

การปรับปรุงค่าประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ที่ประยุกต์ใช้ในระบบทำความเย็นโดยการใช้
พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

THE PERFORMANCE IMPROVEMENT OF THE EJECTOR USED IN REFRIGERATION
APPLICATION BY USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

พีรพงษ์ ธนกิจเจริญวัฒน์
ภาสวิชญ์ บุญช่วย

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การปรับปรุงค่าประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ที่ประยุกต์ใช้ในระบบทำความเย็นโดยการใช้
พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

THE PERFORMANCE IMPROVEMENT OF THE EJECTOR USED IN REFRIGERATION
APPLICATION BY USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

พีรพงษ์ ธนกิจเจริญวัฒน์
ภาสวิษฐ์ บุญช่วย

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

THE PERFORMANCE IMPROVEMENT OF THE EJECTOR USED IN REFRIGERATION
APPLICATION BY USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

PEERAPONG THANAKITCHAROENPHAT
PASSAWITCH BOONCHUAY

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การปรับปรุงค่าประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ที่ประยุกต์ใช้ในระบบทำความเย็นโดยการใช้
พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

THE PERFORMANCE IMPROVEMENT OF THE EJECTOR USED IN REFRIGERATION
APPLICATION BY USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

ผู้จัดทำ

1. นายพีรพงษ์ ธนกิจเจริญพัฒน์

รหัสประจำตัว 57010916

2. นายภาสวิษฐ์ บุญช่วย

รหัสประจำตัว 57010985


(ดร.ณัฐวดี เรืองตระกูล)

อาจารย์ที่ปรึกษา

การปรับปรุงค่าประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ที่ประยุกต์ใช้ในระบบทำความเย็นโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

นายพีรพงษ์ ชนกกิจเจริญวัฒน์ 57010916
นายภาสวิชัย บุญช่วย 57010985
ดร.ณัฐวุฒิ เรืองตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

โครงการนี้จัดทำเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการปรับปรุงประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้ในระบบทำความเย็นโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) โดยที่ประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ซึ่งประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่ (CRMC) จะได้รับจากการคำนวณแบบพลศาสตร์ของไหลโดยจะเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของชุดการทดลองที่เป็นอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่ (CPM) ที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอที่ 130°C, 140°C และ 150°C และมีอุณหภูมิอิ่มตัวของเครื่องระเหยคงที่ที่ 7.5°C โครงการนี้ประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือส่วนแรกจะเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของอีเจ็คเตอร์แบบ CPM จากชุดการทดลองกับการทำแบบจำลองเพื่อยืนยันถึงความแม่นยำในการทำแบบจำลอง ในส่วนต่อมาคือประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์จะได้มาจากอัตราส่วนการเหนี่ยวนำสาร (entrainment ratio) และความดันวิกฤติที่เครื่องควบแน่น (critical condenser pressure) ของอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC จะถูกวิเคราะห์โดยที่ จะมีการนำเสนอพฤติกรรมการไหลของสารทำความเย็น (ไอน้ำ) ภายในอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC และ CPM โดยที่ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC ให้ผลของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำและความดันวิกฤติที่เครื่องควบแน่นสูงกว่าอีเจ็คเตอร์แบบ CPM อยู่ 7.28% และ 1%, ตามลำดับ

คำศัพท์สำคัญ : อีเจ็คเตอร์, ประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์, ประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์, อัตราส่วนการเหนี่ยวนำสาร

THE PERFORMANCE IMPROVEMENT OF THE EJECTOR USED IN REFRIGERATION
APPLICATION BY USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

Mr.Peerapong Thanakitcharoenphat 57010916

Mr.Passawitch Boonchuay 57010985

Dr.Natthawut Ruangtrakoon Advisor

Year 2017

Abstract

This project is to study the possibility of the performance improvement of the ejector used in the refrigeration system by using computation fluid dynamics (CFD). The performance of refrigeration system depends on the performance of the ejector. The performances of the ejector model Constant Rate Momentum Change (CRMC) obtained from CFD were compared with the performances of the actual experiment model Constant Pressure Mixing (CPM) at the several boiler saturation temperatures of 130°C , 140°C and 150°C. The evaporator saturation temperature was fixed at 7.5°C. This project has 2 parts, In the first part, the experimental results of ejector model CPM were used to validate the simulated results in order to grantee the accuracy of the simulation. In another part, the performances of ejector which are the entrainment ratio and critical condenser pressure obtained from CRMC ejector were analyzed. The flow behaviors of the refrigerant (steam) inside the CRMC ejector and CPM ejector were presented. The results indicated that the CRMC ejector provided the higher entrainment ratio and critical pressure than the CPM ejector by 7.28% and 1%, respectively.

Keywords : ejector, Performance of ejector, Entrainment ratio, Critical pressure

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาทุกชั้นตอนจาก ดร. อนุรักษ์ เรื่องตระกูล ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์ ทีมงานวิจัยขอกราบขอบพระคุณในความอนุเคราะห์จากท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ศ.ดร.ศรिता อารณรัตน์ และคุณบริรักษ์ กิจรัตน(พี่บอ) ที่ให้ความกรุณาให้คำแนะนำและความรู้แก่ทีมงานวิจัย ตลอดจนให้ความกรุณาเอื้อเฟื้อด้านสถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติ พี่น้องทุกคนที่คอยช่วยเหลือด้านกำลังใจและให้คำปรึกษาในด้านการทำงานและการใช้ชีวิต

สุดท้ายขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ได้สนับสนุนการทำปริญญาานิพนธ์ในครั้งนี้ ผู้จัดทำจึงใคร่ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายพีรพงษ์ ธนกิจเจริญวัฒน์

นายภาสวิษฐ์ บุญช่วย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและที่มาความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตโครงการ.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 อีเจ็คเตอร์ในระบบทำความเย็น.....	3
2.2 หลักการทำงานของอีเจ็คเตอร์.....	6
2.3 ประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์	6
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอีเจ็คเตอร์.....	8
2.5 ชุดการทดลองของระบบทำความเย็นที่ใช้อีเจ็คเตอร์.....	10
บทที่ 3 ทฤษฎี.....	13
3.1 ลักษณะการไหลภายในอีเจ็คเตอร์	13
3.1.1 คลื่นขยายตัว.....	14

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 CFD (Computation Fluid Dynamics).....	15
3.3 กฎการอนุรักษ์การเคลื่อนที่ของของไหล	16
3.3.1 สมการควบคุมการไหล.....	16
3.3.1.1 การอนุรักษ์มวลในปัญหา3มิติ	16
3.3.1.2 สมการโมเมนตัมใน3มิติ.....	18
3.3.1.3 สมการพลังงานใน3มิติ.....	19
3.4 สมการนาเวียร์-สโตกส์ สำหรับการไหลแบบนิวโทเนียน.....	20
บทที่ 4 วิธีการดำเนินการและแบบจำลอง	21
4.1 ศึกษาแบบจำลองลักษณะหัวฉีดหลักในอีเจ็คเตอร์.....	21
4.2 วิธีการตั้งค่าหัวฉีดหลักในอีเจ็คเตอร์ในโปรแกรม ANSYS	22
4.3 ศึกษาแบบจำลองลักษณะอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่	27
4.4 แบบจำลองและวิธีการตั้งค่าอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันแบบการผสมกันที่ ความดันคงที่ในโปรแกรม ANSYS	28
4.5 แบบจำลองและวิธีการตั้งค่าอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่ ในโปรแกรม ANSYS.....	30
บทที่ 5 ผลการจำลองและวิเคราะห์ผล	39
5.1 ผลการจำลองของหัวฉีดหลัก.....	39
5.2 ผลการจำลองของอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่	40
5.3 ผลการจำลองของอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่	41
5.3.1 ผลการจำลองที่อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 130องศาเซลเซียส.....	41
5.3.2 วิเคราะห์ผลการจำลองที่อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส	42
5.3.3 ผลการจำลองที่อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 140องศาเซลเซียส	45

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.3.4 วิเคราะห์ผลการจำลองที่อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 140 องศาเซลเซียส	47
5.3.5 ผลการจำลองที่อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 150 องศาเซลเซียส.....	47
5.3.6 วิเคราะห์ผลการจำลองที่อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 150 องศาเซลเซียส.....	49
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	50
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	50
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	51
บรรณานุกรม.....	52

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงขนาดของหัวฉีดหลัก[1].....	11
4.1 แสดงลักษณะของหัวฉีดหลักและขนาดของหัวฉีดหลัก[1]	21
4.2 แสดงการตั้งค่าขอบเขต	24
4.3 แสดงคุณสมบัติของสารทำความเย็นในระบบ.....	26
4.4 แสดงขนาดของอีเจ็คเตอร์แบบการผสมที่ความดันคงที่.....	28
4.5 แสดงการตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตของอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดัน	29
4.6 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่.....	34
5.1 แสดงผลที่ได้ของหัวฉีดหลักขนาด d1.4M4 จากวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอขอบเขต 3 ค่า.....	39
5.2 แสดงผลที่ได้ของอีเจ็คเตอร์แบบการผสมที่ความดันคงที่จากวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเทียบกับชุดการทดลองที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอขอบเขต 3 ค่าและอุณหภูมิเครื่องเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียสและหัวฉีดหลักขนาด d1.7M4.....	40
5.3 แสดงผลที่ได้จากวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของอีเจ็คเตอร์แบบการผสมที่ความดันคงที่และอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่ ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเครื่องเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียสและหัวฉีดหลักขนาด d1.7M4	41
5.4 แสดงผลที่ได้จากวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของอีเจ็คเตอร์แบบการผสมที่ความดันคงที่และอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่ ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 140 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเครื่องเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียสและหัวฉีดหลักขนาด d1.7M4.....	45

5.5 แสดงผลที่ได้จากวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของอีเจ็คเตอร์แบบการผสมที่ความดันคงที่และอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ตั้มคงที่ ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 150 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเครื่องเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียสและหัวฉีดหลักขนาด d1.7M4..... 48

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์[1]	4
2.2 องค์ประกอบหลักทั้งสี่ของอีเจ็คเตอร์และความแปรผันของความดันและความเร็วของลำน้ำ ตามตำแหน่งของอีเจ็คเตอร์[1].....	7
2.3 คุณลักษณะสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์[8].....	8
2.4 ขนาดของอีเจ็คเตอร์[1].....	10
2.5 ลักษณะของหัวฉีดหลัก[1].....	11
3.1 แสดงลักษณะการไหลภายในอีเจ็คเตอร์	13
3.2 แสดงลักษณะการไหลภายในอีเจ็คเตอร์แบบunder expanded wave	14
3.3 แสดงลักษณะการไหลภายในอีเจ็คเตอร์แบบover expanded wave	15
3.4 การไหลของมวลเข้าและออกชิ้นส่วนของไหล	17
3.5 องค์ประกอบของความเค้นบนผิวหน้าทั้งสามทิศทางของชิ้นส่วนของไหล	18
3.6 องค์ประกอบของพลังงานบนผิวหน้าทั้งสามทิศทางของชิ้นส่วนของไหล	19
4.1 ลักษณะหัวฉีดหลัก.....	22
4.2 แสดงการเข้าDesignModelerเพื่อวาดแบบ.....	22
4.3 ภาพแสดงลักษณะของหัวฉีดหลัก	23
4.4 แสดงเมชที่ใช้ในการทำแบบจำลองซึ่งจะใช้ 2000 เมช	23
4.5 แสดงขอบเขตในการตั้งค่า	24
4.6 แสดงการตั้งค่าวิธีการคำนวณในโปรแกรม	25
4.7 แสดงการตั้งค่าวิธีการคำนวณในโปรแกรม<ต่อ>.....	25

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
4.8 แสดงการตั้งค่าสารทำงานในระบบดังตารางที่ 4.3.....	26
4.9 แสดงค่า mass flow rate จากโปรแกรม.....	27
4.10 แสดงองค์ประกอบของอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันแบบความดันคงที่	28
4.11 แสดงลักษณะแบบจำลองและลักษณะเมชแบบตารางขนาด 40000 เมช.....	29
4.12 แสดงการตั้งค่าขอบเขต	29
4.13 แสดงลักษณะของอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่	30
4.14 แสดงลักษณะการวาดอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่	37
4.15 แสดงลักษณะเมชตาราง 40000 เมช.....	37
4.16 แสดงการตั้งค่าขอบเขต	38
5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำสารและความดันเครื่องควบแน่นของ อีเจ็คเตอร์แบบ CRMC และอีเจ็คเตอร์แบบ CPM ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเครื่องเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียสและหัวฉีดหลักขนาด d1.7M4.....	42
5.2 ปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่และอีเจ็คเตอร์แบบ การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่ตามลำดับ ที่เงื่อนไขความดันเครื่องควบแน่น 30 mbar และ อุณหภูมิเครื่องเครื่อง ระเหย 7.5 องศาเซลเซียสและหัวฉีดหลักขนาด d1.7M4	42
5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำสารและความดันเครื่องควบแน่นของอีเจ็คเตอร์ แบบ CRMC และอีเจ็คเตอร์แบบ CPM ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 140 องศา เซลเซียส และอุณหภูมิเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียสและหัวฉีดหลักขนาด d1.7M4.....	46

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
5.4	
ปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่และอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ตัมคงที่ตามลำดับ ที่เงื่อนไขความดันเครื่องควบแน่น 40 mbar และอุณหภูมิเครื่องเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียสและหัวฉีดหลักขนาด d1.7M447	47
5.5	
แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำสารและความดันเครื่องควบแน่นของอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC และอีเจ็คเตอร์แบบ CPM ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 150 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิเครื่องเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียสและหัวฉีดหลักขนาด d1.7M448	48
5.6	
ปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่และอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ตัมคงที่ตามลำดับ ที่เงื่อนไขความดันเครื่องควบแน่น 30 mbar และอุณหภูมิเครื่องเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียสและหัวฉีดหลักขนาด d1.7M4.....49	49

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

\dot{Q}_{evap}	อัตราการทำความเย็นของเครื่องระเหย (kW)
\dot{Q}_{boiler}	อัตราพลังงานความร้อนของเครื่องกำเนิดไอ (kW)
\dot{W}_{pump}	อัตราพลังงานที่ป้อนให้ปั๊มน้ำหมุนเวียน (kW)
C_p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg.K)
R_m	ค่าประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์
\dot{m}_s	อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิ (kg/s)
$h_{f,evap}$	ค่าเอนทัลปีของของไหลทุติยภูมิที่เข้าสู่เครื่องระเหย (kJ/kg)
$h_{g,evap}$	ค่าเอนทัลปีของของไหลทุติยภูมิที่ออกมาจากเครื่องระเหย (kJ/kg)
k	อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ
\dot{m}_p	อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลปฐมภูมิ (kg/s)
$h_{g,boiler}$	ค่าเอนทัลปีของของไหลปฐมภูมิที่ออกจากเครื่องกำเนิดไอ (kJ/kg)
$h_{f,boiler}$	ค่าเอนทัลปีของของไหลปฐมภูมิที่ไหลเข้าเครื่องกำเนิดไอ (kJ/kg)
T	อุณหภูมิ (K)
τ	ค่าความเค้นเฉือน (N/m ²)
D_i	เส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า (mm)
D_t	เส้นผ่านศูนย์กลางที่คอคอด(mm)
D_e	เส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออก(mm)
Ma	ความเร็วมัค
M_0	โมเมนต์ในอีเจ็คเตอร์ (N.m)
v_{DE}	ความเร็วของของผสมที่ทางออกดีฟิวเซอร์ (kg/s)
P	ค่าความดัน (Pa)
t	เวลา (s)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและที่มาความสำคัญ

โครงการนี้ทำการศึกษาอีเจ็คเตอร์ในชุดการทดลองระบบทำความเย็น โดยต้องการปรับปรุงค่าประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์เพราะค่าประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นจะขึ้นอยู่กับค่าประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ เนื่องจากมีชุดการทดลองระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์โดยที่ใช้อีเจ็คเตอร์แบบ Constant Pressure Mixing (CPM) โครงการนี้จะเปลี่ยนอีเจ็คเตอร์มาเป็นแบบ Constant Rate of Momentum Change (CRMC) โดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ในการจำลองและคำนวณหาประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์โดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับการไหล แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าประสิทธิภาพของชุดการทดลองต้นแบบเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพ ถึงแม้ว่าการพัฒนาและออกแบบอุปกรณ์อีเจ็คเตอร์สามารถทำการทดลองจริงเพื่อที่จะนำไปสู่ต้นแบบได้ แต่ขั้นตอนการดำเนินงานต่างๆในการทดลองนั้นต้องใช้ต้นทุนในการสร้างชุดการทดลองสูง นอกจากนี้ยังเสียเวลาในการทดลองค่อนข้างมาก รวมทั้งไม่สามารถนำข้อมูลเก่ามาปรับปรุงได้ ต้องทำการทดลองใหม่เมื่อมีการปรับเปลี่ยนรูปร่างและขนาดที่ออกแบบไว้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.ปรับปรุงค่าประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ในชุดการทดลองระบบทำความเย็น
- 2.ศึกษาและวิเคราะห์สาเหตุที่ทำให้อีเจ็คเตอร์แบบ CRMC ให้ค่าประสิทธิภาพที่ดีกว่าเดิม

1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.ศึกษาเฉพาะอุปกรณ์อีเจ็คเตอร์
- 2.ทดสอบที่อุณหภูมิของเครื่องกำเนิดในช่วง 130-150 องศาเซลเซียส
- 3.ทดสอบที่อุณหภูมิของเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียส

4. ใช้หัวฉีดหลักที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.7 มิลลิเมตรและความเร็วที่ปล่อยออกจากหัวฉีดเท่ากับ 4 มัค
5. สมมุติให้ไม่มีการถ่ายเทพลังงานความร้อนระหว่างอุปกรณ์ฮีตเตอร์กับสิ่งแวดล้อม

1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

1. กำหนดขอบเขตและเนื้อหาของโครงการงาน
2. ศึกษางานวิจัย บทความ วรรณกรรม หรือทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงการงานเรื่องที่ทำ
3. ศึกษาการใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่จะทำการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ฮีตเตอร์
4. สร้างแบบจำลองของหัวฉีดหลักและฮีตเตอร์
5. ทำการจำลองสถานการณ์การทำงานของฮีตเตอร์
6. ทำการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของฮีตเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ตัมคังที่ แล้วเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของฮีตเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคังที่

บทที่ 2

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

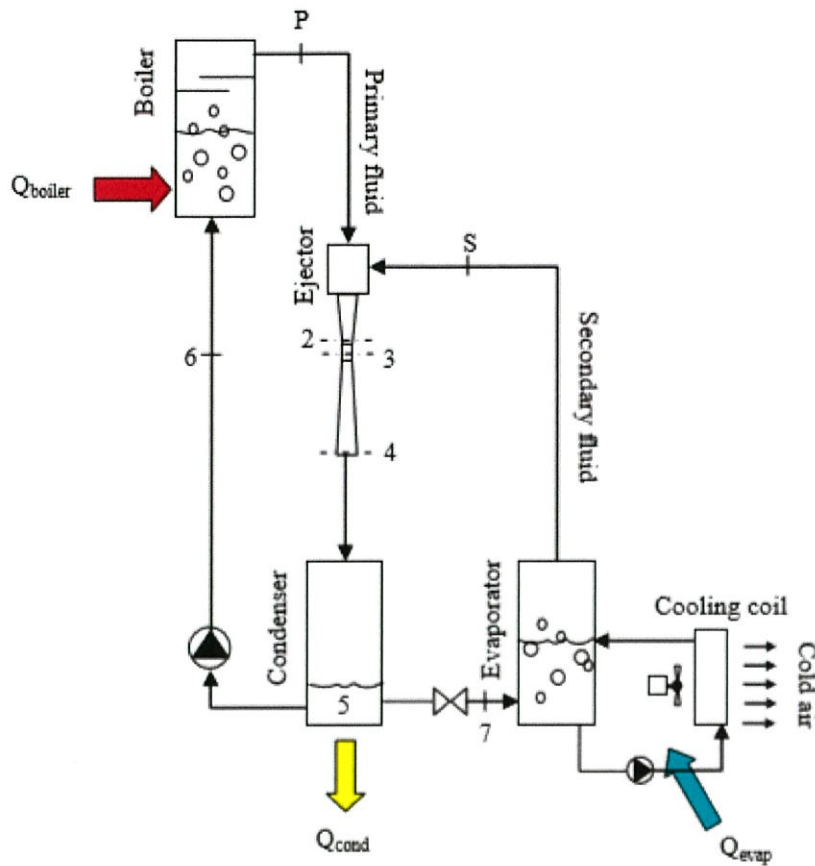
2.1 อีเจ็คเตอร์ในระบบทำความเย็น

อีเจ็คเตอร์ถูกประดิษฐ์เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1901 โดยวิศวกรชาวอังกฤษ Sir Charles Parsons เพื่อใช้ในการสร้างสุญญากาศภายในเครื่องควบแน่นของเครื่องกังหันน้ำ และในปัจจุบันอีเจ็คเตอร์ยังเป็นอุปกรณ์ที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างสุญญากาศตามระบบต่างๆ ได้แก่ระบบการตกผลึก, การอบแห้ง, การถนอมอาหาร, การดูดเอาก๊าซที่ไม่สามารถควบแน่นได้ออกจากเครื่องควบแน่นและการทำงานในระบบทำความเย็น โดยในโครงนี้จะทำการศึกษาอีเจ็คเตอร์ที่ใช้ในระบบทำความเย็น

ในระบบทำความเย็นได้นำอีเจ็คเตอร์มาใช้ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1910 โดยวิศวกรชาวฝรั่งเศส Maurice Leblanc โดยที่ในปัจจุบันอีเจ็คเตอร์จะถูกนำมาใช้แทนเครื่องอัดไอ (compressor) ซึ่งข้อดีของอีเจ็คเตอร์ก็คือไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวทำให้แทบไม่เกิดการสึกหรอและไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานในการขับเคลื่อนอุปกรณ์ รวมทั้งมีราคาที่ถูก

โดยข้อดีของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์คือสามารถใช้พลังงานความร้อนเกรดต่ำ เช่น พลังความร้อนทิ้งจากอุตสาหกรรม พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานชีวมวลซึ่งเป็นแหล่งพลังงานในการขับเคลื่อนระบบ นอกจากนี้ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ยังเป็นระบบเดียวที่สามารถใช้น้ำเป็นสารทำความเย็นโดยที่อีเจ็คเตอร์สร้างสุญญากาศในเครื่องระเหย (evaporator) ทำให้น้ำสามารถเดือดได้ที่อุณหภูมิต่ำ

นอกเหนือจากการใช้น้ำเป็นสารทำความเย็นแล้ว ในปัจจุบันได้มีการนำสารทำความเย็นชนิดต่างๆ เช่น R22 R134a เป็นต้น ซึ่งเป็นสารทำความเย็นสำหรับระบบทำความเย็นแบบอัดไอ มาใช้กับระบบเครื่องทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ด้วย เพื่อที่จะให้ระบบนี้สามารถนำมาใช้งานกับพลังงานความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 2.1 ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์[1]

จากแผนภาพในรูปที่ 2.1 ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์จะมีอุปกรณ์อยู่ด้วยกัน 6 ชิ้น ได้แก่เครื่องระเหย, อีเจ็คเตอร์, เครื่องควบแน่น (condenser), วาล์วลดความดัน (expansion valve), ปั๊มน้ำหมุนเวียน (pump) และเครื่องกำเนิดไอ (boiler) โดยวัฏจักรการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์มีดังนี้

เครื่องกำเนิดไอรับพลังงานความร้อนเกรดต่ำเพื่อใช้ในการผลิตให้สารทำความเย็นซึ่งคือน้ำมีสถานะเป็นไอที่มีความดันและอุณหภูมิสูงพร้อมใช้เป็นของไหลปฐมภูมิสำหรับอีเจ็คเตอร์ โดยที่ท่อดูดของอีเจ็คเตอร์จะต่อเข้ากับเครื่องระเหย ซึ่งทำให้ความดันภายในเครื่องระเหยต่ำลงและทำให้น้ำสามารถเดือดได้ที่อุณหภูมิต่ำ ไอน้ำจากเครื่องระเหยถูกใช้เป็นของไหลทุติยภูมิและผสมเข้ากับของไหลปฐมภูมิภายในอีเจ็คเตอร์ ซึ่งอีเจ็คเตอร์จะเพิ่มความให้กับของไหลผสมให้มีค่าความดันมากกว่าในเครื่องระเหยพร้อมทั้งส่งไปยังเครื่องควบแน่นและกลับตัวเป็นของเหลว โดยแลกเปลี่ยนความร้อนกับสิ่งแวดล้อม บางส่วนของของเหลวจะถูกส่งไปยังเครื่องกำเนิดไอฟื้นทางปั๊มน้ำหมุนเวียน และ

ของเหลวที่ไหลจะขยายตัวผ่านวาล์วลดความดันพร้อมทั้งเข้าสู่เครื่องระเหย โดยภาระการทำความเย็นของระบบแสดงดังสมการที่ (2.1)

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_s (h_{g, evap} - h_{f, evap}) \quad (2.1)$$

\dot{Q}_{evap} คือ อัตราการทำความเย็นของเครื่องระเหย (kW)

\dot{m}_s คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิ (Secondary fluid) (kg/s)

$h_{g, evap}$ คือ ค่าเอนทัลปีของของไหลทุติยภูมิที่ออกมาจากเครื่องระเหย (kJ/kg)

$h_{f, evap}$ คือ ค่าเอนทัลปีของของไหลทุติยภูมิที่เข้าสู่เครื่องระเหย (kJ/kg)

และพลังงานที่ป้อนให้แก่ระบบทำความเย็นจะอยู่ตรงส่วนอุปกรณ์เครื่องกำเนิดไอน้ำกับปั๊มน้ำหมุนเวียน แสดงดังสมการที่ (2.2) และ (2.3) ตามลำดับ

$$\dot{Q}_{boiler} = \dot{m}_p (h_{g, boiler} - h_{f, boiler}) \quad (2.2)$$

$$\dot{W}_{pump} = \dot{m}_p (h_{f, boiler} - h_{g, con}) \quad (2.3)$$

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

\dot{W}_{pump} คือ อัตราพลังงานที่ป้อนให้ปั๊มน้ำหมุนเวียน (kW)

\dot{m}_p คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลปฐมภูมิ (Primary fluid) (kg/s)

$h_{g, boiler}$ คือ ค่าเอนทัลปีของของไหลปฐมภูมิที่ออกจากเครื่องกำเนิดไอน้ำ (kJ/kg)

$h_{f, boiler}$ คือ ค่าเอนทัลปีของของไหลปฐมภูมิที่เข้าสู่เครื่องกำเนิดไอน้ำ (kJ/kg)

$h_{g, con}$ คือ ค่าเอนทัลปีของของไหลปฐมภูมิที่ออกจากเครื่องควบแน่น (kJ/kg)

ประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นจะแสดงในรูปของค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น (Coefficient of Performance, COP) ค่า COP หมายถึงอัตราส่วนระหว่างปริมาณพลังงานความเย็นที่ได้จากเครื่องระเหย ต่อพลังงานที่ป้อนให้แก่ระบบ

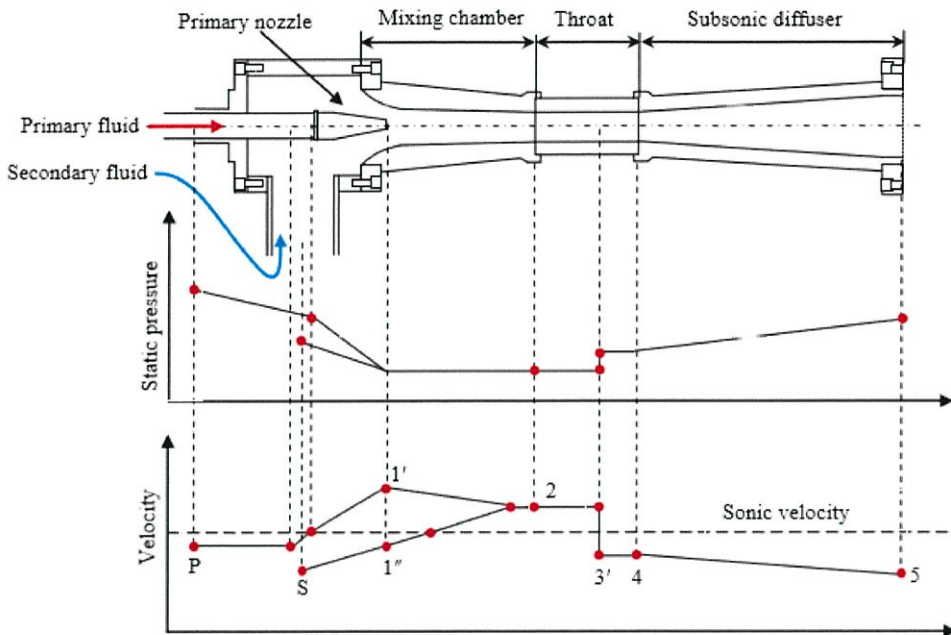
$$COP = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{Q}_{boiler} + \dot{W}_{pump}} = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_p} \left(\frac{h_{g,evap} - h_{f,evap}}{h_{g,boiler} - h_{g,con}} \right) = R_m \left(\frac{h_{g,evap} - h_{f,evap}}{h_{g,boiler} - h_{g,con}} \right) \quad (2.4)$$

R_m คือ ค่าประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ซึ่งเรียกว่า อัตราส่วนการเหนี่ยวนำสาร (Entrainment ratio)

จากสมการข้างบนจะกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพของระบบจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ ดังนั้นอีเจ็คเตอร์จึงเป็นส่วนที่สำคัญอย่างมากต่อระบบทำความเย็น

2.2 หลักการทำงานของอีเจ็คเตอร์

ปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์แสดงรูปที่ 2.2 ซึ่งมีปรากฏการณ์ดังนี้ คือ ของไหลปฐมภูมิที่มาจากเครื่องกำเนิดไอจะมีความดันและอุณหภูมิสูงเข้าสู่หัวฉีดหลัก (Primary nozzle) ซึ่งเป็นหัวฉีดแบบลู่เข้า-บานออก (converging-diverging) เมื่อผ่านคอขวด (Throat) ของไหลปฐมภูมิจะมีความเร็วเท่ากับความเร็วเสียงหรือโซนิค (Sonic) และขยายตัวออกจากปากทางออกของหัวฉีด ความดันสถิตของของไหลปฐมภูมิจะเปลี่ยนเป็นซูเปอร์โซนิค (Supersonic) ทำให้ความดันที่ห้องผสม (Mix chamber) ต่ำลงและเหนี่ยวนำของไหลทุติยภูมิจากเครื่องระเหยที่มีความดันสูงกว่ามาผสมกับของไหลปฐมภูมิ ในช่วงแรกของไหลทั้งสองชนิดยังไม่ผสมกันทันที แต่จะผสมกันสำเร็จก็ต่อเมื่อของไหลทุติยภูมิมีความเร็วเท่ากับความเร็วของของไหลปฐมภูมิ ความดันจะคงที่จนกระทั่งเกิดคลื่นกระแทก (Shock) เนื่องจากของไหลผสมผ่านบริเวณที่มีความดันสูงในตำแหน่งคอขวดและดิฟฟิวเซอร์ปรากฏการณ์นี้ทำให้ความเร็วของผสมลดลงจากซูเปอร์โซนิคเป็นซับโซนิค (Subsonic) อย่างรวดเร็ว และทำให้ความดัน อุณหภูมิ ความหนาแน่นของของไหลเพิ่มขึ้นโดยฉับพลัน จากนั้นความดันของของไหลในช่วงดิฟฟิวเซอร์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงปากทางออกเนื่องจากต้องการลดความเร็วของของไหลให้ต่ำลงจนกระทั่งเกือบอยู่สภาวะหยุดนิ่ง



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบหลักทั้งสี่ของอีเจ็คเตอร์และความแปรผันของความดันและความเร็วของลำน้ำ
ตามตำแหน่งของอีเจ็คเตอร์[1]

2.3 ประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์

ค่าที่บ่งบอกประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์คืออัตราส่วนการเหนี่ยวนำสาร (Entrainment ratio) ซึ่งอัตราส่วนการเหนี่ยวนำสารคืออัตราการไหลของของไหลทุติยภูมิต่ออัตราการไหลของของไหลปฐมภูมิ

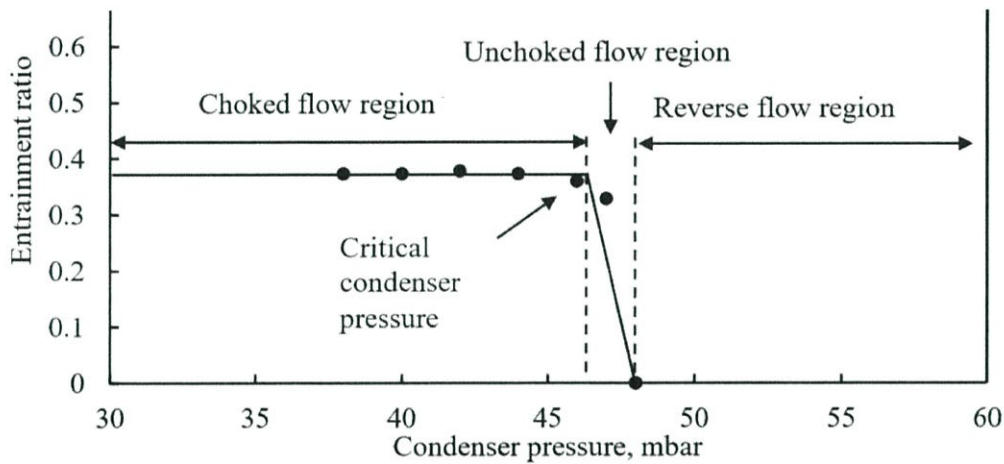
$$R_m = \frac{\text{mass flow rate of secondary fluid}}{\text{mass flow rate of primary fluid}} \quad (2.5)$$

จากรูปที่ 2.3 สามารถแบ่งลักษณะการไหลออกเป็นได้ 3 ส่วน ในส่วนแรกของไหลทุติยภูมิเกิด Choked flow ทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำสารจะมีค่าคงที่แม้ว่าค่าความดันของเครื่องควบแน่นจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่เมื่อเพิ่มค่าความดันของเครื่องควบแน่นจนมีค่ามากกว่าค่าความดันวิกฤติ (Critical pressure) ทำให้ของไหลทุติยภูมิเป็น Unchoked flow ทำให้อัตราการไหลเชิงมวลของของไหล

หุติยภูมิเข้าสู่อีเจ็คเตอร์ให้น้อยลงเป็นสาเหตุทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำสารจะมีค่าลดลง และสุดท้ายเมื่อค่าความดันของเครื่องควบแน่นมีค่ามากกว่าค่าความดันวิกฤติ (Break down pressure) ทำให้การทำงานของอีเจ็คเตอร์ล้มเหลว เนื่องจากของไหลปฐมภูมิไหลออกตรงทางเข้าของของไหลหุติยภูมิ เป็นสาเหตุค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำเป็นศูนย์

นอกจากค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำสาร ยังมีค่าที่บ่งบอกประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ก็คือค่าความดันวิกฤติ เพราะเมื่อความดันวิกฤติมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้อีเจ็คเตอร์สามารถทำงานในสภาพอากาศที่มีอุณหภูมิสูงได้

Choked flow คือ ปรากฏการณ์ไหลของของไหลที่จะเกิดขึ้นเมื่อของไหลไหลผ่านคอขวด ความเร็วของของไหลจะมีค่าเท่ากับความเร็วเสียง



รูปที่ 2.3 คุณลักษณะสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์[8]

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอีเจ็คเตอร์

Keenan และคณะ (1942) [2] ได้นำเสนอทฤษฎีวิเคราะห์การไหลแบบ 1 มิติ (1-D Analysis) โดยใช้สมบัติของก๊าซในอุดมคติมาวิเคราะห์การไหลภายในอีเจ็คเตอร์ ซึ่งอยู่ภายใต้ของข้อสมมุติฐาน 2 ประการตามแต่ชนิดของอีเจ็คเตอร์คือ การผสมกันแบบความดันคงที่ (Constant Pressure Mixing, CPM) และการผสมกันในพื้นที่หน้าตัดคงที่ (Constant Mixing Area, CMA) ซึ่งต่อมาทฤษฎีนี้ได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบและประเมินประสิทธิภาพการทำงานของอีเจ็คเตอร์กันอย่างแพร่หลาย แต่อย่างไรก็ตามทฤษฎีนี้ก็ยังไม่สามารถอธิบายลักษณะการไหลภายในอีเจ็คเตอร์ในขณะที่

เกิดการผสมกันของของไหลปฐมภูมิและทุติยภูมิตั้งวิธีนี้ยังไม่ได้นำค่าแรงเสียดทานที่เกิดจากการไหลภายในอีเจ็คเตอร์มาคำนวณอีกด้วย

Chou และคณะ (2001) [3] ได้นำเสนอสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนามาจากทฤษฎีการวิเคราะห์การไหลแบบ 1 มิติ เพื่อทำการวิเคราะห์การไหลของอีเจ็คเตอร์ในช่วง choked flow และทำนายอัตราการเหนี่ยวนำสารของอีเจ็คเตอร์ ซึ่งพวกเขาพบว่าผลการคำนวณของสมการของพวกเขา นั้นมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าทฤษฎีการวิเคราะห์การไหลแบบ 1 มิติ

Eames (2002) [4] ได้นำเสนอทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่ (Constant Rate of Momentum Change, CRMC) ซึ่งเป็นการออกแบบโดยรวมเอาข้อดีของอีเจ็คเตอร์แบบ CMA และ CPM ไว้ด้วยกัน ซึ่งคาดว่าอีเจ็คเตอร์แบบใหม่จะมีประสิทธิภาพการทำงานสูงกว่าแบบเดิม โดยออกแบบให้อีเจ็คเตอร์มีรูปร่างของดีฟิวเซอร์ที่ต่างแตกต่างจากรูปร่างเดิมในอดีตที่ผ่านมา แต่ทฤษฎีนี้ก็ไม่ได้แนะนำรูปร่างส่วนอื่นๆของอีเจ็คเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ร่วมกับทฤษฎีนี้

Striveerakul และคณะ (2007) [5] ได้ทำการเปรียบเทียบผลของการจำลองการไหลเชิงตัวเลข กับผลการทดลองจริง ซึ่งพบว่า การจำลองการไหลเชิงตัวเลขสามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ได้ใกล้เคียงกับชุดการทดลอง นอกจากนี้ยังสามารถอธิบายปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้นในอีเจ็คเตอร์ได้อีกด้วย

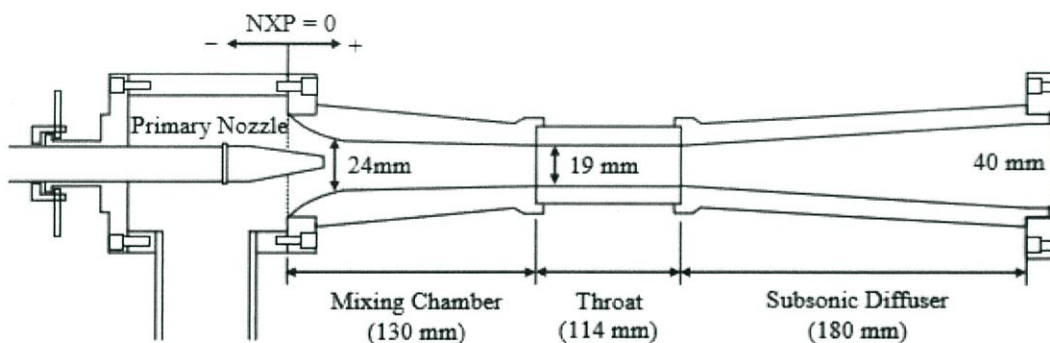
Ruangtrakoon และคณะ (2011) [6] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของรูปร่างของหัวฉีดที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของอีเจ็คเตอร์ โดยใช้หัวฉีดหลักที่มีขนาดต่างกัน 8 ขนาด จากการศึกษาพบว่า รูปร่างของหัวฉีดหลักมีผลต่อประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์เป็นอย่างมาก โดยที่อัตราการไหลของของไหลปฐมภูมิจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอัตราการไหลจะไม่ขึ้นกับขนาดพื้นที่ทางออกของหัวฉีดหลัก ถึงแม้ว่าอีเจ็คเตอร์ที่มีขนาดพื้นที่ทางออกของหัวฉีดหลักเท่ากัน แต่มีขนาดของคอขวดหัวฉีดหลักต่างกัน อีเจ็คเตอร์ที่มีขนาดพื้นที่คอขวดของหัวฉีดหลักใหญ่กว่าจะมีอัตราการไหลของไหลปฐมภูมิตั้งกว่าอีเจ็คเตอร์ที่มีขนาดพื้นที่คอขวดของหัวฉีดหลักที่เล็กกว่า แต่ในกรณีอีเจ็คเตอร์ที่หัวฉีดหลักมีขนาดพื้นที่คอขวดเท่ากันแต่ขนาดพื้นที่ทางออกต่างกัน อีเจ็คเตอร์ที่มีหัวฉีดหลักของขนาดพื้นที่ทางออกใหญ่กว่าจะให้ค่าความดันวิกฤติที่มากกว่า และในกรณีอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอเพิ่มขึ้นแต่อุณหภูมิของเครื่องระเหยเท่าเดิมทำให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำสารจะลดลงแต่ค่าความดันวิกฤติจะเพิ่มขึ้น

Kumar และ Ooi (2014) [7] ได้นำเสนอรูปแบบการพัฒนาจาก Huang และคณะ (1999) ในรูปแบบของแนวคิดการไหลของ Fanno เพื่อจับกระแสแรงเสียดทานของการไหลอัดตัวในห้องผสม และหาค่าเฉลี่ยความจุความร้อนจำเพาะเพื่อปรับปรุงความถูกต้องของการคาดการณ์

Ruangtrakoon และคณะ (2017) [8] ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัมคิงที่และอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่ ซึ่งอีเจ็คเตอร์ทั้ง 2 แบบมีขนาดเท่ากันทุกประการและหัวฉีดหลักมีขนาดเดียวกัน จากการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอและอุณหภูมิเครื่องระเหยอุณหภูมิเดียวกัน อีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัมคิงที่ ให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำที่มากกว่าอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่

2.5 ชุดการทดลองของระบบทำความเย็นที่ใช้อีเจ็คเตอร์

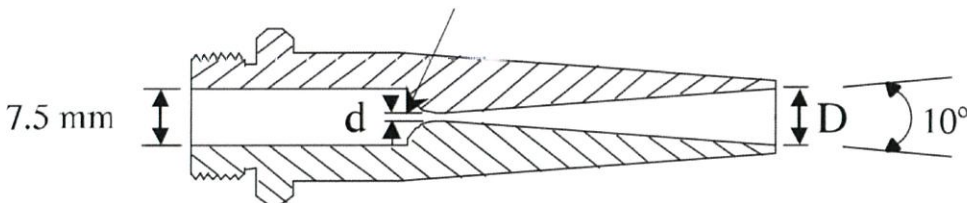
มีการออกแบบสร้างและทดสอบชุดการทดลองระบบทำความเย็นที่ใช้อีเจ็คเตอร์ เพื่อจะได้นำผลลัพธ์ของวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขมาตรวจสอบกับข้อมูลที่วัดได้จากชุดการทดลอง เพื่อที่จะให้แน่ใจได้ว่าวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขได้รับการพัฒนาอย่างถูกต้อง โดยชุดการทดลองใช้เพื่อศึกษาผลกระทบจากอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ, อุณหภูมิเครื่องระเหยและความดันที่เครื่องควบแน่น พร้อมทั้งผลกระทบที่เกิดจากหัวฉีดหลัก (ขนาดของคอคอดและความเร็วมัดที่ทางออก) โดยที่ชุดการทดลองได้รับการออกแบบให้สามารถระบายความร้อนได้ 1 กิโลวัตต์



รูปที่ 2.4 ขนาดของอีเจ็คเตอร์[1]

จากรูปที่ 2.4 แสดงขนาดรูปทรงเรขาคณิตของอีเจ็คเตอร์ซึ่งเป็นอีเจ็คเตอร์รูปแบบการผสมกันที่ความดันคงที่ มีขนาดทางเข้าห้องผสม 24 มิลลิเมตร ขนาดคอคอด 19 มิลลิเมตร และขนาดทางออกตรงส่วนดีฟิวเซอร์ 40 มิลลิเมตร โดยได้รับการออกแบบโดยทฤษฎีของ ESDU (1985) ซึ่งการออกแบบของ ESDU นั้นสามารถหาขนาดของอีเจ็คเตอร์โดยตรงจากการคำนวณเพียงบางส่วนเท่านั้น ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางของคอคอดหัวฉีด, ปากทางออกหัวฉีดและคอคอดอีเจ็คเตอร์ ส่วน

รูปร่างอื่นๆ ที่มีความจำเป็นในการสร้างอีเจ็คเตอร์ซึ่งได้แก่ขนาดของมุมลู่เข้าและออกของอีเจ็คเตอร์ และความยาวของช่วงคอคอดของอีเจ็คเตอร์ ไม่สามารถหาได้จากการคำนวณโดยตรง ESDU เพียงแค่แนะนำค่าต่างๆ เหล่านั้นเป็นช่วงกว้างๆ จึงเป็นเหตุผลให้มีความจำเป็นที่จะต้องใช้การจำลองการไหลเชิงตัวเลขมาจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์รูปร่างต่างๆ เพื่อหารูปร่างและขนาดของอีเจ็คเตอร์ที่ให้สมรรถนะการทำงานสูงสุดภายใต้เงื่อนไขการออกแบบ



รูปที่ 2.5 ลักษณะของหัวฉีดหลัก[1]

จากรูปที่ 2.5 ชุดการทดลองระบบทำความเย็นที่ใช้อีเจ็คเตอร์จะมีหัวฉีดหลักด้วยกัน 8 ขนาด โดยรูปร่างของหัวฉีดหลักที่ใช้จะเป็นแบบลู่เข้า-บานออก (convergent-divergent nozzle) ช่องทางหลักของหัวฉีดหลักเป็นวงกลมและส่วนที่ออกมีรูปกรวยมีมุมรวม 10 องศา เพราะถ้าใช้มุมน้อยกว่านี้ จะทำให้หัวฉีดมีความยาวเกินความจำเป็นซึ่งทำให้เกิดแรงเสียดทาน แต่ถ้าใช้มุมกว้างกว่านี้อาจทำให้ของไหลเกิดการแยกตัวออกจากผนังได้ (separation) จะทำให้ประสิทธิภาพของหัวฉีดลดลง

ตารางที่ 2.1 แสดงขนาดของหัวฉีดหลัก[1]

Nozzle code	d(mm)	(D:d) ²	Calculate exit Mach number	Ejector's area ratio
d1.7M4	1.7	20:1	4	124:1

จกตารางที่ 2.1 ทางโครงการนี้จะทำการศึกษหัวฉีดหลักขนาด d1.7M4 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอขวด 1.7 มิลลิเมตร มีความเร็วตรงทางออกเท่ากับ 4 มัค เนื่องจากหัวฉีดหลัก d1.7M4 . ในชุดการทดลองให้อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลปฐมภูมิได้ใกล้เคียงกับทฤษฎีที่แสดงในสมการ (2.6)

$$\dot{m}_p = A_{throat} P_p \sqrt{\frac{k}{RT_p}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \quad (2.6)$$

ในการทดสอบหัวฉีดทั้งหมดถูกวางไว้ที่ตำแหน่ง NXP (Nozzle Exit Position) ที่ +23 มม. ดังที่แสดงในรูปที่ 2.4

ส่วนความเร็วมัคตรงปากทางออกของหัวฉีดหลักสามารถคำนวณหาได้จากสมการ (2.7)

$$\frac{A_{exit}}{A_{throat}} = \frac{1}{Ma_{exit}} \left[\left(\frac{2}{k+1} \right) \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma_{exit}^2 \right) \right]^{\frac{(k+1)}{2(k-1)}} \quad (2.7)$$

A_{throat} คือ ขนาดพื้นที่ตรงคอขวดของหัวฉีดหลัก

A_{exit} คือ ขนาดพื้นที่ตรงปากทางออกของหัวฉีดหลัก

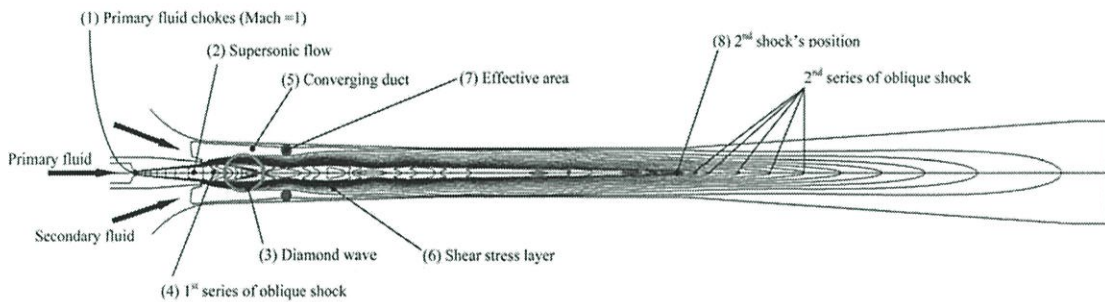
Ma_{exit} คือ ความเร็วมัคของของไหลปฐมภูมิที่ตำแหน่งปากทางออกของหัวฉีดหลัก

บทที่ 3

ทฤษฎี

3.1 ลักษณะการไหลภายในอีเจ็คเตอร์

ในบทนี้จะอธิบายถึงทฤษฎีที่จะใช้การศึกษาโดยที่จะเริ่มจากการศึกษาลักษณะการไหลในรูปแบบต่างๆในตัวอีเจ็คเตอร์ โดยจะพิจารณาที่รูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะการไหลภายในอีเจ็คเตอร์ [1]

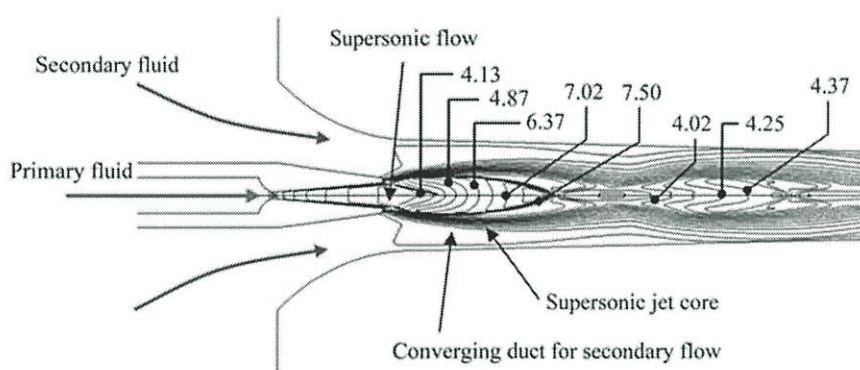
โดยที่ของไหลปฐมภูมิจะเป็นของไหลที่มาจากเครื่องกำเนิดไอและจะถูกฉีดโดยหัวฉีดหลักซึ่งของไหลปฐมภูมิจะถูกเร่งภายในหัวฉีดหลักหลังจากเกิดการไหลผ่านส่วนที่เป็นคอคอของหัวฉีดหลัก โดยที่จะได้ความเร็วที่ทางออกของหัวฉีดหลักเป็นความเร็วเหนือเสียง และจะเกิดเป็นคลื่นขยาย (Expanded-wave) และจากเหตุการณ์ดังกล่าวจะทำให้ของไหลเกิดคลื่นกระแทกครั้งที่ 1 ซึ่งจะเป็นลักษณะของออปติกซ็อก ซึ่งของไหลจะยังไม่มีการผสมกันแต่เนื่องจากของปฐมภูมิและของไหลทุติยภูมิมีความเร็วในการไหลที่แตกต่างกันค่อนข้างมากทำให้เกิดการเหนี่ยวนำ (Shear stress layer) ทำให้ของไหลทุติยภูมิถูกเร่งให้มีความเร็วเป็นความเร็วเสียงหรือมีเลขมัคเท่ากับ 1 โดยของไหลทุติยภูมิจะไหลเข้ามาผสมผ่านส่วนที่เรียกว่า effective area โดยที่จะเกิดการผสมกันไม่มากนักกว่าของไหลทุติยภูมิจะผสมกันอย่างเต็มที่เมื่อมีความเร็วเท่ากับความเร็วเสียงและการไหลจะเป็นแบบ choked flow effective area โดยที่ในระหว่างกระบวนการผสมโมเมนตัมของของไหลปฐมภูมิจะมีการถ่ายเทไปยังของไหลทุติยภูมิ ทำให้ของไหลทุติยภูมิจะถูกเร่งให้มีความเร็วสูงขึ้น ส่วนของไหลปฐมภูมิจะค่อยหน่วง

เนื่องจากถ่ายเทโมเมนตัม จนเมื่อของผสมไหลผ่านคอคอดของอีเจ็คเตอร์ความดันจะมีค่าที่สูงขึ้นทำให้เกิดคลื่นกระแทก ครั้งที่ 2 และทำให้ความเร็วจากที่เคยเป็นความเร็วเหนือเสียงลดลงจนมีความเร็วต่ำกว่าเสียงและความเร็วจะลดลงเพื่อเปลี่ยนไปเป็นความดันสถิตเพื่อเข้าสู่เครื่องควบแน่นต่อไป ซึ่งการไหลจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง นั่นคือ 1.การไหลแบบ choked flow ซึ่งจะเป็นช่วงการไหลที่มีความดันที่ทางออกของอีเจ็คเตอร์มีค่าน้อยกว่าความดันวิกฤติของเครื่องควบแน่น ซึ่งจะทำให้มีการเหนี่ยวนำของไหลทุติยภูมิซึ่งจะได้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำคงที่ 2.การไหลในช่วงของ unchoked flow ซึ่งเป็นช่วงการไหลที่ความดันที่ทางออกของอีเจ็คเตอร์มากกว่าความดันวิกฤติแต่น้อยกว่าความดันวิกฤติซึ่งจะเป็นช่วงที่มีการเหนี่ยวนำลดลงทำให้ช่วงนี้จะมีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำลดลง 3.การไหลในช่วง reverse flow จะเป็นการไหลในช่วงที่ความดันที่ทางออกของอีเจ็คเตอร์มากกว่าความดันวิกฤติทำให้ช่วงนี้จะไม่มีการเหนี่ยวนำของไหลทุติยภูมิ ทำให้มีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำมีค่าเป็น 0 ซึ่งเรื่องนี้จะมีการอธิบายในบทที่ 2

3.1.1 คลื่นขยายตัว (Expanded-wave)

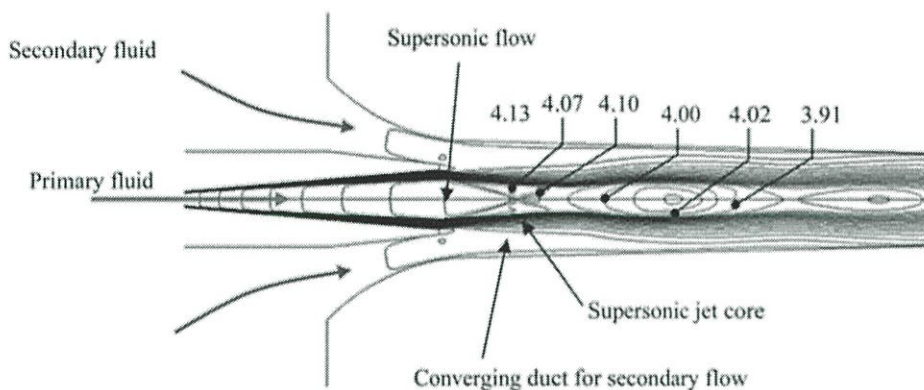
คลื่นขยายตัวจะมีด้วยกัน 2 ลักษณะ คือ

1. under-expanded wave กรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อความดันที่ทางออกของหัวฉีดหลักมากกว่าความดันที่ห้องผสม ทำให้ลักษณะการไหลมีความเร็วมากกว่าความเร็วเสียง ซึ่งความรุนแรงจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความดันที่ทางออกของหัวฉีดหลักกับความดันที่ห้องผสม ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะการไหลภายในอีเจ็คเตอร์แบบ under expanded wave [1]

2. over-expanded wave กรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อความดันที่ทางออกของหัวฉีดหลักน้อยกว่าความดันที่ห้องผสม แต่ว่าความเร็วในการไหลจะไม่สูงเท่ากับ under expanded-wave ทำให้มีการสูญเสียจากการไหลน้อยกว่าแบบ under expanded-wave



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะการไหลภายในอีเจ็คเตอร์แบบ over expanded wave [1]

โดยที่ในการศึกษาของโครงการนี้จะเป็นการศึกษาโดยใช้ CFD (computational fluid dynamics) ซึ่งจะทำกรอธิบาย CFD ดังนี้

3.2 CFD (Computational Fluid Dynamics)

CFD เป็นกระบวนการเชิงตัวเลขและเป็นขั้นตอนวิธี ซึ่งเป็นสาขาหนึ่งในวิชาพลศาสตร์ของไหล ซึ่งจะใช้คอมพิวเตอร์มาใช้ในการคำนวณซ้ำเพื่อสร้างแบบจำลองโดยเป็นการตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขต โดยจะสร้างเมช (mesh) หรือเซลล์ (cell) และทำการคำนวณเป็นแบบระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (finite volume) ประโยชน์ของการใช้ CFD ในการวิเคราะห์คือจะช่วยลดค่าใช้จ่ายและประหยัดเวลาในการออกแบบ ปรับปรุง พัฒนาและยังสามารถทำให้เห็นภาพทิศทางการไหลและยังสามารถใช้ได้กับการไหลทั้งที่เป็นแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน ซึ่งการไหลในอีเจ็คเตอร์ที่โครงการนี้ทำการศึกษามีลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนโดยที่มีการไหลของของไหลในลักษณะไปด้วยกันทำให้

การเลือกใช้โมเดลในการคำนวณผ่าน CFD ก็มีส่วนสำคัญซึ่งในโครงการนี้จะใช้โมเดลในลักษณะ SST K-Omega ซึ่งเป็นโมเดลที่เหมาะสมกับการไหลแบบปั่นป่วนแบบที่มีการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลลักษณะของ shear flow และยังสามารถวิเคราะห์การไหลแบบอื่นๆได้อีกด้วย

ซึ่งโปรแกรม CFD ที่ใช้ทำการศึกษาในโครงการนี้คือโปรแกรม Ansys เพื่อวิเคราะห์ผลให้เข้าใจมากยิ่งขึ้นจึงทำการวิเคราะห์สมการพื้นฐานของการไหล ดังที่จะกล่าวต่อไป

3.3 กฎการอนุรักษ์การเคลื่อนที่ของของไหล

3.3.1 สมการควบคุมการไหล

สมการควบคุมการไหลของของไหลใช้การตั้งสมมติฐานได้ ดังนี้

- มวลของไหลไม่มีการสูญหาย
 - อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหลซึ่งเป็นไปตามกฎของนิวตันข้อที่สอง
 - อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานเท่ากับผลรวมของอัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อนกับอัตราของงานที่กระทำในอนุภาคของไหล (กฎข้อหนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์)
- พิจารณาของไหลให้เป็นของไหลที่อัดตัวได้โดยสนใจตัวแปรดังต่อไปนี้

3.3.1.1 การอนุรักษ์มวลในปัญหา 3 มิติ

การหาสมการอนุรักษ์มวลคือการพิจารณาถึงสมดุลมวลของชิ้นส่วนของไหล ดังนี้

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในชิ้นส่วนของไหล = อัตราการไหลสุทธิของมวลที่เข้าไปในชิ้นส่วนของไหล

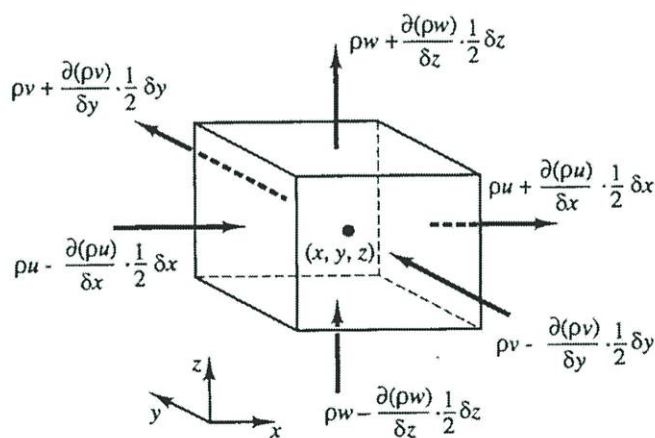
อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในชิ้นส่วนย่อยของของไหล คือ

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \delta x \delta y \delta z) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta x \delta y \delta z \quad (3.1)$$

โดยจากรูปที่ 3.4 จะได้ว่า การไหลสุทธิของมวลเข้าสู่ชิ้นส่วนย่อยผ่านพื้นผิวสามารถเขียนได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 & \left(\rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x\right) \delta y \delta z - \left(\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x\right) \delta y \delta z \\
 & \left(\rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y\right) \delta x \delta z - \left(\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y\right) \delta x \delta z \\
 & \left(\rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z\right) \delta x \delta y - \left(\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z\right) \delta x \delta y
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

โดยการไหลเข้าสู่ชิ้นส่วนมวลกำหนดให้เป็นค่าบวก และมีค่าเป็นลบเมื่อมีการไหลออกจากชิ้นส่วนมวล



รูปที่ 3.4 การไหลของมวลเข้าและออกชิ้นส่วนของไหล

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลภายในชิ้นส่วนย่อยนั้น เท่ากับอัตราของมวลสุทธิจากการไหลออกผ่านพื้นผิวของชิ้นส่วนย่อย ซึ่งเมื่อทำการแก้สมการและจัดรูป จะได้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.3)$$

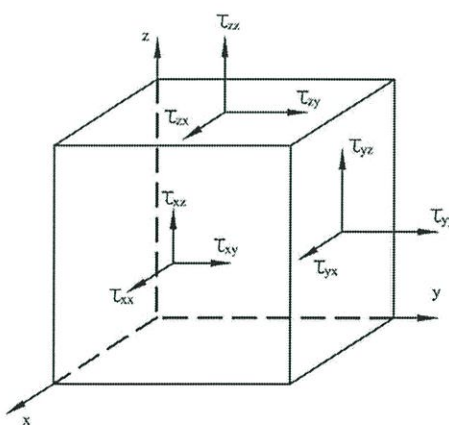
หรือในรูปเวกเตอร์ จะได้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (3.4)$$

3.3.1.2 สมการโมเมนตัมแบบ 3 มิติ

จากกฎข้อที่สองของนิวตันจะได้ว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมของอนุภาคของไหล เท่ากับผลรวมของแรงภายนอกที่กระทำต่ออนุภาค”

อัตราการเพิ่มโมเมนตัมของอนุภาคการไหล = ผลรวมแรงภายนอกที่กระทำต่ออนุภาคของไหล



รูปที่ 3.5 องค์ประกอบของความเค้นบนผิวหน้าทั้งสามทิศทางของชิ้นส่วนของไหล

จะได้

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \Delta(\rho w \vec{V}) = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{-\partial p + \partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (3.5.1)$$

ในการทำงานเดียวกันโมเมนตัมในทิศทาง y และ z จะเขียนได้ว่า

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \Delta(\rho v \vec{V}) = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{-\partial p + \partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (3.5.2)$$

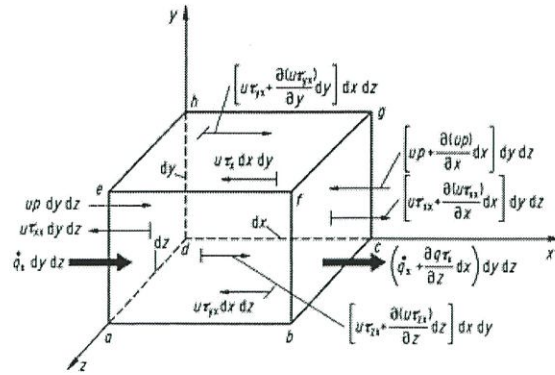
$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \Delta(\rho w \vec{V}) = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{-\partial p + \partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (3.5.3)$$

3.3.1.3 สมการพลังงานในระบบ 3 มิติ

สมการพลังงานถูกหาได้จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ ที่กล่าวไว้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานของอนุภาคของไหล เท่ากับอัตราการเพิ่มของความร้อนของอนุภาคบวกกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของงานของอนุภาคการไหล โดยใช้รูปที่ 3.6 ในการพิจารณาชิ้นส่วนย่อย

ซึ่งจะได้ตั้งสมการ

$$\begin{aligned} \frac{D(\rho E)}{Dt} = & -\text{div}(\rho u) + \left[\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \right. \\ & \left. \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \right] + \text{div}(k\text{grad}T) \end{aligned} \quad (3.6)$$



รูปที่ 3.6 องค์ประกอบของพลังงานบนผิวหน้าทั้งสามทิศทางของชิ้นส่วนของไหล

3.4 สมการนาเวียร์-สโตกส์ สำหรับการไหลแบบนิวโทเนียน

สมการควบคุมที่ประกอบด้วยตัวแปรที่ไม่ทราบค่า โดยประยุกต์ใช้กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันซึ่งจะนำไปวิเคราะห์ในเทอมความเค้น นั่นคือการรวมของเทอมความหนืดและเทอมของความดัน ซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$\frac{D(\rho u)}{Dt} = \frac{\partial p}{\partial x} \text{div}(\mu \text{grad} u) \quad (3.7.1)$$

$$\frac{D(\rho v)}{Dt} = \frac{\partial p}{\partial y} \text{div}(\mu \text{grad} u) \quad (3.7.2)$$

$$\frac{D(\rho w)}{Dt} = \frac{\partial p}{\partial z} \text{div}(\mu \text{grad} u) \quad (3.7.3)$$

และในบทถัดไปจะเป็นวิธีการดำเนินการและแบบจำลองที่ทางโครงการนี้เลือกที่จะศึกษา

บทที่ 4

วิธีการดำเนินการและแบบจำลอง

ในบทนี้จะพูดถึงวิธีการดำเนินการของโครงการและแบบจำลองของโครงการนี้โดยจะทำกาเก็บค่าของอัตราส่วนการเหนียวนำและค่าความดันวิกฤติที่เครื่องควบแน่นจากอีเจ็คเตอร์ของชุดการทดลองซึ่งในโครงการนี้จะพิจารณาอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 130, 140 และ 150 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของเครื่องระเหยจะถูกกำหนดไว้ที่ 7.5 องศาเซลเซียส โดยที่จะมีวิธีการดำเนินการและแบบจำลองดังนี้

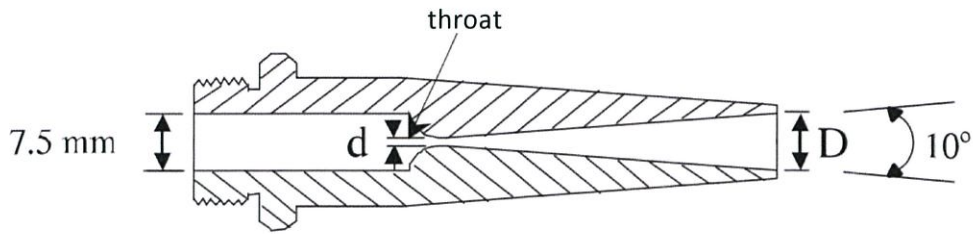
4.1 ศึกษาแบบจำลองลักษณะหัวฉีดหลักในอีเจ็คเตอร์

ศึกษาหัวฉีดหลัก โดยพิจารณาจากหัวฉีดหลักที่มีอยู่ในชุดการทดลองโดยเลือกหัวฉีดหลักที่มีค่าการวัดผลหลายค่าเพื่อสามารถเปรียบเทียบได้ในหลายเงื่อนไข โดยลักษณะของหัวฉีดหลักจะเป็นไปตามรูปที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของหัวฉีดหลัก[1]

Nozzle code	d(mm)	(D:d) ²	Calculate exit Mach number	Ejector's area ratio
d1.7M4	1.7	20:1	4	124:1

Ejector area ratio หมายถึง อัตราส่วนกำลังสองระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางคอขวดของอีเจ็คเตอร์และเส้นผ่านศูนย์กลางคอขวดของหัวฉีดหลัก



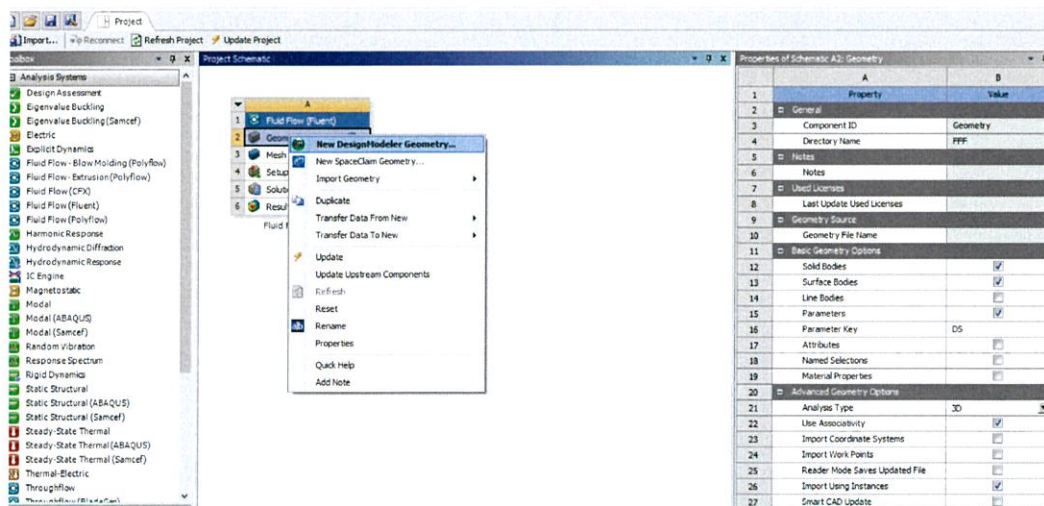
รูปที่ 4.1 ลักษณะของหัวฉีดหลัก[1]

โดยจะทำการเลือกหลักฉีดหลัก d1.7M4 ในการทำแบบจำลองและจะทำการเปรียบเทียบกับค่าตามชุดการทดลอง

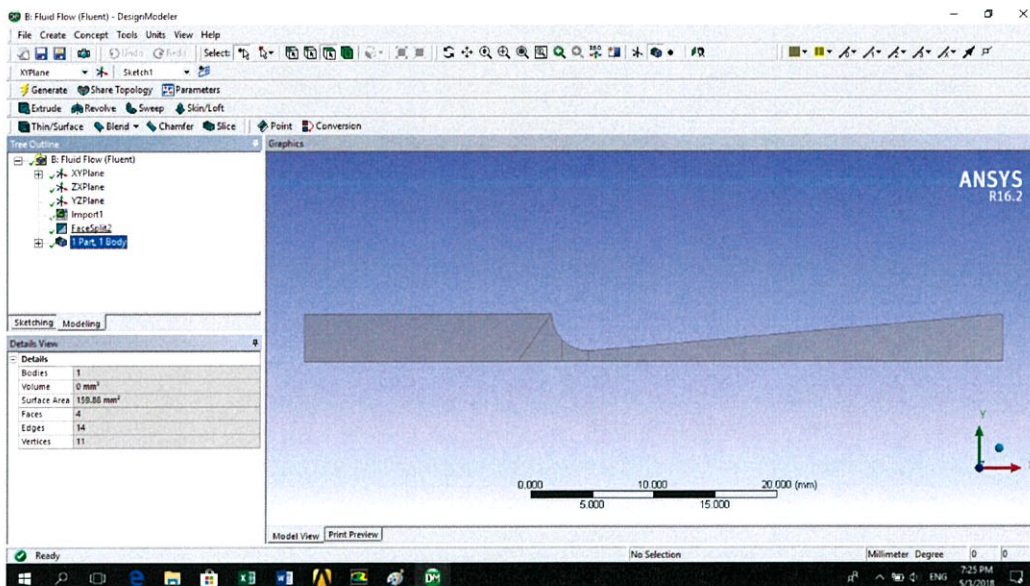
4.2 วิธีการสร้างแบบจำลองและการตั้งค่าหัวฉีดหลักในอีเจ็คเตอร์ในโปรแกรม ANSYS

ทำการสร้างแบบจำลองของหัวฉีดหลัก ตามขนาดดังรูป 4.1 ในโปรแกรมและทำการตั้งค่าต่างๆ ซึ่งจะแสดงรูปที่ 4.2 และ 4.3

1. พิจารณาแบบของหัวฉีดหลักและทำการวาดแบบใน DesignModeler ในโปรแกรม Ansys



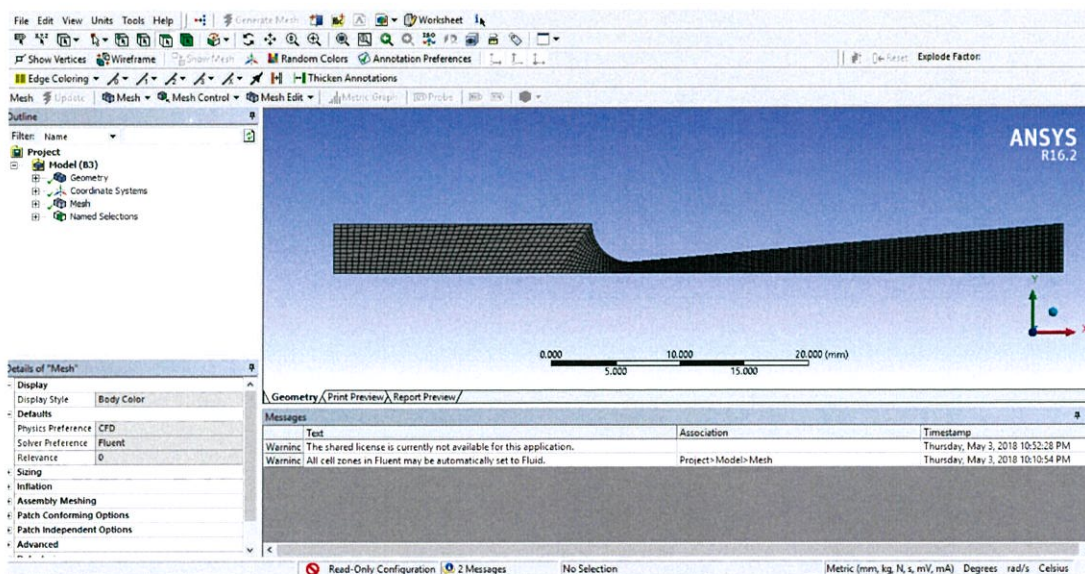
รูปที่ 4.2 แสดงการเข้าDesignModelerเพื่อวาดแบบ



รูปที่ 4.3 ภาพแสดงลักษณะของหัวฉีดหลัก

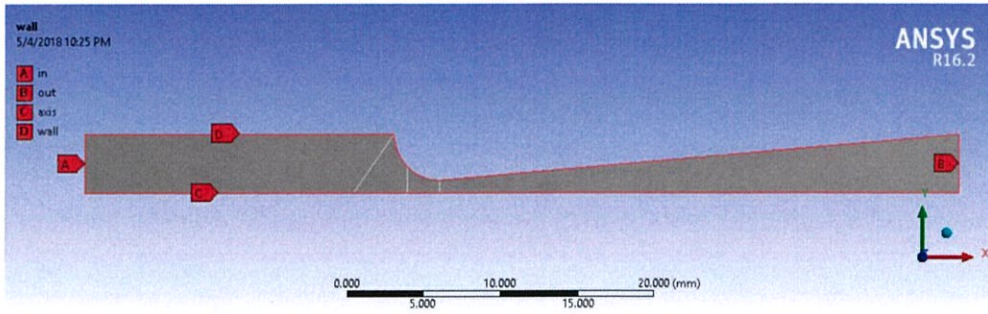
เมื่อทำการสร้างแบบจำลองของหัวฉีดหลักเรียบร้อยแล้ว ต่อไปจะเป็นการแบ่งรูปหัวฉีดหลักให้เป็นพื้นที่เล็กๆ ซึ่งเรียกว่าเมช เพื่อใช้ในโปรแกรมคำนวณต่อไป

2. สร้างเมชโดยจะสร้างให้เมชตั้งฉากกับทิศทางการไหลของของไหลและใช้เมชแบบตารางเนื่องจากการศึกษาการวาดแบบเป็นพื้นที่ปิดแบบมีเหลี่ยมและการคำนวณเป็นแบบ 2 มิติ ซึ่งการใช้เมชแบบตารางสี่เหลี่ยมจะเหมาะสมกับลักษณะงานนี้ ซึ่งจะแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงเมชที่ใช้ในการทำแบบจำลองซึ่งจะใช้ 2000 เมช

3. ตั้งค่าขอบเขตต่างๆที่ทำการศึกษา สำหรับหัวฉีดหลักจะมีการตั้งขอบเขตดังรูปที่ 4.5 และในการตั้งค่าเงื่อนไขในโปรแกรมจะใช้ตามตารางที่ 4.2



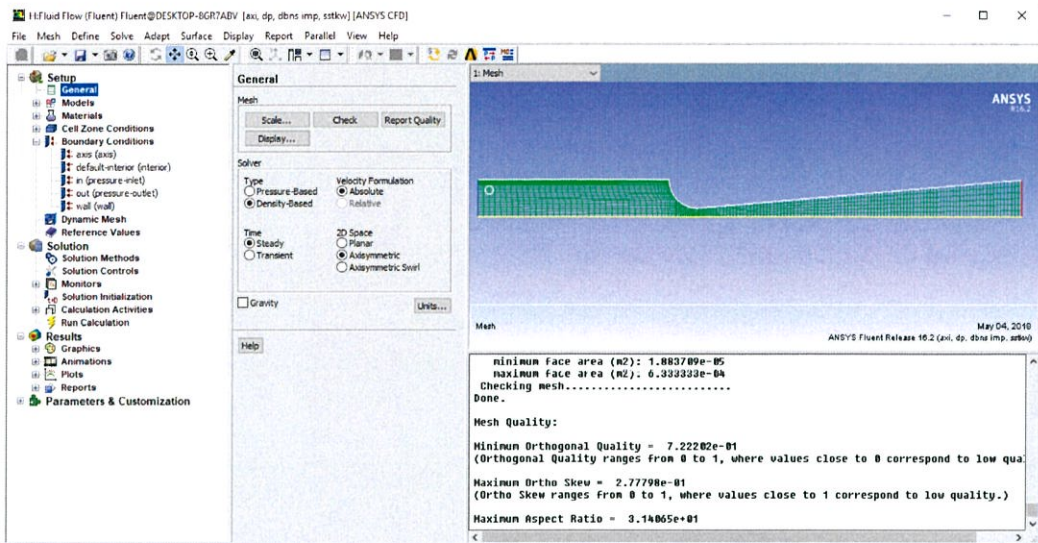
รูปที่ 4.5 แสดงขอบเขตในการตั้งค่า

ตารางที่ 4.2 แสดงการตั้งค่าขอบเขต

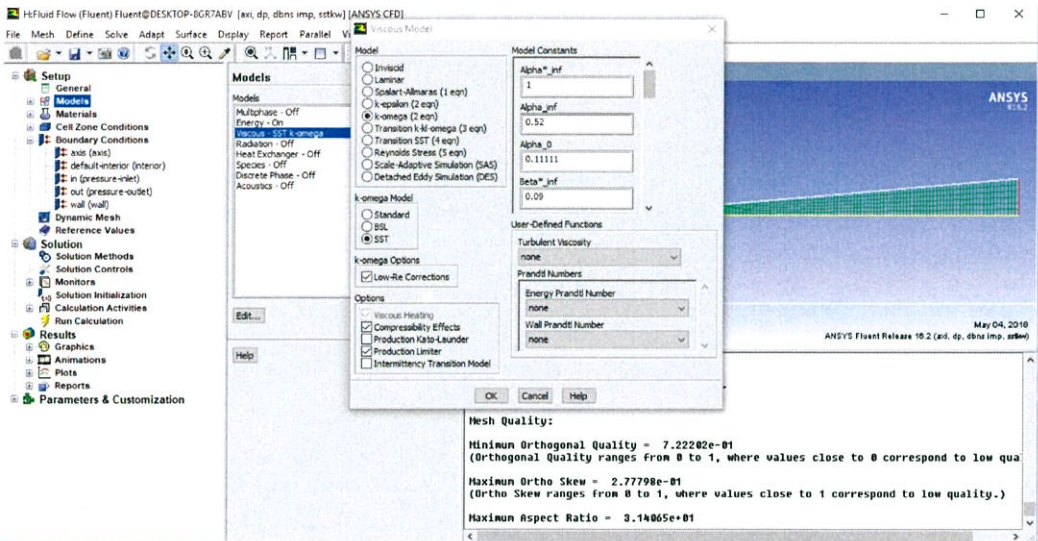
Boundaries	Type
inlet	Pressure-inlet
out	Pressure-outlet
axis	Axis
wall	no slip wall

ตารางที่ 4.2 แสดงการตั้งค่าของเขตเนื่องจากในชุดการทดลองสามารถตั้งค่าอุณหภูมิที่เครื่องกำเนิดไอ ทำให้การตั้งค่าบริเวณทางเข้าจึงใช้การตั้งค่าเป็น Pressure-inlet และจากสมมติฐานจึงตั้งผนังเป็นแบบ no slip wall และเป็น adiabatic

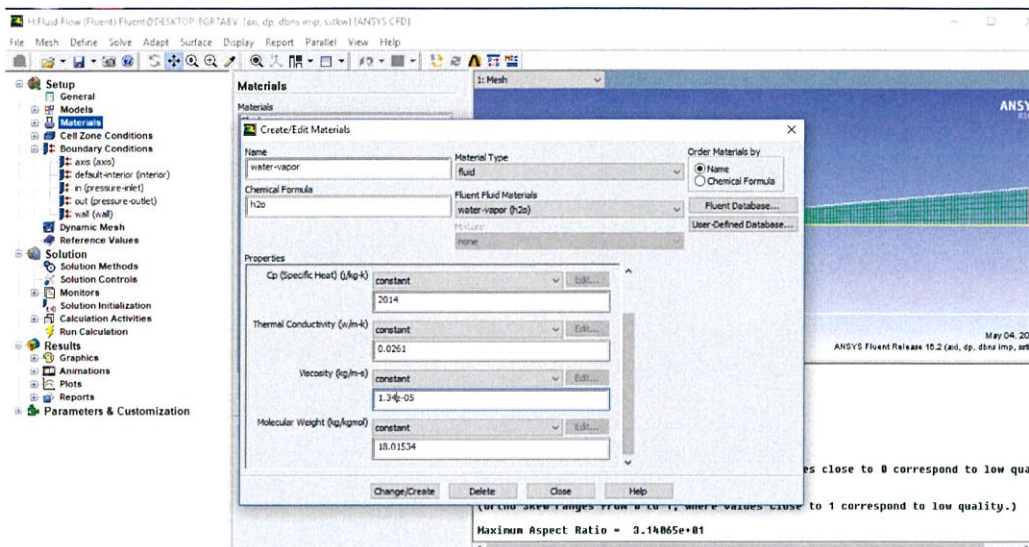
4. ตั้งค่าวิธีการและอื่นๆในโปรแกรมโดยในการสร้างแบบจำลองนี้จะใช้วิธีคิดแบบ Density-based 2D Axisymmetric โดยใช้โมเดล K- Ω -SST ในการคำนวณ ซึ่งจะแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7 โดยที่การตั้งค่าของไหลในท่อจะเป็นไปตามรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.7 แสดงการตั้งค่าวิธีการคำนวณในโปรแกรม



รูปที่ 4.8 แสดงการตั้งค่าวิธีการคำนวณในโปรแกรม <ต่อ>



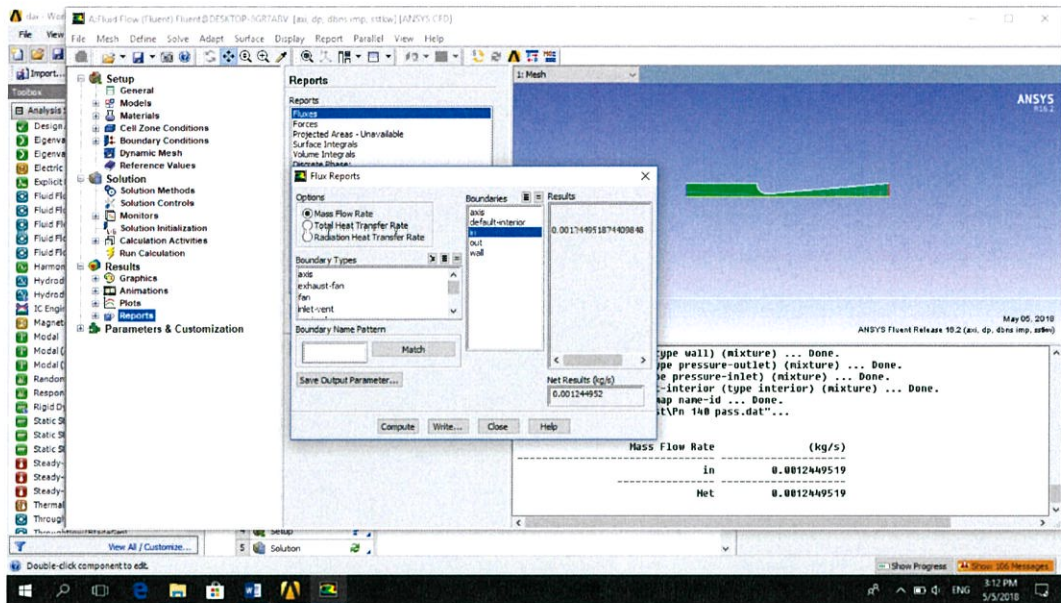
รูปที่ 4.9 แสดงการตั้งค่าสารทำงานในระบบดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.3 แสดงคุณสมบัติของสารทำความเย็นในระบบ

Properties	Value
Density	Ideal-gas
Specific heat (J/kg-K)	2014
Thermal conductivity (W/m-K)	0.0261
Viscosity (kg/m-s)	1.34×10^{-5}
Molecular Weight (kg/kmol)	18.01534

ในการกำหนดคุณสมบัติของของไหลภายในตามตารางที่ 4.3 โครงการนี้จะเลือกของไหลภายในเป็นไอน้ำ(steam) และตั้งค่าเป็นอุดมคติเพื่อพิจารณาให้สอดคล้องกับสมมติฐานที่ได้กล่าวมาข้างต้น

5. เก็บผลที่ได้จากโปรแกรมโดยจะเก็บเป็นค่าอัตราการไหลเชิงมวลซึ่งจะเป็นไปตามรูปที่ 4.9

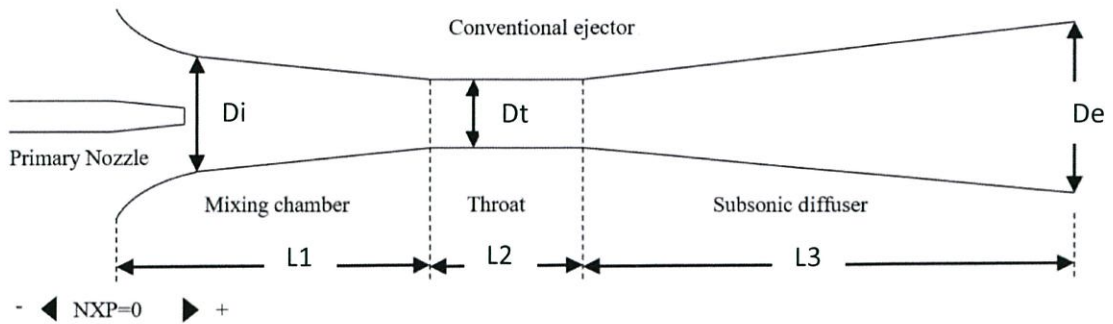


รูปที่ 4.9 แสดงค่า mass flow rate จากโปรแกรม

โดยที่จะเก็บผลที่ได้จากโปรแกรมคำนวณเพื่อนำไปใช้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากชุดการทดลองซึ่งจะแสดงผลในบทถัดไป

4.3 ศึกษาแบบจำลองลักษณะอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่

ในการศึกษาแบบจำลองของลักษณะอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่ที่จะทำการศึกษาและอ้างอิงจากชุดการทดลองที่มีอยู่ซึ่งจะมีลักษณะและขนาดของอีเจ็คเตอร์ดังรูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.10 แสดงองค์ประกอบของอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่[8]

ตารางที่ 4.4 แสดงขนาดของอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่[8]

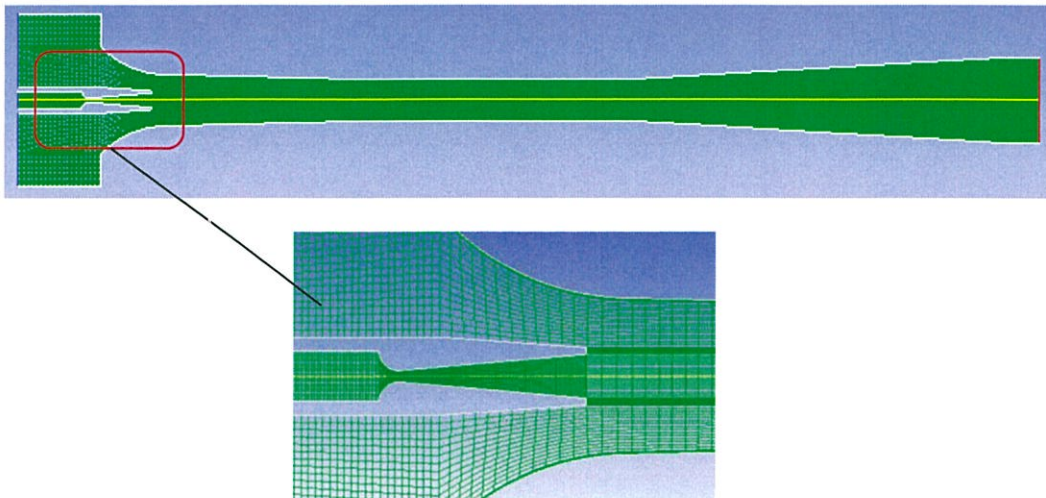
Ejector	Di(mm)	Dt(mm)	De(mm)	L1(mm)	L2(mm)	L3(mm)
Conventional	24	19	40	130	114	180

เมื่อศึกษาอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่ตามชุดการทดลองเรียบร้อยแล้ว จะนำเอาขนาดและลักษณะของอีเจ็คเตอร์มาวาดแบบและคำนวณในโปรแกรมต่อไป

4.4 แบบจำลองและวิธีการตั้งค่าอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่ในโปรแกรม ANSYS

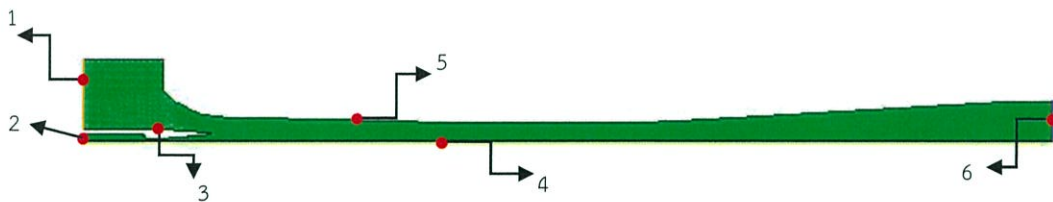
ทำการขึ้นรูปอีเจ็คเตอร์ตามรูปที่ 4.10 โดยใช้ขนาดของอีเจ็คเตอร์ตามตารางที่ 4.4 ซึ่งจะมีการทำแบบจำลองดังนี้

1. สร้างแบบจำลองตั้งที่กล่าวมาข้างต้นและทำการเขียนเมชเพื่อใช้ในการคำนวณ และทำการขึ้นเมชแบบตาราง ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงลักษณะแบบจำลองและลักษณะเมชแบบตารางขนาด 40000 เมช

2. ตั้งค่าขอบเขตที่ทำการศึกษาโดยจะตั้งค่าตามลักษณะในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แสดงการตั้งค่าขอบเขต

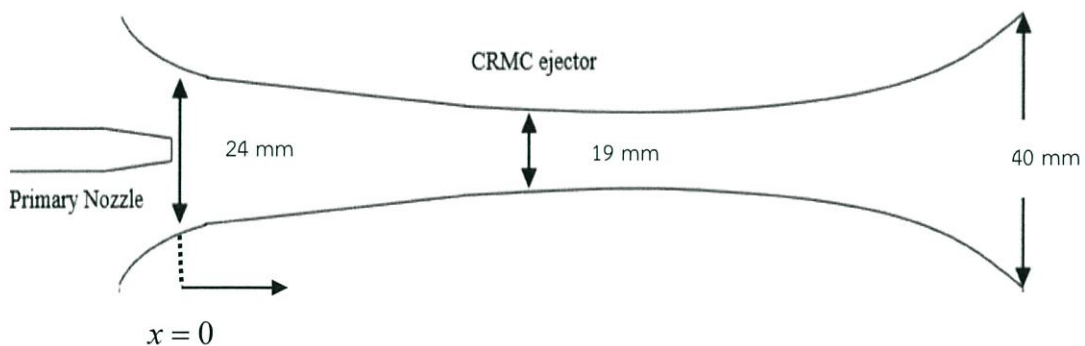
ตารางที่ 4.5 แสดงการตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตของอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่

Boundaries	Type
1.inlet-secondary fluid	pressure-inlet
2.inlet-primary fluid	pressure-inlet
3.wall nozzle	Wall
4.axis	Axis
5.wall ejector	Wall
6.outlet	pressure-outlet

ซึ่งการตั้งค่าดังตารางที่ 4.5 จะเป็นการตั้งค่าขอบเขตโดยที่อีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่ จะมีทางเข้าของของไหล 2 ทาง ซึ่งจะกำหนดว่าทางเข้าที่ 1 เป็นทางเข้าของของไหลทุติยภูมิหรือของไหลที่มาจากเครื่องระเหยซึ่งในการศึกษาของโครงการนี้จะกำหนดที่ 7.5 องศาเซลเซียส ทางเข้าที่ 2 เป็นทางเข้าของของไหลปฐมภูมิหรือของไหลที่มาจากเครื่องกำเนิดไอซึ่งในการศึกษาของโครงการนี้จะกำหนดไว้ 3 ค่า คือ 130, 140 และ 150 องศาเซลเซียส ในการหาค่า ในส่วนของผนังจะตั้งค่าให้เป็น adiabatic เพื่อให้สอดคล้องกับสมมติฐาน และผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงในบทถัดไปพร้อมทั้งการเปรียบเทียบค่ากับชุดการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบค่าเรียบร้อยแล้วต่อไปจะเป็นการพิจารณาอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่

4.5 แบบจำลองและวิธีการตั้งค่าอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่ในโปรแกรม ANSYS

จากการศึกษาข้อมูลของอีเจ็คเตอร์ในรูปแบบต่างๆจึงได้ทำการออกแบบอีเจ็คเตอร์อีกรูปแบบหนึ่งซึ่งเป็นอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่ซึ่งจะเป็นการปรับความโค้งของอีเจ็คเตอร์ให้มีความราบเรียบเป็นลักษณะส่วนโค้งที่มากขึ้นเพื่อลดมุมปะทะของของไหลกับอีเจ็คเตอร์เพื่อพิจารณาว่าอีเจ็คเตอร์ชนิดนี้มีความสามารถในการใช้งานโดยออกแบบจากลักษณะขนาดจากอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันแบบความดันคงที่ ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะของอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่

ซึ่งในการออกแบบอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่จะมีวิธีการคำนวณซึ่งเป็นสมการที่อ้างอิงมาจากกฎ W.Eames [4] ซึ่งมีลักษณะสมการดังต่อไปนี้

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

และการตั้งสมมติฐานเป็นไป ดังนี้

1. ของไหลปฐมภูมิและของไหลทุติยภูมิเป็นของไหลชนิดเดียวกัน
2. ของไหลเป็นของไหลอัดมคต
3. ไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับผนังของอีเจ็คเตอร์
4. ในการรวมกันของของไหลปฐมภูมิและของไหลทุติยภูมิจะเป็นแบบอัดที่บริเวณห้องผสม
ทำให้รู้ถึงความเร็วแม็คที่จุดผสม

ซึ่งเมื่อใช้สมมติฐานนี้จะทำให้การเปลี่ยนแปลงของระยะเส้นผ่านศูนย์กลางในส่วนของดิฟฟิวเซอร์ เป็นดังนี้

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

โดยที่ v_{DE} จะเป็นความเร็วของของไหลผสมที่บริเวณทางออกของดิฟฟิวเซอร์ ทำให้ได้มาเป็น

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

โดยที่ L_d คือระยะความยาวของอีเจ็คเตอร์นับจากตำแหน่ง NXP ซึ่งจะแสดงในรูปที่ 4.14 และในการออกแบบควรจะทำให้ความเร็วที่ทางออกของดีฟิวเซอร์มีค่าน้อยเพื่อลดในเรื่องของความดันตกภายในอีเจ็คเตอร์ ซึ่งจะได้เป็นสมการ

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

และจากสมการอนุรักษ์พลังงานจะได้สมการของอุณหภูมิ ดังนี้

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

จะได้ความดันสถิตที่ทางเข้าของดีฟิวเซอร์เป็นไปตามสมการ

$$T_1 = T_{o,1} - \frac{v_1^2}{2C_p} \quad (4.5)$$

ถ้าให้ความดันสถิตมีค่าคงที่จะได้สมการในการหาความดันรวมที่ทางเข้าดีฟิวเซอร์เป็น

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

ถ้าของไหลทุติยภูมิเป็นของไหลแบบอัดตัวไม่ได้ ในพื้นที่ผสมของของไหลจะมีความดันสถิตที่ทางออกของหัวฉีดหลักเป็น

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

ซึ่งในการหาเส้นผ่านศูนย์กลางของอีเจ็คเตอร์ที่ตำแหน่งต่างๆ สามารถหาความดันสถิตและอุณหภูมิได้ตามสมการ

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

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

จากการไหลเป็นแบบต่อเนื่องจะได้เส้นผ่านศูนย์กลางของอีเจ็คเตอร์ที่ตำแหน่งใดๆเป็น

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

และเมื่อพิจารณาจากสมการจะนำค่าที่ได้มาสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการเข้าโปรแกรมคำนวณต่อไป

กำหนดให้ $V_{NE} = 1049 \text{ m/s}$ และ $V_s = 58.2 \text{ m/s}$ ซึ่งค่าทั้ง 2 มาจากการศึกษาอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่ พร้อมทั้งกำหนดให้ $R_m = 0.487$

$$\text{จะได้ว่า } V_1 = \frac{1049 + (0.487 \times 58.2)}{1 + 0.487} = 724.508 \text{ m/s}$$

$$\text{จะได้ว่า } T_{0,1} = \frac{403 + (0.487 \times 280.5)}{1 + 0.487} = 362.88063K$$

กำหนดให้ $L_D = 400mm$ และ $V_{DE} = 0m/s$ แล้วนำค่าต่างๆไปคำนวณในสมการที่ (4.2), (4.8), (4.9) และ (4.10) ซึ่งคำนวณโดยโปรแกรม excel ซึ่งจะได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่

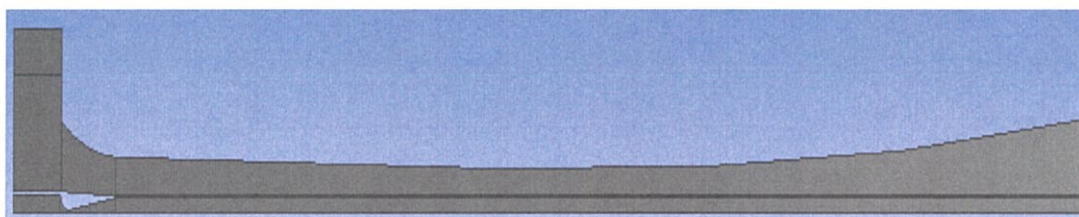
ความยาวตามแกน X(mm)	ความเร็ว (m/s)	อุณหภูมิ (K)	ความดัน (Pa)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (m)
0	724.508	232.565	468.000	0.0240
5	715.452	235.802	495.006	0.0236
10	706.395	238.999	522.810	0.0233
15	697.339	242.155	551.397	0.0230
20	688.283	245.271	580.756	0.0227
25	679.226	248.345	610.871	0.0224
30	670.170	251.379	641.726	0.0221
35	661.114	254.372	673.303	0.0219
40	652.057	257.325	705.584	0.0217
45	643.001	260.237	738.549	0.0214
50	633.945	263.108	772.176	0.0212
55	624.888	265.938	806.443	0.0210
60	615.832	268.728	841.326	0.0209
65	606.775	271.476	876.800	0.0207
70	597.719	274.184	912.840	0.0205
75	588.663	276.852	949.418	0.0204
80	579.606	279.479	986.506	0.0202
85	570.550	282.065	1024.076	0.0201
90	561.494	284.610	1062.096	0.0200

ความยาวตาม แกน X(mm)	ความเร็ว (m/s)	อุณหภูมิ (K)	ความดัน (Pa)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (m)
95	552.437	287.114	1100.538	0.0199
100	543.381	289.578	1139.368	0.0198
105	534.325	292.001	1178.555	0.0197
110	525.268	294.383	1218.065	0.0196
115	516.212	296.725	1257.864	0.0196
120	507.156	299.026	1297.917	0.0195
125	498.099	301.286	1338.191	0.0195
130	489.043	303.506	1378.648	0.0194
135	479.987	305.684	1419.252	0.0194
140	470.930	307.822	1459.968	0.0194
145	461.874	309.919	1500.757	0.0194
150	452.818	311.976	1541.582	0.0194
155	443.761	313.992	1582.405	0.0194
160	434.705	315.967	1623.189	0.0194
165	425.648	317.901	1663.895	0.0194
170	416.592	319.795	1704.484	0.0194
175	407.536	321.648	1744.918	0.0195
180	398.479	323.460	1785.158	0.0195
185	389.423	325.232	1825.167	0.0196
190	380.367	326.962	1864.904	0.0197
195	371.310	328.652	1904.333	0.0197
200	362.254	330.302	1943.413	0.0198
205	353.198	331.910	1982.108	0.0199
210	344.141	333.478	2020.380	0.0201
215	335.085	335.005	2058.190	0.0202
220	326.029	336.492	2095.501	0.0203
225	316.972	337.937	2132.277	0.0205
230	307.916	339.342	2168.481	0.0206

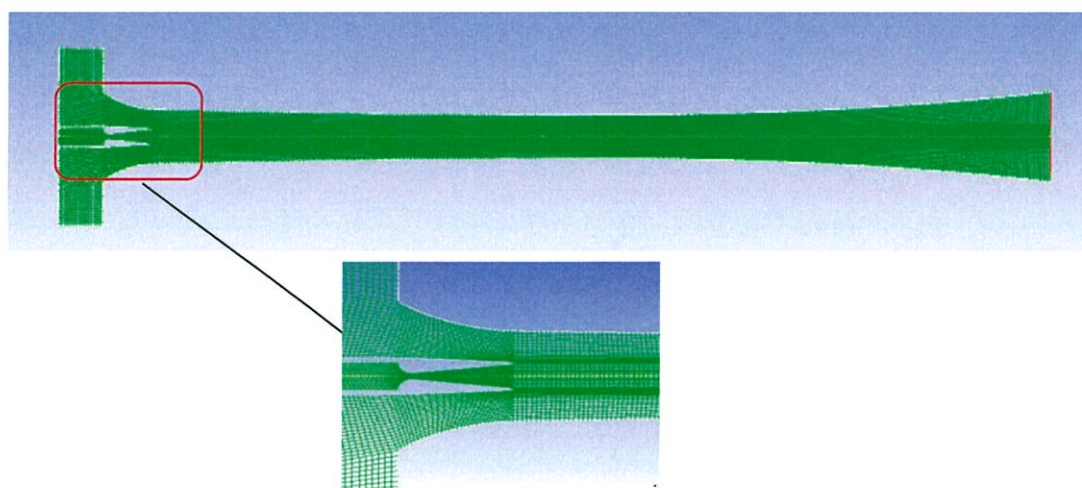
ความยาวตาม แกน X(mm)	ความเร็ว (m/s)	อุณหภูมิ (K)	ความดัน (Pa)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (m)
235	298.860	340.707	2204.077	0.0208
240	289.803	342.030	2239.030	0.0210
245	280.747	343.313	2273.304	0.0212
250	271.691	344.555	2306.865	0.0215
255	262.634	345.756	2339.680	0.0217
260	253.578	346.917	2371.715	0.0220
265	244.521	348.037	2402.939	0.0223
270	235.465	349.116	2433.319	0.0226
275	226.409	350.154	2462.825	0.0229
280	217.352	351.152	2491.428	0.0233
285	208.296	352.109	2519.097	0.0237
290	199.240	353.026	2545.806	0.0242
295	190.183	353.901	2571.526	0.0246
300	181.127	354.736	2596.232	0.0252
305	172.071	355.530	2619.898	0.0257
310	163.014	356.283	2642.500	0.0263
315	153.958	356.996	2664.016	0.0270
320	144.902	357.668	2684.423	0.0278
325	135.845	358.299	2703.700	0.0286
330	126.789	358.890	2721.828	0.0295
335	117.733	359.439	2738.788	0.0306
340	108.676	359.949	2754.562	0.0318
345	99.620	360.417	2769.135	0.0331
350	90.564	360.844	2782.491	0.0347
355	81.507	361.231	2794.617	0.0365
360	72.451	361.577	2805.501	0.0386
362.8	67.379	361.754	2811.048	0.0400

นำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอ็เจ็คเตอร์ที่ได้จากการคำนวณไปสร้างแบบจำลองในโปรแกรม Ansys ซึ่งจะมีวิธีการวาดแบบ , สร้างเมชและเก็บค่าประสิทธิภาพของอ็เจ็คเตอร์และค่าความดันวิกฤติ ดังต่อไปนี้

1. สร้างแบบจำลองและทำการวาดเมชโดยใช้เมชแบบตาราง จำนวน 40000 เมช ซึ่งการสร้างแบบจำลองจะแสดงในรูปที่ 4.14 และรูปร่างเมชของอ็เจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่จะแสดงในรูปที่ 4.15

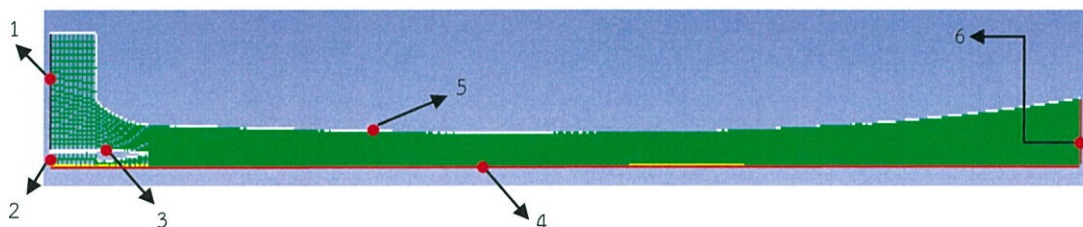


รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะการวาดอ็เจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่



รูปที่ 4.15 แสดงลักษณะเมชตาราง 40000 เมช

2. ตั้งค่าขอบเขตที่ทำการศึกษา ซึ่งการตั้งค่าจะเป็นไปตามตารางที่ 4.5 ซึ่งจะเป็นการตั้งค่าขอบเขต โดยที่อ็เจกเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่ จะมีทางเข้าของของไหล 2 ทาง ซึ่งจะกำหนดว่า ทางเข้าที่ 1 เป็นทางเข้าของของไหลทุติยภูมิหรือของไหลที่มาจากเครื่องระเหยซึ่งในการศึกษาของ โคร่งงานนี้จะกำหนดที่ 7.5 องศาเซลเซียส ทางเข้าที่ 2 เป็นทางเข้าของของไหลปฐมภูมิหรือของไหล ที่มาจากเครื่องกำเนิดไอซึ่งในการศึกษาของโคร่งงานนี้จะกำหนดไว้ 3 ค่า คือ 130,140 และ 150 องศาเซลเซียส ในส่วนของผนังจะตั้งค่าให้เป็น adiabatic เพื่อให้สอดคล้องกับสมมติฐาน และรูปที่ แสดงการตั้งค่าจะแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงการตั้งค่าขอบเขต

3. เก็บค่าของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำสารและทำซ้ำโดยใน 1 อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงความดันที่ เครื่องควบแน่นไปจนความดันที่เครื่องควบแน่นถึงความดันวิกฤติและความดันวิกฤติซึ่งในการทดลอง จะนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ต่อไป

บทที่ 5

ผลการจำลองและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองของวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของหัวฉีดหลัก, อีเจ็คเตอร์แบบการผสมที่ความดันคงที่และอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่ โดยจะทำการเปรียบเทียบระหว่างวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขและผลการทดลองจากชุดการทดลอง เพื่อพิจารณาว่าวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขมีความถูกต้องและเหมาะสมสำหรับในการใช้ศึกษาและพัฒนาอีเจ็คเตอร์ พร้อมทั้งทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่และอีเจ็คเตอร์แบบการผสมที่ความดันคงที่ พร้อมทั้งวิเคราะห์ถึงสาเหตุดังกล่าว

5.1 ผลการจำลองของหัวฉีดหลัก

ตารางที่ 5.1 แสดงผลที่ได้ของหัวฉีดหลักขนาด d1.4M4 จากวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอขอบเขต 3 ค่า

หัวฉีดหลัก			
อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ ($^{\circ}C$)	อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลปฐมภูมิจากชุดการทดลอง (kg/s)	อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลปฐมภูมิวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข(kg/s)	ค่าความคลาดเคลื่อน
130	0.000922	0.000960	4.121
140	0.001219	0.001284	5.332
150	0.001586	0.001652	4.161

จากตารางที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขมีค่าความคลาดเคลื่อนจากชุดการทดลองประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ สาเหตุที่วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขมีค่าอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลปฐมภูมิมากกว่าชุดการทดลองเนื่องจากในวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขสมมติให้เป็นกระบวนการหยุด

นึ่งแบบไอเซนโทรปิก ส่วนในชุดการทดลองการขยายตัวในหัวฉีดหลักจะมีแรงเสียดทานระหว่างของไหลและผนังของหัวฉีด ดังนั้นกระบวนการขยายตัวที่เกิดขึ้นจริงจะไม่ใช่แบบไอเซนโทรปิก

5.2 ผลการจำลองของอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่

ตารางที่ 5.2 แสดงผลที่ได้ของอีเจ็คเตอร์แบบการผสมที่ความดันคงที่จากวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเทียบกับชุดการทดลองที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอขอบเขต 3 ค่า และอุณหภูมิเครื่องเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียสและหัวฉีดหลักขนาด d1.7M4

อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ ($^{\circ}C$)	ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวจากชุดการทดลอง	ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำจากวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข	ค่าความคลาดเคลื่อน
130	0.422	0.446	5.687
140	0.287	0.326	13.589
150	0.188	0.223	18.617

จากตารางที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขมีค่าความคลาดเคลื่อนจากชุดการทดลองไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ซึ่งอยู่ขอบเขตที่สามารถยอมรับได้ ส่วนสาเหตุเมื่ออุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอสูงขึ้นแล้วค่าความคลาดเคลื่อนมีค่ามากเนื่องมาจากในชุดการทดลองจริงเมื่ออุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอมีค่าสูง จึงทำให้อุณหภูมิกายในอีเจ็คเตอร์สูงขึ้นซึ่งทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอีเจ็คเตอร์กับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ส่วนวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขสมมติให้ไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอีเจ็คเตอร์กับสิ่งแวดล้อม

5.3 ผลการจำลองของอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่

5.3.1 ผลการจำลองที่อุณหภูมิกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส

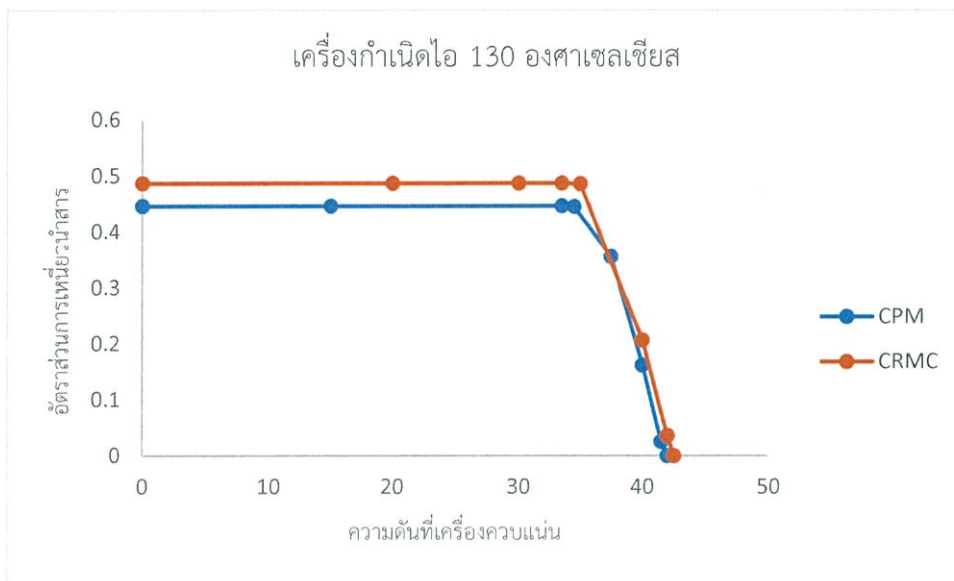
ตารางที่ 5.3 แสดงผลที่ได้จากวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของอีเจ็คเตอร์แบบการผสมที่ความดันคงที่ และอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่ ที่เงื่อนไขอุณหภูมิกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิกำเนิดไอ 7.5 องศาเซลเซียสและหัวฉีดหลักขนาด d1.7M4

ความดันที่ เครื่องควบแน่น (mbar)	อัตราส่วนการ เหนี่ยวนำสาร CPM	ความดันที่ เครื่องควบแน่น (mbar)	อัตราส่วนการ เหนี่ยวนำสาร CRMC
0	0.446	0	0.487
20	0.446	20	0.487
33.5	0.446	30	0.487
34.5	0.446	33.5	0.487
37.5	0.356	35	0.487
40	0.162	40	0.207
41.5	0.025	42	0.036
42	0	42.5	0

จากตารางที่ 5.3 แสดงให้เห็นว่าที่ความดันเครื่องควบแน่นเท่ากับอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่มีค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำสารที่มากกว่าอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่ และค่าความดันวิกฤติของอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่มีค่ามากกว่าอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่อยู่ที่ 0.5 mbar

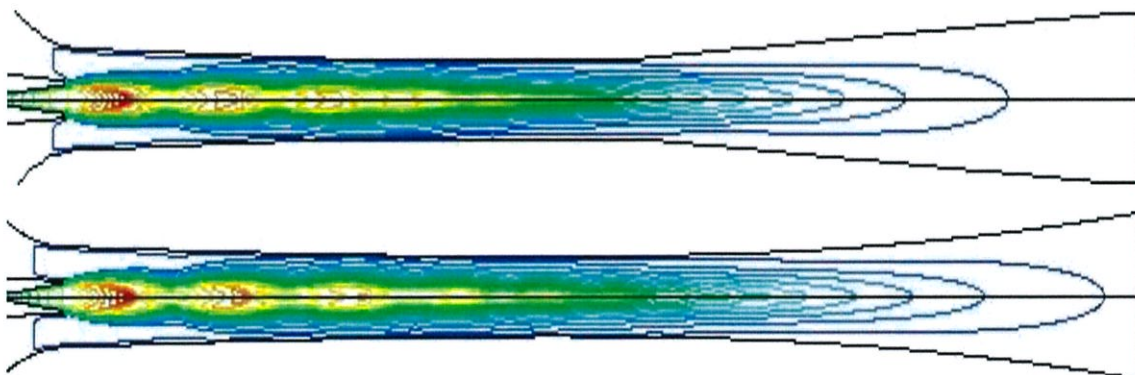
จากรูปที่ 5.1 แสดงให้เห็นว่าอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่มีค่าประสิทธิภาพดีกว่าอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่ ซึ่งในช่วงอัตราส่วนการเหนี่ยวนำสารคงที่อีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่มีค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำสารที่มากกว่าอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่อยู่ที่ 0.041 และสาเหตุที่ทำให้อีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่มี

ค่าความดันวิกฤติที่สูงกว่าอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่เนื่องจากโมเมนต์ตัมที่มากขึ้นในอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ตัมคงที่



รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำสารและความดันเครื่องควบแน่นของอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC และอีเจ็คเตอร์แบบ CPM ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเครื่องควบแน่น 7.5 องศาเซลเซียสและหัวฉีดหลักขนาด d1.7M4

5.3.2 วิเคราะห์ผลการจำลองที่อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.2 ปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่และอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ตัมคงที่ตามลำดับ ที่เงื่อนไขความดันเครื่องควบแน่น 30 mbar และอุณหภูมิเครื่องควบแน่น 7.5 องศาเซลเซียสและหัวฉีดหลักขนาด d1.7M4

จากรูปที่ 5.2 ปรากฏการณ์ที่เกิดภายในอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่และภายในอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ตัมคงที่มีลักษณะใกล้เคียงกันมาก แต่ในส่วนห้องผสมจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าคลื่นกระแทกที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่มีความรุนแรงมากกว่าที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ตัมคงที่ และอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ตัมคงที่มีค่าอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิมากกว่าอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่เนื่องมาจากความดันและอุณหภูมิในตำแหน่งห้องผสมของอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ตัมคงที่มีค่าต่ำ ซึ่งพิสูจน์ข้อสมมุติฐานนี้จากสมการที่ (5.1)

$$\dot{m}_s = \rho Av \quad (5.1)$$

\dot{m}_s คือ อัตราไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิ

ρ คือ ความหนาแน่นตรงทางเข้าห้องผสมของของไหลทุติยภูมิ

A คือ พื้นที่ตรงทางเข้าห้องผสมของของไหลทุติยภูมิ

v คือ ความเร็วตรงทางเข้าห้องผสมของของไหลทุติยภูมิ

$$v = \sqrt{2 \times C_p \times (T - T_s)} \quad (5.2)$$

T คือ อุณหภูมิของของไหลทุติยภูมิตรงทางเข้าห้องผสม

T_s คือ อุณหภูมิของของไหลทุติยภูมิตรงเครื่องระเหย

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (5.3)$$

P คือ ความดันตรงทางเข้าห้องผสมของของไหลทุติยภูมิ

$$\frac{P}{P_s} = \left(\frac{T}{T_s} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (5.4)$$

P_s คือ ความดันของของไหลทุติยภูมิตรงเครื่องระเหย

กำหนดให้ A และ R เป็นค่าคงที่พร้อมทั้งให้ค่า $k = 1.327$, สามารถคำนวณค่าอัตราไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิได้ตามนี้

อีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่

$$P = 0.7 \times P_s = 0.7 \times 1050.3 = 735 \text{ Pa}$$

$$T = 257 \text{ K}$$

$$v = \sqrt{2 \times 2014 \times (280.5 - 257)} = 308 \text{ m/s}$$

$$\dot{m}_s = \frac{735}{257R} \times A \times 308 = 881K \text{ kg/s}$$

อีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์คงที่

$$P = 438 \text{ Pa}$$

$$T = 230 \text{ K}$$

$$v = \sqrt{2 \times 2014 \times (280.5 - 230)} = 451 \text{ m/s}$$

$$\dot{m}_s = \frac{468}{230R} \times A \times 451 = 918K \text{ kg/s}$$

จากที่คำนวณจะเห็นได้ว่าอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์คงที่มีค่าอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิมากกว่าอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่ ซึ่งจะพิสูจน์ความถูกต้องที่คำนวณได้ดังนี้

นำค่าอัตราไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์คงที่หารด้วยอัตราไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่

$$\frac{918K}{881K} = 1.042$$

พร้อมทั้งนำค่าอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์คงที่และอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่ จากวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขมาหารกัน

$$\frac{0.0004652}{0.0004282} = 1.086$$

จะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์คงที่กับอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่ทั้งของวิธีการคำนวณและวิธีคำนวณเชิงตัวเลขมีค่าใกล้เคียงกัน

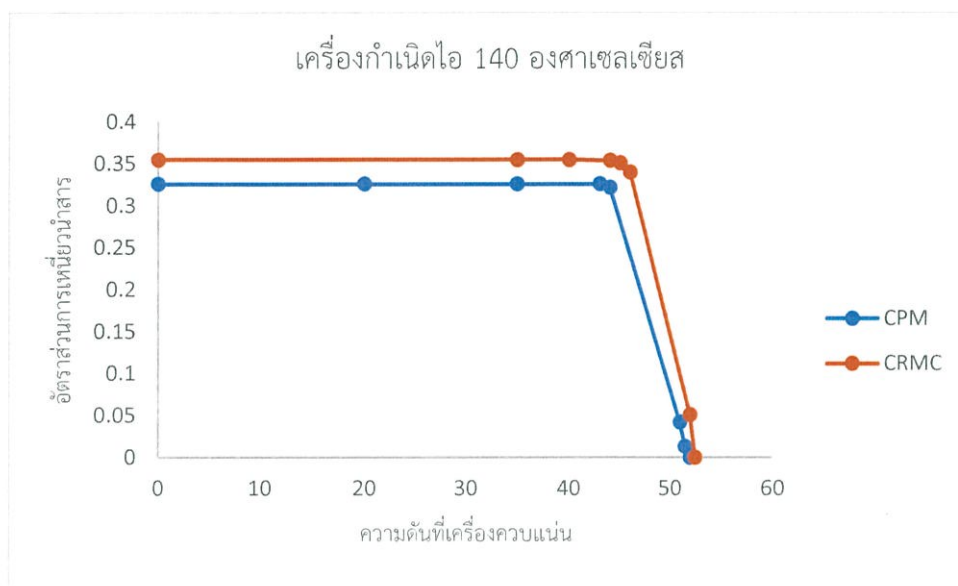
ดังนั้นสรุปได้ว่าสมมติฐานข้อที่ 2 เป็นจริง

5.3.3 ผลการจำลองที่อุณหภูมิกำเนิดไอ 140 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 5.4 แสดงผลที่ได้จากวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของอีเจ็คเตอร์แบบการผสมที่ความดันคงที่และอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์คงที่ ที่เงื่อนไขอุณหภูมิกำเนิดไอ 140 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิกำเนิดไอ 7.5 องศาเซลเซียสและหัวฉีดหลักขนาด d1.7M4

ความดันที่ เครื่องควบแน่น (mbar)	อัตราส่วนการ เหนี่ยวนำสาร CPM	ความดันที่ เครื่องควบแน่น (mbar)	อัตราส่วนการ เหนี่ยวนำสาร CRMC
0	0.326	0	0.355
20	0.326	35	0.355
35	0.326	40	0.355
43	0.326	44	0.354
44	0.322	45	0.351
51	0.042	46	0.340
51.5	0.013	52	0.051
52	0	52.5	0

จากตารางที่ 5.4 แสดงให้เห็นว่าที่ความดันเครื่องควบแน่นเท่ากันอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ตัมคงที่มีค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำสารที่มากกว่าอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่ และค่าความดันวิกฤติของอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ตัมคงที่มีค่ามากกว่าอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่อยู่ที่ 0.5 mbar

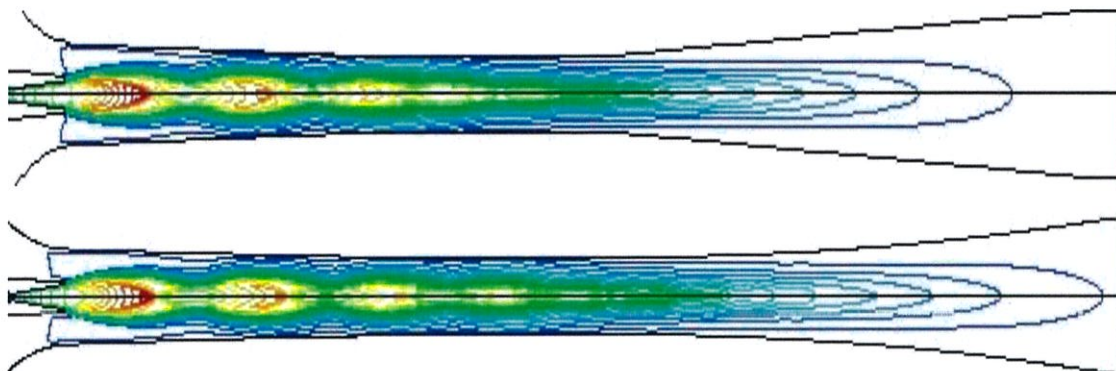


รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำสารและความดันเครื่องควบแน่นของอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC และอีเจ็คเตอร์แบบ CPM ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 140 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเครื่องเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียสและหัวฉีดหลักขนาด d1.7M4

จากรูปที่ 5.3 แสดงให้เห็นว่าอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ตัมคงที่มีค่าประสิทธิภาพดีกว่าอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่ ซึ่งในช่วงอัตราส่วนการเหนี่ยวนำสารคงที่อีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ตัมคงที่มีค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำสารที่มากกว่าอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่อยู่ที่ 0.029 และสาเหตุที่ทำให้อีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ตัมคงที่มีค่าความดันวิกฤติที่สูงกว่าอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่เนื่องจากโมเมนต์ตัมที่มากขึ้นในอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ตัมคงที่

เมื่อเครื่องกำเนิดไอมืออุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสจะทำให้คลื่นขยายที่เกิดขึ้นในห้องผสมมีความรุนแรงมากกว่าที่เครื่องกำเนิดไอ 130 องศาเซลเซียส ทำให้ effective area มีพื้นที่ลดลงซึ่งส่งผลให้อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิไหลเข้าอีเจ็คเตอร์ได้น้อยลง

5.3.4 วิเคราะห์ผลการจำลองที่อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 140 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.4 ปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่และอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่ตามลำดับ ที่เงื่อนไขความดันเครื่องควบแน่น 40 mbar และอุณหภูมิเครื่องเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียสและหัวฉีดหลักขนาด d1.7M4

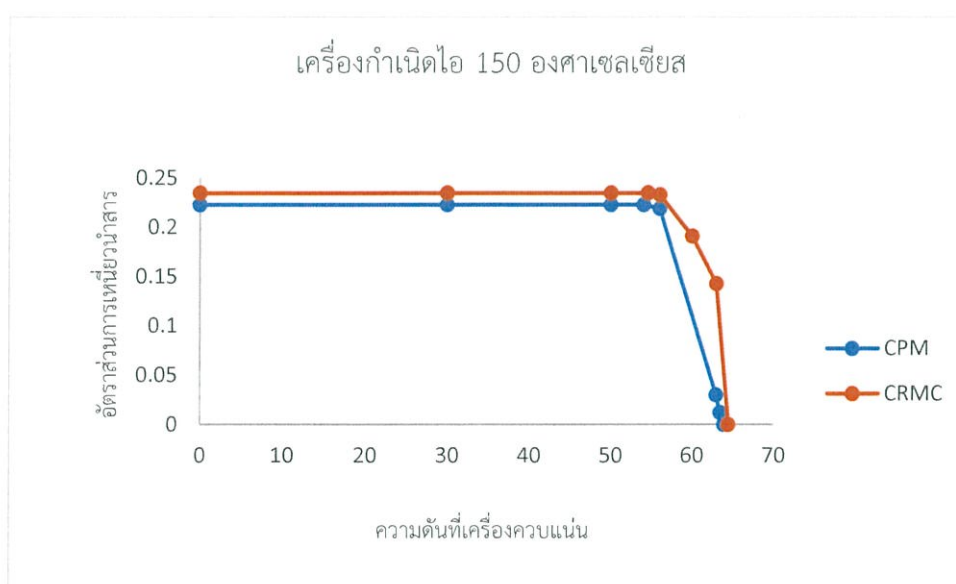
จากรูปที่ 5.4 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่และภายในอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่มีลักษณะใกล้เคียงกันมาก แต่ในส่วนห้องผสมจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าคลื่นกระแทกที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่มีความรุนแรงมากกว่าที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่ และอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่มีค่าอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิมากกว่าอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่เนื่องมาจากความดันและอุณหภูมิในตำแหน่งห้องผสมของอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่มีค่าต่ำ

5.3.5 ผลการจำลองที่อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 150 องศาเซลเซียส

จากตารางที่ 5.5 แสดงให้เห็นว่าที่ความดันเครื่องควบแน่นเท่ากับอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่มีค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำสารที่มากกว่าอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่ และค่าความดันวิกฤติของอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่มีค่ามากกว่าอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่อยู่ที่ 0.5 mbar

ตารางที่ 5.5 แสดงผลที่ได้จากวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของอีเจ็คเตอร์แบบการผสมที่ความดันคงที่ และอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ตัมคงที่ ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 150 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเครื่องเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียสและหัวฉีดหลักขนาด d1.7M4

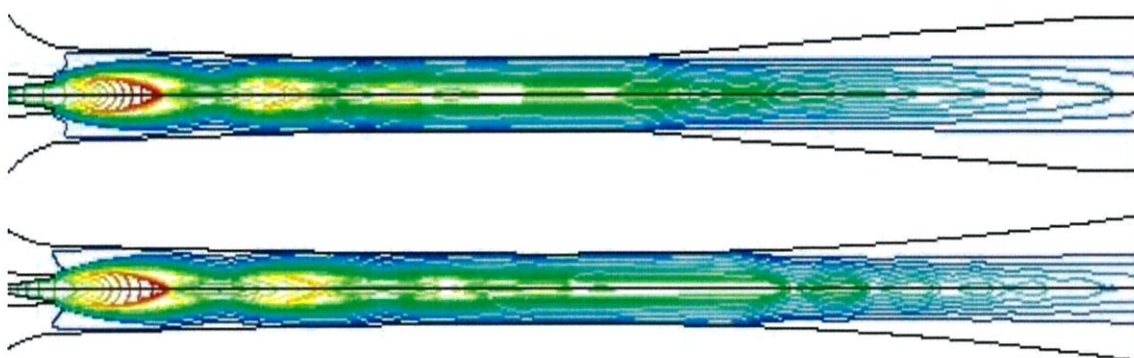
ความดันที่ เครื่องควบแน่น (mbar)	อัตราส่วนการ เหนี่ยวนำสาร CPM	ความดันที่ เครื่องควบแน่น (mbar)	อัตราส่วนการ เหนี่ยวนำสาร CRMC
0	0.223	0	0.235
30	0.223	30	0.235
50	0.223	50	0.235
54	0.223	54.5	0.235
56	0.219	56	0.233
63	0.03	60	0.191
63.5	0.012	63	0.143
64	0	64.5	0



รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำสารและความดันเครื่องควบแน่นของอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC และอีเจ็คเตอร์แบบ CPM ที่เงื่อนไขอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 150 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเครื่องเครื่องระเหย 7.5 องศาเซลเซียสและหัวฉีดหลักขนาด d1.7M4

จากรูปที่ 5.5 แสดงให้เห็นว่าอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่มีค่าประสิทธิภาพดีกว่าอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่ ซึ่งในช่วงอัตราส่วนการเหนี่ยวนำสารคงที่อีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่มีค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำสารที่มากกว่าอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่อยู่ที่ 0.012 และสาเหตุที่ทำให้อีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่มีค่าความดันวิกฤติที่สูงกว่าอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่เนื่องจากโมเมนตัมที่มากขึ้นในอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่

5.3.6 วิเคราะห์ผลการจำลองที่อุณหภูมิกำเนิดไอ 150 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.6 ปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่และอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่ตามลำดับ ที่เงื่อนไขความดันเครื่องควบแน่น 30 mbar และอุณหภูมิกำเนิดไอ 150 องศาเซลเซียสและหัวฉีดหลักขนาด $d1.7M4$

เมื่อเครื่องกำเนิดไอมีอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสจะทำให้คลื่นขยายที่เกิดขึ้นในห้องผสมมีความรุนแรงมากกว่าที่เครื่องกำเนิดไอ 140 องศาเซลเซียส ทำให้ effective area มีพื้นที่ลดลงซึ่งส่งผลให้อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิไหลเข้าอีเจ็คเตอร์ได้น้อยลง

จากรูปที่ 5.6 ปรากฏการณ์ที่เกิดภายในอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่และภายในอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่มีลักษณะใกล้เคียงกันมาก แต่ในส่วนห้องผสมจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าคลื่นกระแทกที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่มีความรุนแรงมากกว่าที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่ และอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่มีค่าอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิมากกว่าอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่เนื่องมาจากความดันและอุณหภูมิในตำแหน่งห้องผสมของอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่มีค่าต่ำ

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการฉบับนี้เป็นโครงการที่ทำการศึกษาการปรับปรุงค่าประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ที่ประยุกต์ใช้ในระบบทำความเย็นโดยการสร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ โดยที่จะมุ่งเน้นในด้านการใช้โปรแกรมในการคำนวณเพื่อวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์โดยที่จะใช้ข้อมูลที่ได้จากการทำวิจัย และข้อมูลจากชุดการทดลองของอาจารย์ศรัทธา อภรรรัตน์ , อาจารย์ณัฐวุฒิ เรืองตระกูลเพื่อทดสอบและบันทึกค่าอัตราการไหลเพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับการออกแบบอีเจ็คเตอร์ในโปรแกรมซึ่งในการออกแบบทางโปรแกรมที่จัดทำจะทำการออกแบบหัวฉีดหลักและอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันแบบความดันคงที่เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าอัตราการเหนียวนำสารและความดันวิกฤติที่เครื่องควบแน่นกับชุดการทดลองในข้างต้น โดยที่ขนาดของหัวฉีดหลักจะอ้างอิงจากชุดการทดลองคือใช้เส้นผ่านศูนย์กลางที่คอคอด 1.7mm และมีอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออกต่อที่คอคอด ยกกำลังสองเป็น 1ต่อ20 เพื่อให้ได้ความเร็วที่ทางออกของหัวฉีดหลักเป็น 4 ทำการเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลของหัวฉีดหลักในแบบจำลองกับชุดการทดลองแล้วจะได้ค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ประมาณ 5% จากนั้นในโครงการนี้จะพิจารณาอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่โดยที่จะมีขนาดของอีเจ็คเตอร์ดังที่กล่าวมาในบทที่ 4 และทำการเปรียบเทียบกับอีเจ็คเตอร์แบบเดียวกันในชุดการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส จะมีค่าความคลาดเคลื่อนของอัตราการเหนียวนำสารอยู่ที่ประมาณ 5% ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส จะมีความคลาดเคลื่อนของอัตราการเหนียวนำสารอยู่ที่ประมาณ 13% ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส จะมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ประมาณ 18% ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบในส่วนของหัวฉีดหลักและอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่แล้วนั้น ในโครงการนี้จะศึกษาอีเจ็คเตอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบทำความเย็นซึ่งในโครงการจะศึกษาอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่ซึ่งจะใช้ลักษณะการออกแบบตาม Ian W.Eames [5] โดยที่การคำนวณจะอยู่ในบทที่ 4.5 โดยเมื่อทำการออกแบบแล้วจะทำการวิเคราะห์ผลซึ่งจะนำผลของอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่มาเปรียบเทียบกับอีเจ็คเตอร์แบบการผสมแบบความดันคงที่ จะได้ว่าอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคงที่นั้นให้ค่าอัตราการเหนียวนำสารดีกว่าอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคงที่ ที่อุณหภูมิ 130 , 140 และ 150 องศาเซลเซียส

เท่ากับ 9 , 8 และ 5% ตามลำดับโดยที่จะมีความผันผวนที่เครื่องควบคุมของอีเจ็คเตอร์แบบการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์คองที่ดีกว่าอีเจ็คเตอร์แบบการผสมกันที่ความดันคองที่อยู่ประมาณ 1%

6.2 ข้อเสนอแนะ

ในการจัดทำโครงการนี้จะพบปัญหาในเรื่องของการใช้ชุดการทดลองซึ่งชุดการทดลองที่มีอยู่นั้นจัดตั้งอยู่ที่สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ทำให้มีปัญหาในการเดินทางไปทำการทดลองและเก็บผล การจัดทำชุดการทดลองนี้จึงจำเป็นเพื่อลดระยะเวลาในการเดินทางและยังสามารถใช้เป็นชุดการทดลองให้กับนักศึกษาที่สนใจในงานด้านนี้อีกด้วย ส่วนในด้านค่าความคลาดเคลื่อนหากทำการศึกษาในงานวิจัยด้านนี้และศึกษาในด้านของโปรแกรมอย่างลึกซึ้งก็จะช่วยให้ผลที่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยลงได้เมื่อเทียบกับชุดการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Ruangtrakoon, T.Thongtip, S. Aphornratana, T. Sriveerakul .(2013) CFD simulation on the effect of primary nozzle geometries for a steam ejector in refrigeration cycle. International Journal of Thermal Sciences63, August, Pages 133-145
- [2] Keenan JH, Neumann EP. A simple air ejector. J Appl.Mech. Trans ASME 1942; 64: A75-A81
- [3] S.K.Chou, P.R.Yang, C.Yap .(2001) Maximum mass flow ratio due to secondary flow choking in an ejector refrigeration system. International Journal of Refrigeration Volume 24, Issue 6, September, Pages 486-499, doi.org/10.1016/S0140-7007(00)00074-8
- [4] Ian W.Eames . (2002) A new prescription for the design of supersonic jet-pump : the constant rate of momentum change method. Applied Thermal Engineering 2002 Pages 121-131
- [5] K. Pianthong, W. Seehanam, M. Behnia, T. Sriveerakul, S. Aphornratana. (2007) Investigation and improvement of ejector refrigeration system using computational fluid dynamics technique. Energy Conversion and Management Volume 48, Issue 9 , September 2007, Pages 2556-2564, doi.org/10.1016/j.enconman.2007.03.021
- [6] N. Ruangtrakoon , S. Aphornratana , T. Sriveerakul. (2011) Experimental studies of a steam jet refrigeration cycle: Effect of the primary nozzle geometries to system performance. Experimental Thermal and Fluid Science Volume 35, Issue 4, May 2011, Pages 676-683. doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2011.01.001
- [7] N. Satheesh Kumar , Kim Tiow Ooi. (2014) One dimensional model of an ejector with special attention to Fanno flow within the mixing chamber. Applied Thermal Engineering Volume 65, Issues 1–2, April 2014, Pages 226-235.

- [8] N. Ruangtrakoon , S. Aphornratana , T. Sriveerakul (2017). Comparison of traditional and CRMC ejector performance used in a steam ejector refrigeration. 2017 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies 2017 AEDCEE, 25-26 May 2017, Bangkok Thailand