

การศึกษาประสิทธิภาพของอีเจคเตอร์แบบการผสมแบบความดันคงที่และอีเจคเตอร์แบบการ  
ผสมแบบอัตราการเปลี่ยนแปลงแบบโมเมนตัมคงที่ซึ่งใช้งานในระบบทำความเย็น

THE NUMERICAL STUDIES ON THE PERFORMANCES OF THE CONSTANT  
PRESSURE MIXING EJECTOR AND CONSTANT RATE OF MOMENTUM CHANGE  
EJECTORS USED IN STEAM EJECTOR REFRIGERATION SYSTEM



ชยณัฐ หวังธนาสาร  
ธนวิทย์ อามระดิษ  
ธนาตุล ตันใจเพชร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'ชยณัฐ' (Chayanat), is written over the bottom right portion of the page.



การศึกษาประสิทธิภาพของอีเจคเตอร์แบบการผสมแบบความดันคงที่และอีเจคเตอร์แบบการผสมแบบอัตราการเปลี่ยนแปลงแบบโมเมนต์คงที่ซึ่งใช้งานในระบบทำความเย็น

THE NUMERICAL STUDIES ON THE PERFORMANCES OF THE CONSTANT PRESSURE MIXING EJECTOR AND CONSTANT RATE OF MOMENTUM CHANGE EJECTORS USED IN STEAM EJECTOR REFRIGERATION SYSTEM



ชยณัฐ หวังธนาสาร  
ธนวิทย์ อามระดิษ  
ธนาตุล ตันใจเพชร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'ชยณัฐ' (Chayanat), is written over the bottom right portion of the page.

THE NUMERICAL STUDIES ON THE PERFORMANCES OF THE CONSTANT  
PRESSURE MIXING EJECTOR AND CONSTANT RATE OF MOMENTUM CHANGE  
EJECTORS USED IN STEAM EJECTOR REFRIGERATION SYSTEM



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 2020**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2563  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาประสิทธิภาพของอีเจคเตอร์แบบการผสมแบบความดันคงที่และอีเจคเตอร์แบบ  
การผสมแบบอัตราการเปลี่ยนแปลงแบบโมเมนตัมคงที่ซึ่งใช้งานในระบบทำความเย็น

THE NUMERICAL STUDIES ON THE PERFORMANCES OF THE CONSTANT  
PRESSURE MIXING EJECTOR AND CONSTANT RATE OF MOMENTUM CHANGE  
EJECTORS USED IN STEAM EJECTOR REFRIGERATION SYSTEM

ผู้จัดทำ

1. ชยณัฐ หวังธนาสาร รหัสประจำตัว 60010202
2. ธนวินท์ อามระดิษ รหัสประจำตัว 60010411
3. ธนาคุณ ตันใจเพชร รหัสประจำตัว 60010433

อาจารย์ที่ปรึกษา

( ดร.ณัฐวุฒิ เรืองตระกูล )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การศึกษาประสิทธิภาพของอีเจคเตอร์แบบการผสมแบบความดันคงที่และอีเจคเตอร์แบบการผสมแบบอัตราการเปลี่ยนแปลงแบบโมเมนตัมคงที่ซึ่งใช้งานในระบบทำความเย็น

ชยณัฐ	หวังธนสาร	60010202
ธนวินท์	อามระดิษ	60010411
ธนาดุล	ตันใจเพชร	60010433
ดร.ณัฐวุฒิ	เรืองตระกูล	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของ Ejector ที่ใช้งานในระบบทำความเย็น ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโปรแกรมวิเคราะห์เชิงตัวเลข ANSYS 2020 R2 (FLUENT 2020) โดยใช้ น้ำ ( $H_2O$ ) เป็นสารทำความเย็น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ในจำลองอยู่บนพื้นฐานของการไหลแบบ Choked การไหลอัดตัวได้ และการเคลื่อนที่ผ่านคลื่นกระแทกที่ตั้งฉากกับการไหล โดยผลการศึกษาจะมุ่งเน้นความสนใจไปที่พฤติกรรมของการไหลของสารทำความเย็น (Contour) และ อัตราส่วนของอัตรา การไหลเชิงมวล (Entrainment Ratio,  $R_m$ ) ที่ไหลผ่าน Primary Inlet (Primary Nozzle) และ Secondary Inlet เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการศึกษาทั้งแบบ CPM Ejector, CRMC Ejector และ ชุดการทดลองกับงานวิจัยที่อ้างอิง

จากการศึกษาที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ ภายในอีเจคเตอร์แบบ CPM มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างฉับพลันในช่วงหนึ่งหลังจากนั้นจึงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความดันภายในอีเจคเตอร์แบบ CRMC มีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปโดยเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆตลอดความยาวของอุปกรณ์ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมของการไหลภายในอุปกรณ์ และผลลัพธ์จากเทคนิค CFD จึงทำให้ทราบว่าโมเดลแบบ CRMC Ejector ให้ผลของ Entrainment Ratio ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงช่วยเสริมประสิทธิภาพของระบบทำความเย็น แต่แลกมาด้วย Critical Pressure ที่ลดลงโดยมีแนวโน้มมาจากการเพิ่มอุณหภูมิที่ Boiler หรือ ลดอุณหภูมิที่ Evaporator จะส่งผลให้ %Rm increment เพิ่มขึ้น และ %Pressure Critical Decrement ลดลง ซึ่งผลที่ดีที่สุดจากการศึกษาคือการติดตั้งอุณหภูมิ Boiler 140 องศาเซลเซียส , อุณหภูมิที่ Evaporator ที่ 7.5 องศาเซลเซียส จะได้ Entrainment Ratio ที่ 0.490 และ ค่า Critical Pressure ที่ลดลงเหลือ 4350 pascal ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

THE NUMERICAL STUDIES ON THE PERFORMANCES OF THE CONSTANT PRESSURE MIXING  
EJECTOR AND CONSTANT RATE OF MOMENTUM CHANGE EJECTORS USED IN STEAM  
EJECTOR REFRIGERATION SYSTEM

Chayanut Wangthanasarn 60010202

Thanadol Tanjaipetch 60010411

Thanawin Amradis 60010433

Dr.Natthawut Ruangtrakoon Advisor

Year 2020

### Abstract

This research presents the investigation of the performance of the ejector used in Ejector refrigeration system by Mathematical Model and Computational Fluid Dynamics (FLUENT 2020). The working fluid used in the ejector is water (H<sub>2</sub>O). Compressible flow was applied for mathematical modeling. The study focuses on Contour and result of Entrainment Ratio (Rm) to be compared with the result of CPM Ejector , CRMC Ejector model and Experimental results from literature review.

According to a previous study, Static pressure in CPM ejector increases instantly when entering diverging diffuser then increases slightly until leave diffuser. In the other hand, Static Pressure in CRMC ejector is growing gradually along the diffuser length. This study focus on fluid flow behavior and entrainment ratio to boost the better performance of this cooling system. This study provides CRMC ejector can operate more efficiently but decrease critical pressure. the trend of these two-parameter are influent by rising Boiler temperature and decline Evaporator temperature. Results in RM increment percentage will climb and Critical Pressure decrement percentage will drop. From our best case is boiler temperature at 140C evaporator temperature at 7.5C and bring RM at 0.490, even critical pressure will decrease but still acceptable at 4350 pascal.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้สำหรับการศึกษาและการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ลุล่วงด้วยดีตลอดการทำงาน ด้วยคำชี้แนะของอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ดร.ณัฐวุฒิ เรืองตระกูล ทั้งคำแนะนำทางวิชาการและขั้นตอนในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นขณะปฏิบัติงาน ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่ปรึกษาและขอกราบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ อาจารย์เอก ดร.เอกราช บำรุงไทยชัยชาญ ที่คอยชี้แนะแนวทาง ให้ข้อสังเกต และแสดงความคิดเห็นอย่างต่อเนื่อง รวมทั้งคอยให้คำปรึกษาเสมอมา และขอขอบคุณพี่นิว เครื่องกลรุ่นที่ 40 ผู้ที่ชี้แนะแนวทางในการเริ่มต้น ตลอดจนการให้คำปรึกษาปัญหาขณะปฏิบัติงาน

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ร่วมกันสร้างปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงตามเป้าหมาย รวมทั้งเพื่อนๆ ร่วมสาขาวิศวกรรมเครื่องกลที่คอยให้การสนับสนุนเรื่องต่าง ๆ และบุคลากรของดีกวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำปริญญาานิพนธ์

สุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณพระคุณของบุคคลผู้ที่คอยสนับสนุนข้าพเจ้ามาโดยตลอด คอยเลี้ยงดู และให้โอกาสการศึกษาในคณะที่ข้าพเจ้าสนใจอย่างเต็มที่ บุคคลที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ก็คือ บิดา มารดา ที่เคารพยิ่ง ท่านให้กำลังใจและเอาใจใส่เสมอมา ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสูงสุด และขอกราบขอพระคุณมา ณ ที่นี้

ชยณัฐ หวังธนาสาร

ธนวินท์ อามระดิษ

ธนาตุล ตันใจเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	II
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการสัญลักษณ์.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.5 ขอบเขตการศึกษา.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 ระบบทำความเย็นแบบ Ejector refrigeration System.....	4
2.3 ทฤษฎีพื้นฐานของการไหลแบบอัดตัวได้.....	7
2.4 การไหลแบบไอเซนโทรปิกผ่านหัวพ่น.....	11
2.5 คลื่นกระแทก (Shock wave) และ Expansion waves.....	13
2.6 กระบวนการและสภาวะในการทำงานภายในอีเจคเตอร์.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญ (ต่อ)

2.7	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในโปรแกรมการวิเคราะห์เชิงตัวเลข FLUENT 2020.....	17
2.8	ขั้นตอนก่อนกระบวนการประมวลผล.....	26
2.9	การสร้างกริดที่เหมาะสมบริเวณใกล้ขอบผนัง.....	26
2.10	ขั้นตอนการแก้ไขปัญหาหรือการจำลอง.....	27
2.11	ขั้นตอนหลังกระบวนการประมวลผล.....	28
2.12	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
บทที่ 3	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	30
3.1	การรวบรวมผลการทดลองจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
3.2	การศึกษาวิธีการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม FLUENT 2020.....	31
3.3	การสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม FLUENT 2020.....	31
3.4	แบบจำลองและวิธีการตั้งค่าอ็เจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์คั้งที่ในโปรแกรม ANSYS.....	38
บทที่ 4	ผลการจำลองและการวิเคราะห์ผล.....	44
4.1	เปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างผลการจำลองของ CPM Ejector และ CRMC Ejector.....	44
4.2	เปรียบเทียบพฤติกรรมการไหลภายใน Ejector ระหว่างผลการจำลองของ CPM Ejector และ CRMC Ejector.....	53
4.3	แนวโน้มของผลการจำลองของ CPM Ejector และ CRMC Ejector.....	57
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	59
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	59
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	60
	เอกสารอ้างอิง.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญตาราง

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	30
ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงผลการทดลองของ Ejector.....	30
ตารางที่ 3.2 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลง โมเมนต์ตัมคองที่.....	41
บทที่ 4 ผลการจำลองและการวิเคราะห์ผล.....	44
ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างผลการจำลองของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิเครื่องระเหย 4.5 องศาเซลเซียส.....	44
ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างผลการจำลองของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียส.....	46
ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างผลการจำลองของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิเครื่องระเหย 10.5 องศาเซลเซียส.....	47
ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างผลการจำลองของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิเครื่องระเหย 13.5 องศาเซลเซียส.....	49
ตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างผลการจำลองของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 135 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียส.....	50
ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างผลการจำลองของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 140 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียส.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ 4.7 ค่าความดันวิกฤตของ CPM Ejector และ CRMC Ejector, % การเพิ่มขึ้นของ Rm และ % การลดลงของ Pcri เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอคังที่อยู่ 130 องศาเซลเซียส.....	57
ตารางที่ 4.8 ค่าความดันวิกฤตของ CPM Ejector และ CRMC Ejector, % การเพิ่มขึ้นของ Rm และ % การลดลงของ Pcri เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอคังที่อยู่ 7.5 องศาเซลเซียส.....	58



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป

บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
รูปที่ 2.1 ระบบทำความเย็นแบบ Ejector refrigeration system.....	4
รูปที่ 2.2 ภาพแสดงส่วนของEjector ในระบบทำความเย็น.....	5
รูปที่ 2.3 แสดงช่วงการทำงานของ Ejector.....	6
รูปที่ 2.4 การไหลแบบคงตัวของของไหลผ่านท่อแอดิยาติก.....	7
รูปที่ 2.5 สภาวะที่เกิดขึ้นจริง สภาวะสแตกเนชั่นที่เกิดขึ้นจริง และสภาวะสแตกเนชั่นไอเซนโทรปิกของของไหล บนกราฟ h-s.....	8
รูปที่ 2.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงหน้าการไหลสำหรับการไหล แบบความเร็วต่ำกว่าความเร็วเสียง และ ความเร็วเหนือกว่าความเร็วเสียง.....	10
รูปที่ 2.7 แสดงคุณสมบัติของไหลที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหัวพ่น-หัวกระจายหรือหัวพ่นลู่ออกและ ตำแหน่งคอขวดเป็นสมบัติวิกฤต เมื่อ $Ma_c = 1$ .....	10
รูปที่ 2.8 ผลกระทบของความดันกลับ ต่อการกระจาย ความดันตลอดหัวพ่นลู่ออก.....	11
รูปที่ 2.9 ผลกระทบของความดันกลับ (back pressure) ต่อการไหลผ่านหัวพ่นลู่ออก.....	12
รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติการไหล ผ่านคลื่นกระแทกตั้งฉาก.....	14
รูปที่ 2.11 กราฟแสดงลักษณะของความเร็วในการไหลแบบปั่นป่วน.....	18
รูปที่ 2.12 The universal law of wall.....	20
รูปที่ 2.13 Geometry of CRMC ejector.....	23
รูปที่ 2.14 แสดงขนาดของกริดบริเวณใกล้ขอบผนัง เมื่อใช้ค่า wall $y^+$ ประมาณ.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป (ต่อ)

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	30
รูปที่ 3.1 The Flow Chart of CFD Methodology.....	32
รูปที่ 3.2 แสดงรูปร่างแบบจำลองแบบสมมาตรตามแนวแกน (2d-Dimensionaxis-Symmetry) .....	33
รูปที่ 3.3 แสดงรูปร่างของ Mesh บริเวณ Primary Nozzle และ Secondary Nozzle.....	34
รูปที่ 3.4 แสดงรูปร่างของ Mesh อย่างละเอียดบริเวณ Mixing Chamber.....	34
รูปที่ 3.5 ตารางแสดงคุณภาพของ Mesh.....	35
รูปที่ 3.6 ภาพแสดง contour ของความเร็วของของไหล.....	37
รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะของอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่.....	38
บทที่ 4 ผลการจำลองและการวิเคราะห์ผล.....	44
รูปที่ 4.1 กราฟประสิทธิภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Rm และ ความดันเครื่อง ควบแน่นของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่อง กำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเครื่องระเหย 4.5 องศาเซลเซียส.....	45
รูปที่ 4.2 กราฟประสิทธิภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Rm และ ความดันเครื่อง ควบแน่นของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่อง กำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียส.....	47
รูปที่ 4.3 กราฟประสิทธิภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Rm และ ความดันเครื่อง ควบแน่นของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่อง กำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเครื่องระเหย 10.5 องศาเซลเซียส..	48
รูปที่ 4.4 กราฟประสิทธิภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Rm และ ความดันเครื่อง ควบแน่นของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่อง กำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเครื่องระเหย 13.5 องศาเซลเซียส....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 4.5 กราฟประสิทธิภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Rm และ ความดันเครื่อง ควบแน่นของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่อง กำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียส.....	51
รูปที่ 4.6 กราฟประสิทธิภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Rm และ ความดันเครื่อง ควบแน่นของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่อง กำเนิดไอ 140 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียส.....	53
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบคอนทัวร์เลขมีระหว่าง CPM Ejector (บน) และ CRMC Ejector (ล่าง) ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเครื่องระเหย 4.5 องศาเซลเซียส.....	54
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบคอนทัวร์เลขมีระหว่าง CPM Ejector (บน) และ CRMC Ejector (ล่าง) ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียส.....	54
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบคอนทัวร์เลขมีระหว่าง CPM Ejector (บน) และ CRMC Ejector (ล่าง) ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเครื่องระเหย 10.5 องศาเซลเซียส.....	55
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบคอนทัวร์เลขมีระหว่าง CPM Ejector (บน) และ CRMC Ejector (ล่าง) ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเครื่องระเหย 13.5 องศาเซลเซียส.....	55
รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบคอนทัวร์เลขมีระหว่าง CPM Ejector (บน) และ CRMC Ejector (ล่าง) ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 135 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียส.....	56
รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบคอนทัวร์เลขมีระหว่าง CPM Ejector (บน) และ CRMC Ejector (ล่าง) ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 140 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียส.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในนามของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## รายการสัญลักษณ์

$m$ อัตราการไหลของมวล, $\text{kg s}^{-1}$	$\Phi_p$ สัมประสิทธิ์การสูญเสียระหว่าง ทางออกหัว พ่นและส่วนห้องการดูด
P ความดัน, Pa	$\Phi_m$ สัมประสิทธิ์การสูญเสียของการ ผสม
T อุณหภูมิ, K	$\Phi_{mp}$ สัมประสิทธิ์การสูญเสียของ การผสมที่ สภาวะ breakdown
M เลขมัค	COP สัมประสิทธิ์สมรรถนะ
k อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ	$Q_e$ อัตราการถ่ายเทพลังงานความ ร้อนเข้าสู่เครื่องระเหย, $\text{J s}^{-1}$
A พื้นที่, $\text{m}^2$	$Q_g$ อัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ เครื่องกำเนิดไอ, $\text{J s}^{-1}$
$C_p$ ค่าความร้อนจำเพาะเมื่อความดันคงที่, $\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	$W$ กำลังของปั๊ม, $\text{Js p}$
u ความเร็ว, $\text{m s}^{-1}$	
a ความเร็วที่ความเร็วเสียง, $\text{m s}^{-1}$	
R ค่าคงที่ของแก๊ส , $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	
Rm ค่า Entrainment Ratio	
AR Area ratio	
$A_r$ Ejector Area Ratio	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

##### (Statement and Significance of The Problems)

ในปัจจุบันเทคโนโลยีและนวัตกรรมของโลกมีการเติบโตอย่างก้าวกระโดด แต่ในมุมกลับกัน สภาพแวดล้อมบนโลกกลับแย่ลงไปอย่างเห็นได้ชัด มีการกล่าวถึงปัญหาด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างอย่างแพร่หลาย ที่มีแนวโน้มว่าจะส่งผลกระทบต่อร้ายแรงในอนาคตอันใกล้ มีองค์กรณ์จำนวนมากที่ออกมารณรงค์และแสดงให้เห็นถึงความสำคัญในการร่วมมือช่วยกันบรรเทาปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคตได้แก่ ปัญหาโลกร้อน ที่ส่งผลให้อุณหภูมิของโลกเพิ่มสูงขึ้นต่อเนื่องจนเกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse Effect) ปัญหาที่แท้จริงของประเทศไทยคืออัตราการใช้พลังงานสูงกว่าอัตราการผลิตพลังงาน ส่งผลให้พลังงานที่ผลิตภายในประเทศไม่เพียงพอจนท้ายที่สุดประเทศของเราจึงจำเป็นต้องนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ ซึ่งสิ่งที่ตามมาจากการนำเข้าพลังงานนั้นคือภาระค่าไฟฟ้าที่สูงขึ้นนั่นเอง ถ้าหากเรามองย้อนกลับมาที่การใช้ไฟฟ้าในภาคครัวเรือน ส่วนใหญ่จะใช้ไปกับเครื่องปรับอากาศ ซึ่งเป็นระบบทำความเย็นแบบอัดไอ มีกลไกในการทำงานคือการเพิ่มแรงดันให้กับสารทำความเย็นในระบบโดยใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อขับเคลื่อน นี่จึงเป็นอีกหนึ่งเครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือนที่ใช้งานพลังงานไฟฟ้ามหาศาล

ต่อมาจึงมีการพัฒนาระบบทำความเย็นที่ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบเรียกว่าระบบทำความเย็นแบบ Ejector Refrigeration System เป็นระบบที่อาศัยหลักการจากผลต่างของความเร็วและความดันที่เกิดขึ้นในสารทำความเย็นในอุปกรณ์ที่เรียกว่า Ejector กระบวนการดังกล่าวมีการใช้พลังงานไฟฟ้าเข้ามาสร้างการขับเคลื่อนภายในปริมาณที่ลดลง โดยมีการพลังงานความร้อนมาใช้เป็นหลัก ซึ่งอาจมาจากธรรมชาติ ได้แก่ พลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพ พลังงานแสงอาทิตย์ รวมไปถึงพลังงานความร้อนที่เหลือจากกระบวนการสันดาป และเพื่อให้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอย่างสูงสุด งานวิจัยฉบับนี้จึงเลือกใช้น้ำ ( $H_2O$ ) เป็นสารทำความเย็นในระบบ เนื่องจากหากการเกิดรั่วไหลของสารทำความเย็น น้ำจะไม่ก่อให้เกิดสภาวะเรือนกระจก ทำให้ระบบทำความเย็นแบบ Ejector Refrigerant System เป็นระบบที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอย่างสมบูรณ์

งานวิจัยชิ้นนี้จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาอุปกรณ์ Ejector ที่นำมาใช้งานภายในระบบทำความเย็นดังกล่าว โดยการใช้แบบจำลองทาง-คณิตศาสตร์ของโปรแกรมวิเคราะห์เชิงตัวเลข FLUENT ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ผลของงาน และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2020 เพื่อศึกษาลักษณะหรือพฤติกรรมการไหลภายในอุปกรณ์ Ejector ซึ่งจุดนี้เป็นข้อได้เปรียบของ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การใช้เทคนิค CFD เนื่องจากการศึกษาการไหลภายในในอุปกรณ์ อาจทำได้ยากในการทดลองจริง แต่ภายในโปรแกรม FLUENT 2020 R2 มีการแสดงผลที่เป็นภาพความเร็วการเคลื่อนที่ของสารทำความเย็นภายในอุปกรณ์ มีการแบ่งสีที่บอกถึงระดับความเร็วที่จุดต่าง ๆ ได้อย่างชัดเจน (Contour) ทำให้ผู้วิจัยสามารถเปลี่ยนรูปร่างทางเลขาคณิตของ Ejector เพื่อศึกษาผลของการไหลที่เปลี่ยนไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังช่วยประหยัดเวลา และงบประมาณที่ใช้จากการทดลองจริงมากขึ้นอีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา (Goal and Objective)

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีการไหลและปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ Ejector เพื่อใช้ในพัฒนาประสิทธิภาพในการเพิ่มแรงดันของสารทำความเย็นภายในระบบทำความเย็นแบบ Ejector Refrigerant System ที่ใช้งานในสภาวะอากาศร้อนและระบายความร้อนโดยเครื่องควบแน่นผ่านหอทำความเย็น (Cooling Tower) โดยใช้ความสัมพันธ์ในทางอุณหพลศาสตร์และความดัน สำหรับการไหลแบบอัดตัวได้ ร่วมกับโปรแกรมวิเคราะห์เชิงตัวเลข FLUENT 2020 ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวเป็นที่ยอมรับและมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ประกอบด้วย

1. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบ CPM Ejector และ CRMC Ejector
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหล และปรากฏการณ์ Choke ที่เกิดขึ้นภายใน Ejector ด้วยเทคนิค CFD ที่ใช้โมเดลแบบ CRMC Ejector
3. เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบ Ejector ที่ใช้น้ำเป็นสารทำความเย็นในการทำงาน

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา (Research hypothesis)

1. อัตราการไหลจากเทคนิค CFD แบบ CRMC Ejector มีค่าสูงกว่า CPM Ejector
2. CRMC Ejector มี Critical Pressure ที่ต่ำกว่า CPM Ejector
3. มีแนวทางในการออกแบบ Ejector ที่ให้ประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 1.4 ขอบเขตการศึกษา (Scope or Limitation of the study)

1. ใช้น้ำ (H<sub>2</sub>O) เป็นสารทำความเย็นในระบบ
2. เครื่องกำเนิดไอ (Boiler) ทำงานอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 130-140 องศาเซลเซียส
3. เครื่องระเหย (Evaporator) ทำงานอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 4.5-13.5 องศาเซลเซียส
4. กำหนดให้ Ejector Area Ratio มีค่าเท่ากัน
5. ในส่วนของ Ejector ไม่มีการถ่ายเทความร้อนเข้าหรือออกจากระบบ
6. กำหนดความคล้ายคลึงทางจลศาสตร์ของไหลและทางรูปทรงเรขาคณิตของ Ejector

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดหวังว่าจะได้รับ

ได้ทราบถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบทำความเย็น Ejector Refrigeration System โดยเปรียบเทียบสารทำความเย็นที่อยู่ในขอบเขตของการศึกษา และสามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่ส่งผลกับประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นภายในEjector ผ่านการวิเคราะห์เชิงตัวเลข



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 2

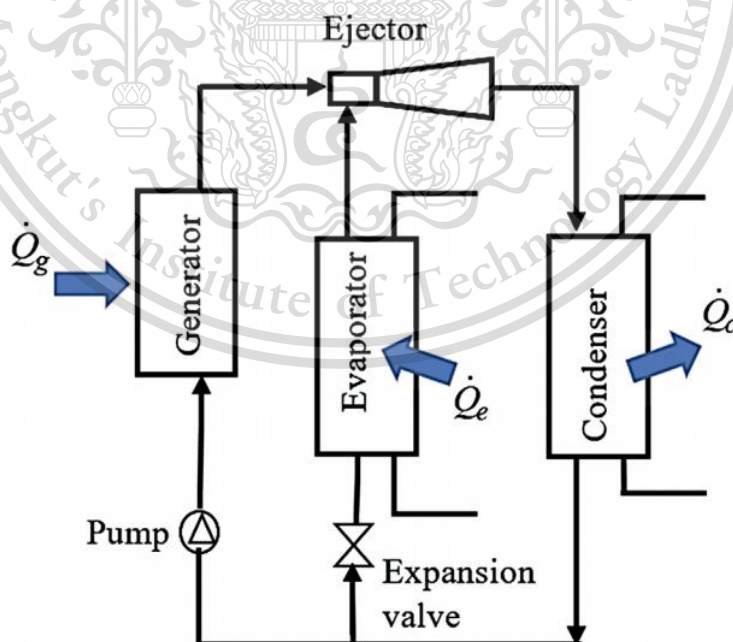
### งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กล่าวนำ

บทนี้กล่าวถึงงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบ Ejector refrigeration system และศึกษาพฤติกรรมการไหลเชิงตัวเลขภายใน Ejector โดยใช้ โปรแกรม FLUENT 2020 เพื่อนำมาเปรียบเทียบความแม่นยำระหว่างแบบจำลอง CMP Ejector และ CRMC Ejector กับผลการทดลองและหาแบบจำลองที่แม่นยำที่สุดในการทำนายพฤติกรรมการไหลของระบบทำความเย็นแบบ Ejector refrigeration system ที่ใช้น้ำ

#### 2.2 ระบบทำความเย็นแบบ Ejector refrigeration system

ในการทำงานของระบบทำความเย็นแบบ Ejector refrigeration system ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยใช้ Ejector แทนเครื่องอัดไอทางกล ในระบบทำความเย็นแบบดั้งเดิม



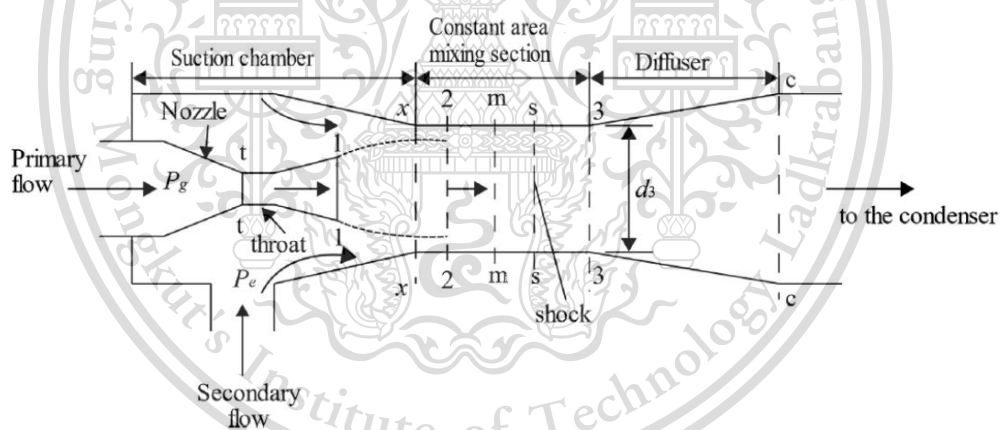
รูปที่ 2.1 ระบบทำความเย็นแบบ Ejector refrigeration system [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น โดยผู้ดูแลเนื้อหาเว็บไซต์ขอสงวนสิทธิ์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โดยพลังงานความร้อนจะถูกใช้เป็นแหล่งต้นกำเนิดพลังงานให้กับเครื่องกำเนิดไอ (generator) เพื่อผลิต ไอน้ำ (water vapor) ที่มีความดันสูงและอุณหภูมิสูง หรือ เรียกว่าของไหลปฐมภูมิ (primary fluid) อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอซึ่งปกติแล้วถูกใช้ในช่วง 130 องศาเซลเซียส ถึง 150 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปทรง Ejector และชนิดของสารทำความเย็นที่ถูกใช้เป็นสารทำงาน โดยที่ของไหลปฐมภูมิที่ออกจากเครื่องกำเนิดไอนั้นอยู่ในสภาวะไออิ่มตัว (saturated vapor) ของไหลปฐมภูมิจะไหลผ่านส่วนหัวพ่น (nozzle) ที่อยู่ภายใน Ejector ณ ที่ทางออกของหัวพ่น ของไหลปฐมภูมิจะมีความเร็วเหนือเสียง (supersonic) และมีความดันสถิตต่ำ ซึ่งจากความดันสถิตต่ำที่ทางออกหัวพ่นนี้ ทำให้ของไหลทุติยภูมิ (secondary fluid) ที่อยู่ภายในเครื่องระเหย (evaporator) ระเหยและทำให้ส่วนที่เป็นของเหลวของของไหลทุติยภูมิมีอุณหภูมิลดลง นำไปสู่การทำคามเย็น ไอของของไหลทุติยภูมิจะถูกดูดเข้าสู่ Ejector จากนั้นการไหลของของไหลทั้งสองจะรวมกันในส่วนห้องผสม (mixing chamber) ของ Ejector และเกิดคลื่นกระแทกตั้งฉาก (normal shockwave) ณ ส่วนที่เรียกว่าห้องผสมหน้าตัดคงที่ (constant-area mixing section) ทำให้หลังผ่านคลื่นกระแทกตั้งฉาก ความดันสถิตและอุณหภูมิตั้งขึ้นอย่างฉับพลันและไหลผ่านตัวกระจาย (diffuser) ไปยังเครื่องควบแน่น (condenser) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ภาพแสดงส่วนของ Ejector ในระบบทำความเย็น [1]

จากนั้นความดันที่ออกจากตัวกระจายของของไหลจะเป็นความดันทำงานของเครื่องควบแน่นของไหลที่มีสภาวะเป็นไอจะควบแน่นกลับมาเป็นของไหลที่มีสภาวะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิภายนอก (ambient temperature) และถูกนำไปย้อนกลับสู่เครื่องกำเนิดไอน้ำผ่านปั๊ม (pump) เพื่อให้เป็นวัฏจักรที่สมบูรณ์พลังงานที่ถูกขับออกเป็นความร้อนโดยเครื่องควบแน่นยังสามารถนำพลังงานความร้อนเหลือทิ้งไปใช้สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดย King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

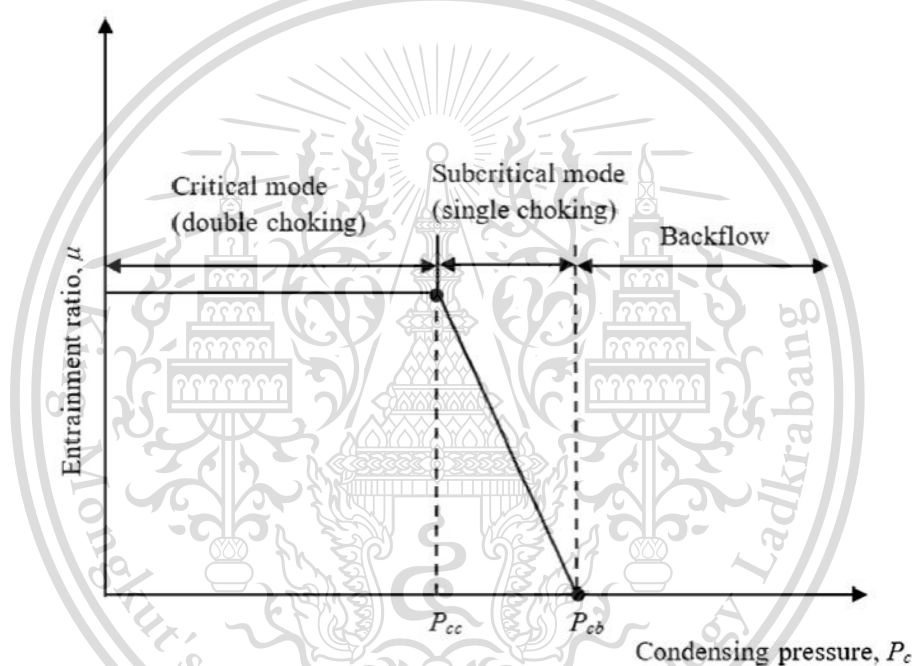
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การทำงานของระบบทำความเย็นแบบ Ejector ค่าประสิทธิภาพ (Entrainment Ratio) จะเป็นไปตามดังที่แสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งมีลักษณะอยู่ 2 แบบตามสภาวะในการทำงานได้แก่

1. สภาวะการทำงานในช่วง Critical mode ค่า Entrainment Ratio จะมีค่าคงที่และ Condensing Pressure มีค่าต่ำกว่า Critical Condensing Pressure

2. สภาวะการทำงานในช่วง Subcritical mode ค่า Condensing Pressure จะอยู่ระหว่าง Critical Condensing Pressure และ Breakdown Pressure ในภาวะการทำงานแบบ Subcritical ค่าประสิทธิภาพ (Entrainment Ratio) จะค่อย ๆ ลดลงเมื่อ Condensing Pressure สูงขึ้น จนกระทั่งเป็นศูนย์ (เกิดการไหลย้อนกลับของสารทำงาน)



รูปที่ 2.3 แสดงช่วงการทำงานของ Ejector [1]

การทำงานของระบบทำความเย็นแบบ Ejector ในช่วงการทำงานแบบวิกฤตค่า Entrainment Ratio มีค่าคงที่ และ Condensing Pressure มีค่าต่ำกว่า Critical Condensing Pressure ในการทำงานแบบ Subcritical ค่า Condensing Pressure จะอยู่ระหว่าง Critical Condensing Pressure และ Breakdown Pressure ในภาวะการทำงานแบบ Subcritical ค่า Entrainment Ratio จะลดลงเมื่อ Condensing Pressure สูงขึ้น จนกระทั่งเป็นศูนย์ (เกิดการไหลย้อนกลับของสารทำงาน) ดังแสดงในรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

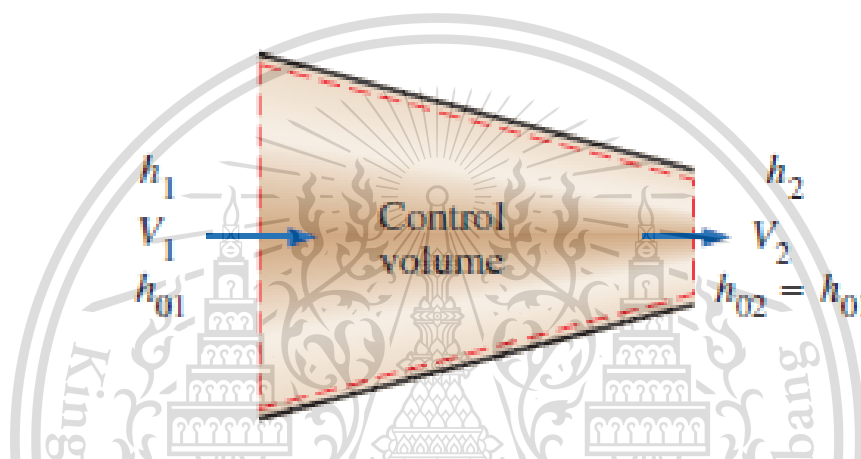
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.3 ทฤษฎีพื้นฐานของการไหลแบบอัดตัวได้

### 2.3.1 สถานะสแตกเนชัน (Stagnation)

การไหลแบบอัดตัวได้ด้วยความเร็วสูง พบได้ในอุปกรณ์หลายชนิด เช่น เครื่องบิน หรือ เครื่องบินไอพ่น โดยมีการกำหนดสถานะอ้างอิงที่เรียกว่า สถานะสแตกเนชัน เพื่อให้การวิเคราะห์มีความสะดวกมากยิ่งขึ้น ในระบบจำเป็นต้องมีการพิจารณาพลังงานจลน์เนื่องมีการไหลด้วยความเร็วสูง กล่าวคือ เมื่อมีการพิจารณาพลังงานจลน์ ( $\frac{V^2}{2}$ ) รวมกับ Static Enthalpy ( $h$ ) เท่ากับ Stagnation enthalpy ( $h_0$ ) จะเป็นดังสมการข้างล่างนี้โดยมีหน่วยเป็น kJ/kg

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



รูปที่ 2.4 การไหลแบบคงตัวของของไหลผ่านท่อแอดิแบติก [7]

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

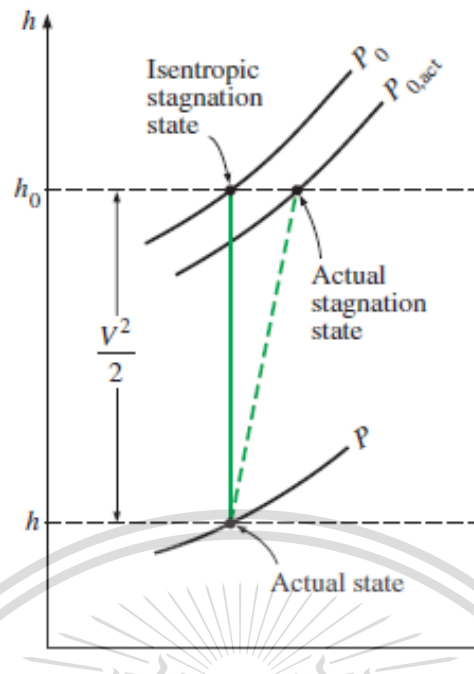
จากรูปที่ 2.3 และสมการ (2.2) เมื่อของไหลถูกทำให้หยุดนิ่ง จะได้ว่า Stagnation enthalpy เป็นเอนทัลปีของของไหลเมื่อของไหลถูกให้หยุดนิ่งตามกระบวนการ Adiabatic พลังงานจลน์ของไหลจะถูกเปลี่ยนเป็นเอนทัลปี ( $u+Pv$ ) ซึ่งจะส่งผลให้อุณหภูมิและความดันของของไหลสูงขึ้น

โดยทั่วไปกระบวนการสแตกเนชันมีลักษณะใกล้เคียงกับกระบวนการไอเซนโทรปิก จึงสามารถประมาณให้กระบวนการสแตกเนชันเป็นกระบวนการไอเซนโทรปิกได้ และถือได้ว่าสมบัติสแตกเนชันเป็นสมบัติสแตกเนชันไอเซนโทรปิกตามดังที่แสดงในรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.5 สถานะที่เกิดขึ้นจริง สถานะสแตกเนชันที่เกิดขึ้นจริง และสถานะสแตกเนชันไอเซนโทรปิกของของไหลบนกราฟ h-s [7]

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

$$C_p T_0 = C_p T + \frac{v^2}{2} \quad (2.3)$$

หรือ

$$T_0 = T + \frac{v^2}{2C_p} \quad (2.4)$$

โดย  $T_0$  คือ อุณหภูมิสแตกเนชัน มีหน่วยเป็น Kelvin (K)

ในทำนองเดียวกันกับอุณหภูมิ เมื่อของไหลถูกทำให้หยุดนิ่งตามกระบวนการไอเซนโทรปิก ความดัน สแตกเนชัน  $P_0$  จะมีความสัมพันธ์กับความดันสถิต  $P$  ดังนี้

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

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

$$\frac{P_0}{P} = \left(\frac{T_0}{T}\right)^{1/(k-1)} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 2.3.2 ความเร็วเสียงและเลขมัค (Speed of sound and Mach number)

ปัจจัยที่มีความสำคัญอีกตัวหนึ่งในการศึกษาการไหลแบบอัดตัวได้คือ ความเร็วของเสียงหรือความเร็วโซนิก (velocity of sound or sonic speed) สำหรับสารทำงานที่เป็นแก๊สอุดมคติ จะได้สมการดังนี้

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

เนื่องจาก R เป็นค่าคงที่ ส่วน k เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ดังนั้นความเร็วเสียงของแก๊สอุดมคติจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ

ความเร็วเสียงมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์การไหลแบบอัดตัวได้เพราะมีความเร็วเสียงจะถูกใช้อ้างอิงเพื่อระบุสภาพการไหลของของไหล (หรือการเคลื่อนที่ของวัตถุ) ในเทอมตัวแปรที่เรียกว่าเลขมัค (Mach number, Ma)

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

### 2.3.3 อิทธิพลของพื้นที่หน้าตัดการไหลต่อความเร็วในการไหลของของไหล (Variation of fluid velocity with flow area)

ในระหว่างการไหลของของไหลผ่านอุปกรณ์หลายชนิด เช่น หัวพ่น หัวกระจายและกักกันสมบัติของของไหลจะมีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางของการไหลเป็นหลักจึงถือเป็นการไหลแบบไอเซนโทรปิกในหนึ่งมิติได้โดยมีความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้

ความสัมพันธ์ของพื้นที่หน้าตัดการไหลกับสมบัติต่าง ๆ ในระบบที่มีการไหลแบบไอเซนโทรปิกในหนึ่งมิติคือ ความดัน อุณหภูมิ ความหนาแน่น ความเร็วในการไหลและเลขมัค จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

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

1. Subsonic flow หรือ การไหลที่มีความเร็วต่ำกว่าความเร็วเสียง ( $Ma < 1$ ) เทอม  $1 - Ma^2$  จะมีเครื่องหมายเป็นบวก การไหลในท่อลู่ออก ( $dA > 0$ ) จะทำให้ความดันเพิ่มขึ้นในขณะที่ความเร็วจะลดลง ในทางตรงกันข้าม การไหลในท่อลู่อเข้า ( $dA < 0$ ) จะทำให้ความดันลดลงในขณะที่ความเร็วจะเพิ่มขึ้น

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

2. Supersonic flow หรือ สำหรับการไหลที่มีความเร็วสูงกว่าความเร็วเสียง ( $Ma > 1$ )

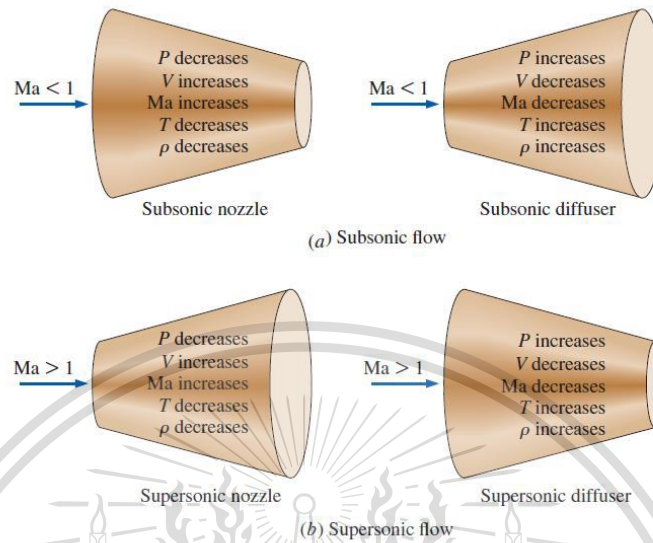
เทอม  $1 - Ma^2$  จะมีเครื่องหมายเป็นลบ การไหลในท่อลู่ออก ( $dA > 0$ ) จะทำให้ความดันลดลงในขณะที่ความเร็วจะเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม การไหลในท่อลู่อเข้า ( $dA < 0$ ) จะ

ทำให้ความดันเพิ่มขึ้นในขณะที่ความเร็วจะลดลง

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

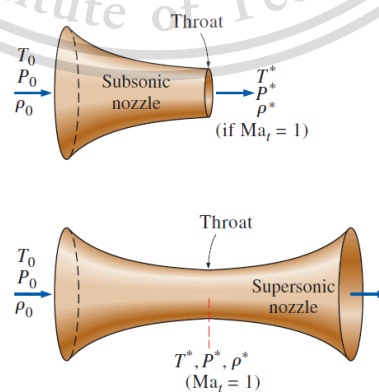
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โดยนิยามแล้ว อุปกรณ์ที่เพิ่มความเร็วในการไหลเรียกว่า หัวพ่น (Nozzle) และอุปกรณ์ที่ลดความเร็วในการไหลเรียกว่าหัวกระจาย (Diffuser) ผลของการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดการไหลสำหรับการไหลแบบความเร็วต่ำกว่าความเร็วเสียงและความเร็วเหนือกว่าความเร็วเสียง ได้ถูกแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงหน้าการไหลสำหรับการไหลแบบความเร็วต่ำกว่าความเร็วเสียง และ ความเร็วเหนือกว่าความเร็วเสียง [7]

จะเห็นได้ว่าการใช้หัวพ่นเพื่อเพิ่มความเร็วในการไหลจากความเร็วต่ำกว่าความเร็วเสียง (Subsonic flow) ให้เป็นความเร็วเหนือกว่าความเร็วเสียง (Supersonic flow) ต้องมีการติดตั้งหัวกระจายเข้ากับหัวพ่น เป็นหัวพ่น-หัวกระจาย หรือหัวพ่นลู่เข้า-ลู่ออก โดยในช่วงแรกของไหลจะผ่านช่วงหัวพ่นหรือช่วงลู่เข้า ซึ่งเลขมัคจะเพิ่มขึ้นและจะมีค่าเป็นหนึ่งตำแหน่งคอคอดจากนั้นของไหลจะมีความเร็วสูงขึ้นสู่ระดับเหนือกว่าความเร็วเสียงในช่วงหัวกระจายหรือช่วงลู่ออก ดังแสดงในรูปที่ 2.7



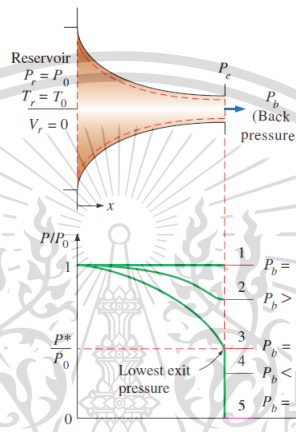
รูปที่ 2.7 แสดงคุณสมบัติของไหลที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหัวพ่น-หัวกระจาย หรือหัวพ่นลู่เข้า-ลู่ออกและตำแหน่งคอคอดเป็นสมบัติวิกฤต เมื่อ  $Ma_t = 1$  [7]

## 2.4 การไหลแบบไอเซนโทรปิกผ่านหัวพ่น

หัวพ่นลู่เข้าหรือหัวพ่นลู่เข้า-ลู่ออก มักถูกประยุกต์ใช้อย่างหลากหลายในทางวิศวกรรมรวมไปถึงกังหันไอและกังหันแก๊ส ระบบแรงขับเคลื่อนในอากาศยานและยานอวกาศ ในส่วนนี้จะมีการพิจารณาผลกระทบของความดันกลับ (back pressure) หรือ ความดันด้านหลังของเขตขาออกของหัวพ่นต่อความเร็วขาออก อัตราการไหลของมวลและการกระจายตัวของความดันตลอดหัวพ่น

### 2.4.1 หัวพ่นลู่เข้า (Converging nozzle)

พิจารณาการไหลที่มีความเร็วต่ำกว่าความเร็วเสียงที่ผ่านหัวพ่นลู่เข้าดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ผลกระทบของความดันกลับ ต่อการกระจายความดันตลอดหัวพ่นลู่เข้า [7]

ทางเข้าหัวพ่นถูกติดกับแหล่งกักเก็บต้นกำเนิด (reservoir) ที่มีความดัน  $P$ , และอุณหภูมิ  $T$ , และสมมติแหล่งกักเก็บนั้นใหญ่เพียงพอตั้งนั้นความเร็วทางเข้าหัวพ่นเมื่อเทียบกับขาออกนั้นมีค่าน้อยจนเข้าใกล้ศูนย์และการไหลผ่านหัวพ่นที่การพิจารณาให้เป็นไอเซนโทรปิก ความดันสแตกเนชันและอุณหภูมิสแตกเนชันของของไหลที่หน้าตัดใด ๆ ผ่านหัวพ่นจะเท่ากับความดันและอุณหภูมิแหล่งกักเก็บ (reservoir) ตามลำดับ

ทำการลดความดันกลับ (back pressure) และสังเกตผลกระทบลัพท์ับการกระจายความดันตลอดความยาวของหัวพ่นดังแสดงในรูปที่ 2.8 จะสังเกตได้ว่าเมื่อความดันกลับถูกลดเข้าสู่  $P_3 = P^*$  คือความดันที่ต้องการเพื่อเพิ่มความเร็วของไหลให้เป็นความเร็วเสียงที่ระนาบทางออกหรือคอคอ) การไหลของมวลจะไปถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่งและการไหลนี้ถูกเรียกว่าเกิดโซ้ค (choked)

สำหรับการไหลที่ไหลผ่านพื้นที่ที่กำหนดและคุณสมบัติสแตกเนชัน  $T_0$  และ  $P_0$  อัตราการไหลของมวลสูงสุดจะมีค่าเกิดขึ้นเมื่อ  $Ma = 1$  และเกิดขึ้นที่พื้นที่การไหลที่น้อยที่สุดที่คอคอ ( $A^*$ ) จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$m_{max} = P_0 \frac{A^*}{\sqrt{T_0}} \sqrt{\frac{k+1}{2}} \frac{2^{(K+1)/(k-1)}}{\sqrt{k}} \quad (2.11)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาใดๆอย่างองถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

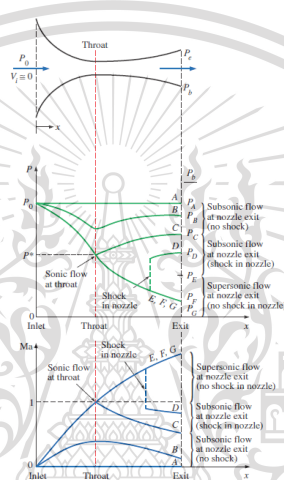
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่การไหลที่ไหลผ่านหลายผ่านหัวพ่นสัมพันธ์กับพื้นที่คอขวดโดยมีอัตราไหลของมวลและคุณสมบัติสแตกนชันของของไหลเหมือนกันจะมีความสัมพันธ์ดังนี้

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

#### 2.4.2 หัวพ่นลู่เข้า-ลู่ออก (converging-diverging nozzle)

การบังคับให้ของไหลผ่านหัวพ่นลู่เข้า-ลู่ออกไม่ได้ยืนยันว่าของไหลจะถูกเร่งเข้าสู่ความเร็วเหนือเสียง ในความจริงของไหลมักจะถูกพบว่ามีความเร็วลดลงในส่วนของลู่ออกแทนที่จะมีความเร็วเพิ่มถ้าความดันกลับนั้นไม่ได้อยู่ในช่วงที่ถูกต้อง เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ พิจารณารูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ผลกระทบของความดันกลับ (back pressure) ต่อการไหลผ่านหัวพ่นลู่เข้า-ลู่ออก [7]

ของไหลไหลเข้าหัวพ่นด้วยความเร็วต่ำที่ความเร็วสแตกนชัน  $P_0$  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) และไปถึงค่าสูงสุดที่คอขวดแต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วจะสูญเสียในส่วนที่สอง (ส่วนลู่ออก) หรือเรียกว่าหัวกระจาย (diffuser) ความดันจะลดลงในส่วนลู่เข้า ถึงจุดต่ำสุดที่คอขวด และเพิ่มขึ้นที่การเสียความเร็วในส่วนลู่ออก

2. เมื่อ  $P_b = P_c$  ความดันที่คอขวดจะมีค่า  $P^*$  และของไหลจะมีค่าความเสียงที่คอขวดแต่ในส่วนของการลู่ออกของหัวพ่นจะทำหน้าที่เหมือนหัวกระจาย (diffuser) ลดความเร็วของไหลไปเป็นความเร็วซับโซนิค อัตราการไหลของมวลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันกลับ (back pressure) ลดลงจนกระทั่งถึงค่าสูงสุดที่สามารถถึงได้โดยที่  $P_b = P^*$  เป็นความดันต่ำสุดที่สามารถให้ได้ที่คอขวดและความเร็วเสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งหากมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มาไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

คือความเร็วสูงสุดที่สามารถถึงได้เมื่อใช้หัวพ่นลู่เข้า ดังนั้น การลดลงของ  $P_b$  ลงกว่านี้จะไม่มีความกระทบกับการไหลของของไหลในส่วนลู่เข้าของหัวพ่นหรืออัตราการไหลของมวลผ่านหัวพ่น อย่างไรก็ตามการลดนี้จะมีอิทธิพลต่อลักษณะของการไหลในส่วนของการลู่ออกของหัวพ่น

3. เมื่อของไหลมีความเร็วเท่ากับความเร็วเสียง (ความดันมีค่าเท่ากับ  $P^*$ ) ณ ตำแหน่งคอคอดของหัวพ่น ความเร็วจะเพิ่มขึ้นในส่วนลู่ออกของหัวพ่น (Diverging Section) และจะเกิดคลื่นกระแทกตั้งฉากในช่วงระหว่างคอคอดและทางออกของหัวพ่นทำให้ความเร็วลดลงจนต่ำกว่าเสียงและความดันเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน การไหลผ่านคลื่นกระแทกตั้งฉากเป็นกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ (ไม่สามารถประมาณเป็น กระบวนการ Isentropic ได้) ตำแหน่งของคลื่นกระแทกตั้งฉากจะเลื่อนไปตามแนวทิศทางการไหลเมื่อความดันของของไหลที่ตำแหน่งทางออกของหัวพ่นลดลงและตำแหน่งของคลื่นกระแทกตั้งฉากจะอยู่ที่ระนาบทางออกของหัวพ่นเมื่อความดัน ณ ทางออกของหัวพ่นมีค่าลดลงจนเท่ากับ  $P_E$  ในกรณีนี้จะสามารถประมาณเป็นกระบวนการ Isentropic ได้ แต่อย่างไรก็ตามความเร็วจะลดลงจนต่ำกว่าเสียงเมื่อของไหลไหลออกจากหัวพ่น (เนื่องจากตำแหน่งของคลื่นกระแทกตั้งฉากอยู่ ณ ระนาบทางออกของหัวพ่นในกรณีที่มีความดันทางออกเท่ากับ  $P_E$ )

4. เมื่อความดันทางออกลดลงต่ำกว่า  $P_E$  การไหลภายในหัวพ่นหลังจากผ่านคอคอดจะเป็นความเร็วเหนือเสียงจนออกจากหัวพ่น และสามารถประมาณได้ว่าเป็นกระบวนการ Isentropic เมื่อความดันทางออกมีค่าเท่ากับ  $P_E$  จะเกิด Expansion waves ณ ตำแหน่งทางออกของหัวพ่น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Oblique Shocks

## 2.5 คลื่นกระแทก (Shock wave) และ Expansion waves

คลื่นเสียงถูกทำให้เกิดขึ้นโดยการรบกวนความดันเล็กน้อยที่น้อยมาก ๆ และเดินทางผ่านตัวกลางที่ความเร็วเสียง โดยที่จะมีช่วงความดันกลับบางค่าที่ทำให้เส้นบาง ๆ ที่เกิดขึ้นซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไหลอย่างฉับพลันโดยเกิดขึ้นที่ภายในการไหลของของไหลในหัว พ่นลู่เข้า-ลู่ออกภายใต้เงื่อนไขการไหลแบบความเร็วซูเปอร์โซนิก โดยเรียกส่วนนี้ว่าคลื่นกระแทก (shock waves)

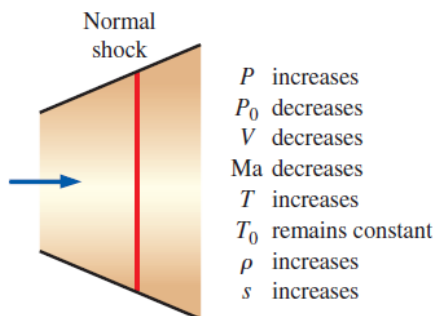
### คลื่นกระแทกตั้งฉาก (normal shock wave)

ระนาบตั้งฉากที่เกิดขึ้นกับทิศทางการไหลจะถูกเรียกว่า คลื่นกระแทกตั้งฉาก (normal shock waves) กระบวนการไหลผ่านคลื่นกระแทกนี้ถือเป็นกระบวนการที่ไม่สามารถย้อนกลับได้และไม่สามารถประมาณเป็นกระบวนการไอเซนโทรปิกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติการไหลผ่านคลื่นกระแทกตั้งฉาก [7]

## 2.6 กระบวนการและสภาวะในการทำงานภายในอีเจคเตอร์

### 2.6.1 Ejector model

ในกระบวนการผสมระหว่างของไหลปฐมภูมิและของไหลทุติยภูมิ ความเร็วของของไหลปฐมภูมิลดลงเนื่องจากแรงเฉือนระหว่างของไหลปฐมภูมิและของไหลทุติยภูมิ ในขณะเดียวกันความเร็วของของไหลทุติยภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น และเพื่อให้การผสมระหว่างของไหลทั้งสองมีค่าความดันรวมคงที่จึงได้มีการใช้สมมติฐานดังนี้

- i. ของไหลใน Ejector เป็นของไหลที่สามารถอัดตัวได้ และค่าความจุความร้อนจำเพาะไม่แปรผันตามอุณหภูมิเนื่องจากความเปลี่ยนแปลงของค่าความจุความร้อนจำเพาะมีค่าน้อยในช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน
- ii. การไหลอยู่ในสภาวะคงตัวและเป็นหนึ่งมิติ (เคลื่อนที่ตามแนว Ejector) ตลอดทั้งระบบ
- iii. ในส่วนของ Ejector ไม่มีการถ่ายเทความร้อนเข้าหรือออกจากระบบ เนื่องจากของไหลของระบบมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง จึงทำให้ระยะเวลาในการถ่ายเทพลังงานความร้อนมีค่าน้อย ส่งผลให้ค่าความร้อนสุทธิที่ถูกถ่ายเทมีค่าน้อย
- iv. ของไหลทั้งสองทำงานอยู่ในสถานะแก๊สอัดตัว
- v. ความเร็วก่อนเข้าหัวพ่น Supersonic มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความเร็วออกจากหัวพ่น
- vi. ในช่วงท่อผสมหน้าตัดคงที่ของ Ejector ความดันมีค่าคงที่ในช่วงการทำงานแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

vii. ในแต่ละช่วงของ Ejector ของระบบทำความเย็นเป็น ช่วงปริมาตรควบคุม (Control Volume)

## 2.6.2 การทำงานในสภาวะวิกฤต (Critical mode of operation)

ในการทำงานในสภาวะวิกฤต ทั้ง Primary Fluid และ Secondary Fluid เกิดการไหลแบบ Choked และใช้ Isentropic Flow ในการหาประสิทธิภาพ อัตราการไหลของมวลของ Primary Fluid ที่ไหลผ่านหัวพ่น สามารถหาค่าได้จาก

$$m_p = P_g \frac{A_t}{\sqrt{T_g}} \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{(k+1)/(k-1)}} \sqrt{\eta_p} \quad (2.13)$$

เลขมัคที่ตำแหน่งทางออกหัวพ่น ( $M_{p1}$ ) และ ความดันที่ทางออกหัวพ่นจากความสัมพันธ์ Isentropic

$$\left(\frac{A_{p1}}{A_t}\right)^2 \approx \frac{1}{M_{p1}^2} \left(\frac{2}{k+1} \left(1 + \frac{(k-1)}{2} M_{p1}^2\right)\right)^{(k+1)/(k-1)} \quad (2.14)$$

$$\frac{P_g}{P_{p1}} \approx \left(1 + \frac{(k-1)}{2} M_{p1}^2\right)^{k/(k-1)} \quad (2.15)$$

เลขมัคของ Primary Fluid ที่ตำแหน่งทางเข้าท่อผสมหน้าตัดคงที่ ( $M_{2p}$ ) และความดันที่ตำแหน่งหน้าตัดคงที่

$$\frac{P_{2p}}{P_{p1}} \approx \frac{\left(1 + \frac{(k-1)}{2} M_{p1}^2\right)^{(k+1)/(k-1)}}{\left(1 + \frac{(k-1)}{2} M_{2p}^2\right)^{(k+1)/(k-1)}} \quad (2.16)$$

พื้นที่ตั้งฉากของการไหลของ Primary Fluid ที่ตำแหน่งหน้าตัดคงที่ ( $A_{2p}$ ) หาได้จาก

$$\frac{A_{2p}}{A_{p1}} \approx \frac{\left(\frac{\phi_p}{M_{2p}}\right) \left(\frac{2}{k+1}\right) \left(1 + \frac{(k-1)}{2} M_{2p}^2\right)^{(k+1)/(2(k-1))}}{\left(\frac{1}{M_{p1}}\right) \left(\frac{2}{k+1}\right) \left(1 + \frac{(k-1)}{2} M_{p1}^2\right)^{(k+1)/(2(k-1))}} \quad (2.17)$$

ในสมการอัตราส่วนของพื้นที่ตั้งฉากของการไหล ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสีย ถูกนำมาคิดในช่วง Primary Fluid เคลื่อนที่จากทางออกหัวพ่น สู่อผสมหน้าตัดคงที่ ความสูญเสียนี้เกิดจากความหนืดของ Primary Fluid และ Secondary Fluid ที่ Boundary การไหลที่ไหลเข้าสู่ท่อผสมได้ถูกตั้งสมมุติฐานว่าเกิดการ Choked ด้วยเหตุนี้เลขมัคของ Secondary Fluid จึงเท่ากับ 1 ความดันของ Secondary Fluid ที่ตำแหน่ง 2 หาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\frac{P_e}{P_{2s}} \approx \left(1 + \frac{(k-1)}{2} M_{2s}^2\right)^{k/(k-1)} \quad (2.18)$$

อัตราการไหลของมวลของ Secondary Fluid สามารถคำนวณได้โดยวิธีเดียวกันกับของไหล Primary Fluid แต่ถูกดูดเข้าสู่ท่อผสมหน้าตัดคงที่โดยหาได้ดังนี้

$$\dot{m}_s = P_e \frac{A_{2s}}{\sqrt{T_e}} \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{(k+1)/(k-1)}} \quad (2.19)$$

$\eta_s$  คือ Isentropic Efficiency สำหรับการสูญเสียในการดูดของ Secondary Fluid พื้นที่หน้าตัดที่ตำแหน่ง 2 คือ  $A_3$  ซึ่งเป็นผลรวมของพื้นที่ตั้งฉากการไหลของ Primary Fluid ( $A_{2p}$ ) และ Secondary Fluid ( $A_{2s}$ )

$$A_{2p} + A_{2s} = A_3 \quad (2.20)$$

ณ ท่อผสม อุณหภูมิและเลขมัคของ Primary Fluid และ Secondary Fluid สามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{T_g}{T_{2p}} = 1 + \frac{(k-1)}{2} M_{2p}^2 \quad (2.21)$$

$$\frac{T_e}{T_{2s}} = 1 + \frac{(k-1)}{2} M_{2s}^2 \quad (2.22)$$

เมื่อของไหลทั้งสองผสมกันแล้ว จากการอนุรักษ์โมเมนตัมและพลังงานจะได้

$$\phi_m (\dot{m}_p u_{2p} + \dot{m}_s u_{2s}) = (\dot{m}_p + \dot{m}_s) u_m \quad (2.23)$$

$u_{2p}$  และ  $u_{2s}$  คือความเร็วของ primary fluid และ secondary fluid ตามลำดับ  $u_m$  คือความเร็วของกระแสที่ถูกผสม  $\phi_m$  คือสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน สมการอนุรักษ์พลังงานมีดังนี้

$$\dot{m}_p \left( C_p T_{2p} + \frac{u_{2p}^2}{2} \right) + \dot{m}_s \left( C_p T_{2s} + \frac{u_{2s}^2}{2} \right) = (\dot{m}_p + \dot{m}_s) \left( C_p T_m + \frac{u_m^2}{2} \right) \quad (2.24)$$

ความเร็วในท่อผสมสามารถหาได้จาก เลขมัคที่หาได้จากสมการที่ผ่านมาโดย

$$u_{2p} = M_{2p} a_{2p} \quad (2.25)$$

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

$$a_{2p} = \sqrt{kRT_{2p}} \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
และสำหรับความเร็วของ Secondary Fluid สามารถหาได้ในทำนองเดียวกัน

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หลังจากของไหลทั้งสองได้ผสมกันแล้ว เกิดคลื่นกระแทกตั้งฉากพร้อมทั้งความดันเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน สามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{P_3}{P_m} = 1 + \frac{2k}{k+1} (M_m^2 - 1) \quad (2.27)$$

และเลขมัค ณ ทางเข้า Diffuser (ตำแหน่ง 3) หาได้จาก

$$M_3^2 = \frac{1 + \frac{(k-1)}{2} M_m^2}{k M_m^2 - \frac{(k-1)}{2}} \quad (2.28)$$

การไหลผ่าน Diffuser ถูกตั้งสมมุติฐานว่าเป็นกระบวนการ Isentropic ด้วยเหตุนี้จึงสามารถคำนวณหาความดันควบแน่นวิกฤต (Critical Condensing Pressure) ได้จาก

$$\frac{P_{cc}}{P_3} \approx \left( 1 + \frac{(k-1)}{2} M_3^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (2.29)$$

จากสมการข้างต้นทั้งหมด ประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นภายใต้ภาวะการทำงานแบบวิกฤตสามารถหาได้ Entrainment Ratio,  $R_m$  เป็นตัวแปรสำคัญของประสิทธิภาพของระบบสามารถหาได้จาก

$$R_{mcc} = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_p} \quad (2.30)$$

## 2.7 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในโปรแกรมการวิเคราะห์เชิงตัวเลข FLUENT 2020

### 2.7.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการไหล

ของไหลคือ สสารที่เปลี่ยนรูปร่างหรือไหลด้วยความเค้นเฉือน ของเหลวและแก๊สต่างก็เป็นรูปแบบหนึ่งของของไหล แต่ของเหลวเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ หรือสามารถอัดตัวได้ภายใต้ความดันสูง ส่วนแก๊สนั้นเป็นของไหลที่อัดตัวได้ ซึ่งของไหลที่อัดตัวได้เป็นของไหลที่ความหนาแน่นไม่คงที่ขึ้นอยู่กับหลาย ๆ ตัวแปร เช่น แก๊สที่อยู่ในสภาวะปิดสนิท เมื่อได้รับความร้อนจะทำให้มีความหนาแน่นสูงขึ้น แต่เมื่อสูญเสียความร้อน ความหนาแน่นของแก๊สจะลดลง ในงานวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะของไหลที่อัดตัวได้เนื่องจากสสารที่อยู่ภายใน Ejector นั้นเป็นการไหลที่สามารถอัดตัวได้ทั้งหมด แต่ในงานวิจัยนี้จะศึกษาทั้งในกรณีที่อยู่ใน Ejector เป็นแก๊สทั้งหมด

### 2.7.2 การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน

ประเภทการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วนนั้นพิจารณาได้จาก Reynolds number ซึ่งค่าของ Reynolds number มักขึ้นอยู่กับความเร็วของการไหลของของไหลกับความหนืดของของไหลเป็นหลัก หากค่าความเร็วต่ำจะทำให้ของไหลเกิดการไหลแบบราบเรียบ และความ

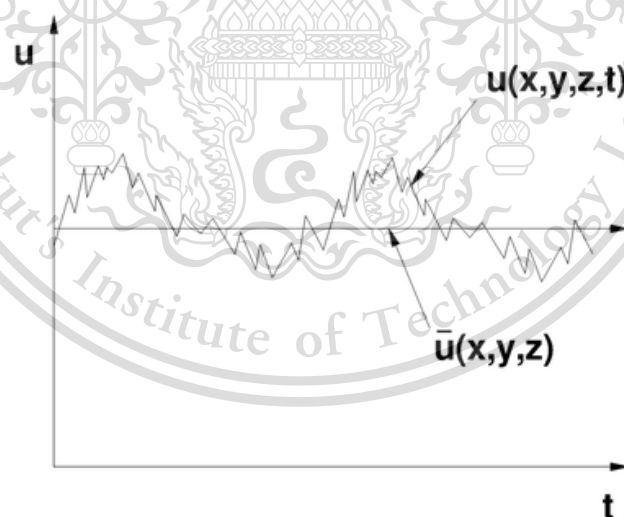
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สูงก็จะทำให้ของไหลเกิดการไหลแบบปั่นป่วน ในกรณีค่าความหนืดจะให้ผลในทางตรงกันข้าม ถ้าของไหลมีความหนืดสูง มักจะเกิดการไหลแบบราบเรียบเพราะแรงต้านความเร็วในการไหลมาก ในทางกลับกันถ้าของไหลมี ความหนืดต่ำ จะทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนเพราะแรงต้านความเร็วในการไหลน้อย ในงานวิจัยนี้ จะมุ่งเน้นไปที่การไหลแบบปั่นป่วนเป็นหลักเนื่องจากพฤติกรรมของการไหลของไหลภายใน Ejector นั้นเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเหนือเสียง จนทำให้ค่า Reynolds number นั้นอยู่ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน

### 2.7.3 สมการควบคุมของการไหลของของไหล

สมการควบคุมของการไหลของของไหล (governing equation of fluid flow) โดยปกติแล้วค่า ตัวแปรต่าง ๆ สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนมักมีค่าไม่คงที่ และเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับเวลา เช่น ตัวอย่างของความเร็ว  $u$  ตามรูปที่ 2.11 ซึ่งปัญหาลักษณะเช่นนี้ทำให้การคำนวณตัวแปรมีความยุ่งยากเพิ่มมากขึ้นเป็นอย่างมาก เพราะฉะนั้นเพื่อทำให้ง่ายต่อการคำนวณจึงทำการสมมุติว่าคุณสมบัติต่าง ๆ ในกรณีการไหลแบบปั่นป่วนนี้ สามารถแบ่งออกเป็นได้ 2 ส่วนโดยใช้หลักการ Reynolds decomposition ได้แก่ ส่วนที่ค่าเฉลี่ยไม่ขึ้นกับเวลา และส่วนที่ค่าความผันผวนที่ขึ้นกับเวลา



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงลักษณะของความเร็วในการไหลแบบปั่นป่วน [9]

สมการพื้นฐานของการไหลแบบปั่นป่วนสำหรับสมการความต่อเนื่อง (continuity equation) และสมการโมเมนตัม (momentum equation) สามารถเขียนสมการทั้งสองให้อยู่ในรูปของเทนเซอร์ (tensor) ได้ดังนี้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2.31)$$

สมการโมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2.32)$$

จาก Reynold decomposition ทุกตัวแปรในการไหลสามารถแบ่งออกเป็นส่วนที่เป็นส่วนที่เป็นค่าเฉลี่ยและส่วนที่แทนผลของการสั่น ตัวอย่างเช่น ฟังก์ชัน สามารถแบ่งได้เป็น

$$f = \bar{f} + f' \quad (2.33)$$

จากนั้นทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง (time-averaging) จะได้ว่า

$$\bar{f}(x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(x,t) dt \quad (2.34)$$

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

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.35)$$

และ

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.36)$$

ซึ่งสมการ 2.35 และ 2.36 นี้ เรียกว่าสมการ Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)

## 2.7.4 กฎของขอบผนัง (The Law of the Wall)

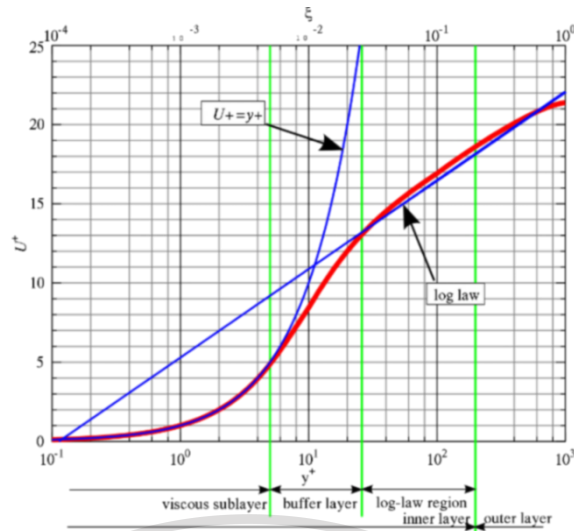
กฎของขอบผนัง (The Law of the Wall) เป็นกฎที่อธิบายถึง ค่าเฉลี่ยของความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) ณ จุดหนึ่ง ๆ เป็นสัดส่วนกับฟังก์ชันลอการิทึม (logarithm) ของระยะทางจากจุดนั้นไปที่ผนัง ในพลศาสตร์ของไหล หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าขอบเขตของการไหลของไหล (the boundary of the fluid region) โดยช่วงของฟังก์ชันลอการิทึม (logarithm) แสดงดัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.12 the universal law of wall [8]

### 2.7.5 สูตรลอการิทึมทั่วไป

สูตรลอการิทึมทั่วไปสำหรับกฎของขอบผนัง (The law of wall) ในการหาค่าของ u plus และ y plus ประกอบไปด้วยสูตรสมการต่าง ๆ ดังนี้

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \tag{2.37}$$

โดยที่  $u^+$  คือ ความเร็วไร้มิติ

$u$  คือ ความเร็วที่ขนานกับผนัง

$u_\tau$  คือ Friction velocity

$y^+$  plus

$$y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu} \tag{2.38}$$

โดยที่  $y^+$  คือ พิกัดของผนัง (Dimensionless)

$y$  คือ ระยะห่างจากผนัง ในกรณีของโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 20 จะหมายถึงระยะห่าง

จากจุดกึ่งกลางของกริดแรกกับผนัง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$u_\tau$  คือ Friction velocity

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$\nu$  คือ Kinematic viscosity

### 2.7.6 การคำนวณของไหลด้วยเทคนิคการคำนวณแบบพลศาสตร์

การคำนวณของไหลด้วยเทคนิคการคำนวณแบบพลศาสตร์ (computational fluid dynamic) เป็นการคำนวณเพื่อศึกษาและแก้ไขปัญหาของของไหลโดยวิธีการจำลองพฤติกรรมของไหลของของไหลที่ไม่สามารถศึกษาด้วยการสังเกตและการมองเห็น โดยใช้สมการพื้นฐานของวิธีการเชิงตัวเลข (principle numerical method) ในการคำนวณเพื่อเปลี่ยนจากสมการควบคุมของการไหลของของไหล (governing equation of fluid flow) ต่าง ๆ ซึ่งประกอบไปด้วยสมการการไหลของนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equation) ในรูปแบบของการอนุรักษ์พลังงาน (conservation of energy) สมการความต่อเนื่อง และสมการการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมไปเป็นสมการทางพีชคณิต เพื่อหาคำตอบของสมการด้วยวิธีการเชิงตัวเลข (numerical method) ซึ่งการเปลี่ยนจากสมการควบคุมของการไหลของของไหลต่าง ๆ ไปเป็นสมการทางพีชคณิต (algebraic equation) นั้นทำได้โดยวิธีการจำกัดทางปริมาตร (finite volume method) ซึ่งโดยปกติแล้วการคำนวณของไหลด้วยเทคนิคการคำนวณแบบพลศาสตร์จะถูกแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนก่อนกระบวนการประมวลผล (pre-processing step) ขั้นตอนการแก้ไขปัญหาหรือการจำลอง (solver step or simulation) และขั้นตอนหลังกระบวนการประมวลผล (post-processing)

### 2.7.7 Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation

สมการ Reynolds Averaged Navier-stokes Simulation (RANS) เป็นสมการการเคลื่อนที่สำหรับการไหลของของไหลที่ใช้หลักการ Reynolds decomposition โดยควบคุมค่าการไหลให้เป็นปริมาณเฉลี่ยตามเวลาที่ถูกละเลงขึ้นในการการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งเป็นสมการที่ช่วยประหยัดเวลาและทรัพยากรในการแก้ปัญหาคำนวณของไหลด้วยเทคนิคการคำนวณแบบพลศาสตร์ซึ่งถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในวงการวิศวกรรม และมีให้ใช้ในโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 20 โดยประกอบไปด้วย Spalart-Allmaras,  $k - \epsilon$ ,  $k - \omega$  และ Reynolds stress model (RSM) ซึ่งหลักพื้นฐานของสมการ Reynolds Averaged Navier-stokes Simulation (RANS) นั้นมักใช้คำนวณของไหลที่มีค่าการไหลขึ้นอยู่กับเวลา (time-dependent flow)

### 2.7.8 โมเดลจำลองความปั่นป่วนแบบ SST $k - \omega$

โมเดลจำลองความปั่นป่วนแบบ SST  $k - \omega$  คือโมเดลที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่จาก Standard  $k - \omega$  โดยมีสิ่งสำคัญที่แตกต่างกันดังนี้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

i. แบบจำลอง SST k -  $\omega$  ได้มีการคำนวณแบบผสมโดยการค่อย ๆ ปรับเปลี่ยนการคำนวณแบบ Standard k -  $\omega$  บริเวณในพื้นที่ด้านในของขอบเขตของการไหลของของไหลเป็นแบบ k -  $\epsilon$  ที่ช่วงเลข Reynolds number สูงบริเวณในพื้นที่ด้านนอกของขอบเขตของการไหล

ii. ปรับเปลี่ยนสูตรความหนืดปั่นป่วนเพื่ออธิบายผลการปรับเปลี่ยนของความเค้นเฉือนแบบปั่นป่วน The transport equations คือวิธีการคำนวณความหนืดที่ปั่นป่วนและวิธีการคำนวณค่าคงที่ของโมเดลและเงื่อนไขอื่น ๆ โดยแสดงแยกกันสำหรับแต่ละโมเดล

สมการโมเดลจำลองความปั่นป่วนแบบ SST k -  $\omega$  มีลักษณะคล้ายกับสมการของ Standard k -  $\omega$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (2.39)$$

และ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega + Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (2.40)$$

ประสิทธิภาพการแพร่กระจายสำหรับโมเดลจำลองความปั่นป่วนแบบ SST k -  $\omega$  หาได้ดังนี้

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (2.41)$$

และ

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (2.42)$$

ในแบบจำลอง k -  $\omega$  ค่าความหนืดเอ็ดดี้  $\mu_t$  (Eddy Viscosity) สามารถคำนวณได้จาก

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max \left[ \frac{1}{\alpha^*} \frac{S F_2}{a_1 \omega} \right]} \quad (2.43)$$

โดยที่ S คือ strain rate magnitude และ

$$\sigma_k = \frac{1}{(F_1/\sigma_{k,1}) + ((1-F_1)/\sigma_{k,2})} \quad (2.44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ส่วนตัวเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

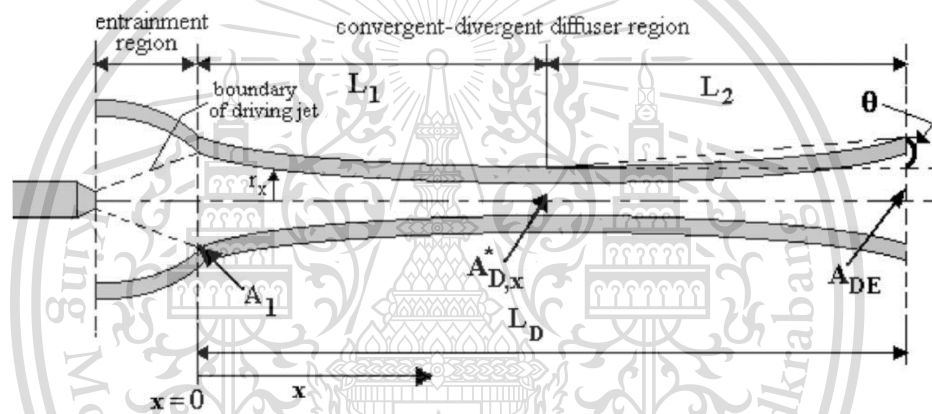
ค่าคงที่ของแบบจำลองมีค่าเท่ากับ

$$\sigma_{k,1} = 1.176, \sigma_{\omega,1} = 2.0, \sigma_{k,2} = 1.0, \sigma_{\omega,2} = 1.168$$

$$a_1 = 0.31, \beta_{i,1} = 0.075, \beta_{i,2} = 0.0828$$

### 2.7.9 สมการการสำหรับออกแบบ CRMC ejector (CRMC Designed Equations)

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาและออกแบบ CRMC ejector เปรียบเทียบกับ CPM ejector จะต้องควบคุมตัวแปรดังนี้ให้มีค่าเท่ากันคือ 1.Throat Diameter 2.Diffuser Exit Diameter 3.ความยาวทั้งหมดของ Ejector โดยการหา  $L_D$  เพื่อให้ตัวแปรทั้ง 3 เป็นไปตามข้อกำหนดดังกล่าวและ entrainment range ไม่สั้นเกินไป ซึ่งลักษณะและองค์ประกอบของ CRMC ejector แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 Geometry of CRMC Ejector [5]

และสมการการหาค่าต่าง ๆ ในการออกแบบแบ่งได้เป็น 2 ส่วนมีดังนี้

1. สมการหาค่าที่จุดเริ่มต้น ( $X_0$ ) และ จุด  $L_2$

สมการความเร็วที่จุดเริ่มต้น ( $X_0$ )

$$c_1 = \frac{c_{NE} + R_m c_s}{1 + R_m} \quad (2.46)$$

สมการอุณหภูมิรวมที่จุดเริ่มต้น ( $X_0$ )

$$T_{o,1} = \frac{T_{o,g} + R_m T_{o,s}}{1 + R_m} \quad (2.47)$$

สมการความดันรวมที่จุดเริ่มต้น ( $X_0$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  

$$P_{o,1} = P_{NE} \left( \frac{T_{o,1}}{T_1} \right)^{\gamma/\gamma-1} \quad (2.48)$$
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สมการหาความยาว  $L_2$

$$L_2 = D_{D,x}^* \frac{\left(\frac{D_{DE}}{D_{D,x}^*} - 1\right)}{2 \tan(\theta)} \quad (2.49)$$

โดยที่  $R_m$  คือ entrainment ratio

$c_{NE}$  คือ ความเร็วจากของไหลปฐมภูมิ

$c_s$  คือ ความเร็วจากของไหลทุติยภูมิ

$T_{o,g}$  คือ อุณหภูมิรวมจากของไหลปฐมภูมิ

$T_{o,s}$  คือ อุณหภูมิรวมจากของไหลทุติยภูมิ

$P_{NE}$  คือ ความดันสถิตที่ทางออก Nozzle

$T_1$  คือ อุณหภูมิสถิตจุดเริ่มต้น

$\gamma$  คือ heat capacity ratio

$D_{D,x}^*$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางที่ Throat

$D_{DE}$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางที่ Diffuser Exit

$\theta$  คือ มุมระหว่างปลาย Diffuser Exit กับ Throat

2. สมการหาค่าที่จุด X ใด ๆ

สมการความเร็วที่จุด X ใด ๆ

$$c_{D,x} = c_1 - \frac{(c_1 - c_{DE})x}{L_D} \quad \text{for } 0 \leq x \leq L_D \quad (2.50)$$

สมการอุณหภูมิที่จุด X ใด ๆ

$$T_x = T_{o,1} - \frac{c_{D,x}^2}{2C_p} \quad (2.51)$$

สมการความดันที่จุด X ใด ๆ

$$P_x = P_{o,1} \left(\frac{T_x}{T_{o,1}}\right)^{\gamma/\gamma-1} \quad (2.52)$$

สมการเส้นผ่านศูนย์กลางที่จุด X ใด ๆ

$$D_{D,x} = 2 \sqrt{\frac{\dot{m}_g(1 + R_m)RT_x}{\pi P_x c_{D,x}}} \quad (2.53)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด โดยที่  $c_{DE}$  คือ ความเร็วที่ทางออก Diffuser และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$L_D$  คือ ระยะทางทั้งหมดในการออกแบบ CRMC Ejector

$C_p$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะภายใต้กรณีความดันคงที่

$\gamma$  คือ heat capacity ratio

$\dot{m}_g$  คือ mass flowrate ของของไหลปฐมภูมิ

$R_m$  คือ entrainment ratio

$R$  คือ  $C_p - C_v$

### 2.7.10 ขอบเขตและเงื่อนไขของการจำลอง (Boundary Conditions)

ขอบเขตและเงื่อนไขของการจำลอง (boundary condition) เป็นการกำหนดค่าเริ่มของ Primary Inlet และ Secondary Inlet ว่ามีค่าสถานะเริ่มต้นก่อนเข้า Ejector อย่างไร ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้อยู่ในรูปแบบของความดันทางเข้า (Pressure Inlet Type) โดยใช้สมการของของไหลที่อัดตัวได้ (Compressible Flow) นำมาคิดหาของความดันทั้งหมด (Total Pressure) และความดันสถิต (Static Pressure) ดังนี้

$$p_0 = p_s \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{\gamma/(\gamma - 1)} \quad (2.54)$$

โดยที่  $p_0$  คือ Total pressure

$p_s$  คือ Static pressure

$M$  คือ Mach number

$\gamma$  คือ Ratio of specific heats ( $c_p/c_v$ )

นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังใช้สมการ Turbulence ในการหา Turbulent kinetic Energy และ Specific Dissipation Rate เพื่อให้โปรแกรมสามารถทำนายพฤติกรรมการไหลได้ง่ายขึ้น ซึ่งค่า Turbulent kinetic Energy และ Specific Dissipation Rate หาได้จากสมการดังนี้

$$k = \frac{3}{2} (U_i I)^2 \quad (2.55)$$

โดยที่  $k$  คือ Turbulent kinetic energy

$U_i$  คือ ความเร็วเฉลี่ยที่ทางเข้า

$I$  คือ Turbulence intensity

และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $\omega$  คือ Specific Dissipation Rate

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

k คือ Turbulent kinetic energy

$C_\mu$  คือ ค่าคงที่ในโมเดล ซึ่งในโมเดลจำลองความปั่นป่วนแบบ SST k –  $\omega$  เท่ากับ 0.09

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของทางเข้า

## 2.8 ขั้นตอนก่อนกระบวนการประมวลผล

ขั้นตอนก่อนกระบวนการประมวลผลเป็นขั้นตอนที่ใช้ในการระบุขอบเขตทางกายภาพของแบบจำลอง (physical boundary) ซึ่งขอบเขตทางกายภาพ (physical boundary) เหล่านี้จะถูกแบ่งออกเป็นจำนวนเล็ก (grid cells or grid elements)

โดยปกติแล้วขั้นตอนนี้ยังเป็นขั้นตอนสำคัญที่จะกำหนดทิศทางการไหลของของไหลด้วยการระบุรูปแบบของการไหลของของไหลผ่านทางหน้าต่าง (operator-friendly interface) ซึ่งมีวิธีการดังต่อไปนี้

- i การสร้างรูปทรงหรือแบบจำลองที่สนใจ ซึ่งเรียกว่าส่วนการคำนวณหลัก (computational domain)
- ii การสร้างกริดให้เหมาะสมต่อโมเดลจำลองความปั่นป่วนแบบ SST k –  $\omega$
- iii การเลือกปรากฏการณ์ทางกายภาพหรือทางเคมี (physical and chemical phenomena) ที่จำเป็นสำหรับการคำนวณ
- iv การเลือกค่าคุณสมบัติของสารทำงาน (working fluid)
- v การกำหนดค่าและขอบเขตหรือบริเวณที่จะทำการศึกษา

## 2.9 การสร้างกริดที่เหมาะสมบริเวณใกล้ขอบผนัง

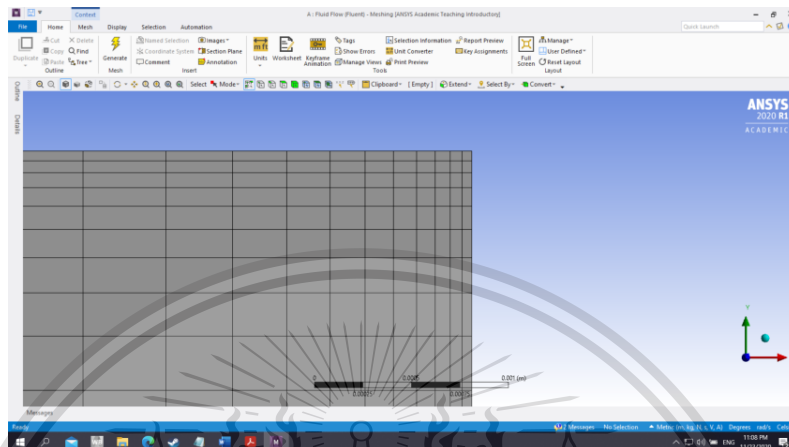
การสร้างกริดที่เหมาะสมบริเวณใกล้ขอบผนัง (near-wall mesh requirement) เป็นหนึ่งในวิธีการสำคัญสำหรับการแก้ปัญหาคำนวณการไหลของของไหลด้วยเทคนิคคำนวณแบบพลศาสตร์ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องและมีความแม่นยำมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือมีเงื่อนไขการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ซึ่งโดยปกติแล้วโมเดลการจำลองการไหลแบบปั่นป่วน  $k - \omega$  นั้นจะพิจารณาเฉพาะช่วงพื้นที่การไหลแบบปั่นป่วนที่ถูกพัฒนาอย่างเต็มที่แล้วเท่านั้น (area of turbulence fully developed) โดยมีเทคนิคในการสร้างกริดที่เหมาะสมบริเวณใกล้ขอบผนัง ขนาดของกริดที่บริเวณขอบผนังที่เหมาะสมถูกกำหนดโดยค่า  $wall y^+$  ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.14 แสดงขนาดของกริดบริเวณใกล้ขอบผนังเมื่อใช้ค่า  $wall y^+$  ประมาณ 1

จากโมเดลจำลองความปั่นป่วนแบบ SST  $k - \omega$  แม้จะสามารถใช้งานได้ในทุกช่วงของค่า  $wall y^+$  ที่มีค่าไม่เกิน 30 แต่จะแนะนำค่า  $wall y^+$  อยู่ที่ไม่เกิน 1 เพื่อความแม่นยำที่สุดในการคำนวณตามสมการ 2.35 ในงานวิจัยนี้ขนาดของกริดที่กำหนดให้มีค่า  $wall y^+$  ประมาณ 1 ตามรูปที่ 2.13 ตามการคำนวณจากสมการ  $wall y^+$  แต่ในความเป็นจริงแล้วค่า  $wall y^+$  จะไม่สามารถควบคุมให้อยู่ตามการคำนวณได้เนื่องจากแต่ละจุดความเร็วในการไหลมีค่าไม่เท่ากันและยังมีผลมากในบริเวณขอบคอตของหัวฉีดเนื่องจากบริเวณนั้นมีค่าความเร็วในการไหลที่สูงมากจึงทำให้ค่า  $wall y^+$  จะเกินจากที่คำนวณเพราะค่าของ  $wall y^+$  แปรผันตามค่าความเร็วในการไหล

โดยงานวิจัยนี้ค่า  $wall y^+$  จริงมีค่าไม่เกิน 10 ซึ่งจะอยู่ในช่วงการคำนวณแบบ Scalable wall function

## 2.10 ขั้นตอนการแก้ไขปัญหาหรือการจำลอง

ขั้นตอนการแก้ไขปัญหาหรือการจำลอง (solver step or simulation) คือ ขั้นตอนการแก้ไขสมการที่เกี่ยวข้องกับปัญหาของของไหลทั้งหมด และกระบวนการทำซ้ำของการแก้ไขปัญหา (iteration) เพื่อให้ข้อมูลที่ได้มีความแม่นยำและความน่าเชื่อถือมากที่สุด ซึ่งการแก้พีชคณิตเชิงตัวเลขนั้น (numerical algorithm) ประกอบไปด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- i การรวม (integration) สมการควบคุมของการไหลของของไหล (governing equation of fluid flow) ตลอดปริมาตรที่ถูกจำกัด (finite control volume)
- ii การจัดแบ่งจำพวกของสมการ (discretizing) ให้อยู่ในจำพวกเดียวกัน อย่างเช่น สมการการพาความร้อน (convection equation) สมการการแพร่ (diffusion equation) และ สมการต้นกำเนิด (source equation)
- iii การแก้สมการพีชคณิต (algebraic equation) ด้วยวิธีการทำซ้ำของการแก้ไขปัญหา (iteration)

## 2.11 ขั้นตอนหลังกระบวนการประมวลผล

ขั้นตอนหลังกระบวนการประมวลผลเป็นขั้นตอนที่ถัดมาจากขั้นตอนการแก้ไขปัญหหรือการจำลอง (solver step or simulation) เพื่อดูผลลัพธ์ที่ต้องการศึกษาซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

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

## 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

MWESIGYE et al. 2018 [1] ทฤษฎีและสมการการไหลของสารทำความเย็นภายใน Ejector ที่ทำงานในระบบทำความเย็นแบบ Ejector ในสถานะ Pressure Critical Mode, Subcritical Mode, Backflow

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

KUMAR ANSYS Inc 2013 [2] ใช้วิธี CFD ในการหาลักษณะการไหลของของไหลภายใน Ejector โดยเปรียบเทียบระหว่างการ Setup แบบ [PBCS: 2 nd order], [PBCS: 2 nd order , adapted ], [PBCS: PRESTO, QUICK ], [ PBCS: PRESTO QUICK adapted ], [ PBCS: PRESTO, QUICK, adapted twice] , [DBNS], [DBNS: adapted]

REZA GHIAS ANSYS Inc. 2011 [3] ใช้วิธี CFD ในการหาลักษณะการไหลของของไหลภายใน Ejector มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบ Ejector โดยในการวิจัยนี้เปรียบเทียบการสร้าง Mesh แบบปกติ กับ การสร้าง Mesh Adaption โดยเพิ่มความละเอียดของ Mesh ที่บริเวณที่เกิดปรากฏการณ์ Shock Diamond

SATHA APHORNRATANA et al. 2011 [4] ทดลองประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ Ejector ในระบบทำความเย็นแบบ Ejector ที่ใช้น้ำ ( $H_2O$ ) เป็นสารทำความเย็นในระบบโดยมุ่งเน้นความสนใจไปที่ค่า Rm (Entrainment Ratio) จากการทดลองที่กำหนดให้ อุณหภูมิจาก Boiler อยู่ที่ 130-150° C และอุณหภูมิ Evaporator อยู่ที่ 7.5° C

Ian W. Eames. 2002 [5] ใช้ในการศึกษาและออกแบบ CRMC Ejector



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงจำลอง ที่ใช้การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโปรแกรม FLUENT 2020 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลภายใน Ejector ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลตามบทที่ 2 และวิธีการสร้างแบบจำลองให้มีความน่าเชื่อถือและมีความใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด โดยผู้วิจัยได้ทำการเลือกการทดลองของ Satha Aphornratana et al.[4] ซึ่งได้ทำการทดลองโดยใช้ น้ำ ( $H_2O$ ) เป็นสารทำความเย็นใน Ejector เพื่อตรวจสอบผลการจำลอง

โดยมีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยดังนี้

1. การรวบรวมผลการทดลองจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ได้มีผลการจำลองสามารถนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่น่าเชื่อถือ และตรวจสอบได้
2. การศึกษาวิธีการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT จึงได้ทำการศึกษาทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการไหลภายในอุปกรณ์ เพื่อให้แบบจำลอง Ejector ที่สร้างขึ้นมีความน่าเชื่อถือ เพื่อผลลัพธ์ที่ถูกต้องและแม่นยำ
3. การสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม FLUENT 2020 โดยนำวิธีการต่าง ๆ ที่ได้ทำการศึกษามาประยุกต์ใช้กับแบบจำลอง Ejector โดยใช้สารทำความเย็นเป็น น้ำ ( $H_2O$ )

#### 3.1 การรวบรวมผลการทดลองจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลการทดลองของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบทำความเย็นแบบ Ejector โดยใช้สารทำความเย็น น้ำ ( $H_2O$ ) จาก Satha Aphornratana et al.[4]

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงผลการทดลองของ Ejector

Nozzle dimension (mm.)	Primary Temperature ( $^{\circ}C$ )	Primary mass flow (kg/h)	Secondary mass flow (kg/h)	Entrainment Ratio (Rm)
D1.7	130	3.505	1.478	0.422

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ ห้ามมิให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.2 การศึกษาวิธีการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม FLUENT 2020

การสร้างแบบจำลองนั้นจำเป็นจะต้องมีการเลือกเงื่อนไขของการจำลองที่ถูกต้อง และมีการประยุกต์ใช้ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการไหลแบบอัดตัวมาใช้ เพื่อให้ผลของการจำลองมีความถูกต้อง และน่าเชื่อถือ เราจึงได้รวบรวมงานวิจัยและบทความต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองภายใน Ejector โดยมีสารทำความเย็นเป็น น้ำ ( $H_2O$ ) โดยมีดังต่อไปนี้

1. ANSYS Fluent Tutorial Guide เป็นแหล่งที่รวบรวมวิธีการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ภายในโปรแกรม โดยได้มีการอธิบายการเลือกใช้โมเดล การสร้างเงื่อนไขให้กับแบบจำลอง

2. Sciencedirect เป็นเว็บไซต์สำหรับรวบรวมงานวิจัยและผลการทดลองต่าง ๆ เราได้ทำการศึกษาค้นคว้าการเลือกรูปแบบการจำลองของแต่ละงานวิจัย เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยของเราให้มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือมากขึ้น

3. Fluid Mechanics 101 เป็นแชลแนลที่ทำการศึกษาและอธิบายพฤติกรรมการไหลของของไหล โดยได้ทำการอธิบายสมการต่าง ๆ ที่ได้นำมาใช้อย่างละเอียด รวมทั้งการเช็คคุณภาพของ Mesh ว่ามี Mesh ที่ดีนั้นควรเป็นอย่างไร ทำให้เราสามารถสร้างแบบจำลองที่มีคุณภาพมากขึ้น

4. Peacesoftware เป็นเว็บไซต์ที่ทำการบอกคุณสมบัติของของไหลในสภาวะต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นค่าความหนืดของของไหล หรือค่าความหนาแน่น ซึ่งมีความแม่นยำที่อยู่ในเกณฑ์ที่เชื่อถือได้

### 3.3 การสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม FLUENT 2020

ในปัจจุบันนี้เราสามารถทำการจำลองการไหลของของไหลได้ด้วยการสร้างแบบจำลองในโปรแกรมได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โปรแกรม FLUENT 2020 เนื่องจากว่าตัวโปรแกรมนี้สามารถทำการคำนวณ Computation Fluid Dynamic (CFD) ของของไหลได้ ทั้งแบบ Single-Phase Flows และ Multi-Phase Flows ซึ่งทางผู้ทำได้มองเห็นว่า โปรแกรมนี้ตอบสนองความต้องการในการที่จะทำการจำลองทั้งแบบ Dry Steam เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของของไหลใน Ejector ที่มีเงื่อนไขในการทำงานที่ต่างกัน

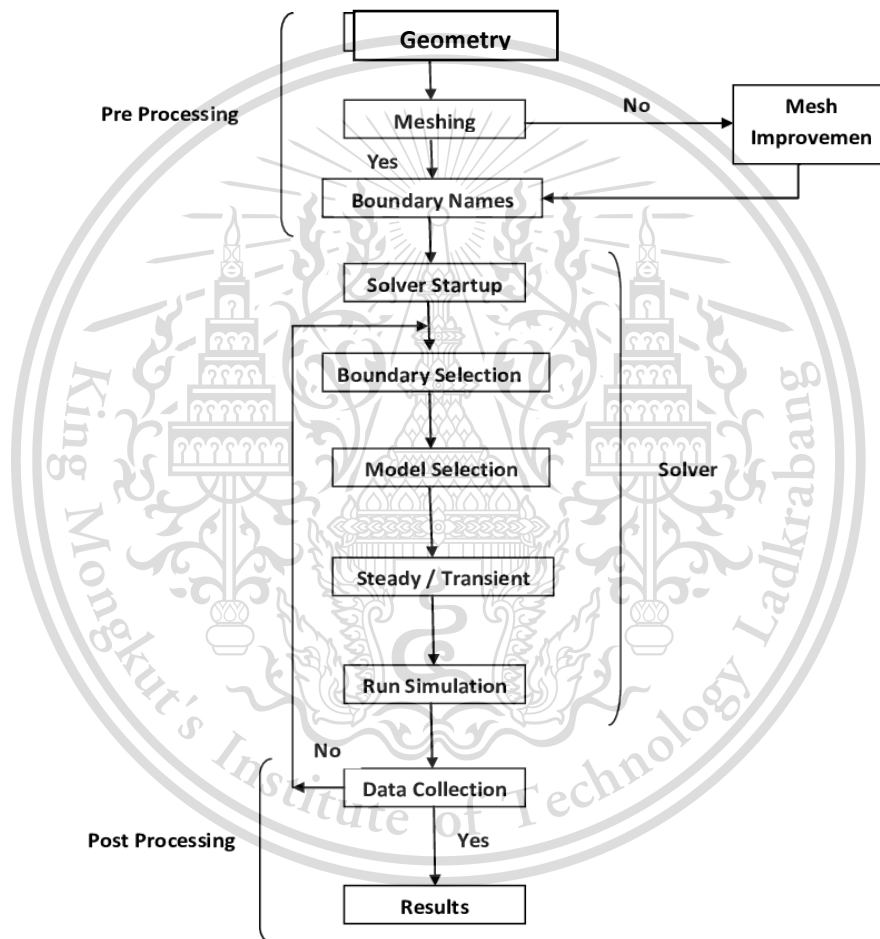
โดยการทำงานของโปรแกรม FLUENT 2020 จะแบ่งส่วนการทำงานของโปรแกรมเป็น 4 ส่วนการทำงานใหญ่ ๆ ได้แก่

1. Geometry โดยเป็นการสร้างแบบจำลองโมเดลของ Ejector ตามแบบที่ได้มาจากการทดลองของ Satha Aphornratana et al.[4] เพื่อนำมาวาดแบบจำลอง

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2. Meshing โดยเป็นวิธีการสร้างกริด (grid element) โดยนำทฤษฎีของ wall  $y^+$  และการเช็คคุณภาพของ Mesh มาใช้ในการช่วยในการออกแบบการสร้างกริด ให้เป็นไปตามสมการการไหล
3. Solver Set Up เป็นขั้นตอนในการออกแบบโมเดลการทดลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม โดยทำการจำลองพฤติกรรมการไหลของของไหล ซึ่งเราจะต้องทำการเลือก Boundary Conditions และ Model ที่ถูกต้องเพื่อให้คำตอบที่ผ่านการทำซ้ำมีคำตอบที่ถูกต้องและแม่นยำที่สุด
4. Results เป็นการนำขอบเขตเงื่อนไข (Boundary Condition) มาคำนวณผ่านการกำหนด Solver Set Up ด้วยวิธีการทำซ้ำ จนผลลัพธ์มีแนวโน้มเข้าสู่เกณฑ์ที่กำหนด



รูปที่ 3.1 The Flow Chart of CFD Methodology [9]

### 3.3.1 การสร้างแบบจำลองเชิงกายภาพ (Geometry)

สำหรับงานวิจัยนี้ ทางผู้จัดทำได้เลือก Ejector จากการทดลองของ Satha Aphornratana

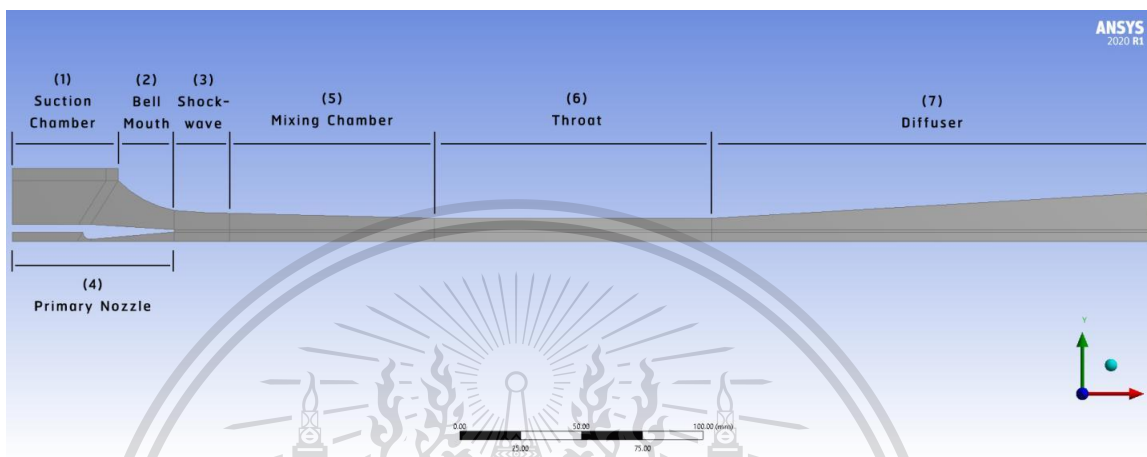
et al.[4] นำมาสร้างแบบจำลองโดยได้ทำการสร้างรูปแบบจำลองในรูปแบบ 2 มิติ และมีรูปร่างเอกสารนี้เป็นเอกสารทศวงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สมมาตรตามแนวแกน โดยจาก Pianthong et al. [6] ได้ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองในรูปแบบ 2 มิติว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

มิติ และ 3 มิติผลลัพธ์ที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันมาก แต่ความเร็วในการประมวลของแบบจำลอง 2 มิติ ใช้เวลาประมวลผลน้อยกว่าแบบจำลอง 3 มิติมาก และยังคงระยะเวลาในการเขียนแบบอีกด้วย

โดยรูปทรงของ Ejector ประกอบไปด้วย ทางเข้าเส้นผ่านศูนย์กลางของ primary nozzle 7.75 มิลลิเมตร และ secondary nozzle มีรัศมี 23 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของคอคอด 1.7 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของทางออกที่ 40 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.2 แสดงรูปร่างแบบจำลองแบบสมมาตรตามแนวแกน (2d-Dimension axis-Symmetry)

จากรูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นการแบ่งส่วนของ Ejector เป็นส่วนต่าง ๆ โดยวิธีการแบ่งแบบนี้ เพื่อให้ง่ายต่อการตี Mesh และสามารถนำทฤษฎี wall  $y^+$  มาใช้ในการตี Mesh ได้

โดยเราได้ทำการแบ่งส่วนออกเป็น 7 ส่วนหลัก ๆ โดยอาศัยการแบ่งตามส่วนโค้งเพื่อให้ Mesh มีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมมากที่สุด โดยมีการแบ่งชิ้นส่วนที่ 3 (Shock wave) ที่มีการแบ่งพิเศษ ขึ้นมาตามทฤษฎีคลื่นกระแทก (Shock wave) ดังรูป

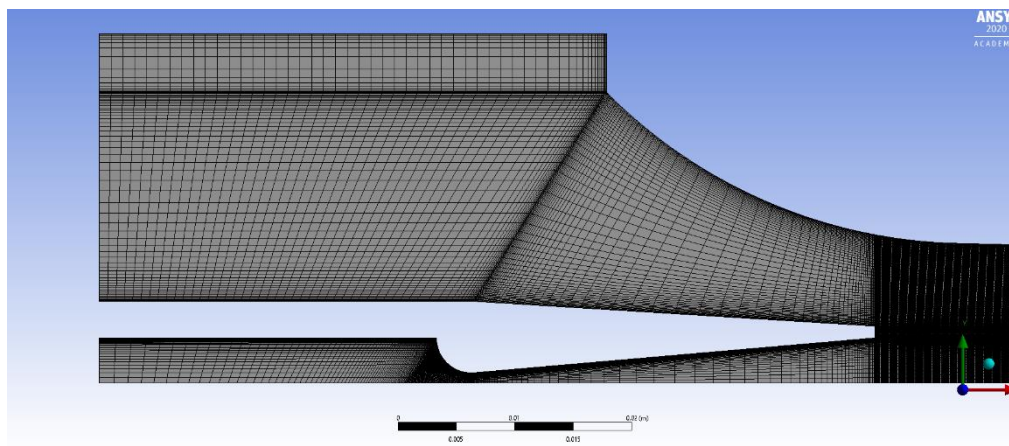
### 3.3.2 การสร้างเมช (Meshing)

Mesh คือการแบ่งโมเดลออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ในรูปทรงเรขาคณิตต่าง ๆ เพื่อให้โปรแกรมสามารถวิเคราะห์จุดต่าง ๆ ของ working fluid ได้โดยที่ Mesh 1 ชิ้นจะเรียกว่า Element และในแต่ละ Element จะมีจุด Node ซึ่งเป็นจุดตรงมุมของ Element โดยที่จุด Node แต่ละจุดจะเป็นจุดที่โปรแกรมใช้คำนวณหาผลลัพธ์ ดังนั้นหากจำนวน Mesh เรามาก โปรแกรมก็จะใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้น ซึ่งชนิด Mesh ที่เราเลือกนำมาใช้คือ Mesh ที่มีรูปสี่เหลี่ยมซึ่งเหมาะกับการจำลองการไหล เพราะจำทำให้การเข้าสู่คำตอบดีกว่า ในการหาจำนวนกริดที่เหมาะสมจะใช้กระบวนการที่เรียกว่า การทำ grid independent และความละเอียดบริเวณผนังที่มีค่า wall  $y^+$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

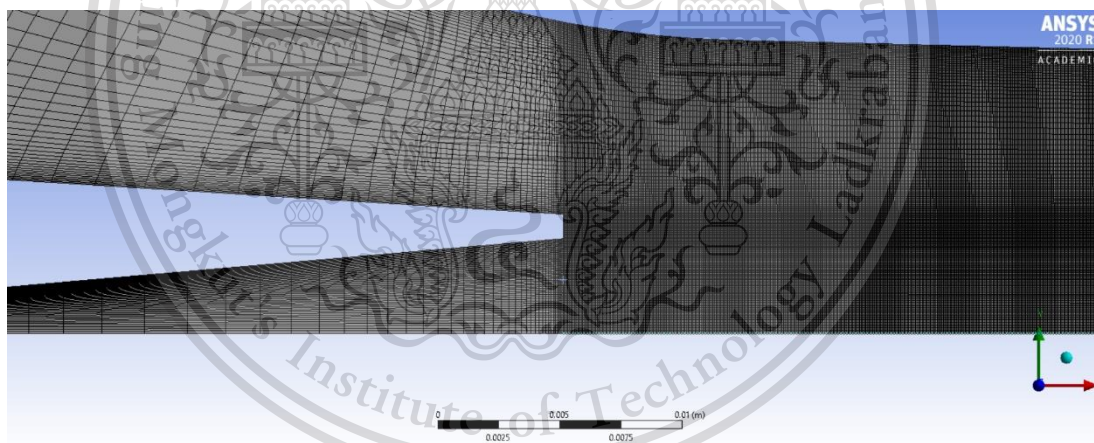
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.3 แสดงรูปร่างของ Mesh บริเวณ Primary Inlet และ Secondary Inlet

โดยจากรูปที่ 3.3 จะเห็นว่าบริเวณของขอบผนังของ Ejector มีจำนวนของ Mesh ที่อัดแน่นมากกว่าบริเวณพื้นที่การไหลของของไหล เนื่องจากบริเวณขอบผนังเป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วมากที่สุด ทำให้เราต้องสร้าง Element จำนวนมากเพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์ทุกจุดของการเปลี่ยนแปลงให้แม่นยำยิ่งขึ้น และบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของ Mesh ตามการแบ่งส่วน เราได้ทำการคำนวณ Bias Factor เพื่อให้จุดที่เกิดการคำนวณมีความต่อเนื่องกัน



รูปที่ 3.4 แสดงรูปร่างของ Mesh อย่างละเอียดบริเวณ Mixing Chamber

จากรูปที่ 3.4 แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของ Mesh บริเวณ Mixing Chamber เนื่องจากว่าเป็นจุดที่มีการรวมกันของของไหล ที่มีอุณหภูมิและความดันต่างกันอย่างมากทำให้ต้องมีการคำนวณมากกว่าจุดอื่น ๆ จึงทำให้จำนวน Mesh ในพื้นที่บริเวณนี้มีความหนาแน่นเป็นอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Skewness mesh metrics spectrum:

					
Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

Orthogonal Quality mesh metrics spectrum:

					
Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

### รูปที่ 3.5 ตารางแสดงคุณภาพของ Mesh

จากภาพที่ 3.5 เป็นตารางในการตรวจสอบคุณภาพของ Mesh ที่เราสร้าง โดยตาราง Skewness mesh เป็นตารางที่แสดงความสมมาตรของ Mesh โดยคุณภาพของ Mesh ที่เราได้ทำการจำลองมีค่า Skewness อยู่ที่ 0.03054 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ดีเยี่ยม ส่วนค่า Orthogonal Quality mesh คือค่าที่แสดงว่าปริมาณ Mesh ส่วนใหญ่ของเรามีหน้าตาเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามากหรือน้อย โดยค่าเฉลี่ยของ Orthogonal Quality Mesh ของแบบจำลองที่ผู้วิจัยมีค่าเท่ากับ 0.9871 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ดีเยี่ยมเหมือนกัน

#### 3.3.3 การทำ Solver Set Up

เราได้ทำการเลือก SST k-omega เนื่องจากเป็นตัวที่ถูกปรับปรุงและถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่ของ k-epsilon และ k-omega จากการสร้าง Grid โดยใช้หลักการของ wall  $y^+$  ซึ่งสามารถคำนวณ Mesh ที่ไม่ชิดขอบได้ดี ซึ่งเราได้เลือกโมเดลแบบจำลองแบบ Steady state ซึ่งเป็นการหาค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงในทุกช่วงเวลาเพื่อนำมาคำนวณหาผลลัพธ์

ในกระบวนการทำ Solver Set Up จะมีการเลือก Methods and Controls ซึ่งอ้างอิงจาก Manish Kumar [2] โดยการคำนวณแบบ Pressure-based

Pressure-based solver ใช้ Methods ในการคำนวณเป็น AUSM+ scheme และเป็น second-order upwind ในทุกสมการที่คำนวณ

ในส่วนของ Controls ใช้การตั้งค่าเป็น The ILU smoother เนื่องจากทำให้การลู่เข้าของผลเป็นไปแบบราบรื่นกว่า standard Gauss-Seidel และ limiter type เป็น Multidimensional - Cell to Face Limiting

ทั้งหมดนี้เป็นการตั้งค่าเพื่อให้ผลจากการคำนวณเกิดการลู่เข้าแบบราบเรียบและมีความแม่นยำมากที่สุดในการคำนวณผ่านแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 3.3.3.1 ขอบเขตและเงื่อนไขของการจำลอง อย่างยิ่งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ขอบเขตและเงื่อนไขของการจำลอง (boundary condition) เป็นการกำหนดค่าเริ่มของ Primary Inlet และ Secondary Inlet ว่ามีค่าสถานะเริ่มต้นก่อนเข้า Ejector ในรูปแบบของความดันทางเข้า (Pressure Inlet Type) โดยใช้สมการของของไหลที่อัดตัวได้ (Compressible Flow) นำมาคิดหาความดันทั้งหมด (Total Pressure) และความดันสถิต (Static Pressure) เราได้ใช้สมการ Turbulence ในการหา Turbulent Kinetic Energy (k) และ Specific Dissipation Rate ( $\omega$ ) ส่วนที่ทางออกของของไหลที่ตัวกระจาย ให้อยู่ในรูปแบบของความดันขาออก (Pressure Outlet Type)

โดยทำการกำหนดคุณสมบัติของ Primary inlet เป็น water vapor ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ตามตารางผลการทดลองของ Satha Aphornratana et al.[4] และจะได้คุณสมบัติของความดันทั้งหมด (Total Pressure) เท่ากับ 270.466 kPa ค่าความดันสถิต (Static Pressure) เท่ากับ 270.260 kPa ค่า Turbulent Kinetic Energy (k) เท่ากับ  $0.71298 \text{ m}^2/\text{s}^2$  และค่า Specific Dissipation Rate ( $\omega$ ) เท่ากับ 2841.704

โดยทำการกำหนดคุณสมบัติของ Secondary inlet เป็น water vapor ที่อุณหภูมิ 7.5 องศาเซลเซียส ตามตารางผลการทดลองของ Satha Aphornratana et al.[4] และจะได้คุณสมบัติของความดันทั้งหมด (Total Pressure) เท่ากับ 1.051 kPa ค่าความดันสถิต (Static Pressure) เท่ากับ 1.037 kPa ค่า Turbulent Kinetic Energy (k) เท่ากับ  $8.51665 \text{ m}^2/\text{s}^2$  และค่า Specific Dissipation Rate ( $\omega$ ) เท่ากับ 2057.188

โดยทำการกำหนดคุณสมบัติของ Outlet เป็น water vapor ที่อุณหภูมิ 26.52 องศาเซลเซียส ตามตารางผลการทดลองของ Satha Aphornratana et al.[4] และโดยที่ Outlet มีฟังก์ชันให้เลือกในการกำหนดค่าความดันเป็นความดันสถิต (Static Pressure) ค่าความดันสถิต (Static Pressure) เท่ากับ 3.500 kPa ค่า Turbulent Kinetic Energy (k) เท่ากับ  $7.21 \text{ m}^2/\text{s}^2$  และค่า Specific Dissipation Rate ( $\omega$ ) เท่ากับ 1750.78

### 3.3.3.2 สารทำงานในระบบ

สารที่ใช้ในการจำลองระบบทำความเย็น Ejector นี้คือ water vapor เนื่องจากน้ำเป็นสารทำความเย็นที่เมื่อเกิดการรั่วไหล จะไม่เป็นอันตรายต่อธรรมชาติแตกต่างจากสารทำความเย็นชนิดอื่น ๆ ที่เมื่อเกิดการรั่วไหลจะทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก ที่เป็นสาเหตุของสภาวะโลกร้อน และน้ำยังเป็นสารทำความเย็นที่มีราคาถูกและหาได้ง่ายอีกด้วย

### 3.3.3.3 เกณฑ์การลู่เข้า

งานวิจัยนี้ได้กำหนดเกณฑ์การลู่เข้า (Convergence Criteria) สำหรับการจำลองเพื่อศึกษา

พฤติกรรมของของไหลแบบ Dry Steam โดยแบ่งเกณฑ์ออกเป็น 2 หลักเกณฑ์ใหญ่ ๆ ดังนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

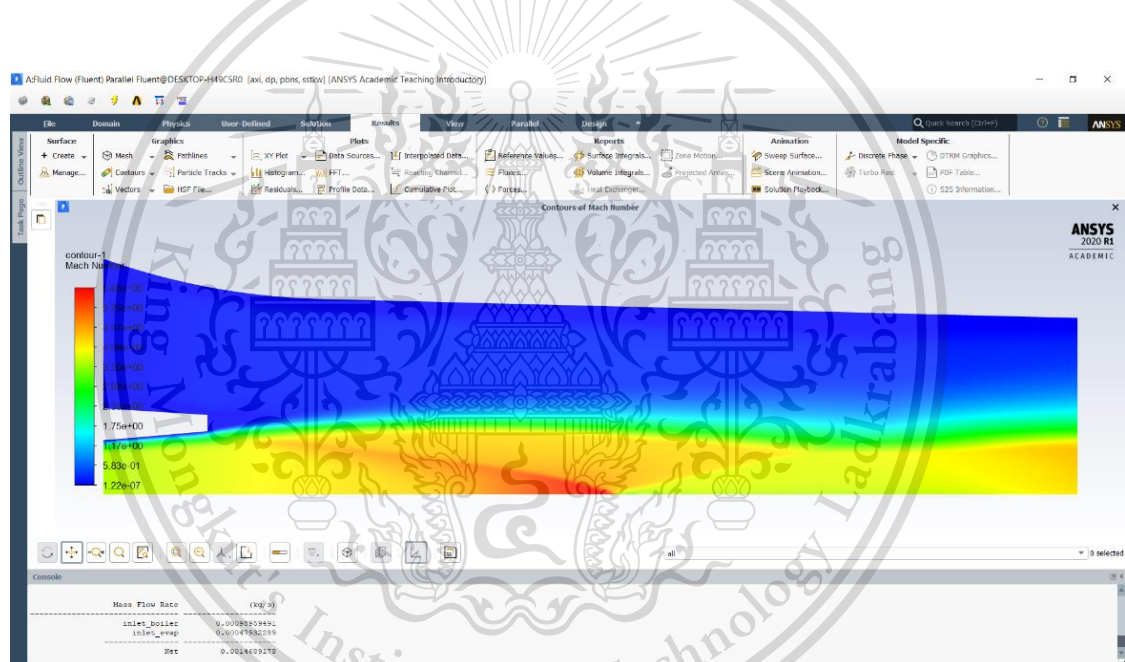
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1. ให้ผลรวมของ mass flux ระหว่างด้านพื้นที่ทางเข้าและทางออก (inlet and outlet face) มีค่าเป็นศูนย์ นั่นหมายความว่า การไหลลักษณะดังกล่าวอยู่ภายใต้กฎการอนุรักษ์มวล (conservation of mass) โดยเกณฑ์การลู่เข้าของ mass flux ต้องมีค่าน้อยกว่า  $10^{-7}$

2. การคำนวณค่าตกค้าง (residual) ของสัมประสิทธิ์ค่านัยสำคัญ (significant coefficient) ต้องมีค่าน้อยกว่า  $10^{-7}$  เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและสมเหตุสมผล

### 3.3.4 การหาผลลัพธ์ (Results)

เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการหาผลลัพธ์ โดยการนำขอบเขตเงื่อนไข (Boundary Condition) มาคำนวณผ่านการกำหนด Solver Set Up ด้วยวิธีการทำซ้ำ จนผลลัพธ์มีแนวโน้มเข้าสู่เกณฑ์ที่กำหนด โดยผลลัพธ์ที่ได้ เราสามารถที่จะวิเคราะห์ ความเร็ว อุณหภูมิ ความดัน  $wall y^+$  และอัตราการไหลเชิงมวล (mass flow rate)



รูปที่ 3.6 ภาพแสดง contour ของความเร็วของของไหล

จากภาพที่ 3.6 แสดงให้เห็นความเร็วของของไหลในแต่ละจุดของ Ejector โดยจากภาพจะเห็นคลื่นกระแทก (Shock wave) ที่เกิดจากการตีด้วยแรงเฉือนของของไหล จาก Primary inlet และ Secondary inlet โดยจะแสดงเป็นแถบสีต่าง ๆ และเราสามารถเลือกดูอัตราการไหลของมวลของ Primary inlet และ Secondary inlet ได้

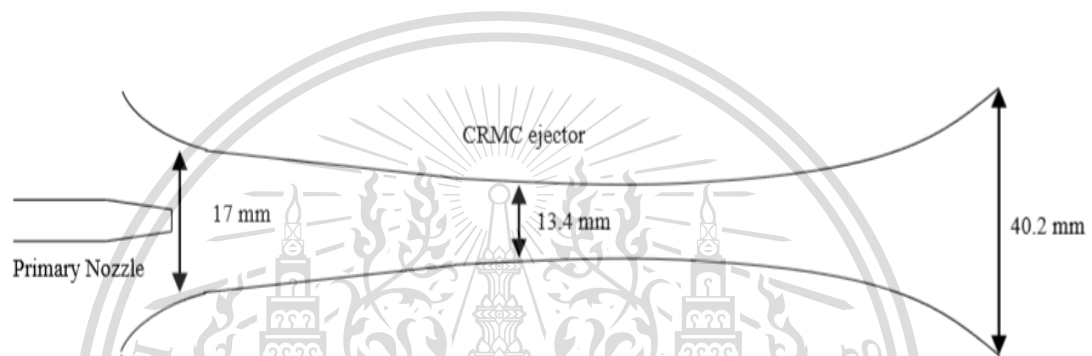
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.4 แบบจำลองและวิธีการตั้งค่าอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่ในโปรแกรม ANSYS

จากการศึกษาข้อมูลของอีเจ็คเตอร์ในรูปแบบต่างๆจึงได้ทำการออกแบบอีเจ็คเตอร์อีกรูปแบบหนึ่งซึ่งเป็นอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่ซึ่งจะเป็นการปรับความโค้งของอีเจ็คเตอร์ให้มีความราบเรียบเป็นลักษณะส่วนโค้งที่มากขึ้นเพื่อลดมุมปะทะของของไหลกับอีเจ็คเตอร์เพื่อพิจารณาว่าอีเจ็คเตอร์ชนิดนี้มีความสามารถในการใช้งานโดยออกแบบจากลักษณะขนาดจากอีเจ็คเตอร์แบบแบบการผสมกันแบบความดันคงที่ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะของอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่

ซึ่งในการออกแบบอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่จะมีวิธีการคำนวณซึ่งเป็นสมการที่อ้างอิงมาจาก Ian W.Eames [4] ซึ่งมีลักษณะสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{dM_o}{dx} = m_p(1 + R_m) \frac{dv}{dx} = \beta \quad (4.1)$$

และการตั้งสมมติฐานเป็นไป ดังนี้

1. ของไหลปฐมภูมิและของไหลทุติยภูมิเป็นของไหลชนิดเดียวกัน
2. ของไหลเป็นของไหลอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ 3. ไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับผนังของอีเจ็คเตอร์ หันไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีจทั้งหมดมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ในการรวมกันของของไหลปฐมภูมิและของไหลทุติยภูมิจะเป็นแบบอัดที่บริเวณห้องผสม

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำให้รู้ถึงความเร็วที่จุดผสม

ซึ่งเมื่อใช้สมมติฐานนี้จะทำให้การเปลี่ยนแปลงของระยะเส้นผ่านศูนย์กลางในส่วนของดิฟฟิวเซอร์ เป็นดังนี้

$$v_{D,x} = v_1 \text{ ที่ระยะ } x=0 \text{ และ } v_{D,x} = v_{DE} \text{ ที่ } x = L_d$$

โดยที่  $v_{DE}$  จะเป็นความเร็วของของไหลผสมที่บริเวณทางออกของดิฟฟิวเซอร์ ทำให้ได้มาเป็น

$$v_{D,x} = v_1 - \frac{(v_1 - v_{DE})x}{L_D} \quad \text{สำหรับ } 0 \leq x \leq L_D \quad (4.2)$$

โดยที่  $L_d$  คือระยะความยาวของไอเจ็คเตอร์นับจากตำแหน่ง NXP ซึ่งจะแสดงในรูปที่ 4.14 และในการออกแบบควรจะทำให้ความเร็วที่ทางออกของดิฟฟิวเซอร์มีค่าน้อยเพื่อลดในเรื่องของความดันตกภายในไอเจ็คเตอร์ ซึ่งจะได้เป็นสมการ

$$v_1 = \frac{v_{NE} + R_m v_s}{1 + R_m} \quad (4.3)$$

และจากสมการอนุรักษ์พลังงานจะได้สมการของอุณหภูมิ ดังนี้

$$T_{o,1} = \frac{T_{o,g} + R_m T_{o,s}}{1 + R_m} \quad (4.4)$$

จะได้ความดันสถิตที่ทางเข้าของดิฟฟิวเซอร์เป็นไปตามสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อเรื่อง  $T_1 = T_{o,1} \left( \frac{v_1}{2C_p} \right)^2$  อิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกา (4.5) ไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ถ้าให้ความดันสถิตมีค่าคงที่จะได้สมการในการหาความดันรวมที่ทางเข้าดีฟิวเซอร์เป็น

$$P_{o,1} = P_{NE} \left( \frac{T_{o,1}}{T_1} \right)^{\gamma/\gamma-1} \quad (4.6)$$

ถ้าของไหลทุกชนิดเป็นของไหลแบบอัดตัวไม่ได้ ในพื้นที่ผสมของของไหลจะให้ความดันสถิตที่ทางออกของหัวฉีดหลักเป็น

$$P_{NE} = P_{os} - \left( \frac{\rho_o v_s^2}{2} \right) \quad (4.7)$$

ซึ่งในการหาเส้นผ่านศูนย์กลางของอีเจ็คเตอร์ที่ตำแหน่งต่างๆ จะสามารถหาความดันสถิตและอุณหภูมิได้ตามสมการ

$$T_x = T_{o,1} - \left( \frac{v_{D,x}^2}{2C_p} \right) \quad (4.8)$$

$$P_x = P_{o,1} \left( \frac{T_x}{T_{o,1}} \right)^{\gamma/\gamma-1} \quad (4.9)$$

จากการไหลเป็นแบบต่อเนื่องจะได้เส้นผ่านศูนย์กลางของอีเจ็คเตอร์ที่ตำแหน่งใดๆเป็น

$$D_{D,x} = 2 \sqrt{\frac{m_p (1 + R_m) R T_x}{\pi P_x v_{D,x}}} \quad (4.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั่น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

และเมื่อพิจารณาจากสมการจะนำค่าที่ได้มาสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการเข้าโปรแกรมคำนวณต่อไป

กำหนดให้  $V_{NE} = 1140.85\text{m/s}$  และ  $V_s = 47.69\text{m/s}$  ซึ่งค่าทั้ง 2 มาจากการศึกษาอีเจ็คเตอร์แบบความดันคงที่ พร้อมทั้งกำหนดให้  $R_m = 0.526$

$$\text{จะได้ว่า } V_1 = \frac{1140.85 + (0.526 \times 47.69)}{1 + 0.526} = 767.04\text{m/s}$$

$$\text{จะได้ว่า } T_{0,1} = \frac{403 + (0.526 \times 280.5)}{1 + 0.526} = 366.672\text{K}$$

กำหนดให้  $L_D = 294.6\text{mm}$  และ  $V_{DE} = 43.48\text{m/s}$  แล้วนำค่าต่างๆไปคำนวณในสมการที่ (4.2), (4.8), (4.9) และ (4.10) ซึ่งคำนวณโดยโปรแกรม excel ซึ่งจะได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 3.2 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่

ความยาวตามแกน X(mm)	ความเร็ว (m/s)	อุณหภูมิ (K)	ความดัน (Pa)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)
0	767.0	225.1	692.8	24.37
5	754.8	229.6	749.4	23.86
10	742.5	234.0	808.3	23.38
15	730.2	238.3	869.7	22.94
20	717.9	242.6	933.3	22.54
25	705.6	246.8	999.2	22.16
30	693.4	251.0	1067.2	21.81
35	681.1	255.0	1137.4	21.49
40	668.8	259.0	1209.7	21.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ความยาว ตามแกน X(mm)	ความเร็ว (m/s)	อุณหภูมิ (K)	ความดัน (Pa)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (mm)
45	656.5	262.9	1283.9	20.92
50	644.2	266.8	1360.0	20.66
55	632.0	270.6	1438.0	20.43
60	619.7	274.2	1517.6	20.22
65	607.4	277.9	1598.8	20.03
70	595.1	281.4	1681.4	19.86
75	582.8	284.9	1765.5	19.71
80	570.6	288.3	1850.8	19.57
85	558.3	291.7	1937.2	19.45
90	546.0	294.9	2024.7	19.34
95	533.7	298.1	2113.0	19.25
100	521.4	301.2	2202.1	19.18
105	509.2	304.3	2291.8	19.12
110	496.9	307.3	2381.9	19.08
115	484.6	310.2	2472.4	19.05
120	472.3	313.0	2563.0	19.04
125	460.0	315.7	2653.7	19.04
130	447.8	318.4	2744.4	19.06
135	435.5	321.0	2834.7	19.10
140	423.2	323.6	2924.7	19.15
145	410.9	326.0	3014.1	19.21
150	398.6	328.4	3102.8	19.30
155	386.3	330.7	3190.7	19.40
160	374.1	333.0	3277.6	19.52
165	361.8	335.2	3363.3	19.65
170	349.5	337.3	3447.8	19.81
175	337.2	339.3	3530.9	19.99
180	324.9	341.3	3612.4	20.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรที่ปฏิบัติงานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปเพื่อประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ความยาวตามแกน X(mm)	ความเร็ว (m/s)	อุณหภูมิ (K)	ความดัน (Pa)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)
185	312.7	343.1	3692.2	20.42
190	300.4	345.0	3770.1	20.67
195	288.1	346.7	3846.1	20.95
200	275.8	348.4	3920.0	21.26
205	263.5	350.0	3991.6	21.60
210	251.3	351.5	4060.9	21.98
215	239.0	352.9	4127.8	22.40
220	226.7	354.3	4192.0	22.87
225	214.4	355.6	4253.6	23.38
230	202.1	356.8	4312.3	23.96
235	189.9	358.0	4368.1	24.60
240	177.6	359.1	4420.9	24.92
245	165.3	360.1	4470.6	25.79
250	153.0	361.0	4517.1	26.20
255	140.7	361.9	4560.4	27.00
260	128.5	362.7	4600.3	27.80
265	116.2	363.4	4636.8	28.40
270	103.9	364.1	4669.8	29.10
275	91.6	364.7	4699.3	30.80
280	79.3	365.2	4725.2	32.08
285	67.1	365.6	4747.4	33.50
290	54.8	365.9	4766.0	37.29
294.6	43.5	366.2	4779.8	40.00

นำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอีเจ็คเตอร์ที่ได้จากการคำนวณไปสร้างแบบจำลองในโปรแกรม Ansys ซึ่งจะมีวิธีการวาดแบบ , สร้างเมชและเก็บค่าประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์และค่าความดัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 4

### ผลการจำลองและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองของ CPM Ejector และ CRMC Ejector โดยจะทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงตัวเลขและพฤติกรรมการไหลระหว่าง CPM Ejector และ CRMC Ejector พร้อมทั้งวิเคราะห์ถึงแนวโน้มของผลการจำลองเพื่อใช้ศึกษาและพิจารณาพัฒนา Ejector ต่อไปภายภาคหน้า

#### 4.1 เปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างผลการจำลองของ CPM Ejector และ CRMC Ejector

##### 4.1.1 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างผลการจำลองของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิกำเนิดไอ 4.5 องศาเซลเซียส หัวฉีดหลักขนาด D1.7M4

ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างผลการจำลองของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิกำเนิดไอ 4.5 องศาเซลเซียส

ความดันที่ เครื่องควบแน่น (Pa)	$R_m$ CPM Ejector	ความดันที่ เครื่องควบแน่น (Pa)	$R_m$ CRMC Ejector
0	0.429	0	0.521
2800	0.429	2800	0.521
3000	0.429	3000	0.521
3200	0.429	3200	0.521
3250	0.429	3250	0.521

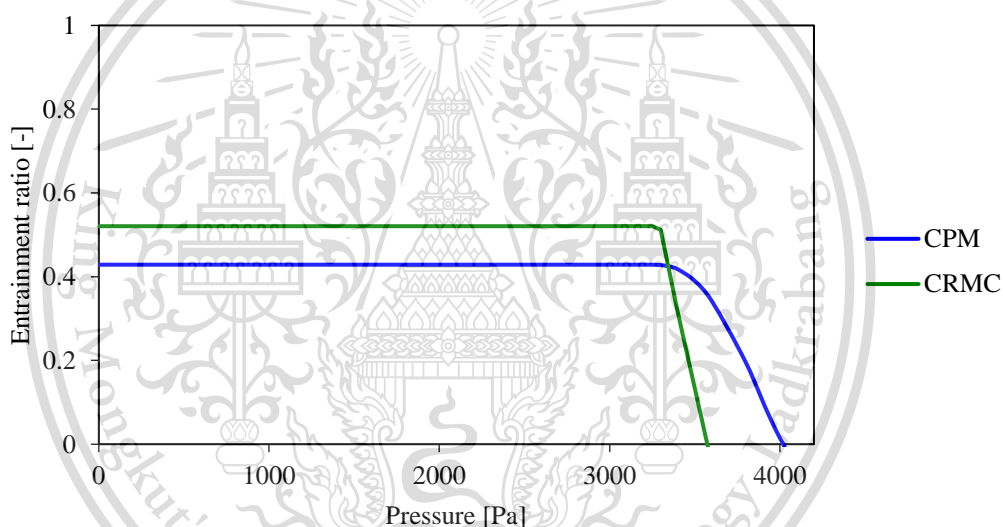
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามใช้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3300	0.428	3300	0.512
3600	0.342	3400	0.316
4200	-0.128	3600	-0.047

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าในช่วงการทำงานแบบวิกฤตค่า  $R_m$  ของ CRMC Ejector มีค่าอยู่ที่ 0.521 ซึ่งมากกว่าค่า  $R_m$  ของ CPM Ejector ที่มีค่าอยู่ที่ 0.429 และ CPM Ejector และค่าความดันวิกฤติของ Ejectors ทั้งสองมีค่าเท่ากันอยู่ที่ 3250 Pa ซึ่งสามารถแสดงผลเป็นรูปแบบของกราฟประสิทธิภาพดังแสดงรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟประสิทธิภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $R_m$  และ ความดันเครื่องควบแน่นของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิกำเนิดไอ 4.5 องศาเซลเซียส

4.1.2 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างผลการจำลองของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิกำเนิดไอ 7.5 องศาเซลเซียส หัวฉีดหลักขนาด D1.7M4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างผลการจำลองของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียส

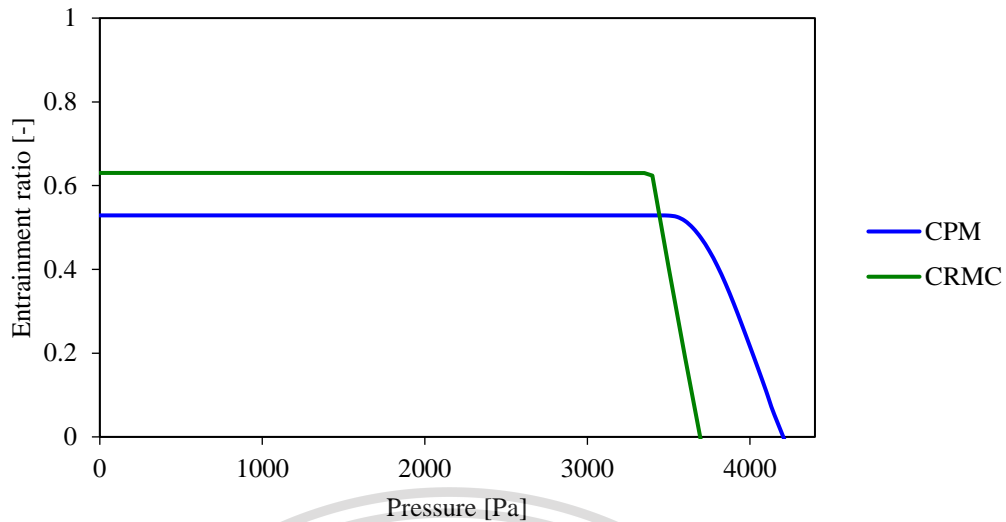
ความดันที่ เครื่องควบแน่น (Pa)	$R_m$ CPM Ejector	ความดันที่ เครื่องควบแน่น (Pa)	$R_m$ CRMC Ejector
0	0.528	0	0.630
2800	0.528	2800	0.630
3200	0.528	3200	0.630
3300	0.528	3300	0.630
3350	0.528	3350	0.630
3500	0.528	3500	0.404
3850	0.366	3600	0.191
4300	-0.090	3700	-0.013

จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าในช่วงการทำงานแบบวิกฤตค่า  $R_m$  ของ CRMC Ejector มีค่าอยู่ที่ 0.630 ซึ่งมากกว่าค่า  $R_m$  ของ CPM Ejector ที่มีค่าอยู่ที่ 0.528 และ CPM Ejector แต่ค่าความดันวิกฤตของ CRMC Ejector มีค่าลดลงอยู่ที่ 3350 Pa เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความดันวิกฤตของ CPM Ejector ที่มีค่าอยู่ที่ 3500 Pa ซึ่งสามารถแสดงผลเป็นรูปแบบของกราฟประสิทธิภาพดังแสดงรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.2 กราฟประสิทธิภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $R_m$  และความดันเครื่องควบแน่นของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิกำเนิดไอ 7.5 องศาเซลเซียส

#### 4.1.3 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างผลการจำลองของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิกำเนิดไอ 10.5 องศาเซลเซียส หัวฉีดหลักขนาด D1.7M4

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างผลการจำลองของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิกำเนิดไอ 10.5 องศาเซลเซียส

ความดันที่ เครื่องควบแน่น (Pa)	$R_m$ CPM Ejector	ความดันที่ เครื่องควบแน่น (Pa)	$R_m$ CRMC Ejector
0	0.657	0	0.754
2800	0.657	2800	0.754
3200	0.657	3200	0.754
3300	0.657	3300	0.754

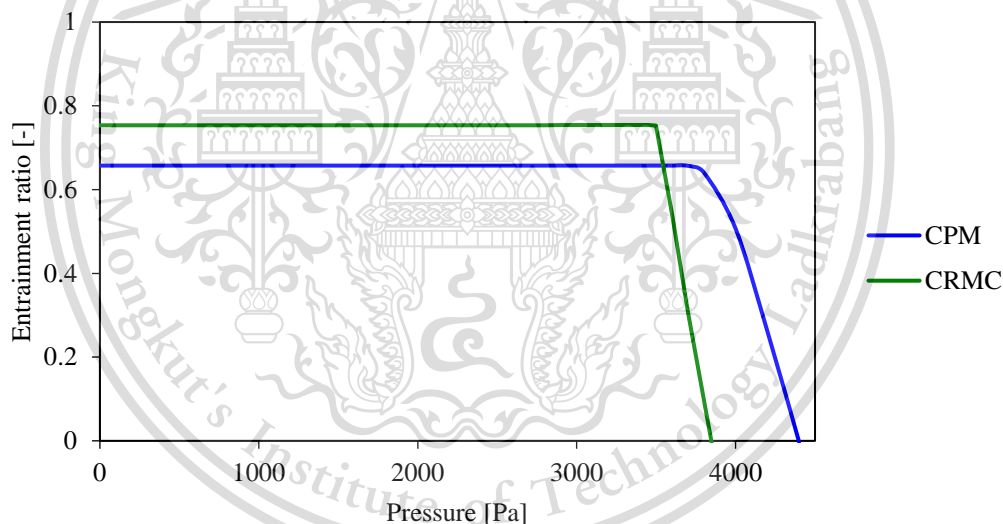
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3450	0.657	3450	0.754
3700	0.657	3700	0.307
4000	0.507	3800	0.099
4400	-0.003	3850	-0.005

จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าในช่วงการทำงานแบบวิกฤตค่า  $R_m$  ของ CRMC Ejector มีค่าอยู่ที่ 0.754 ซึ่งมากกว่าค่า  $R_m$  ของ CPM Ejector ที่มีค่าอยู่ที่ 0.657 และ CPM Ejector แต่ค่าความดันวิกฤตของ CRMC Ejector มีค่าลดลงอยู่ที่ 3450 Pa เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความดันวิกฤตของ CPM Ejector ที่มีค่าอยู่ที่ 3700 Pa ซึ่งสามารถแสดงผลเป็นรูปแบบของกราฟประสิทธิภาพดังแสดงรูปที่ 4.3



**รูปที่ 4.3** กราฟประสิทธิภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $R_m$  และ ความดันเครื่องควบแน่นของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิเครื่องระเหย 10.5 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.1.4 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างผลการจำลองของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิเครื่องระเหย 13.5 องศาเซลเซียส หัวฉีดหลักขนาด D1.7M4

ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างผลการจำลองของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิเครื่องระเหย 13.5 องศาเซลเซียส

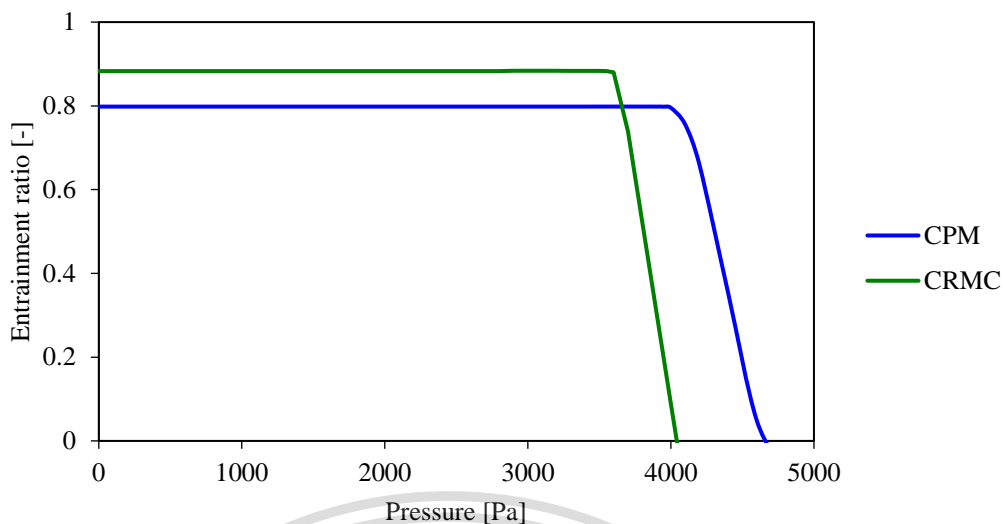
ความดันที่ เครื่องควบแน่น (Pa)	$R_m$ CPM Ejector	ความดันที่ เครื่องควบแน่น (Pa)	$R_m$ CRMC Ejector
0	0.798	0	0.883
2800	0.798	2800	0.883
3200	0.798	3200	0.883
3400	0.798	3400	0.883
3550	0.798	3550	0.883
3950	0.798	3950	0.176
4400	0.353	4000	0.088
4800	-0.073	4050	-0.019

จากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าในช่วงการทำงานแบบวิกฤตค่า  $R_m$  ของ CRMC Ejector มีค่าอยู่ที่ 0.883 ซึ่งมากกว่าค่า  $R_m$  ของ CPM Ejector ที่มีค่าอยู่ที่ 0.798 และ CPM Ejector แต่ค่าความดันวิกฤติของ CRMC Ejector มีค่าลดลงอยู่ที่ 3550 Pa เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความดันวิกฤติของ CPM Ejector ที่มีค่าอยู่ที่ 3950 Pa ซึ่งสามารถแสดงผลเป็นรูปแบบของกราฟประสิทธิภาพดังแสดงรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



**รูปที่ 4.4** กราฟประสิทธิภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $R_m$  และความดันเครื่องควบแน่นของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิกำเนิดไอ 13.5 องศาเซลเซียส

**4.1.5 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างผลการจำลองของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิกำเนิดไอ 135 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิกำเนิดไอ 7.5 องศาเซลเซียส หัวฉีดหลักขนาด D1.7M4**

**ตารางที่ 4.5** ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างผลการจำลองของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิกำเนิดไอ 135 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิกำเนิดไอ 7.5 องศาเซลเซียส

ความดันที่ เครื่องควบแน่น (Pa)	$R_m$ CPM Ejector	ความดันที่ เครื่องควบแน่น (Pa)	$R_m$ CRMC Ejector
0	0.457	0	0.553
2800	0.457	2800	0.553
3200	0.457	3200	0.553
3600	0.457	3600	0.553
3800	0.457	3800	0.553

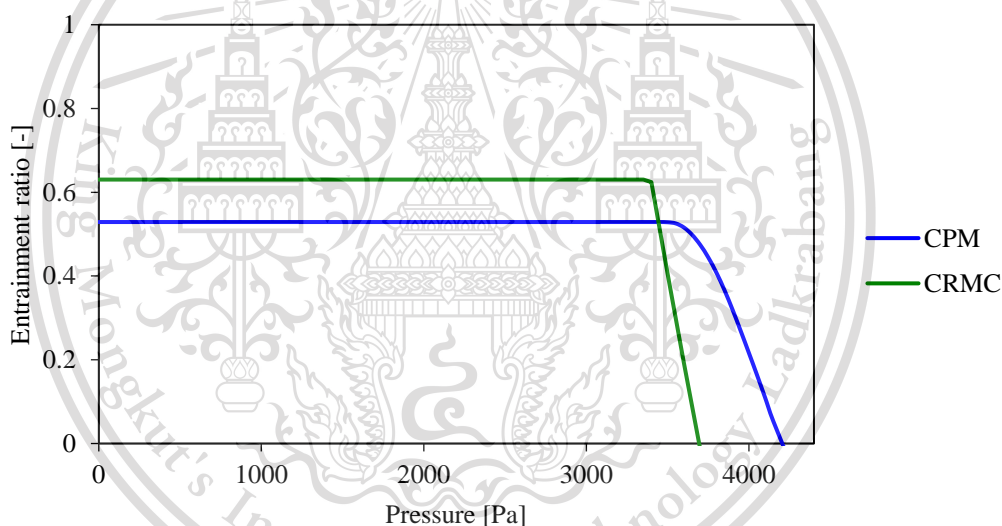
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3850	0.457	3850	0.552
4300	0.316	4050	0.226
5000	-0.194	4200	-0.025

จากตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าในช่วงการทำงานแบบวิกฤตค่า  $R_m$  ของ CRMC Ejector มีค่าอยู่ที่ 0.553 ซึ่งมากกว่าค่า  $R_m$  ของ CPM Ejector ที่มีค่าอยู่ที่ 0.457 และ CPM Ejector แต่ค่าความดันวิกฤตของ CRMC Ejector มีค่าลดลงอยู่ที่ 3800 Pa เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความดันวิกฤตของ CPM Ejector ที่มีค่าอยู่ที่ 3850 Pa ซึ่งสามารถแสดงผลเป็นรูปแบบของกราฟประสิทธิภาพ ดังแสดงรูปที่ 4.5



**รูปที่ 4.5** กราฟประสิทธิภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $R_m$  และ ความดันเครื่องควบแน่นของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.1.6 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างผลการจำลองของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 140 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียส หัวฉีดหลักขนาด D1.7M4

ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขระหว่างผลการจำลองของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 140 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียส

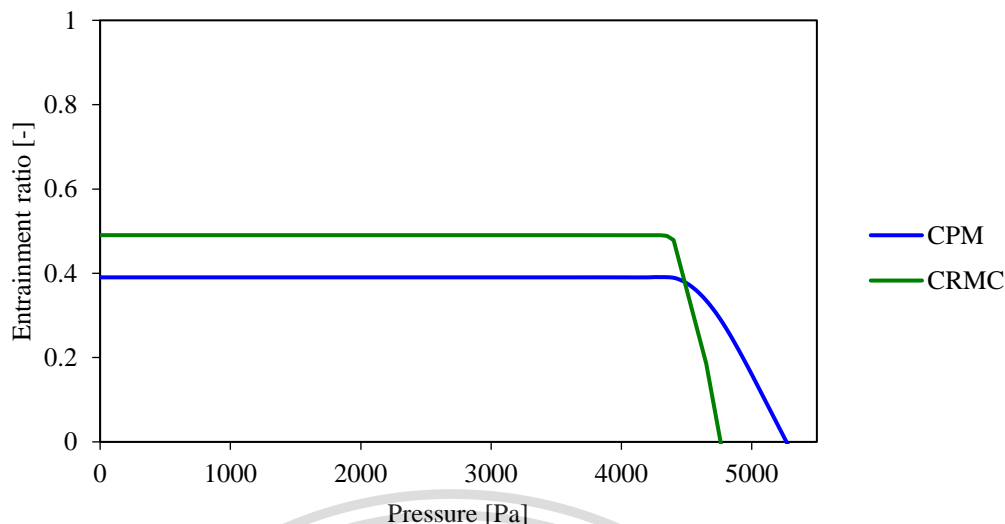
ความดันที่ เครื่องควบแน่น (Pa)	$R_m$ CPM Ejector	ความดันที่ เครื่องควบแน่น (Pa)	$R_m$ CRMC Ejector
0	0.390	0	0.490
2800	0.390	2800	0.490
3600	0.390	3600	0.490
4000	0.390	4000	0.490
4350	0.390	4350	0.490
4400	0.390	4400	0.489
4800	0.271	4650	0.186
5300	-0.020	4800	-0.065

จากตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าในช่วงการทำงานแบบวิกฤตค่า  $R_m$  ของ CRMC Ejector มีค่าอยู่ที่ 0.490 ซึ่งมากกว่าค่า  $R_m$  ของ CPM Ejector ที่มีค่าอยู่ที่ 0.390 และ CPM Ejector แต่ค่าความดันวิกฤติของ CRMC Ejector มีค่าลดลงอยู่ที่ 4350 Pa เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความดันวิกฤติของ CPM Ejector ที่มีค่าอยู่ที่ 4400 Pa ซึ่งสามารถแสดงผลเป็นรูปแบบของกราฟประสิทธิภาพดังแสดงรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.6 กราฟประสิทธิภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $R_m$  และ ความดันเครื่องควบแน่นของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ที่เงื่อนไขอุณหภูมิกำเนิดไอ 140 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิกำเนิดไอ 7.5 องศาเซลเซียส

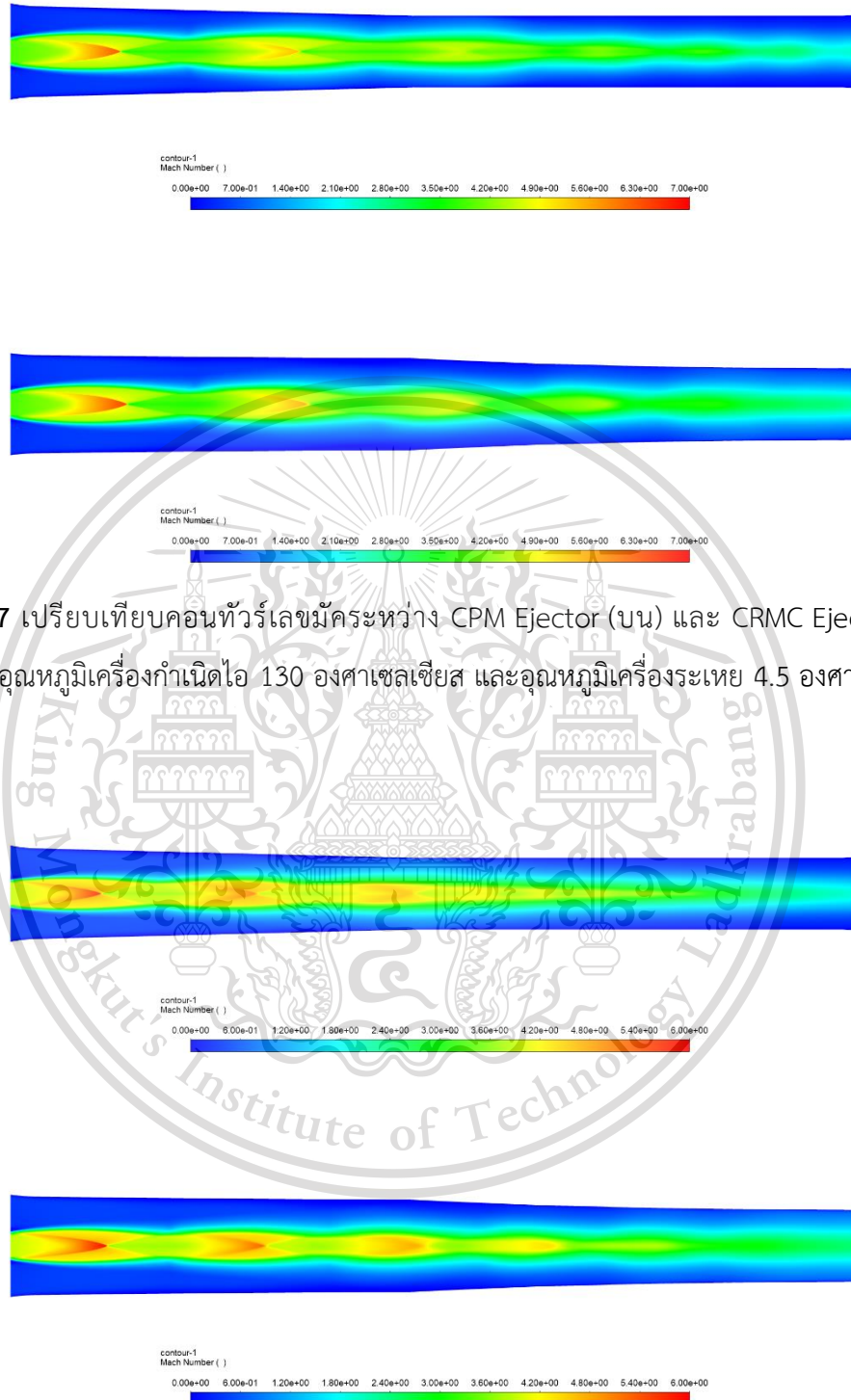
#### 4.2 เปรียบเทียบพฤติกรรมการไหลภายใน Ejector ระหว่างผลการจำลองของ CPM Ejector และ CRMC Ejector

เมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการไหลภายใน Ejector ระหว่างผลการจำลองของ CPM Ejector และ CRMC Ejector ในทุกกรณี โดยเปรียบเทียบผ่านคอนทัวร์เลขมัค ในช่วงการทำงานแบบวิกฤต ซึ่งในทุกกรณีได้ลักษณะความแตกต่างของพฤติกรรมการไหลของคลื่นขยายตัวและคลื่นกระแทก เหมือนกันคือ ที่เงื่อนไขอุณหภูมิกำเนิดไอ และ อุณหภูมิกำเนิดไอเดียวกันคลื่นขยายตัว ภายใน CRMC ejector นั้นมีขนาดที่ใหญ่กว่า CPM ejector ยิ่งช่วงเข้าใกล้ throat กระจายได้ทั่วมากกว่าอย่างชัดเจน และ จำนวนกับความแข็งแรงของ shock wave ของ CRMC ejector ก็มีมากกว่าของ CPM ejector เป็นผลทำให้การเหนี่ยวนำของไหลทุติยภูมิของ CRMC ejector ทำได้ดีกว่า CPM ejector แสดงตามรูปต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



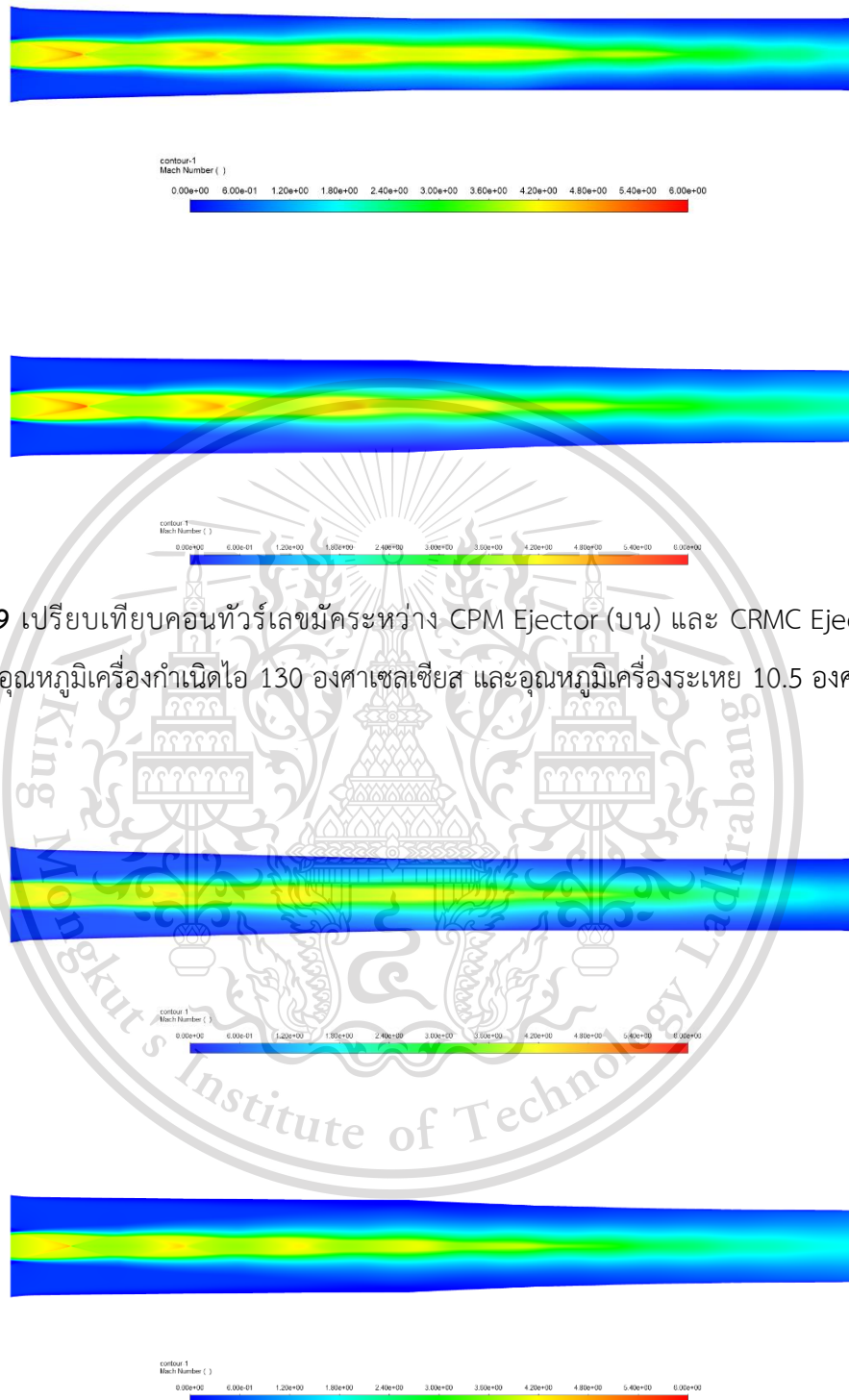
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบคอนทัวร์เลขมักระหว่าง CPM Ejector (บน) และ CRMC Ejector (ล่าง) ที่เงื่อนไขอุณหภูมิกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิกำเนิดไอ 4.5 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบคอนทัวร์เลขมักระหว่าง CPM Ejector (บน) และ CRMC Ejector (ล่าง) ที่เงื่อนไขอุณหภูมิกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิกำเนิดไอ 7.5 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



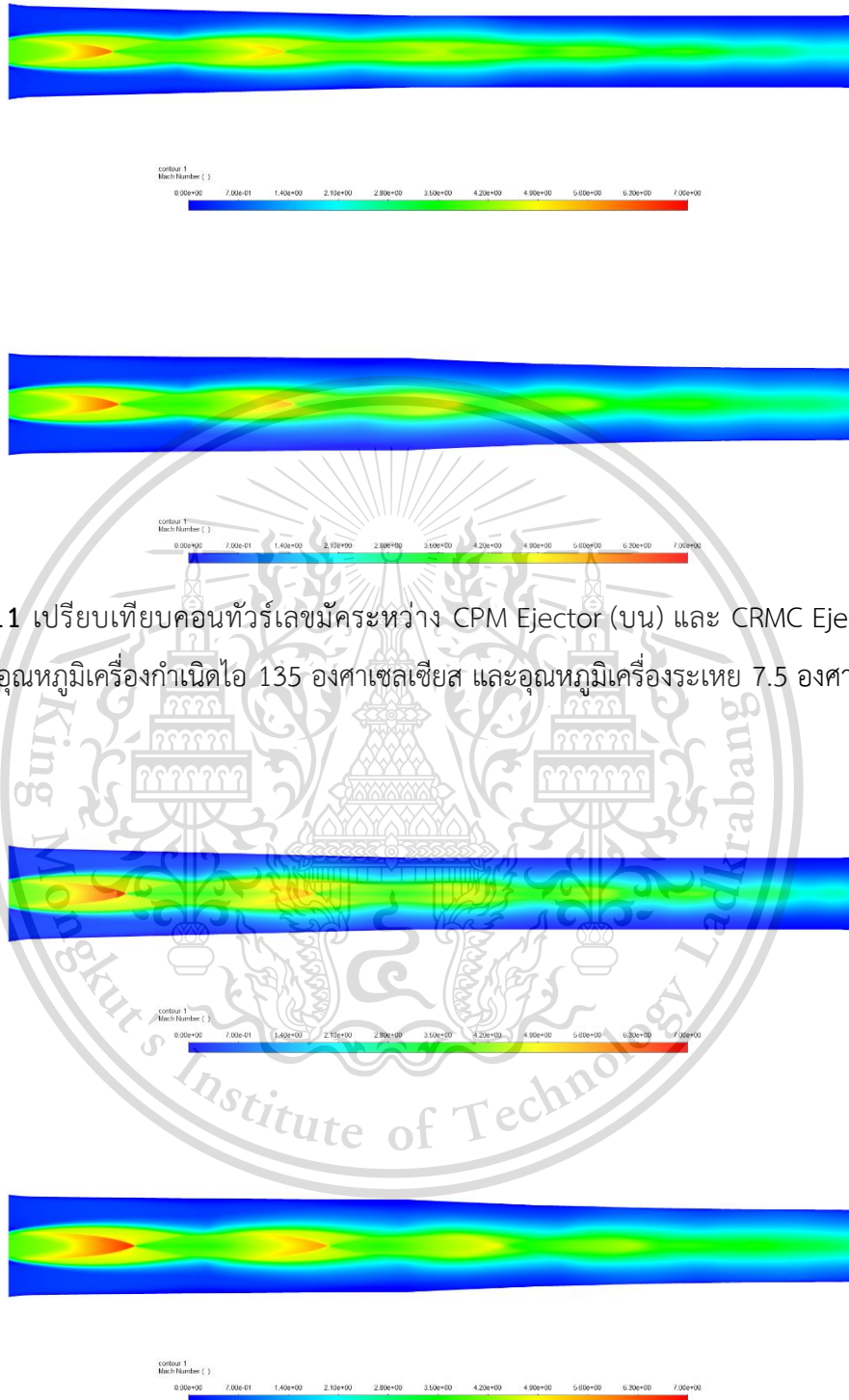
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบคอนทัวร์เลขมักระหว่าง CPM Ejector (บน) และ CRMC Ejector (ล่าง) ที่เงื่อนไขอุณหภูมิมอเตอร์กำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิมอเตอร์ระเหย 10.5 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบคอนทัวร์เลขมักระหว่าง CPM Ejector (บน) และ CRMC Ejector (ล่าง) ที่เงื่อนไขอุณหภูมิมอเตอร์กำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิมอเตอร์ระเหย 13.5 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่สัญญาใด ๆ หนึ่งในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบคอนทัวร์เลขมักระหว่าง CPM Ejector (บน) และ CRMC Ejector (ล่าง) ที่เงื่อนไขอุณหภูมิกำหนดไอ 135 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิกำหนดไอ 7.5 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบคอนทัวร์เลขมักระหว่าง CPM Ejector (บน) และ CRMC Ejector (ล่าง) ที่เงื่อนไขอุณหภูมิกำหนดไอ 140 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิกำหนดไอ 7.5 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่หรือใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

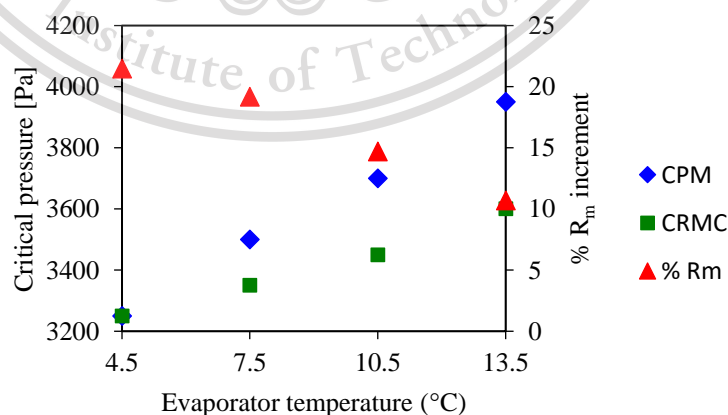
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 4.3 แนวโน้มของผลการจำลองของ CPM Ejector และ CRMC Ejector

ตารางที่ 4.7 ค่าความดันวิกฤตของ CPM Ejector และ CRMC Ejector, % การเพิ่มขึ้นของ  $R_m$  และ % การลดลงของ  $P_{cri}$  เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอคงที่อยู่ที่ 130 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิเครื่องระเหย	ความดันวิกฤต (Pa)		% $R_m$	% $P_{cri}$
	CPM	CRMC		
4.5	3250	3250	21.47	0
7.5	3500	3350	19.17	-4.29
10.5	3700	3450	14.71	-6.76
13.5	3950	3600	10.68	-8.86

จากตารางที่ 4.7 เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอคงที่อยู่ที่ 130 องศาเซลเซียสการทำ CRMC Ejector จะได้ % การเพิ่มขึ้นของ  $R_m$  ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและ % การลดลงของ  $P_{cri}$  ที่มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิของเครื่องระเหยน้อยลง โดยในกรณีที่ดียที่สุดคือที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิเครื่องระเหย 4.5 องศาเซลเซียส โดย % การเพิ่มขึ้นของ  $R_m$  อยู่ที่ 21.47% และมีค่าความดันวิกฤตเท่ากับ CPM Ejector ซึ่งแนวโน้มของ % การเพิ่มขึ้นของ  $R_m$  แสดงผลเป็นรูปแบบของกราฟดังรูปที่ 4.13



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ห้ามเผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า  
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันวิกฤตของ CPM Ejector และ CRMC Ejector, % การเพิ่มขึ้นของ  $R_m$  กับอุณหภูมิเครื่องระเหยจนถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

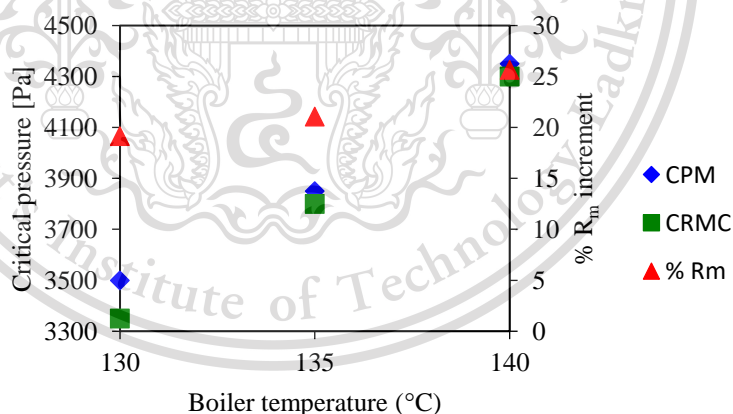
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.8 ค่าความดันวิกฤตของ CPM Ejector และ CRMC Ejector, % การเพิ่มขึ้นของ  $R_m$  และ % การลดลงของ  $P_{cri}$  เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิเครื่องระเหยคงที่อยู่ที่ 7.5 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ	ความดันวิกฤต (Pa)		% $R_m$	% $P_{cri}$
	CPM	CRMC		
130	3500	3350	19.17	-4.29
135	3500	3800	21.07	-1.30
140	4400	4350	25.66	-1.14

จากตารางที่ 4.8 เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิเครื่องระเหยคงที่อยู่ที่ 7.5 องศาเซลเซียสการทำ CRMC Ejector จะได้ % การเพิ่มขึ้นของ  $R_m$  ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและ % การลดลงของ  $P_{cri}$  ที่มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดเพิ่มขึ้น โดยในกรณีที่ดีที่สุดคือที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 140 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียส โดย % การเพิ่มขึ้นของ  $R_m$  อยู่ที่ 21.47% และมี % การลดลงของ  $P_{cri}$  อยู่ที่ 1.14% ซึ่งแนวโน้มของ % การเพิ่มขึ้นของ  $R_m$  แสดงผลเป็นรูปแบบของกราฟดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันวิกฤตของ CPM Ejector และ CRMC Ejector, % การเพิ่มขึ้นของ  $R_m$  กับอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลลัพธ์ทั้งหมดที่ได้จากเทคนิค CFD ทำให้เราเห็นถึงความแตกต่างของลักษณะการไหล (Mach number contour) , ค่าความดันวิกฤต(Critical Pressure) และ Entrainment ratio ของสารทำความเย็นภายในระบบทำความเย็นแบบ CPM Ejector และ CRMC Ejector โดยสรุปได้ว่า Entrainment Ratio (Rm) ที่ได้จาก CRMC Ejector ให้ค่าที่สูงกว่า CPM Ejector แต่ในทางตรงกันข้าม Critical Pressure จาก CRMC Ejector ให้ค่าที่ต่ำกว่า CPM Ejector และมีแนวโน้มที่ไม่คงที่ และสรุปลักษณะการไหลภายในอุปกรณ์ได้ว่า CRMC Ejector มีลักษณะทางกายภาพที่คล้ายกับ Nozzle อีกหนึ่งตัวที่เพิ่มเข้ามา ส่งผลให้คลื่นกระแทก (Expansion wave & Shock wave) มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ช่วยในการเพิ่มอัตราการไหลในภาคทุติยภูมิ (Secondary Fluid) ส่วนสาเหตุที่ความดันวิกฤตมีค่าลดลงจากโมเดลดังกล่าวนี้มาจาก ที่บริเวณคอคออดมีการพันตัวของความดันได้ต่ำกว่า จึงทำให้ค่าความดันที่ทางออกมีค่าที่ลดลงเมื่อเทียบกับ CPM Ejector

Entrainment Ratio เป็นผลลัพธ์ที่แสดงถึงประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบ Ejector แต่ในความเป็นจริงเราไม่สามารถคำนึงถึงการเพิ่มขึ้นของค่านี้เพียงอย่างเดียวไม่ได้ เนื่องจากค่าความดันวิกฤตก็ยังคงมีความสำคัญในเรื่องของการไหลของสารทำความเย็นเช่นกัน ถ้าหากเรานำระบบทำความเย็นดังกล่าวไปใช้ในประเทศเขตร้อนโดยไม่คำนึงถึงค่าความดันวิกฤต อาจส่งผลให้สารทำความเย็นไหลย้อนกลับ เพื่อป้องกันกรณีดังกล่าวจึงจำเป็นต้องติดตั้งค่าความดันที่ทางออกให้ต่ำลง จะส่งผลให้อุณหภูมิที่ทางออกมีค่าต่ำลงเช่นกัน จากนั้นการปล่อยความร้อน (waste heat) ออกจากระบบจะเกิดขึ้นได้ยากหรือเป็นไปได้เลยสิ่งเหล่านี้จะเห็นได้ชัดในประเทศเขตร้อน หรือประเทศที่มีสภาพอุณหภูมิของอากาศภายนอกค่อนข้างสูง

การศึกษานี้จึงสรุปได้ว่า CRMC Ejector ให้ค่า Entrainment Ratio (Rm) ที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับ CPM Ejector และค่าความดันวิกฤตที่ลดลงเป็นอีกหนึ่งตัวแปรสำคัญที่จะส่งผลให้เกิดการไหลย้อนกลับของสารทำความเย็น ส่งผลให้การใช้งานระบบทำความเย็นดังกล่าวในประเทศเขตร้อนอาจมีปัญหามาก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ Boiler และลดอุณหภูมิที่ Evaporator จะส่งผลให้ %Rm increment มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ %Critical Pressure Decrement ลดลง แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับการใช้งานจริงซึ่งต้องคำนึง

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จาก Rm และ Critical Pressure โดยกรณีศึกษาของ CRMC Ejector ที่มีประสิทธิภาพที่สุดของเราจะ มีการติดตั้งอุณหภูมิที่ Boiler อยู่ที่ 140 องศาเซลเซียส , อุณหภูมิที่ Evaporator ที่ 7.5 องศาเซลเซียส จะได้ค่า Entrainment Ratio (Rm) อยู่ที่ 0.490 และ Critical Pressure ที่ลดลงแต่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ที่ 4,350 Pascal

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

เพิ่มการจำลองแบบ CRMC Ejector ด้วยเทคนิค CFD โดยมีการติดตั้งอุณหภูมิที่ Boiler อยู่ที่ 145 องศาเซลเซียส , อุณหภูมิที่ Evaporator ที่ 7.5 องศาเซลเซียส โดยสันนิษฐานว่าค่าความดันวิกฤติ (Critical Pressure) อาจมีค่าที่สูงขึ้นกว่า CPM Ejector และยังได้รับค่า Entrainment Ratio (Rm) ที่สูงอยู่ด้วยเช่นกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## เอกสารอ้างอิง

- [1] 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.
- [2] Balasubramanyam Sasanapuri, Manish Kumar, Sutikno Wirogo, Konstantin A. Kurbatskii. (2013). **Numerical Simulation of a Supersonic Cruise Nozzle**. United States of America: ANSYS Inc.
- [3] 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.
- [4] Satha Aphornratana, Natthawut Ruangtrakoon, Thanarath Sriveerakul. (2011). **Experimental studies of a steam jet refrigeration cycle: Effect of the primary nozzle geometries to system performance**. Thailand: Sirindhorn international institute of technology Thammasat University.
- [5] Ian W. Eames. (2002). **A new prescription for the design of supersonic jet-jumps: the constant rate of momentum change method**. United Kingdom Nottingham University.
- [6] K. Pianthong, W. Sechanam, M. Behnia, T. Sriveerakul, S. Aphornratana. (2007). **Investigation and improvement of ejector refrigeration system using computational fluid dynamics technique**. Thailand: Ubon Ratchathani University
- [7] YUNUS A. CENGEL and MICHAEL A. BOLES. **Thermodynamics An Engineering Approach**. 8th Edition. New York : McGraw-Hill. Inc.2015.
- [8] jousefm 2018, **What is y+ (yplus)?**, SimScale CAE Forum, viewed 26 November 2020, <<https://www.simscale.com/forum/t/what-is-y-plus/82394>>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

[9] ANSYS Inc. 2009, **ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide**, viewed 26 November 2020, <[https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main\\_pre.htm](https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main_pre.htm)>

[10] Fluid Mechanics 101 2020, **[CFD] Pressure-Inlet Boundary Conditions**, viewed 20 October 2020, <<https://www.youtube.com/watch?v=Er2j5Kq17as>>

[11] peacesoftware 2007, **Thermodynamic properties of saturated steam**, viewed 20 October 2020, <[https://www.peacesoftware.de/einigewerte/wasser\\_dampf\\_e.html](https://www.peacesoftware.de/einigewerte/wasser_dampf_e.html)>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.