-หัวกระจาย หรือหัวพ่นลู่เข้า-ลู่ออก โดยในช่วงแรกของการไหลจะผ่าน ช่วงหัวพ่นหรือช่วงลู่เข้า ซึ่งเลขมัคจะเพิ่มขึ้นและจะมีค่าเป็นหนึ่ง ที่ตำแหน่งคอคอดจากนั้นของไหลจะ มีความเร็วสูงขึ้นสู่ระดับเหนือกว่าความเร็วเสียงในช่วงหัวกระจายหรือช่วงลู่ออก ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติของไหลที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหัวพ่น-หัวกระจาย หรือหัวพ่นลู่เข้า-ลู่ออกและตำแหน่งคอคอดเป็นสมบัติวิกฤต เมื่อ $Ma_t = 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 ความสัมพันธ์ของสมบัติต่าง ๆ สำหรับการไหลแบบไอเซนโทรปิกของแก๊สอุดมคติ

อุณหภูมิ T ของแก๊สอุดมคติที่ตำแหน่งใด ๆ มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิสถิตที่ตำแหน่งนั้นดังนี้

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \left(\frac{k-1}{2} \right) Ma^2 \quad 2.16$$

อัตราส่วนของความดันสถิตที่ต่อความดันสถิต แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{P_0}{P} = \left[1 + \left(\frac{k-1}{2} \right) Ma^2 \right]^{k/k-1} \quad 2.17$$

อัตราส่วนของความหนาแน่นสถิตที่ต่อความหนาแน่นสถิต แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left[1 + \left(\frac{k-1}{2} \right) Ma^2 \right]^{k/k-1} \quad 2.18$$

คุณสมบัติของของไหลที่ตำแหน่งเลขมัคมีค่าเท่ากับ 1 หรือที่บริเวณคอคอคอดนั้น เรียกว่าคุณสมบัติวิกฤต (critical properties) เรียกอัตราส่วนของสมบัติที่ตำแหน่งดังกล่าวต่อสมบัติที่สภาวะสถิตที่ตำแหน่งนั้นเรียกว่า อัตราส่วนวิกฤต (critical ratio) เมื่อกำหนดให้ด้วยก “*” เป็นสัญลักษณ์แสดงสมบัติที่สภาวะวิกฤตและให้ $Ma = 1$ จะได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

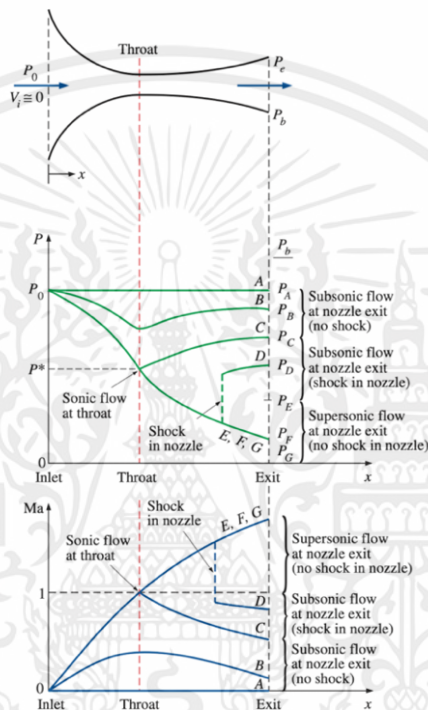
$$\frac{T^*}{T_0} = \frac{2}{k+1} \quad 2.19$$

$$\frac{P^*}{P_0} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k/k-1} \quad 2.20$$

$$\frac{\rho^*}{\rho_0} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k/k-1} \quad 2.21$$

2.3.5 การไหลแบบไอเซนโทรปิกผ่านหัวพ่น

หัวพ่นลู่เข้าหรือหัวพ่นลู่เข้า-ลู่ออก มักถูกประยุกต์ใช้อย่างหลากหลายในทางวิศวกรรมรวมถึงกังหันไอและกังหันแก๊ส ระบบแรงขับเคลื่อนในอากาศยานและยานอวกาศ ในส่วนนี้จะมีการพิจารณาผลกระทบของความดันกลับ (back pressure) หรือความดันด้านหลังของเขตขาออกของหัวพ่นต่อความเร็วขาออก อัตราการไหลของมวลและการกระจายตัวของความดันตลอดหัวพ่น



รูปที่ 2.7 ผลกระทบของความดันกลับ (back pressure) ต่อการไหลผ่านหัวพ่นลู่เข้า-ลู่ออก

หัวพ่นลู่เข้า-ลู่ออก (converging-diverging nozzle)

การบังคับให้ของไหลผ่านหัวพ่นลู่เข้า-ลู่ออกไม่ได้ยืนยันว่าของไหลจะถูกเร่งเข้าสู่ความเร็วเหนือเสียง ในความจริงของไหลมักจะถูกพบว่ามีความเร็วลดลงในส่วนของลู่ออกแทนที่จะมีความเร็วเพิ่ม ถ้าความดันกลับนั้นไม่ได้อยู่ในช่วงที่ถูกต้อง เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ พิจารณารูปที่ 2.7

ของไหลไหลเข้าหัวพ่นด้วยความเร็วต่ำที่ความเร็วสแตกเนชัน P_0 เมื่อ $P_b = P_0$ (case A) จะไม่มีการไหลผ่านหัวพ่น เป็นไปตามหลักการที่ว่า การไหลผ่านหัวพ่นจะถูกขับโดยความต่างของความดันระหว่างขาเข้าและขาออก ต่อไปจะเป็นการอธิบายว่าเกิดอะไรขึ้นเมื่อความดันกลับ (back pressure) ถูกทำให้ต่ำกว่านี้

1. เมื่อ $P_0 > P_b > P_c$ การไหลจะยังคงเป็นความเร็วซับโซนิคและการไหลของมวลจะต่ำกว่าการไหลที่ความเร็วที่เกิดการไหลโซค ความเร็วของไหลจะเพิ่มในส่วนแรก(ส่วนลู่เข้า) และไปถึงค่าสูงสุดที่คอคอด แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วจะสูญเสียในส่วนที่สอง(ส่วนลู่ออก) หรือเรียกว่าหัวกระจาย (diffuser) ความดันจะลดลง ในส่วนลู่เข้าถึงจุดต่ำสุดที่คอคอดและเพิ่มขึ้นที่การเสียความเร็วในส่วนลู่ออก

2. เมื่อ $P_b = P_c$ ความดันที่คอคอดจะมีค่า P^* และของไหลจะมีค่าความเสียงที่คอคอดแต่ในส่วนของการลู่ออกของหัวพ่นจะทำหน้าที่เหมือนหัวกระจาย (diffuser) ลดความเร็วของไหลไปเป็นความเร็วซับโซนิค อัตราการไหลของมวลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันกลับ (back pressure) ลดลงจนกระทั่งถึง ค่าสูงสุดที่สามารถถึงได้ โดยที่ $P_b = P^*$ เป็นความดันต่ำสุดที่สามารถให้ได้ที่คอคอดและความเร็วเสียง คือความเร็วสูงสุดที่สามารถถึงได้ เมื่อใช้หัวพ่นลู่เข้า ดังนั้น การลดลงของ P_b ลงกว่านี้จะไม่มีการกระทบกับการไหลของของไหลในส่วนลู่เข้าของหัวพ่นหรืออัตราการไหลของมวลผ่านหัวพ่น อย่างไรก็ตามการลดลงนี้จะมีอิทธิพลต่อลักษณะของการไหลในส่วนของการลู่ออกของหัวพ่น

3. เมื่อของไหลมีความเร็วเท่ากับความเร็วเสียง (ความดันมีค่าเท่ากับ P^*) ณ ตำแหน่งคอคอดของหัวพ่น ความเร็วจะเพิ่มขึ้นในส่วนลู่ออกของหัวพ่น (Diverging Section) และจะเกิดคลื่นกระแทกตั้งฉาก ในช่วงระหว่างคอคอดและทางออกของหัวพ่นทำให้ความเร็วลดลงจนต่ำกว่าเสียงและความดันเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน การไหลผ่านคลื่นกระแทกตั้งฉากเป็นกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ (ไม่สามารถประมาณเป็นกระบวนการ Isentropic ได้) ตำแหน่งของคลื่นกระแทกตั้งฉากจะเลื่อนไปตามแนวทิศทางการไหลเมื่อความดันของของไหลที่ตำแหน่งทางออกของหัวพ่นลดลงและตำแหน่งของคลื่นกระแทกตั้งฉากจะอยู่ที่ระนาบทางออกของหัวพ่นเมื่อความดัน ณ ทางออกของหัวพ่นมีค่าลดลงจนเท่ากับ P_E ในกรณีนี้จะสามารถประมาณเป็นกระบวนการ Isentropic ได้ แต่อย่างไรก็ตามความเร็วจะลดลงจนต่ำกว่าเสียงเมื่อของไหลไหลออกจากหัวพ่น (เนื่องจากตำแหน่งของคลื่นกระแทกตั้งฉากอยู่ ณ ระนาบ ทางออกของหัวพ่นในกรณีที่ความดันทางออกเท่ากับ P_E)

4. เมื่อความดันทางออกลดลงจนต่ำกว่า P_E การไหลภายในหัวพ่นหลังจากผ่านคอคอดจะเป็นความเร็วเหนือเสียงจนออกจากหัวพ่น และสามารถประมาณได้ว่าเป็นกระบวนการ Isentropic เมื่อความดันทางออกมีค่าเท่ากับ P_F จะเกิด Expansion waves ณ ตำแหน่งทางออกของหัวพ่น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Oblique Shock

2.4 Computational Fluid dynamics (CFD)

การจำลองการไหลเชิงตัวเลขอธิบายการไหลและกระบวนการผสมกันภายในอีเจ็คเตอร์ ผลลัพธ์จากการจำลองในโปรแกรมสามารถเชื่อถือได้เทียบเท่ากับผลลัพธ์จากการทดลองจริง ซึ่งเทคนิค CFD นี้สามารถนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบอเจ็คเตอร์ได้

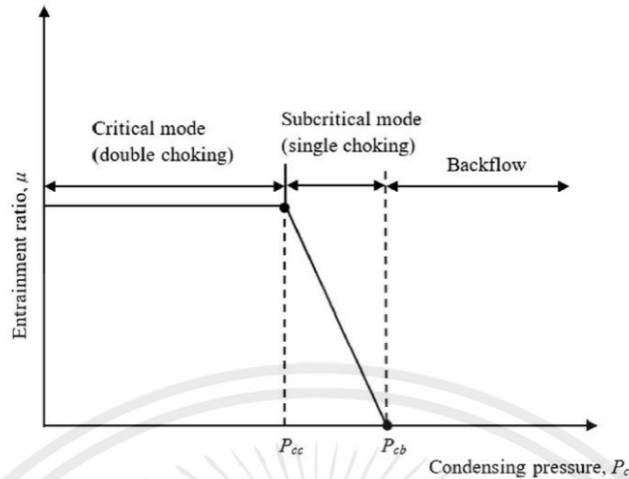
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพในการทำงานที่โหมดวิกฤต (Critical model) การสร้างแบบจำลองการทำงานในภาวะที่ต่ำกว่าจุดวิกฤตและหาเงื่อนไขที่ระบบไม่สามารถทำงานได้ (Breakdown condition) พร้อมทั้งหาค่าประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์เพื่อเพิ่มความแม่นยำของแบบจำลอง

2.4.1 Ejector model

ในกระบวนการผสมระหว่างของไหลปฐมภูมิและทุติยภูมิ ความเร็วของของไหลปฐมภูมิลดลงเนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างของไหลปฐมภูมิและของไหลทุติยภูมิ ในขณะที่เดียวกันความเร็วของของไหลทุติยภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น และเพื่อให้ของไหลผสมมีค่าความดันรวมคงที่จึงมีสมมติฐานดังนี้

- i. ของไหลในอีเจ็คเตอร์เป็นแก๊สอุดมคติ และค่าความจุความร้อนจำเพาะไม่แปรผันตามอุณหภูมิ
- ii. การไหลอยู่ในสภาวะคงตัวและเป็นหนึ่งมิติตลอดทั้งระบบ
- iii. อีเจ็คเตอร์ไม่มีการถ่ายเทความร้อนเข้าหรือออกจากระบบ เนื่องจากของไหลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ทำให้เวลาในการถ่ายเทพลังงานความร้อนมีน้อย
- iv. ของไหลอยู่ในสภาวะอิมพัลส์
- v. ความเร็วก่อนเข้าหัวพ่น Supersonic มีค่าเป็นศูนย์ เมื่อเทียบกับความเร็วที่ออกจากหัวพ่น
- vi. ในแต่ละช่วงของอีเจ็คเตอร์ของระบบทำความเย็นเป็นปริมาตรควบคุม การทำงานของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ ในช่วงการทำงานแบบวิกฤตค่า Entrainment Ratio มีค่าคงที่ และ Condensing Pressure มีค่าต่ำกว่า Critical Condensing Pressure
- vii. ในการทำงานแบบ Subcritical ค่า Condensing Pressure จะอยู่ระหว่าง Critical Condensing Pressure และ Breakdown Pressure
- viii. ในการทำงานแบบ Subcritical ค่า Entrainment Ratio จะลดลงเมื่อ Condensing Pressure สูงขึ้นจนเป็นศูนย์ นั่นคือเกิดการไหลย้อนกลับของสารทำงาน



รูปที่ 2.8 แสดงช่วงการทำงานของ Ejector

2.4.2 การทำงานในสภาวะวิกฤต (Critical mode of operation)

ในการทำงานในสภาวะวิกฤต เกิดการไหลแบบ Choked และใช้ Isentropic Flow ในการหาประสิทธิภาพอัตราการไหลของของไหลปฐมภูมิที่ไหลผ่านหัวพ่นสามารถหาได้จากสมการ

$$\dot{m}_p = P_g \frac{A_t}{\sqrt{T_g}} \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \sqrt{\eta_p} \quad 2.22$$

เลขมัคที่ตำแหน่งที่ทางออกหัวพ่น (M_{p1}) และความมันที่ทางออกจากหัวพ่นจากความสัมพันธ์แบบ Isentropic

$$\left(\frac{A_{p1}}{A_t} \right)^2 \approx \frac{1}{M_{p1}^2} \left(\frac{2}{k+1} \left(1 + \frac{k-1}{2} M_{p1}^2 \right) \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \quad 2.23$$

$$\frac{P_p}{P_{p1}} \approx \left(1 + \frac{k-1}{2} M_{p1}^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad 2.24$$

เลขมัคของของไหลปฐมภูมิที่ตำแหน่งทางเข้าที่อสมหน้าตัดคงที่ (M_{2p}) และความดันต่ำ ตำแหน่งหน้าตัดคงที่

$$\frac{P_{2p}}{P_{1p}} \approx \frac{\left(1 + \frac{(k-1)}{2} M_{p1}^2 \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}{\left(1 + \frac{(k-1)}{2} M_{p2}^2 \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad 2.25$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางของการไหลของของไหลปฐุมุมุมิที่ตำแหน่งหน้าตัดคงที่ (A_{2p}) หาได้จาก

$$\frac{A_{2p}}{A_{1p}} \approx \frac{\left(\frac{\phi_p}{M_{2p}}\right) \left(\left(\frac{2}{k+1}\right) \left(1 + \frac{(k-1)}{2} M_{2p}^2\right)\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}}{\left(\frac{1}{M_{1p}}\right) \left(\left(\frac{2}{k+1}\right) \left(1 + \frac{(k-1)}{2} M_{1p}^2\right)\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}} \quad 2.26$$

ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสีย ถูกนำมาคิดในช่วงของไหลปฐุมุมุมิ ความสูญเสียนี้เกิดจากความหนืดของของไหลปฐุมุมุมิ และ ของไหลทุติยภูมิที่ Boundary การไหลที่ไหลเข้าสู่ท่อผสมได้ถูกตั้งสมมติฐานว่าเกิดการ Choked ดังนั้นเลขมัคของ ของไหลทุติยภูมิจึงเท่ากับ 1 ความดันของของไหลทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 2 ซึ่งหาได้จาก

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

อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิสามารถคำนวณได้ โดยกำหนดให้ท่อผสมหน้าตัดคงที่

$$\dot{m}_s = P_e \frac{A_{2s}}{\sqrt{T_e}} \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \sqrt{\eta_s}} \quad 2.28$$

η_s คือ Isentropic Efficiency สำหรับการสูญเสียการดูดของของไหลทุติยภูมิพื้นที่หน้าตัดที่ตำแหน่ง 2 คือ A_3 ซึ่งผลรวมของพื้นที่คือ

$$A_{2p} + A_{2s} = A_3 \quad 2.29$$

ที่ท่อผสม อุณหภูมิและเลขมัคของของไหลปฐุมุมุมิและของไหลทุติยภูมิสามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{T_g}{T_{2p}} = 1 + \frac{(k-1)}{2} M_{2p}^2 \quad 2.30$$

$$\frac{T_e}{T_{2s}} = 1 + \frac{(k-1)}{2} M_{2s}^2 \quad 2.31$$

เมื่อของไหลทั้งสองผสมกันแล้วตามกฎการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัมจะได้ว่า

$$\phi_m (\dot{m}_p u_{2p} + \dot{m}_s u_{2s}) = (\dot{m}_p + \dot{m}_s) u_m \quad 2.32$$

u_{2p} และ u_{2s} คือความเร็วของไหลปฐมภูมิ และความเร็วของของไหลทุติยภูมิตามลำดับ u_m คือความเร็วของของไหลที่ถูกลมผสม ϕ_m คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการอนุรักษ์พลังงานได้ดังนี้

$$\dot{m}_p \left(C_p T_{2p} + \frac{u_{2p}^2}{2} \right) + \dot{m}_s \left(C_p T_{2s} + \frac{u_{2s}^2}{2} \right) = (\dot{m}_p + \dot{m}_s) \left(C_p T_m + \frac{u_m^2}{2} \right) \quad 2.33$$

ความเร็วในท่อผสมหาได้จาก

$$u_{2p} = M_{2p} v_{2p} \quad 2.34$$

v_{2p} คือความเร็วเสียงที่อุณหภูมิ T_{2p} และสามารถหาได้จาก

$$v_{2p} = \sqrt{kRT_{2p}} \quad 2.35$$

สำหรับความเร็วทุติยภูมิสามารถหาได้ในทำนองเดียวกัน หลังจากของไหลได้ผสมกันแล้ว เกิดคลื่นกระแทกและความดันเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันคำนวณได้จาก

$$\frac{P_3}{P_m} = 1 + \frac{2k}{k+1} (M_m^2 - 1) \quad 2.36$$

เลขมัคที่ทางเข้า Diffuser หาได้จาก

$$M_3^2 = \frac{1 + \frac{(k-1)}{2} M_m^2}{k M_m^2 - \frac{(k-1)}{2}} \quad 2.37$$

การไหลผ่าน Diffuser เป็นการไหลแบบ isentropic สามารถหาความดันควบนานวิฤตได้จากสมการ

$$\frac{P_{con}}{P_3} \approx \left(1 + \frac{k-1}{2} M_3^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad 2.38$$

ประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นภายใต้การทำงานแบบวิฤต สามารถหาได้จาก *Entrainment Ratio*, R_m

$$R_{m,con} = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_p} \quad 2.39$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 การทำงานภายใต้สภาวะต่ำกว่าสภาวะวิกฤต (Subcritical mode of operation)

Entrainment Ratio มีค่าคงที่ในการทำงานที่ภาวะวิกฤต (Critical Condensing Pressure) ประสิทธิภาพจะเริ่มลดลงจนถึงสภาวะที่ระบบไม่สามารถทำงานได้ ในช่วงระหว่าง Critical mode และ Subcritical mode จะลดลงเท่ากับศูนย์

ความสัมพันธ์ระหว่างความดันของของไหลปฐมภูมิ และเลขมัคที่ทางเข้าที่ผสมหน้าตัดคงที่สามารถหาได้ โดย

$$\frac{P_g}{P_{xp}} \approx \left(1 + \frac{k-1}{2} M_{xp}^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad 2.40$$

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

ที่จุด Breakdown ค่า Entrainment Ratio เป็นศูนย์แสดงว่าไม่มีของไหลทุติยภูมิถูกดูดเข้าสู่ Ejector ดังนั้นอัตราการไหลของมวลของของไหลทุติยภูมิเท่ากับศูนย์ และที่หน้าตัด $x-x$ มีความดันเท่ากับความดันของเครื่องระเหย ($P_{xp} = P_e$)

$$P_{xp} = P_{xs} = P_e \quad 2.41$$

อุณหภูมิและความเร็วของของไหลปฐมภูมิที่หน้าตัด $x-x$ คำนวณได้จาก

$$\frac{T_g}{T_{xp}} = 1 + \frac{k-1}{2} M_{xp}^2 \quad 2.42$$

และ

$$u_{xp} = M_{xp} \sqrt{kRT_{xp}} \quad 2.43$$

ภายใต้การทำงานในสภาวะ Subcritical และ Breakdown Pressure จากการอนุรักษ์โมเมนตัม จะได้ว่า

$$\Phi_{mp} (\dot{m}_p u_{xp} + \dot{m}_s u_{xs}) = (\dot{m}_p + \dot{m}_s) u_{m2} \quad 2.44$$

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

$$\dot{m}_p \left(C_p T_{xp} + \frac{u_{xp}^2}{2} \right) + \dot{m}_s \left(C_p T_{xp} + \frac{u_{xp}^2}{2} \right) = (\dot{m}_p + \dot{m}_s) \left(C_p T_{m2} + \frac{u_{m2}^2}{2} \right) \quad 2.45$$

ที่หน้าตัด $m-m$

$$u_{m2} = M_{m2} \sqrt{kRT_{m2}} \quad 2.46$$

จากหน้าตัด $m-m$ ไปทางเข้า Diffuser

$$\frac{P_{32}}{P_{m2}} = 1 + \frac{2k}{k+1} (M_{m2}^2 - 1) \quad 2.47$$

และ

$$M_{32}^2 = \frac{1 + \frac{k-1}{2} M_{m2}^2}{k M_{m2}^2 - \frac{k-1}{2}} \quad 2.48$$

ที่ทางออกของ Diffuser ความดัน breakdown, P_{cb} มีค่าเท่ากับ

$$\frac{P_{cb}}{P_{32}} \approx \left(1 + \frac{k-1}{2} M_{32}^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad 2.49$$

โดยตัวห้อย 2 เพื่อแสดงถึงความแตกต่างจากเทอมในการทำงานในสภาวะวิกฤต

2.4.4 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of performance)

Coefficient of performance (COP) ของระบบทำความเย็นแบบ Ejector

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g + \dot{W}_p} \quad 2.50$$

โดย ความสามารถในการทำความเย็นเท่ากับ

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_s (h_{eo} - h_{ei}) \quad 2.51$$

h_{eo} และ h_{ei} คือเอนทัลปีขาออกและขาเข้าเครื่องระเหยตามลำดับอัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องกำเนิดไอเท่ากับ

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_p (h_{go} - h_{gi}) \quad 2.52$$

h_{go} และ h_{gi} คือเอนทัลปีขาออกและขาเข้าของเครื่องกำเนิดไอ งานของ pump เท่ากับ

$$\dot{W}_p = \dot{m}_p (h_{gi} - h_{co}) \quad 2.53$$

โดย h_{co} คือเอนทัลปี ณ ทางออกของเครื่องควบแน่นจะได้

$$COP = R_m \frac{(h_{eo} - h_{ei})}{(h_{go} - h_{co})} \quad 2.54$$

2.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในโปรแกรมการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ANSYS (FLUENT)

2.5.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการไหล

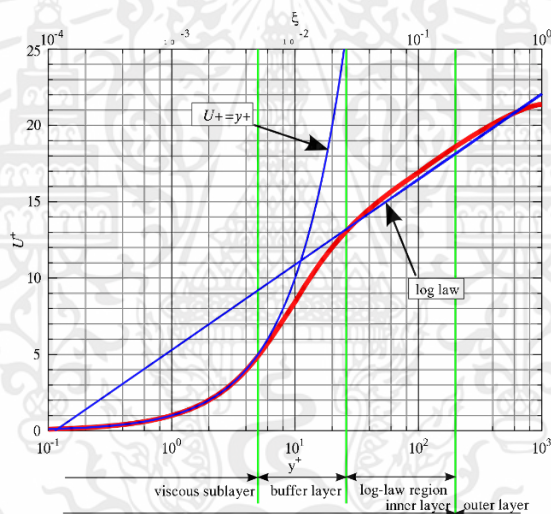
ของไหล คือ สสารที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมีความเค้นเฉือนมากระทำ สสารจะเกิดการเคลื่อนที่และการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง สถานะของของไหลได้แก่ของเหลวและก๊าซ ของเหลวเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้หรืออัดตัวได้ภายใต้สภาวะที่มีความดันสูง ส่วนก๊าซเป็นของไหลที่อัดตัวได้ ของไหลที่อัดตัวได้เป็นของไหลที่มีความหนาแน่นไม่คงที่ ความหนาแน่นขึ้นอยู่กับหลายๆตัวแปร โดยในงานวิจัยนี้เราจะใช้ก๊าซ ซึ่งเป็นของไหลอัดตัวได้

2.5.2 การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน

การไหลแบบราบเรียบและปั่นป่วนขึ้นอยู่กับความเร็วของของไหลเป็นหลักโดยที่ความเร็วของการไหลต่ำจะทำให้ของไหลไหลแบบราบเรียบ แต่ถ้าความเร็วสูงจะทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน ปัจจัยที่ส่งผลต่อรูปแบบการไหลอื่นๆ เช่น ถ้าของไหลมีความหนืดสูง มักจะเกิดการไหลราบเรียบเพราะแรงต้านความเร็วในการไหลน้อย ในงานวิจัยนี้จะเน้นไปที่การไหลแบบปั่นป่วนเป็นหลัก เนื่องจากพฤติกรรมของของไหลภายใน Ejector นั้นมักเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง และเนื่องจากสสารที่อยู่ใน Ejector มีสถานะเป็นก๊าซมีความหนืดต่ำ

2.5.3 The universal law of the wall

ในกลศาสตร์ของไหล กฎสากลของขอบผนังคือกฎที่กล่าวว่า ค่าของความเร็วเฉลี่ย ณ จุดๆหนึ่ง อันเนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วน เป็นสัดส่วนโดยตรงกับฟังก์ชันลอการิทึมของระยะห่างจากขอบผนังของจุดนั้นๆ หรือรู้จักกันในอีกชื่อหนึ่งว่าขอบเขตของการไหลของของไหล



รูปที่ 2.9 The universal law of wall

2.5.4 สูตรลอการิทึมทั่วไป

สูตรลอการิทึมทั่วไป (General logarithm formulation) สำหรับกฎสากลของขอบผนัง (The universal law of wall) ประกอบไปด้วยสูตร สมการต่างๆ ดังนี้

u plus

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad 2.55$$

โดยที่ u^+ คือความเร็วไร้มิติ

u คือ ความเร็วที่ขนานกับผนัง

u_τ คือ friction velocity

y plus

$$y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu} \quad 2.56$$

โดยที่ y^+ คือ พิกัดของผนัง (dimensionless)

y คือระยะห่างผนัง

u_τ คือ friction velocity

ν คือ kinematic viscosity

2.5.5 การคำนวณของไหลด้วยเทคนิคการคำนวณแบบพลศาสตร์

การคำนวณเพื่อศึกษาและแก้ไขปัญหาของของไหลโดยวิธีการจำลองพฤติกรรมของไหลของของไหลที่ไม่สามารถศึกษาได้ด้วยการสังเกตและการมองเห็น โดยใช้สมการพื้นฐานของวิธีการเชิงตัวเลข (Principle numerical method) ในการคำนวณเพื่อเปลี่ยนจากสมการควบคุมของการไหลของของไหลซึ่งประกอบด้วยสมการการไหลของนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equation) ในรูปแบบของการอนุรักษ์พลังงานสมการการต่อเนื่องและสมการการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมไปเป็นสมการทางพีชคณิต เพื่อหาผลลัพธ์ของสมการด้วยวิธีการเชิงตัวเลขทำได้โดยวิธีการจำกัดเชิงปริมาตร โดยทั่วไปการคำนวณของไหลด้วยเทคนิคคำนวณ

แบบพลศาสตร์จะถูกแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการประมวลผล ขั้นตอนการแก้ไขปัญหาหรือการจำลอง และขั้นตอนการประมวลผล

2.5.6 Reynold Averged Navier-Stokes Simulation

สมการ Reynold Averged Navier-Stokes Simulation เป็นสมการที่ใช้ในการควบคุมปริมาณการไหลเฉลี่ยในช่วงของการไหลปั่นป่วนที่ถูกจำลองและใช้ในโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 2023 โดยประกอบไปด้วย Spalart-Allmaras, k- ϵ , k- ω และ Reynold stress model ซึ่งเป็นหลักพื้นฐานของสมการ Reynold Averged Navier-Stokes Simulation ที่มักใช้การคำนวณของไหลที่มีค่าการไหลขึ้นอยู่กับเวลา

2.5.7 โมเดลจำลองความปั่นป่วนแบบ Realizable k- ω

โมเดลความปั่นป่วนแบบ Realizable k- ω (k- ω -sst) สมการจลน์ของค่าความปั่นป่วน (k) เขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) - \rho u_i' u_j' \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \rho \beta^* k \omega \quad 2.57$$

และสมการอัตราการลดลงของพลังงานจลน์ของค่าความปั่นป่วนจำเพาะ (ω) เขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) - \frac{\alpha}{v_t} \rho u_i' u_j' \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \rho \beta \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad 2.58$$

โดยที่ค่า Eddy viscosity แสดงได้ดังนี้

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \frac{1}{\max\left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{\Omega F_2}{a\omega}\right]} \quad 2.59$$

$$\Omega = \sqrt{\Omega_{ij} \Omega_{ij}} \quad 2.60$$

โดยที่

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad 2.61$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^2) \quad 2.62$$

$$\Phi_2 = \max \left[2 \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho\omega y^2} \right] \quad 2.63$$

2.6 ขั้นตอนการประมวลผล

ขั้นตอนก่อนการประมวลผลเป็นขั้นตอนที่ใช้ในการระบุขอบเขตทางกายภาพของแบบจำลอง ซึ่งขอบเขตทางกายภาพเหล่านั้นจะถูกแบ่งออกเป็นจำนวนเล็กตามความเหมาะสมด้วยวิธีการเลือกจำนวนกริดที่เหมาะสม

โดยปรกติแล้วนั้นขั้นตอนสำคัญที่จะกำหนดทิศทางการไหลของของไหลด้วยการระบุรูปแบบของการไหลของของไหลผ่านหน้าตัดซึ่งมีวิธีการ ดังต่อไปนี้

- i. การสร้างรูปทรงหรือแบบจำลองที่สนใจ ซึ่งเรียกว่าส่วนการคำนวณหลัก
- ii. การสร้างจำนวนกริดที่น้อยที่สุดที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณ ซึ่งสามารถทำได้โดยการเลือกจำนวนกริดที่เหมาะสม
- iii. การเลือกปรากฏการณ์ทางกายภาพและทางเคมีที่จำเป็นสำหรับการคำนวณ
- iv. การเลือกคุณสมบัติของสารทำงาน
- v. การกำหนดค่าและขอบเขตหรือบริเวณที่จะทำการศึกษา

2.7 การเลือกจำนวนกริดที่เหมาะสม

การเลือกจำนวนกริดที่เหมาะสม เป็นวิธีการสำคัญสำหรับการแก้ปัญหาการไหลของของไหลด้วยเทคนิคคำนวณแบบพลศาสตร์ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องและมีความแม่นยำมากที่สุด ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับความแม่นยำของข้อมูลเชิงตัวเลข (numerical result) ที่ได้จากการคำนวณของไหลด้วยเทคนิคคำนวณแบบพลศาสตร์ โดยมีเงื่อนไข และการคำนวณเพื่อหาจำนวนกริดที่เหมาะสม (grid independent) ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ (mathematical formula) ในการคำนวณเพื่อหาผลลัพธ์ดังกล่าว สำหรับใช้ในการจำลองเชิงตัวเลข ด้วยโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 2023

ผลลัพธ์ของการเลือกจำนวนกริดที่เหมาะสมได้จากการคำนวณด้วยสูตรสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งคือจำนวนกริดที่น้อยที่สุดที่ต้องการจำลองเชิงตัวเลข (numerical simulation) สามารถประหยัดเวลาที่ใช้ในการคำนวณของไหลด้วยเทคนิคคำนวณแบบพลศาสตร์และผลลัพธ์ที่ได้ออกมาแล้วยังมีความแม่นยำและมีความสมเหตุสมผล

ค่าความผิดพลาดของข้อมูลเชิงตัวเลข (truncation error, \mathcal{E}) ที่เกิดจากการเลือกจำนวนกริดที่เหมาะสม เกิดจากผลต่างระหว่างค่าผลลัพธ์เชิงตัวเลข ณ ปัจจุบัน (current numerical result, Φ) ดังสมการ

$$\mathcal{E} = \Phi_{grid\ independent} - \Phi \quad 2.64$$

แสดงให้เห็นว่าเมื่อกริดมีจำนวนมากขึ้นค่าความผิดพลาดของข้อมูลเชิงตัวเลขจะมีค่าน้อยลง

2.8 ขั้นตอนหลังกระบวนการประมวลผล

ขั้นตอนหลังกระบวนการประมวลผลเป็นขั้นตอนที่ถัดจากขั้นตอนการแก้ไขปัญหาหรือการจำลอง (solver step or simulation) เพื่อดูผลลัพธ์ที่ต้องการศึกษาซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

- i. การเรียกแสดงแบบจำลองต้นแบบ (domain geometry) หรือแสดงหน้าตาของกริด (grid display)
- ii. พล็อตเวกเตอร์ (vector plot)
- iii. พล็อตคอนทัวร์ (contour plot)
- iv. พล็อตหน้าตัดแบบสองมิติและสามมิติ (2D and 3D surface plot)
- v. การตรวจจับอนุภาค (particle tracking)
- vi. การดูค่าการจัดการต่างๆ เช่น การเคลื่อน (translation) การหมุน (rotation) อัตราส่วน (scaling)
- vii. การปรับแต่งสีของข้อมูลที่ได้หลังจากการคำนวณ (color postscript output)

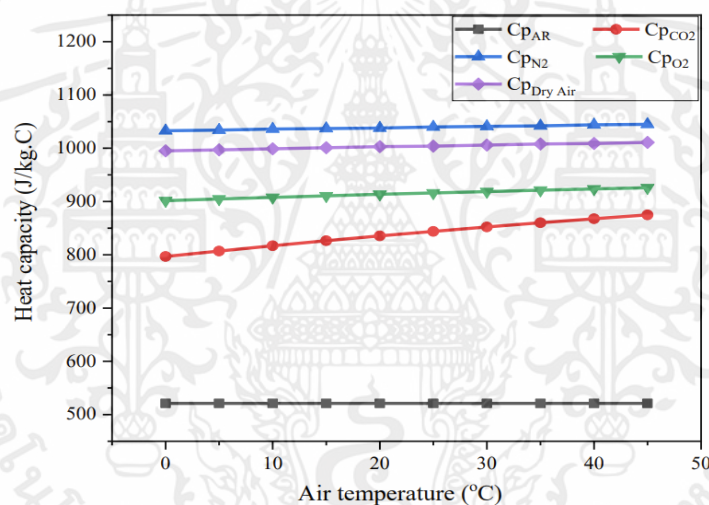
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ผลการทดลองจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้อากาศเป็นสารทำงาน

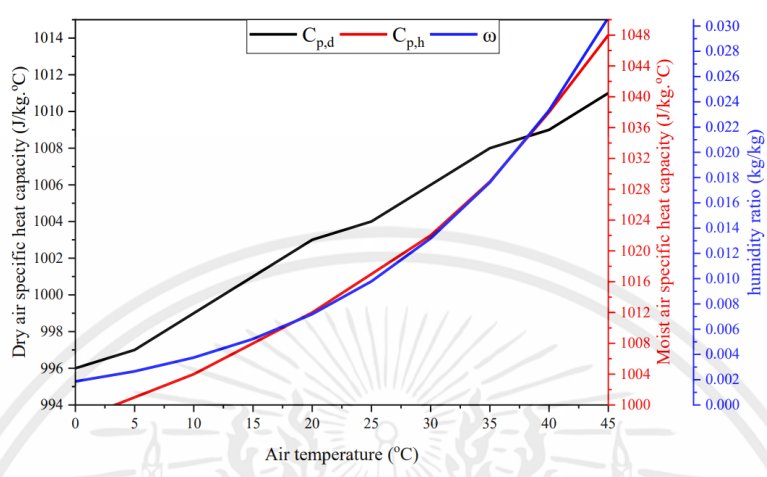
จากงานวิจัยของ Alaa Ahmad Sammour, Oleg V. Komarov, Mohammed A.Qasim และ Ahmad Yousef Saleh 2023 ความจุความร้อนจำเพาะของส่วนประกอบอากาศแห้งจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของอากาศ โดยก๊าซอาร์กอนจะคงที่ที่ $0.521 \text{ kJ/kg}\cdot\text{C}$ ส่วนประกอบ O_2 , CO_2 และ N_2 แสดงความจุความร้อนจำเพาะที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศแห้งเพิ่มขึ้น 5.56%



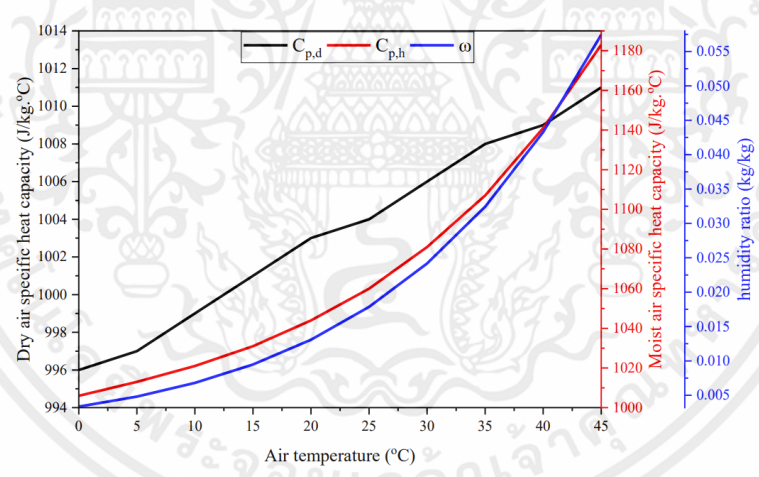
รูปที่ 3.1 ความร้อนสำหรับส่วนประกอบอากาศแห้งที่ความชื้นสัมพัทธ์ 60%

ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศได้รับอิทธิพลอย่างมากจากอากาศแวดล้อมที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 10% และ 90% อุณหภูมิสูงจะเพิ่มค่าจำเพาะของอากาศเนื่องจากความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำที่สูงขึ้น ความชื้นจำเพาะที่สูงขึ้นจะเพิ่มความจุความร้อนของอากาศ ตัวอย่างเช่น เมื่ออุณหภูมิอากาศแวดล้อมเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 45°C ที่ความชื้น 10% ความจุความร้อนจำเพาะจะเพิ่มขึ้น 5.01% ที่ความชื้น 90% ความจุความร้อนจำเพาะเพิ่มขึ้น 17.6% ในขณะที่อัตราส่วนความชื้นเพิ่มขึ้น 16.1% อากาศแห้งไม่ส่งผลต่อความจุความร้อนจำเพาะ

งานเฉพาะของคอมเพรสเซอร์โรงงานระบายความร้อนเป็นส่วนโดยตรงกับค่าเฉพาะของ C_p ซึ่งสามารถลดลงได้โดยการลดอุณหภูมิอากาศ



รูปที่ 3.2 ความร้อนจำเพาะสำหรับอากาศแห้งและชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 10%

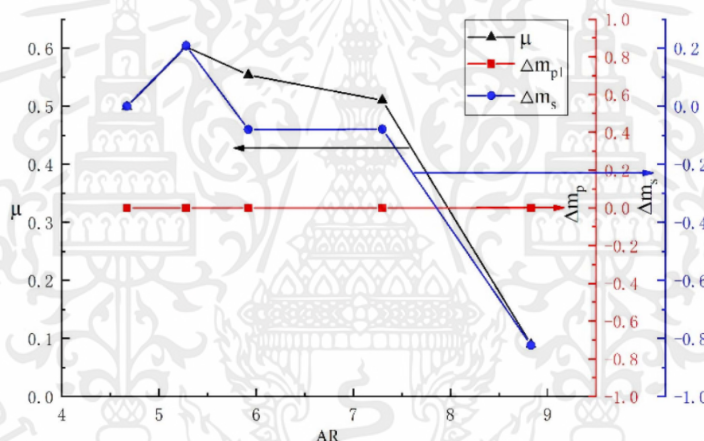


รูปที่ 3.3 ความร้อนจำเพาะสำหรับอากาศแห้งและชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

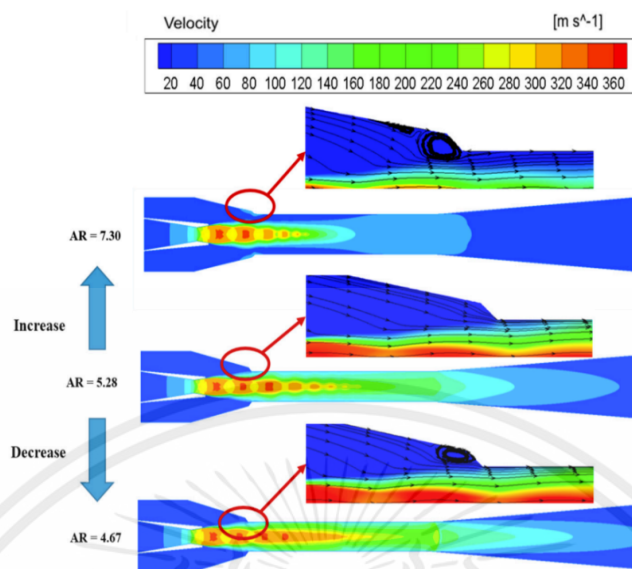
3.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอีเจ็คเตอร์

อิทธิพลของ AR ต่อประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ : อัตราส่วนกักเก็บและอัตราการไหลของมวลของไหลทุติยภูมิได้รับผลกระทบจากอัตราส่วนพื้นที่ อัตราการไหลของมวลของไหลปฐมภูมิยังคงที่ ในขณะที่อัตราการไหลจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนพื้นที่ ที่ 5.28 อัตราการไหลของมวลทุติยภูมิถึงค่าสูงสุด ส่งผลให้อัตราส่วนกักเก็บสูงสุดอยู่ที่ 0.602 อัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของมวลทุติยภูมิจะสูงกว่า 0 เมื่อ AR ต่ำกว่า 5.28 และเป็นลบเมื่อ AR สูงกว่า ทำให้เกิดปรากฏการณ์การไหลย้อนกลับ และลดอัตราการไหลของมวลทุติยภูมิและอัตราส่วนการกักเก็บ อัตราการไหลของมวลของไหลปฐมภูมิได้รับอิทธิพลจากคุณลักษณะของของไหลในหัวฉีด ซึ่งคงที่แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงของ AR ซึ่งบ่งชี้ว่า AR ส่งผลต่ออัตราส่วนการขึ้นรถไฟและอัตราการไหลของมวลทุติยภูมิอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 3.4 ผลกระทบของอัตราส่วนพื้นที่ต่ออัตราส่วนการกักเก็บ

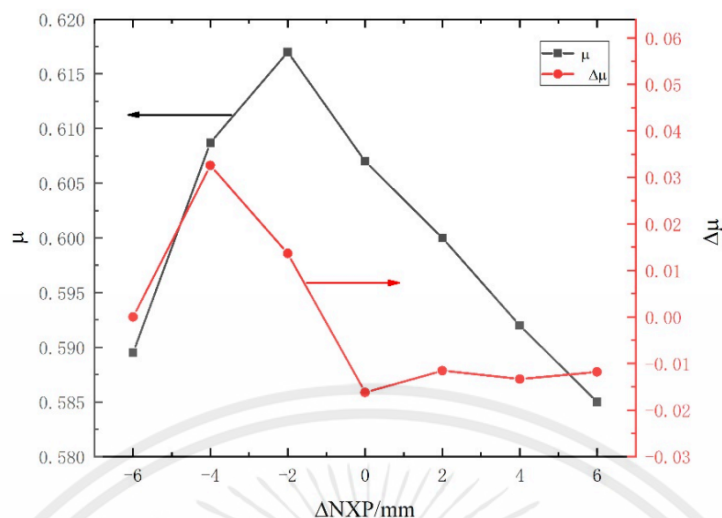
ลักษณะเฉพาะของช่องไหลของอีเจ็คเตอร์จะแตกต่างกันไปตามอัตราส่วนพื้นที่ที่แตกต่างกัน เมื่ออัตราส่วนพื้นที่เพิ่มขึ้น คลื่นกระแทกจะหายไปเป็นส่วนท้ายของห้องผสม ซึ่งบ่งชี้ว่าของไหลหลักจะเปลี่ยนเป็นของไหลทุติยภูมิ เมื่อ AR ต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม พลังงานจลน์ของของไหลปฐมภูมิจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากอัตราการไหลของมวลของไหลทุติยภูมิลดลง ซึ่งส่งผลให้ความเร็วของของไหลผสมเหนือเสียงในห้องผสม เมื่อ AR เท่ากับ 5.28 ของไหลหลักและของไหลรองจะผสมกันอย่างสมบูรณ์ช่วยลดการสูญเสียพลังงานและส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด อย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราส่วนพื้นที่อาจทำให้คลื่นกระแทกหายไปและตัวเป่าทำงานล้มเหลว



รูปที่ 3.5 ปรัชการณการไหลย้อนกลับเป็นปัญหาสำคัญในตัวเป่า ซึ่งพื้นที่การไหลของของไหลทุติยภูมิได้รับ

ผลกระทบจากอัตราส่วนพื้นที่ (AR) พื้นที่การไหลย้อนกลับจะลดลงในช่วงแรกและเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ AR ซึ่งส่งผลต่อกระบวนการผสมของของไหลสองชนิดเป็นหลัก เมื่อ AR เท่ากับ 4.67 แสดงว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องผสมมีขนาดเล็กเกินไป ส่งผลให้ของเหลวหลักเต็มทั้งห้อง และไม่มีพื้นที่เพียงพอสำหรับของไหลทุติยภูมิที่เข้าไปในตัวดีดออก ส่งผลให้ของเหลวไหลย้อนกลับ เมื่อ AR เหมาะสมที่สุด ของไหลทุติยภูมิจะไหลลงสู่พื้นที่ขนาดใหญ่ ช่วยลดความเค้นเฉือนระหว่างของไหลเคลื่อนที่และของไหลที่กักตัวไว้ ดังนั้น AR ที่เหมาะสมที่สุดจึงสามารถจัดการปรากฏการณ์การไหลย้อนกลับและลดการสูญเสียคลื่นกระแทกภายในตัวดีดออกได้

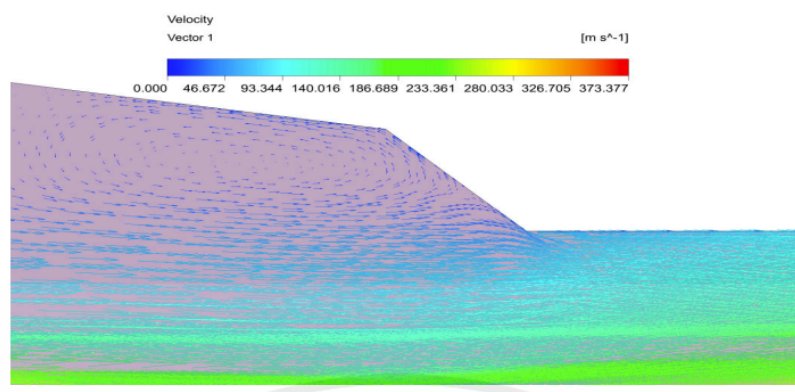
อิทธิพลของ NXP ต่อประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ : อัตราส่วนกักกันซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ จะเพิ่มขึ้นตาม NXP โดยมีอัตราส่วนกักกันเป็นบวกเมื่อ NXP เพิ่มขึ้น และอัตราส่วนกักกันติดลบเมื่อ NXP ลดลง NXP ที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้ประสิทธิภาพลดลงอย่างรวดเร็ว ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของอีเจ็คเตอร์เกิดขึ้นเมื่อ NXP เป็นลบ โดยมีอัตราส่วนการขึ้นสูงสุดที่ 0.617 ส่งผลให้อัตราส่วนการขึ้นรูปแบบดีขึ้น 17.34% เมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้น



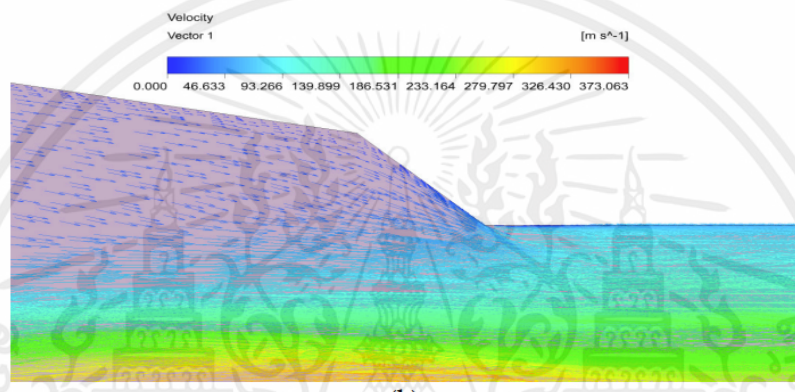
รูปที่ 3.6 ผลกระทบของ NXP ต่อทางเข้าของอีเจ็คเตอร์

บริเวณกระแสน้ำมันในห้องดูดจะหายไปเมื่อค่า NXP สูงกว่าค่าที่เหมาะสม ส่งผลให้เกิดการขยายตัวมากเกินไปในของไหลปฐุมภูมิ ซึ่งส่งผลให้พื้นที่ส่วนสุดท้ายของลำแสงไหลแบบโรโมที่มีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่ทางเข้าของห้องผสม ส่งผลให้พื้นที่การไหลเล็กลงสำหรับของไหลทุติยภูมิในห้องผสมการไหลย้อนกลับนี้ส่งผลให้สูญเสียพลังงานเพิ่มขึ้นภายในตัวเป่า และลดอัตราการไหลของมวลทุติยภูมิลงส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานต่ำ เมื่อ NXP ลดลงระดับการขยายตัวของของไหลทำงานจะค่อยๆปรับและของไหลทุติยภูมิที่กักไว้จะเข้าสู่ห้องผสมโดยไม่มีการไหลย้อนกลับส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

การกระจายความเร็วของของไหลปฐุมภูมิในห้องผสมได้รับผลกระทบจาก NXP ซึ่งส่งผลต่อการขยายตัวของของไหลปฐุมภูมิ เมื่อ NXP น้อยกว่าค่าที่เหมาะสม น้ำมันโรโมที่จะขยายตัวน้อยเกินไป ส่งผลให้แรงดันที่แตกต่างกันระหว่างน้ำมันหลักและของเหลวทุติยภูมิน้อยลง สิ่งนี้นำไปสู่การลดลงของอัตราการไหลของมวลของเหลวทุติยภูมิ ประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ลดลงเนื่องจากการสูญเสียที่ไม่สามารถกลับคืนสภาพเดิมภายในอีเจ็คเตอร์ได้เนื่องจากกระบวนการแบบวนรอบของการขยายการบีบอัดและการขยาย แกนความเร็วจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ NXP ซึ่งบ่งชี้ว่าการขยายตัวของของไหลปฐุมภูมิได้รับผลกระทบจาก NXP เป็นหลัก

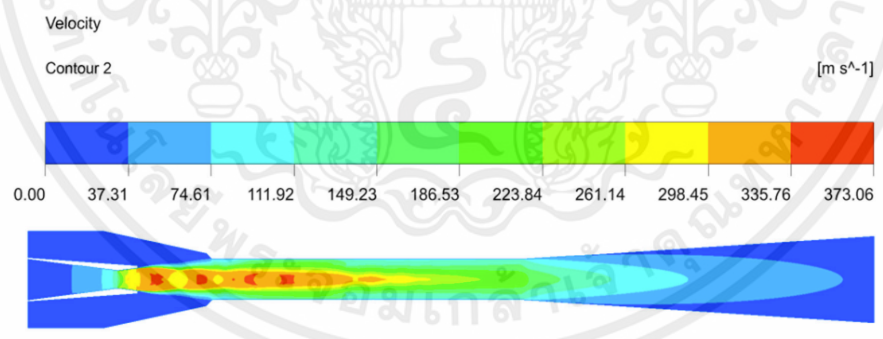


(a)

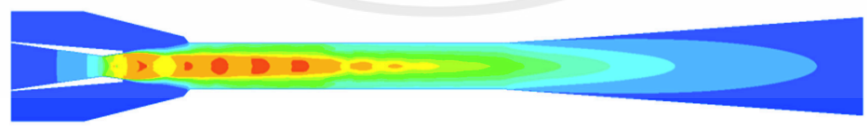


(b)

รูปที่ 3.7 เวกเตอร์ความเร็วในห้องดูด (a) $\Delta NXP = 6$ มม. (b) $\Delta NXP = -2$ มม.



(a)



(b)

รูปที่ 3.8 ผลกระทบของ NXP ต่อสนามความเร็ว (a) $\Delta NXP = -2$ มม. (ข) $\Delta NXP = -6$ มม.

3.2 การสร้างแบบจำลองการทดลองด้วยโปรแกรม ANSYS (FLUENT)

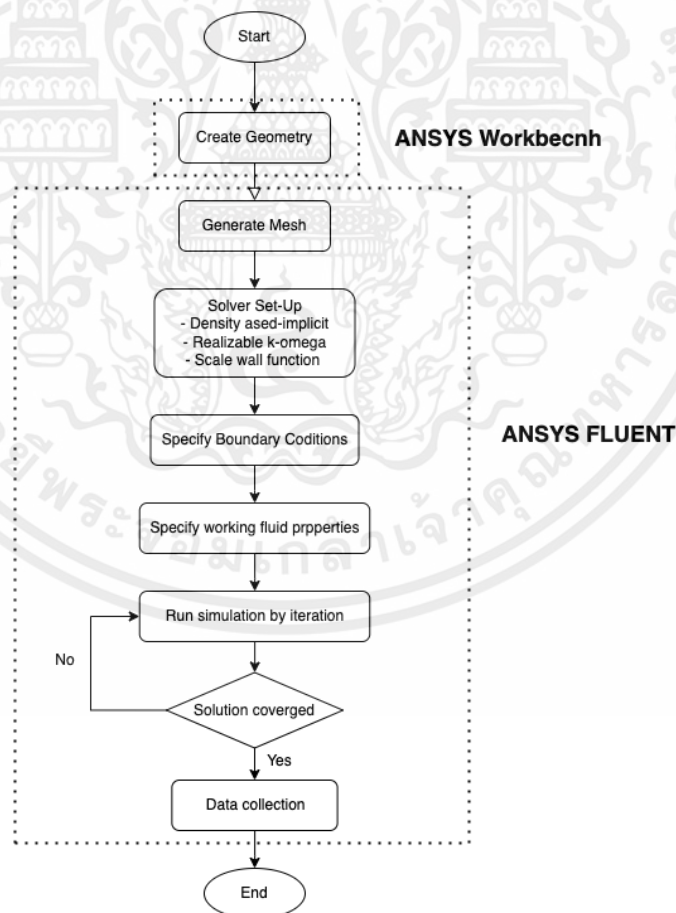
ในงานวิจัยนี้อาศัยการวิเคราะห์การจำลองของสารทำความเย็นที่เคลื่อนที่ภายใน Ejector ซึ่งเราสามารถทำการจำลองการไหลของของไหลได้ด้วยการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม ANSYS(FLUENT) 2023 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของสารทำความเย็นใน Ejector โดยเงื่อนไขการทำงานที่ต่างกัน ซึ่งแบ่งขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

1. การออกแบบเชิงกายภาพ ด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench 2023

โดยเป็นการสร้างแบบจำลองโมเดลของ Ejector ตามแบบที่ได้มาจากการคำนวณ

2. การจำลองการไหลของของไหล ด้วยโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 2023

ด้วยการ Meshing ซึ่งเป็นวิธีการสร้างกริด (grid element) ให้กับแบบจำลองอีเจ็คเตอร์เชิงกายภาพ เมื่อทำโมเดลการทดลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม และทำการเลือกเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) จากนั้นจึงจำลองการไหลด้วยกระบวนการทำซ้ำ (Iteration) จนได้ผลลัพธ์ที่มีแนวโน้มเข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง

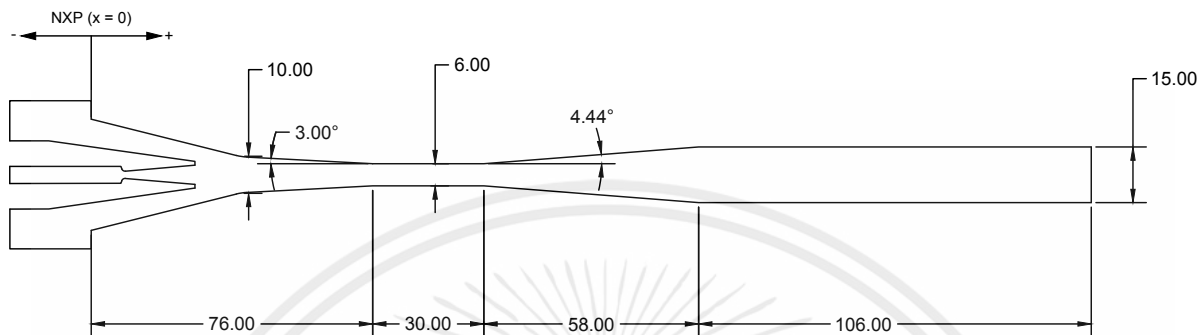


รูปที่ 3.9 Flow Chart for the CFD simulation

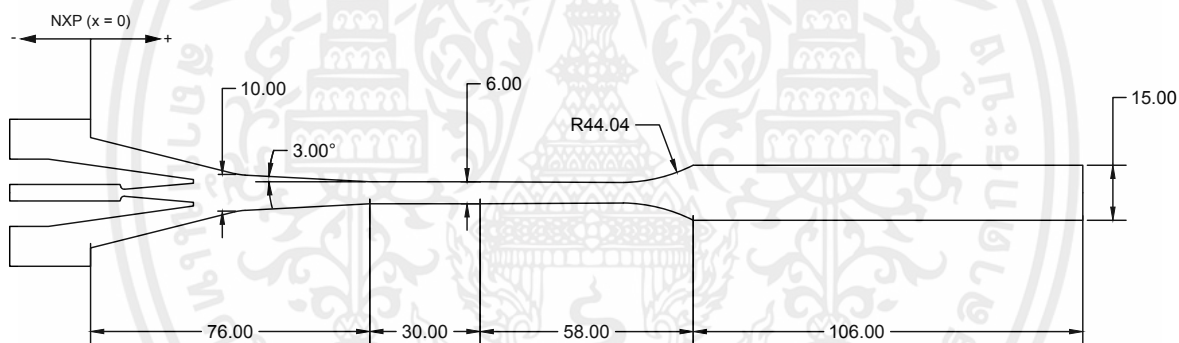
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 การสร้างแบบจำลองเชิงกายภาพ (Geometry)

สำหรับงานวิจัยนี้ ได้ทำการเลือกออกแบบ Ejector ซึ่งถูกสร้างเป็นแบบจำลองที่เป็น 2 มิติ ในหน่วย มิลลิเมตร (mm) และมีรูปร่างสมมาตรตามแนวแกน โดยใช้ขนาด Ejector ที่ได้จากการคำนวณ

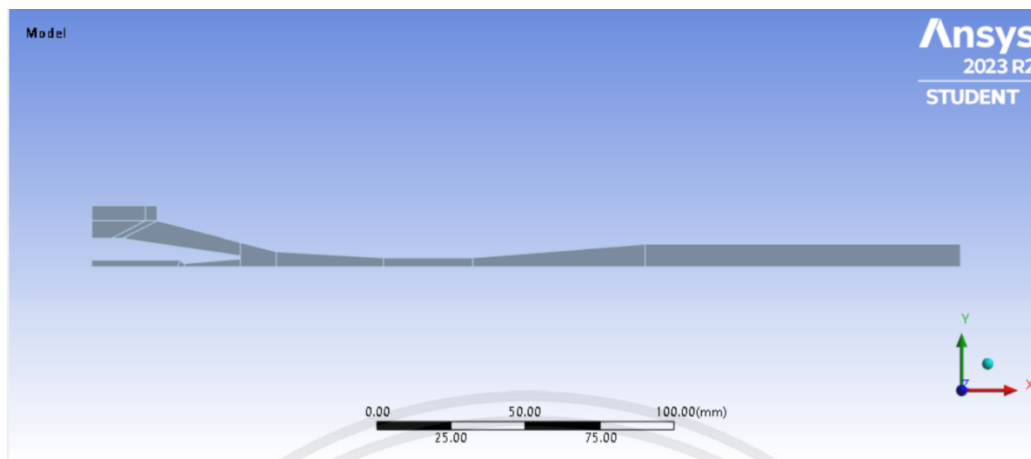


รูปที่ 3.10 CPM Ejector ในหน่วยมิลลิเมตร



รูปที่ 3.11 CRMC Ejector ในหน่วยมิลลิเมตร

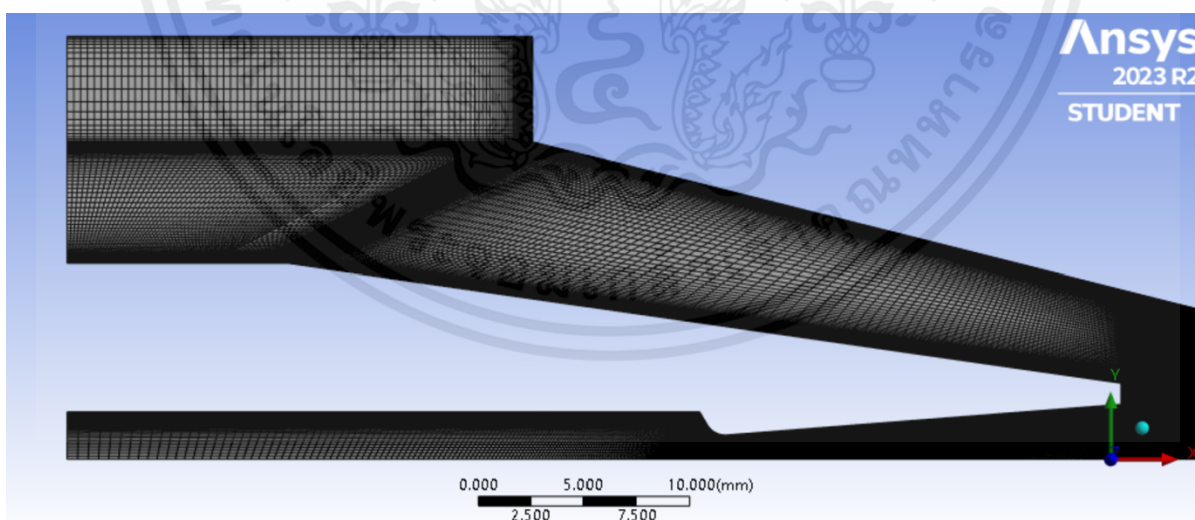
ได้ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองในรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติผลลัพธ์ที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันมาก แต่การประมวลผลของแบบจำลอง 2 มิติ นั้นสามารถทำได้ไวกว่า 3 มิติ และยังลดระยะเวลาในการเขียนแบบอีกด้วย



รูปที่ 3.12 รูปร่างแบบจำลอง 2 มิติ และมีรูปร่างสมมาตรตามแนวแกนของ Ejector

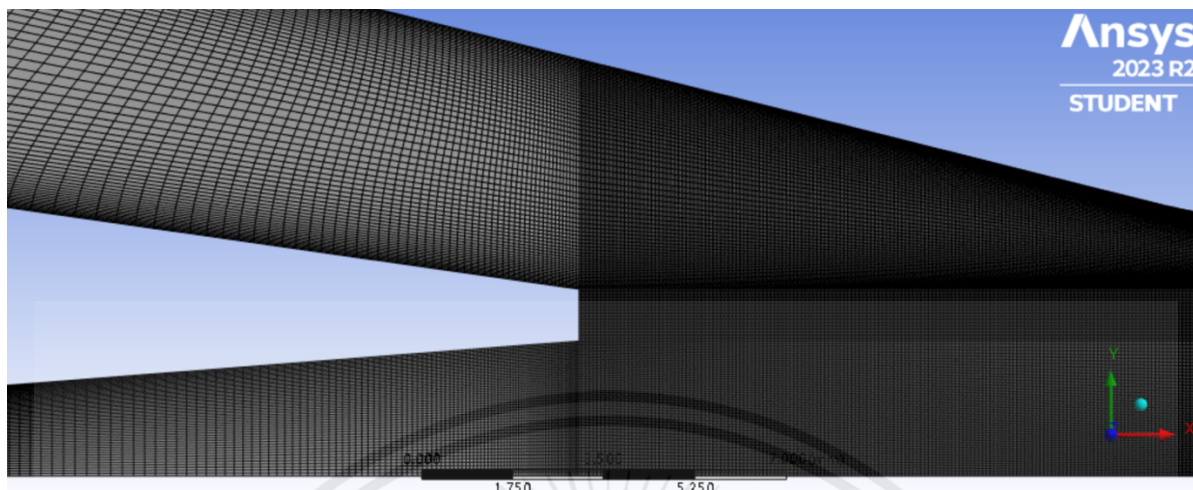
3.2.2 การสร้างเมช (Meshing)

การสร้างเมช คือ การแบ่งชิ้นงานออกเป็นชิ้นส่วนเรขาคณิตเล็กๆ เพื่อให้เราสามารถใช้สูตรคำนวณต่างๆ ที่เรามีอยู่ได้ ดังนั้นจึงทำให้โปรแกรมสามารถวิเคราะห์ที่จุดต่าง ๆ ของสารทำงานได้โดย Mesh 1 ชิ้นจะเรียกว่า Element และในแต่ละ Element จะมีจุด Node ซึ่งเป็นจุดตรงมุมของแต่ละ Element และเป็นจุดที่โปรแกรมใช้คำนวณหาผลลัพธ์ ดังนั้นระยะเวลาการคำนวณในโปรแกรมจะขึ้นอยู่กับจำนวนจุด Node ที่ถูกสร้างขึ้นด้วย โดยการสร้างเมช จะถูกสร้างเป็นรูปสี่เหลี่ยมซึ่งเหมาะกับการจำลองด้านการไหล

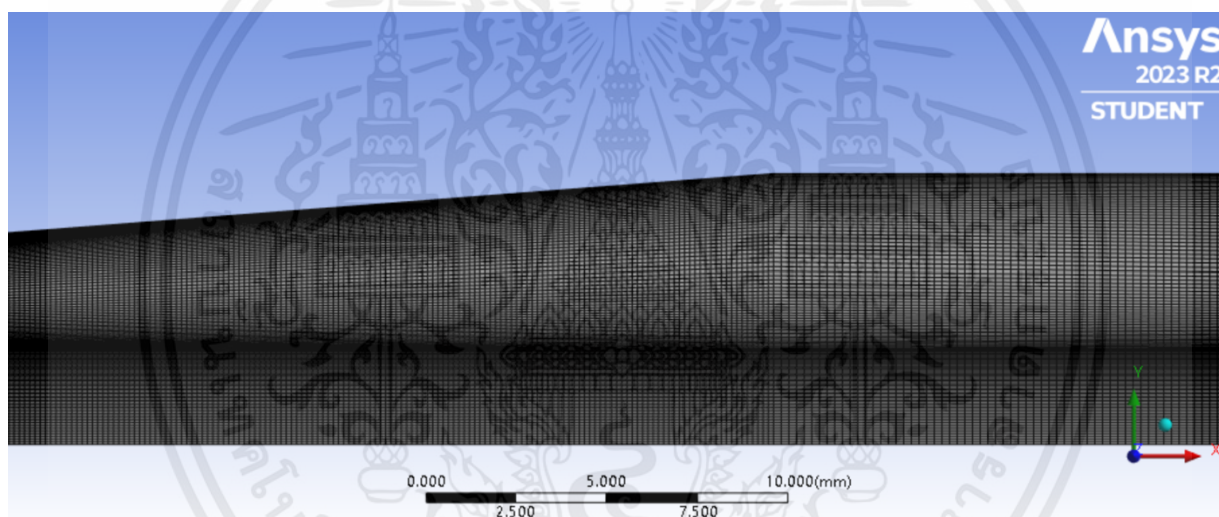


รูปที่ 3.13 Grid ที่บริเวณ Primary Inlet และ Secondary Inlet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 Grid ที่บริเวณทางเชื่อมของของไหล



รูปที่ 3.15 Grid ที่บริเวณ Diffuser

3.2.3 Solver Set-Up

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกใช้ SST k-omega ในการคำนวณหาความเร็วของของไหลในสภาวะปั่นป่วนที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์ เนื่องจากเป็นโมเดลที่ถูกพัฒนาขึ้นจาก k-epsilon และ k-omega ซึ่งสามารถคำนวณเมชที่ไม่ชิดขอบได้ดี และเหมาะสมสำหรับการจำลองการไหลแบบชั้นขีดผิวและขอบเขตที่กว้าง ซึ่งเราได้เลือกโมเดลแบบจำลองแบบ Steady state ซึ่งเป็นการหาค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงในทุกช่วงเวลาเพื่อนำมาคำนวณหาผลลัพธ์ สำหรับการอนุรักษ์โมเมนตัม และยังสามารถเลือกใช้ Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS equations) สำหรับการอนุรักษ์มวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 ขอบเขตและเงื่อนไขการจำลอง

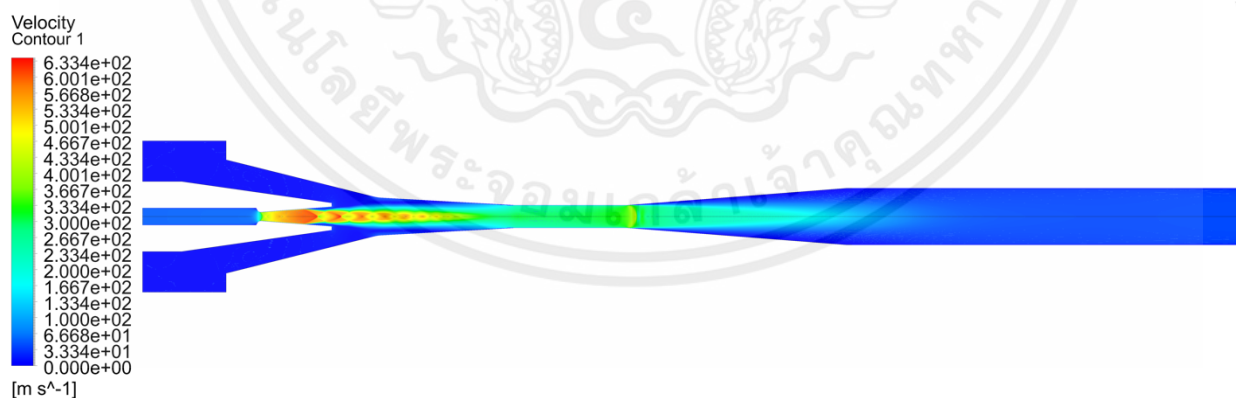
ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดความดันสัมบูรณ์เป็น zero-operating โดยกำหนดอุณหภูมิของของไหลปฐมภูมิที่มาจากเครื่องอัดอากาศมีอุณหภูมิคงที่ 32 องศาเซลเซียส และกำหนดอุณหภูมิของของไหลทุติยภูมิที่มาจากถังสุญญากาศมีอุณหภูมิคงที่ 32 องศาเซลเซียส ความดันจากเครื่องอัดอากาศอยู่ในช่วง 400-700 kPa ความดันจากถังสุญญากาศอยู่ในช่วง 80-88 kPa มีความเข้มข้นของความปั่นป่วน (turbulent intensity) ที่ upstream และ downstream มีค่าเป็นร้อยละ 5 โดยไม่มีการสูญเสียของความร้อนที่บริเวณขอบ ไม่มีการไหล และ heat flux มีค่าเท่ากับ 0

3.2.5 สารทำงานในระบบ

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกสารทำงานในระบบเป็น อากาศ (Air) เนื่องจากเป็นสารธรรมชาติที่มีความปลอดภัยสูง ไม่ต้องสังเคราะห์จึงมีต้นทุนต่ำ ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ไม่เกิดปัญหาก๊าซเรือนกระจก ไม่ทำลายชั้นโอโซน ไม่จำเป็นต้องใช้ความดันสูง และไม่เกิดการควบแน่น แต่มีข้อควรระวังเกี่ยวกับความชื้นสัมพัทธ์ที่จะส่งผลต่อค่า C_p

3.2.6 การหาผลลัพธ์

สามารถทำได้โดยนำขอบเขตเงื่อนไขของการจำลอง (Boundary Conditions) และการคำนวณผ่าน Solver Set-Up ด้วยโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 2023 ซึ่งใช้กระบวนการทำซ้ำ (Iteration) เพื่อคำนวณหาผลลัพธ์ที่ได้ ซึ่งสังเกตได้จากแนวโน้มในการลู่ออกค่าใดค่าหนึ่ง และผลลัพธ์ที่ได้จะสามารถวิเคราะห์ ความเร็ว ความดัน อุณหภูมิ รวมไปถึงอัตราการไหลเชิงมวล เป็นต้น



รูปที่ 3.16 กราฟคอนทัวร์แสดงความเร็วของของไหลภายในอีเจ็คเตอร์

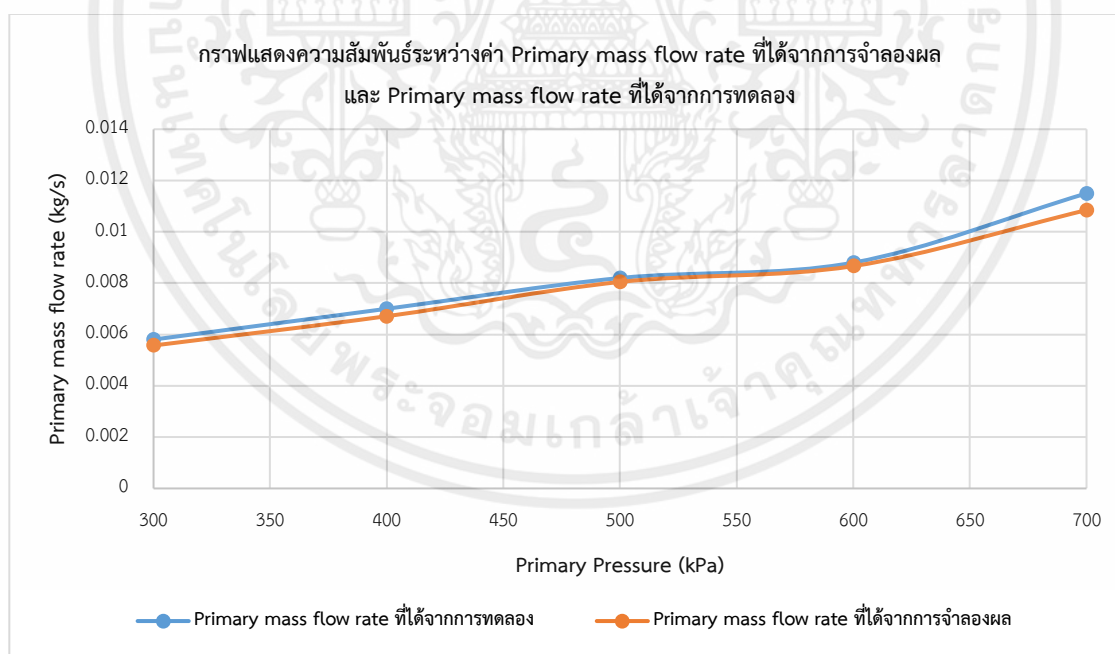
บทที่ 4

ผลการจำลองและวิเคราะห์ผล

4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

Primary Pressure (kPa)	Primary mass flow rate ที่ได้จากการทดลอง (kg/s)	Primary mass flow rate ที่ได้จากการจำลองผล (kg/s)
300	0.0058	0.005568
400	0.007	0.006711
500	0.0082	0.008047
600	0.0088	0.008665
700	0.0115	0.01086

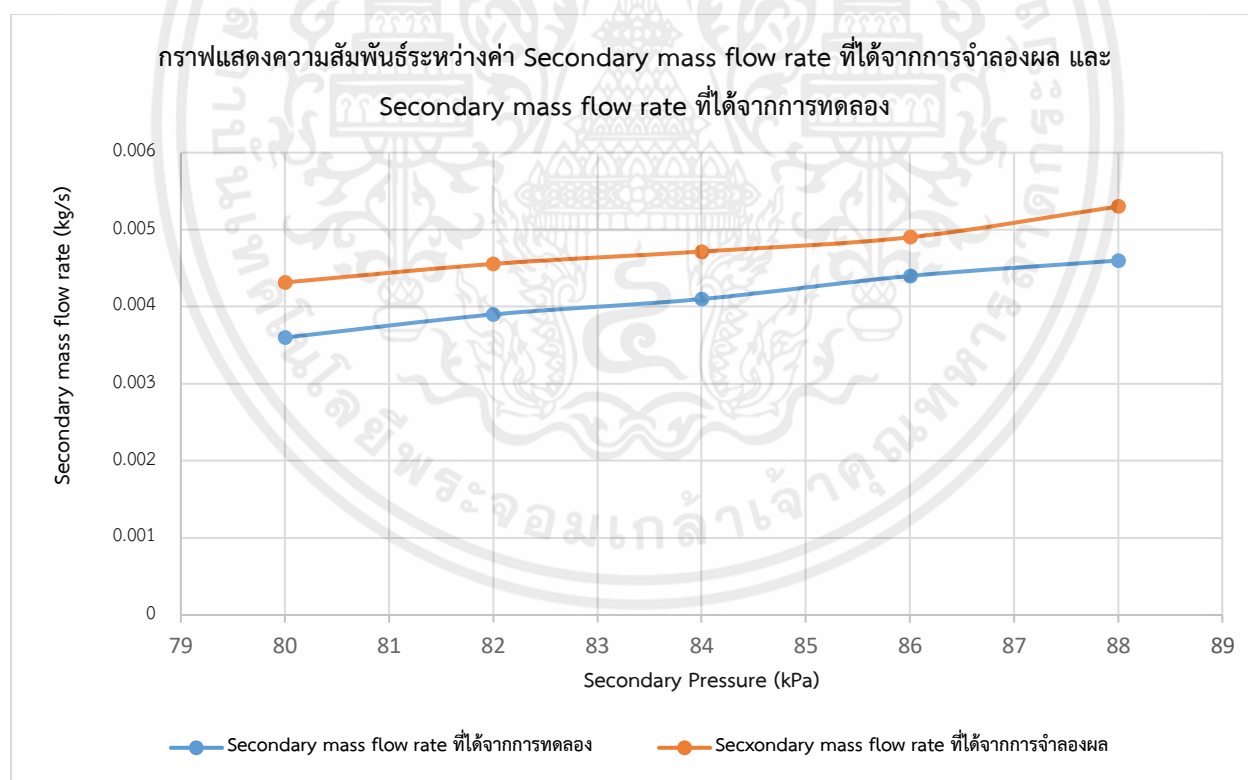
ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบค่า Primary mass flow rate
ที่ได้จากการทดลอง และ Primary mass flow rate ที่ได้จากการจำลองผล



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Primary mass flow rate
ที่ได้จากการทดลอง และ Primary mass flow rate ที่ได้จากการจำลองผล

Pressure Secondary (kPa)	Secondary mass flow rate ที่ได้จากการทดลอง (kg/s)	Secondary mass flow rate ที่ได้จากการจำลองผล (kg/s)
80	0.0036	0.004315
82	0.0039	0.004556
84	0.0041	0.004716
86	0.0044	0.004902
88	0.0046	0.0053013

ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบค่า Secondary mass flow rate
ที่ได้จากการทดลอง และ Secondary mass flow rate ที่ได้จากการจำลองผล



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ค่า Secondary mass flow rate
ที่ได้จากการทดลอง และ Secondary mass flow rate ที่ได้จากการจำลองผล

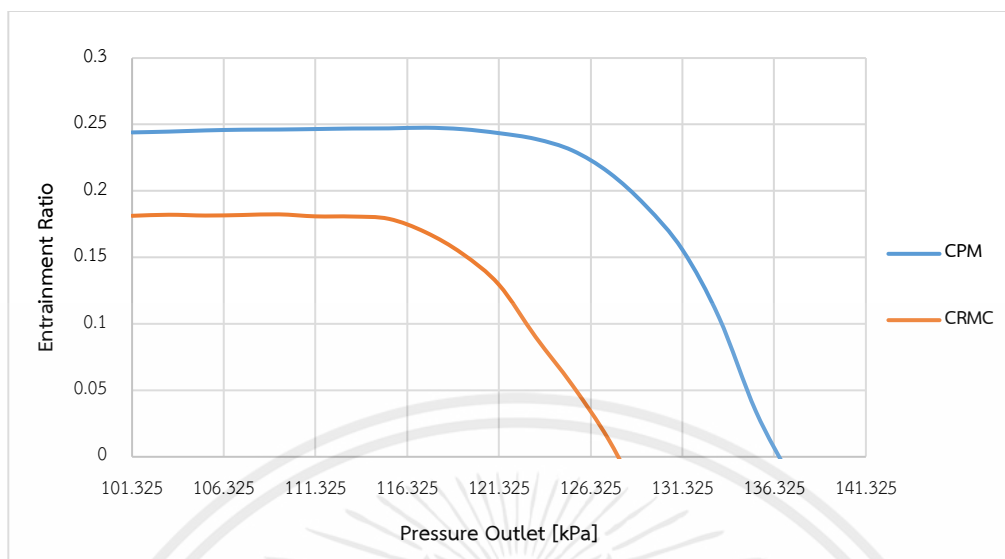
4.2 การเปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงตัวเลข

4.2.1 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไขความดันปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 80 kPa

P_{cri} (kPa)	R_m CPM Ejector	P_{cri} (kPa)	R_m CRMC Ejector
101.325	0.2440	101.325	0.1813
105.325	0.2455	105.325	0.1815
109.325	0.2462	109.325	0.1824
113.325	0.2469	113.325	0.1807
117.325	0.2475	117.325	0.1689
121.325	0.2434	121.325	0.1294
125.325	0.2304	125.325	0.0538
129.325	0.1888	129.325	-0.0402
133.325	0.1046	-	-
137.325	-0.0189	-	-

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไขความดันปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 80 kPa

จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าในช่วงการทำงานแบบวิกฤตค่า Entrainment Ratio ของ CPM Ejector มีค่าเท่ากับ 0.2475 ซึ่งมากกว่าค่า Entrainment Ratio ของ CRMC Ejector ที่มีค่าเท่ากับ 0.1824 ความดันวิกฤติของ CPM Ejector และ CRMC Ejector มีค่าอยู่ที่ 113.325 kPa และ 109.325 ตามลำดับ โดยสามารถแสดงผลเป็นรูปแบบของกราฟดังรูปที่ 4.3



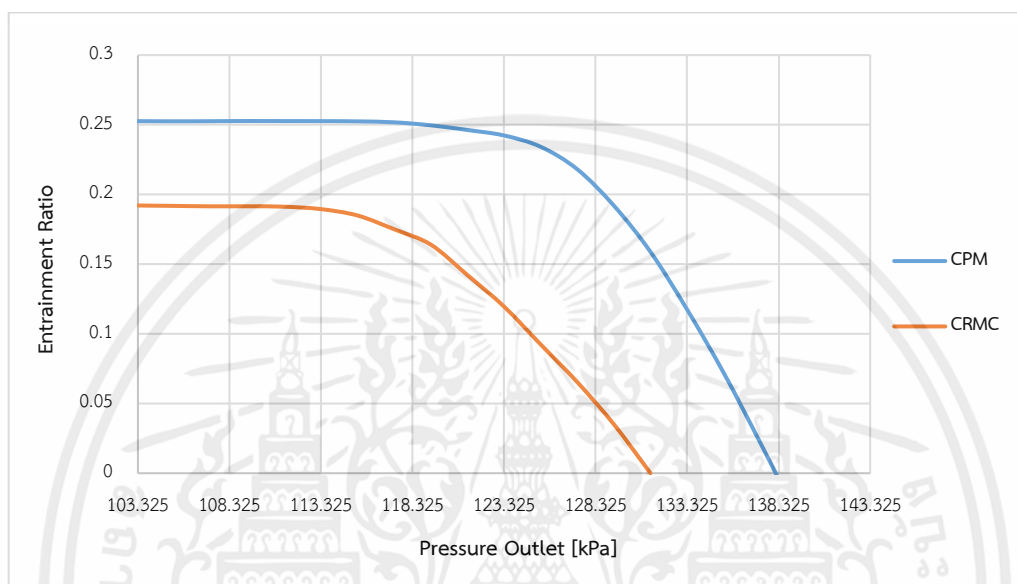
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า R_m และความดันที่ทางออกของอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไขความดันปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 80 kPa

4.2.2 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไขความดันปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 82 kPa

P_{cri} (kPa)	R_m CPM Ejector	P_{cri} (kPa)	R_m CRMC Ejector
103.325	0.2526	103.325	0.1921
107.325	0.2525	107.325	0.1915
111.325	0.2525	111.325	0.1912
115.325	0.2524	115.325	0.1849
119.325	0.2496	119.325	0.1645
123.325	0.2423	123.325	0.1195
127.325	0.2180	127.325	0.0653
131.325	0.1587	131.325	-0.0000952
135.325	0.0718	-	-
139.325	-0.0309	-	-

ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไขความดันปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 82 kPa

จากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าในช่วงการทำงานแบบวิกฤตค่า Entrainment Ratio ของ CPM Ejector มีค่าเท่ากับ 0.2526 ซึ่งมากกว่าค่า Entrainment Ratio ของ CRMC Ejector ที่มีค่าเท่ากับ 0.1921 และค่าความดันวิกฤตของ CPM Ejectors และ CRMC Ejector มีค่าเท่ากันอยู่ที่ 103.325 kPa ตามลำดับ โดยสามารถแสดงผลเป็นรูปแบบของกราฟดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า R_m และความดันที่ทางออกของอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไขความดันปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 82 kPa

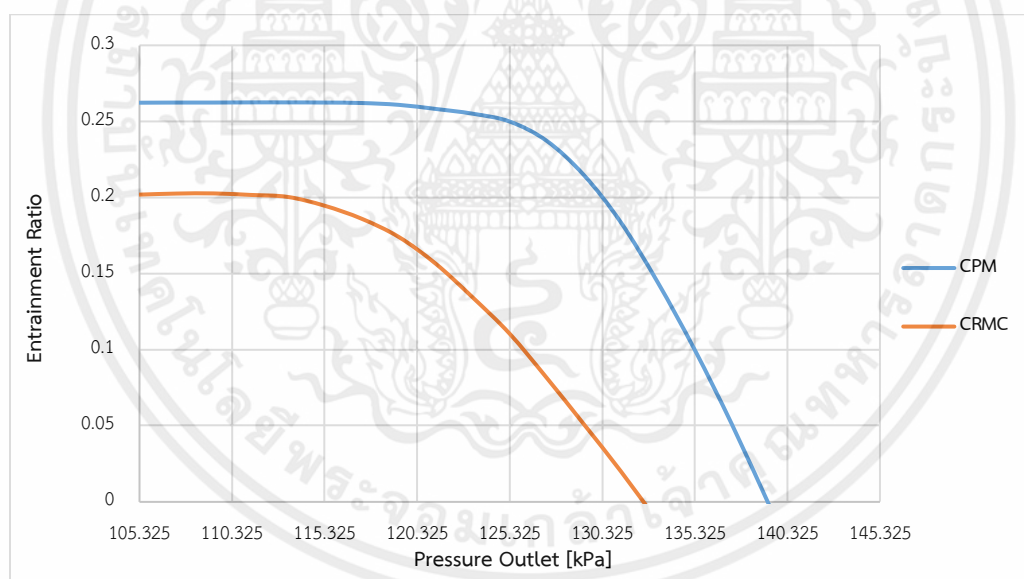
4.2.3 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไขความดันปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 84 kPa

P_{cri} (kPa)	R_m CPM Ejector	P_{cri} (kPa)	R_m CRMC Ejector
105.325	0.2623	105.325	0.2019
109.325	0.2624	109.325	0.2027
113.325	0.2625	113.325	0.1964
117.325	0.2621	117.325	0.1761
121.325	0.2582	121.325	0.1335

125.325	0.2499	125.325	0.0904
129.325	0.2148	129.325	0.03302
133.325	0.1441	133.325	-0.01303
137.325	0.0609	-	-
141.325	-0.001953	-	-

ตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไขความดันปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 84 kPa

จากตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าในช่วงการทำงานแบบวิกฤตค่า Entrainment Ratio ของ CPM Ejector มีค่าเท่ากับ 0.2625 ซึ่งมากกว่าค่า Entrainment Ratio ของ CRMC Ejector ที่มีค่าเท่ากับ 0.2027 ความดันวิกฤตของ CPM Ejector และ CRMC Ejector มีค่าอยู่ที่ 113.325 kPa และ 109.325 ตามลำดับ โดยสามารถแสดงผลเป็นรูปแบบของกราฟดังรูปที่ 4.5



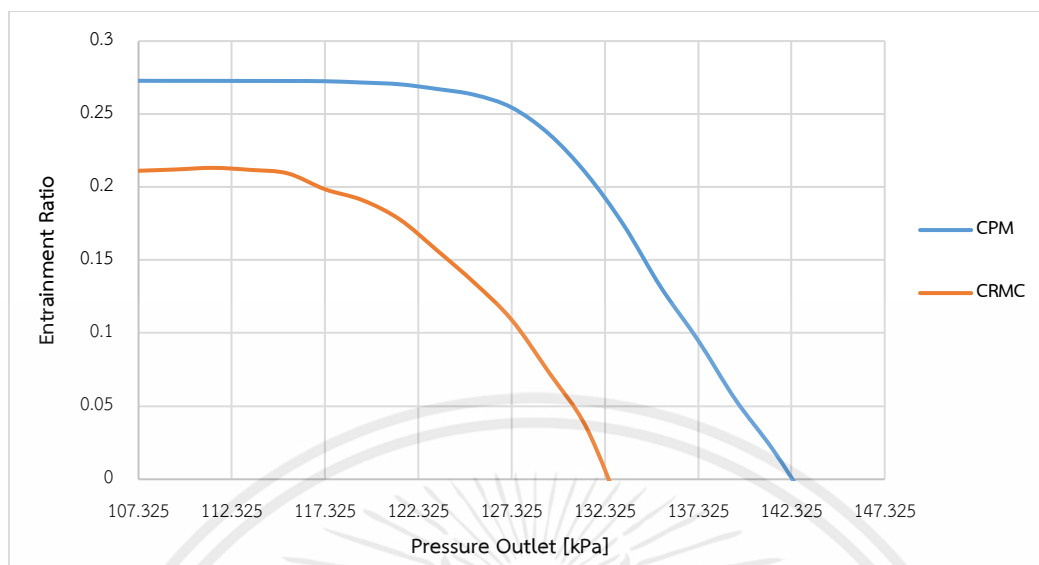
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Rm และความดันที่ทางออกของอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไขความดันปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 84 kPa

4.2.4 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไขความดัน
ปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 86 kPa

P_{cri} (kPa)	R_m CPM Ejector	P_{cri} (kPa)	R_m CRMC Ejector
107.325	0.2728	107.325	0.2112
111.325	0.2727	111.325	0.2132
115.325	0.2726	115.325	0.2094
119.325	0.2716	119.325	0.1911
123.325	0.2672	123.325	0.1567
127.325	0.2545	127.325	0.1091
131.325	0.2093	131.325	0.0355
135.325	0.1314	135.325	-0.0257
139.325	0.03439	-	-
143.325	-0.01892	-	-

ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไข
ความดันปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 86 kPa

จากตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าในช่วงการทำงานแบบวิกฤตค่า Entrainment Ratio ของ CPM Ejector มีค่าเท่ากับ 0.2728 ซึ่งมากกว่าค่า Entrainment Ratio ของ CRMC Ejector ที่มีค่าเท่ากับ 0.2132 ความดันวิกฤตของ CPM Ejector และ CRMC Ejector มีค่าอยู่ที่ 107.325 kPa และ 111.325 ตามลำดับ โดยสามารถแสดงผลเป็นรูปแบบของกราฟดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า R_m และความดันที่ทางออกของอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไขความดันปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 86 kPa

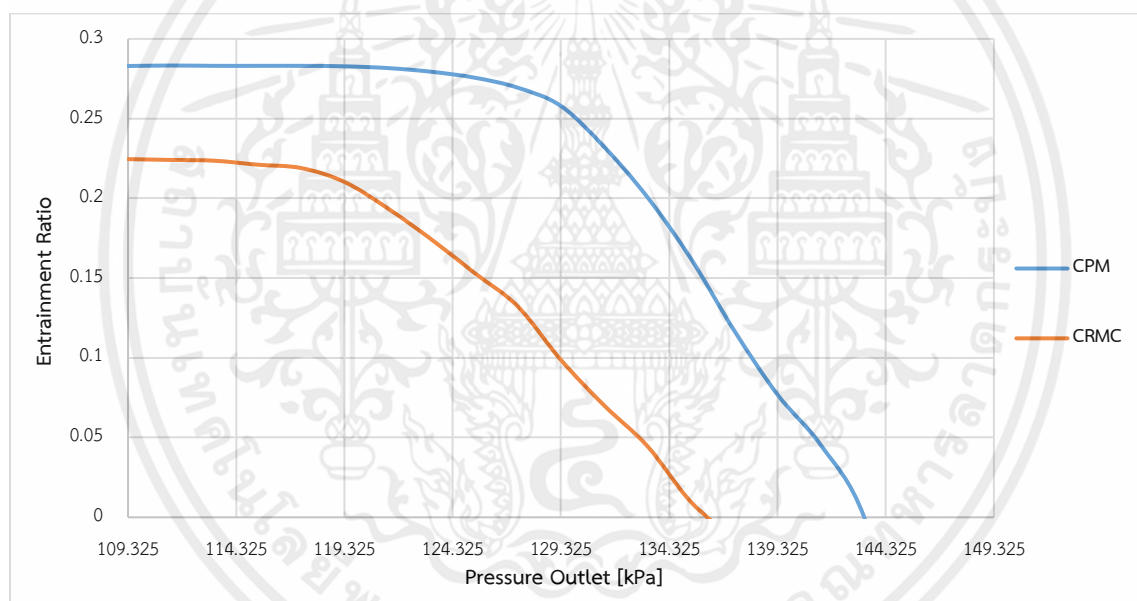
4.2.5 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไขความดันปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 88 kPa

P_{cri} (kPa)	R_m CPM Ejector	P_{cri} (kPa)	R_m CRMC Ejector
109.325	0.2835	109.325	0.2246
113.325	0.2831	113.325	0.2236
117.325	0.2831	117.325	0.2191
121.325	0.2817	121.325	0.1937
125.325	0.2757	125.325	0.1532
129.325	0.2579	129.325	0.0985
133.325	0.2006	133.325	0.0444
137.325	0.1171	137.325	-0.0136

141.325	0.04525	-	-
145.325	-0.0992	-	-

ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไขความดันปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 88 kPa

จากตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าในช่วงการทำงานแบบวิกฤตค่า Entrainment Ratio ของ CPM Ejector มีค่าเท่ากับ 0.2835 ซึ่งมากกว่าค่า Entrainment Ratio ของ CRMC Ejector ที่มีค่าเท่ากับ 0.2246 ค่าความดันวิกฤตของ CPM Ejectors และ CRMC Ejector มีค่าอยู่ที่ 109.325 kPa เท่ากัน โดยสามารถแสดงผลเป็นรูปแบบของกราฟดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Rm และความดันที่ทางออกของอีเจ็คเตอร์ประเภท CPM และ CRMC ที่เงื่อนไขความดันปฐมภูมิ 700 kPa และความดันทุติยภูมิ 88 kPa

4.3 แนวโน้มของผลการจำลองระหว่างอีเจ็คเตอร์ประเภทต่างๆ

ทำการศึกษารูปแบบโครงสร้างของอีเจ็คเตอร์ Constant Pressure Mixing (CPM) และ Constant Rate of Momentum Change (CRMC) โดยการสร้างแบบจำลอง และทำการเปรียบเทียบผลการจำลองระหว่างโมเดลทั้งสองรูปแบบนี้ รวมไปถึงผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างอีเจ็คเตอร์ประเภทต่าง ๆ ซึ่งมีผลลัพธ์ดังนี้



รูปที่ 4.8 CPM Ejector



รูปที่ 4.9 CRMC Ejector



รูปที่ 4.10 CPM + CRMC Ejector



รูปที่ 4.11 CRMC + CPM Ejector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P ₂ (kPa)	P _{cri} (kPa)	R _m			
		CRMC	CPM	CPM + CRMC	CRMC + CPM
80	101.325	0.1817	0.2440	0.07827	0.2778
82	103.325	0.1821	0.2526	0.08257	0.2802
84	105.325	0.2022	0.2624	0.08677	0.2847
86	107.325	0.2132	0.2729	0.09095	0.2911
88	109.325	0.2219	0.2829	0.09515	0.2963

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความดันวิกฤตและ Entrainment Ratio ระหว่างอีเจ็คเตอร์ประเภทต่างๆ

เมื่อกำหนดให้ความดันปฐมภูมิคงที่ที่ 700 kPa

จากตารางที่ 4.8 เมื่อกำหนดให้ความดันปฐมภูมิคงที่ที่ 700 kPa ค่า Entrainment Ratio มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความดันทุติยภูมิและความดันทางออกที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในกรณีที่ได้ค่ามากที่สุดคือที่เงื่อนไขความดันทุติยภูมิเท่ากับ 88 kPa โดยค่า Entrainment Ratio ของ CPM Ejector มีค่าต่ำสุดและมากที่สุดเท่ากับ 0.2440 และ 0.2829 ตามลำดับ ค่า Entrainment Ratio ของ CRMC Ejector มีค่าต่ำสุดและมากที่สุดเท่ากับ 0.1817 และ 0.2219 ตามลำดับ ค่า Entrainment Ratio ของ CPM + CRMC Ejector มีค่าต่ำสุดและมากที่สุดเท่ากับ 0.07827 และ 0.9515 ตามลำดับ และ ค่า Entrainment Ratio ของ CRMC + CPM Ejector มีค่าต่ำสุดและมากที่สุดเท่ากับ 0.2778 และ 0.2963 ตามลำดับ

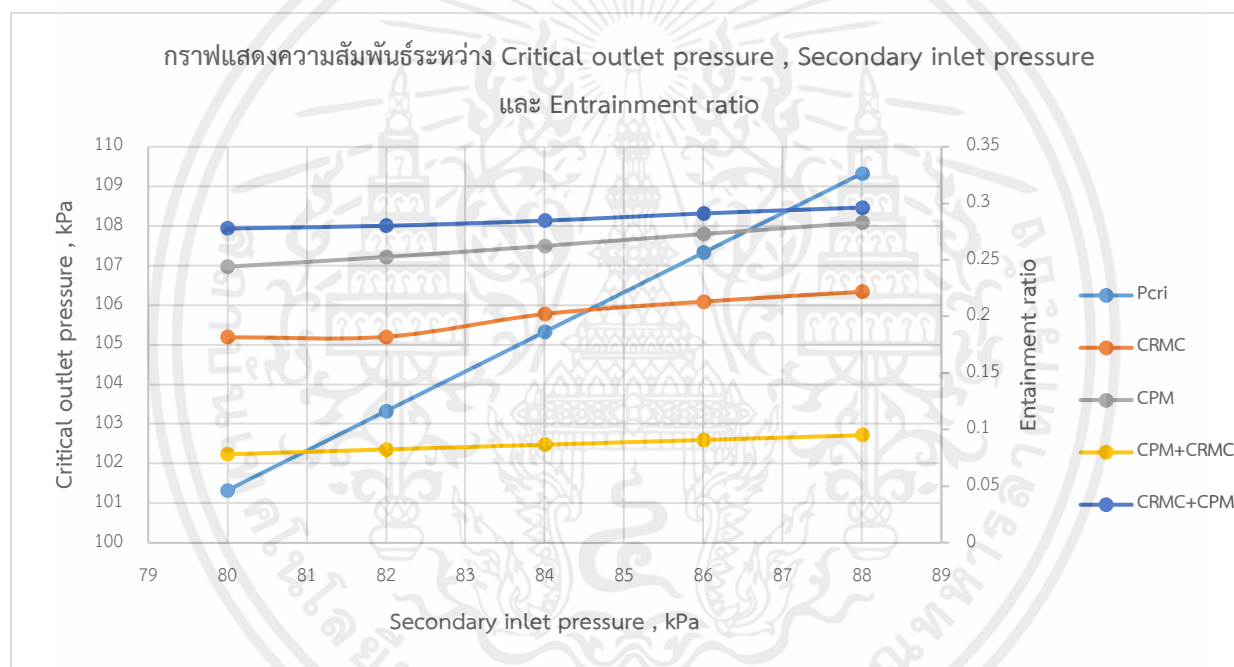
P ₁ (kPa)	P _{cri} (kPa)	R _m			
		CRMC	CPM	CPM + CRMC	CRMC + CPM
400	103.325	-0.4248	-0.2934	0.3181	-1.766
500	105.325	0.1154	0.2927	0.2011	-0.6227
600	107.325	0.2075	0.3069	0.1279	-0.1646
700	109.325	0.1844	0.2428	0.08087	0.1292

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าความดันวิกฤตและ Entrainment Ratio ระหว่างอีเจ็คเตอร์ประเภทต่างๆ

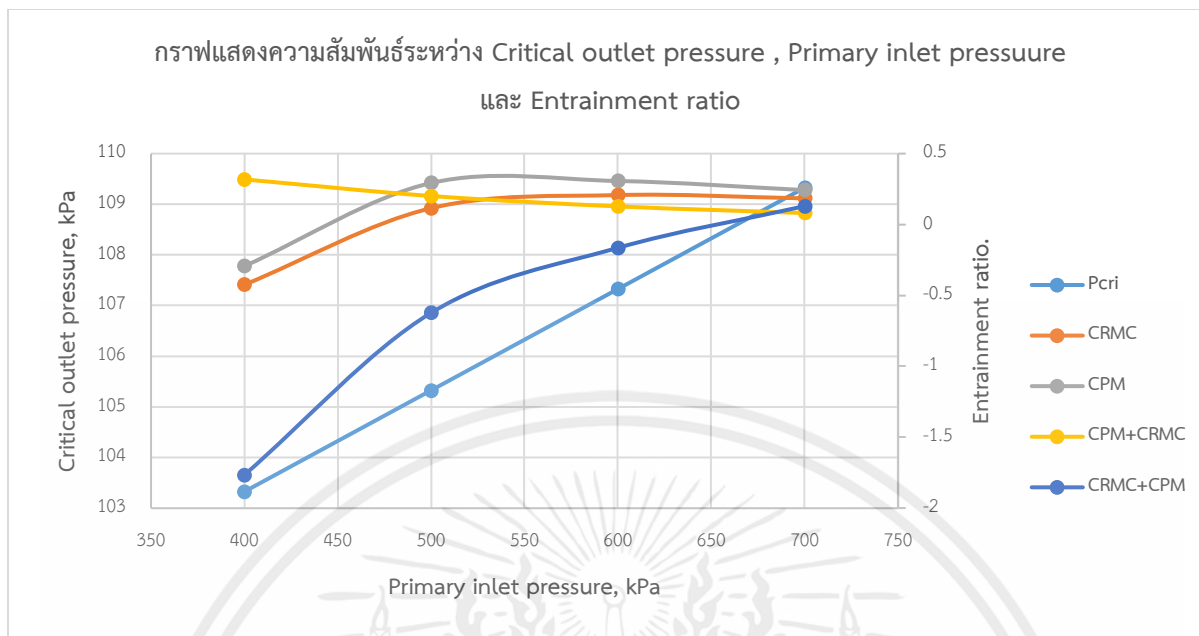
เมื่อกำหนดให้ความดันคงทุติยภูมิคงที่ที่ 80 kPa

จากตารางที่ 4.9 เมื่อกำหนดให้ความดันทุติยภูมิคงที่ที่ 80 kPa ค่า Entrainment Ratio มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความความดันปฐมภูมิและความดันทางออกที่เพิ่มขึ้น โดยค่า Entrainment Ratio ของ CPM Ejector มีค่าต่ำสุดและมากที่สุดเท่ากับ -0.2934 และ 0.3069 ตามลำดับ และค่า Entrainment Ratio ของ CRMC Ejector มีค่าต่ำสุดและมากที่สุดเท่ากับ -0.4248 และ 0.2075 ตามลำดับ ค่า Entrainment Ratio ของ CPM + CRMC Ejector มีค่าต่ำสุดและมากที่สุดเท่ากับ 0.08087 และ 0.3181 ตามลำดับ และ ค่า Entrainment Ratio ของ CRMC + CPM Ejector มีค่าต่ำสุดและมากที่สุดเท่ากับ -1.766 และ 0.1292 ตามลำดับ

จากผลการจำลองทั้งหมดสามารถนำมาทำเป็นกราฟเพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่า Entrainment Ratio และความดันฝั่งขาออกได้ทั้งหมด ดังต่อไปนี้



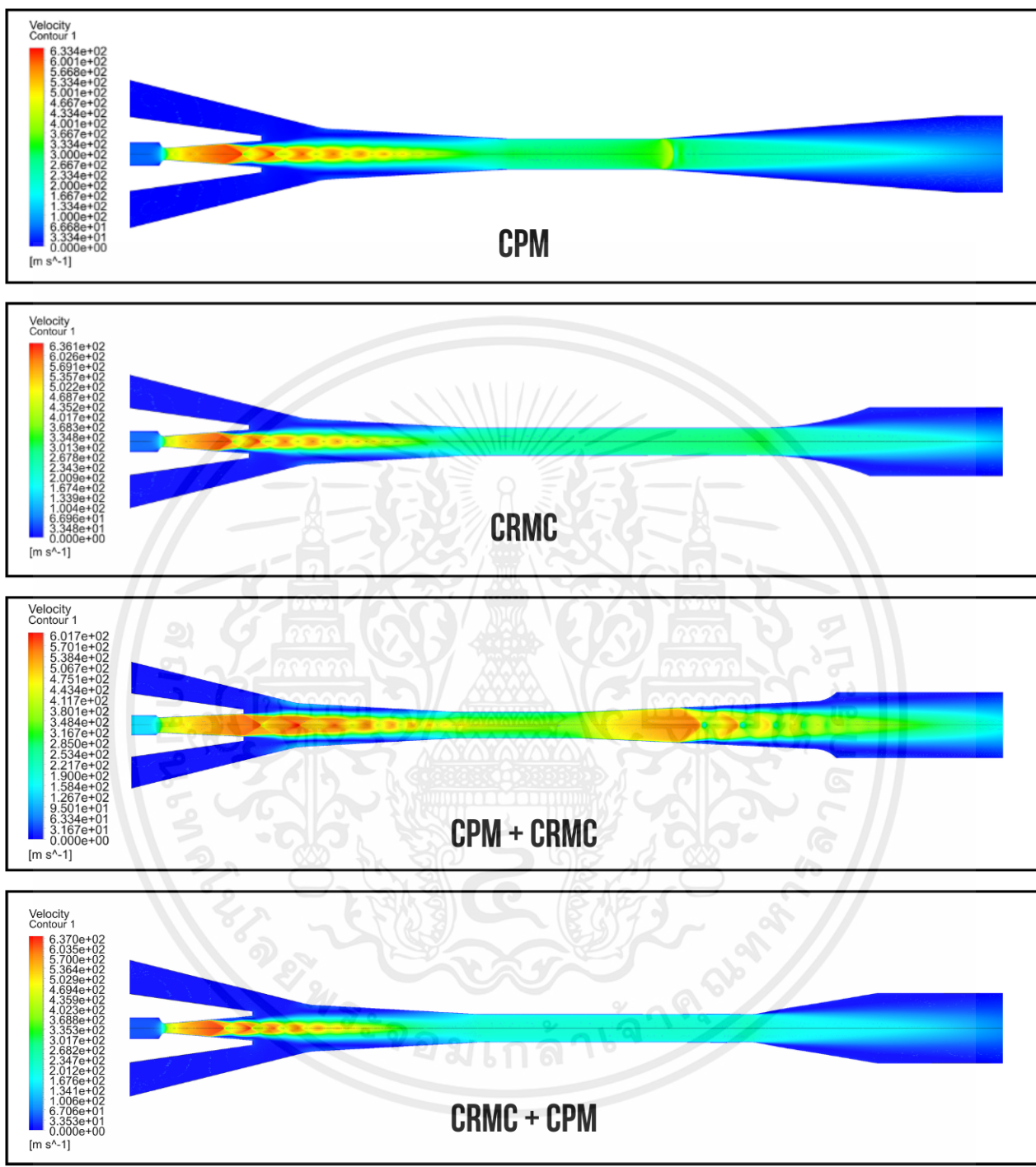
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันวิกฤต ค่าความดันทุติยภูมิและค่า Entrainment Ratio ของอีเจ็คเตอร์ประเภทต่าง ๆ



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันวิกฤต ค่าความดันปฐมภูมิและค่า Entrainment Ratio ของอีเจ็คเตอร์ประเภทต่าง ๆ

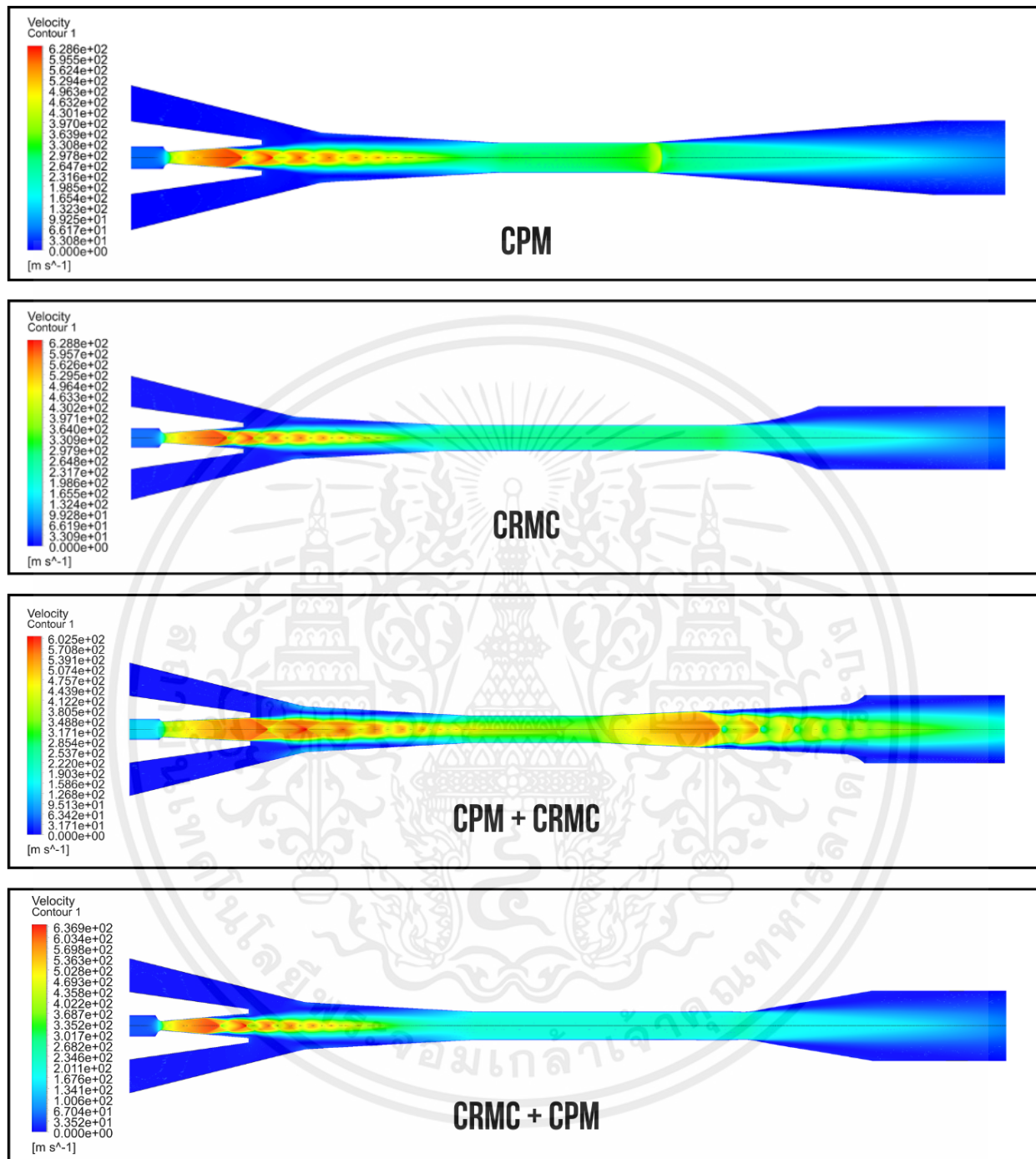
4.4 การเปรียบเทียบพฤติกรรมการไหลภายในอีเจ็คเตอร์

โดยการเปรียบเทียบกราฟคอนทัวร์ที่แสดงความเร็วในการไหลระหว่างผลการจำลอง ซึ่งในแต่ละกรณีจะมีลักษณะความแตกต่างของพฤติกรรมการไหลของคลื่นขยายตัวและคลื่นกระแทกภายในอีเจ็คเตอร์ ที่ความดันปฐมภูมิเท่ากันคลื่นขยายตัวที่เกิดขึ้นภายใน CRMC Ejector มีขนาดใกล้เคียงกับ CPM Ejector จำนวนและความแข็งแรงของคลื่นกระแทกที่เกิดขึ้นภายใน CPM Ejector มีมากกว่าของ CRMC Ejector และที่ความดันทุติยภูมิเท่ากันคลื่นขยายตัวและความแข็งแรงของคลื่นกระแทกที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์ทั้งสองจะเพิ่มขึ้นตามความดันปฐมภูมิ ซึ่งแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



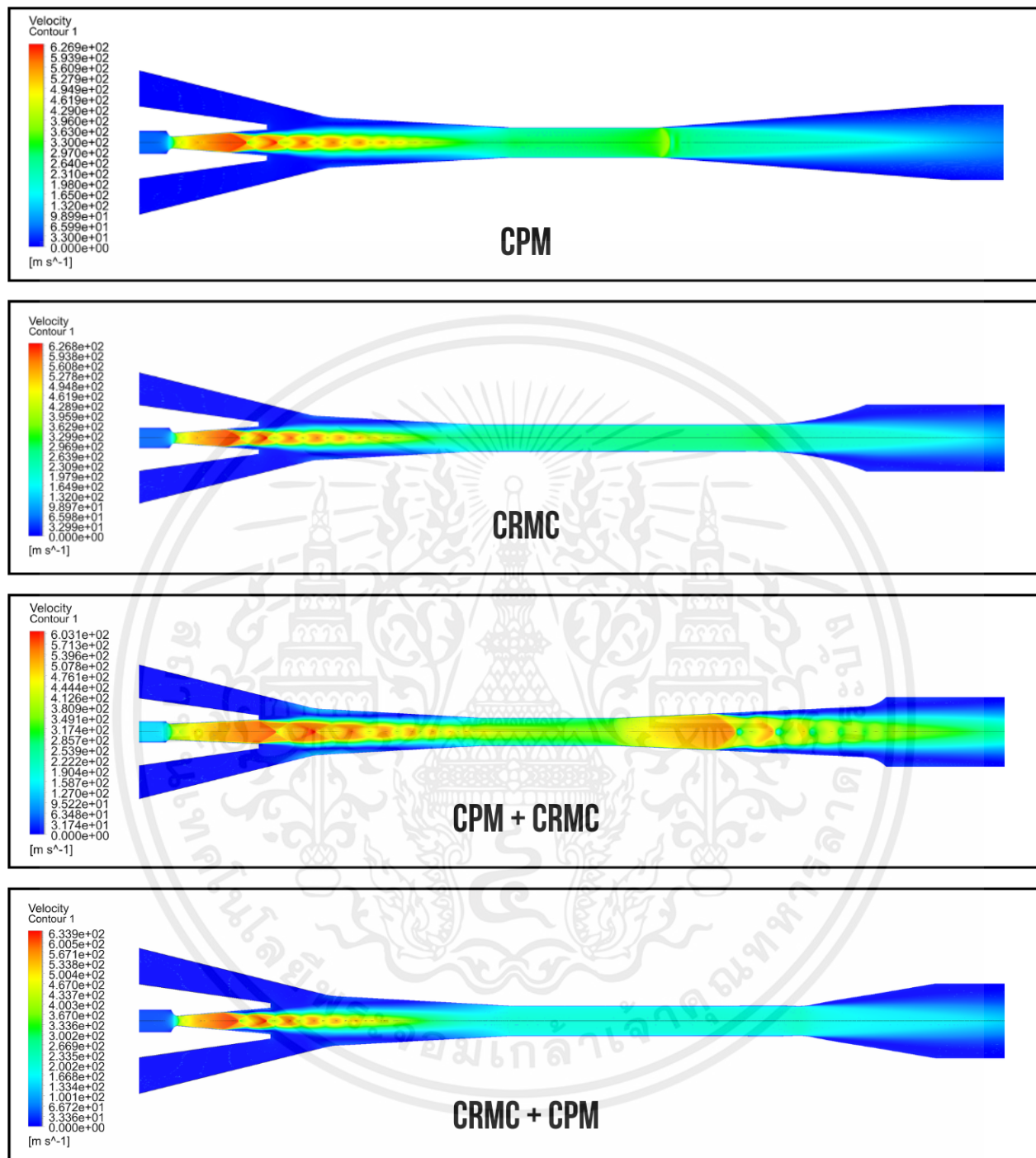
รูปที่ 4.14 กราฟคอนทัวร์แสดงค่าความเร็วของอีเจ็คเตอร์ประเภทต่าง ๆ ที่เงื่อนไขความดันป้อน 700 kPa ความดันทุติยภูมิ 80 kPa และความดันทางออก 101.325 kPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



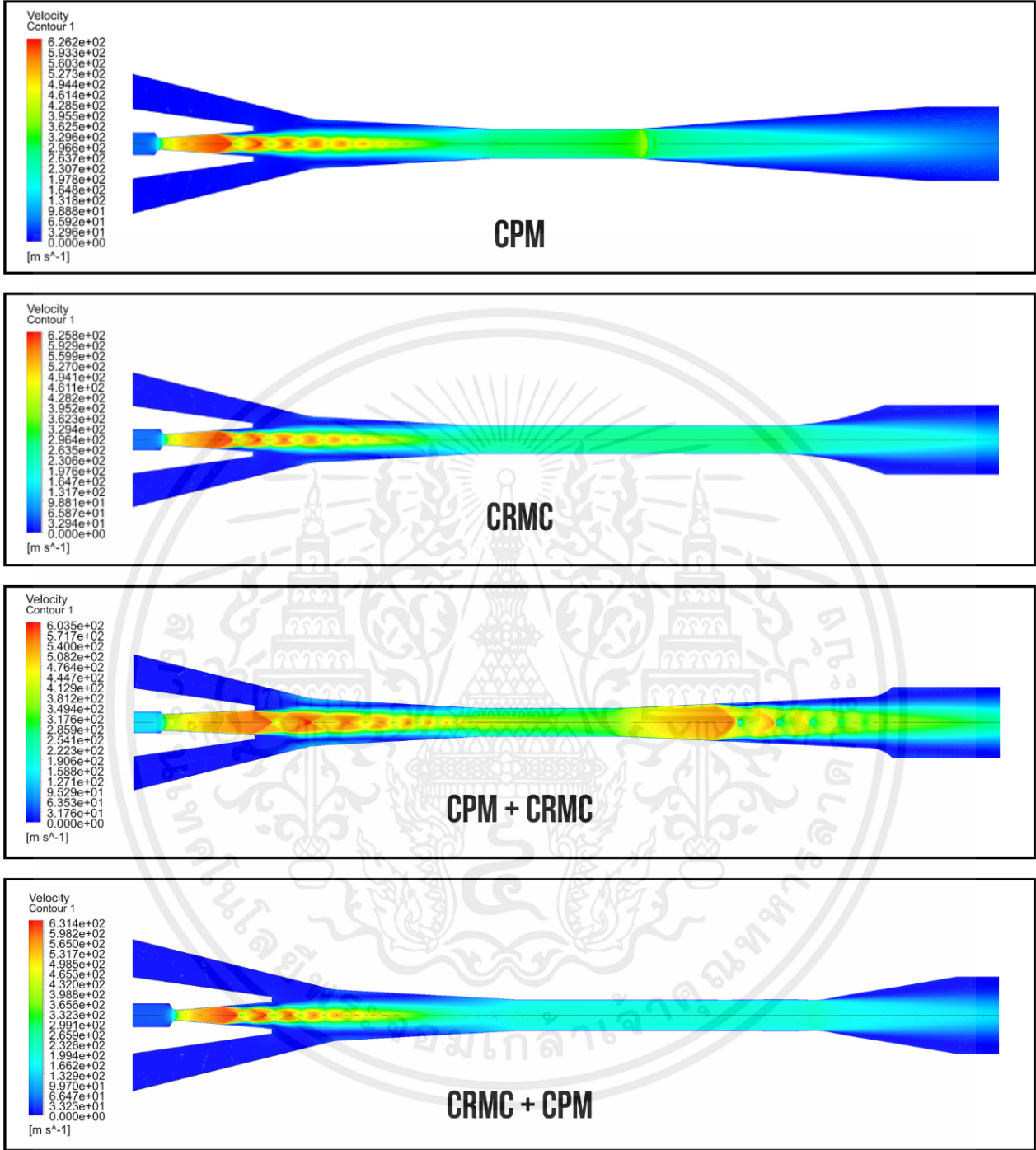
รูปที่ 4.15 กราฟคอนทัวร์แสดงค่าความเร็วของไอเจ็ทเตอร์ประเภทต่าง ๆ ที่เงื่อนไขความดันป้อน 700 kPa ความดันทุติยภูมิ 82 kPa และความดันทางออก 103.325 kPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



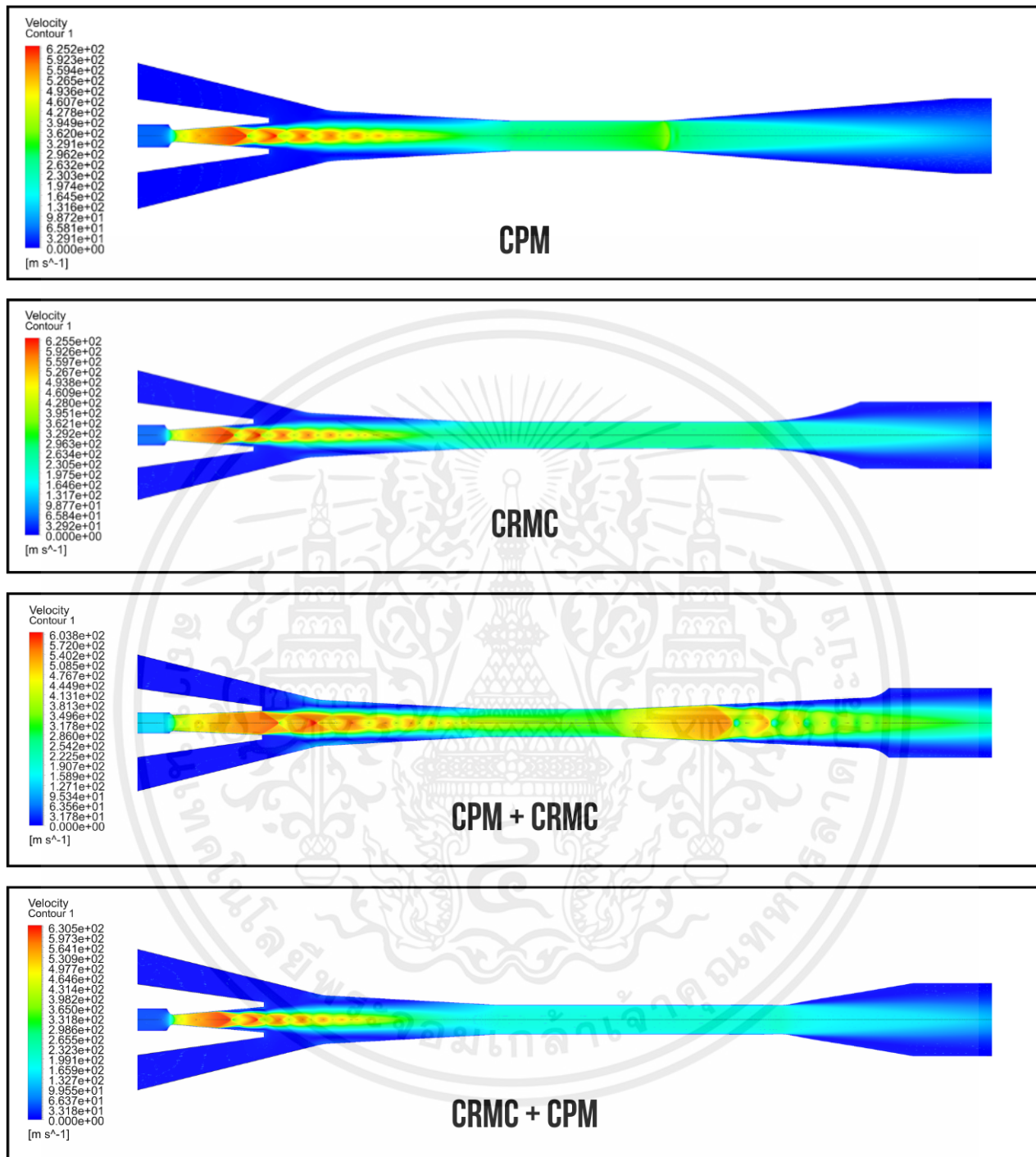
รูปที่ 4.16 กราฟคอนทัวร์แสดงค่าความเร็วของอีเจ็คเตอร์ประเภทต่าง ๆ

ที่เงื่อนไขความดันป้อน 700 kPa ความดันทุติยภูมิ 84 kPa และความดันทางออก 105.325 kPa



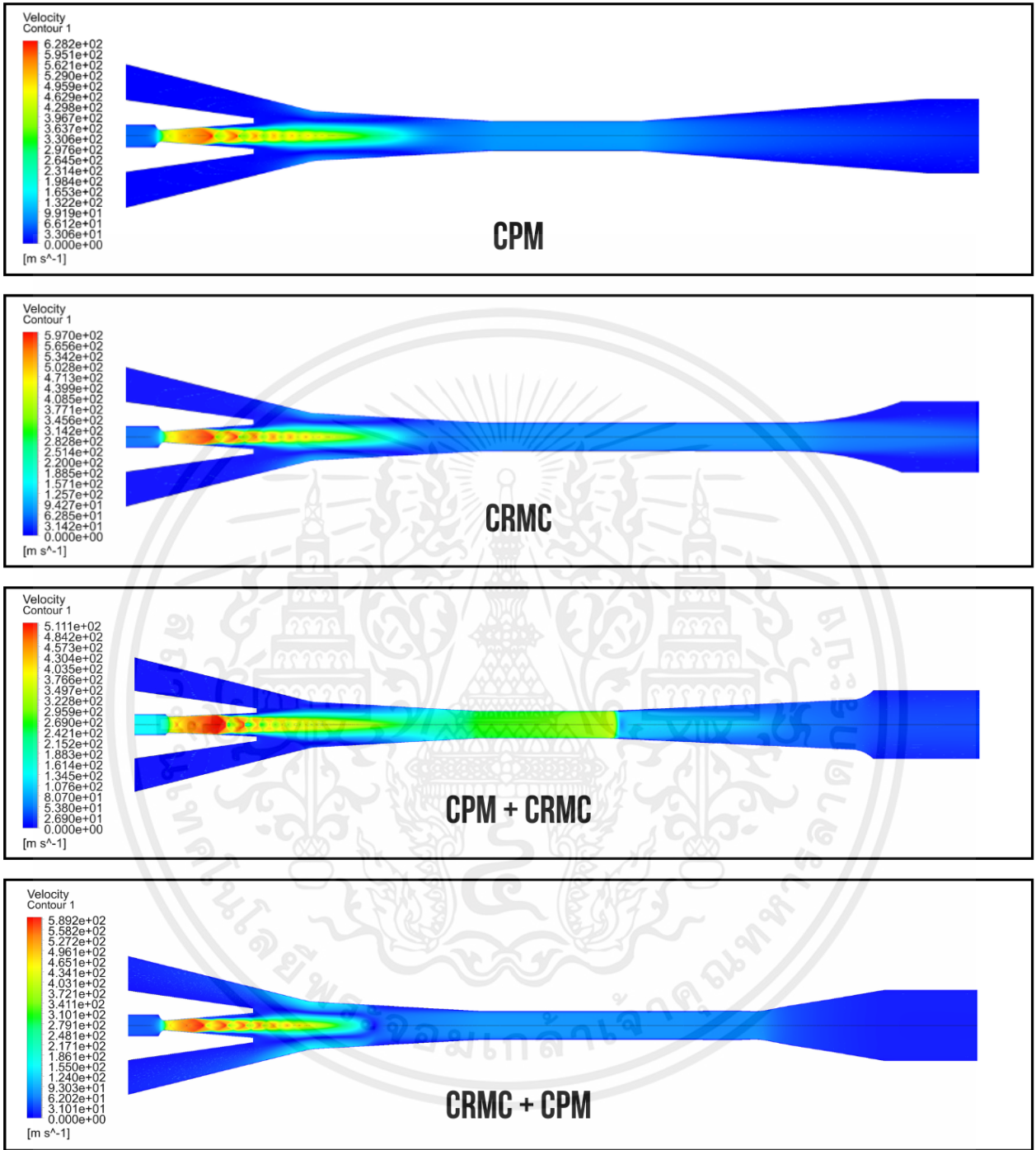
รูปที่ 4.17 กราฟคอนทัวร์แสดงค่าความเร็วของอีเจ็คเตอร์ประเภทต่าง ๆ ที่เงื่อนไขความดันป้อน 700 kPa ความดันทุติยภูมิ 86 kPa และความดันทางออก 107.325 kPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



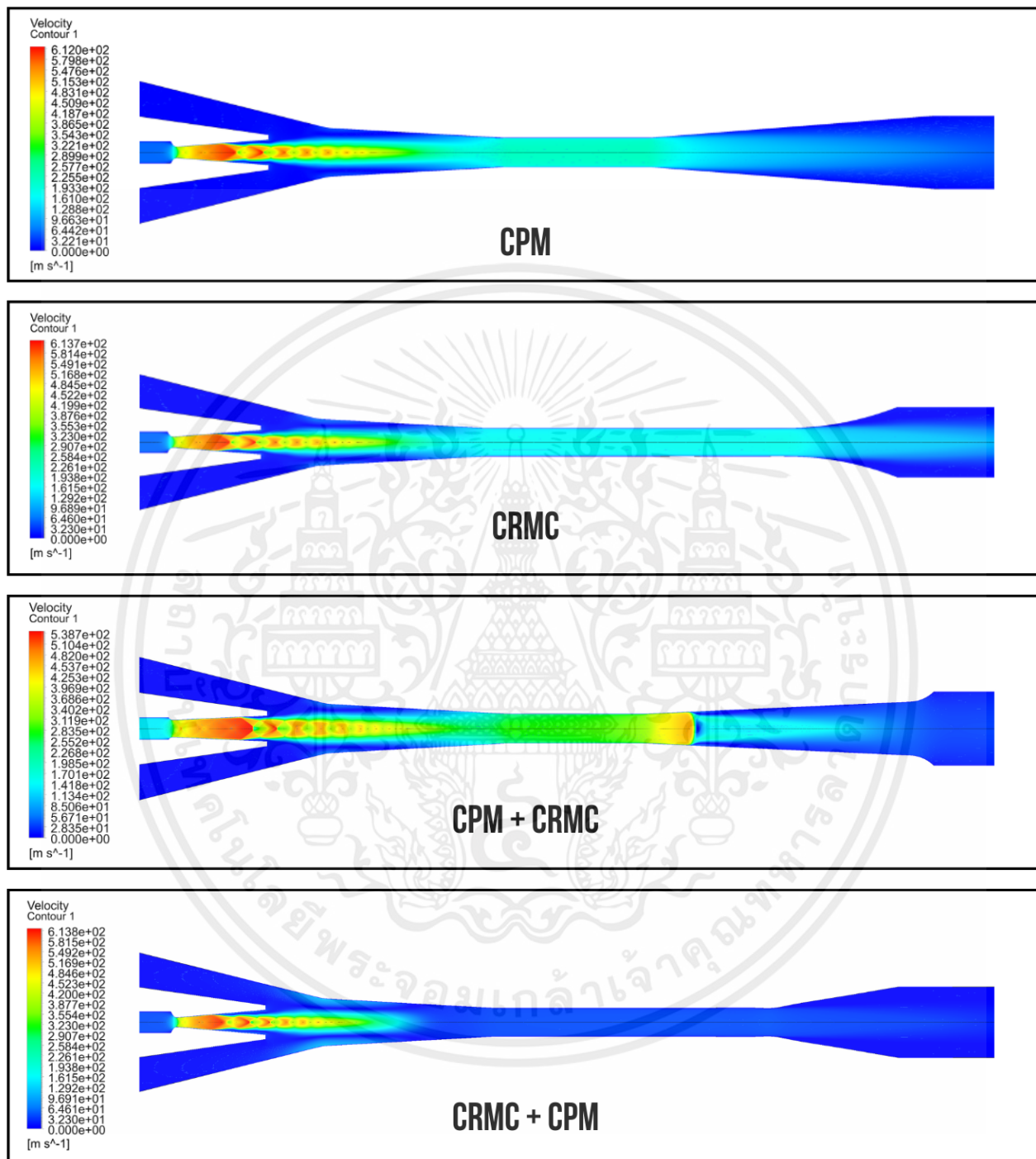
รูปที่ 4.18 กราฟคอนทัวร์แสดงค่าความเร็วของอีเจ็คเตอร์ประเภทต่าง ๆ

ที่เงื่อนไขความดันป้อน 700 kPa ความดันทุติยภูมิ 88 kPa และความดันทางออก 109.325 kPa



รูปที่ 4.19 กราฟคอนทัวร์แสดงค่าความเร็วของอีเจ็คเตอร์ประเภทต่าง ๆ ที่เงื่อนไขความดันป้อน 400 kPa ความดันทุติยภูมิ 80 kPa และความดันทางออก 103.325 kPa

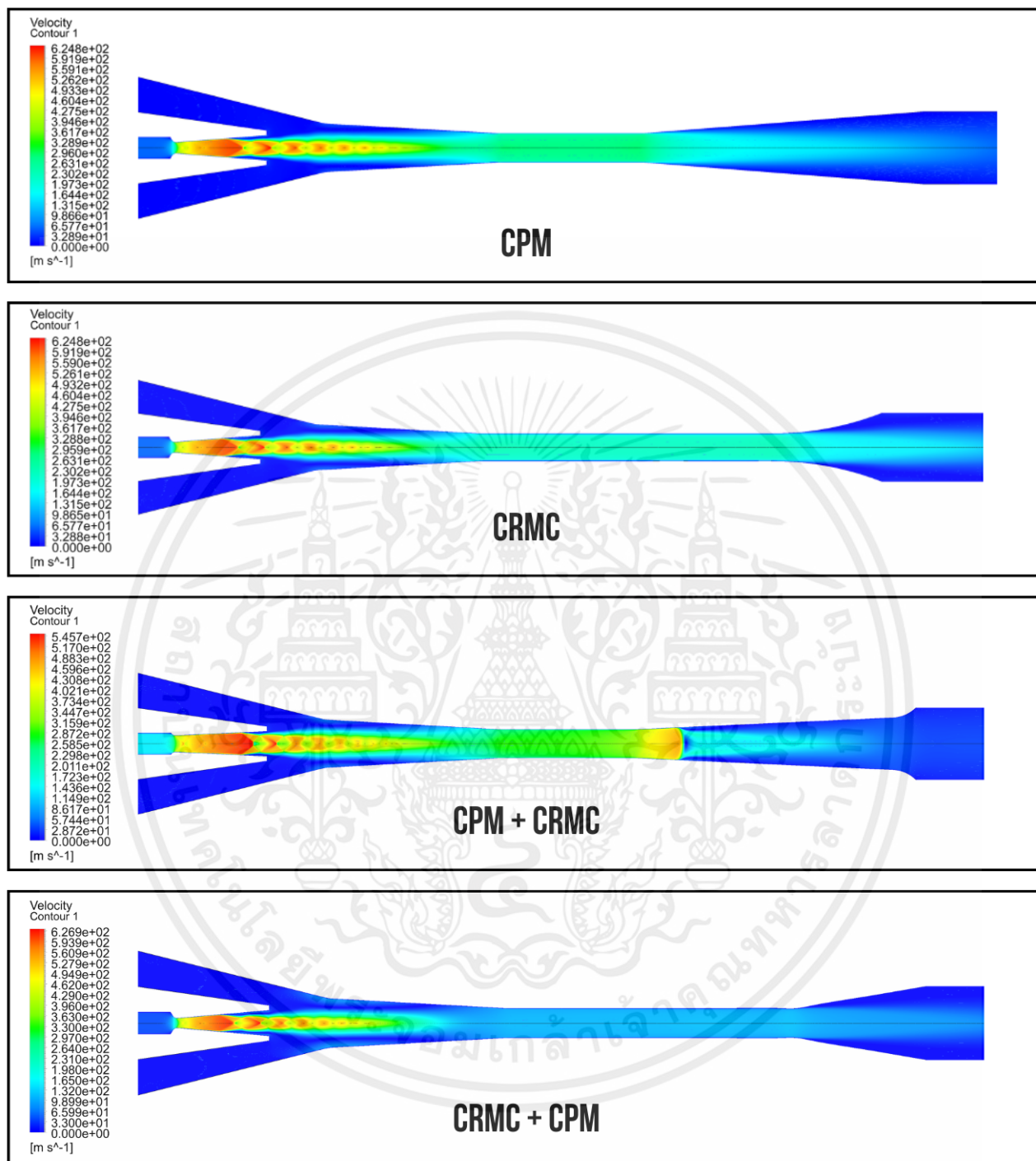
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 กราฟคอนทัวร์แสดงค่าความเร็วของอีเจ็คเตอร์ประเภทต่าง ๆ

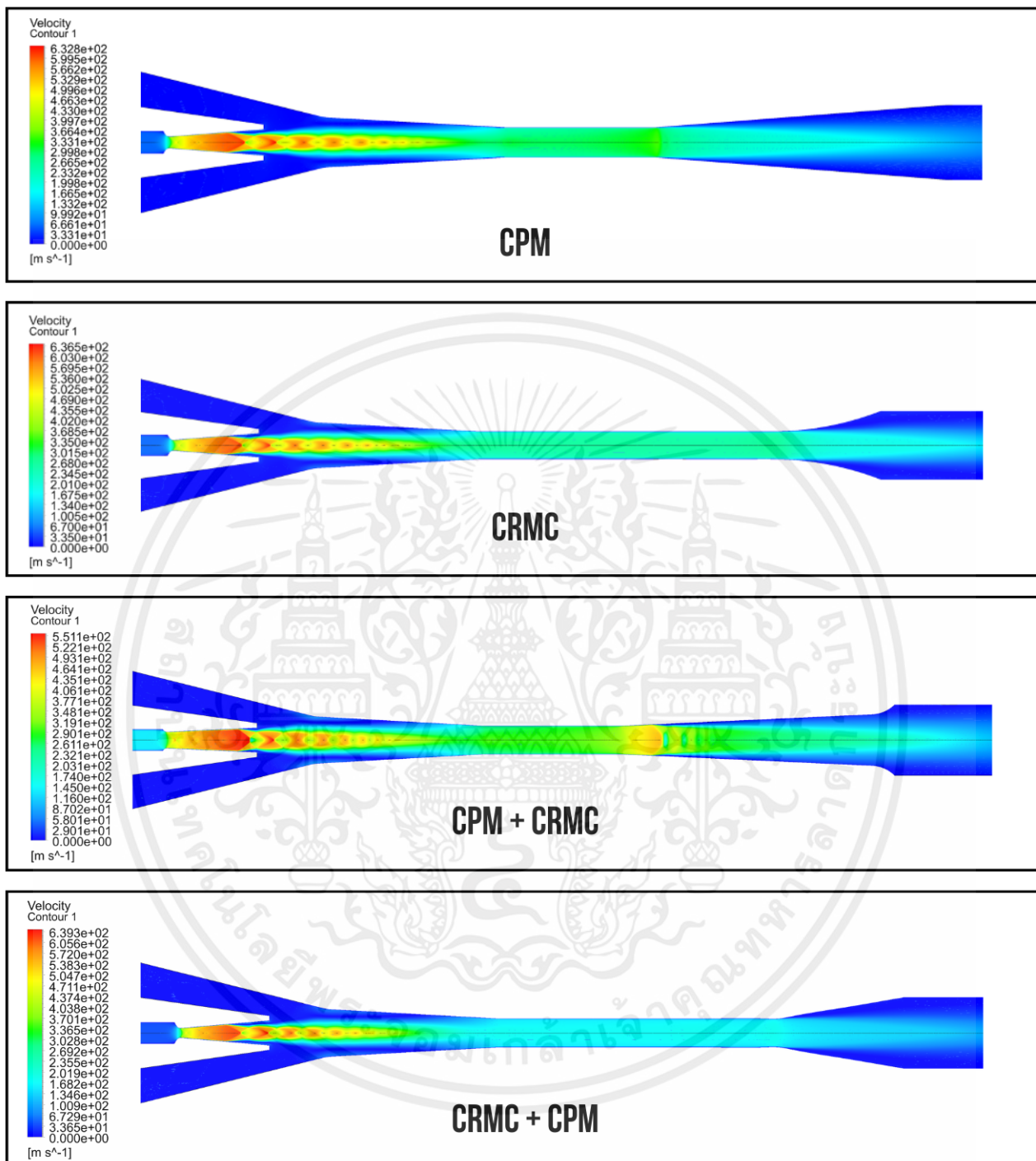
ที่เงื่อนไขความดันป้อน 500 kPa ความดันทุติยภูมิ 80 kPa และความดันทางออก 105.325 kPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 กราฟคอนทัวร์แสดงค่าความเร็วของอีเจ็คเตอร์ประเภทต่าง ๆ

ที่เงื่อนไขความดันปฐมภูมิ 600 kPa ความดันทุติยภูมิ 80 kPa และความดันทางออก 107.325 kPa



รูปที่ 4.22 กราฟคอนทัวร์แสดงค่าความเร็วของอีเจ็คเตอร์ประเภทต่าง ๆ

ที่เงื่อนไขความดันป้อน 700 kPa ความดันทุติยภูมิ 80 kPa และความดันทางออก 109.325 kPa

บทที่ 5

สรุปการจำลองผล

ผลลัพธ์ทั้งหมดที่ได้จากเทคนิค CFD ทำให้เราเห็นถึงความแตกต่างของลักษณะการไหล (Mach number contour) , ค่าความดันวิกฤต(Critical Pressure) และ Entrainment ratio ของสารทำความเย็นภายในระบบทำความเย็นแบบ CPM Ejector และ CRMC Ejector โดยสรุปได้ว่า Entrainment Ratio (Rm) ที่ได้จาก CPM Ejector ให้ค่าที่สูงกว่า CRMC Ejector และสรุปลักษณะการไหลภายในอุปกรณ์ได้ว่า CRMC Ejector มีลักษณะทางกายภาพเหมือนกับการต่อ Diffuser โดยลักษณะของ Diffuser เป็นแบบปากแตรในส่วนต้นของ Diffuser จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับคอคอดแล้วค่อยๆโค้งขึ้นเป็นปากแตร ช่วงท้ายของ Diffuser จะมีการโค้งขึ้นเพิ่มความชันอย่างรวดเร็วทำให้ Static Pressure บริเวณปากทางออกของ Diffuser สูงกว่า CPM ในทำนองเดียวกันจะทำให้อัตราเร็วในการดูดอากาศของ CPM สูงกว่า นั่นคือ Rm ของ CPM สูงกว่า CRMC

Entrainment Ratio เป็นผลลัพธ์ที่แสดงถึงประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบ Ejector แต่ในความเป็นจริงเราไม่สามารถคำนึงถึงการเพิ่มขึ้นของค่านี้เพียงอย่างเดียวไม่ได้ เนื่องจากค่าความดันวิกฤตก็ยังคงมีความสำคัญในเรื่องของการไหลของสารทำความเย็นเช่นกัน ถ้าหากเรานำระบบทำความเย็นดังกล่าวไปใช้ในประเทศเขตร้อนโดยไม่คำนึงถึงค่าความดันวิกฤต อาจส่งผลให้สารทำความเย็นไหลย้อนกลับเพื่อป้องกันกรณีดังกล่าวจึงจำเป็นต้องติดตั้งค่าความดันที่ทางออกให้ต่ำลง จะส่งผลให้อุณหภูมิที่ทางออกมีค่าต่ำลงเช่นกัน จากนั้นการปล่อยความร้อน (waste heat) ออกจากระบบจะเกิดขึ้นได้ยากหรือเป็นไปได้เลยสิ่งเหล่านี้จะเห็นได้ชัดในประเทศเขตร้อน หรือประเทศที่มีสภาพ อุณหภูมิของอากาศภายนอกค่อนข้างสูง

ในการศึกษานี้เราจึงสรุปว่า CPM Ejector ให้ค่า Entrainment ratio สูงกว่า CRMC Ejector และการเพิ่มขึ้นของ Critical outlet pressure จะส่งผลให้เกิดการไหลย้อนกลับ

เมื่อเพิ่มความดันวิกฤต แล้วคงที่ ความดันปฐมภูมิและทุติยภูมิไว้ โดยความดันวิกฤตเริ่มต้นที่ 1 บรรยากาศ และเพิ่มขึ้นครั้งละ 2000 Pa ผลปรากฏว่าทั้งสองโมเดลให้ค่า Rm คงที่ค่านี้ เมื่อเพิ่มความดันวิกฤตไปเรื่อย ๆ ถึงจุดหนึ่ง ทั้งสองโมเดลจะให้ค่า Rm ที่ลดลง จนให้ค่าเป็นลบ นั่นคือเกิดการไหลย้อนกลับ จากการศึกษาพบว่าค่า Rm ของ CRMC จะลดลงเร็วกว่า CPM และค่าความดันวิกฤตก่อนเกิดการไหลย้อนกลับของ CPM สูงกว่า CRMC

นอกจากนี้ยังมีการออกแบบอีเจ็คเตอร์อีก 2 โมเดล คือ CPM+CRMC และ CRMC+CPM โดยแบบทั้งสองมีส่วนต้นเหมือนกันต่างกันที่ส่วนขยาย จากนั้นทำการจำลองดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดให้ความดันปฐมภูมิคงที่ที่ 700 kPa ค่า Entrainment Ratio มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความดันทุติยภูมิและความดันทางออกที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในกรณีที่ได้ค่ามากที่สุดคือที่เงื่อนไขความดันทุติยภูมิเท่ากับ 88 kPa โดย

- ค่า Entrainment Ratio ของ CPM Ejector มีค่าต่ำสุดและมากที่สุดเท่ากับ 0.2440 และ 0.2829 ตามลำดับ
- ค่า Entrainment Ratio ของ CRMC Ejector มีค่าต่ำสุดและมากที่สุดเท่ากับ 0.1817 และ 0.2219 ตามลำดับ
- ค่า Entrainment Ratio ของ CPM+CRMC Ejector มีค่าต่ำสุดและมากที่สุดเท่ากับ 0.07827 และ 0.09515 ตามลำดับ
- ค่า Entrainment Ratio ของ CRMC+CPM Ejector มีค่าต่ำสุดและมากที่สุดเท่ากับ 0.2778 และ 0.2963 ตามลำดับ

และเมื่อกำหนดให้ความดันทุติยภูมิคงที่ที่ 80 kPa ค่า Entrainment Ratio มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความดันปฐมภูมิและความดันทางออกที่เพิ่มขึ้น โดย

- ค่า Entrainment Ratio ของ CPM Ejector มีค่าต่ำสุดและมากที่สุดเท่ากับ -0.2934 และ 0.3069 ตามลำดับ
- ค่า Entrainment Ratio ของ CRMC Ejector มีค่าต่ำสุดและมากที่สุดเท่ากับ -0.4248 และ 0.2075 ตามลำดับ
- ค่า Entrainment Ratio ของ CPM+CRMC Ejector มีค่าต่ำสุดและมากที่สุดเท่ากับ 0.0808 และ 0.3181 ตามลำดับ
- ค่า Entrainment Ratio ของ CRMC+CPM Ejector มีค่าต่ำสุดและมากที่สุดเท่ากับ -1.766 และ 0.1292 ตามลำดับ

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Ruangtrakoon , Satha Aphoratana , Thanarath Sriveerakul (2011). **Experimental studies of a steam jet refrigeration cycle: Effect of the primary nozzle geometries to system performace.** Thailand: Sirindhorn international instute of technology Thammasat University.
- [2] Aggrey Mwesigye, Seth B. Dworkin. (2018) **Performance analysis and optimization of an ejector refrigeration system using alternative working fluids under critical and subcritical operation Modes.** Canada; Ryerson University.
- [3] N. Ruangtrakoon, T Thongtip, S. Aphornratana, T. Sriveerakul. (2013) **CFD simulation on the effect of primary nozzle geometries for a steam eiector in refrigeration cycle.** Thailand; Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University, Ubon Ratchathani University.
- [4] N. Ruangtrakoon, T Thongtip, S. Aphornratana, B. Kitrattana. (2017) **Comparison of traditional and CRMC ejector performance used in a steam ejector refrigeration.** Thailand; Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University, Phranakhon Rajabhat University.
- [5] Meihong Yu, Chen Wang, Lei Wang, Hongxia Zhao. (2022) **Optimization Design and Performance Evaluation of R1234yf Ejectors for Ejector-Refrigeration Systems.** China; Shandong University.
- [6] Alaa Ahmad Sammour, Oleg V. Komarov Mohammed A. Qasim, Ahmad Yousef Saleh (2023) **Investigation of the Influence of Ambient Conditions on the Thermodynamic Characteristics of Air as a Working Fluid for Gas Turbines.** Russia; Ural Federal University.
- [7] Dr. Satha Aphornratana, **ทฤษฎีระบบเครื่องทำความเย็น** Thailand; Thammasat University.

[8] Reza Ghias, Balasubramanyam Sasanapuri, Manish Kumar, Sutikno Wirogo. (2011). **Simulation of flow through Supersonic Cruise Nozzle: A validation study**. United States of America: ANSYS Inc.

[9] K. Pianthong, W. Seehanam , M. Behnia, T. Sriveerakul, S. Aphornratana. (2007). **Investigation and improvement of ejector refrigeration system using computational fluid dynamics technique**. Thailand: Ubon Ratchathani University.

[10] YUNUS A. CENGEL and MICHAEL A. BOLES. **Thermodynamics An Engineering Approach. 8th Edition**. New York : McGraw-Hill. Inc.2015.

[11] ANSYS Inc. 2009, **ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide**, viewed 26 January 2024, < https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main_pre.htm>

[12] Fluid Mechanics 101 2020, **[CFD] Pressure-Inlet Boundary Conditions**, viewed 20 January 2024,