

การวิเคราะห์ความเร็วเหนือเสียงที่เหมาะสมของหัวฉีดสำหรับอีเจ็คเตอร์ใช้ในระบบทำความเย็นโดยใช้

โปรแกรมจำลองทางพลศาสตร์ของไหล

<mark>นายเอกลักษ</mark>ณ์ เกิดพรม

การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลศึกษา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2567 ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การวิเคราะห์ความเร็วเหนือเสียงที่เหมาะสมของหัวฉีดสำหรับอีเจ็คเตอร์ใช้ในระบบทำความเย็นโดยใช้ โปรแกรมจำลองทางพลศาสตร์ของไหล

น<mark>ายเอกลักษณ์ เ</mark>กิดพรม

การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลศึกษา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2567 ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



<mark>ใบรับรองการค้นคว้าอ</mark>ิสระ

<mark>บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระน</mark>ครเหนือ

เรื่อง การวิเคราะห์ความเร็วเหนือเสียงที่เหมาะสมของหัวฉีดสำหรับอีเจ็คเตอร์ใช้ในระบบทำความ เย็นโดยใช้โปรแกรมจำลองทางพลศาสตร์ของไหล

โดย นาย<mark>เอกลักษณ์ เกิดพรม</mark>

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลศึกษา

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย / หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติวุฒิ ศุทธิวิโรจน์)

<mark>คณะกรรมการสอบการค้นคว้าอิสระ</mark>

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ เรื่องตระกูล)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(<mark>รองศาสตราจา</mark>รย์ ดร.กิตติวุฒิ ศุทธิวิโรจน์)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ต้องชนะ ทองทิพย์)

ชื่อ : นายเอกลักษณ์ เกิดพรม ชื่อการค้นคว้าอิสระ : การวิเคราะห์ความเร็วเหนือเสียงที่เหมาะสมของหัวฉีด สำหรับอีเจ็คเตอร์ใช้ในระบบทำความเย็นโดยใช้โปรแกรม จำลองทางพลศาสตร์ของไหล สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกลศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระหลัก : รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติวุฒิ ศุทธิวิโรจน์ ปีการศึกษา : 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการวิเคราะห์ความเร็วเหนือเสียงที่เหมาะสมของหัวฉีดในอีเจ็คเตอร์สำหรับ ระบบทำความเย็น โดยใช้โปรแกรม ANSYS Fluent 2024 ในการจำลองพลศาสตร์ของไหล เชิงคำนวณเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของขนาดปากทางออกของหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ที่มีค่า 5.48 mm. 6.48 mm. และ 7.48 mm. พารามิเตอร์ของอีเจ็คเตอร์ประกอบด้วย สัดส่วนท่อผสม (Mixing Chamber) ที่ส่วนทางเข้ามีขนาดมุม 1.67° และมีขนาดความยาวที่ท่อผสมส่วนกลาง (Throat) อยู่ที่ 15.96 มม. และท่อเพิ่มความดัน (Subsonic Diffuser) มีขนาดมุมที่ 6° โดยการจำลองทำภายใต้ช่วงอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอที่ 85-95°C, อุณหภูมิของเครื่องระเหยที่ 5–10°C และอุณหภูมิของคอนเดนเซอร์คงที่ที่ 28°C โดยใช้สารทำความเย็น R1233zd และ R1224yd เป็นสารทำความเย็นในระบบ

ผลการวิเคราะห์พบว่า ขนาดปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดคือ 6.48 mm. เนื่องจากมีค่าความเร็วของเสียงสูงสุดคือ 2.85 และมีอัตราส่วนเชิงมวลสูงสุดที่ 0.570 เมื่อใช้ สารทำความเย็น R1233zd ที่อุณหภูมิเครื่องระเหย 6°C และในช่วงอุณหภูมิของเครื่องระเหย เพิ่มขึ้นเป็น 8–10°C ขนาดหัวฉีดที่เหมาะสมจะเปลี่ยนเป็น 5.48 มม. โดยสามารถให้อัตราส่วน เชิงมวลสูงสุดถึง 0.72 นอกจากนี้ การเปรียบเทียบสารทำความเย็นพบว่า R1233zd ให้ค่าความเร็ว ของเสียงและอัตราส่วนเชิงมวลสูงกว่าสารทำความเย็น R1224yd ในทุกกรณี

(มีจำนวนทั้งสิ้น 102 หน้า)

คำสำคัญ : อีเจ็คเตอร์,ความเร็วเหนือเสียง,การวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหล ______อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระหลัก

Name	: Mr. Aekkalak Koedphom
Independent Study Title	: Computational fluid dynamics analysis for
	optimization design of the supersonic nozzle used in
	ejector refrigeration system
Major Field	: Mechanical Engineering Education
	King Mongkut's University of Technology North
	Bangkok
Independent Study Advisor	: Associate Professor Dr. Kittiwoot Sutthivirode
Academic Year	: 2024

ABSTRACT

This research investigates the Computational fluid dynamics analysis for optimization design of the supersonic nozzle used in ejector refrigeration system using ANSYS Fluent 2024 for computational fluid dynamics simulations. The study analyzes the effects of different nozzle exit diameters 5.48 mm, 6.48 mm, and 7.48 mm. The ejector parameters include a mixing chamber with an inlet angle of 1.67°, a throat length of 15.96 mm, and a subsonic diffuser with an angle of 6°. The simulations are conducted within generator saturation temperatures of 85° C – 95° C, evaporator temperatures of 5° C – 10° C, and a constant condenser temperature of 28°C. Two refrigerants, R1233zd and R1224yd, were used in the simulations.

The results indicate that the 6.48 mm nozzle exit is the most suitable, as it provides the highest Mach number 2.85 and the highest mass entrainment ratio of 0.570 when using R1233zd with an evaporator temperature of 6°C. As the evaporator temperature increases to 8–10°C, the optimal nozzle exit diameters to 5.48 mm, where the mass entrainment ratio reaches a maximum of 0.72. Furthermore, a comparison of refrigerants reveals that R1233zd consistently yields higher sound speed and mass flow ratios than R1224yd in all cases.

(Total 102 Pages)

Keywords: : Ejector, Supersonic, Computational fluid dynamics

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

สารนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของรองศาสตราจารย์ ดร.กิตติวุฒิศุทธิวิโรจน์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.ต้องชนะ ทองทิพย์ อาจารย์ที่ปรึกษาสารนิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ของการวิจัยตลอดจนวิธีการดำเนินการศึกษาอันเป็น ประโยชน์อย่างยิ่ง ในการทำ สารนิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณคณาจารย์และ เจ้าหน้าที่ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือทุกท่าน ซึ่งเป็นบุคคลที่คอยช่วยเหลือและสนับสนุนจนทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อแ<mark>ละคุ</mark>ณแม่ ตลอดจนญาติพี่น้องทุกๆท่าน และ เพื่อนๆ รวมทั้งเพื่อนร่วมงานทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการทำวิจัยในครั้งนี้ ที่คอยให้กำลังใจและ ช่วยเหลือเพื่อให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีมาตลอด

เอ<mark>กลักษณ์ เกิดพ</mark>รม

สารบัญ

			หน้า
บทคัดย่	อภา	ษาไทย	ๆ
บทคัดย่	อภา	ษาอังกฤษ	ዋ
กิตติกรร	รมปร	ัะกาศ	ঀ
สารบัญ	ตารา	٩	જ
สารบัญ	ภาพ		൵
บทที่ 1	บท	น้ำ	1
	1.1	ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
	1.2	วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
	1.3	ขอบเขตของการวิจัย	2
	1.4	นิยามศัพท์	2
	1.5	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2	เอก	สารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
	2.1	ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์	4
	2.2	อีเจ็คเตอร์	6
	2.3	การสร้างอีเจ็คเตอร์	8
	2.4	การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้	23
	2.5	สารทำความเย็น	24
	2.6	พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	29
	2.7	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในโปรแกรมการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ANSYS (FLUENT)	32
	2.8	วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	38
บทที่ 3	วิธีด์	ำเนินการวิจัย	42
	3.1	ศึกษาเอกสารข้อมูล <mark>และฝึกใช้งานโปรแกรมจำลอง</mark> Ansys Fuent 2024	43
	3.2	การออกแบบอีเจ็คเตอร์	43
	3.3	เงื่อนไขขอบเขตการจำลองอีเจ็กเตอร์	44
	3.4	ทำการจำลองของไหลด้วยโปรแกรม Ansys FLUENT 2024	45
บทที่ 4	ผลก	าารวิจัย	51
	4.1	ผลกระทบของปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ต่อประสิทธิภาพ	51

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	64
5.1 สรุปผล	64
5.2 ข้อเสนอแนะ	66
บรรณานุกรม	67
ภาคผนวก ก	69
คู่มือการใช้งานโปรแกรมจำล <mark>อ</mark> งการ	70
ภาคผนวก ข	88
ผลการบัน <mark>ทึก</mark> การจ <mark>ำลองทางพลศาสตร์ของไหล</mark>	89
ภาคผนวก ค	95
ภาพแถบสี <mark>แสดงค่าความเร็วขอ</mark> งเสียงของหัวฉีดอีเจ็คเต <mark>อ</mark> ร์	96
ประวัติผู้วิจัย	102
No 3 Crease 20 2	
	1
O Same?	

สารบัญตาราง

\$ ตารางที่		
3-1	แสดงเงื่อนไขขอบเขตในการจำลองอีเจ็คเตอร์	44
3-2	แสดงคุณสมบัติของสารทำ <mark>ความเย็น</mark>	50
ข-1	ผลการทด <mark>สอบความเร็ว</mark> ของเสียงและอัตราส่วนเชิงมวล <mark>ของปากทาง</mark> ออกหัวฉีด	89
	ขนา <mark>ด 5.48 mm สารทำความเย็น R1233 zd</mark>	
ข-2	<mark>ผลการทดสอบความเร็วของเสียงและอัตราส่วนเชิง</mark> มวล ของปากทางออกหัวฉี <mark>ด</mark>	90
	ขนาด 6.48 mm สาร <mark>ท</mark> ำความเย็น R1233 zd	
ข-3	ผลการทดส <mark>อบ</mark> ความเ <mark>ร็วของเสียงและอัตราส่วนเชิงมวล ของปากทา</mark> งออกหัวฉีด	91
	ขนา <mark>ด</mark> 7.4 <mark>8 mm สารทำความเย็น R12</mark> 33 zd	
ข-4	ผลการทดสอบความ <mark>เร็วของเสียงและอัตราส่วนเชิงมว</mark> ล ของปากทางออกหัวฉีด	92
	ขนาด 5.48 mm สารทำความเย็น R1224 yd	
ข-5	ผลการทดสอบความเร็วของเสียง <mark>และอัตราส่ว</mark> นเชิงมวล ของปากทางออกหัวฉีด	93
	ขนาด 6.48 mm สารทำความเย็น R1224 yd	
ข-6	ผลกา <mark>รทดสอบความเร็วของเสียงและอัตราส่วนเชิง</mark> มวล ของปากทางออกหัวฉีด	94
	ขนาด 7.48 mm สารทำความเย็น R1224 yd	

NHTHN Della

สารบัญรูปภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1 '	ระบบเครื่องทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์	4
2-2	แผนภาพของอีเจ็คเตอร์และแผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงความดันและความเร็วของ	7
é	สารทำงานภายในของอีเจ็คเตอร์	
2-3	แผนภูม <mark>ิอุณหภู</mark> มิ – เอนโทรปี (Mollier chart) ของอีเจ็คเตอร์	7
2-4 i	กระบวนการหยุดนิ่งแบบไอเซนโทรปิก (isentropic stagnation process)	10
2-5 °	หัวฉีดแบบลู่เข้า-บานออก (converging-diverging nozzle)	11
2-6 i	กระบวนกา <mark>รขย</mark> ายตัวของสารทำงานในหัวฉีดปฐมภูมิ	13
2-7 i	กระบวนการคลื่นกระแทกภายในท่อผ <mark>สม</mark> ส่วนกลาง	18
2-8 i	กระบวนการคลื่นกระแทกบนแผนภูมิ อุณหภูมิ-เอนโทรปี (T-s)	18
2-9 i	กระบวน <mark>การเพิ่มความดันของสา</mark> รทำง <mark>านใ</mark> นท่อเพิ่มความดัน	21
2-10	การเกิดพื้นที่วงแหวนรอบ ๆ คลื่นขยายตัวภายในท่อผสม	22
2-11	การนำความร้อนกลับมาใช้	23
2-12	ผังแสดงการใช้งานความร้อนทิ้งเพื่อการปรับอากาศ	24
2-13	ก <mark>ารใ</mark> ช้สารทำควา <mark>มเย็นตั้งแต่อดี</mark> ตจนถึงปัจจุบัน	25
2-14	อุตสาหกรรมที่มีการใช้ HFO-1224yd	<mark>2</mark> 6
2-15	คุณสมบัติของสารทำความเย็น	27
2-16	ความดันไอที่อุณหภูมิของสารทำความเย็น	28
2-17	การเข้ากันได้ระหว่างสารทำความเย็นแต่ละชนิดกับน้ำมันและโลหะ	28
2-18	ร <mark>ูปทรงปกติของเลขมัคที่แสดงถึงการไหลภายในอีเจ็คเตอร์โดยใช้ R14</mark> 1b เป็นสารทำงาง	J 29
2-19	การก่อตัวของคลื่นขยายที่เกิดจากเทคนิคการตรวจเอกซเรย์ด้วยเลเซอร์	30
2-20	กราฟเงาแสดงการไหลภายในอีเจ็คเตอร์ถ่ายโดยเทคนิคการถ่ายภาพ	31
	Schlieren Photograph Technique	
2-21	กราฟเงาเปรียบเทียบกับรูปร่างของเลขมัคได้จากการจำลอง CFD	32
2-22	ลักษณะของความเร็วในการไหลแบบปั่นป่วน	33
2-23	กฎสากลขอบผนัง (The Universal Law of the Wall)	35
2-24	กริดแบบมีโครงสร้าง (Structured Grid)	36
2-25	กริดแบบไม่มีโครงสร้าง (Unstructured Grid)	37
2-26	กริดผสม (Hybrid Grid)	38

	ภาพที่	หน้า
	2-27 กริดแบบปรับตัว (Adaptive Mesh)	38
	2-28 ขนาดของกริดบริเวณใกล้ขอบผนังเมื่อใช้ค่า wall y ⁺ ที่ต่างกัน	38
	3-1 Flow Chart แสดงขั้นตอนการดำเนินงาน	42
	3-2 หัวฉีดปฐมภูมิที่ได้จากการทดลอง	43
	3-3 อีเจ็คเตอร์ที่ได้จากการทดลอง	44
	3-4 หัวฉีดอีเจ็คเตอร์ทปากทางออกขนาด 5.48 mm	45
	3-5 หัวฉีดอีเจ็คเตอร์ทปากทางออกขนาด 6.48 mm	45
	3-6 หัวฉีดอีเจ็คเตอร์ทปากทางออกขนาด 7.48 mm	45
	3-7 The flowchart for implementing the CFD simulation	46
	3-8 แสดงรูปร่ <mark>างแบบจำลองแบบ 2</mark> มิติแบบสมมาตรตามแนวแกนของอีเจคเตอร์	47
	3-9 การสร้างกริดสำหรับแบบจำลองอีเจคเตอร์ในโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 2024	47
	3-10 แสดงลักษณะกริดที่ถูกต้องและสมบูรณ์	48
	3-11 Flow Chart แสดงขั้นต <mark>อนการสร้างกริด</mark>	48
	3-12 ลักษณะ model ที่พร้อมกับการ Setup	49
	4-1 แสดงค่าความเร็วของเสียงกับปากทางออกหัวฉี <mark>ดอ</mark> ีเจ็คเตอร์	51
	4-2 แถบสีแสดงค่าความเร็วของเสียงกับปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์	52
1	ที่อุณหูมิเครื่องระเหย 6 °C	
	4-3 แถบสีแสดงค่าความเร็วของเสียงกับปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์	53
	ที่อุณหูมิเครื่องระเหย 8 °C	
	4-4 แถบสีแสดงค่าความเร็วของเสียงกับปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์	54
	ที่อุณหูมิเครื่องระเหย 10 °C	
	4-5 แสดงค่าอัตราส่วนเชิงมวลกับปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์	55
	4-6 แสดงค่าอัตราส่วนเชิงมวลกับอุณหภูมิเครื่องระเหย	56
	4-7 แสดงค่าความเร็วของเสียงกับอุณหภูมิเครื่องระเหย	57
	ที่ปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 5.48 mm	
	4-8 แสดงค่าความเร็วของเสียงกับอุณหภูมิเครื่องระเหย	58
	ที่ปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 6.48 mm	

	ภาพที่	หน้า
	4-9 แสดงค่าความเร็วของเสียงกับอุณหภูมิเครื่องระเหย	58
	ที่ปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 7.48 mm	
	4-10 แสดงค่าอัตราส่วนเชิงมวลกับอุณหภูมิเครื่องระเหย	59
	ที่ปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 5.48 mm	
	4-11 แสดงค่าอัตราส่วนเชิงมวลกับอุณหภูมิเครื่องระ เ หย	60
	ที่ปากทางออกหัวฉี <mark>ดอ</mark> ีเจ็คเ <mark>ตอ</mark> ร์ขนาด 6.48 mm	
	4-12 แสดงค่าอัตราส่วนเชิงมวลกับอุณหภูมิเครื่องระเหย	60
	ที่ป <mark>ากทางออกหัวฉีดอี</mark> เจ็คเตอร์ขนาด 7.48 mm	
	4-13 <mark>แถบสีแสดงค่าความเร็วของเสีย</mark> งกับปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 5.48 mm	<mark>6</mark> 1
	ที่อุณหูมิเครื่องระเหย 6 °C	
	4-14 แถบสีแสดงค่าความเร็วของเสียงกับปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 6.4 <mark>8</mark> mm	62
	ที่อุณหูมิเครื่องระเหย 6 °C	
	4-15 แถบสีแสดงค่าความเร็ว <mark>ของเสียง</mark> กับปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 7.48 mm	63
	ที่อุณหูมิเครื่องระเหย 6 °C	
	ก-1 โปรแกรมจำลองการไหล ANSYS (FLUENT) 2024	70
	ก-2 The flowchart for implementing the CFD simulation	71
1	ก-3 หน้าต่างหลักของโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 2024	71
	ก-4 Tool box of ANSYS	72
	ก-5 Fluid Flow (Fluent)	72
	ก-6 Creating Models	73
	ก-7 Creating Grid Mesh	73
	ก-8 Flow Chart แสดงขั้นตอนการสร้างกริด	74
	ก-9 Setup – General	75
	ก-10 Setup – Models – Energy	75
	ก-11 Energy	75
	ก-12 Setup – Models – Viscous	76
	ก-13 Viscous Model	76

ภาพที่		หน้า
ก-1	1 Setup – Materials – Fluid – air	77
ก-1.	5 Create/Edit Materials	77
ก-1	5 Setup – Boundary Conditions	78
ก-1	7 Operating Conditions	78
ก-1	3 Pressure Primary	79
ก-1	Pressure secondary	80
ก-2) Pressure outlet	80
ก-2	1 Solution – Methods	81
ก-22	2 Solution – Monitors – Residual	81
ก-2:	3 Residual Monitors	82
ก-2	1 Setup – Viscous	82
ก-2.	5 Viscous Model	83
ก-2	5 Solution – Initialization	83
ก-2	7 Solution – Calculation Activities	84
ก-2	3 Solution – Run Calculation	84
ก-2	9 Results – Report – Fluxes	85
ก-3) Fluxe Reports	85
ก-3	1 Contours	86
ก-3	2 Contours static Pressure	86
ก-3	3 แถบสี Contours of Static Pressure	87
ค-1	แสดงค่า <mark>ความเร็วของเสียงปา</mark> กทาง <mark>ออกหัวฉี</mark> ดขนาด 5.48 mm.ที่อุณหภูมิ	96
	เครื่องกำเนิดไอ 90 °C อุณหภูมิเครื่องระเหย 6 °C สารทำความเย็น R1233 zd	
ค-2	แสดงค่าความเร็วของเสียงปากทางออกหัวฉีดขนาด 5.48 mm.ที่อุณหภูมิ	96
	เครื่องกำเนิดไอ 90 °C อุณหภูมิเครื่องระเหย 8 °C สารทำความเย็น R1233 zd	
ค-3	แสดงค่าความเร็วของเสียงปากทางออกหัวฉีดขนาด 5.48 mm.ที่อุณหภูมิ	96
	เครื่องกำเนิดไอ 90 °C อุณหภูมิเครื่องระเหย 10 °C สารทำความเย็น R1233 zd	

7
7
7
3
3
3
)
)
)
)
)
)
L

ภาพที่ หน้า ค-17 แสดงค่าความเร็วของเสียงปากทางออกหัวฉีดขนาด 7.48 mm.ที่อุณหภูมิ 101 เครื่องกำเนิดไอ 90 °C อุณหภูมิเครื่องระเหย 8 °C สารทำความเย็น R1224 yd

ค-18 แสดงค่าความเร็วของเสียงปากทางออกหัวฉีดขนาด 7.48 mm.ที่อุณหภูมิ 101 เครื่องกำเนิดไอ 90 °C อุณหภูมิเครื่องระเหย 10 °C สารทำความเย็น R1224 yd



บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันสถานการณ์ด้านพลังงานของประเทศไทยมีแนวโน้มการใช้พลังงานทุกประเภทที่สูงขึ้น เนื่องจากการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศที่ขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ทั้งในภาคการเกษตร, ภาคอุตสาหกรรม, และครัวเรือน ส่งผลให้ความต้องการพลังงานเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งทำให้ ประเทศไทยต้องพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศเพิ่มมากขึ้น การนำเข้าพลังงานที่สูงขึ้นย่อม ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิต และทำให้เกิดวิกฤตการณ์ด้านพลังงานในอนาคต หากไม่มีการพัฒนา เทคโนโลยีที่ช่วยลดการใช้พลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิผล

ในภาคอุตสาหกรรม หนึ่งในปัญหาที่สำคัญคือการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนเหลือทิ้ง จากกระบวนการผลิต โรงงานต่างๆ มักปล่อยความร้อนส่วนเกินที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์ออกสู่สิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นในรูปของไอร้อน หรือจากกระบวนการผลิตอื่นๆ ซึ่งไม่เพียงแค่ทำให้ประสิทธิภาพการ ผลิตลดลง แต่ยังเป็นการสูญเสียทรัพยากรที่มีค่า การจัดการกับความร้อนเหลือทิ้งดังกล่าวจึงเป็น ปัญหาที่ต้องมีการแก้ไขเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานให้เกิดประโยชน์สูงสุดการพัฒนาระบบ ที่สามารถนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ไหม่ (Waste Heat Recovery) จึงกลายเป็นเรื่องสำคัญ เนื่องจากจะช่วยลดการใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานหลัก เช่น ไฟฟ้า ลดต้นทุนการผลิต และลดการ ปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ระบบทำความเย็นเป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่สำคัญ ในการใช้พลังงานในหลายภาคส่วน โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมและภาคครัวเรือน ซึ่งมีบทบาทสำคัญ ในกระบวนการผลิตที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิ, การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร, หรือแม้กระทั่งใน อุตสาหกรรมยาและเคมีภัณฑ์ที่ต้องการอุณหภูมิที่เสถียร การทำความเย็นยังมีบทบาทสำคัญใน กระบวนการที่ต้องรักษาคุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์จากการเสื่อมสภาพที่อาจเกิดขึ้น จากอุณหภูมิสูง นอกจากนี้, ระบบทำความเย็นยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตต่าง ๆ โดยการลดความร้อนที่เกิดขึ้นจากเครื่องจักรและอุปกรณ์ภายในโรงงานอุตสาหกรรม, ซึ่งสามารถลด ความเสี่ยงจากการเกิดความเสียหายและเพิ่มอาดกรเร็งบายงเครื่องจักร.

ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ (Vapor Compression Cycle) ซึ่งใช้ไฟฟ้าในการทำงานยังคงเป็น ที่นิยมในปัจจุบัน แต่ข้อจำกัดหลักของระบบนี้คือการใช้พลังงานสูงและการปล่อยสารทำความเย็นที่ อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วยเหตุนี้การพัฒนาระบบทำความเย็นที่มีประสิทธิภาพ และใช้น้อยพลังงานจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในปัจจุบันระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ (Ejector Refrigeration System) ได้รับการสนใจมากขึ้นในช่วงหลายปีที่ผ่านมาเนื่องจาก มีความสามารถในการนำพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการต่าง ๆ มาใช้ในระบบทำความ เย็น ซึ่งช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าและยังสามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ด้วยโดยเฉพาะ ในประเทศไทยที่มีแหล่งพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมต่างๆ และความร้อนจาก แสงแดด, การนำความร้อนเหล่านี้มาใช้ในระบบทำความเย็นจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการพัฒนา ระบบที่ยั่งยืน.ซึ่งหัวฉีดสำหรับอีเจ็คเตอร์เป็นองค์ประกอบสำคัญในระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ มีหน้าที่เพิ่มความดันในระบบทำความเย็น ดังนั้นหากออกแบบหัวฉีดสำหรับอีเจ็คเตอร์ที่เหมาะสมจะ ส่งผลช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์.

ดังนั้นทางผู้วิจัยทำจึงมีแนวความคิดโดยใช้โปรแกรมจำลองทางพลศาสตร์ของไหลหรือ Computational Fluid Dynamics มาใช้วิเคราะห์ความเร็วเหนือเสียงที่เหมาะสมของหัวฉีดสำหรับ อีเจ็คเตอร์ในระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ ซึ่งโปรแกรมจำลองทางพลศาสตร์ของไหล เป็นเครื่องมือที่สำคัญในการพัฒนาและออกแบบระบบที่มีประสิทธิภาพสูงสุดลดต้นทุนในการพัฒนา หาขนาดสัดส่วนหัวฉีดสำหรับอีเจ็คเตอร์ให้เหมาะสมในการใช้งานและการทำงานในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความเร็วเหนือเสียงของหัวฉีดสำหรับอีเจ็คเตอร์ในระบบทำความเย็น เพื่อหาสัดส่วนขนาดปากทางออกของหัวฉีดปฐมภูมิให้เหมาะสมโดยวิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วย โปรแกรม ANSYS (FLUENT) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางและเป็นที่ยอมรับ

1.2.1 เพื่อศึกษาความเร็วเหนือเสียงของหัวฉีดสำหรับอีเจ็คเตอร์โดยใช้โปรแกรมจำลองทาง พลศาสตร์ของไหลที่ใช้สารทำความเย็นสองชนิดต่างกันเป็นสารทำความเย็น

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพต่าง ๆ ของหัวฉีดสำหรับอีเจ็คเตอร์ที่ใช้สารทำความเย็น R1233zd และสารทำความเย็นR1224yd เป็นสารทำความเย็นในระบบ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ใช้วิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม ANSYS (FLUENT)

1.3.2 ใช้สารทำความเย็น R1233zd และสารทำความเย็น R1224yd ในการศึกษาระบบทำ ความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์

1.3.3 ความดันอิ่มตัวของสารทำความเย็นอยู่ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส 90 องศาเซลเซียส
 และ 95 องศาเซลเซียส

1.3.4 อุณหภูมิของเครื่องระเหยจะอยู่ที่ 5-10 องศาเซลเซียส

1.3.5 ใช้ขนาดคอคอดของหัวฉีดปฐมภูมิคงที่ โดยมีการเปลี่ยนแปลงปากทางออกของหัวฉีด ปฐมภูมิในการวิเคราะห์ความเร็วเหนือเสียงของหัวฉีดสำหรับอีเจ็คเตอร์ในระบบทำความเย็น

1.4 นิยามศัพท์

การจำลองพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics: CFD) คือกระบวนการใช้ คอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์เพื่อวิเคราะห์และแก้ปัญหาเกี่ยวกับการไหลของของไหลรวมถึงการถ่ายเท ความร้อนและมวลในระบบต่างๆ กระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับการใช้หลักการทางคณิตศาสตร์ ฟิสิกส์ และการคำนวณในการสร้างแบบจำลองและการจำลองสภาวะการไหลของของไหลในสภาพแวดล้อม ต่าง ๆ

1.5 ประโยชน์ที่<mark>คาดว่าจะได้รับ</mark>

8/10

 1.5.1 ได้ทราบถึงประสิทธิภาพของหัวฉีดอีเจ็คเตอร์จากการวิเคราะห์ความเร็วเหนือเสียงของ หัวฉีดสำหรับอีเจ็คเตอร์ในระบบทำความเย็นโดยการลดต้นทุนที่มีค่าใช้จ่ายสูงและลดเวลาในการ พัฒนา

1.5.2 ได้แบบจำลองการวิเคราะห์ความเร็วเหนือเสียงของหัวฉีดสำหรับอีเจ็คเตอร์สำหรับระบบ ทำความเย็น

1.5.3 ได้ทราบถึงความแตกต่างของความเร็วเหนือเสียงของหัวฉีดสำหรับอีเจ็คเตอร์เมื่อ สารทำความเย็นแตกต่างกัน

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์

ระบบเครื่องทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ (ejector refrigeration cycle) เป็นระบบ เครื่องทำความเย็น ที่ใช้พลังงานความร้อนในการขับเคลื่อน เช่นเดียวกับระบบเครื่องทำความเย็นแบบ ดูดซึม ดังนั้นจึงสามารถที่จะนำเอาพลังงานความร้อนคุณภาพต่ำมาเปลี่ยนเป็นพลังงานความเย็นที่มี ประโยชน์ ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์เป็นระบบที่ใช้ อีเจ็คเตอร์ (Ejector) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ อาศัยหลักการ Venturi effect ในการสร้างสุญญากาศและอัดสารทำความเย็น โดยระบบนี้สามารถ ใช้พลังงานความร้อนเหลือทิ้ง (waste heat) หรือพลังงานความร้อนต่ำเพื่อขับเคลื่อนกระบวนการ ทำความเย็นทำให้มีประสิทธิภาพสูงและลดการใช้พลังงานไฟฟ้า



ภาพที่ 2-1 ระบบเครื่องทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ (สุรเชษฐและคณะ, 2564)

ภาพที่ 2-1 แสดงแผนภาพของวัฏจักรเครื่องทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ภายในระบบจะ ประกอบไปด้วย คอนเดนเซอร์ อีวาโปเรเตอร์และวาล์วลดความดัน เช่นเดียวกับระบบเครื่องทำ ความเย็นแบบอัดไอเพียงแต่ในการเพิ่มความดันของสารทำความเย็นจะใช้อีเจ็คเตอร์บอยเลอร์และปั๊ม หมุนเวียนสารทำงานแทนเครื่องอัดไอที่ใช้พลังงานกลในการขับเคลื่อนเริ่มต้นที่ บอยเลอร์ซึ่งจะรับ พลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงเพื่อใช้ในการผลิตไอสารทำงานที่มีความดันและ อุณหภูมิสูงและใช้เป็นของไหลปฐมภูมิสำหรับอีเจ็คเตอร์และท่อดูดของอีเจ็คเตอร์จะต่อกับ อีวาโปเรเตอร์ดังนั้นจึงทำให้ความดันภายในอีวาโปเรเตอร์ลดต่ำลงและจะทำให้สารทำงานระเหย กลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิต่ำโดยจะรับพลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ ซึ่งก็คือภาระ การทำความเย็นของระบบนั่นเองไอสารทำงานความดันต่ำจากอีวาโปเรเตอร์ซึ่งถูกใช้เป็นของไหล ทุติยภูมิจะผสมกับของไหลปฐมภูมิภายในท่อผสมของอีเจ็คเตอร์และทางออกของท่อเพิ่มความดันของ ไหลผสมซึ่งถูกเพิ่มความดันให้มีค่าสูงขึ้นมากกว่าในอีวาโปเรเตอร์จะส่งผ่านไปยังคอนเดนเซอร์และ กลั่นตัวเป็นของเหลวโดยระบายความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกบางส่วนของของเหลวที่ได้จะถูก ส่งกลับไปยังบอยเลอร์โดยผ่านปั้มหมุนเวียนสารทำงานและของเหลวส่วนที่เหลือจะขยายตัวผ่านวาล์ว ลดความดันและเข้าสู่อีวาโปเรเตอร์เป็นการครบวัฏจักรการทำงาน

เช่นเดียวกับระบบเครื่องทำความเย็นแบบดูดซึมซึ่งใช้พลังงานความร้อนในการขับเคลื่อนและใช้ พลังงานกลเพียงเล็กน้อยในการหมุนเวียนสารทำงาน ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นของระบบ เครื่องทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์จะสามารถคำนวณได้จาก

$$COP = \frac{\Sigma \dot{Q}_{evap}}{\dot{Q}_{boiler} + \dot{W}_{pump}}$$
(2-1)

โดยที่ Q_{evap} คือ ภาระการทำความเย็นที่ถ่ายเทให้กับอีวาพอเรเตอร์ (kw) Q_{boiler} คือ ค่าพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับบอยเลอร์ (kw) W_{pump} คือ ค่าพลังงานกลที่ใช้ในการขับเคลื่อนปั๊ม (kw) ค่าพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับบอยเลอร์สามารถคำนวณได้จาก

$$\dot{Q}_{\text{boiler}} = \dot{m}_{\text{p}} \times h_{\text{g}} @ T_{\text{boiler}} - h_{\text{f}} @ T_{\text{con}}$$
 (2-2)

้ ค่าภาระการทำความเย็นที่ถ่ายเทให้กับอีวาโปเรเตอร์จะสามารถคำนวณได้จาก

$$\dot{\mathbf{Q}}_{\text{evap}} = \dot{\mathbf{m}}_{s} \times \mathbf{h}_{g} @ \mathbf{T}_{\text{evap}} - \mathbf{h}_{f} @ \mathbf{T}_{\text{con}}$$
 (2-3)

h_f@T_{con} คือ เอนซัลปีของสารทำงานทางเข้าบอยเลอร์และอีวาโปเรเตอร์ซึ่งมี ค่าเท่ากับค่าของของเหลวอิ่มตัวที่อุณหภูมิเครื่องควบแน่น (kJ/kg)

โดยปกติแล้วค่าพลังงานกลที่ใช้ในการขับเคลื่อนปั้มหมุนเวียนสารทำงานจะมีค่าน้อยมากเมื่อ เทียบกับพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับบอยเลอร์และที่อีวาโปเรเตอร์ ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การ ทำความเย็นจึงสามารถที่จะคำนวณจาก

$$COP = R_{m} \times \frac{h_{g}@T_{evap} - h_{f}@T_{con}}{h_{g}@T_{boiler} - h_{f}@T_{con}}$$
(2-4)

ในช่วงอุณหภูมิทำง<mark>าน</mark>ของระบบเครื่<mark>องท</mark>ำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์นั้น

$$h_g@T_{boiler} \approx h_g@T_{evap}$$

ดังนั้น

COP≈ R_m

(2-6)

(2-5)

2.2 อีเจ็คเตอร์

ในปี 1858 นักประดิษฐ์ชาวฝรั่งเศสชื่อว่า Henry Giffard ได้ประดิษฐ์อีเจ็คเตอร์ขึ้นเป็น ครั้งแรกของโลกเพื่อใช้ในการสูบน้ำไปยังถังเก็บน้ำของระบบเครื่องยนต์ผลิตไอน้ำหลังจากนั้นได้มีการ ประยุกต์ใช้อีเจ็คเตอร์กันอย่างกว้างขวางเช่นใช้อีเจ็คเตอร์ในระบบน้ำหล่อเย็นของเตาปฏิกรณ์ นิวเคลียร์เป็นต้นซึ่งส่วนใหญ่แล้วอีเจ็คเตอร์จะถูกนำไปประยุกต์ใช้ในระบบทำความเย็นหรือที่เรียกกัน ว่าระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์

อีเจ็คเตอร์ คือ อุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ใช้หลักการทำงานของปรากฏการณ์การไหลผ่านทางคอคอด (Venturi Effect) โดยการเปลี่ยนความดันสถิตของของไหลปฐมภูมิให้กลายเป็นความดัน พลศาสตร์ ซึ่งจะทำให้เกิดบริเวณที่มีความดันต่ำหรือความดันสถิตภายในอีเจ็คเตอร์และเกิดการ เหนี่ยวนำเอาของไหลทุติยภูมิเข้ามาผสมกับของไหลปฐมภูมิก่อนที่จะไหลออกจากอีเจ็คเตอร์



จากภาพที่ 2-2 และ 2-3 แสดงแผนภาพของอีเจ็คเตอร์และแผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลง ความดันและความเร็วของสารทำงานภายในของอีเจ็คเตอร์เริ่มต้นที่สารทำงานความดันสูงซึ่งอยู่ใน สถานะไอ (P) ที่เรียกว่า ของไหลปฐมภูมิ (Primary Fluid) จะขยายตัวผ่านหัวฉีดปฐมภูมิ (Primary-Nozzle) ซึ่งเป็นหัวฉีดแบบลู่เข้า-บานออก (Converging-Diverging หรือ Laval Nozzle) ที่ทางออก ของหัวฉีดปฐมภูมิของไหลปฐมภูมิจะขยายตัวและถูกเร่งให้มีความเร็วมากกว่าความเร็วของเสียงซึ่งจะ ทำให้เกิดความดันต่ำขึ้นที่ปากทางออกของหัวฉีด (1-P) เมื่อเป็นเช่นนี้ สารทำงานความดันต่ำซึ่งอยู่ ในสถานะไอ (S) ที่เรียกว่า ของไหลทุติยภูมิ (Secondary Fluid) จะถูกดูดเข้ามาภายในท่อผสม (1-s) ้ และหลังจากนั้นของไหลปฐมภูมิซึ่งมีความเร็วสูงจะผสมกับของไหลทุติยภูมิซึ่งมีความเร็วต่ำภายในท่อ ้ผสมกระบวนการผสมจะเสร็จสิ้<mark>นสมบูรณ์เมื่อของไหลผสมเข้</mark>าสู่ท่อผสมส่วนกลาง (2) ความเร็วของ ของไหลผสมจะต่ำกว่าความเร็วของของไหลปฐมภูมิที่ออกมาจากหัวฉีดแต่ก็ยังคงมีความเร็วมากกว่า ความเร็วของเสียงซึ่งโดยธรรมชาติแล้วของไหลที่ซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นไอหรือก๊าซและมีความเร็ว มากกว<mark>่าควา</mark>มเร็วเสียงและเมื่อไ<mark>หล</mark>มาในบริเวณที่มีความดันสูงจะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ้คลื่<mark>นกระแทก ซึ่งจะทำให้ของไหลควา</mark>มเร็วลดต่ำลงม<mark>าอยู่</mark>ในร<mark>ะ</mark>ดับที่ต่ำกว่าความเร็วของเสียงซึ่งจะทำ <mark>ให้ ความดัน อุณหภูมิ และความหนาแน่นของของไหลนั้น ๆ เพิ่มขึ้นโ<mark>ดยฉั</mark>บพลันหลังจาก<mark>นั้น</mark>ของไหล</mark> ู้ผสมซึ่งความเร็วต่ำกว่าความเร็วของเสียง (3<mark>) ก็</mark>จะไหลเข้าสู่ท่<mark>อเ</mark>พิ่มความดัน (Subsonic Diffuser) ้เพื่อลดความเร็วให้ต่ำลงจ<mark>นเกือบอยู่ในสภาวะ</mark>หยุ<mark>ดนิ่ง หรือที่เรียกว่า Stagnatio</mark>n State <mark>ดัง</mark>นั้น พลังงานจลน์ของของไหลเกือบทั้งหมดจึงเปลี่ยนกลับมาเป็นความดันที่สูงขึ้นที่ทางออกของท่อเพิ่ม ้ความดัน (4) เป็นอันสิ้นสุดกระบวนการเพิ่มความดันหรือกระบวนการอัดไอของอีเจ็คเต<mark>อ</mark>ร์ ดังภาพที่ 2-3 แผนภาพของอีเจ็คเตอร์และแผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงความดันและ แสดง ความเร็วของสารทำงานภายในของอีเจ็คเตอร์

ประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์จะนิยามโดยใช้ค่าอัตราส่วนเชิงมวล (Mass Entrainment Ratio) ซึ่งก็คือค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการโดยมวลของสารทำความเย็นทุติยภูมิต่ออัตราการไหลโดยมวล ของสารทำความเย็นปฐมภูมิ ดังสมการที่ (2-7)

$$R_{m} = rac{\ddot{o}$$
ตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นทุติยภูมิ $(\dot{m_{s}})$ (2-7)

2.3 การสร้างอีเจ็คเตอร์

2.3.1 การคำนวณหาประสิทธิภาพการทำงานของอีเจ็คเตอร์

กระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์สารทำงานจะอยู่ในสถานะไอทีมีความดัน ต่ำมากดังนั้นจึงสามารถสมมติได้ว่าสารทำงานที่ใช้เป็นก๊าซในอุดมคติ (ideal gas) ซึ่งความสัมพันธ์ ระหว่าง อุณหภูมิความดันและความหนาแน่นจะหาได้จากสมการของก๊าซในอุดมคติ (ideal gasequation) โดยที่ P คือ ค่าความดันสัมบูรณ์ (absolute pressure, kPa)

T คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (absolute temperature, kPa)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant, kJ/kg. k)

ρ คือ ค่าความหนาแน่น (kg/m³)

และในการวิเคราะห์เรายังใช้สมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\dot{\mathbf{Q}} = \dot{\mathbf{W}} + \sum \dot{\mathbf{m}}_{e} \times \left(\mathbf{h}_{e} + \frac{v_{e}^{2}}{2} + g \times \mathbf{Z}_{e} \right) - \sum \dot{\mathbf{m}}_{i} \times \left(\mathbf{h}_{i} + \frac{v_{i}^{2}}{2} + g \times \mathbf{Z}_{i} \right)$$
(2-9)

เมื่อนำสมการนี้มาใช้กับอีเจ็คเต_ือร์พลังงานศักย์จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงและจะไม่มีการถ่ายเท พลังงานความร้อนและพลังงานกลกับสิ่งแวดล้อมภายนอกดังนั้น

$$\sum \dot{\mathbf{m}}_{e} \times \left(\mathbf{h}_{e} + \frac{V_{e}^{2}}{2}\right) = \sum \dot{\mathbf{m}}_{i} \times \left(\mathbf{h}_{i} + \frac{V_{i}^{2}}{2}\right)$$
(2-10)

หรือ

$$\sum \dot{\mathbf{m}}_{e} \times h_{o-e} = \sum \dot{\mathbf{m}}_{i} \times h_{o-i}$$
(2-11)

ซึ่ง h_{o-e} และ h_{o-i} คือค่า เอนธัลปีรวม (total enthalpy หรือ stagnation enthalpy) ซึ่งได้รวม พลังงานจลน์เข้ากับเอนธัลปีของสารทำงาน ดังนั้น

$$h_0 = h + \frac{V^2}{2}$$
 (2-12)

โดยที่ ho คือ ค่าเอนธัลปีรวม (total enthalpy) ของของไหล (kJ/kg)

h คือ ค่าเอนธัลปีสถิต (static enthalpy) ของของไหล (kJ/kg)

เมื่อของไหลที่มีความเร็ว V ถูกทำให้หยุดนิ่งโดยไม่มีการถ่ายเทพลังงานกับสิ่งแวดล้อมและ สามารถย้อนกลับได้จะเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการหยุดนิ่งแบบไอเซนโทรปิก (isentropicstagnation process) ซึ่งพลังงานจลน์ทั้งหมดของของไหลจะเปลี่ยนกลับไปเป็นค่าเอนธัลปีซึ่งทำให้มี การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากอุณหภูมิสถิต (static temperature) ไปเป็นอุณหภูมิรวม (stagnation temperature) และความดันจะเปลี่ยนแปลงจากความดันสถิต (static pressure) ไป เป็นความมดันรวม (stagnation pressure) และสำหรับก๊าซในอุดมคติซึ่ง △h = Cp x △T ดังนั้น อุณหภูมิรวมหาได้จากสมการ 2-13

$$\Gamma_{\rm o} = T + \frac{V^2}{2 \times C_{\rm p}} \tag{2-13}$$

- โดยที่ T_o คือ ค่าอุณหภูมิรวม (total temperature หรือ stagnation temperature) ของของไหล (°C, K)
 - T คือ ค่าอุณหภูมิสถิต (static temperature) ของของไหล (°C, K)





ภาพที่ 2-4 กระบวนการหยุดนิ่งแบบไอเซนโทรปิก (isentropic stagnation process)

เมื่อกระบวนการนี้เป็นแบบไอเซนโทรปิก ดังนั้น ความดันรวมจะหาได้จาก

$$\frac{P_0}{p} = \left[\frac{T_0}{T}\right]^{\frac{k}{k-1}}$$

(2-14)

โดยที่ Po คือ ค่าความดันรวม (total pressure) ของของไหล (kPa)

P คือ ค่าความดันสถิต (static pressure) ของของไหล (kPa)

k คือ ค่าอัตราส่วนความร้อนจำเพาะ (specific heat ratio) ของของไหล

ตัวแปรอีกอย่างที่ใช้กันแพร่หลายในการวิเคราะห์ก๊าซในอุดมคติซึ่งไหลด้วยความเร็วสูง คือ ตัวเลขของมัค (Mach number) ซึ่งนิยามโดยอัตราส่วนระหว่างความเร็วของของไหลต่อความเร็วของ เสียงในของไหลนั้น ๆ

$$\mathbf{M} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{V}_{\text{sound}}} = \frac{\mathbf{V}}{\sqrt{\mathbf{k} \times \mathbf{R} \times \mathbf{T}}}$$
(2-15)

โดยที่ V_{sound} คือ ค่าความเร็วของเสียงในก๊าซในอุดมคติ (velocity of sound, m/sec)

- R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant, J/kg.K)
- T คือ อุณหภูมิสถิตของของไหล (K)
- K คือ ค่าอัตราส่วนความร้อนจำเพาะ (specific heat ratio)

2.3.2 หัวฉีดปฐมภูมิ (primary nozzle)

หัวฉีดปฐมภูมิสำหรับอีเจ็คเตอร์ที่ใช้ก๊าซเป็นสารทำงานจะเป็นชนิดลู่เข้า-บานออก (converging-diverging) ซึ่งจะสามารถเร่งความเร็วของก๊าซจากหยุดนิ่งจนมีความเร็วมากกว่า ความเร็วของเสียงที่ปากทางออกของหัวฉีด ภาพที่ 2-5 แสดงภาพของหัวฉีดปฐมภูมิของไหลปฐมภูมิ (P) ที่มีความดันและอุณหภูมิสูงซึ่งมีความเร็วต่ำหรืออยู่ในสภาวะหยุดนิ่ง (stagnation state) จะถูก เร่งและขยายตัวในหัวฉีดส่วนที่เป็นท่อลู่เข้า (converging duct) ทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมี ความเร็วเท่ากับความเร็วของเสียงที่คอคอดของหัวฉีด (throat) ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิและความดันลด ต่ำลงหลังจากนั้นสารทำงานจะขยายตัวและถูกเร่งต่อจนกระทั่งมีความเร็วมากกว่าความเร็วของเสียง ในหัวฉีดส่วนที่เป็นท่อซึ่งมีลักษณะบานออก (diverging duct) ดังนั้น ที่ปากทางออกของหัวฉีด ปฐมภูมิของไหลปฐมภูมิจึงมีความเร็วสูงซึ่งมากกว่าความเร็วของเสียง (M1P > 1) และจะมีความดัน และอุณหภูมิต่ำ



ภาพที่ 2-5 หัวฉีดแบบลู่เข้า-บานออก (converging-diverging nozzle)

การที่จะเร่งให้มีความเร็วสูงขึ้นจะต้องใช้ท่อซึ่งมีลักษณะลู่เข้าเพราะเมื่อสารทำงานมีความเร็วไม่ สูงความหนาแน่นของสารทำงานจะลดลงไม่มาก โดยจะพิจารณาจากสมการที่ใช้ในการหาอัตราการ ไหลของของไหลในท่อ

$$\dot{\mathbf{m}} = \boldsymbol{\rho} \times \mathbf{V} \times \mathbf{A} \tag{2-16}$$

โดยที่ **ρ** คือ ค่าความหนาแน่น (kg/m²)

- V คือ ความเร็วของของไหล (m/s)
- A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ (m²)

เมื่อของไหลมีความเร็วต่ำกว่าความเร็วของเสียงอุณหภูมิและความดันจะมีค่าลดลงไม่มากนักซึ่ง จะทำให้ความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นการที่จะเร่งให้ของไหลมีความเร็วสูงขึ้นจึงต้องลด ขนาดของท่อให้เล็กลงภายในหัวฉีดส่วนที่เป็นท่อลู่เข้าของไหลจะถูกเร่งให้มีความเร็วสูงสุดที่คอคอด (throat) ของหัวฉีดซึ่งจะมีความเร็วเท่ากับความเร็วของเสียงพอดี (M = 1) หลังจากนั้นถ้าต้องการที่ จะเร่งให้ของไหลมีความเร็วเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าความเร็วของเสียง (M > 1) เมื่อของไหลมีความเร็ว มากกว่าความเร็วของเสียง (supersonic flow) จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดัน ค่อนข้างมากซึ่งจะทำให้ความหนาแน่นของของไหลลดลงอย่างรวดเร็วจึงจำเป็นต้องการพื้นที่ในการ ไหลมากขึ้นทั้ง ๆ ที่ของไหลมีความเร็วเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นการที่จะเร่งความเร็วของของไหลจาความเร็ว

เท่ากับความเร็วของเสียง จนมีค่ามากกว่าความเร็วของเสียงจึงจำเป็นต้องใช้ท่อที่ลักษณะบานออก เพื่อรองรับการเพิ่มขึ้นของ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (ในขณะที่อัตราการไหลเชิงมวลมีค่าคง เดิม) ดังนั้น การที่จะเร่งให้ของไหล มีความเร็วเพิ่มสูงขึ้นจากจุดหยุดนิ่งไปจนมีความเร็วมากกว่า ความเร็ว ของเสียงจึงจำเป็นที่จะต้องใช้หัวฉีดที่มีลักษณะลู่เข้า-บานออก (convergent divergentnozzle) เท่านั้น โดยที่ของไหลจะถูกเร่งจากจุดหยุดนิ่งในหัวฉีดส่วนที่มีลักษณะลู่เข้าจนมีความเร็ว เท่ากับความเร็วของเสียง (M = 1) ที่คอคอด (ส่วนที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กที่สุด) หลังจากนั้นของไหลจะ ถูกเร่งให้มีความเร็วมากกว่าความเร็วของเสียง (M > 1) ในหัวฉีดส่วนที่มีลักษณะบานออกจนได้ ความเร็วสูงสุดที่ปากทางออก ดังนั้น ถ้าหัวฉีดมีลักษณะลู่เข้าเพียงอย่างเดียว (convergent nozzle) จะสามารถเร่งให้ของไหลมีความเร็วสูงสุดได้เพียงเท่ากับความเร็วของเสียงเท่านั้น





เมื่อใช้หัวฉีดปฐมภูมิเป็นปริมาตรควบคุมและไม่มีพลังงานความร้อนหรือพลังงานกลถ่ายเท ระหว่างหัวฉีดกับสิ่งแวดล้อมและเป็นกระบวนการที่สามารถย้อนกลับได้ ดังนั้นการขยายตัวในหัวฉีดนี้ จึงเป็นแบบไอเซนโทรปิกและสมการอนุรักษ์พลังงานของหัวฉีด

$$\dot{m}_{p} \times \left(h_{p} + \frac{V_{p}^{2}}{2}\right) = \dot{m}_{p} \times \left(h_{1p} + \frac{V_{1p}^{2}}{2}\right)$$
 (2-17)

เมื่อ h_{o-P} = h_{o-1P'} และ T_{o-P} = T_{o-1P'} และเมื่อเราสมมุติว่ากระบวนการขยายตัวภายในหัว<mark>ฉีด</mark> ปฐมภูมิ เป็นกระบวนการแบบไอเซนโทรปิก ดังนั้น จึงไม่มีการสูญเสียความดันรวม

$$P_{o-P} = P_P = P_{o-f} = P_{o-1P}$$
 (2-18)

อุณหภูมิสถิตของของไหลปฐมภูมิที่ปากทางออกของหัวฉีดจะหาได้จาก

$$\frac{T_{1\dot{P}}}{T_{P}} = \left[\frac{P_{1}}{P_{P}}\right]^{\frac{k-1}{k}}$$
(2-19)

ของไหลปฐมภูมิที่ออกจากหัวฉีดจะมีความเร็วเท่ากับ

$$V_{1\acute{P}} = \sqrt{2 \times C_p \times (T_P - T_{1\acute{P}})}$$
(2-20)

$$\eta_{\text{nozzle}} = \frac{\frac{V_{1P}^2}{2}}{\frac{V_{1P}^2}{2}}$$
(2-21)

ซึ่งคืออัตราส่วนระหว่างพลังงานจลน์ที่ได้จากกระบวนการขยายตัวที่เกิดขึ้นจริงต่อพลังงานจลน์ที่ได้ จากกระบวนการขยายตัวแบบไอเซนโทรปิก

$$\eta_{\text{nozzle}} = \frac{T_{\text{P}} - T_{1\text{P}}}{T_{\text{P}} - T_{1\text{P}}}$$
(2-22)

โดยทั่วไปแล้วหัวฉีดแบบลู่เข้า-บานออกจะมีประสิทธิภาพประมาณ 90 ถึง 95% และความเร็วจริง ที่ได้

$$V_{1P} = \sqrt{2 \times C_p \times (T_P - T_{1P})}$$
(2-23)

ค่าตัว<mark>เลขข</mark>องมัค

$$M_{1P} = \frac{V_{1P}}{\sqrt{k \times R \times T_{1P}}}$$
(2-24)

เมื่อกระบวนการขยายตัวในหัวฉีดไม่สามารถย้อนกลับได้ จะทำให้เกิดการสูญเสียความดันรวมดังนั้น

$$P_{o-1P} < P_{o-P}$$
 (2-25)

ถ้าเราทราบค่าอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลปฐมภูมิ พื้นที่หน้าตัดที่ปากทางออกของหัวฉีด

$$A_{1P} = \frac{\dot{m}_{p}}{\frac{P_{1P}}{R \times T_{1P}} \times V_{1P}}$$
(2-26)

ที่คอคอดของหัวฉีดซึ่งของไหลจะมีความเร็วเท่ากับความเร็วของเสียง (M = 1) และ จากภาพที่ 2-6 จะเห็นได้ว่าไม่ว่ากระบวนการขยายตัวจะเป็นแบบไอเซนโทรปิก หรือแบบย้อนกลับ ไม่ได้ความเร็วและอุณหภูมิของของไหลจะมีค่าเท่ากันที่แตกต่างกันก็คือค่าความดันสถิตหัวฉีดที่มีการ ขยายตัวแบบไอเซนโทรปิกจะมีความดันสถิตที่คอคอดสูงกว่าหัวฉีดที่ใช้จริงความเร็วที่คอคอดของ หัวฉีดซึ่งของไหลจะมีความเร็วเท่ากับเร็วของเสียง (M = 1) ดังนั้น

$$V_{t} = V_{t} = \sqrt{k \times R \times T_{t}}$$
(2-27)

โดยที่ค่าอุณหภูมิสถิต

$$T_{t} = T_{p} - \frac{k \times R \times T_{c}}{2 \times C_{p}}$$
(2-28)

และค่าความดันสถิตเมื่อเป็นกระบวนการแบบไอเซนโทรปิก

$$\frac{P_{t}}{P_{p}} = \left[\frac{T_{t}}{T_{p}}\right]^{\frac{K-1}{k}}$$
(2-29)

และค่าความดันสถิตเมื่อเป็นกระบวนการที่ไม่สามารถย้อนกลับได้

$$\frac{P_1}{P_P} = \left[\frac{T_{t''}}{T_P}\right]^{\frac{k-1}{k}}$$
(2-30)

โดยที่ Tt" คือ อุณหภูมิที่เกิดขึ้นเมือการขยายตัวเป็นไอเซนโทรปิกและขยายตัวจากตัวจากความ ดัน ไปจนได้ความดัน P_P ซึ่งที่จุด t" นี้จะมีความเร็วมากกว่าความเร็วของเสียงถ้าเป็นกระบวนการที่มี การ สูญเสียจะได้ความเร็วเท่ากับความเร็วของเสียงพอดี ซึ่ง Tt" จะหาได้จาก

$$\eta_{\text{nozzle}} = \frac{T_{\text{P}} - T_{\text{t}}}{T_{\text{P}} - T_{\text{t}''}}$$
(2-31)

พื้นที่หน้าตัดของคอคอดจะหาได้จาก

$$A_{t} = \frac{\dot{m}_{p}}{\frac{P_{t}}{R \times T_{t}} \times V_{t}}$$
(2-32)

2.3.3 ของไหลทุติยภูมิที่ทางเข้าของท่อผสม

เนื่องจากที่ปากทางออกของหัวฉีดปฐมภูมิจะมีความดันต่ำกว่าความดันของอีวาโปเรเตอร์ อยู่ เล็กน้อย ดังนั้นของไหลทุติยภูมิจะถูกเร่งจากสภาวะหยุดนิ่งให้มีความเร็วสูงขึ้นเพื่อที่จะลดความ ยุ่งยากในการคำนวณเราจะสมมตให้กระบวนการขยายตัวนี้เป็นแบบไอเซนโทรปิก ดังนั้นอุณหภูมิสถิต ของของไหลทุติยภูมิจะหาได้โดย

$$\frac{T_{1S}}{T_{S}} = \left[\frac{P_{1}}{P_{S}}\right]^{\frac{k-1}{k}}$$
(2-33)

และจะมีความเร็ว

$$V_{1P} = \sqrt{2 \times C_p \times (T_s - T_{1s})}$$
(2-34)

ค่าตัวเลขของมัค

$$M_{1S} = \frac{V_{1S}}{\sqrt{k \times R \times T_{1S}}}$$
(2-35)

พื้นที่หน้าตัดสำหรับของไหลทุติยภูมิที่ทางเข้าของท่อผสมซึ่งเป็นพื้นที่วงแหวนที่อยู่ระหว่างเส้นรอบวง ของปากทางเข้าของท่อผสมและเส้นรอบวงของปากทางออกของหัวฉีดปฐมภูมิ

$$A_{1S} = \frac{\dot{m}_s}{\frac{P_s}{R \times T_s} \times V_s}$$
(2-36)

และพื้นที่หน้าตั<mark>ดทั้งหมดที่ปากทางเข้า</mark>ของท่อผสม

$$A_1 = A_{1P} + A_{1S}$$
 (2-37)

2.3.4 ท่อผสม (mixing chamber)

ภายในท่อผสมของไหลปฐมภูมิซึ่งมีความเร็วสูงจะผสมกับของไหลทุติยภูมิซึ่งมีความเร็วต่ำ โดยกระบวนการนี้จะมีความดันคงที่ตลอดตั้งแต่จุดเริ่มต้น (1) จนถึงจุดสิ้นสุด (2) กระบวนการผสม จะเสร็จสิ้นสมบูรณ์ภายในท่อผสมส่วนกลาง (2) ก่อนที่คลื่นกระแทกจะเกิดขึ้น ดังนั้นจึงมีการถ่ายเท พลังงานและโมเมนตั้มระหว่างของไหลทั้งสอง เมื่อเราให้ท่อผสมเป็นปริมาตรและควบคุมจากสมการ อนุรักษ์โมเมนตั้มของของไหล (momentum equation)

$$(P_{1} \times A_{1} - P_{2} \times A_{2}) = (\dot{m}_{p} + \dot{m}_{s}) \times V_{2} - (\dot{m}_{p} \times V_{1P} + \dot{m}_{s} \times V_{1P})$$
(2-38)

เมื่อความดันในท่อผสมมีค่าคงที่ ดังนั้นค่าในวงเล็บทางซ้ายมือจึงเป็นศูนย์แต่ในความเป็นจริง แล้วของไหลทุติยภูมิและของไหลปฐมภูมิอาจจะไม่ผสมกันสมบูรณ์ทำให้เกิดการสูญเสียความเร็วของ ของไหลผสมเพื่อที่จะให้ผลการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองจึงมีการเพิ่มค่าประสิทธิภาพ ของกระบวนการผสมในการคำนวณ

$$V_{2} = \eta_{mix} \times \frac{\left[(\dot{m}_{p} \times V_{1P}) + (\dot{m}_{s} \times V_{1s}) \right]}{\dot{m}_{P} \cdot \dot{m}_{s}}$$
(2-39)

อุณหภูมิสถิตของของไหลผสมจะหาได้จาก

$$T_2 = T_{o-2"} \times \frac{V_2^2}{\dot{m}_P \times C_P}$$
 (2-40)

โดยที่ T₂ คือ อุณหภูมิรวมของของไหลผสม ซึ่งหาได้จากอนุรักษ์พลังงาน

$$(\dot{m}_{p} \times \dot{m}_{s}) \times h_{o-2} = (\dot{m}_{p} \times h_{p}) + (\dot{m}_{s} \times h_{s})$$
 (2-41)

เมื่อ Δh=C_p×ΔT

$$\dot{m}_{p} \times C_{p} \times (T_{0-2} - T_{p}) = \dot{m}_{s} \times C_{p} \times (T_{s} - T_{0-2})$$
 (2-42)

้ค่าตัวเลขข<mark>อง</mark>มัคข<mark>องข</mark>องไห_{ลผสมก่อนการเกิดคลื่นกระแทก}

$$M_2 = \frac{V_2}{\sqrt{k \times R \times T_2}}$$
(2-43)

พื้นที่ห<mark>น้า</mark>ตัดของท่อผสมส่วนกลาง

$$A_2 = \frac{\dot{m}_p + \dot{m}_s}{\frac{P_2}{R \times T_2} \times V_2}$$
(2-44)

2.3.5 กระบวนการคลื่นกระแทกภายในท่อผสมส่วนกลาง

กระบวนการคลื่นกระแทก (normal shock wave) จะเกิดขึ้นเมือของไหลในสถานะก๊าซ เคลื่อนที่ด้วยความเร็วมากกว่าความเร็วของเสียงซึ่งจะมีความดันและอุณหภูมิต่ำเมื่อของไหลนี้ เคลื่อนที่มายังบริเวณที่มีความดันสูงกว่าคลื่นกระแทกจะเกิดขึ้นทำให้ความเร็วของของไหลนั้น ๆ ลดลงทันทีและจะมีค่าต่ำกว่าค่าความเร็วของเสียงกระบวนการนี้จะไม่มีการถ่ายเทความร้อน หรือ พลังงานกลกับสิ่งแวดล้อม ดังนั้น เมื่อความเร็วลดลงทันทีพลังงานจลน์จะเปลี่ยนกลับมาเป็นเอนธัลปี ซึ่งมีผลให้ความดันอุณหภูมิและความหนาแน่นของของไหลมีค่าสูงขึ้นโดยทันที่ถึงแม้ว่ากระบวนการ คลื่นกระแทกจะสามารถเพิ่มความดันสถิตให้ของไหลได้แต่ก็เป็นกระบวนการที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ คลื่นกระแทกนี้ไม่มีความหนาและไม่มีการถ่ายเทพลังงานใด ๆ ระหว่างของไหลและสิ่งแวดล้อมเลย ดังนั้น

และเมื่อเป็นกระบวนการที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ ของไหลจะมีค่าความดันรวมลดลง



ภาพที่ 2-8 กระบวนการคลื่นกระแทกบนแผนภูมิ อุณหภูมิ-เอนโทรปี (T-s)

ในการคำนวณหาสมบัติของของไหลหลังจากการเกิดคลื่นกระแทกเราจะใช้สมการอนุรักษ์ พลังงานสมการอนุรักษ์มวลและสมการอนุรักษ์โมเมนตั้ม จากสมการอนุรักษ์พลังงาน

$$h_2 + \frac{v_2^2}{2} = h_3 + \frac{v_3^2}{2}$$
(2-47)

จากสมการอนุรักษ์มวล

$$\rho_2 \times V_2 = \rho_3 \times V_3 \tag{2-48}$$

และจากสมการอนุรักษ์โมเมนตั้ม

$$A \times (P_2 - P_3) = \dot{m} \times (V_3 - V_2)$$
 (2-49)

$$(P_2 - P_3) = \rho \times V_2(V_3 - V_2)$$
(2-50)

การที่จะหาความเร็วอุณหภูมิและความดันของของไหลหลังจากการเกิดคลื่นกระแทกเราจำเป็นที่ จะต้องแก้สมการทั้งสามพร้อม ๆ กันจากสมการอนุรักษ์พลังงานและสมการอนุรักษ์มวลเราจะได้ เส้น Fanno line และจากสมการอนุรักษ์โมเมนตั้มและสมการอนุรักษ์มวลเราจะได้เส้น Rayleighline และเส้น Fanno lone จะตัดกันที่สภาวะก่อนการเกิดคลื่นกระแทก (2) และสภาวะหลังจากการ เกิดคลื่นกระแทก (3)

จากสมการอนุรักษ์พลังงานและเนื่องจากไม่มีการถ่ายเทพลังงานระหว่างของไหลและสิ่งแวดล้อม ดังนั้น อุณหภูมิจะมีค่าคงที่ (T₀₋₂ = T₀₋₃) ดังนี้

$$T_{2} + \frac{M_{2}(K \times R \times T_{2})}{2 \times C_{p}} = T_{3} + \frac{M_{2}(K \times R \times T_{3})}{2 \times C_{p}}$$
(2-51)

และเมื่อ C_p - C_v =R และ K= $\frac{C_p}{C_v}$ ดังนี้

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{1 + M_2^2 \times (K-1)/2}{1 + M_3^2 \times (K-1)/2}$$
(2-52)

จา<mark>กสมการอนุรักษ์</mark>มวล

$$\frac{P_2}{R \times T_2} \times M_2 \times \sqrt{K \times R \times T_2} = \frac{P_3}{R \times T_3} \times M_3 \times \sqrt{K \times R \times T_3}$$
(2-53)

เราจะได้อัตราส่วนของความดันสถิต

$$\frac{P_3}{P_2} = \frac{M_2}{M_3} \times \frac{\sqrt{T_3}}{\sqrt{T_2}}$$
 (2-54)

และเมื่อเอาสมการ 2-52 มารวมกับสมการ 2-54

$$\frac{P_3}{P_2} = \frac{M_2 \times \sqrt{1 + M_2^2 \times (K - 1)/2}}{M_2 \times \sqrt{1 + M_3^2 \times (K - 1)/2}}$$
(2-55)

จากสมการอนุรักษ์โมเมนตั้ม

$$\mathbf{A} \times (\mathbf{P}_3 - \mathbf{P}_2) = \dot{\mathbf{m}} \times \mathbf{V}_2 - \dot{\mathbf{m}} \times \mathbf{V}_3 \tag{2-56}$$

และเมื่อ
$$\dot{m} = \frac{P_2}{R \times T_2} \times V_2 \times A$$
 และ $\dot{m} = \frac{P_3}{R \times T_3} \times V_3 \times A$ ดังนี้

เมื่อเอาสมการ 2-55 กับสมการ 2-57 มารวมกันจะได้

$$M_3^2 = \frac{M_2^2 + \frac{2}{K-1}}{\frac{2 \times K}{K-1} \times M_2^2 - 1}$$
(2-57)

เมื่อรู้ค่าอุณหภูมิสถิต ความดันสถิต และตัวเลขของมัคของของไหลผสมก่อนการเกิดคลื่นกระแทกจะ สามารถหาค่าต่าง ๆ เหล่านี้หลังจากการเกิดคลื่นกระแทกได้

2.3.6 ท่อเพิ่มความดัน

หลังจากการเกิดคลื่นกระแทกความเร็วของของไหลผสมจะลดลงโดยจะมีความเร็วต่ำกว่า ความเร็ว ของเสียงซึ่งมีผลทำให้ความดันสถิตมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ก็ยังคงมีพลังงานจลน์เหลืออยู่ ดังนั้นถ้า ทำให้ความเร็ว ของของไหลผสมลดลงจนเกือบอยู่ในสภาวะหยุดนิ่งพลังงานจลน์จะเปลี่ยนกลับไปเป็น เอนธัลปีและจะทำ ให้ของไหลผสมมีความดันสถิตเพิ่มขึ้นอีก

ถ้าของไหลผสมถูกลดความเร็วลงจนอยู่ในสภาวะหยุดนิ่ง (stagnation state) เราจะได้ความดัน เท่ากับความดันรวมซึ่งจะเป็นความดันสูงสุดที่ทำได้แต่จะต้องใช้ท่อเพิ่มความดัน ซึ่งที่ทำงออกจะมี ขนาด ใหญ่มากในทางปฏิบัติแล้วเราจะออกแบบให้ของไหลมีความเร็วที่ปากทางออกของท่อเพิ่ม ความดันอยู่ ประมาณที่ 30 ถึง 50 m/sec นอกไปจากนี้กระบวนการเพิ่มความดันในท่อเพิ่มความดันนี้ อาจจะไม่เป็น กระบวนการที่สามารถย้อนกลับได้เนื่องจากมีแรงเสียดทานและการสูญเสียเกิดขึ้น ภายในท่อเพิ่มความดัน ประสิทธิภาพของท่อเพิ่มความดัน (diffuser isentropic efficiency) สามารถนิยามโดย

$$\eta_{diffuser} = \frac{T_4 - T_3}{T_{0-4} - T_3}$$
(2-58)



ภาพที่ 2-9 กระบวนการเพิ่มความดันของสารทำงานในท่อเพิ่มความดัน

ถ้ากระบวนการเพิ่มความดันนี้เป็นแบบไอเซนโทรปิกอุณหภูมิสถิตของของไหลที่ปากทางออกของ ท่อเพิ่ม<mark>ค</mark>วามดันจะหาได้จาก

$$T_{o-3} = T_{o-4} = T_3 + \frac{V_3^2}{2 \times C_p}$$
 (2-59)

ดังนั้น จากสมการ 2-59 เราสามารถหา T_4 ได้ และจะหา $P_{o-4}=P_4$ ได้จาก

$$\frac{P_{\acute{4}}}{P_3} = \left[\frac{T_{\acute{4}}}{T_3}\right]^{\frac{k-1}{k}}$$
(2-60)

เมื่อ $T_{o-4} = T_{o-3}$ และเรากำหนดค่าความเร็วของของไหลที่ปากทางออกท่อเพิ่มความดันดังนั้นเราจะ สามารถหา T_4 ได้จาก

$$T_4 = T_{o-4} - \frac{V_4^2}{2 \times C_p}$$
(2-61)

และสามารถหาความดันสถิตของของไหลที่ปากทางออกของท่อเพิ่มความดัน

$$\frac{P_{\acute{4}}}{P_{0-4}} = \left[\frac{T_{\acute{4}}}{T_{0-4}}\right]^{\frac{k-1}{k}}$$
(2-62)
ขนาดของปากทางออกของท่อเพิ่มความดัน

$$A_4 = \frac{\dot{m}_p + \dot{m}_s}{\frac{P_4}{R \times T_4}} \times V_4 \tag{2-63}$$

2.3.7 การเกิดพื้นที่วงแหวน

เมื่อของไหลปฐมภูมิถูกเร่งและออกมาจากหัวฉีดปฐมภูมิแล้วของไหลปฐมภูมิซึ่งมี ความเร็ว มากกว่าความเร็วของเสียงจะขยายตัวและบานออกซึ่งก่อให้เกิดคลื่นขยายตัว (expansionwave) ด้วย สาเหตุดังกล่าวจะท้าให้เกิดพื้นที่วงแหวน (effective area) ขึ้นระหว่างคลื่นขยายตัวและ ผนังของท่อผสม ดังภาพที่ 2-10 ซึ่งท่อวงแหวนที่เกิดขึ้นนี้จะดูดเอาไอของของไหลทุติยภูมิเข้ามาใน ท่อผสมและเมื่อของ ไหลทุติยภูมิถูกดูดเข้ามาแล้วจะถูกเร่งให้มีความเร็วสูงขึ้นเนื่องจากพื้นที่ของการ ไหลลดลงโดยจะยังไม่มี การผสมกับของไหลปฐมภูมิจนกระทั่งมีความเร็วสูงขึ้นเนื่องจากพื้นที่ของการ เสียงและจะเกิดการไหลอั้น ของของไหลทุติยภูมิขึ้นตรงพื้นที่วงแหวนนี้ (เช่นเดียวกับการเกิดการไหล อั้นที่คอคอดของหัวฉีดปฐมภูมิ เมื่อของไหลปฐมภูมิถูกเร่งให้มีความเร็วเท่ากับความเร็วของเสียง) ซึ่ง สภาวะดังกล่าวจะท้าให้อัตราการไหลของของไหลทุติยภูมิมีล่าคงที่หลังจากเกิดการไหลอั้นของของ ไหลทุติยภูมิที่พื้นที่วงแหวนแล้วการผสมกันระหว่างของไหลปฐมภูมิและของไหลทุติยภูมิจึงจะเกิดขึ้น



ภาพที่ 2-10 การเกิดพื้นที่วงแหวนรอบ ๆ คลื่นขยายตัวภายในท่อผสม

2.3.8 สารทำงาน

ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์นี้เริ่มพัฒนาโดยใช้น้ำเป็นสารทำงานเนื่องจากเป็นระบบ ขนาด ใหญ่ใช้สำหรับปรับอากาศอาคารขนาดใหญ่ ดังนั้นไม่ว่า บอยเลอร์ คอนเดนเซอร์ ปั้มหมุนเวียน สารทำงานก็สามารถนำเอาของที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมมาใช้ได้เลย น้ำมีค่าความร้อนแฝงของการ เปลี่ยน สถานะจากของเหลวกลายเป็นไอสูงมากจึงทำให้อัตราการหมุนเวียนสารทำงานต่ำและ ความดันแตกต่าง ระหว่างบอยเลอร์กับคอนเดนเซอร์ต่ำจึงทำให้พลังงานกลที่ใช้ในการขับเคลื่อนปั้ม นั้นมีค่าน้อยมากนอกจากนี้น้ำยังมีราคาถูกและไม่ทำลายสภาวะแวดล้อมแต่ข้อเสียของการใช้น้ำเป็น สารทำงานคือไม่สามารถใช้กับงานที่ต้องการความเย็นที่ต่ำกว่า 0 C° และโดยปรกติแล้วระบบจะมี ความดันต่ำกว่า บรรยากาศมากจึงเป็นการยากที่จะป้องกันการรั่วซึมของอากาศจากภายนอก

2.4 การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้

ความร้อนทิ้ง หรือ Waste heat หมายถึง พลังงานที่ไหลออกไปพร้อมกับกระแสของอากาศ ้ก๊าซไอเสีย ของเหลว ที่ออกไป<u>จากขอบเขตของอาคารหรือโรง</u>งาน สู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งพลังงานเหล่านั้น ้ในที่สุดไม่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ ตัวอย่างของความร้อนทิ้งดังกล่าว ได้แก่ ก๊าซไอเสียจากอุปกรณ์ที่มี การเผาไหม้ เช่น อุตสาหกรรม หม้อไอน้ำ ก๊าซหรือลมร้อนจากกระบวนการผลิต น้ำระบายความร้อน ้ความร้อนจากผิวร้อนของเครื่องจักร หรือผลิตภัณฑ์ แล้วถ่ายเทให้กับอากาศ โดยการเผาหรือแผ่รังสี ้ความร้อนทิ้งมักแบ่งตามช่วงอุณหภูมิซึ่งจะแสดงถึงศักยภาพในการนำไปใช้งาน มาตรฐานในการแบ่ง ้ช่วงอุณหภูมิความ<mark>ร้อ</mark>นทิ้ง<mark>ค่อนข้างใก</mark>ล้เคียงกัน ในการศึกษานี้จะใช้ห</mark>น่วยอุณหภูมิตาม SI ดังนี้ ้ความร้อนทิ้งอุณหภูมิต่ำมีช่วงอุณหภูมิต่ำกว่<mark>า 2</mark>50°C, ความร้อนทิ้งอุณหภูมิปานกลางมีช่วงอุณหภูมิ ตั้งแต่ 250 °C ถึง 500°C และ ความร้อนทิ้งอุณหภูมิสูง มีช่วงอุณหภูมิ เกินกว่า 500°C ขณะเดียวกัน การนำความร้อนทิ้งมาใช้ จำเป็นต้องมีแหล่งรับความร้อนหรือ Heat sink ซึ่งได้แก่ กระบวนการที่มี ทำความร้อนที่โรงงานต้องใช้ เช่น การผลิตน้ำร้อน การผลิตอากาศร้อน การให้ความร้อน การ ้ชิ้นงานในที่นี้จะแบ่งแหล่งใช้ความร้อ<mark>นออกเป็น</mark> 3 ช่วงได้แก่ แหล่งรับความร้อนทิ้งอุณหภูมิต่ำ ้ต้องการอุณหภูมิต่ำกว่า 150°C , แหล่งรับความร้อนทิ้งอุณหภูมิปานกลาง ต้องการอุณหภูมิ <mark>ใน</mark>ช่วง 150 °C ถึง 250°C และแหล่งรับความร้อนทิ้งอุณหภูมิสูง ต้องการอุณหภูมิที่เกิน 500°C (กลุ่มวิจัยเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน, 2565)

การนำความร้อนกลับมาใช้ (Waste Heat Recovery) เป็นกระบวนการดึงพลังงานความร้อนที่ สูญเสียไปจากกระบวนการอุตสาหกรรมหรือเครื่องจักรต่าง ๆ กลับมาใช้ใหม่ แทนที่จะปล่อยทิ้งไปใน สิ่งแวดล้อม วิธีนี้ช่วย เพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ลดต้นทุน และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม



ภาพที่ 2-11 การนำความร้อนกลับมาใช้

การนำความร้อนทิ้งมาใช้ในการปรับอากาศ (Waste heat Recovery for Air Conditioning) เทคโนโลยีในการนำความร้อนทิ้งมาใช้เป็นแหล่งพลังงานในการปรับอากาศมีหลายเทคโนโลยี อาทิ ระบบดูดซึม ระบบดูดซับ การใช้สารดูดความชื้นและการใช้อีเจคเตอร์ เป็นต้น ดังภาพที่ 2-12



ภาพที่ 2-12 ผังแสดงการใช้งานความร้อนทิ้งเพื่อการปรับอากาศ

2.5 สารทำความเย็น

ในอดีตจนถึงปัจจุบันอุตสาหกรรมทำความเย็นได้มีการเติบโตเป็นอย่างมากไม่ว่าจะเป็นด้าน วิศวกรรม ยา อาหาร เป็นต้น แต่ในขณะเดียวกันการเติบโตของอุตสาหกรรมเหล่านี้ก็นำมาสู่ปัญหา ภาวะโลกร้อน (Global warming) เนื่องจากสารทำความเย็นใช้เวลาในการย่อยสลายค่อนข้างนาน หากมีการสะสมในชั้นโทรโฟสเพียมาก(Troposphere) ก็จะก่อใหเกิดการทำลายชั้นโอโซนได้ในที่สุด โดยสารทำความเย็นที่นำมาใช้ในช่วงแรกนั้น ได้แก่สารไฮโดรคาร์บอน เช่น โพรเพน (Propane) บิวเทน (Butane) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO2) และแอมโมเนีย (NH3) ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายแต่ เนื่องจากติดไฟง่ายจึงได้เกิดแนวคิดสารที่เราคุ้นเคยขึ้นมาเป็นอย่างดี ชื่อว่า Freon (R-12) ที่เป็น ตระกูลคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Chlorofluorocarbons) แต่พบว่าสารเหล่านี้มีศักยภาพที่ทำให้เกิด ภาวะโลกร้อน (Global warming potential, GWP) รวมถึงสามารถทำลายชั้นโอโซนได้ (Ozone depleting potential, ODP)จึงได้ยกเลิกการใช้สารเหล่านี้ในที่สุด หลังจากนั้นก็ได้มีการ พัฒนาตัวไฮโดคอลโรรฟลูออโรคาร์บอนขึ้นมา (HCFCs) ได้แก่ R-22 แต่เนื่องจากยังมีผลกระทบต่อ สิ่งแวดล้อมจีได้มีการเลิกใช้ไปในที่สุด ต่อมาไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFCs) ได้แก่ R-134a R143a และ R-407a เป็นต้น เข้ามามีบทบาทมากขึ้นเพื่อการทำลายชั้นโซน โดยสารทำความเย็นเหล่านี้ให้ ประสิทธิภาพที่ดีแต่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องโลกร้อนอยู่ ทำให้บริษัทต่าง ๆ คิดค้นสารทำความเย็นที่เป็น มิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อเป็นการลดภาวะโลกร้อน (Global warming) และการทำลายชั้นโอโซน (Ozone depleting) จึงได้สารทำความเย็นตระกูลไฮโดรฟลูออโรโอเลฟินส์ (Hydrofluoro olefins) ออกมา เช่น HFO-1224yd และ HFO-1233zd ซึ่งสารเหล่านี้มีค่า GWP ต่ำ รวมถึงมีค่า ODP ที่ ใกล้เคียง 0 แสดงให้เห็นถึงความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมแต่ยังคงประสิทธิภาพในการใช้งานเป็นอย่างดี โดยสามารถสรุปดังภาพที่ 2-13



ภาพที่ 2-13 การใช้สารทำความเย็นตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

ดังนั้นนอกจากการเลือกสารทำความเย็นที่ให้ประสิทธิภาพในการดำเนินระบบที่ดีที่สุดแล้วปัจจัยที่ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ผู้ผลิตควรตระหนักถึงผลกระทบต่อโลกและสุขภาพใน ระยะยาว

ชิลเลอร์ (Chiller) เป็นหนึ่งในเครื่องทำความเย็นที่นิยมมากในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ไม่ว่าจะ เป้นอุตสาหกรรมยา ไอซ์สเก็ต การดัดงอหรือแม้กระทั่งตามห้างสรรพสินค้าที่ต้องมีเครื่องชนิดนี้เอาไว้ แลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศภายในห้าง เครื่องชิลเลอร์จะให้ประสิทธิภาพในการทำความเย็น ค่อนข้างดี โดยระบบของชิลเลอร์จะมีสารทำความเย็นไหลอยู่ภายในระบบ ได้แก่ R448A, R410A, R404A, R407C, R717, Ammonia, R134A, HFC, R-744 C02, R-245fa, R-1234yf, R-1234ze(E), R-1233zd(E) และ R-1336mzz เป็นต้น อย่างไรก็ตามสารทำความเย็นบางตัวมีความเป็นพิษและ ห้ามใช้ในบางประเทศ รวมถึงมีผลต่อภาวะโลกร้อน จึงได้มีการคิดค้นสารทำความเย็นตระกูล ไฮโดรฟลูออโรโอเลฟินส์ขึ้นมา ดังที่กล่าวไปข้างต้น เช่น HFO-1224yd ที่นอกจากจะให้ประสิทธิภาพ ในการทำความเย็น ค่า GWP มีค่าต่ำและ ODP มีค่าใกล้เคียงกับ 0 อีกด้วย ซึ่ง HFO-1224yd เป็น สารทำความเย็นที่ไม่สามารถติดไฟได้ (Non-flammable property) นิยมนำมาใช้ในเครื่องชิลเลอร์ แบบปั่นเหวี่ยง (Centrifugal chiller) วัฏจักรแร็งคิน (Organic Rankine Cycle) แบบการใช้ 2 วงจร (Binary cycle generation) ฮัทปั้มที่ใช้ผลิตความร้อนระบบการใช้พลังงานความร้อน เหลือทิ้ง (Waste heat recovery system) ใช้เป็นสารเป่า (Blowing- agent) สารดับเพลิง (Fire extinguishing agent) หรือแม้กระทั่งในการล้างทำความสะอาดในอุตสาหกรรมเครื่องบิน (Aerosol solvent) ในส่วนของเครื่องที่มีการใช้น้ำมันหรือต้องการกำจัดคราบน้ำมันออกจากเครื่อง ดังภาพที่ 2-14



ภาพที่ 2-14 อุตสาหกรรมที่มีการใช้ HFO-1224yd

HFO-1224yd จะให้ประสิทธิภาพในการทำความเย็นใกล้เคียงกับ R-245fa ประหยัดพลังงาน มาก และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า HCFC-123 และ HFO-1233zd(E) อีกทั้ง HFO-1224yd มี คุณสมบัติทางเคมีใกล้เคียงกับ R-245fa ทำให้สามารถเปลี่ยนมาใช้สารทำความเย็นชนิดนี้ได้โดยที่ไม่ ต้องมีการออกแบบระบบทำความเย็นใหม่ให้ยุ่งยาก ซึ่งคุณสมบัติเป็นดังภาพที่ 2-15

Refrigerant		AMOLEATM	HFC	HCFC	HFO
		1224yd	-245fa	-123	-1233zd(E)
Molecular formula		CF ₃ CF=CHCl	CF ₃ CH ₂ CHF ₂	CHCl ₂ CF ₃	CF ₃ CH=CHCl
Molecular weight	g/mol	148.5	134.0	152.9	130.5
Critical temperature	°C	155.5	153.9	183.7	166.5
Critical pressure	MPa	3.34	3.65	3.66	3.62
Critical density	kg/m ³	527	519	550	480
Freezing point	°C	-115	-105	-107	-107
Normal boiling point	°C	15	15	28	18
Vapor pressure(25℃)	kPa	149	149	91.4	130
Vapor density(25℃)	kg/m ³	9.47	8.50	5.87	7.21
Liquid density(25°C)	kg/m ³	1361	1339	1464	1263
Latent heat of vaporization(25°C)	kJ/kg	164.0	191.2	171.4	191.2
Heat capacity ratio (25℃、1atm)		1.098	1.094	1.445	1.105
Surface tension(25℃)	N/m	12.7	13.6	15.2	14.6
Solubility of water(25℃)	ppm	290	1600	632	460
Volume resistivity	Ω∙cm	5.7×10 ⁹	2.0×10 ⁹	1.5×10 ⁸	N.D.
Flammable range	vol%	None	None	None	None
ODP (CFC-11=1)		0.00023*7	0	0.02	0.00024
GWP (CO ₂ =1, 100 ITH)		0.88*7	1030	77	1
Atmospheric lifetime	-	20days	7.7years	1.3years	26days
AEL	ppm	1000	300	50	800
ASHRAE Classification		A1	B1	B1	A1
RCL	ppm	60000	34000	9100	16000
CAS No.		111512-60-8	460-73-1	306-83-2	102687-65-0
TSCA	-	Applied	Registered	Registered	Registered

a		e e	0	ಡ
ภาพท	2-15	คณสมบตของส	ารทาคว	ามเยน

เมื่อเปรียบเทียบกับ R-245fa เราจะสังเกตเห็นว่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature) ความดันวิกฤต (Critical pressure)) และความหนาแน่นวิกฤต (Critical density) มีค่าไม่แตกต่าง กันมาก ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อการเปลี่ยนสถานะของสารทำความเย็น นอกจากนี้จุดเดือดและจุด เยือกแข็งยังมีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจาก GWP และ ODP พบว่า HFO-1224yd มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าด้วยค่าเท่ากับ 0.88 และ 0.00023 ตามลำดับ อีกทั้งค่าของ การปลดปล่อยสารทำความเย็น (Allowable Exposure Limit, AEL) และความเข้มข้นในสถานที่ปิด (Refrigerant Concentration Limit, RCL) มีค่าเท่ากับ 1,000 และ 60,000 ppm ตามลำดับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเภทของสารทำความเย็นโดยที่จัดขึ้นจากองค์กร ASHRAE ได้ระบุให้ HFO-1224yd จัดอยู่ในกลุ่ม A1 คือเป็นสารมีพิษน้อยและไม่เกิดการลุกลามของไฟภายใต้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับ R-245fa และ HCFC-123 หากเปรียบเทียบความดันไอที่ เกิดขึ้นพบว่า HFO-1224yd จะมีค่าความดันไอใกล้เคียงกับ HFC-245fa และ HFO-1233zd ดังภาพที่ 2-16 จึงไม่ต้องยุ่งยากต่อการออกแบบระบบใหม่หากเปลี่ยนมาใช้ HFO-1224yd



ภาพที่ 2-16 ความดันไอที่อุณหภูมิของสารทำความเย็น

จากภาพที่ 2-5 พบว่าการเข้ากันได้ระหว่างสารทำความเย็นแต่ละชนิดกับน้ำมันและโลหะโดยมี การควบคุมวัน อุณหภูมิ ประเภทน้ำมันรวมถึงขนาดของชิ้นโลหะที่ใช้ พบว่า HFO-1224yd จะมี ความเป็นกรดในน้ำมันและสารหล่อเย็นน้อยกว่า R-245fa และ HCFC-123 รวมถึงมีค่าดีกรีการ กัดกร่อนต่อโลหะน้อยกว่า 5 mg/dm² ต่อ 1 วัน ดังภาพที่ 2-17

Refrigerant		AMOLEA™ 1224yd	HFC -245fa	AMOLEA™ 1224yd	HCFC -123
Type of Oil		POE	POE	Naph.*	Naph.*
Temp.		175℃	175℃	175℃	175°C
Aging time		14days	14days	14days	14days
Acidity of refrigerant [ppm as HF]		<1	<1	1	>20,000
Appearance	2	Clear	clear	Clear	Cloudy
Oil color [AST	м]	0.2	0.2	0.8	9.9
Acidity of oi [mgKOH/g]		<0.01	<0.03	<0.01	0.08
Degree of	SS	<5	<5	<5	<5
corrosion	Cu	<5	<5	<5	+10
[mg/dm²/day]	Al	<5	<5	<5	>+100

ภาพที่ 2-17 การเข้ากันได้ระหว่างสารทำความเย็นแต่ละชนิดกับน้ำมันและโลหะ

2.6 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ Computational Fluid Dynamics (CFD) คือศาสตร์ที่ใช้ คอมพิวเตอร์ในการจำลองและวิเคราะห์พฤติกรรมของไหล (ของเหลวและก้าซ) รวมถึงการถ่ายเท ความร้อน โดยอาศัยหลักการของกลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanics) และวิธีการคำนวณเชิง ตัวเลข (Numerical Methods) เพื่อแก้สมการที่ควบคุมการไหลของของไหล เช่น สมการอนุรักษ์มวล (Continuity Equation) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Navier-Stokes Equations) สมการอนุรักษ์มวล (Continuity Equation) CFD ถูกนำไปใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น อากาศยานและ ยานยนต์สำหรับวิเคราะห์แรงด้านอากาศ (Aerodynamics) พลังงานและสิ่งแวดล้อมจำลองการไหล ของก้าซในโรงไฟฟ้าหรือการกระจายตัวของมลพิษ ในอุตสาหกรรม ด้านวิศวกรรมเครื่องกล วิเคราะห์ การถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชีวการแพทย์ จำลองการไหลของเลือดในหลอด เลือด ซึ่ง ซอฟต์แวร์ที่ใช้ทำ CFD ได้แก่ ANSYS Fluent, OpenFOAM, COMSOL Multiphysics, Star-CCM+, SimScale เป็นต้น สรุป CFD เป็นเครื่องมือสำคัญในการวิเคราะห์และออกแบบระบบที่ เกี่ยวข้องกับของไหล โดยช่วยให้สามารถศึกษาปรากฏการณ์ที่ชับซ้อน ลดต้นทุนการทดลองจริง และ ปรับปรุงประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ในหลากหลายอุตสาหกรรม

การใช้การจำลอง CFD เพื่ออธิบายการไหลภายในอีเจ็คเตอร์ภายใต้เงื่อนไขการทำงานและ รูปทรงเรขาคณิตที่แตกต่างกัน ผลการจำลองถูกนำมาใช้แสดงเป็นภาพคอนทัวร์แบบเติมสีของ Mach number, อุณหภูมิสถิต และความดันสถิต ซึ่งสามารถสร้างขึ้นได้ง่ายผ่านฟังก์ชันของ ซอฟต์แวร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ ตัวอย่างภาพคอนทัวร์ของ Mach numberแสดงอยู่ในภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2-18 รูปทรงปกติของเลขมัคที่แสดงถึงการไหลภายในอีเจ็คเตอร์โดยใช้ R141b เป็นสารทำงาน (Tongchana, 2016)

เพื่อทำให้พฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์มีความสมจริงมากขึ้น นักวิจัยบางคนได้ พยายามค้นหาวิธีทางเลือกในการสำรวจการแสดงผลของการไหล หนึ่งในวิธีเหล่านั้นคือ การตรวจ เอกซเรย์ด้วยเลเซอร์ (Laser-Tomography) ซึ่งถูกเสนอโดย Buhanguel et al. (2011) เทคนิค การตรวจเอกซเรย์ด้วยเลเซอร์ใช้หลักการสะท้อนของแสงเลเซอร์ผ่านปริชีมเพื่อตรวจสอบการไหลของ กระแสความเร็วเหนือเสียงที่เคลื่อนผ่านอีเจ็คเตอร์โปร่งใส ภาพตัวอย่างที่ได้จากเทคนิคนี้แสดงในภาพ ที่ 2.19 ซึ่งสามารถเห็นได้ว่าพฤติกรรมจริงของการไหลความเร็วเหนือเสียงสามารถถูกแสดงออกมาได้ อย่างชัดเจนผ่านเทคนิคการตรวจเอกซเรย์ด้วยเลเซอร์นั้นมีลักษณะคล้ายคลึงกับผลลัพธ์จาก การจำลอง Computational Fluid Dynamics ที่แสดงออกมาในรูปแบบของกราฟิกฟิลคอนทัวร์ (Graphic Filled Contour) อีกทั้งยังแสดงให้เห็นว่าลักษณะการไหลของกระแสเจ็ตมีการ เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญตามเงื่อนไขการทำงานที่แตกต่างกัน เทคนิคการตรวจเอกซเรย์ด้วย เลเซอร์จึงถือเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาการแสดงผลของการไหลภายในอีเจ็คเตอร์ในปัจจุบัน เทคนิคนี้สามารถนำไปใช้ได้กับอีเจ็คเตอร์ที่ใช้ อากาศเป็นของไหลทำงานเท่านั้น เนื่องจากข้อจำกัด ของอุปกรณ์และเทคโนโลยีที่มีอยู่ในขณะนี้





Little et al. (2016) ได้เสนอ เทคนิคการถ่ายภาพ Schlieren Photograph Technique หรือ Shadowgraph เพื่อใช้สร้างภาพแสดงพฤติกรรมการไหลภายในอีเจ็คเตอร์เทคนิคนี้ใช้หลักการ สะท้อนแสงผ่านอีเจ็คเตอร์โปร่งใสที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อสร้างภาพของกระแสความเร็ว เหนือเสียงที่ไหลผ่านอีเจ็คเตอร์ ตัวอย่างของภาพชลีเรนที่ถ่ายโดย (Little et al, 2016) แสดงดังภาพ ที่ 2-20งานวิจัยของพวกเขามุ่งเน้นไปที่การถ่ายภาพแสดงการไหลโดยใช้สารทำความเย็น R134a เป็น ของไหลทำงานสำหรับการใช้งานด้านระบบทำความเย็น จากภาพที่ 2-20 สามารถเห็นได้ว่า กระบวนการไหลของ R134a ที่เคลื่อนที่ผ่านอีเจ็คเตอร์สามารถมองเห็นได้จริง แม้ว่าของไหลทำงาน จะไม่ใช่อากาศ (ซึ่งเป็นข้อจำกัดของเทคนิคการตรวจเอกชเรย์ด้วยเลเซอร์ นอกจากนี้ งานวิจัยยัง พิสูจน์ว่า ลักษณะการไหลของ R134a ภายในอีเจ็คเตอร์มีความคล้ายคลึงกับผลลัพธ์ของการจำลอง CFD ซึ่งแสดงเป็นภาพคอนทัวร์แบบเติมสีที่ได้จากแบบจำลอง RNG-k–epsilon ตัวอย่างการ เปรียบเทียบระหว่างภาพถ่ายชลีเรนและผลการจำลอง CFD แสดงอยู่ในภาพที่ 2-21 จากผลลัพธ์ ดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า การจำลอง CFD เป็นหนึ่งในวิธีที่มีประสิทธิภาพในการประเมินสมรรถนะ ของอีเจ็คเตอร์ อย่างไรก็ตาม ภาพเงา (Shadowgraph) ที่ได้จากเทคนิคการถ่ายภาพ Schlieren-Photograph Technique อาจมีข้อจำกัดเนื่องจากชนิดของของไหลที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 2-20 กราฟเงาแสดงการไหลภายในอีเจ็คเตอร์ถ่ายโดยเทคนิคการถ่ายภาพ Schlieren Photograph Technique (Little et al, 2016)



ภาพที่ 2-21 กราฟเงาเปรียบเทียบกับรูปร่างของเลขมัคได้จากการจำลอง CFD, (Little et al, 2016)

2.7 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในโปรแกรมการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ANSYS (FLUENT)

2.7.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการไหล

ของไหลคือ สสารที่มีการเปลี่ยนรูปอย่างต่อเนื่อง เมื่อมีความเค้นเฉือนมากระทำจะทำให้ สสาร เกิดการเคลื่อนที่และเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ของเหลวและก๊าซจัดว่าเป็นรูปแบบของของไหลชนิด หนึ่ง แต่ก๊าซเป็นของไหลที่อัดตัวได้ ส่วนของเหลวเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ หรือสามารถอัดตัวได้ ภายใต้ความ ดันสูง ของไหลอัดตัวได้เป็นของไหลที่มีความหนาแน่นไม่คงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับหลายๆตัวแปร เช่น ก๊าซที่อยู่ใน สภาวะปิดสนิท เมื่อได้รับความร้อนจะทำให้มีความหนาแน่นสูงขึ้น แต่เมื่อสูญเสีย ความ ร้อน ความ หนาแน่นของก๊าซจะลดลง ในงานวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะของไหลที่อัดตัวได้เนื่องจาก สสารที่ อยู่ภายในอีเจ็คเตอร์นั้นมีสถานะเป็นก๊าซทั้งหมด ซึ่งก๊าซเป็นของไหลที่อัดตัวได้

2.7.1.1 การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน

การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วนนั้นพิจารณาจากความเร็วของการไหล ของของไหลเป็นหลักโดยที่ที่ความเร็วของการไหลต่ำจะทำให้ของไหลเกิดการไหลแบบราบเรียบแต่ถ้า ค่า ความเร็วสูงจะทำให้ของไหลเกิดการไหลแบบปั่นป่วน อีกทั้งยังสามารถพิจารณาได้จากความหนืด ของ ของไหล ถ้าของไหลมีความหนืดสูง มักจะเกิดการไหลแบบราบเรียบเพราะแรงต้านความเร็วใน การ ไหล มาก ในทางกลับกันถ้าของไหลมีความหนืดต่ำ จะทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนเพราะแรง ต้าน ความเร็ว ในการไหลน้อย ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การไหลแบบปั่นป่วนเป็นหลักเนื่องจาก พฤติกรรมการไหลของ ของไหลภายในอีเจ็คเตอร์นั้นมักเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง อีกทั้งสสารที่อยู่ ภายในอีเจ็คเตอร์มีสถานะเป็น ก๊าซทั้งหมดซึ่งมีค่าความหนืดต่ำ

2.7.1.<mark>2 ส</mark>มการ<mark>ควบคุมของ</mark>การไหลของของไหล

สมการควบคุมของการไหลของของไหล โดยปกติแล้วค่าตัวแปรต่างๆสำหรับการ ไหลแบบ ปั่นป่วนมักมีค่าไม่คงที่ และค่าต่างๆเหล่านี้นั้นจะเป็นสมการความสัมพันธ์ที่ขึ้นกับเวลา กล่าวก็คือค่า เหล่านี้จะเปลี่ยนไปตามเวลาที่เปลี่ยนไป ดังเช่น ตัวอย่างของความเร็ว u ตาม ภาพที่ 2-22 ซึ่งปัญหา ลักษณะ เช่นนี้ทำให้การคำนวณตัวแปรมีความยุ่งยากเพิ่มมากขึ้นเป็นอย่าง มาก เพราะฉะนั้นจึงทำการ สมมุติว่า คุณสมบัติต่าง ๆที่พิจารณาในกรณีการไหลแบบปั่นป่วนนี้ สามารถแบ่งออกเป็นได้ 2 ส่วน โดยใช้หลักการ Reynolds decomposition ได้ดังนี้ 1.ส่วนที่ค่าเฉลี่ย ไม่ขึ้นกับเวลา 2. ส่วนที่ค่าความผันผวนขึ้นกับเวลา

u u'(t)

ภาพที่ 2-22 ลักษณะของความเร็วในการไหลแบบปั่นป่วน

สมการพื้นฐานของการไหลแบบปั่นป่วนสำหรับสมการความต่อเนื่อง และสมการโมเมนตัม สามารถเขียนสมการทั้งสองให้อยู่ในรูปของเทนเซอร์ได้ดังนี้ สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{2-64}$$

สมการโมเมนตั้ม

$$\frac{\partial}{\partial x_{i}} \left(\rho u_{j} u_{i} \right) = - \frac{\partial_{p}}{\partial x_{i}} + \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[\mu \left(\frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial u_{j}}{\partial x_{i}} \right) \right]$$
(2-65)

้จาก Reynold decomposition ทุกตัวแปรในการไหลสามารถแบ่งออกเป็นส่วนที่เป็นส่วนที่เป็น ค่าเฉลี่ยและส่วนที่<mark>แทน</mark>ผลของการสั่น ตัวอย่างเช่น ฟังก์ชั่น สามารถแบ่งได้เป็น

$$f = \bar{f} + f' \tag{2-66}$$

จากนั้นทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง (time-averaging) จะได้ว่า

$$\bar{f}(x) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{t}^{t+T} f(x, y) dt$$
(2-67)

ซึ่งเมื่อทำการเฉลี่ยแล้วจะทำให้ค่าเฉลี่ยของส่วนที่แทนผลของค่าผันผวนกับเวลา นั้นมีค่าเป็นศูนย์ $(\overline{f'}=0)$ และจะได้ค่าเฉลี่ยของผลคูณทั้งสองตัวแปรมีค่าเป็น $\overline{f_g}=f_g+\overline{f'_{g'}}$ หากทำการเฉลี่ยใน ช่วงเวลาหนึ่งกับสมการความต่อเนื่องและสมการโมเมนตัมจะได้

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{2-68}$$

$$\rho u_1 \cdot \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} = \frac{\partial_{\overline{p}}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$
(2-69)

ซึ่งสมการ 2-68 และ 2-69 นี้ เรียกว่าสมการ Reynols-Averaged Navier-Strokes (RANS)

2.7.2 กฎสากลของผนัง

กฎสากลของผนัง หรือ The Universal Law of the Wall เป็นหลักการที่ใช้อธิบาย โครงสร้างของชั้นเขตแดน (Boundary Layer) ใกล้พื้นผิวของของไหลที่กำลังเคลื่อนที่ โดยเฉพาะใน การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) บนพื้นผิวแข็ง เช่น ผนังท่อ หรือแผ่นเรียบ ดังภาพที่ 2-23



ภาพที่ 2-23 กฎสากลขอบผนัง (The Universal Law of the Wall)

ความสำคัญของ The Law of the Wall ใช้ในการจำลองการไหลปั่นป่วนช่วยให้เข้าใจพฤติกรรม การไหลใกล้ผนังใน CFD เช่น ANSYS Fluent ใช้ในการออกแบบระบบไหลในอุตสาหกรรม เช่น ท่อ ส่งของไหล, อากาศพลศาสตร์ของปีกเครื่องบิน ช่วยลดข้อผิดพลาดในการวิเคราะห์ความฝัดของผิว (Wall Shear Stress) และแรงเสียดทานของไหล (Friction Factor)

2.7.3 การเลือกจำนวนกริดที่เหมาะสม

การเลือกจำนวนกริดที่เหมาะสม นั้นเกี่ยวข้องกับความแม่นยำและความสมเหตุสมผลของ ข้อมูลเชิงตัวเลข ที่ได้จากการคำนวณของไหลด้วยเทคนิคคำนวณแบบพลศาสตร์ โดยเงื่อนไขและการ คำนวณเพื่อหาจำนวนกริดที่เหมาะสม สามารถทำได้โดยการใช้สูตรสมการทางคณิตศาสตร์ ในการ คำนวณเพื่อหาผลลัพธ์ดังกล่าว เพื่อเลือกจำนวนกริดที่เหมาะสม สำหรับการจำลองเชิงตัวเลขใน โปรแกรม ANSYS FLUENT สำหรับผลลัพธ์ของการเลือกจำนวนกริดที่เหมาะสมที่ได้จากการคำนวณ ด้วยสูตรสมการ ทาง คณิตศาสตร์ซึ่งก็คือจำนวนกริดที่น้อยที่สุด ที่ต้องการจำลองเชิงตัวเลขนั้นยัง สามารถประหยัดเวลาที่ ใช้ในการคำนวณของไหลด้วยเทคนิคคำนวณแบบพลศาสตร์ และผลลัพธ์ที่ได้ ออกมานั้นยังมีความ แม่นยำ และมีความสมเหตุสมผล

ค่าความผิดพลาดของข้อมูลเชิงตัวเลข (truncation error, *E*) ที่เกิดจากการเลือกจำนวนกริด ที่เหมาะสมเกิดจากผลต่างระหว่างค่าผลลัพธ์เชิงตัวเลขของจำนวนกริดอิสระ (grid independent result, Ø_{grid independent}) และค่าผลลัพธ์เชิงตัวเลข ณ ปัจจุบัน (current numerical result, Ø)

 $\mathcal{E} = \mathbf{\emptyset}$ grid independent - $\mathbf{\emptyset}$

(2-70)

ประเภทของกริด (Types of Grids/Meshes)

2.7.3.1 กริดแบบมีโครงสร้าง (Structured Grid) ประกอบด้วยเซลล์รูป สี่เหลี่ยม (2D) หรือทรงอิฐ (3D) เช่น Hexahedral Mesh มีโหนดที่เรียงตัวเป็นระเบียบ ทำให้การคำนวณมี ประสิทธิภาพสูง **ใ**ช้ในปัญหาที่มีขอบเขตเรียบง่าย เช่น ท่อไหล, แผ่นเรียบดังภาพที่ 2-24

ภาพที่ 2-24 กริดแบบมีโครงสร้าง (Structured Grid)

2.7.3.2 กริดแบบไม่มีโครงสร้าง (Unstructured Grid) ประกอบด้วย สามเหลี่ยม (2D) หรือสี่หน้า (3D) เช่น Tetrahedral Mesh ปรับเปลี่ยนรูปร่างให้เหมาะกับ ขอบเขตซับซ้อน เช่น ปีกเครื่องบิน, ใบพัดใช้งานง่าย แต่ต้องใช้ทรัพยากรคำนวณมากกว่าดังภาพที่ 2-25



ภาพที่ 2-25 กริดแบบไม่มีโครงสร้าง (Unstructured Grid)

2.7.3.3 กริดผสม (Hybrid Grid) ผสมระหว่าง Structured และ Unstructured ตัวอย่าง เช่น ใช้ Hexahedral ในโซนที่ต้องการความแม่นยำสูง และ Tetrahedral ในโซนที่ซับซ้อน ดังภาพที่ 2-26



ภาพที่ 2-26 กริดผสม (Hybrid Grid)

2.7.3.4 กริดแบบปรับตัว (Adaptive Mesh) กริดที่สามารถปรับให้ละเอียดขึ้นเฉพาะ บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงสูง เช่น ช็อกเวฟ, ขอบปีก, กระแสน้ำวนดังแสดงในภาพที่ 2-27



ภาพที่ 2-27 กริดแบบปรับตัว (Adaptive Mesh)

2.7.4 การ<mark>สร้างกริดที่เห</mark>มาะสมบริเวณใกล้ขอบพนัง

การสร้างกริด (Grid Generation หรือ Meshing) เป็นขั้นตอนสำคัญในการจำลองทาง พลศาสตร์ของไหล ซึ่งมีผลโดยตรงต่อ ความแม่นยำของผลลัพธ์, ความเร็วในการคำนวณและ ความเสถียรของการแก้สมการในซอฟต์แวร์ เช่น ANSYS Fluent การสร้างกริดที่เหมาะสมบริเวณ ใกล้ขอบผนังเป็นหนึ่งในวิธีการสำคัญสำหรับการแก้ปัญหา การไหลของของไหลด้วยเทคนิคคำนวณ แบบพลศาสตร์ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องและมีความ แม่นยำมากที่สุดซึ่งโดยปกติแล้วโมเดล การจำลองการไหลแบบปั่นป่วน k – **E** นั้นจะพิจารณาเฉพาะช่วงพื้นที่การไหลแบบปั่นป่วนที่ถูก พัฒนาอย่างเต็มที่แล้วเท่านั้น โดยมีเทคนิคในการสร้างกริดที่เหมาะสม บริเวณใกล้ขอบผนังขนาด ของกริดที่บริเวณขอบผนังที่เหมาะสมถูกกำหนด โดยค่า wall y⁺ แสดงในภาพที่ 2-24



รูปที่ 2.28 ขนาดของกริดบริเวณใกล้ขอบผนังเมื่อใช้ค่า wall y⁺ ที่ต่างกัน

2.8 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

M. Elgezzar. et al.(2024) ใช้โปรแกรมจำลองพลศาสตร์ของไหลศึกษาพารามิเตอร์ทาง เรขาคณิตสำหรับการออกแบบอีเจ็คเตอร์ความเร็วเหนือเสียงที่มีประสิทธิภาพสูง วิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง CFD เชิงตัวเลข ซึ่งสร้างขึ้นโดยใช้ ANSYS Fluent 18.2 Workbench เพื่อใช้ในการจำลอง วิเคราะห์ และออกแบบหัวฉีดเหนือเสียงที่มีประสิทธิภาพสูง สำหรับระบบทำความเย็น ผลจากการศึกษาได้ข้อสรุป 1) มุม convergence angle ที่เหมาะสมที่สุด อยู่ที่ 23° การเพิ่มหรือลดมุมจากค่านี้จะทำให้ประสิทธิภาพของหัวฉีดลดลง 2) ความยาวที่เหมาะสม ของส่วนคอคอดควรมีค่าประมาณ 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของคอคอด 3) มุมกระจายตัวของ ส่วน Diffuser ควรอยู่ในช่วง 8° ถึง 15° 4) ความยาวของ Diffuser ควรมากกว่าหรือเท่ากับ 4 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางของคอคอด จากการศึกษาทำให้สามารถออกแบบรูปทรงที่เหมาะสมที่สุด สำหรับกรณีศึกษาที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ซึ่งส่งผลให้อัตราส่วนการนำพาเพิ่มขึ้นจาก 0.3935 เป็น 1.2001 ภายใต้สภาวะการทำงานเดียวกัน

S. A. Khan. et al.(2019) จำลองพลศาสตร์ของไหลเซิงคำนวณ (CFD) ได้ดำเนินการโดยใช้ ANSYS FLUENT เพื่อศึกษาการไหลที่เกิดขึ้นจากหัวฉีดแบบคอคอด-คอกว้าง (Convergent-Divergent Nozzle) และท่อที่มีการขยายตัวอย่างฉับพลัน (Suddenly Expanded Duct) เงื่อนไข การจำลองที่ใช้ ได้แก่ อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (L/D) = 10 อัตราส่วนพื้นที่ (Area Ratio) ระหว่างทางออกของหัวฉีดและพื้นที่หน้าตัดของท่อ = 1.6 ในการศึกษานี้ ได้ทำการ วิเคราะห์ผลกระทบของ เลขมาคที่ทางออกของหัวฉีด (Nozzle Exit Mach Number) และ อัตราส่วนแรงดันหัวฉีด (Nozzle- Pressure Ratio) โดยใช้ค่าต่างๆ ดังนี้ เลขมัคที่ทางออกของหัวฉีด 1.87, 2.25 และ 2.58 สำหรับแต่ละเลขมัค ได้ตั้งค่า NPR เป็น 3, 5, 7, 9 และ 11 ทำให้มีการจำลอง ทั้งหมด 15 กรณีศึกษา โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน k-**ω** (k-**ω** Turbulence Model)ผลการ จำลองพบว่ามีความสอดคล้องกับผลการทดลอง และจากการวิเคราะห์พบว่า เลขมัคที่ทาง ออกของ หัวฉีดและอัตราส่วนแรงดันหัวฉีดมีผลโดยตรงต่อการไหลที่ขยายตัวออกจากหัวฉีด

Natthawut. et al.(2011) ทดลองเกี่ยวกับระบบทำความเย็นด้วยไอน้ำแบบอีเจ็คเตอร์ (Steam Jet Refrigeration) มีการสร้างและทดสอบตู้เย็นต้นแบบที่มีความสามารถในการทำ ความเย็น 1 กิโลวัตต์ โดยทำการทดลองในสภาวะอุณหภูมิที่แตกต่างกัน และใช้หัวฉีดหลัก (Primary Nozzle) หลายรูปแบบระบบถูกทดสอบโดยกำหนด อุณหภูมิอิ่มตัวของหม้อไอน้ำ ให้อยู่ ในช่วง110 - 150°C และกำหนดอุณหภูมิของเครื่องระเหย (Evaporator) คงที่ที่ 7.5°C สำหรับการ ทดลองนี้ ใช้หัวฉีดหลักทั้งหมด 8 รูปแบบ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก จำนวน 6 หัวฉีดแรก มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางที่คอคอด (Throat Diameter) อยู่ในช่วง 1.4 - 2.6 มม. และมี Mach Number ที่ ทางออก (Exit Mach Number) เท่ากับ 4.0 อีกจำนวน 2 หัวฉีดที่เหลือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ คอคอดเท่ากันที่ 1.4 มม. แต่มี Mach Number ที่ทางออกต่างกันคือ 3.0 และ 5.5 ผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่า รูปทรงเรขาคณิตของหัวฉีดหลักมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ (COP)

Tongchana.(2016) ใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ในการทำนาย ประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ โดย ใช้สารทำความเย็น R141b และทำการ ทดสอบระบบทำความเย็นสำหรับใช้งานสำหรับปรับอากาศใน ประเทศไทย โดยระบบถูกออกแบบให้ มีความสามารถในการทำความเย็นได้ถึง 4500 วัตต์ใช้เครื่องกำเนิดไออุณหภูมิใน ช่วง90-98 องศาเซลเซียส ใช้ 2 วิธีการในการการทดสอบ 1) ใช้เครื่องทำความร้อนไฟฟ้าเป็นภาระใน การทำความเย็น 2) ใช้งานปรับอากาศภายในห้อง หลังจากการทดสอบ พบว่า ระบบทำความเย็น แบบอีเจ็คเตอร์โดยใช้ R141b เป็นสารทำความเย็นสามารถทำงานได้ใน เงื่อนไขการ ทำงานใน ประเทศไทยโดยสามารถรองรับภาระในการทำความเย็นได้ถึง 4500 วัตต์

สุรเซษฐ และคณะ.(2564) การศึกษาแบบจำลองอีเจ็คเตอร์เพื่อใช้ในระบบทำความเย็น แบบอีเจ็คเตอร์เพื่อหาสัดส่วนที่ดีที่สุด ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำความเย็น ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ อีเจ็คเตอร์ที่ใช้งานจะมีตำแหน่งในการปรับขนาด 4 แบบ ประกอบด้วย ท่อผสมส่วนทางเข้า , ท่อผสม ส่วนกลาง , ท่อเพิ่มความดัน , ปากทางออกของหัวฉีด โดยการจำลองจะอยู่บนเงื่อนไขการทำงานของ 3 สารทำความเย็นประกอบด้วย R245fa , R1233zd, R1224yd โดยในการจำลองและนำผล มาเปรียบเทียบกันซึ่งผลที่ได้จากการจำลองพบว่าสารที่มีค่าสมรรถนะการทำงานที่ดีที่สุดคือ สารทำความ เย็น R1224yd โดยการควบคุมในการจำลองมีการใช้ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

กรเทพและคณะ.(2564) ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) เพื่อศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์สองสเตทในระบบทำความเย็น โดยสร้าง พารามิเตอร์เพื่อศึกษาส่วนที่มีผลต่อประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์สองสเตทจากนั้นทำการวิเคราะห์ การจำลองโดยใช้โปรแกรม Ansys Fluent 20 ซึ่งสารทำความเย็นในระบบอีเจ็คเตอร์สองสเตทใช้เป็น ไอน้ำ กำหนดให้ทำงานที่สภาวะอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอเท่ากับ 130 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิ เครื่องระเหย7.5 องศาเซลเซียส แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ในการจำลองอยู่บนพื้นฐานของ การไหลแบบอัดตัวได้ โดยผลการศึกษาจะมุ่งเน้นไปที่ Entraiment Ratio คืออัตราการไหลเซิงมวล ของของไหลรอง (Secondary Fluid) ต่อของไหลหลัก (Primary Fluid) นอกจากนั้นยังสนใจ ความ ดันวิกฤติ (Critical back pressure), คอนทัวเลขมัค (Contour Mach number) จากผลการศึกษา ขนาดทางเข้าของไหลรองที่สอง (Secondary inlet 2) และระยะทางเข้าของของไหลรองที่สอง ไม่มีผลต่อ Entrainment Ratio, ความดันวิกฤติ (Critical back pressure) และคอนทั่วเลขมัค (Contour Mach number) แต่ขนาดคอคอดของอีเจ็คเตอร์ (Ejector throat)ส่งผลให้ Entrainment Ratio เพิ่มขึ้น ความดันวิกฤติลดลง โดยโมเดลอีเจคเตอร์สองสเตทที่ให้ผลดีที่สุด จะได้ Entrainment Ratio ที่ 0.901 ซึ่งเพิ่มขึ้นร้อยละ 67.5 เมื่อเทียบกับอีเจ็คเตอร์หนึ่งสเตทและ ความดันวิกฤติ (Critical back pressure) ที่ 2200 ปาสกาล ซึ่งลดลงร้อยละ 34.3 เมื่อเทียบกับอีเจ็ตเตอร์หนึ่งสเตท



บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิเคราะห์ความเร็วเหนือเสียงที่เหมาะสมของหัวฉีดสำหรับอีเจ็คเตอร์ใช้ในระบบทำความเย็น โดยใช้ โปรแกรมจำลองทางพลศาสตร์ของไหล มีขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัย ดังนี้



ภาพที่ 3-1 Flow Chart แสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 ศึกษาเอกสารข้อมูลและฝึกใช้งานโปรแกรมจำลอง Ansys Fuent 2024

ศึกษาเอกสารข้อมูลอีเจ็คเตอร์ในระบบทำความเย็นที่ใช้อีเจ็คเตอร์เป็นอุปกรณ์ ขยายตัวรวมถึง ศึกษาวัสดุที่ใช้การจัดสร้างอีเจ็คเตอร์ด้วย โดยจะพิจารณาศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการจำลองการไหลของ สารทำเย็น โดยใช้โปรแกรม Ansys Fuent 2024 ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์ ทางวิศวกรรมขั้นสูงซึ่ง สามารถวิเคราะห์ได้หลากหลายด้าน เช่น การวิเคราะห์ด้านกลศาสตรของแข็ง (Solid Mechanic), การวิเคราะห์กลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanic), การวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) และการวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetics) โดยใช้ หลักการไฟ ในต์อิลิเมนต์ (Finite Element Method) สำหรับสารนิพนธ์ฉบับนี้จะใช้การ วิเคราะห์พลศาสตร์ของ ไหลด้วยโปรแกรม Ansys โดยเริ่มวิเคราะห์จากคำสั่งต่างๆของโปรแกรม เพื่อทำการจำลองการไหล ของสารทำความเย็น

3.2 การออกแบบอีเจ็คเตอร์

ออกแบบอีเจ็คเตอร์ในงานวิจัยของสุรเซษฐ (2564) ได้มีผลจากการจำลองหาพารามิเตอร์ของ อีเจ็คเตอร์ที่ดีที่สุด คือ สัดส่วนท่อผสม(Mixing Chamber) ส่วนทางเข้ามีขนาด 1.67° องศามุม มี ขนาดความยาวที่ท่อผสมส่วนกลาง (Throat) ที่ 15.96 mm มีขนาดองศามุมที่ท่อเพิ่มความดัน (Subsonic Diffuser) อยู่ที่ 6° องศามุมและมีขนาดความกว้างปากทางออกของที่ 6.48 mm.ซึ่ง ข้อมูลพารามิเตอร์ของอีเจ็คเตอร์ในงานวิจัยมีความสอดคล้องกับแนวทางที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้



ภาพที่ 3-2 หัวฉีดปฐมภูมิที่ได้จากการทดลอง



<mark>ภาพที่</mark> 3-3 อีเ<mark>จ็ค</mark>เตอร์ที่ได้จากการทดลอง

3.3 เงื่<mark>อนไขขอบเขตกา</mark>รจ<mark>ำลองอีเจ็คเ</mark>ตอร์

กำหนดเงื่อนไขขอบเขตการศึกษาผลวิเคราะห์ความเร็วเหนือเสียงที่เหมาะสมของหัวฉีดสำหรับ อีเจ็คเตอร์ใช้ในระบบทำความเย็นและเปรียบเทียบประสิทธิภาพต่าง ๆ ของหัวฉีดสำหรับอีเจ็คเตอร์ โดยเงื่อนไขในการจำลองทางพลศาสตร์ใช้แหล่งความร้อนในการขับเคลื่อนระบบมีอุณหภูมิกำเนิดไอ (T_{sen}) อยู่ระหว่าง 85°C - 95°C อุณหภูมิเครื่องระเหย (T_{evap}) อยู่ระหว่าง 5°C-10°C และอุณหภูมิ เครื่องควบแน่น (T_{con}) ที่ 28 °C ทำการเปลี่ยนขนาดความกว้างที่ตำแหน่งปากทางออกหัวฉีดเพิ่ม และลดขนาดที่ละ 1 mm ได้แก่ 5.48 mm, 6.48 mm และ 7.48 mm ทั้ง 2 สารทำความเย็น การจำลองเพื่อหาค่าความเร็วของเสียง (Mach Number) แถบสีของความเร็วของเสียง (Contour Mach- Number) และค่าอัตราส่วนเชิงมวล (mass entrainment ratio) เพื่อหาขนาดที่เหมาะสม จะแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 แสดงเงื่อนไขขอบเขตในการจำลองอีเจ็คเตอร์

Input	Value	
Temperature generator	85℃ - 95 ℃	
Temperature Evaporator	5℃ - 10℃	
Temperature condensor	28°C	
Nozzle exit diameter	5.48mm,6.48mm,7.48mm	
Fluid Type	R1233zd,R1224yd	
Turbulence Model	Realizable k- E	



SECTION Nozzle 5.48 mm





ภาพที่ 3-5 หัวฉีดอีเจ็คเตอร์ทปากทางออกขนาด 6.48 mm



ภาพที่ 3-6 หัวฉีดอีเจ็คเตอร์ทปากทางออกขนาด 7.48 mm

3.4 ทำการจำลองของไหลด้วยโปรแกรม Ansys FLUENT 2024

ในปัจจุบันการวิเคราะห์ปัญหาการไหลของของไหลด้วยเทคนิคการคำนวณของไหลแบบ พลศาสตร์มีไว้เพื่อจำลองพฤติกรรมการไหลของของไหลทั้งสองส่วนโดยประกอบไปด้วยของไหล ปฐมภูมิและของไหลทุติยภูมิที่เคลื่อนที่ภายในอีเจ็คเตอร์ซึ่งมีเป้าหมายสำคัญในการทำนาย ประสิทธิภาพของอีเจคเตอร์ที่ใช้ R1233 zd และR1224 yd เป็นสารทำความเย็นในระบบและศึกษา พฤติกรรมการไหลของของไหลภายใน อีเจ็คเตอร์ที่ใช้สารทำความเย็นต่างชนิดกันและเงื่อนไขในการ ทำงานต่างกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 2024 ในการแก้ปัญหาการไหลของของไหล ซึ่ง แบ่งโปรแกรมออกเป็น 3 ส่วนในการทำงาน คือ

1. Design Modeler ทำหน้าที่ในการสร้างในการสร้างแบบจำลองอีเจ็คเตอร์

2. Mesh ทำหน้าที่ในการสร้างกริดให้กับแบบจำลองอีเจ็คเตอร์

3. Setup FLUENT 2024 ทำหน้าที่ในการกำหนดโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมเพื่อการ จำลอง พฤติกรรมการไหลของของไหลผ่านทางกระบวนการทำซ้ำเพื่อให้ได้คำตอบที่ถูกต้องและ แม่นยำมาก ที่สุดจากส่วนการทำงานสุดท้าย โปรแกรม ANSYS FLUENT 2024 สามารถทราบ ประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์และ พฤติกรรมการไหลของของไหลภายในอีเจคเตอร์ได้โดยการสังเกตุ จากกราฟคอนทัวร์ซึ่งขั้นตอนการ ทำงานของโปรแกรม ANSYS FLUENT 2024 นั้นสามารถสรุปได้ ดังภาพที่ 3-7





3.4.1 สำหรับงานวิจัยนี้แบบจำลองอีเจคเตอร์จะถูกสร้างในรูปแบบที่เป็นสองมิติและมีรูปร่าง สมมาตรตามแนวแกน รูปแบบ 2 มิติ รูปทรงของอีเจคเตอร์ประกอบไปด้วย ท่อผสมทางเข้าอยู่ที่
1.67 องศา ท่อผสมส่วนกลาง 15.96 mm. ท่อเพิ่มความดันอยู่ที่ 6 องศา และปากทางออกหัวฉีด
อีเจ็คเตอร์อยู่ที่ 5.48 mm, 6.48 mmและ 7.48 mm.



ภาพที่ 3-8 แสดงรูปร่างแบบจำลองแบบ 2 มิติแบบสมมาตรตามแนวแกนของอีเจคเตอร์

3.4.2 การสร้างกริด

กริดที่สร้างนั้นเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม (quadrilateral grid) เพราะว่ากริด ลักษณะนี้นั้น เหมาะสมในงานจำลองด้านการไหลที่มีความเร็วเหนือเสียง เพื่อให้ได้ค่าที่ได้จากการ จำลองมีความ แม่นยำและความถูกต้องมากที่สุด ในการหาจำนวนกริดที่เหมาะสมใช้กระบวนการที่ เรียกว่าการทำ grid independent ในลักษณะกริดจะเน้นความหนาอยู่ที่ผนังของอีเจ็คเตอร์และจำนวนจะต้อง ละเอียดสมมาตรและสมดุลกัน



ภาพที่ 3-9 การสร้างกริดสำหรับแบบจำลองอีเจคเตอร์ในโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 2024



ภาพที่ 3-11 Flow Chart แสดงขั้นตอนการสร้างกริด

3.4.3 วิธีการ Setup เงื่อนไขการคำนวณเป็น Density-based Implicit เนื่องจากคุณสมบัติของ ของไหล เป็นของไหลแบบอัดตัวได้ ค่าความหนาแน่นจะเปลี่ยนแปลงได้ และเคลื่อนที่ด้วย ความเร็ว เหนือเสียง ด้วยเหตุนี้ลักษณะการไหลภายในอีเจคเตอร์จะเป็นแบบชั้น Laminar เพียงในช่วง Viscous Sublayer หรือช่วงที่ติดกับผนัง และไหลในลักษณะปั่นป่วน Turbulent Fluctuation ในช่วงที่เหลือ จึงใช้ Turbulence Model แบบ Realizable k- **E** โดยแบบจำลองนี้ถูกใช้งานอย่าง กว้างขวางในการ จำลองการไหลภายในอีเจคเตอร์และ wall function ที่ใช้ในการจำลองการไหลติด กับผนังคือ Scalable Wall Function



ภาพที่ 3-12 ลักษณะ model ที่พร้อมกับการ Setup

3.4.4 ขอบเขตและเงื่อนไขของการจำลอง สำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ ขอบเขตทางเข้าเป็น Pressure Inlet กำหนดความดันอิ่มตัวของของไหลเป็นออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) ความดันทางด้าน หัวฉีดอีเจ็คเตอร์หรือความดันของของไหลปฐมภูมิ (Inlet Primary) และส่วนห้องการดูดหรือความดัน ของของไหลทุติยภูมิ (Inlet secondary) ในขณะที่ส่วนปลายด้านทางออกของของไหลให้อยู่ใน รูปแบบของความดันขาออก (pressure outlet)

3.4.5 สารทำงานในระบบสำหรับสารทำงานในระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะใช้สารทำความเย็นอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ R1233zd และ R1224yd ซึ่งถูกจัดอยู่ในชนิดของสารทำ ความเย็นแบบแห้ง อีกทั้งยังใช้ค่าความหนาแน่นของสารทำความเย็น เป็นค่าในแบบจำลองแก๊ส อุดมคติ เนื่องจากการใช้ค่าความหนาแน่นแบบจำลองแก๊สจริงในการแก้ปัญหาของ ไหลมีความยาก และซับซ้อนเกินไปซึ่งใช้เวลาอย่างมากในการจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลภายในอีเจ็คเตอร์ ตามตารางที่ 3-2

		しつ	0	ಷ
ตารางท	3-2	แสดงคุณสมบตของ	เสารทาคว′	ามเยน

Physical properties	R1233zd	R1224yd
Molecular weight (kg/kmol)	130.5	148.5
Specific heat of liquid at 25°C	1216	1137
Boiling pint at atmosphere (°C)	18	15
GWP (CO2=1, 100 ITH)	1	0.88



บทที่ 4 ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์ค<mark>วามเร็วเหนือเสียงที่เหมาะสมของหัวฉีดสำหรับ</mark>อีเจ็คเตอร์ใช้ในระบบ ทำความเย็นโ<mark>ดยใช้ โปร</mark>แกรมจำลองทางพลศาสตร์ของไหลโดยจำแนกผล<mark>ดังนี้</mark>

4.1 ผลกระทบของปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ต่อประสิทธิภาพ

4.1.1 กรณีศึกษาเมื่ออุณหภูมิเครื่องระเหยมีการเปลี่ยนแปลง

ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ต่อประสิทธิภาพ กรณีอุณหภูมิเครื่องระเหยมีการเปลี่ยนแปลง คือ ผลวิเคราะห์ค่าความเร็วของเสียง (Mach Number) และผลวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนเชิงมวล (mass entrainment ratio) ของสารทำความเย็น R1233 zd





จากภาพที่ 4-1 ผลวิเคราะห์ค่าความเร็วของเสียง (Mach Number) กับปากทางออกของหัวฉีด อีเจ็คเตอร์พบว่า ในช่วงปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 5.48 mm-6.48 mm. เมื่อมีการ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องระเหย (T_{evap}) ที่สูงขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบทำให้ของค่าความเร็วของเสียง จะมีแนวโน้มทิศทางสูงขึ้น โดยเกิดค่าความเร็วของเสียงที่สูงสุดและใกล้เคียงกันในทุกช่วงการเปลี่ยน อุณหภูมิเครื่องระเหย แต่ในช่วงปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 6.48 mm.-7.48 mm. ผลของค่า ความเร็วของเสียงจะมีแนวโน้มค่าความเร็วของเสียงทิศทางลดลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เครื่องระเหยที่สูงขึ้น



ภาพที่ 4-2 แถบสีแสดงค่าความเร็วของเสียงกับปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ ที่อุณหูมิเครื่องระเหย 6 °C

จากภาพที่ 4-2 แถบสีค่าความเร็วของเสียงที่ปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ที่อุณหภูมิ เครื่องระเหย 6 °C พบว่า ค่าความเร็วของเสียงสูงที่สุดเท่ากับ 2.848 อยู่ที่ปากทางออกของหัวฉีด อีเจ็คเตอร์ขนาด 6.48 mm โดยแถบสีของคลื่นขยายตัว (expansion wave) มีสีแดงเข้มเกิดขึ้น บริเวณปากทางของหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ แสดงให้เห็นถึงค่าความเร็วของเสียงที่มีค่าสูง แล้วแถบสีของคลื่น ค่อย ๆ ลดลงเป็นสีส้มเมื่อคลื่นขยายจนถึงท่อผสมส่วนกลาง รองลงมาคือปากทางออกหัวฉีด อีเจ็คเตอร์ขนาด7.48 mm. มีค่าความเร็วของเสียงเท่ากับ 2.824 โดยแถบสีของคลื่นขยายตัวมีสีแดง แล้วแถบสีค่อย ๆ ลดลงเป็นสีเหลืองเมื่อคลื่นขยายจนถึงท่อผสมส่วนกลาง และค่าของความเร็วของ เสียงน้อยสุดเท่ากับ 2.565 คือปากทางออกของหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 5.48 mm แถบสีของคลื่น ขยายตัวมีสีส้ม แล้วแถบสีค่อยๆลดลงเป็นสีเขียวเมื่อคลื่นขยายจนถึงท่อผสม



กาพที่ 4-3 แถบสีแสดงค่าความเร็วของเสียงกับปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ ที่อุณหูมิเครื่องระเหย 8 °C

จากภาพที่ 4-3 แถบสีค่าความเร็วของเสียงที่ปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ที่อุณหภูมิ เครื่องระเหย 8 °C พบว่า ค่าความเร็วของเสียงสูงที่สุดเท่ากับ 2.852 อยู่ที่ปากทางออกของหัวฉีด อีเจ็คเตอร์ขนาด 6.48 mm โดยแถบสีของคลื่นขยายตัว (expansion wave) มีสีแดงเข้มเกิดขึ้น บริเวณปากทางของหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ แสดงให้เห็นถึงค่าความเร็วของเสียงที่มีค่าสูงแล้วแถบสีค่อย ๆ ลดลงเป็นสีส้มเมื่อคลื่นขยายจนถึง ท่อผสมส่วนกลาง รองลงมาคือปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 7.48 mm. มีค่าความเร็วของเสียงเท่ากับ 2.802 โดยแถบสีของคลื่นขยายตัวมีสีแดงแล้วแถบสีค่อย ๆ ลดลงเป็นสีเหลืองเมื่อคลื่นขยายจนถึงท่อผสมส่วนกลาง และค่าความเร็วของเสียงน้อยสุดเท่ากับ 2.606 คือปากทางออกของหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 5.48 mm แถบสีของคลื่นขยายตัวมีสีส้ม แล้วแถบ สีค่อย ๆ ลดลงเป็นสีเขียวเมื่อคลื่นขยายจนถึงท่อผสม



ภาพที่ 4-4 แถบสีแสดงค่าความเร็วของเสียงกับปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ ที่อุณหูมิเครื่องระเหย 10 °C

จากภาพที่ 4-4 แถบสีค่าความเร็วของเสียงที่ปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ที่อุณหภูมิ เครื่องระเหย 10 °C พบว่า ค่าความเร็วของเสียงสูงที่สุดเท่ากับ 2.848 ที่ปากทางออกของหัวฉีด อีเจ็คเตอร์ขนาด 6.48 mm โดยแถบสีของคลื่นขยายตัว (expansion wave) มีสีแดงเข้มเกิดขึ้น บริเวณปากทางของหัวฉีดอีเจ็คเตอร์แสดงให้เห็นถึงค่าความเร็วของเสียงที่มีค่าสูง แล้วแถบสีของคลื่น ค่อย ๆ ลดลงเป็นสีส้มเมื่อคลื่นขยายจนถึงท่อผสมส่วนกลาง รองลงมาคือปากทางออกหัวฉีด อีเจ็คเตอร์ขนาด7.48 mm. มีค่าความเร็วของเสียงเท่ากับ 2.760 โดยแถบสีของคลื่นขยายตัวมีสีแดง แล้วแถบสีค่อย ๆลดลงเป็นสีเหลืองเมื่อคลื่นขยายจนถึงท่อผสมส่วนกลาง และค่าของความเร็วของ เสียงน้อยสุดเท่ากับ 2.651 คือปากทางออกของหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 5.48 mm แถบสีของคลื่น ขยายตัวมีสีส้มแล้วแถบสีค่อย ๆ ลดลงเป็นสีเขียวเมื่อคลื่นขยายจนถึงท่อผสม





จากภาพที่ 4-5 ผลวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนเชิงมวล (mass entrainment ration) กับทางออกของ หัวฉีดอีเจ็คเตอร์ พบว่า เมื่อจำลองอุณหภูมิอิ่มตัวของเครื่องกำเนิดไอ (T_{gen}) 90 °C ความดันอิ่มตัว ของสารทำความเย็นและอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลปฐมภูมิ (m_p) มีค่าที่คงที่

ศึกษาผลอัตราส่วนเชิงมวลที่อุณหภูมิเครื่องระเหย (T_{evap}) เท่ากับ 6 °C ในช่วงปากทางออก หัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 5.48mm - 6.48 mm. เส้นแนวโน้มค่าของอัตราส่วนเชิงมวลมีทิศทางเพิ่มขึ้น โดยเมื่อสังเกตที่ปากทางออกของหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 6.48 mm.จะมีค่าอัตราส่วนเชิงมวลสูงสุดแต่ ในช่วงปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 6.48 mm.- 7.48 mm.เส้นแนวโน้มค่าของ อัตราส่วนเชิงมวลทิศทางลดลงเพียงเล็กน้อย

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเครื่องระเหยเท่ากับ 8 °C -10 °C ในช่วงปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 5.48mm-6.48 mm. เส้นแนวโน้มค่าของอัตราส่วนเชิงมวลมีทิศทางลดลง เนื่องจากสารทำความเย็น รับภาระการทำความเย็นที่ถ่ายเทให้กับเครื่องระเหยทำให้อุณหภูมิและความดันอิ่มตัวสูงขึ้นทำให้ อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิ (m๋,) มีค่าสูงขึ้นเพิ่มตาม แต่อัตราการไหลเชิงมวลของ ของไหลปฐมภูมิ (m๋,) ยังคงมีค่าคงที่ ส่งผลกระทบให้อัตราส่วนเชิงมวลมีค่าลดลง และในช่วงปาก ทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 6.48mm-7.48 mm.เส้นแนวโน้มค่าของอัตราส่วนเชิงมวลทิศทาง ลดลงเพียงเล็กน้อย



ภาพที่ 4-6 แสดงค่าอัตราส่วนเชิงมวลกับอุณหภูมิเครื่องระเหย

จากภาพที่ 4-6 ผลวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนเชิงมวล (mass entrainment ration) กับอุณหภูมิ เครื่องระเหยมีการเปลี่ยนแปลง พบว่า เมื่อจำลองอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ (T_{gen}) 90 ^oC ความดันอิ่มตัวและอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลปฐมภูมิ (m_{้p}) มีค่าที่คงที่

ในช่วงอุณหภูมิเครื่องระเหย (T_{evap}) 5 °C - 6 °C ที่ปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 5.48 mmและ 6.48 mm. มีแนวโน้มค่าของอัตราส่วนเชิงมวลมีทิศทางเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการ ไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิ (m๋_s) มีค่าที่น้อยตามอุณหภูมิและความดันอิ่มตัวของเครื่องระเหย และเมื่อสังเกตจากกราฟแสดงที่ปากหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 6.48 mm.จะมีค่าอัตราส่วนเชิงมวลสูงสุด แต่ในช่วงปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด7.48 mm. มีแนวโน้มค่าของอัตราส่วนเชิงมวลทิศทาง ลดลงเพียงเล็กน้อย

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเครื่องระเหยเท่ากับ 7 °C -10 °C ปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 5.48 mmและ 6.48 mm. เส้นแนวโน้มค่าของอัตราส่วนเชิงมวลมีทิศทางลดลง เนื่องจากสารทำความเย็น รับภาระการทำความเย็นที่ถ่ายเทให้กับเครื่องระเหยทำให้อุณหภูมิและความดันอิ่มตัวสูงขึ้นทำให้ อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิ (m๋s) มีค่าสูงขึ้นเพิ่มตาม แต่อัตราการไหลเชิงมวลของ ของไหลปฐมภูมิ (m๋p) ยังคงมีค่าคงที่ ส่งผลกระทบให้อัตราส่วนเชิงมวลมีค่าลดลง และเมื่อสังเกตจาก กราฟแสดงที่ปากหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 5.48 mm.จะมีค่าอัตราส่วนเชิงมวลสูงสุด และในช่วงปาก ทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 7.48 mm.แนวโน้มค่าของอัตราส่วนเชิงมวลทิศทางลดลงเพียง เล็กน้อย

4.1.2 กรณีศึกษาเมื่อสารทำความเย็นมีการเปลี่ยนแปลง

ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ต่อประสิทธิภาพกรณีเมื่อสาร ทำความเย็นมีการเปลี่ยนแปลง คือ ผลวิเคราะห์ค่าความเร็วของเสียง (Mach Number) และผล วิเคราะห์ค่าอัตราส่วนเชิงมวล (mass entrainment ratio) ของสารทำความเย็น R1233 zd และ สารทำความเย็น R1224 yd



จากภาพที่ 4-7 ผลวิเคราะห์ค่าความเร็วของเสียง (Mach Number) กับอุณหภูมิเครื่องระเหย มีการเปลี่ยนแปลงที่ปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 5.48 mm.เมื่อจำลองอุณหภูมิและ ความดันอิ่มตัวของเครื่องกำเนิดไอ (T_{sen}) 90 °C คงที่ พบว่า ทั้ง 2 สารทำความเย็น R1233 zd และ สารทำความเย็น R 1224 yd ในช่วงอุณหภูมิเครื่องระเหยตั้งแต่ 5 °C - 10 °C เส้นแนวโน้มของ ค่าความเร็วของเสียงทิศทางเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าความเร็วของเสียง 2 สารทำความเย็น ปรากฏว่าสารทำความเย็น R1233 zd มีค่าความเร็วของเสียงสูงกว่า สารทำความเย็น R1224 yd




จากภาพที่ 4-8 ผลวิเคราะห์ค่าความเร็วของเสียง (Mach Number) กับอุณหภูมิเครื่องระเหยมี การเปลี่ยนแปลงที่ปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 6.48 mm.เมื่อจำลองอุณหภูมิและ ความดันอิ่มตัวของเครื่องกำเนิดไอ (T_{sen}) 90 °C คงที่ พบว่า ทั้ง 2 สารทำความเย็น R1233 zd และ สารทำความเย็นR 1224 yd ในช่วงอุณหภูมิเครื่องระเหยตั้งแต่ 5 °C - 8 °C เส้นแนวโน้ม ของค่าความเร็วของเสียงมีทิศทางเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งค่าสูงสุดที่อุณหภูมิเครื่องระเหย 8 °C และมีทิศทาง ลดลงในช่วงอุณหภูมิเครื่องระเหยตั้งแต่ 8 °C - 10 °C เมื่อเปรียบเทียบค่าความเร็วของเสียง 2 สารทำความเย็น ปรากฏว่าสารทำความเย็นR1233 zd มีค่าความเร็วเหนือเสียงสูงกว่า สารทำความเย็น R1224 yd



ภาพที่ 4-9 แสดงค่าความเร็วของเสียงกับอุณหภูมิเครื่องระเหย ที่ปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 7.48 mm จากภาพที่ 4-9 ผลวิเคราะห์ค่าความเร็วของเสียง (Mach Number) กับอุณหภูมิเครื่องระเหย มีการเปลี่ยนแปลงที่ปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 7.48 mm.เมื่อจำลองอุณหภูมิและ ความดันอิ่มตัวของเครื่องกำเนิดไอ (T_{gen}) 90 °C คงที่ พบว่า ทั้ง 2 สารทำความเย็น R1233 zd และ สารทำความเย็นR 1224 yd ในช่วงอุณหภูมิเครื่องระเหยตั้งแต่ 5 °C - 10 °C เส้นแนวโน้มของ ค่าความเร็วของเสียงมีทิศทางลดลง เมื่อเปรียบเทียบค่าความเร็วของเสียง 2 สารทำความเย็นปรากฏ ว่าสารทำความเย็นR1233 zd มีค่าความเร็วของเสียงสูงกว่า สารทำความเย็น R1224 yd



าพที่ 4-10 แสดงค่าอัตราส่วนเชิงมวลกับอุณหภูมิเครื่องระเหย ที่ปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 5.48 mm

จากภาพที่ 4-10 ผลวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนเชิงมวล (mass entrainment ration) กับอุณหภูมิ เครื่องระเหยมีการเปลี่ยนแปลงที่ปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 5.48 mm เมื่อจำลองอุณหภูมิ ความดันอิ่มตัวและอัตราการไหลเซิงมวลของของไหลปฐมภูมิ (m๋_p) ของสารทำความเย็น ของ เครื่องกำเนิดไอ (T_{gen}) 90 °C มีค่าที่คงที่ พบว่า ทั้ง 2 สารทำความเย็น R1233 zd และ สารทำความเย็นR 1224 yd ในช่วงอุณหภูมิเครื่องระเหยตั้งแต่ 5 °C - 10 °C เส้นแนวโน้มของค่า อัตราส่วนเชิงมวลทิศทางเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนเชิงมวล 2 สารทำความเย็นปรากฏ ว่า สารทำความเย็น R1233 zd มีค่าอัตราส่วนเชิงมวลสูงกว่า สารทำความเย็น R1224 yd



ภาพที่ 4-11 แสดงค่าอัตราส่วนเชิงมวลกับอุณหภูมิเครื่องระเหย ที่ปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนา<mark>ด 6.4</mark>8 mm

จากภาพที่ 4-11 ผลวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนเชิงมวล (mass entrainment ration) กับอุณหภูมิ เครื่องระเหยมีการเปลี่ยนแปลงที่ปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 6.48 mm เมื่อจำลองอุณหภูมิ ความดันอิ่มตัวและอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลปฐมภูมิ (m๋_p) ของสารทำความเย็น ของเครื่องกำเนิดไอ (T_{gen}) 90 °C มีค่าที่คงที่ พบว่า ทั้ง 2 สารทำความเย็น R1233 zd และ สารทำความเย็น R 1224 yd ในช่วงอุณหภูมิเครื่องระเหยตั้งแต่ 5 °C - 10 °C เส้นแนวโน้มของค่า อัตราส่วนเชิงมวลทิศทางเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนเชิงมวล 2 สารทำความเย็นปรากฏ ว่าสารทำความเย็น R1233 zd มีค่าอัตราส่วนเชิงมวลสูงกว่า สารทำความเย็น R1224 yd



ภาพที่ 4.12 แสดงค่าอัตราส่วนเชิงมวลกับอุณหภูมิเครื่องระเหย ที่ปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 7.48 mm

จากภาพที่ 4-12 ผลวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนเชิงมวล (mass entrainment ration) กับอุณหภูมิ เครื่องระเหยมีการเปลี่ยนแปลงที่ปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 7.48 mm เมื่อจำลองอุณหภูมิ ความดันอิ่มตัวและอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลปฐมภูมิ (m̂_p) ของสารทำความเย็นของ เครื่องกำเนิดไอ (T_{sen}) 90 °C มีค่าที่คงที่ พบว่า ทั้ง 2 สารทำความเย็น R1233 zd และ สารทำความเย็นR 1224 yd ในช่วงอุณหภูมิเครื่องระเหยตั้งแต่ 5 °C - 10 °C เส้นแนวโน้มของค่า อัตราส่วนเชิงมวลทิศทางเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนเชิงมวล 2 สารทำความเย็นปรากฏ ว่าสารทำความเย็น R1233 zd มีค่าอัตราส่วนเชิงมวลสูงกว่า สารทำความเย็น R1224 yd



ภาพที่ 4-13 แถบสีแสดงค่าความเร็วของเสียงกับปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 5.48 mm ที่อุณหูมิเครื่องระเหย 6 °C

จากภาพที่ 4-13 แถบสีแสดงค่าความเร็วของเสียง (Mach Number) ที่ปากทางออกหัวฉีด อีเจ็คเตอร์ขนาด 5.48 mm. ที่อุณหภูมิเครื่องระเหย 6 °C พบว่า เมื่อเปรียบเทียบค่าความเร็ว ของเสียงที่ปากทางออกของหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 5.48 mm ของสารทำความเย็น R1233 zd มีค่า ความเร็วของเสียงเท่ากับ 2.565 และที่สารทำความเย็น R1224 yd มีค่าความเร็วของเสียงเท่ากับ 2.549 จากการวิเคราะห์ สารทำความเย็นR1233 zd ค่าความเร็วที่สูงกว่าสารทำความเย็น R1224 yd โดยสังเกตจากแถบสีแสดงค่าความเร็วของเสียงทั้ง 2 สารทำความเย็น ปรากฏว่าบริเวณปาก ทางออกของหัวฉีดอีเจ็คเตอร์เกิดแถบสีของคลื่นขยายตัว (expansion wave) มีลักษณะเป็นสีส้ม แสดงให้ทราบถึงค่าความเร็วของเสียงที่สูงบริเวณจุดนี้ แล้วแถบสีของคลื่นค่อยๆลดลงเป็นสีเขียวเมื่อ คลื่นขยายจนถึงท่อผสม แสดงให้ทราบถึงค่าของความเร็วของเสียงลดลง

2.06 2.25 2.44 2.63 0.00 0.19 0.38 0.56 0.75 0.94 1.13 131 1.50 1.69 2.81 3.00 $T_{gen} = 90 \, ^{\circ}C \, D_{exit} = 6.48 \, mm.$ $T_{evap} = 6 °C$

Contour R1233 zd

Contour R1224 yd

ภาพที่ 4-14 แถบสีแสดงค่าความเร็วของเสียงกับปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 6.48 mm ที่อุณหูมิเครื่องระเหย 6 ℃

จากภาพที่ 4-14 แถบสีแสดงค่าความเร็วของเสียง (Mach Number) ที่ปากทางออกหัวฉีด อีเจ็คเตอร์ขนาด 6.48 mm. ที่อุณหภูมิเครื่องระเหย 6 °C พบว่า เมื่อเปรียบเทียบค่าความเร็ว ของเสียงที่ปากทางออกของหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 6.48 mm ของสารทำความเย็น R1233 zd มีค่า ความเร็ว ของเสียงเท่ากับ 2.848 และที่สารทำความเย็น R1224 yd มีค่าความเร็วของเสียง เท่ากับ 2.845 จากการวิเคราะห์สารทำความเย็นR1233 zd ค่าความเร็วของเสียงที่สูงกว่า สารทำความเย็นR1224 yd

โดยสังเกตจากแถบสีแสดงค่าความเร็วของเสียงทั้ง 2 สารทำความเย็น ปรากฏว่าบริเวณปาก ทางออกของหัวฉีดอีเจ็คเตอร์เกิดคลื่นขยายตัว (expansion wave) มีลักษณะเป็นสีแดงเข้มแสดงให้ เห็นถึงค่าความเร็วของเสียงที่มีค่าสูงบริเวณจุด แล้วแถบสีของคลื่นค่อยๆลดลงเป็นสีส้มเมื่อคลื่นขยาย จนถึงท่อผสมส่วนกลาง แสดงให้ทราบถึงค่าของความเร็วของเสียงลดลง และตรงบริเวณท่อผสม ส่วนกลางเกิดกระบวนการคลื่นกระแทก (normal shock wave) ทำให้ความเร็วของของไหลลดลง ทันทีและจะมีค่าต่ำกว่าค่าความเร็วของเสียงลักษณะแถบสีที่เกิดขึ้นเป็นสีฟ้าแสดงถึงความเร็ว ของเสียงลดลงส่งผลให้ความดันและอุณหภูมิสูงที่บริเวณท่อเพิ่มความดัน



ภาพที่ 4.15 แถบสีแสดงค่าความเร็วของเสียงกับปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 7.48 mm ที่อุณหูมิเครื่องระเหย 6 °C

จากภาพที่ 4-15 แถบสีแสดงค่าความเร็วของเสียง(Mach Number) ที่ปากทางออกหัวฉีด อีเจ็คเตอร์ขนาด 7.48 mm. ที่อุณหภูมิเครื่องระเหย 6 °C พบว่า เมื่อเปรียบเทียบค่าของความเร็ว ของเสียงที่ปากทางออกของหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ขนาด 6.48 mm ของสารทำความเย็น R1233 zd มีค่าความเร็วของเสียงเท่ากับ 2.843 และที่สารทำความเย็น R1224 yd มีค่าความเร็วของเสียง เท่ากับ 2.799 จากการวิเคราะห์ สารทำความเย็น R1233 zd ค่าความเร็วที่สูงกว่าสารทำความเย็น R1224 yd

โดยสังเกตจากแถบสีแสดงค่าความเร็วของเสียงสารทำความเย็นR 1233 zd ปรากฏว่าบริเวณ ปากทางออกของหัวฉีดอีเจ็คเตอร์เกิดคลื่นขยายตัว (expansion wave) มีลักษณะเป็นแถบสีแดง แสดงให้เห็นถึงค่าความเร็วของเสียงที่มีค่าสูง แล้วแถบสีของคลื่นค่อยๆลดลงเป็นสีส้ม เมื่อคลื่นขยาย จนถึงท่อผสมส่วนกลาง และตรงบริเวณท่อผสมส่วนกลางเกิดกระบวนการคลื่นกระแทก (normal shock wave) ทำให้ความเร็วของของไหลลดลงทันทีและจะมีค่าต่ำกว่าค่าความเร็วของ เสียงลักษณะแถบสีที่เกิดขึ้นเป็นสีฟ้าแสดงถึงความเร็วของเสียงลดลง ส่งผลให้ความดันและอุณหภูมิ สูงที่บริเวณท่อเพิ่มความดัน

ส่วนสารทำความเย็น R1224 yd บริเวณปากทางของหัวฉีดอีเจ็คเตอร์เกิดคลื่นขยายตัวมีลักษณะ เป็นแถบสีแดงแสดงให้ทราบค่าความเร็วของเสียงที่มีค่าสูง แล้วแถบสีของคลื่นลดลงเปลี่ยนเป็นสีเขียว จนถึงท่อผสมส่วนกลาง ลักษณะของคลื่นมีการขยายตัวไม่ยาวมากเนื่องจากผลการวิเคราะห์ ค่า อัตราส่วนเชิงมวลที่ใช้สารทำความเย็น R1224 yd ที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าสารทำความเย็น R1233 zd

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การวิเคราะห์ความเร็วเหนือเสียงที่เหมาะสมของหัวฉีดสำหรับอีเจ็คเตอร์ใช้ในระบบทำความเย็น โดยใช้โปรแกรมจำลองทางพลศาสตร์ของไหลสามารถสรุปผลและมีข้อเสนอแนะดังนี้

5.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์ความเร็วเหนือเสียงที่เหมาะสมของหัวฉีดสำหรับอีเจ็คเตอร์ใช้ ในระบบทำความเย็นโดยใช้ โปรแกรมจำลองทางพลศาสตร์ของไหล โดยผู้วิจัยได้การจำลองอีเจ็คเตอร์ ที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดปากทางออกหัวฉีดอีเจ็ค จำนวน 3 ขนาด คือ 5.48 mm ,ขนาด 6.48mm และขนาด 7.48mm จำลองอุณหภูมิอิ่มตัวของเครื่องกำเนิดไอ (T_{sen}) จะอยู่ในช่วง 85℃ ถึง 95℃ อุณหภูมิของเครื่องระเหย (T_{evap}) จะอยู่ในช่วง 5 – 10 ℃ และอุณหภูมิทางออก(T_{con}) อยู่ที่ 28 ℃ ใช้สารทำความเย็นในการจำลองจำนวน 2 สาร ประกอบไปด้วย R1233zd , R1224yd

การวิเคราะห์ผลกระทบของปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ต่อประสิทธิภาพ ประกอบด้วยค่า ความเร็วของเสียง (Mach Number) ค่าอัตราส่วนเชิงมวล (mass entrainment ration) รวมถึงแถบ <mark>สี</mark>แสดงค่าความเร็วของเสียง (Mach Number Contour) ซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วนดังนี้

5.1.1 กรณีอุณหภูมิเครื่องระเหยมีการเปลี่ยนแปลง

ผลวิเคราะห์ค่าความเร็วของเสียง (Mach Number) กับปากทางออกของหัวฉีด อีเจ็คเตอร์ โดยศึกษาอุณหภูมิอิ่มตัวของเครื่องกำเนิดไอ (T_{sen}) 90°C อุณหภูมิทางออก(T_{con}) 28 °C และอุณหภูมิเครื่องระเหย (T_{evap}) 6°C, 8°Cและ 10°C ของสารทำความเย็น R1233 zd พบว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเครื่องระเหยเพิ่มสูงขึ้นในช่วงปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ ขนาด 5.48 mm.- 6.48 mm.มีค่าความเร็วของเสียงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยปากทางออกหัวฉีด อีเจ็คเตอร์ขนาด 6.48 mm. มีค่าความเร็วของเสียงสูงสุด และในช่วงปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ ขนาด 6.48 mm.- 7.48 mm. อีเจ็คเตอร์จะทำให้ค่าความเร็วของเสียงลดลง สรุปผลปากทางออก หัวฉีดอีเจ็คเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดคือ ขนาด 6.48 mm เนื่องจากมีค่าความเร็วของเสียงสูงสุดคือ 2.85

ผลวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนเชิงมวล (mass entrainment ratio) กับทางออกของหัวฉีด อีเจ็คเตอร์อุณหภูมิเครื่องระเหยมีการเปลี่ยนแปลง โดยศึกษาอุณหภูมิอิ่มตัวของเครื่องกำเนิดไอ (T_{gen}) 90°C อุณหภูมิทางออก(T_{con}) 28 °C และอุณหภูมิเครื่องระเหย (T_{evap}) 6°C, 8°Cและ 10° ของสารทำ ความเย็น R1233 zd พบว่า ในช่วงอุณหภูมิเครื่องระเหย (T_{evap}) 6°C ขนาดปากทางออกหัวฉีด อีเจ็คเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด คือขนาด 6.48 mm เนื่องจากมีอัตราส่วนเชิงมวลเท่ากับ 0.570 สูงที่สุด หากเพิ่มหรือลดขนาดจากค่านี้จะทำให้ค่าอัตราส่วนเชิงมวลลดลง ส่วนในช่วงอุณหภูมิเครื่องระเหย (T_{evap}) 8°C และ10°C ขนาดปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด คือขนาด 5.48 mm โดยมี ค่าอัตราส่วนเชิงมวลเท่ากับ 0.65 และ0.72 ตามลำดับ หากเพิ่มขนาดปากของหัวฉีดจะทำให้ ค่าอัตราส่วนเชิงมวลลดลง เนื่องจากสารทำความเย็นรับภาระการทำความเย็นที่ถ่ายเทให้กับ เครื่องระเหยทำให้อุณหภูมิและความดันอิ่มตัวสูงขึ้นทำให้อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิ (m_้) มีค่าสูงขึ้นเพิ่มตามแต่อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลปฐมภูมิ (m_้) ยังคงมีค่าคงที่ ส่งผล กระทบให้อัตราส่วนเชิงมวลมีค่าลดลง

ผลวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนเชิงมวล (mass entrainment ration) กับอุณหภูมิเครื่องระเหยมี การเปลี่ยนแปลง โดยศึกษาที่อุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ (T_{gen}) 90 ℃ ความดันอิ่มตัวและอัตราการ ไหลเชิงมวลของของไหลปฐมภูมิ (m_p) มีค่าที่คงที่ พบว่า ในช่วงอุณหภูมิเครื่องระเหย (T_{evap}) 5 ℃ - 6 ℃ ขนาดขนาดปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด คือขนาด 6.48 mm เนื่องจาก มีค่าอัตราส่วนเชิงมวลมากที่สุดในช่วงอุณหภูมินี้ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเครื่องระเหยเป็น 7 ℃ -10 ℃ ขนาดปากทางออกหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด คือขนาด 5.48 mm เนื่องจากมีค่าอัตราส่วน เชิงมวลมากที่สุด ส่วนในช่วงขนาดปากหัวฉีด 6.48 mmและ 7.48 mm มีค่าอัตราส่วนเชิงมวลลดลง เนื่องจากสารทำความเย็นรับภาระการทำความเย็นที่ถ่ายเทให้กับเครื่องระเหยทำให้อุณหภูมิและ ความดันอิ่มตัวสูงขึ้นทำให้อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิ (m_s) มีค่าสูงขึ้นเพิ่มตาม แต่อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลปฐมภูมิ (m_p) ยังคงมีค่าคงที่ ส่งผลกระทบให้อัตราส่วนเชิงมวล มีค่าลดลง

5.1.2 กรณีศึกษาเมื่อสารทำความเย็นมีการเปลี่<mark>ยนแปลง</mark>

ผลวิเคราะห์ค่าความเร็วของเสียง (Mach Number) และค่าอัตราส่วนเชิงมวล (mass entrainment rationกับอุณหภูมิเครื่องระเหย5 °C - 10 °C กำหนดอุณหภูมิและ ความดันอิ่มตัวของเครื่องกำเนิดไอ (T_{gen}) 90 °C คงที่ โดยทำการศึกษาเปลี่ยนแปลงสารทำความเย็น R1233 zd และ สารทำความเย็น R1224 yd พบว่า ในช่วงปากหัวฉีดอีเจ็คเตอร์ 5.48 mm, 6.48mm และ7.48 mm ที่ใช้สารทำความเย็น R1233 zd มีค่าความเร็วของเสียงและค่าอัตราส่วน เชิงมวลสูงกว่า เปรียบเทียบกับค่าความเร็วของเสียงที่ใช้สารทำความเย็น R1224 yd

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลองของหัวฉีดสำหรับอีเจ็คเตอร์ กับงานวิจัยที่ เกี่ยวข้องเป็นขั้นตอนสำคัญในการ เพิ่มความน่าเชื่อถือของแบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหล และ ช่วยยืนยันว่า geometry และ boundary condition ที่ใช้มีความสมจริงและสอดคล้องกับฟิสิกส์ของ การไหลจริง

5.2.1 ควรกำหนดและตีเขียนกริดให้มีความละเอียดเหมาะสม หากกริดมีความละเอียดน้อย ส่งผลการวิเคราะห์ที่ได้จะมีค่าความคลาดเคลื่อน

5.2.2 ควรมีการเปลี่ยนแปลงชนิดของสารทำความเย็นที่หลากหลายที่มีใช้ในงานอุตสาหกรรม เพื่อนำผลมาเปรียบเทียบค่าชนิดของสารทำความเย็นที่ดีและเหมาะสมต่อการใช้งาน



บรรณานุกรม

กรเทพ ก้องแดนไพร, กฤษณพงศ์ แผ่นทอง และธนโชติ ไทรสุวรรณ. (2564). **การศึกษาสมรรถนะ** ของอีเจ็คเตอร์สองสเตทโดยใช้โปรแกรมจำลอง. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สุรเชษฐ <mark>ฉันทตระ</mark>กูลซัย และณัฐภัทร ภิรมย์บัณฑิต. (2564). **การศึกษาแบบจำลองอีเจคเตอร์**

สำหรับใช้ในระบบทำความเย็นเพื่อหารูปทรงที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรมจำลองทาง พลศาสตร์ของไหล. ปริญญานิพนธ์ครุศาสตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกลภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ

กลุ่มวิจัยเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน. (2565). (ออนไลน์). **คู่มือการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้** (สืบค้นวันที่ 27 มกราคม 2568) จาก https://www.enconlab.com/ wasteheat/ / downloads/publish wasteheatrecovery.pdf

Bouhanguel A., Desevaux, P., & Gavignet, E. (2011). Flow visualization in supersonic ejectors using laser tomography techniques. International journal of refrigeration, 34(7), 1633–1640.

Elgezzar, M., Rashad, A., Hassan, M. S., & Elnady, T. (2024). CFD Analysis and Geometrical Parameter Investigation For The Design of A High-Efficiency Supersonic Ejector. FME Transactions, 52(1).

Khan, S. A., Mohiuddin, M., Saleel, C. A., & Fharukh, G. M. (2019). Investigation of the effects of nozzle exit mach number and nozzle pressure ratio on axisymmetric flow through suddenly expanded nozzles. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) ISSN, 8, 570-78.

Little, A. B., & Garimella, S. (2016). Shadowgraph visualization of condensing R134a flow through ejectors. International journal of refrigeration, 68, 118-129.
Ruangtrakoon, N., Aphornratana, S., & Sriveerakul, T. (2011). Experimental studies of a steam jet refrigeration cycle: effect of the primary nozzle geometries to system performance. Experimental thermal and fluid science, 35(4), 676-683.

Tissaoui, Y., Marras, S., Quaini, A., de Brangaca Alves, F. A., & Giraldo, F. X. (2023).

A Non-Column Based, Fully Unstructured Implementation of Kessler's Microphysics With Warm Rain Using Continuous and Discontinuous Spectral Elements. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 15(3)

Thongtip, T.O.N.G.C.H.A.N.A., Aphornratana, S., & Leephakpreeda, T. (2016).

Development of the jet refrigeration system to be used with waste heat (No. 89691). Thammasat University.

Tysell, L., & Nordström, J. (2007). Accuracy evaluation of the unstructured nodecentered finite volume method in aerodynamic computations.
In Proceedings of the 10th ISGG Conference on Numerical Grid Generation, International Society of Grid Generation (ISGG), Heraklion, Crete, Greece.
You, Y. H., Kou, X. Y., & Tan, S. T. (2015). Adaptive meshing for finite element analysis of heterogeneous materials. Computer-Aided Design, 62, 176-189.



ภาคผนวก ก

คู่มือการใช้งานโปรแกรมจ<mark>ำล</mark>องการไหล Ansys Fluant 2024

2167



ภาพที่ ก-1 โปรแกรมจำลองการไหล ANSYS (FLUENT) 2024

โปรแกรม ANSYS (FLUENT) 2024 ในการแก้ปัญหาการไหลของของไหล ซึ่งแบ่งโปรแกรม ออกเป็น

3 ส่วนใ<mark>น</mark>การทำงาน คือ

- 1. Design Modeler ทำหน้าที่ในการสร้างในการสร้างแบบจำลองอีเจ็คเตอร์
- 2. Mesh ทำหน้าที่ในการสร้างกริดให้กับแบบจำลองอีเจ็คเตอร์

 Setup FLUENT 2024 ทำหน้าที่ในการกำหนดโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมเพื่อการจำลอง พฤติกรรมการไหลของของไหลผ่านทางกระบวนการทำซ้ำเพื่อให้ได้คำตอบที่ถูกต้องและแม่นยำมาก ที่สุด

จากส่วนการทำงานสุดท้าย ANSYS (FLUENT) 2024 สามารถทราบประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ และ พฤติกรรมการไหลของของไหลภายในอีเจคเตอร์ได้โดยการสังเกตุจากกราฟคอนทัวร์ซึ่งขั้นตอน การ ทำงานของโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19 นั้นสามารถสรุปได้ดังรูปที่ ก-2



ภาพที่ ก-2 The flowchart for implementing the CFD simulation

ซึ่งโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 2024 จะมีเมนูการ simulation ให้เลือกหลากหลายรูปแบบ ดังภาพที่ ก-3 ที่แสดง ถึงหน้าต่างหลักของโปรแกรม ANSYS



ภาพที่ ก-3 หน้าต่างหลักของโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 2024

ในสารนิพนธ์เล่มนี้ใช้การจำลองการไหล Fluid Flow (Fluent) 2024 ในการจำลองอัตราการไหล Simulation ดังภาพที่ ก-4

Analysis Systems	
E Coupled Field Harmonic	
😝 Coupled Field Modal	
Coupled Field Static	
R Coupled Field Transient	
Eigenvalue Buckling	
Electric	
Explicit Dynamics	
🔇 Fluid Flow - Blow Molding (Polyflow)	
Fluid Flow-Extrusion(Polyflow)	
S Fluid Flow (CFX)	
Eluid Elow (Eluent with Eluent Meshing)	
🖸 Fluid Flow (Fluent)	
Fluid Flow (Polyflow)	
Harmonic Acoustics	
Marmonic Response	
Mydrodynamic Diffraction	
Response Hydro dynamic Response	
Magnetostatic	
🕎 Modal	
10 Modal Acoustics	
Random Vibration	
Response Spectrum	
Rigid Dynamics	
B0 Static Acoustics	
Static Structural	
Steady-State Thermal	
Structural Optimization	
🙀 Substructure Generation 🗸	C studieter (street)
View All / Customize	Fluid Flow (Fluent)
Ready	

ภาพที่ **ก-4** Tool box of ANSYS

เมื่อเลือก Fluid Flow (Fluent) จะปรากฏหน้าต่างของการ Simulation ของ Fluid Flow (Fluent) ขึ้น ดังภาพที่ ก-5 ซึ่งจะประกอบไปด้วย

- 1. Fluid Flow (Fluent) คือ การ Simulation ที่จะใช้ในสารนิพนธ์เล่มนี้
- 2. Geometry คือ การเขียนแบบและกำหนดขอบเขตการ Simulation ออกเป็นส่วนๆ
- Mesh คือ การสร้างกริดเพื่อใช้ในการ Mash และกำหนด inlet1, inlet2, outlet, wall_ejectorและ wall_nozzle
- 4. Setup คือ การตั้งค่าและการ Simulation
- 5. Solution คือ การตรวจสอบผลการ Simulation
- 6. Results คือ การสร้างภาพการไหล Simulation



ภาพที่ ก-5 Fluid Flow (Fluent)

สำหรับงานวิจัยนี้แบบจำลองอีเจ็คเตอร์จะถูกสร้างในรูปแบบที่เป็นสองมิติและมีรูปร่าง สมมาตร ตามแนวแกน เปรียบเทียบระหว่างรูปแบบ 3 มิติและ 2 มิติ พบว่าผลลัพธ์ที่ได้ใกล้เคียงกันโดยที่ รูปร่าง 2 มิติใช้เวลาน้อยกว่า



ภาพที่ ก-6 Creating Models

การสร้างกริด กริดที่สร้างนั้นเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม (quadrilateral grid) เพราะว่ากริดลักษณะนี้ นั้น เหมาะสมในงานจำลองด้านการไหลที่มีความเร็วเหนือเสียง เพื่อให้ได้ค่าที่ได้จากการจำลองมี ความ แม่นยำและความถูกต้องมากที่สุด ในการหาจำนวนกริดที่เหมาะสมใช้กระบวนการที่เรียกว่า การทำ grid independent ในลักษณะกริดจะเน้นความหนาอยู่ที่ผนังของอีเจ็คเตอร์และจำนวน จะต้องละเอียด สมมาตรและสมดุลกัน



ภาพที่ ก-7 Creating Grid Mesh

เมื่อสร้างกริดเสร็จแล้ว เราก็จะทำการ sizing โดยการกำหนด Number of divisions ตั้งค่าจาก soft เป็น Hart กำหนด bias type จากนั้น ก็จะทำการตั้งชื่อ กำหนด inlet1 , inlet2 , outlet กำหนด wall nozzle และ wall ejector และอัพเดท mesh ตามลำดับ ดังรูปที่ ก-8



ภาพที่ ก-8 Flow Chart แสดงขั้นตอนการสร้างกริด

	Ele Domain Display Weah Info Order Units Check Units Check Outine View Second Second Info Mathematic Second Informatic Methods Controls Informatic Methods Controls	Physics User-Poffe	Solution Combine Image: Separate Separate Dectored Separate Dectored Adjacency Activate. Report Quality Image: Separate Relative Image: Separate Separate Image: Separate Relative Image: Separate Store Image: Separate Relative Image: Separate Space Image: Separate Separate Image: Separate Separate Image: Separate Space Image: Separate Store Image: Separate Separate Image: Separa	Results V	tiv Par Interfaces Meah	aliel Dee Mesh Models Dynamic Mesh Cap Model Mesh	Turbomachinery	Adapt Surface	Ansys	
	100	126	ภาพที่ ก	-9 Setu	p – Gei	neral	10	2	- \	
ວງວາມັນ			4461322	op or a l		เปิดพลัง	10100	ປາ ທີ່ງໃ	พื้อิด	วัญนุญห
ง เก่นน การไหล	ทแถบตานขา ดังภาพที่ ก-	10 และ ก-	มิยเร เดยก 11	energy	แถงกาท	เบตพลง	1 1231 18		MELIAI (ลกษณะ
11 1 0 0 7 101	File Domain	Physics User-Defit	ned Solution	Results V	fiew Par	allel Des	• • Q Quick Se.	. 0	Ansys	
	Display Display Display Display Display Display Display Check- Quality	Scale 6	Combine - Delete Separate - Deactivat Adjacency	Append - e Replace Mesh Replace Zone	Mesh	Dynamic Mesh	Turbomachinery	Adapt Surface		
	Outline View <	Task Page General Mesh		•		Mesh				
	Setup General O Models Models	Scale Check Display Units	Report Quality						8	178
	Energy (On) Viscous (SST k-omeg Radiation (Off) Heat Exchanger (Off) Species (Off)	Type Vel Pressure-Based O Density-Based	ocity Formulation Absolute Relative							14
	 Discrete Phase (Off) Solidification & Melti Acoustics (Off) Structure (Off) Brotential/Electrocher 	Time 2D • Steady • • Transient •	Space (Planar Axisymmetric Axisymmetric Swirl							1
	Alterials Alterials Cell Zone Conditions Dell Zone Conditions Alterial Conditions Alterial Conditions Alterial Conditions	Console	7 7000870-05	Ð				0 selected all	•	
	Autually decimely Den Dynamic Mesh Reference Values Other Contemportation Reference Frames	minimum 2d volume (maximum 2d volume () Face area statistics:	m3): 2.464127e-09 m3): 9.168502e-08				-		7	
		ภาพ	ที่ ก-10 เ	Setup –	Models	s – Ene	rgy	1		
			Ener	gy	215	×				
			Energy							
			🗹 En	ergy Equa	ation					
				60		3				
			ок	Cancel	Hel	lp)				
				d						

ในการ set up ให้เลือก Axisymmetric เป็นการทำให้แนวแกนทั้ง2สมมาตรกัน ดังภาพที่ ก-9

ภาพที่ ก-11 Energy

se (Off) & Melting (Off f) Time 2D Space Steady Planar Transient Axisymmetric	
tions	C solected all
tions Console try Definitions maximum volume (m3): 1.095366e-09	
total volume (m3): 7.798967e-05 minimum 2d volume (m3): 2.164127e-0 maximum 2d volume (m3): 9.168502e-0	19 18
Viscous Model	X Model Constants
O Inviscid	C2-Epsilon
C Laminar	1.9 TKE Brandtl Number
Spalart-Alimaras (1 eqn)	
k-omega (2 egn)	TDR Prandtl Number
O Transition k-kl-omega (3 eqn)	1.2
○ Transition SST (4 eqn)	Energy Prandtl Number
O Reynolds Stress (5 eqn)	0.85
Scale-Adaptive Simulation (SAS)	3) Wall Prandtl Number
 Detached Eddy Simulation (DES 	0.85
O Detached Eddy Simulation (DES k-epsilon Model	0.85
Detached Eddy Simulation (DES k-epsilon Model Standard	User-Defined Functions
Detached Eddy Simulation (DES k-epsilon Model Standard RNG RNG	User-Defined Functions Turbulent Viscosity
Detached Eddy Simulation (DES k-epsilon Model Standard RNG Realizable	User-Defined Functions Turbulent Viscosity none
Detached Eddy Simulation (DES k-epsilon Model Standard RNG Realizable Near-Wall Treatment	User-Defined Functions User-Defined Functions Turbulent Viscosity none Prandtl Numbers
Detached Eddy Simulation (DES k-epsilon Model Standard RNG Realizable Near-Wall Treatment Standard Wall Functions	User-Defined Functions Turbulent Viscosity none Prandtl Numbers TKE Prandtl Number
Detached Eddy Simulation (DES k-epsilon Model Standard RNG Realizable Near-Wall Treatment Standard Wall Functions Scalable Wall Functions	User-Defined Functions User-Defined Functions Turbulent Viscosity none Prandtl Numbers TKE Prandtl Number TDB Prandtl Number TDB Prandtl Number
Detached Eddy Simulation (DES k-epsilon Model Standard RNG Realizable Near-Wall Treatment Standard Wall Functions Scalable Wall Functions Non-Equilibrium Wall Functions	User-Defined Functions User-Defined Functions Turbulent Viscosity none Prandtl Numbers TKE Prandtl Number none TDR Prandtl Number none
Detached Eddy Simulation (DES k-epsilon Model Standard RNG Realizable Near-Wall Treatment Standard Wall Functions Scalable Wall Functions Non-Equilibrium Wall Functions Enhanced Wall Treatment Menter-I echner	User-Defined Functions User-Defined Functions Turbulent Viscosity none Prandtl Numbers TKE Prandtl Number none TDR Prandtl Number none Function Fun
Detached Eddy Simulation (DES k-epsilon Model Standard RNG Realizable Near-Wall Treatment Standard Wall Functions Scalable Wall Functions Non-Equilibrium Wall Functions Enhanced Wall Treatment Menter-Lechner User-Defined Wall Functions	User-Defined Functions User-Defined Functions Turbulent Viscosity none Prandtl Numbers TKE Prandtl Number none TDR Prandtl Number none Energy Prandtl Number none
Detached Eddy Simulation (DES k-epsilon Model Standard RNG Realizable Near-Wall Treatment Standard Wall Functions Scalable Wall Functions Non-Equilibrium Wall Functions Enhanced Wall Treatment Menter-Lechner User-Defined Wall Functions	User-Defined Functions Turbulent Viscosity none Prandtl Numbers TKE Prandtl Number none TDR Prandtl Number none Energy Prandtl Number none Wall Prandtl Number
Detached Eddy Simulation (DES k-epsilon Model Standard RNG Realizable Near-Wall Treatment Standard Wall Functions Scalable Wall Functions Non-Equilibrium Wall Functions Enhanced Wall Treatment Menter-Lechner User-Defined Wall Functions Options	0.85 User-Defined Functions Turbulent Viscosity none Prandtl Numbers TKE Prandtl Number none TDR Prandtl Number none Verandtl Number none Vall Prandtl Number none Vall Prandtl Number none

มาที่ viscous ดังภาพที่ ก-12 เลือก k-epsilion กับ Realizable ดังภาพที่ ก-13

ภาพที่ ก-13 Viscous Model

จากนั้นคลิก Material - Fluid - Air ดังภาพที่ ก-14 เปลี่ยน Density เป็น ideal-gas และใส่ค่า Cp, Thermal , Viscousity และ Molecular Weight ตามค่าของแต่ละสารทำความเย็นที่คำนวณได้ ดังภาพที่ ก-15

Image: Scale Image: Scale Image: Scale Image: Scale Image: Scale Image:	ombine ₊ ⊞ [®] Delete [▲ Ap eparate ₊ ⊞ [®] Deactivate [®] Re djacency m [*] Activate [®] Re	pend + Mesh place Mesh place Zone	Dynamic Mesh	Turbomachinery	Adapt Surface	
Outline View		-		Mesh		×
General Filter Toxt Mach					5	2024
• Setup Scole Ch	neck Report Quality	1				
Un General	its					
Ar Materials Solver Solver Type	Velocity Formulation	j				
Cell Zone Conditions Pressure-Based Density-Based	Absolute Relative					
Boundary Conditions Mesh interfaces						
Auxiliary Geometry Definitions Opnamic Mesh	O Planar					
Reference Values O Transient Et, Reference Frames	Axisymmetric Axisymmetric Swirl					
fo Named Expressions					0 selected all	
Console						
Monitors GM Coll Register	ics: ea (m2): 2.972016e-05					2
ภาพที่ ก Create/Edit Materials Name	n-14 Setup	– Material	s – Fluid	d – air	Drefor Matoriale b	V
ภาพที่ ก Create/Edit Materials Name air Chemical Formula	N-14 Setup Material Typ fluid Fluent Fluid	– Material e Materials	.s – Fluid	d – air	Order Materials b Name Chemical Form	y ula
ภาพที่ ก Create/Edit Materials Name air Chemical Formula	Material Typ fluid Fluent Fluid air	– Material e Materials	.s – Fluic	d – air	Order Materials b Name Chemical Form Fluent Datab	y ula ase
ภาพที่ ก Create/Edit Materials Name air Chemical Formula	N-14 Setup Material Typ fluid Fluent Fluid air Mixture pope	– Material e Materials	.s – Fluic	d – air	Order Materials b Name Chemical Form Fluent Datab GRANTA MDS Da	y ula ase
ภาพที่ ก Create/Edit Materials Name air Chemical Formula	N-14 Setup Material Typ fluid Fluent Fluid air Mixture none	– Material e Materials	.s – Fluic	d – air	Order Materials b Name Chemical Form Fluent Datab GRANTA MDS Da User-Defined Da	y ula ase. (tab:
ภาพที่ ก Create/Edit Materials Name air Chemical Formula Properties	Material Typ fluid Fluent Fluid air Mixture none	– Material e Materials	.s – Fluic	d – air •	Order Materials b Name Chemical Form Fluent Datab GRANTA MDS Da User-Defined Da	y ula itaba itaba
ภาพที่ ก Create/Edit Materials Name air Chemical Formula Properties Cp (Specific Heat)	N-14 Setup Material Typ Fluid Fluent Fluid air Mixture none	– Material e Materials	.s – Fluic	d – air	Order Materials b Name Chemical Form Fluent Datab GRANTA MDS Da User-Defined Da	y iula itab itab
ภาพที่ ก Create/Edit Materials Name air Chemical Formula Properties Cp (Specific Heat)	h-14 Setup Material Typ fluid Fluent Fluid air Mixture none	– Material e Materials	.s – Fluic	d – air • •	Drder Materials b Name Chemical Form Fluent Datab GRANTA MDS Da User-Defined Da	y iula iase itab
ภาพที่ f	A-14 Setup Material Typ fluid Fluent Fluid air Mixture none (J/(kg K)) constant 1216 [W/(m K)] constant	– Material e Materials	.s – Fluic	d – air	Drder Materials b Name Chemical Form Fluent Datab GRANTA MDS Da User-Defined Da	y iula itaba itaba
ภาพที่ f	A-14 Setup Material Typ filuid Fluent Fluid air Mixture none) [J/(kg K)] constant 1216 [W/(m K)] constant 0.0242	– Material e Materials	.s – Fluic	d – air	Order Materials b Name Chemical Form Fluent Datab GRANTA MDS Da User-Defined Da	y ula itaba itaba
רerete/Edit Materials Name air Chemical Formula Properties Cp (Specific Heat) Thermal Conductivity Viscosity)	A-14 Setup Material Typ fluid Fluent Fluid air Mixture none) [J/(kg K)] constant 1216 [W/(m K)] constant 0.0242 [kg/(m s)] constant	- Material	.s – Fluic	d – air	Order Materials b Name Chemical Form Fluent Datab GRANTA MDS Da User-Defined Da	y iula iase. itaba itaba
רפפול אפריוש: אמיים מיי Chemical Formula Properties Cp (Specific Heat) Thermal Conductivity Viscosity	A-14 Setup Material Typ fluid Fluent Fluid air Mixture none (J/(kg K)] constant (L1/(kg K)] constant (L1/(kg K)] constant (L1/(kg K)] constant (L1/(kg K)] constant (L1/(kg K)] constant (L1/(kg K)) constant	- Material	.s – Fluic	d – air	Drder Materials b Name Chemical Form Fluent Datab GRANTA MDS Da User-Defined Da	y ula itaba
רeate/Edit Materials Name air Chemical Formula Properties Cp (Specific Heat) Thermal Conductivity Viscosity Molecular Weight	A-14 Setup Material Typ fluid Fluent Fluid air Mixture none (J/(kg K)] constant 1216 [W/(m K)] constant 0.0242 [kg/(m 5]] constant 1.7894e-05 : [kg/km0] constant	– Material e Materials	.s – Fluic	d – air	Drder Materials b Name Chemical Form Fluent Datab GRANTA MDS Da User-Defined Da	y ula itaba itaba

ภาพที่ **ก-15** Create/Edit Materials

มาที่ Boundary Conditions ดังภาพที่ ก-16 เลือก Operating Conditions ทำการเปลี่ยน Operating Pressure เป็น 0 ดังภาพที่ ก-17

O lipley O info - O o o o o o o o o o o o o o o o o o	Im Scale Im	
Image: Source of the second secon	Index Optimus Program Impose Description Impose Description Impose Description<	× + - + = + = + + = + + = + + = + + = + + = + + = + + = + + = + + = + + = + + = + + + = + + + = + + + + = + + + + = + + + + = + + + + = + + + + = + + + + + = + + + + + = + + + + + = + + + + + + = + + + + + = + + + + + = +
Controls Report Definitions • Q. Monitors	sinimum face area (n2): 2.2970146-05 as a second se	
	ภาพที่ ก-16 Setup – Boundary Conditions	
	ภาพที่ ก-16 Setup – Boundary Conditions	
	ภาพที่ ก-16 Setup – Boundary Conditions	
ALL SALES	ภาพที่ ก-16 Setup – Boundary Conditions	

	Filter Text	< Task Page inlet_primary interior:surface_body outlet	-				4esh		×	
0		Phase Type motores to concern the concernt the concern the concern the concern the concern	nlet • 6 ny [Profiles] •		•			0 selected all	Ansys 2004 RAL STUDENT	× + + + = + + = + + + + + + + + + + + +
Pressure Inle ne Name Ilet_primary	Controls Report Definitions O. Monitors	minimum face ar maximum face ar Checking mesh	ta (m2): 2.972016e-05 ta (m2): 7.338875e-04	X P Zone inlet	ressure Inlet Name _primary					
Nomentum	Thermal Radiation Specie	es DPM Multiphase	Potential Structure	UDS Mor	mentum Th	ermal Radiation	Species DPM	Multiphase	Potential	Structure
	Reference Frame Absolut Gauge Total Press	te sure [Pa] 741700 sure [Pa] 667530		Total	Temperature	KJ 358		•		

เลือก inlet Primary ใส่อุณหภูมิกับความดันของแต่ลารทำความเย็นที่ได้คำนวณไว้ดังภาพที่ ก-19

ภาพที่ **ก-18** Pressure Primary

เลือก inlet secondary ใส่อุณหภูมิกับความดันของแต่ลารทำความเย็นที่ได้คำนวณไว้ดังภาพที่ ก-19



Pressure Inl	et							×	Pressure Inl	et							×
one Name									Zone Name								
inlet_seconda	ry								inlet_seconda	у							
Momentum	Thermal	Radiation	Species	DPM	Multiphase	Potential	Structure	UDS	Momentum	Thermal	Radiation	Species	DPM	Multiphase	Potential	Structure	UDS
	Refe	erence Frame	Absolute					•	Total Tempera	ture [K] 278	3			•			
		Gauge To	tal Pressure	[Pa] 59	700			•									
	Superso	nic/Initial Gau	ge Pressure	[Pa] 53	730			•									
Dire	ction Specific	ation Method	Normal to	Boundary				•									
Prevent Re	everse Flow																
	Turbule	nce															
	Specific	ation Method	Intensity an	nd Viscosi	ty Ratio			•									
		Turbule	nt Intensity	[%] 5				•									
		Turbulent Vis	cosity Ratio	10				•									
			Apply	Close	Help							Apply	Close	Help			
									11								

ภาพที่ ก-19 Pressure secondary

เลือก outlet ใส่อุณหภูมิกับความดันของแต่ลารทำความเย็นที่ได้คำนวณไว้ดังภาพที่ ก-20

O Displey ① Info ↓ O ↓ ↓ Units Check+ Quality ↓	Scale Scale Scale Image: Combine + mail Delete App 1 Transform + Image: Combine + mail Delete Image: Combin	Interfaces Mesh. Nodes istace Mesh. Image: Dynamic Mesh istace Mesh Image: Dynamic Mesh
Outland Very Image: Construction of the second s	Inax Forda Intel primary indel secondary indel secondary Phase Type D intel secondary Phase Type D intel secondary intel secondary in	Arcon A
Pressure Outlet	e parsa	X Pressure Outlet Zone Name outlet
Momentum Thermal Radiation Sp	pecies DPM Multiphase Potential Structure UD	5 Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential Structure U
Backflow Reference Frame Abo Grauge P Pressure Profile M Backflow Direction Specification Tot Backflow Pressure Specification Tot Prevent Reverse Flow	kolute ressure [Pa] 144300 utilpiler 1 mai to Boundary ai Pressure	Backflow Total Temperature [K] 301

ภาพที่ **ก-20** Pressure outlet

ในส่วนของ Solutions มาที่ Methods ทำการเปลี่ยน Turbulant เป็น Second Order Upwind ดังภาพที่ ก-21

O Display () Info - O Check- Quality - O	Scale	Append Append Replace Mesh Replace Zone	Dynamic Mesh Turbomachinery Adapt	Surface
Outline View <	Task Page Spatial Discretization		Mesh	× Ansys 2024 R1
Filter Text	Gradient			STUDENT
Boundary Conditions	Least Squares Cell Based			
K3 Mesh Interfaces	Second Order			6
Auxiliary Geometry Definitions Demomir Mach	Density			C C
Reference Values	Second Order Upwind			3
💿 🔽 Reference Frames	Momentum			
fe Named Expressions	Second Order Upwind			
Methods	Turbulent Kinetic Energy	Q		-
🔀 Controls	Second Order Upwind 💌			1
Report Definitions	Turbulent Dissipation Rate			
Q Monitors Gell Registers	Second Order Upwind	6		
Automatic Mesh Adaption	Energy			
🛃 Initialization	Second Order Upwind			
Calculation Activities	4		0 selected	all
Results	Console			
Surfaces Graphics Legitimeter	Face area statistics: minimum face area (m2): 2.972016e-05 maximum face area (m2): 7.33875e-04 Checking mesh.			<u>a</u> C

จากนั้นมาที่ Monitors – Residual ดังภาพที่ ก-22 เปลี่ยนค่า Absolute criteria เป็น 0.00001 ทุก ช่อง ดังภาพที่ ก-23

Eile Domain Physic	rs User-Defined Solution R	esults View	r Par	allel Des ^r	 Q Quick Se 		0	/Ar	isys
Mesh Olspłay () Info ↓ O P Units Check↓ Quality ↓ ↓	Scale Scale Scale Delete Transform Isoparate Isoparate Decativate Make Polyhedra Adjacency Adjacency Adjacency	Append -	Interfaces Mesh Overset	Mesh Models	Turbomachinery	Adapt S	iurface *		
Hiter Text	Task Page Second Order Upwind			м	esh		1	X Ansys 2024 R1 STUDENT	
Setup Solution	Pseudo Time Method Global Time Step Transent Formulation Horn Brantive Time Advancement Frazen Flac Formulation Warped-Face Gradient Correction High Order Term Relaxation Default		-		-	0 colocted			• H 🖬 H F H 💼 🌾 🔅
Surfaces Graphics Construction Dashboard Animations Animations	Console Console Race area statistics: minimum face area (m2): 2.972016e-05 maximum face area (m2): 7.338075e-04 Checklung mach					0 selected	511		8

ภาพที่ ก-22 Solution – Monitors – Residual

Options	Equations			
Print to Console	Residual	Monitor C	Check Converge	ence Absolute Criteria
Plot	continuity		✓	0.00001
Curves Axes	x-velocity		\checkmark	0.00001
Iterations to Plot	y-velocity	•	✓	0.00001
1000	energy		\checkmark	0.00001
	k	•	~	0.00001
terations to Store	epsilon		~	0.00001
1000 👻				
	Convergence Con	nditions		
	Show Advanced	Options		

ภาพที่ ก-23 Residual Monitors

กลับมาที่ส่วน Setup - Viscous ดังภาพที่ ก-24 เลือก Compressibility Effects ดังภาพที่ ก-25



ภาพที่ **ก-24** Setup – Viscous

Indel Indel Constants Provised Provised P	<complex-block></complex-block>		Siscous Model	X	
Invisid 2-Epsilon Isaminar 1.5 Selandard Maransa (1 eqn) 1.5 Isapian (2 eqn) 1.7 Tansition SST (4 eqn) 1.7 Sela-Adaptive Simulation (0ES) 0.85 Beached Eddy Simulation (0ES) 0.85 Beached Wall Functions 1.75 Beached Wall Functions 1.75 Beached Eddy Simulation (0ES) 1.75 Beached Wall Functions 1.75 <td><complex-block></complex-block></td> <td></td> <td>Model</td> <td>Model Constants</td> <td></td>	<complex-block></complex-block>		Model	Model Constants	
Image Image Spalart-Almars (1 eq) Image Spalart-Almars (2 eq) Image Transtion kH-omega (2 eq) Image Scale-Adapter Simulation (Sts) Image Scale-Adapter Simulation (Sts) Image Scale-Adapter Simulation (Sts) Image Reynolds Stress (5 eq) Image Scale-Adapter Simulation (OES) Image Reynolds Stress (5 eq) Image Scale-Adapter Simulation (OES) Image Resileable Image Resileable Image Resileable Image Image Image Standard Image Scale-Image Image Scale-Image Image Scale-Image Image Scale-Image Image Scale-Image Image Image Image <t< td=""><td><complex-block></complex-block></td><td></td><td>O Inviscid</td><td>C2-Epsilon</td><td></td></t<>	<complex-block></complex-block>		O Inviscid	C2-Epsilon	
Spalart-Allmaras (1 eqn) Pepslin (2 eqn) Promistion (XH omega (3 eqn) Transition ST (4 eqn) Scala-Adaptive Simulation (StS) Betached Eddy Simulation (<complex-block></complex-block>		O Laminar	1.9	
image: image: image: image: <td< td=""><td><complex-block></complex-block></td><td></td><td> Spalart-Allmaras (1 eqn) </td><td>TKE Prandtl Number</td><td></td></td<>	<complex-block></complex-block>		 Spalart-Allmaras (1 eqn) 	TKE Prandtl Number	
Image: Classical Stress (2 eqn) Image: Classical Stress (2 eqn) Image: Scale-Adaptive Simulation (SAS) Energy Prandtl Number Image: Scale-Adaptive Simulation (SAS) Energy Image: Classical Stress (2 eqn) Image: Scale-Adaptive Simulation (SAS) Energy Prandtl Number Image: Scale-Adaptive Simulation (SAS) Energy Prandtl Number Image: Scale-Adaptive Simulation (DES) Energy Prandtl Number Image: Scale-Adaptive Simulation Energy Prandtl Number Image: Scale-Adaptive Simulation Energy Prandtl Number Image: Scale-Adaptive Simulation Energy Prandtl Number Image: Scale-Adaptive Simulation Energy Prandtl Number Image: Scale-Adaptive Simulation Energy Prandtl Number Image: Scale-Adaptive Simulation Energy Prandtl Number Image: Scale-Adaptive Simulation Energy Prandtl Number Image: Scale-Adaptive Simulation Energy Prandtl Number Image: Scale-Adaptive Simulation Energy	<complex-block></complex-block>		k-epsilon (2 egn)	1	
Image: State Adaptive Simulation (SAS)	<complex-block></complex-block>		k-omega (2 egn)	TDR Prandtl Number	
Image: Sector Adaptive Simulation (Scis) Energy Prandtl Number Os5 Scale-Adaptive Simulation (Os0) Os5 Verbandt Number Os6 Scale Noted Invision String Not Invision String Scale Noted Invision String Not Invision String Scale Noted Invision String Not Scale Noted Scale Noted Invision String Options Invision String Verbandt Number Inone Invision String Incited Number Inone Inone Invision String Incited Number Inone Inone Invision String Incited Number	<complex-block></complex-block>		Transition k-kl-omega (3 egn)	1.2	
Reynolds Stress (5 eq) 0.5 Scale-Adaptive Simulation (5A) 0.5 Detached Eddy Simulation (0ES) 0.5 Non-Equilibrium Valia User-Defined Functions Realizable urbulent Viscosity Non-Equilibrium Vali Functions Prandtl Number Standard Vali Functions Prandtl Number User-Defined Functions Prandtl Number Standard Vali Functions Prandtl Number User-Defined Vali Functions Pregy Prandtl Number Distribution Vali Functions Pregy Prandtl Number Non-Equilibrium Vali Functions Pregy Prandtl Number Non-Equilibrium Vali Functions Pregy Prandtl Number Viscous Heating Production Limiter Production Limiter Non-Equilibrium Vali Functions Non-Equilibrium Vali Functions Pregy Prandtl Number Non-Equi Prandt Number Pregy Prandtl N	<complex-block></complex-block>		Transition SST (4 eqn)	Enorgy Prandtl Number	
Scale-Adaptive Simulation (SAS) Wall Prandtl Number Detached Eddy Simulation (DES) 0.85 repsilon Model 0.85 Standard user-Defined Functions Realizable Turbulent Viscosity Non-Equilibrium Wall Functions none Standard Wall Functions none Standard Wall Functions none Scale-Defined Wall Functions none Wall Prandtl Number none Viscous Heating none Viscous Heating none Production Limiter none Nor-Spailbring Kiffects none Production Limiter none Norwing A-255 Viscous Model Non-Using A-255 Viscous Model	<complex-block></complex-block>		Reynolds Stress (5 ean)	0.85	
O betached Eddy Simulation (CES) Wai Prandit Number O Bas 0.8 Standard User-Defined Functions NNG Turbulent Viscosity Non-Equilibrium Wall Functions Frandit Number O Bas Non-Equilibrium Wall Functions Defined Wall Functions Defined Number O Bas Non-Equilibrium Wall Functions Defined Wall Functions Defined Wall Functions Defined Wall Func	<complex-block></complex-block>		Scale-Adaptive Simulation (SAS)		
Image: Sector	<image/> <image/>		Detached Eddy Simulation (DES)	Wall Prandti Number	
אושטים אושטי	<complex-block></complex-block>		Sectories Easy children (CES)	0.85	
Standard RNG Realizable Turbulent Viscosity Non-Equilibrium Wall Functions Prandit Number Non-Equilibrium Wall Functions Reference User-Defined Wall Functions Interview Prandit Number Non-Equilibrium Wall Functions Interview Prandit Number Non-Equilibrium Wall Functions Interview Prandit Number User-Defined Wall Functions Interview Prandit Number Non-Equilibrium Wall Functions Interview Prandit Number User-Defined Wall Functions Interview Prandit Number Non-Equilibrium Wall Functions Interview Prandit Number Non-Eprinde Wall Functions Interview Prandit Number Interview Compressibility Effects Interview Prandit Number Non-Eprinde Wall Prantin Prandit Number	<complex-block><image/><image/></complex-block>		k-epsilon Model		
Image: Noil Realizable User-Defined Functions Non-Equilibrium Wall Functions Prandtl Number Non-Equilibrium Wall Functions Prandtl Number Non-Equilibrium Wall Functions Internation User-Defined Wall Treatment Internation Non-Equilibrium Wall Functions Internation User-Defined Wall Treatment Internation Options Energy Prandtl Number Viscous Heating Internation Or User-Defined Wall Functions Internation Production Limiter Internation Internation Internation Non-Explicition Limiter Internation Internation Internation Inter	<complex-block></complex-block>		Standard		
• Realizable Turbulent Viscosity • Standard Wall Functions Scalable Wall Functions S	<complex-block></complex-block>		O RNG	User-Defined Functions	
Near-Wall Treatment กอกะ Standard Wall Functions Prandtl Number Scalable Wall Functions Interactions Non-Equilibrium Wall Functions Interactions Derivations Interactions Viscous Heating Interactions Viscous Heating Interactions Production Limiter Interaction Limiter Nonwite Cancel Help	<complex-block></complex-block>		Realizable	Turbulent Viscosity	
ທາງ ທາງ Bit and of Wall Functions Scalable Wall Functions Enhanced Wall Treatment Outer-Defined Wall Functions Options Viscous Heating Viscous Heating Viscou	<complex-block><form></form></complex-block>		Near-Wall Treatment	none	
Scalable Wall Functions Frander Wall Number Non-Equilibrium Wall Functions Inone User-Defined Wall Functions Energy Prandel Number Options Wall Prandel Number Oticos Wall Prandel Number Image: Compressibility Effects Image: Compressibility Effects Production Limiter Image: Compressibility Effects <t< td=""><td><complex-block> Scalable Wall Functions Frandet Number Non-Equilibrium Wall Functions Frandet Number Other Frandet Number Inone User-Defined Wall Functions Energy Prandet Number Other Scalable Wall Flore Energy Prandet Number Other Scalable Wall Flore Energy Prandet Number Non-Equilibrium Wall Flore Energy Prandet Number</complex-block></td><td></td><td>Ctondard Well Functions</td><td>Prondtl Numbors</td><td></td></t<>	<complex-block> Scalable Wall Functions Frandet Number Non-Equilibrium Wall Functions Frandet Number Other Frandet Number Inone User-Defined Wall Functions Energy Prandet Number Other Scalable Wall Flore Energy Prandet Number Other Scalable Wall Flore Energy Prandet Number Non-Equilibrium Wall Flore Energy Prandet Number</complex-block>		Ctondard Well Functions	Prondtl Numbors	
รังสมอย พงฆ Functions เห็ะ Frandi Number Non-Equilibrium Wall Functions IDR Frandi Number DR Frandi Number IDR Frandi Number None IDR Frandi Number Nenter-Lechner IDR Frandi Number User-Defined Wall Functions Integrations Viscous Heating IDR Frandi Number None IDR Frandi Number	<complex-block> Scalasie wali Functions Derrandti Number Derry Prandti Number none Image: Compressibility Effects Production Limiter User-Defined Wall Functions Detross Derrandti Number none Viscus Heating Production Limiter Derrandti Number none Derrandti Statistics Production Limiter Production Limiter Derrandti Number none Derrandti Statistics Production Limiter Production Limiter Derrandti Aumber none Production Limiter Derrandti Aumber Production Limiter Derrandti Aumber Production Limiter Derrandti Aumber Production Limiter Derrandti Aumber Distributions Production Limiter Production Limiter Derrandti Aumber Production Limiter Derrandti Aumber Distributions Namon A-25 Viscous Model Statutions - Initialization AA Initialization Statutions - Initialization AA Initialization</complex-block>		Standard Wall Functions	TVE Drandt Number	
พฤษายางอายาม กาย โกลกced Wall Treatment โกลกced Wall Treatment User-Defined Wall Functions โกลกced Wall Functions Viscous Heating โกลกced Wall Functions Viscous Heating เกลกced Wall Functions Wall Prandtl Number เกลด Interstolling Compressibility Effects Interstolling Initialization กาพที่ ก-25 Viscous Model Initialization	Non-tequined Wall Treatment Wenter-Lechner User-Defined Wall Functions Uscous Heating Uscous Heating OC Cance Help Troduction Limiter OC Cance Helpהחלל ה-25 Viscous Model		Scalable wall Functions		
เป็น Prandu Number Nenter-Lechner User-Defined Wall Functions Dergy Prandtl Number None Wall Prandtl Number None Wall Prandtl Number None Namin Antiperstation	I של שאל און הרפינות של		Non-Equilibrium Wall Functions	TDP Prandtl Number	
Intervener in the intervener in the intervener in the intervener in the intervener intervener intervener intervener intervener intervene inte	In the set of the		Ennanced Wall Treatment		
Over-verified wall Functions Energy Frandtl Number Options Inne Viscous Heating Wall Prandtl Number Image: Compressibility Effects Inne Image: Cancel Help Image: Cancel Help Anwn n-25 Viscous Model	ערענערע און איז		Menter-Lechner	Iune	
<pre>options</pre>	Options Inne Viscous Heating Inne Viscous Heating Inne Inne Inne Production Limiter Inne Inne Inne Image: Inne Image: Inne Image: Inne Image: Inne Image: Inne Image: Inne Image: In		User-Defined Wall Functions	Energy Prandtl Number	
<u>Viscous Heating</u> <u>Compressibility Effects</u> <u>Production Limiter</u> or Cancel Help ภาพที่ ก-25 Viscous Model	Viscous Heating Wall Prandtl Number none none Production Limiter oc cancel Help อาพที่ ก-25 Viscous Model วัวนของ Solutions – Initialization กด Initialize		Options	none	
<u>rownialization อด Initialization</u> กาพที่ ก-25 Viscous Model	In the production Limiter Production Limiter In The production Limiter In Cancel Help ภาพที่ ก-25 Viscous Model An Win An Win		Viscous Heating	Wall Prandtl Number	
Production Limiter ดะ Cancel Help ภาพที่ ก-25 Viscous Model	Production Limiter Inter Cancel Help ภาพที่ ก-25 Viscous Model ว่วนของ Solutions – Initialization กด Initialize		✓ Compressibility Effects	none	
ัณ Cancel และ ภาพที่ ก-25 Viscous Model	Intervention กิด Initialization กิด Initializa		Production Limiter		
	Bit Domain Physics User-Defined Solution Results View Parallel Desiring * Q Quick Se O Image: Annotation	₿≓	OK	Cancel Help	
Mesh Zones Interfaces Hesh Models © Diploy Image: Combine of the Combineo of the Combine of the Combine of the Combine of the Combi		CUNDY Solution	ง ราพที่ ก-2! กร – Initialization กด score <u>verbrind</u> solution record Scole Grandman - ⊞ better	Cancel Help 5 Viscous Model Initialize so Vew Pareled Des • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	ry Adapt Surface
Hosh Zones Histarcas Hesh Models Image: Separate in the se	🕑 Units encode Goundy 🗸 Malae Polyhedra 👘 Adjacency 🖽 Addiate 🗠 Replace Zone 📖	JUNDI Solution	ง ภาพที่ ก-2! กร – Initialization กด slos <u>ter-telfine subtion</u> result Scale Separate Bookles Separate Bookles Se	Cancel Help 5 Viscous Model 5 Viscous Model Initialize ts Vice Paralel Des • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	ck Ge O F Ans
Image: Normal Scale State Point Scale <	Outline View Task Page Male Polyheirs ************************************	고 11 인전 Solution Bit Domain Pty Diploy Diploy Diploy Diploy Check, Quality, Outline View	ร ร Scale Scale Make Pelyhedra Stake Page	Cancel Help 5 Viscous Model Initialize ks Vew Paralel Des Constant Append Backer Mesh., Replace Zone, Butterfaces Mesh Medels Constant Replace Zone, Butterfaces Mesh Mesh Medels Constant Replace Zone, Butterfaces Mesh Mesh Medels Constant Replace Zone, Butterfaces Mesh Mesh Mesh Medels Constant Replace Zone, Butterfaces Mesh Mesh Mesh Mesh Medels Replace Zone, Butterfaces Mesh Mesh Mesh Mesh Mesh Mesh Mesh Me	ry Adapt Surface
Heads Heads Heads Heads Heads Heads Heads Jack O Ipploy Obelow. Obelow. <td>Outline View Task Page Male Polyhedra **** Adjacency ************************************</td> <td>222923 Solution</td> <td>ระ Scie Make Polyhedra Make Polyhedra Make Polyhedra Transform Tra</td> <td>Cancel Help 5 Viscous Model Initialize to very Parallel Des • • • • • • • • • • • • • • • • • • •</td> <td>ry Adapt Surface</td>	Outline View Task Page Male Polyhedra **** Adjacency ************************************	222923 Solution	ระ Scie Make Polyhedra Make Polyhedra Make Polyhedra Transform Tra	Cancel Help 5 Viscous Model Initialize to very Parallel Des • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	ry Adapt Surface
Mesh Zones Mesh Models Diploy Scale Deletex Mesh Models Diploy Sparate Deletex Append Diploy Sparate Deletex Replox Meth Units Check Quality Mala Polyherino Adjacency Adjacency Adjacency Muther View C Task Page Replox Meth Replox Meth Rep	Outline View Task Page Masher Software Outline View Task Page Masher Software Filter Text Initialization Initialization	Duvel Solution	Solution Initialization Solution Initialization Solution Initialization Task Payleding Solution Initialization Task Payleding	Cancel Help 5 Viscous Model Initialize keptoce Meth Replace Meth Replace Zore We Meth Replace Zore Meth Meth Meth Meth Meth Meth Meth	ek see.
Nesh Zones Mesh Mesh Mesh Image: Specific State Sole Sole Specific State Mesh Tutomachnery Image: Specific State Specific State Specific State Mesh Mesh Tutomachnery Image: Specific State Specific State Specific State Specific State Mesh Mesh Image: Specific State Specific State Specific State Specific State Specific State Mesh Image: Specific State Specific State Specific State Specific State Specific State Specific State Image: Specific State Specific State Specific State Specific State Specific State Specific State Image: Specific State Specific State Specific State Specific State Specific State Specific State Image: Specific State Specific State Specific State Specific State Specific State Specific State Image: Specific State Specific State Specific State Specific State Specific State Specific State Image: Specific State Specific State Specific State Specific State Specific State Specific State Image: Specific State Specific State Specific State Specific State </td <td>Outline View < Task Page ()</td> Filter Ted Initialization Objection Initialization	Outline View < Task Page ()	Carlon Contain The Solution	ער איז	Cancel Help 5 Viscous Model Initialize so Vice Paralel Des Construction Replace Mesh. Replace Mesh. Repla	ry Adapt Surface
Nech Zones Mech	Outline View Make Polyhedrol [*]* Adjocency (E] Addrete Meginice Zone (E) Adjocency (E] A	Disploy Displ	עלי אראל אראל אראל ארא אראל אראל אראל ארא אראל אראל אראל ארא אראל אראל	Cancel Help 5 Viscous Model Initialize to view parallel point of a constraint of a constrai	Ré Secuiro Contractoria de la co
Neath Neath Neath Neath Neath Neath Neath Neath Informace Informace <td< td=""><td>Outline View Adjoency () Adjoency.</td><td>PLUYERS Solution</td><td>ער אליינגער אליינגער איין אליינגער איין איין איין איין איין איין איין איי</td><td>Cancel Help 5 Viscous Model Initialize k Vew Paralel Des C C C Append Vew Machine Papeore Mechine Replace Kenhine Correction of Correction Mesh Models Mesh Models Mesh Medeline Mesh Medeline Mesh Models Mesh Models Mesh Models Mesh Models Mesh</td><td>Adapt Surface</td></td<>	Outline View Adjoency () Adjoency.	PLUYERS Solution	ער אליינגער אליינגער איין אליינגער איין איין איין איין איין איין איין איי	Cancel Help 5 Viscous Model Initialize k Vew Paralel Des C C C Append Vew Machine Papeore Mechine Replace Kenhine Correction of Correction Mesh Models Mesh Models Mesh Medeline Mesh Medeline Mesh Models Mesh Models Mesh Models Mesh Models Mesh	Adapt Surface
Normality Norma	Units Outline View Make Polyhedroli Makee Polyhedroli Makee Polyhedroli Makee Polyh	PLUTER Cell Cell Cenc Contions Cell Cell Cenc Centions Cell Cell Cenc Centions Cell Cell Cenc Centions Cell Cell Cenc Centions Cell Centions Cell Centions Cen	المعالية Image: Solution Initialization Initializa	Cancel Help 5 Viscous Model Initialize keptoc Meth. Replace Meth. Replace Zore. We Meth. Replace Zore. Meth	ry Adapt Surface
Note: Source: Master Statistical Image: Im	Units	The Test Contain Contains	Schein Histeltzein Schein Histeltzein Ster Verrorfind Schlie Schein Histeltzein Schein Histeltzein Sc	Cancel Help 5 Viscous Model Initialize s Vice Paralel Des C Q Q Append With Models Replace Mesh. Replace Mesh. Replace Zone. Mesh Mesh. Correct. Mesh Mesh	et Ge- C F Ans ry Adapt Surface T X X STUDENT
Weah Tomas Master Solator: Master	Untilse View Task projector <	Dipploy Dipplo	Scale Scale.	Cancel Help 5 Viscous Model Initialize Agend View Parallel Des C C C C C C C C C C C C C C C C C C C	cl. star. ry Adapt Surface SURFACE SURFACE
Nearborn Zones Methan Methan </td <td>Units. Units. Units.<td>Display Displa</td><td>ل</td><td>Cancel Help 5 Viscous Model Initialize to verset. Mesh Model Append Mesh Replace Zone Wesh Model Correct Sca Model Mesh</td><td>ry Adapt Surface</td></td>	Units. Units. <td>Display Displa</td> <td>ل</td> <td>Cancel Help 5 Viscous Model Initialize to verset. Mesh Model Append Mesh Replace Zone Wesh Model Correct Sca Model Mesh</td> <td>ry Adapt Surface</td>	Display Displa	ل	Cancel Help 5 Viscous Model Initialize to verset. Mesh Model Append Mesh Replace Zone Wesh Model Correct Sca Model Mesh	ry Adapt Surface
Weah Zones Methan Depringuity Methan Interfaces Methan Depringuity Methan	Untilse View Control C	Plan Test Plan Test	Scie Sci	Cancel Help 5 Viscous Model Initialize to vev Parelle Des C Q Q Append Becker Replace Meth Replace Zorn Browner C Q Q Meth Replace Zorn Meth Meth C Q Q Meth C Q Q C Q Q Q Q C Q Q Q Q Q Q Q Q Q Q Q Q Q Q	ry Adapt Surface
Nethods Status Transform Construction Master Schwart Deschwart Deschwart <td>Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of th</td> <td>Care Contains Care Contains Contai</td> <td>Scale. Scale.</td> <td>Cancel Help 5 Viscous Model Initialize to Viscous Model Initialize to Viscous Model Papend Cancel Mesh Models Papend With Models Papend Wi</td> <td>ry Adapt Surface</td>	Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of the interaction Image: Section of th	Care Contains Care Contains Contai	Scale. Scale.	Cancel Help 5 Viscous Model Initialize to Viscous Model Initialize to Viscous Model Papend Cancel Mesh Models Papend With Models Papend Wi	ry Adapt Surface
Wesh Solar Diploy Diploy Diploy D	Outline View Take Projectory, main Adjuscency,	Diana Diana Diana Diana Diana Diana Diana Diana Diana Check Diana	Scale Scale.	Cancel Help 5 Viscous Model Initialize Append View Parallol Des C C C C C C C C C C C C C C C C C C C	Adapt Surface
Neah Zones Methan Departed Methan Departed Methan Departed Methan Departed Methan Departed Methan Departed Departed Methan Departed Departed Methan Departed Methan Departed Methan Departed Methan Departed Methan Departed Departed Methan Methan Departed	Untils: Until: Until: </td <td>Bit Domain Pty Bit Domain Pty Bit December Mesh Dirlo Dirlo Dirlo Dirlo Dirlo Dirlo Dirlo Dirlo Dirlo Wath Dirlo Dirlo Withs Check. Quality Outline View Dirlo Dirlo Filer Text Dirlo Dirlo Dirlo Dirlo</td> <td>Scle Schettrug Inthistorio Schettrug</td> <td>Cancel Help 5 Viscous Model Initialize to view parallel per el el</td> <td>ct See. C C C C C C C C C C C C C C C C C C</td>	Bit Domain Pty Bit Domain Pty Bit December Mesh Dirlo Dirlo Dirlo Dirlo Dirlo Dirlo Dirlo Dirlo Dirlo Wath Dirlo Dirlo Withs Check. Quality Outline View Dirlo Dirlo Filer Text Dirlo Dirlo Dirlo Dirlo	Scle Schettrug Inthistorio Schettrug	Cancel Help 5 Viscous Model Initialize to view parallel per el	ct See. C C C C C C C C C C C C C C C C C C

ภาพที่ **ก-26** Solution – Initialization

เมื่อทำการ Initialize เสร็จแล้ว มาที่ Calculation Activities เป็นการกำหนด Auto Save ว่า ต้องการ Save ทุกๆกี่รอบของการ run โปรแกรม

Mesh Display	Scale Scale ∯ Transform G Separate ↓ Make Polyhedra ∯ Adjacency	Interfaces Mesh Models ∰ Aspiace Xeeta ∰ Mesh. ∰ Dynamic Mesh. Turbomachinery Adapt Surface ∰ Aspiace Zone ∰ Overset Str. Gap Model Image: Str. Str. Str. Str. Str. Str. Str. Str.	
utline View	< Task Page	K 🛃 🔤 Mesh 🛛 🗙	
		Ansys	
	Calculation Activities	2024 81	-
Filter Text	Autosave Every (Iterations)	STUDENT	1000
for Named Expressions	500 C Edit		
Solution	Automatic Export		
Methods		G	
Panort Definitions			3
		T	-
🗑 Cell Registers			
So Automatic Mesh Adaption	Annual Contraction Annual Contraction		5
	Create 🖕 Edit Delete		-
Calculation Activities	. –		1
Execute Commands	Execute Commands		K.
- Automatically Initialize and		Q	e
Solution Animations			
Cell Register Operations			<u> </u>
Run Calculation		-	-
Surfaces		• 0 selected all	•
📀 🔮 Graphics	Console		0 <
	-Pressure information is available at th	e boundaries	0
Scene Scene			-
Dashboard	iter scalar-0 scalar-1		

ภาพที่ ก-27 Solution - Calculation Activities

มาที่ Run Calculation กำหนดรอบที่ Number Iterations ว่าต้องการให้โปรแกรม run กี่รอบ และ กด Calculate เพื่อทำการเริ่มการ Simulation ดังภาพที่ ก-28

File Domain Physi	ics User-Defined Solution	Results	View F	Parallel Des	🗘 🔺 🔍 Quick Se	🔿 📘 🗛 Ansys
Displey Displey Dinfo - Check- Quality - Check-	Scale Scale Stransform Make Folyhedra → Adjacency Activ	te (* Append ttv (* Append ttivate (* Replace Mes vate (* Replace Zon	• Interfaces • Mesh • • •	Mesh Models	Turbomachinery Adapt	Surface
Outline View	Task Page Length Scale Method Conservative Parameters			h	tesh	
Jon Named Expressions Solution Solution Methods Controls Report Definitions • Q. Monitors	Number of Iterations Reporting Interactions 2000 1 Profile Update Interval 1	erval				8
Cell Registers Cell Registers Automatic Mesh Adaption Control	Solution Processing Statistics Data Sampling for Steady Statistics Data File Quantities		_			
Execute Commands Automatically Initialize and I Solution Animations Cell Register Operations Date Collegition	Solution Advancement Calculate					
Results Surfaces	(10 M			0 selecte	• Ile bi
Graphics Graphics Plots Scene Dashboard	Console -Fressure information is available iter scalar-0 sc	at the boundaries				

ภาพที่ **ก-28** Solution – Run Calculation

เมื่อทำการ run เสร็จสมบูรณ์ ในส่วนของ Results – Reports – Fluxes ดังภาพที่ ก-29 เลือก inlet- Primary , inlet secondary, outlet จากนั้นกด compute จึงจะได้ค่าของ inlet Primary , inlet secondary และoutlet ดังภาพที่ ก-30 ให้นำค่า inlet secondary / inlet Primary จึงจะได้ ค่า อัตราส่วนเชิงมวล (mass entrainment ratio : Rm)

Oisploy () Info •	Domain Ph Mesh	hysics User-Defined	Solution Zones bine - B Delete arate - B Deactivate	Results V	View Pa	Mesh Models	Turbomachinery	e	©	Ansys
Filter Test	Check+ Quality +	Make Polyhedra Adje Conservative	cency 📑 Activate Verbosity 🕶 0	Replace Zone	Mesh	Sap Model		Scaled Residu	als Ans 200 STUDE	× 595 24 R1 NT
● Setup ● Solution ● Results ● Graph ● Grap	s s ard lons crete Phase tiency est crete Phase tiency data crete Phase tiency data crete Phase tiency data sec face Integrals & Contomization exports	Parameters Number of Bentions 2000 Profile updae Interval 3 Solution Processing Statistics Data f Solution Advancement Console	Reporting Interval		-	_		0 selected	ol	
1.10		epsilon hyb_init-0	1.45		10					
	XP	ภาพที่	ก-29 F	Results -	- Repo	rt – Flu	xes	1	5	
	Flux Rep Options Mass F Total H	ภาพที่ ports Flow Rate Heat Transfer Rate	n-29 F	Results - Iter 🕞	- Repo	rt – Flu _{Results}	xes	3	×	
N S S S S S S S S S S S S S S S S S S S	Flux Rep Options Mass F Total H Radiati Viscous	<mark>ports</mark> Flow Rate Heat Transfer Rate ion Heat Transfer Rate is Work Rate	n-29 F Boundaries F axis inlet_primary inlet_seconda interior-surfat outlet surface_body wall_ejector wall_nozzle	Results - Iter 👼 ry re_body	- Repo	rt – Flu Results 0.021127382292 -0.00152552092 -0.01960194297	XES	3	×	
Ser Surg	Flux Rep Options Mass F Total H Radiati Viscou:	אסייאל אסייאלי ports How Rate Heat Transfer Rate ion Heat Transfer Rate is Work Rate	n-29 F axis inlet_primary inlet_seconda interior-surfac outlet surface_body wall_ejector wall_nozzle	Results - Iter 🗟 ry re_body	- Repo	rt – Flu Results 0.02112738229: -0.00152552092 -0.01960194297	XES	.,	×	GR
Ser Sires	Flux Rep Options Mass F Radiati Viscous	אראילי ports Iow Rate Heat Transfer Rate ion Heat Transfer Rate is Work Rate put Parameter	n-29 F Boundaries F axis inlet_primary inlet_seconda interior-surfato outlet surface_body wall_ejector wall_nozzle	Results -	Close Hel	rt – Flu Results 0.02112738229: -0.00152552092 -0.01960194297	XES		×	GR

เมื่อต้องการดูแถบสี ให้เลือกคำสั่ง Results และเลือก Contours ดังภาพที่ ก-31 หลังจาก นั้นเลือกค่าที่ต้องการดู จากภาพที่ ก-32 เป็นการเลือก Pressure, static Pressure

<u>File</u> Domain	Physics User-D	efined Solution	Results	View F	Parallel Des	🕠 🔺 🔍 Quick S		0 📔 🖊	Insys
O Display ⊙ Info ↓ Occk+ Quality	Scale C ⁰ Transform • Make Polyhedra	Zor © Combine → ∰ Delete □ Separate → ∰ Deact → Adjacency ∰ Activa	nes a (* Append ivate (* Replace Mer ite (* Replace Zon	e Interfaces Interfaces Mesh Overset	Mesh Models	Turbomachinery	Adapt St	urface	
Filter Text	 Task Page Length Scale M Conservative 	tethod Verbosity		Mes	sh >		Scaled Residual	S X Ansys 2024 R STUDENT	S 2
Setup Solution Results Surfaces Surfaces Mesh Mesh Mesh Results Resul	Parameters Number of Itera 2000 Profile Update 1 1 Solution Procee Statistics Data Samp	tions Reporting Inter therval ssing ling for Steady Statistics							2 8 6
Plots Scene Dashboard Animations Reports Parameters & Customization Simulation Reports	Solution Adva	Data File Quantities ncement Calculate					0 selected al	1	- H
	Console	Mass Flow Rate	[kg/s]					A	• 10

<mark>ภาพที่ ก-31 Contours</mark>

contour-1		
Ontions	Contours of	
✓ Filled	Pressure	
✓ Node Values	Static Pressure	
Boundary Values Contour Lines	Min Max	
Global Range	0	
Auto Range	Surfaces Filter Text 🔂 🗮 🐺	
Clip to Range Draw Profiles	axis inlet_primary inlet_secondary	
Coloring	interior-surface_body outlet surface_body	
 Banded Smooth 	wall_ejector wall_nozzle	
	Display State	
Colormap Options	None Use Active New Surface	
s	ave/Display Compute Close Help	16

หลังจากนั้นโปรแกรมแสดงผลแถบสี Contours of Static Pressure และแสดงแถบสี เปรียบเทียบกับค่าความดันที่เกิดขึ้นในแบบจำลองอีเจ็คเตอร์ ดังภาพที่ ก-33

Displa Views Headligh J Options 2 Display Sta Camera 2 Peniodic Ins	t v Lighting of tes MALANTIC v Stancing	Graphics Lights 60 Compose Colormap 62 Material Editor Annotate	Image: Mesh Display Image: Wesh Display Image: Open constraints Image: Open constraints Image: Open constraints Image: Open constraints	Graphics Toolbars ☑ Copy y ☑ Object Selection/Disp	Graphics Effects	
time View ************************************	Tack Page C Length Scale Method Conservative V Parameters Number of Berations 2000 C Profile Update Interval 1 Solution Processing Statistics Solution Advancement Cale	Contor Contor	irs of Static Pressure [Pa]	×	Scaled Residuals	X Ansyss 2024 Rel STUDENT
	3				0 selected all	
	Console					

ภาพที่ ก-33 แถบสี Contours of Static Pressur



ภาคผนวก ข

ผลบันทึกจ<mark>ำลองทางพลศาสตร์ของไหลเพื่อวิเคราะห์ความเร็วเหนือเสียงที่เหมาะสมของหัวฉีดสำหรับ</mark>

อีเจ็คเตอร์ใช้ในระบบทำความเย็นโดยใช้โปรแกรมจำลองทางพลศาสตร์ของไหล

2117

	ე [.]	ากทางออกหัวฉี	ดขนาด 5.48 mr	n สารทำความเย็น R	1233 zd
	T _{gen} (℃)	T _{con} (°C)	T _{evap} (℃)	Mach Number	Rm
		1	5	2.557944	-0.072205866
	11		6	2.57448	0.010892591
1	OF	20	7	2.58406	0.130407277
9	60	20	8	2.594362	0.244135711
	- Jet	1 nd	9	2.60082	0.414727738
	2.5	1 22	10	2.644418	0.593068573
	T _{gen} (℃)	T _{con} (°C)	T _{evap} (℃)	Mach Number	Rm
	m	28	5	2. <mark>5</mark> 59 <mark>415</mark>	0.418307056
	15. VI		6	2.565355	0.5 <mark>185</mark> 55995
	00		7	2.589321	0.625288763
	90		8	2.606328	0.656373848
'n	- 5		9	2.622944	0.689945992
	2 4	24.92	10	2.651196	0.724347956
Ċ	T _{gen} (℃)	T _{con} (°C)	T _{evap} (℃)	Mach Number	Rm
	Son 1	20	5	2.821048	0.450053228
	128	1 371	6	2.767349	0.46281567
	05	28	7	2.68951	0.46969737
	75	20	8	2.596274	0.482886581
		and the second second	9	2.581242	0.505437813
			10	2.573166	0.524175663

ตารางที่ ข-1 ผลการทดสอบความเร็วของเสียงและอัตราส่วนเชิงมวล ของปากทางออกหัวฉีด ขนาด 5.48 mm สารทำความเย็น R1233 zd

ป	lากทางออกหัวฉี	ดขนาด 6.48 mr	n สารทำความเย็น R	1233 zd
T _{gen} (℃)	T _{con} (°C)	T _{evap} (℃)	Mach Number	Rm
	1	5	2.853532	-0.132292872
		6	2.8355865	-0.091676902
OE	20	7	2.802055	-0.084425907
60	20	8	2.73052	-0.0516217
- See	1 nd	9	2.662309	-0.028382773
2.5	162	10	2.634806	-0.017298016
T _{gen} (°C)	T _{con} (°C)	T _{evap} (℃)	Mach Number	Rm
1	28	5	2. <mark>8</mark> 42501	0.544080264
15.		6	2.848391	0.570485899
00		7	2.85044	0.600649656
90		8	2.852422	0.631024487
- 5	8-1.3	9	2.852225	0.663306793
0	24.82	10	2.848677	0.699890694
T _{gen} (℃)	T _{con} (°C)	T _{evap} (℃)	Mach Number	Rm
Non 1	74	5	2.814217	0.481219422
100	1 371	6	2.825846	0.504098172
05	28	7	2.836503	0.528177223
75	20	8	2.845039	0.552770334
	and the second se	9	2.851625	0.579600255
		10	2.86479	0.609665086

ตารางที่ ข-2 ผลการทดสอบความเร็วของเสียงและอัตราส่วนเชิงมวล ของปากทางออกหัวฉีด ขนาด 6.48 mm สารทำความเย็น R1233 zd

	പ'	ากทางออกหัวฉี	ดขนาด 7.48 mr	n สารทำความเย็น R	1233 zd
Т	「 _{gen} (℃)	T _{con} (°C)	T _{evap} (℃)	Mach Number	Rm
	1	1	5	2.75144	-0.466683485
	11		6	2.748815	-0.475624849
ß	OF	20	7	2.729064	-0.481357676
1	00	20	8	2.709206	-0.493477484
	Je!	1 nd	9	2.701775	-0.468315095
	2.12	1 22	10	2.68 <mark>9</mark> 99	-0.434073568
T	「 _{gen} (℃)	T _{con} (°C)	T _{evap} (℃)	Mach Number	Rm
7		28	5	2. <mark>8</mark> 43504	0.539093798
2	5. V		6	2.824876	0.5 <mark>657</mark> 84899
	00		7	2.81775	0.602479969
	90		8	2.803567	0.639222187
ò.	- 5		9	2.788013	0.658624509
90	1		10	2.760025	0.699697113
T	「 _{gen} (℃)	T _{con} (°C)	T _{evap} (℃)	Mach Number	Rm
10	2	79	5	2.95386	0.476967559
1	8	1 371	6	2.947465	0.498004348
	05	20	7	2.930125	0.522413101
	75	20	8	2.8948	0.547580214
			9	2.849057	0.565260674
			10	2.798658	0.580042579

ตารางที่ ข-3 ผลการทดสอบความเร็วของเสียงและอัตราส่วนเชิงมวล ของปากทางออกหัวฉีด ขนาด 7.48 mm สารทำความเย็น R1233 zd

ป	ากทางออกหัวฉี	ดขนาด 5.48 mr	n สารทำความเย็น R	1224 yd
T _{gen} (℃)	T _{con} (°C)	T _{evap} (℃)	Mach Number	Rm
	1	5	2.567967	-0.144906437
11		6	2.589119	-0.063070265
OF	20	7	2.597258	0.034894962
CO	20	8	2.602622	0.164443836
- See	124	9	2.61326	0.319757913
25	1 22	10	2.645764	0.486488234
⊤ _{gen} (°C)	T _{con} (°C)	T _{evap} (℃)	Mach Number	Rm
1	20	5	2.53448	0.340941725
75. V		6	2.549908	0.4 <mark>374</mark> 02185
00		7	2.571919	0.550900857
90	20	8	2.594496	0.601920633
- 5	2-1.3	9	2.61476	0.64090658
0	24.82	10	2.64102	0.6611388
T _{gen} (℃)	T _{con} (℃)	T _{evap} (℃)	Mach Number	Rm
Non 1	79	5	2.819185	0.473452654
128	6	2.7409929	0.480327411	
05	29	7	2.631809	0.483034777
75	20	8	2.55715	0.503734282
		9	2.546859	0.530900695
		10	2.541834	0.571005226

ตารางที่ ข-4 ผลการทดสอบความเร็วของเสียงและอัตราส่วนเชิงมวล ของปากทางออกหัวฉีด ขนาด 5.48 mm สารทำความเย็น R1224 yd

٩	ปากทางออกหัวฉี	ดขนาด 6.48 mr	n สารทำความเย็น R	1224 yd
T _{gen} (℃)	T _{con} (°C)	T _{evap} (℃)	Mach Number	Rm
1	1	5	2.855235	-0.247610878
		6	2.840609	-0.227691376
OF	20	7	2.812222	-0.206689007
00	20	8	2.749993	-0.205771096
· Set	Lak	9	2.672296	-0.191383335
2.5		10	2.65 <mark>2</mark> 804	-0.186614367
⊤ _{gen} (°C)	T _{con} (°C)	T _{evap} (℃)	Mach Number	Rm
77	E B	5	2. <mark>8</mark> 38918	0.559462828
15		6	2.845455	0.5 <mark>958</mark> 98874
00	20	7	2.848282	0.626932785
90	20	8	2.848968	0.65792161
	12-12	9	2.848439	0.692356062
	24.92	10	2.840812	0.714028816
T _{gen} (℃)	T _{con} (°C)	T _{evap} (℃)	Mach Number	Rm
Non 1	79	5	2.828837	0.502655924
128	1 371	6	2.83972	0.525930012
05	28	7	2.84936	0.550565801
20	20	8	2.85995	0.56650409
		9	2.86855	0.59551384
		10	2.879315	0.644896081

ตารางที่ ข-5 ผลการทดสอบความเร็วของเสียงและอัตราส่วนเชิงมวล ของปากทางออกหัวฉีด ขนาด 6.48 mm สารทำความเย็น R1224 yd
	ปากทางออกหัวฉีดขนาด 7.48 mm สารทำความเย็น R1224 yd				
	T _{gen} (℃)	T _{con} (°C)	T _{evap} (℃)	Mach Number	Rm
	85	28	5	2.751755	-0.545978788
			6	2.746398	-0.561370551
0			7	2.70786	-0.587119864
9			8	2.691168	-0.591450638
			9	2.684647	-0.558126812
			10	2.645408	-0.531642273
	T _{gen} (°C)	T _{con} (°C)	T _{evap} (℃)	Mach Number	Rm
	90	28	5	2.799872	0.142100018
			6	2.785095	0.21658541
			7	2.769011	0.240140527
			8	2.755337	0.259036192
n			9	2.732516	0.270607555
			10	2.72396	0.282271412
ľ	T _{gen} (℃)	T _{con} (°C)	T _{evap} (℃)	Mach Number	Rm
	95	28	5	2.9584	0.493561112
1			6	2.949869	0.51616676
			7	2.93655	0.531548262
			8	2.904773	0.557780551
			9	2.868221	0.588472363
			10	2.816428	0.61865252

ตารางที่ ข-6 ผลการทดสอบความเร็วของเสียงและอัตราส่วนเชิงมวล ของปากทางออกหัวฉีด ขนาด 7.48 mm สารทำความเย็น R1224 yd

<mark>ภาคผนวก</mark> ค

ภาพแถบสีแสดงค่<mark>าความเร็วของเสียงของหัวฉีดอีเจ็คเ</mark>ตอร์

211



ภาพที่ ค-1 แสดงค่าความเร็วของเสียงปากทางออกหัวฉีดขนาด 5.48 mm.ที่อุณหภูมิ เครื่องกำเนิดไอ 90 °C อุณหภูมิเครื่องระเหย 6 °C สารทำความเย็น R1233 zd



ภาพที่ ค-3 แสดงค่าความเร็วของเสียงปากทางออกหัวฉีดขนาด 5.48 mm.ที่อุณหภูมิ เครื่องกำเนิดไอ 90 °C อุณหภูมิเครื่องระเหย 10 °C สารทำความเย็น R1233 zd



ภาพที่ ค-4 แสดงค่าความเร็วของเสียงปากทางออกหัวฉีดขนาด 6.48 mm.ที่อุณหภูมิ เครื่องกำเนิดไอ 90 °C อุณหภูมิเครื่องระเหย 6 °C สารทำความเย็น R1233 zd



ภาพที่ ค-6 แสดงค่าความเร็วของเสียงปากทางออกหัวฉีดขนาด 6.48 mm.ที่อุณหภูมิ เครื่องกำเนิดไอ 90 °C อุณหภูมิเครื่องระเหย 10 °C สารทำความเย็น R1233 zd



ภาพที่ ค-7 แสดงค่าความเร็วของเสียงปากทางออกหัวฉีดขนาด 7.48 mm.ที่อุณหภูมิ เครื่องกำเนิดไอ 90 °C อุณหภูมิเครื่องระเหย 6 °C สารทำความเย็น R1233 zd

2.44

2.06

2.25

2.63

2.81

3.00

0.38

0.56

0.19

0.00

0.75

0.94

1.13

131

1.50

1.69

1.88

ภาพที่ ค-8 แสดงค่าความเร็วของเสียงปากทางออกหัวฉีดขนาด 7.48 mm.ที่อุณหภูมิ เครื่องกำเนิดไอ 90 °C อุณหภูมิเครื่องระเหย 8 °C สารทำความเย็น R1233 zd



ภาพที่ ค-9 แสดงค่าความเร็วของเสียงปากทางออกหัวฉีดขนาด 7.48 mm.ที่อุณหภูมิ เครื่องกำเนิดไอ 90 °C อุณหภูมิเครื่องระเหย 10 °C สารทำความเย็น R1233 zd



ภาพที่ ค-10 แสดงค่าความเร็วของเสียงปากทางออกหัวฉีดขนาด 5.48 mm.ที่อุณหภูมิ เครื่องกำเนิดไอ 90 °C อุณหภูมิเครื่องระเหย 6 °C สารทำความเย็น R1224 yd



ภาพที่ ค-12 แสดงค่าความเร็วของเสียงปากทางออกหัวฉีดขนาด 5.48 mm.ที่อุณหภูมิ เครื่องกำเนิดไอ 90 °C อุณหภูมิเครื่องระเหย 10 °C สารทำความเย็น R1224 yd



ภาพที่ ค-13 แสดงค่าความเร็วของเสียงปากทางออกหัวฉีดขนาด 6.48 mm.ที่อุณหภูมิ เครื่องกำเนิดไอ 90 °C อุณหภูมิเครื่องระเหย 6 °C สารทำความเย็น R1224 yd



ภาพที่ ค-15 แสดงค่าความเร็วของเสียงปากทางออกหัวฉีดขนาด 6.48 mm.ที่อุณหภูมิ เครื่องกำเนิดไอ 90 °C อุณหภูมิเครื่องระเหย 10 °C สารทำความเย็น R1224 yd



ภาพที่ ค-16 แสดงค่าความเร็วของเสียงปากทางออกหัวฉีดขนาด 7.48 mm.ที่อุณหภูมิ เครื่องกำเนิดไอ <mark>9</mark>0 °C อุณหภูมิเครื่องระเหย 6 °C สารทำความเย็น R1224 yd



ภาพที่ ค-18 แสดงค่าความเร็วของเสียงปากทางออกหัวฉีดขนาด 7.48 mm.ที่อุณหภูมิ เครื่องกำเนิดไอ 90 °C อุณหภูมิเครื่องระเหย 10 °C สารทำความเย็น R1224 yd

ประวัติผู้เขียน

ชื่อการค้นคว้าอิสระ

สาขาวิชา

ชื่อ

ประวัติ

นายเอกลักษณ์ เกิดพรม

การวิเคราะห์ความเร็วเหนือเสียงที่เหมาะสมของหัวฉีดสำหรับ <mark>อีเจ็คเตอร์ใช้ในระบบทำความ</mark>เย็นโดยใช้โปรแกรมจำลองทาง พลศาสตร์ของไหล วิศวกรรมเครื่องกลศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ <mark>ที่อ</mark>ยู่ 28 ม.13 ตำบลบางระกำ อำเภอบางระกำ จังหวัดพิษณุโลก 65140 เบอร์โทรติดต่อ 0898608126

E-mail : <u>eakkalakpltc@gmail.com</u>

ประวัติการศึกษา

ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ

ร<mark>ะดับประกาศนียบัตรว</mark>ิชาชีพชั้นสูง

ระดับปริญญาตรี

ประวัติการทำงาน พ.ศ. 2557-2559 8160

พ.ศ. 2560-ปัจจุบัน

<u>วิทยาลัยเท</u>คนิคพิษณุโลก ปีการศึกษา 2546 วิทยาลัยเทคนิคพิษณุโลก ปีการศึกษา 2548 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลล้<mark>านนาตาก</mark> ปีการศึกษา 2551

<mark>ครูผู้ช่วยแผนกวิชาช่</mark>างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคชัยนาท <mark>ครูแผนกวิชาช่</mark>างยนต์ **วิทยาลัยเท**คนิคพิษณุโลก