



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาและหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของอุปกรณ์คิดใน
ระบบทำความเย็นโดยใช้วิธีการคำนวณทางตัวเลขและการทดลอง

โดย นายกุลเชษฐ์ เพียรทอง และ คณะ

ตุลาคม พ.ศ. 2548

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาและหาสถานะการทำงานที่เหมาะสมของอุปกรณ์ใน
ระบบทำความเย็นโดยใช้วิธีการคำนวณทางตัวเลขและการทดลอง

คณะผู้ทำวิจัย

- นายกุลเชษฐ์ เพียรทอง
- Musud Behnia

สังกัด

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
University of Sydney

สนับสนุนโดยทบวงมหาวิทยาลัย และ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย ทบวงฯ และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

รายงานการวิจัยเรื่อง	การศึกษาและหาสภาวะที่เหมาะสมของอุปกรณ์หัวฉีดในระบบทำความเย็น โดยใช้การคำนวณทางตัวเลขและการทดลอง
หัวหน้าโครงการวิจัย	นายกุลเชษฐ์ เพียรทอง
หน่วยงาน	วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ระยะเวลาดำเนินการ	2 ปี
งบประมาณที่ได้รับ	480,000 บาท (สี่แสนแปดหมื่นบาทถ้วน)
คำสำคัญ	อีเจ็คเตอร์ ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ CFD CRMC

บทคัดย่อ

การศึกษาและพัฒนาระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ (ejector refrigeration) มีอย่างต่อเนื่องเป็นเวลาหลายปีแล้ว การใช้พลังงานความร้อนขับเคลื่อนระบบ ต้นทุนการบำรุงรักษาราคาต่ำ เนื่องจากไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนที่ เป็นข้อดีของระบบนี้ แต่มีด้อย คือ ประสิทธิภาพทำความเย็นต่ำ ซึ่งเป็นอุปสรรคในการนำระบบทำความเย็นชนิดนี้ไปใช้งานจริง สมรรถนะของระบบการทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของอีเจ็คเตอร์เป็นสำคัญ ดังนั้นการศึกษาและออกแบบอุปกรณ์ อีเจ็คเตอร์ อย่างมีประสิทธิภาพจึงสำคัญต่อการพัฒนาระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ งานวิจัยจึงได้นำเอาความรู้ด้าน Computational Fluid Dynamics (CFD) โดยโปรแกรม FLUENT มาใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้นและทำนายคุณลักษณะของอีเจ็คเตอร์ พร้อมทั้งใช้เป็นเครื่องมือช่วยออกแบบอีเจ็คเตอร์ตามแนวคิดแบบ Constant Rate of Momentum Changes (CRMC) ซึ่งเป็นแนวความคิดใหม่และยังมีผู้ศึกษาวิจัยน้อย ก่อนนำอีเจ็คเตอร์ไปสร้างจริงและทำการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบผลการออกแบบ ผลจากการศึกษาและทดลองทำให้เราทราบถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ที่มีต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์จากผลการทดลอง และ CFD ซึ่งสอดคล้องกัน

Title	Investigation and Optimization of Ejector Performance in Refrigeration System using Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulation and Experiment
Head of Project	Mr.Kulachate Pianthong
Organization	Mechanical Engineering Deapartment, Faculty of Engineering, Ubonratchatani University
Run time	2 years
Budget	480,000 bath
Keywords	Ejector, Ejector refrigeration system, CFD, CRMC

Abstract

Ejector refrigeration system has been researched and developed continuously for many years. The main advantages of this system are utilizing low-cost energy (heat energy) to drive the system, low operating cost, and high durability due to few moving parts. The only weakness of this system is that it usually gives low coefficient of performance (COP). The performance of the ejector refrigeration system depends much on the ejector performance. Therefore, the system performance can be enhanced by improving the ejector performance. This study tries to adopt the technique of Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation to investigate the ejector characteristics, improve its performance, and then build the new ejector to apply in the current test rig. The commercial software, called FLUENT, is used as a computational tool. The new concept of ejector design called “Constant Rate of Momentum Change” or CRMC is investigated and applied. Then the prototype CRMC ejector has been built and installed in the current test rig to verify the performance. The experimental results agree quite well with the CFD predictions. However, the CFD prediction shows a little higher in entrainment ratio than that from the experiments.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัย ขอขอบคุณ Professor Masud Behnia แห่ง University of Sydney ประเทศ Australia ในฐานะ mentor ที่ให้คำปรึกษาตลอดการวิจัยนี้ ขอขอบคุณ รศ.ดร.ศรัทธา อาภรณ์รัตน์ และ นาย ชนรัฐ ศรีวีระกุล แห่ง สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร ที่เอื้อเฟื้อชุดอุปกรณ์การทดลอง พร้อมกับคำแนะนำอันมีประโยชน์ในการทำการทดลอง ซึ่งทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ ขอขอบคุณ นายวิระพันธ์ สีหนาม ผู้ช่วยวิจัย และ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ช่วยดำเนินการ หลายๆ อย่าง ตลอดระยะเวลาที่ทำการทำวิจัย ช่วยให้งานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี สุดท้ายและสำคัญยิ่ง การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ผู้วิจัย ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

นายกุลเชษฐ์ เพียรทอง

31 ตุลาคม 2548

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญตาราง	IV
สารบัญรูปภาพ	V
บทที่ 1 บทนำ	1-1
1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1-1
2. วัตถุประสงค์ของโครงการ	1-3
3. ขอบเขตของงานวิจัย	1-3
4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1.3
5. ระเบียบวิธีวิจัย	1-4
6. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	1-5
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2-1
1. หลักการทำงานของอีเจ็คเตอร์และระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์	2-1
2. ปัจจัยบ่งชี้สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์	2-4
2.1 ประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์	2-4
2.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์	2-5
2.2.1 ผลกระทบจากเงื่อนไขการทำงาน	2-5
2.2.2 ผลกระทบจากรูปร่างของอีเจ็คเตอร์	2-6
3. การออกแบบอีเจ็คเตอร์	2-8
4. แบบจำลอง CFD ของอีเจ็คเตอร์	2-9
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3-1
1. สมการอนุรักษ์การไหลของของไหล	3-1
1.1 สมการเชิงอนุพันธ์มวล	3-1
1.2 สมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัม	3-2
1.3 สมการเชิงอนุพันธ์พลังงาน	3.4
2. แบบจำลองความปั่นป่วนของการไหล	3-5

สารบัญ(ต่อ)	หน้า
2.1 สมการค่าเฉลี่ยของ Reynolds	3-5
2.2 แบบจำลองความปั่นป่วน แบบ Standard $k - \varepsilon$	3-7
2.2.1 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k - \varepsilon$	3-8
2.2.2 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Realizable $k - \varepsilon$	3-9
3. การไหลแบบอัดตัว (Compressible flow)	3-10
3.1 คุณสมบัติรวมของของไหล (Stagnation properties)	3-10
3.2 ความเร็วเสียง (Speed of sound or Sonic velocity)	3-12
3.3 การไหลแบบไอเซนทรอปิกผ่านท่อหน้าตัดเปลี่ยนแปลง	3-14
3.4 ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติก๊าซอุดมคติ	3-16
3.5 การไหลผ่านท่อคอขวด (Isentropic flow through nozzles)	3-17
3.5.1 ท่อหน้าตัดลู่เข้า (Converging nozzle)	3-17
3.5.2 ท่อหน้าตัดลู่เข้า-ลู่ออก (Converging –divergent nozzle)	3-20
3.6 Shock wave ของการไหลในท่อ	3-20
4. แบบจำลองการไหลใน 1 มิติของอีเจ็คเตอร์	3-23
5. Computational Fluid Dynamics (CFD)	3-25
5.1 ระเบียบวิธี finite volume	3-25
5.2 ระเบียบขั้นตอนการแก้ปัญหา	3-27
5.2.1 ระเบียบขั้นตอน Segregated solver	3-27
5.2.2 ระเบียบขั้นตอน Coupled solver	3-28
5.3 ระเบียบวิธีคำนวณ	3-29
5.4 ระเบียบวิธีแก้ปัญหการไหลของบริเวณใกล้เคียงผนัง	3-29
บทที่ 4 การจำลองหาสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์	4-1
1. แบบจำลองเชิงตัวเลขของอีเจ็คเตอร์	4-1
1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	4-1
1.2 คุณสมบัติของสารทำงาน	4-2
1.3 โดเมนของปัญหาและรูปร่างของกริด	4-2
2. ผลยืนยันแบบจำลอง CFD ของอีเจ็คเตอร์	4-4
2.1 ผลกระทบจากเงื่อนไขการทำงานที่มีต่ออีเจ็คเตอร์	4-4

สารบัญ(ต่อ)	หน้า
2.2 รูปแบบความดันตลอดความยาวของอีเจ็คเตอร์	4-5
3. แบบจำลองของอีเจ็คเตอร์ใน 2 มิติ และ 3 มิติ	4-7
4. ผลกระทบของพารามิเตอร์บางตัวที่มีต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์	4-9
4.1 ผลกระทบของเงื่อนไขการทำงาน	4-9
4.1.1 ผลกระทบจากสถานะของเครื่องกำเนิดไอ	4-10
4.1.2 ผลกระทบจากสถานะของเครื่องระเหย	4-14
4.2 ผลกระทบจากรูปร่างของอีเจ็คเตอร์	4-17
4.2.1 ตำแหน่งปากทางออกของหัวฉีด	4-17
4.2.2 ความยาวของ throat	4-23
5. สรุป	4-27
บทที่ 5 การออกแบบอีเจ็คเตอร์ตามแนวคิด CRMC	5-1
1. แนวคิดการออกแบบอีเจ็คเตอร์ Constant Rate of Momentum Changes	5-1
2. สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC	5-4
3. การประยุกต์ใช้ CFD กับ การออกแบบอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC	5-5
3.1 การปรับปรุงรูปร่างอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC โดยใช้ CFD	5-6
3.2 การศึกษาและคาดคะเนสมรรถนะอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC ด้วย CFD	5-7
บทที่ 6 การทดลองและผลการทดลอง	6-1
1. ชุดการทดลอง	6-2
1.1 เครื่องกำเนิดไอ (boiler)	6-2
1.2 เครื่องระเหย (Evaporator)	6-3
1.3 เครื่องควบแน่น (Condenser)	6-3
1.4 ถังเก็บสารทำงาน (Receiver tank)	6-3
1.5 ปั๊มหมุนเวียนสารทำงาน (Circulation pump)	6-3
1.6 อีเจ็คเตอร์ (Ejector)	6-4
2. การวัดค่าตัวแปรในระบบ	6-4
2.1 การวัดอุณหภูมิ	6-4
2.2 การวัดความดัน	6-4
2.3 การวัดอัตราการไหล	6-4

สารบัญ(ต่อ)	หน้า
3. ระบบควบคุมในชุดอุปกรณ์การทดลอง	6-4
3.1 การควบคุมระดับของสารทำงาน	6-5
3.2 การควบคุมกระแสไฟฟ้าของขดลวดทำความร้อน	6-5
3.3 การควบคุมความดันของเครื่องควบแน่น	6-6
4. ขั้นตอนและวิธีการทดลอง	6-6
4.1 ขั้นตอนการติดตั้งอีเจ็คเตอร์	6-6
4.2 ขั้นตอนการตรวจสอบหาตำแหน่งรั่วในระบบ	6-7
4.3 ขั้นตอนการเตรียมสถานะของสารป้อนภูมิและน้ำระบายความร้อน	6-7
4.4 ขั้นตอนการปรับลดความดันอากาศของระบบ	6-7
4.5 ขั้นตอนการเปิดให้ระบบทำงาน	6-8
4.6 ขั้นตอนการเก็บผลการทดลอง	6-8
5. ผลการทดลองและผลจากCFD ของอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC ที่ปรับปรุงแล้ว	6-8
5.1 ค่า R_m และ จุด CBP	6-8
5.2 รูปแบบความดันสถิตที่ผนังของอีเจ็คเตอร์	6.10
6. สรุปและวิเคราะห์ผลการศึกษานี้อีเจ็คเตอร์แบบ CRMC ที่ปรับปรุงแล้ว	6-13
บทที่ 7 สรุป	7-1
เอกสารอ้างอิง	R-1

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการคำนวณของ CFD	4-1
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของสารในการคำนวณ	4-2
ตารางที่ 4.3 ขนาดของอีเจ็คเตอร์	4-10
ตารางที่ 4.4 ผลของเงื่อนไขการทำงานและรูปร่างลักษณะอีเจ็คเตอร์ที่มีต่อสมรรถนะ	4-28
ตารางที่ 5.1 เงื่อนไขการออกแบบอีเจ็คเตอร์	5-3
ตารางที่ 7.1 สรุปเงื่อนไขการคำนวณของ CFD	7-1
ตารางที่ 7.2 สรุปอิทธิพลและผลของพารามิเตอร์ที่มีต่ออีเจ็คเตอร์	7-2

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 แผนผังแสดงระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์อย่างง่าย	1-2
รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์	2-2
รูปที่ 2.2 คุณลักษณะการไหลในอีเจ็คเตอร์	2-2
รูปที่ 2.3 Effective area ที่เกิดขึ้นในอีเจ็คเตอร์	2-3
รูปที่ 2.4 Mollier's chart ของ ejector	2-5
รูปที่ 2.5 คุณลักษณะโดยทั่วไปของอีเจ็คเตอร์	2-6
รูปที่ 2.6 ผลกระทบจากอุณหภูมิของ boiler ที่มีต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์	2-6
รูปที่ 2.7 ประเภทของอีเจ็คเตอร์	2-7
รูปที่ 3.1 รูปแบบของมวลผ่านกรอบขนาดเล็ก	3-1
รูปที่ 3.2 รูปแบบของแรงที่กระทำกับมวลของไหลขนาดเล็ก	3-2
รูปที่ 3.3 พิจารณางานและพลังงานที่เกิดขึ้นกับก้อนมวลขนาด dx และ dy	3-4
รูปที่ 3.4 การเปลี่ยนแปลงอย่างไม่เป็นระเบียบของการไหลแบบปั่นป่วน	3-5
รูปที่ 3.5 ปริมาตรควบคุมเมื่อของไหลผ่านท่อ	3-11
รูปที่ 3.6 การเคลื่อนที่ของหน้าคลื่นเสียง	3-12
รูปที่ 3.7 ผลของ Mach number ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดของท่อ	3-16
รูปที่ 3.8 การไหลผ่านท่อคอขวดของอากาศด้วยปั๊มลดความดัน	3-18
รูปที่ 3.9 การไหลผ่านท่อคู่เข้า-คู่ออก ของอากาศด้วยปั๊มลดความดัน	3-20
รูปที่ 3.10 ปริมาตรควบคุมของ Shock	3-21
รูปที่ 3.11 Mollier's chart	3-21
รูปที่ 3.12 ลักษณะการไหลภายในอีเจ็คเตอร์	3-22
รูปที่ 3.13 finite volume method ใน 1 มิติ	3-26
รูปที่ 3.14 แผนภาพลำดับการคำนวณของระเบียบวิธีแบบ Segregated solver	3-27
รูปที่ 3.15 แผนภาพลำดับการคำนวณของระเบียบวิธีแบบ Coupled solver	3-28
รูปที่ 4.1 รูปร่างและการแบ่งกริดภายในอีเจ็คเตอร์	4-3
รูปที่ 4.2 สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์จากผลของอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ	4-4
รูปที่ 4.3 สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์จากผลของอุณหภูมิเครื่องระเหย	4-5
รูปที่ 4.4 การทดลองและCFD ของความดันสถิตที่บริเวณผนังอีเจ็คเตอร์	4-6

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.5 รูปร่างแบบจำลองอีเจ็คเตอร์ใน 3 มิติ	4-7
รูปที่ 4.6 ความดันสถิตตามแนวแกนของแบบจำลองอีเจ็คเตอร์ 2 มิติและ 3 มิติ	4-7
รูปที่ 4.7 Mach number บนระนาบของอีเจ็คเตอร์	4-8
รูปที่ 4.8 Mach number ของอีเจ็คเตอร์ในระบบแกน 3 มิติ	4-8
รูปที่ 4.9 รูปร่างของอีเจ็คเตอร์	4-10
รูปที่ 4.10 สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์แบบ CPM เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ	4-11
รูปที่ 4.11 แถบสี Mach number ที่อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอต่างกันของอีเจ็คเตอร์แบบ CPM	4-12
รูปที่ 4.12 สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์แบบ CMA เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ	4-13
รูปที่ 4.13 แถบสี Mach number ที่อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอต่างกันของอีเจ็คเตอร์แบบ CMA	4-14
รูปที่ 4.14 สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์แบบ CPM เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องระเหย	4-15
รูปที่ 4.15 แถบสี Mach number ที่อุณหภูมิเครื่องระเหยต่างกันของอีเจ็คเตอร์แบบ CPM	4-16
รูปที่ 4.16 สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์แบบ CMA เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องระเหย	4-17
รูปที่ 4.17 แถบสี Mach number ที่อุณหภูมิเครื่องระเหยต่างกันของอีเจ็คเตอร์แบบ CMA	4-18
รูปที่ 4.18 แถบสี Mach number ที่ตำแหน่งหัวฉีดต่างๆ ของอีเจ็คเตอร์	4-19
รูปที่ 4.19 อิทธิพลของอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอและตำแหน่งหัวฉีดที่มีต่อค่าEntrianment ratio	4-21
รูปที่ 4.20 อิทธิพลของอุณหภูมิเครื่องระเหยและตำแหน่งหัวฉีดที่มีต่อค่าEntrianment ratio	4-22
รูปที่ 4.21 ผลของความยาว Throat ที่มีต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์	4-23
รูปที่ 4.22 อิทธิพลของอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอและความยาว Throat ที่มีต่อค่าEntrianment ratio	4-24
รูปที่ 4.23 อิทธิพลของอุณหภูมิเครื่องระเหยและความยาว Throat ที่มีต่อค่าEntrianment ratio	4-25
รูปที่ 4.24 แถบสี Mach number ตามความยาว Throat ของอีเจ็คเตอร์	4-27
รูปที่ 5.1 CRMC ejector	5-2
รูปที่ 5.2 พื้นที่หน้าตัดตลอดความยาวของ Diffuser	5-4
รูปที่ 5.3 Mach number ตามแนวแกนของ Diffuser	5-4
รูปที่ 5.4 สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC	5-5
รูปที่ 5.5 แบบของอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC ที่ปรับปรุงแล้ว	5-6
รูปที่ 5.6 ผล CFD ของอิทธิพลของเครื่องกำเนิดไอที่มีต่อสมรรถนะอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC	5-7
รูปที่ 5.7 ผล CFD ของอิทธิพลของเครื่องระเหยที่มีต่อสมรรถนะอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC	5-8

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.8 Mach number ของอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC เปรียบเทียบกับอีเจ็คเตอร์ทั่วไป	5-9
รูปที่ 6.1 เครื่องทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์	6-1
รูปที่ 6.2 แผนภาพระบบชุดทดลองเครื่องทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์	6-2
รูปที่ 6.3 คอมพิวเตอร์และชุดควบคุม	6-5
รูปที่ 6.4 อีเจ็คเตอร์ที่ติดตั้งพร้อมสำหรับการทดลอง	6-6
รูปที่ 6.5 อิทธิพลของเครื่องกำเนิดไอที่มีต่ออีเจ็คเตอร์แบบ CRMC	6-9
รูปที่ 6.6 อิทธิพลของเครื่องระเหยที่มีต่ออีเจ็คเตอร์แบบ CRMC	6-9
รูปที่ 6.7 ผลความดันสถิตบนผนังของอีเจ็คเตอร์จากความดันเครื่องควบแน่น	6-10
รูปที่ 6.8 ผลความดันสถิตบนผนังของอีเจ็คเตอร์จากอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ	6-11
รูปที่ 6.9 ผลความดันสถิตบนผนังของอีเจ็คเตอร์จากความดันเครื่องระเหย	6-12

บทที่ 1

บทนำ

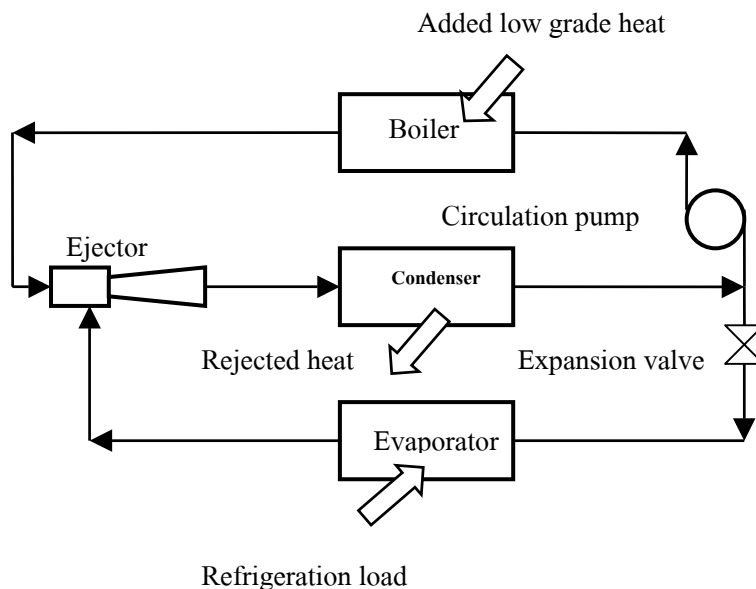
1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ระบบอุตสาหกรรมในปัจจุบันกำลังพัฒนาและขยายตัวอย่างต่อเนื่อง อันเป็นเหตุให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม จากความร้อนทิ้งที่โรงงานอุตสาหกรรมปล่อยออกมา และทำให้ทรัพยากรด้านพลังงานลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นเหตุให้เกิดปัญหาด้านเศรษฐกิจและสภาพสังคมตามมา นอกจากนี้แล้วปัญหาสีเขียวทำให้โลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ระบบปรับอากาศในอาคารบ้านเรือนเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของผู้คนขึ้น แต่ระบบทำความเย็นในปัจจุบันก็ก่อให้เกิดปัญหาสีเขียว (จากการทำความเย็นที่ใช้ในระบบ) ดังนั้นปัจจุบันการพัฒนาระบบทำความเย็นจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงการประหยัดพลังงานและลดปัญหาสีเขียวควบคู่กัน ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์เป็นระบบทำความเย็นทางเลือกใหม่ที่เหมาะสมอย่างยิ่งกับสถานะการในปัจจุบันเนื่องจาก เป็นระบบที่สามารถนำเอาความร้อนทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือพลังงานความร้อนราคาถูกอื่นๆ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานขับเคลื่อนระบบ สามารถนำมาใช้เป็นสารทำความเย็นได้ ทำให้ระบบไม่ก่อให้เกิดปัญหาสีเขียว นอกจากนี้แล้วยังมีอายุการใช้งานนานและเสียค่าซ่อมบำรุงต่ำกว่าระบบทั่วไป เนื่องจากไม่ใช่เครื่องอัดไอ

Maurice Leblanc คือคนแรกที่คิดค้นและประดิษฐ์ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ ในปี ค.ศ. 1910 [1] เป็นระบบทำความเย็นสำหรับการปรับอากาศในอาคารขนาดใหญ่ แต่การศึกษาและพัฒนา ระบบได้หยุดชะงักลงเนื่องจาก ให้สมรรถนะการทำความเย็นต่ำกว่าระบบทำความเย็นแบบอัดไอ แต่ในปัจจุบัน ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์เริ่มเป็นที่สนใจอีกครั้งและได้รับการศึกษาพัฒนาอย่างกว้างขวาง ข้อเด่นของระบบนี้ ได้แก่ โครงสร้างของระบบที่ไม่ซับซ้อน มีชิ้นส่วนเคลื่อนที่น้อย ไม่เกิดการสึกกร่อน อีกทั้งยังสามารถใช้น้ำเป็นสารทำความเย็นซึ่งไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม แต่ระบบมีข้อด้อย คือ มีประสิทธิภาพการทำความเย็นต่ำ [2] ดังนั้นหากสามารถแก้ปัญหานี้ได้ ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์จะเหมาะสมกับการใช้งานในปัจจุบันเป็นอย่างยิ่ง รูปที่ 1.1 แสดงระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์อย่างง่าย

จากรูปที่ 1.1 จะสังเกตเห็นได้ว่า ejector, boiler และ circulating pump เป็นส่วนที่ติดตั้งแทน compressor ในระบบทำความเย็นแบบอัดไอ โดยสารทำงานความดันสูงที่ได้จากการเดือดภายในเครื่องกำเนิดไอ (generator or boiler) จะถูกใช้เป็นก๊าซป้อนของอีเจ็คเตอร์ ก๊าซความดันสูงนี้จะไหลและขยายตัวผ่านหัวฉีด (nozzle) ด้วยความเร็วสูง ก่อให้เกิดความดันต่ำ บริเวณปากทางออกของหัวฉีดที่ต่อกับเครื่องระเหย (evaporator) ความดันของเครื่องระเหยจะลดลง ดังนั้นสารทำงานในเครื่องระเหยจึงสามารถเดือดและระเหยได้ในอุณหภูมิที่ต่ำ ค่าความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารทำงานใน

เครื่องระเหยหรือก๊าซทุติยภูมิของอีเจ็คเตอร์จะถูกดูดพร้อมเพิ่มความดันให้สูงขึ้น ที่ห้องผสมและทางออกของอีเจ็คเตอร์ตามลำดับ จากนั้นจะกลั่นตัวกลับเป็นสารทำงานเหลวภายในเครื่องควบแน่น (condenser) สารทำงานเหลวนี้นี้จะถูกหมุนเวียนกลับไปอีเจ็คเตอร์โดย ปั๊มหมุนวน (Circulation pump) สารทำงานบางส่วนจะถูกลดความดันผ่านวาล์วลดความดัน (expansion valve) ก่อนจะไหลกลับเข้าสู่เครื่องระเหย เป็นการครบวัฏจักรการทำงาน



รูปที่ 1.1 แผนผังแสดงระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์อย่างง่าย

สมรรถนะของตัวอีเจ็คเตอร์จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบโดยตรง ดังนั้นงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ผ่านมาจะเน้นการศึกษาคุณลักษณะของอีเจ็คเตอร์ที่มีต่อระบบ โดยการทำทดลองควบคู่กับใช้ทฤษฎีอธิบายและคาดคะเนปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์

ปัจจุบันได้มีการนำความรู้ทางวิธีการเชิงตัวเลขมาแก้ปัญหาและอธิบายคุณลักษณะการไหลของของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) เนื่องจาก สะดวกและประหยัดค่าใช้จ่าย ดังนั้นหากนำ CFD เข้ามาช่วยในการคาดคะเนสมรรถนะและศึกษาคุณลักษณะของอีเจ็คเตอร์ การออกแบบอีเจ็คเตอร์จะสะดวกและลดต้นทุนในการสร้างจริงได้[3] ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าเราอาจมีอีเจ็คเตอร์รูปร่างใหม่ที่มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าตัวเดิม

งานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะนำ CFD เข้ามาช่วยในการศึกษาและออกแบบรูปร่างของอีเจ็คเตอร์ใหม่ ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นหรือดีกว่าที่มีอยู่ในปัจจุบัน ก่อนการสร้างจริงเพื่อทดสอบ โดยทำการนำทฤษฎีการออกแบบอีเจ็คเตอร์แบบใหม่ เช่น การออกแบบตามแนวคิด “การเท่ากันของอัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมภายในอีเจ็คเตอร์คงที่ (constant rate of momentum change, CRMC)” [4] ควบคู่กับ การใช้หลักพื้นฐานของการไหลของของไหลแบบอัดตัว (compressible flow) ก่อนที่จะนำความรู้

และทฤษฎีเหล่านี้ มาใช้ในการออกแบบ ซึ่ง CFD จะช่วยคาดคะเนประสิทธิภาพและศึกษาคุณลักษณะการไหลที่เกิดขึ้น หากอีเจกเตอร์ให้ประสิทธิภาพที่น่าพอใจจึงจะทำการสร้างและทดสอบจริง เมื่ออีเจกเตอร์มีสมรรถนะที่สูงขึ้นแล้ว จะเป็นการเพิ่มโอกาสในการนำระบบทำความเย็นแบบอีเจกเตอร์มาใช้งานจริง

2. วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 2.1 ศึกษาการทำงานและการออกแบบของอีเจกเตอร์ในระบบทำความเย็นแบบอีเจกเตอร์ที่ใช้น้ำเป็นสารทำความเย็น
- 2.2 เปรียบเทียบผลของ CFD กับ ผลจากการทดลองในกรณีศึกษารูปร่างอีเจกเตอร์อย่างง่าย
- 2.3 ออกแบบรูปร่างอีเจกเตอร์แบบใหม่และใช้ CFD ในการทดสอบสมรรถนะและปรับเปลี่ยนรูปร่างจนได้ลักษณะของอีเจกเตอร์ที่เหมาะสม
- 2.4 ยืนยันการทำงานของอีเจกเตอร์ตัวใหม่ โดยเปรียบเทียบผลของ CFD กับ การทดลอง

3. ขอบเขตของงานวิจัย

- 3.1 ใช้ Commercial CFD code (Fluent) ทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ (ในบางกรณี)
- 3.2 ออกแบบและสร้างอีเจกเตอร์แบบใหม่ที่ใช้ในระบบทำความเย็นแบบอีเจกเตอร์ที่ใช้น้ำเป็นสารทำความเย็น
- 3.3 อีเจกเตอร์ที่ออกแบบจะนำไปทดสอบกับระบบที่มีสมรรถนะการทำความเย็น 3 kW และใช้น้ำเป็นสารทำความเย็น
- 3.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษาเปรียบเทียบได้แก่ entrainment ratio, pressure lift ratio และ critical back pressure

4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 4.1 ศึกษาการทำงานและออกแบบอีเจกเตอร์แบบใหม่ที่ทำให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดโดยใช้ความรู้ด้านของไหลพลศาสตร์และการคำนวณเชิงตัวเลขของของไหลพลศาสตร์ (CFD)
- 4.2 การศึกษานี้อาจสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับ อีเจกเตอร์ในงานอื่นได้
- 4.3 สร้างอีเจกเตอร์รูปร่างใหม่ที่ทำให้ประสิทธิภาพสูงกว่าที่มีอยู่ในปัจจุบันซึ่งจะให้ระบบทำความเย็นแบบอีเจกเตอร์มีประสิทธิภาพสูงขึ้นด้วย

5. ระเบียบวิธีวิจัย

5.1 ศึกษาและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากหนังสือหรือวารสาร

5.2 กำหนด คุณสมบัติที่ใช้ในการบ่งชี้สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้น้ำเป็นสารทำความเย็น ซึ่งได้แก่

- ค่า Entrainment ratio ซึ่ง บ่งบอกถึงสมรรถนะการทำความเย็นของระบบ
- ค่า Pressure lift ratio ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการนำเอาความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมของระบบ
- Critical back pressure บ่งบอกถึงความยืดหยุ่นในการทำงานของระบบทำความเย็น

5.3 ศึกษาทฤษฎีการออกแบบอีเจ็คเตอร์ ที่ใช้ในระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ และ ทำการออกแบบรูปร่าง ลักษณะของอีเจ็คเตอร์แบบใหม่ โดยออกแบบตามเงื่อนไขของชุดทดลองตามเอกสารอ้างอิง [5]

5.4 สร้างแบบจำลองสำหรับอีเจ็คเตอร์ที่ออกแบบไว้ ใน GAMBIT ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้สร้าง mesh ทั้ง 2 มิติและ 3 มิติ

5.5 ใช้ CFD code (FLUENT) ศึกษาสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์

- เปรียบเทียบผลของ CFD กับ ผลการทดลองของผู้ที่ได้ทำมาก่อนสำหรับแบบจำลองอย่างง่าย
- ทดสอบสมรรถนะอีเจ็คเตอร์แบบใหม่ที่ได้ทำการออกแบบไว้ โดย ศึกษาถึงผลกระทบของเงื่อนไขสภาวะ การทำงานของระบบที่มีต่ออีเจ็คเตอร์ อันได้แก่ อุณหภูมิของ boiler อุณหภูมิ ของ evaporator และ ความดันของ condenser
- แก้ไขปรับปรุงแบบ เมื่อพบว่าอีเจ็คเตอร์ให้ประสิทธิภาพไม่น่าพอใจ

5.6 สร้างอีเจ็คเตอร์ที่ได้จาก การคำนวณโดย CFD เพื่อใช้ในการทดลองจริง

5.7 ทดสอบคุณสมบัติของอีเจ็คเตอร์ที่สร้างโดยการทำทดลอง กับชุดการทดลองที่ใช้ในเอกสารอ้างอิง [5] ซึ่งตั้งอยู่ที่ ศูนย์วิจัยนานาชาติสิริธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เป็นชุดทดลองระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ที่ใช้น้ำเป็นสารทำความเย็น และสามารถทำความเย็นได้ ประมาณที่ 3 kW

5.8 วิเคราะห์และสรุปผลการศึกษาเปรียบเทียบ

- เปรียบเทียบสมรรถนะ อีเจ็คเตอร์แบบใหม่และทั่วไป
- ศึกษาพฤติกรรมและปรากฏการณ์ไหลที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์รูปร่างใหม่จากแบบจำลอง CFD

5.9 เขียนรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

- สรุปผลกสนดำเนินงานตลอดโครงการ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและข้อเสนอแนะต่างๆ

6. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับพลศาสตร์ของไหล (CFD) ชื่อ FLUENT และ โปรแกรมสร้างรูปร่างแบบจำลอง GAMBIT
2. คอมพิวเตอร์ความเร็วสูงสำหรับการคำนวณของ CFD
3. ชุดทดลองของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ ที่ใช้น้ำเป็นสารทำความเย็นและมีสมรรถนะทำความเย็นที่ 3 kW (ชุดทดลอง ตามเอกสารอ้างอิง [5])

บทที่ 2

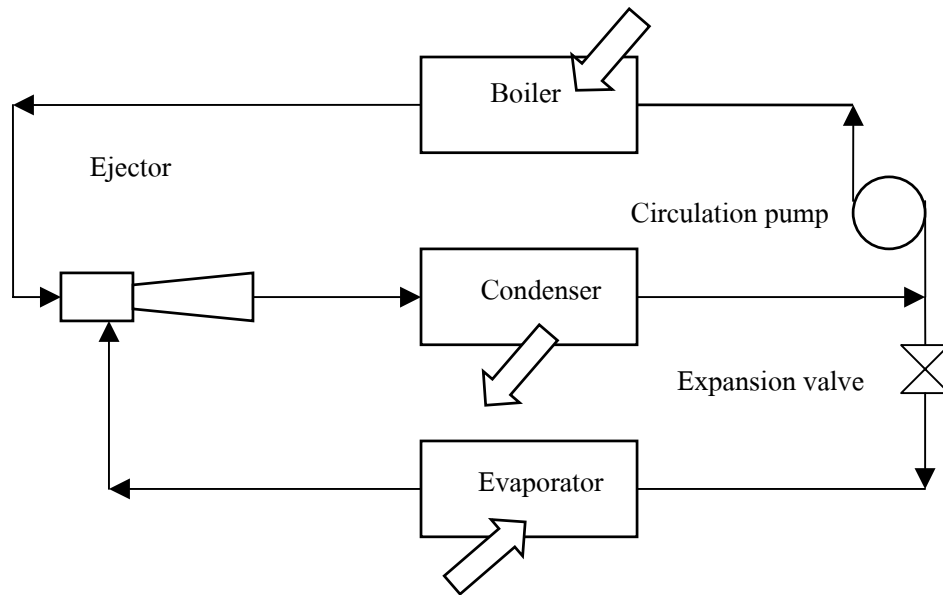
บททวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. หลักการทำงานของอีเจ็คเตอร์และระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์

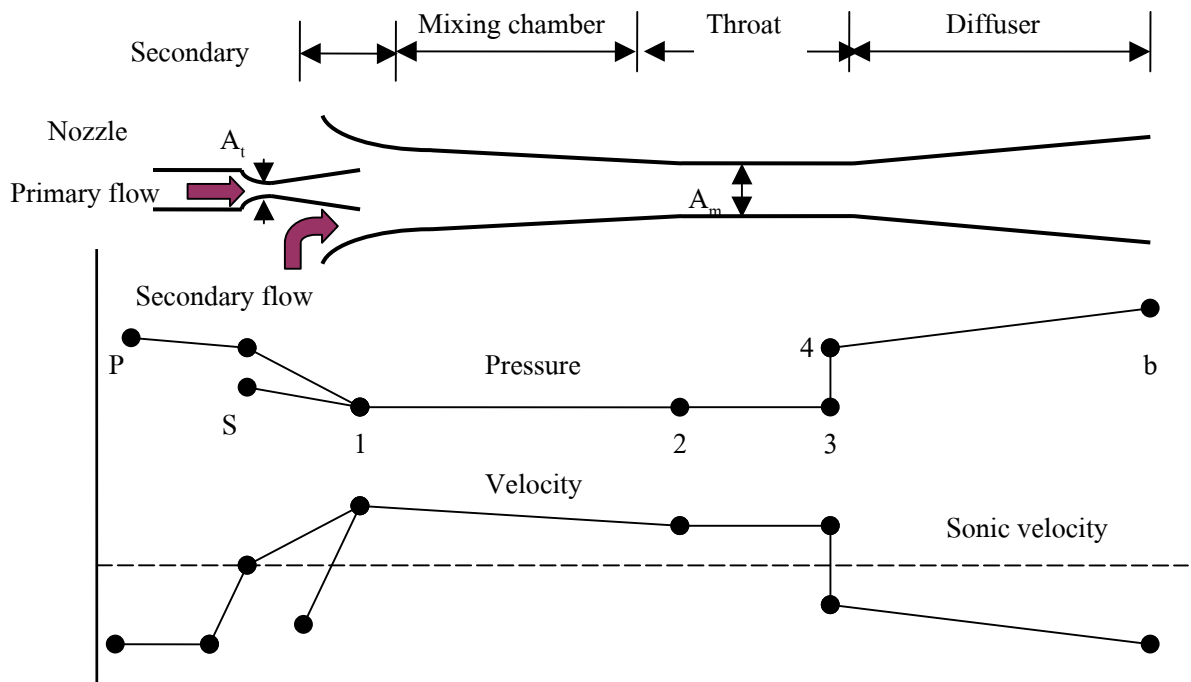
เป็นที่ทราบกันดีว่าอีเจ็คเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการถ่ายเทมวลสาร โดยใช้หลักการเหนี่ยวนำของสารหนึ่งที่มีความเร็วสูงให้อีกสารซึ่งความเร็วต่ำเคลื่อนที่ตาม งานออกแบบและพัฒนาอีเจ็คเตอร์ เพื่อใช้งานในอุตสาหกรรม ได้ดำเนินการมามากกว่า 50 ปีแล้ว แต่การศึกษาวิจัยเพื่อนำอีเจ็คเตอร์มาใช้ในระบบทำความเย็นมีขึ้นเมื่อไม่นานนี้เอง ระบบทำความเย็นที่ใช้อีเจ็คเตอร์ เป็นอุปกรณ์ในระบบ เป็นคิดใหม่และยังมีการศึกษาและพัฒนาอยู่โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทย

ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าอีเจ็คเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แทนเครื่องอัดไอ (compressor) ซึ่งปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้นใน อีเจ็คเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.2 ของไหลปฐมภูมิ (Primary fluid) จาก boiler ที่ความดันสูงเข้าสู่หัวฉีด (nozzle) ผ่านคอขวด(throat) แล้วขยายตัวออกทางปากทางออกของหัวฉีด ที่ตำแหน่ง 1 ความดันสถิตของก๊าซปฐมภูมิจะเปลี่ยนเป็นความเร็ว ทำให้ความดันที่ตำแหน่งดังกล่าว หรือ ที่ห้องผสม (mixing chamber) ต่ำลงและเหนี่ยวนำให้ของไหลทุติยภูมิ (Secondary fluid) จากเครื่องระเหย evaporator ให้มีความเร็วเพิ่มขึ้นจนมีความเร็วเท่ากับความเร็วเสียงที่ C (choking) ช่วงการผสมกันของทั้งสองสาร ค่าความดันจะคงที่ [6] จนกระทั่งเกิด shock ช่วง (3-4 ในรูปที่ 2) เนื่องจากความดันสูงบริเวณ throat และ subsonic diffuser ปรากฏการณ์ shock ทำให้ความเร็วของของผสมลดลงจาก supersonic เป็น subsonic อย่างรวดเร็ว เป็นผลให้ความดันช่วง diffuser มีค่าเพิ่มขึ้น (ช่วง 4 – b) จากผลศึกษาค่าของความดันสถิตตลอดความยาวของอีเจ็คเตอร์ของ Chunnanond และ คณะ [5] , Huag และ คณะ [7] , Eames และ คณะ [8], Chen and Sun [9] และ Aidoun และ คณะ [10] โดยให้ผลสนับสนุนข้อสมมติฐานข้างต้นได้อย่างดี

Kennan และ คณะ [11, 12] เป็นนักวิจัยกลุ่มแรกที่เสนอทฤษฎีการออกแบบอีเจ็คเตอร์ โดยการวิเคราะห์การไหลของของไหลใน 1 มิติ เพื่อการคาดคะเนคุณลักษณะของอีเจ็คเตอร์ โดยใช้ความสัมพันธ์ทางพลศาสตร์การไหลของก๊าซ ร่วมกับ ความสัมพันธ์พื้นฐานของของไหล นั่นคือ สมการอนุรักษ์มวล (conservation of mass) สมการอนุรักษ์พลังงาน (conservation of energy) และ สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (conservation of momentum) แนวความคิดนี้ให้ผลที่ยอมรับได้ และ เป็นหลักการพื้นฐานในการออกแบบอีเจ็คเตอร์สำหรับระบบทำความเย็น กันอย่างกว้างขวาง

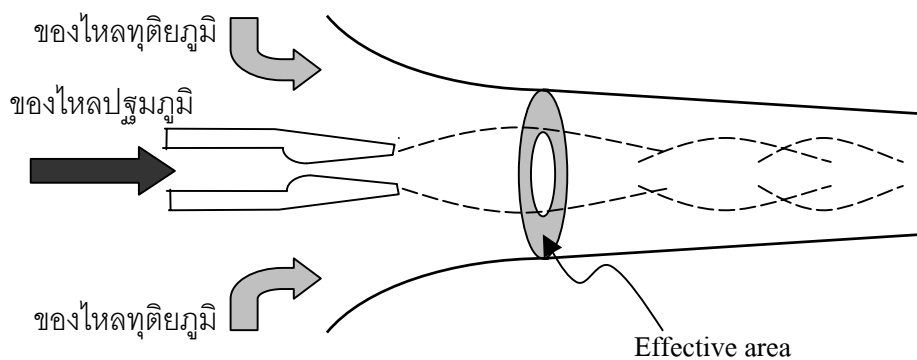


รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์



รูปที่ 2.2 คุณลักษณะการไหลในอีเจ็คเตอร์

เพื่อให้ทฤษฎีของ Keenann ถูกต้องมากยิ่งขึ้น Aphornratanat และคณะ [13], Garris Jr CA และคณะ [14] ได้นำประสิทธิภาพ isentropic ของอีเจ็คเตอร์แต่ละช่วง มาคำนวณรวม ซึ่งทำให้ผลการคาดคะเนมีค่าใกล้เคียงมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามทฤษฎีของ Keenann ก็ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่อีเจ็คเตอร์มีสมรรถนะคงที่เมื่อความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ลดลงได้ (constant capacity effect) ต่อมา Munday และ Bagster [15] ได้ศึกษาปรากฏการณ์ดังกล่าวและอธิบายว่าสารปฐุมภูมิและทุดิยภูมิจะยังไม่ผสมกันก่อนจนกว่าสารทุดิยภูมิจะมีความเร็วเท่ากับเสียง (Sonic condition) เสมือนการเคลื่อนที่ผ่านคอขวดในหัวฉีด (การ choking ของสารทุดิยภูมิ) พร้อมทั้งนิยามพื้นที่หน้าตัดที่สารทุดิยภูมิมีความเร็วเท่ากับเสียงว่า Effective area (แสดงดังรูปที่ 2.3) ซึ่งต่อมาภายหลัง Haung และคณะ [7, 16] ได้สร้างแบบจำลองจากทฤษฎีของ Munday และ Bagster โดยได้นำเอาขนาดของ Effective area มาร่วมในการคำนวณด้วยโดยสมการความสัมพันธ์ใช้ควบคู่กับผลของการทดลองพบว่า ตำแหน่งของ Effective area ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการทำงานของอีเจ็คเตอร์



รูปที่ 2.3 Effective area ที่เกิดขึ้นในอีเจ็คเตอร์

นอกจากการใช้ทฤษฎีของ Keenann และ Munday กับ Buster ช่วยในการศึกษาและอธิบายปรากฏการณ์ภายในอีเจ็คเตอร์แล้ว ยังได้มีนักวิจัยที่พยายามจะหาวิธีการอื่นเข้ามาช่วยศึกษาและออกแบบ อีเจ็คเตอร์ เช่น

Rogdakis E.D และคณะ [17] ได้นำเอาความสัมพันธ์เชิงอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) มาช่วยในการศึกษาอีเจ็คเตอร์ที่อยู่ในระบบทำความเย็นควบคู่กับทฤษฎีของ Munday และ Bagster ซึ่งให้ผลเป็นที่ยอมรับได้ แต่ความสัมพันธ์นี้ก็สามารถใช้ได้กับเฉพาะกรณีที่สารทำความเย็นที่ทางเข้าอีเจ็คเตอร์มีองค์ประกอบของเหลวอยู่ด้วย (สถานะของผสม) เท่านั้น ซึ่งไม่เหมาะกับกรณีที่สารทำงานมีสถานะเป็นไอคง

M.Ouzzane และคณะ [18] นำเอาหลักการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติในหนึ่งมิติแบบ ของไหลอัดตัวได้ (compressible fluid) ควบคู่กับสมการอนุพันธ์ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณและจำลองลักษณะการไหลที่เกิดขึ้น แต่ทั้งนี้ความสัมพันธ์นี้ก็เป็นแบบใน 1 มิติซึ่งแตกต่างจากการไหลที่เกิดขึ้นจริง

ปัจจุบันนักวิจัยได้นำความรู้ด้านระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการไหลของของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ปัญหาพลศาสตร์การไหลอย่างกว้างขวางซึ่งรวมถึงการนำไปใช้ศึกษาการไหลที่เกิดในอีเจ็คเตอร์ด้วย เนื่องจากประหยัดเวลาและงบประมาณ อีกทั้งปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะที่สูงขึ้นกว่าในอดีต ด้วยเหตุนี้ทำให้ CFD เป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการนำไปศึกษาและออกแบบอีเจ็คเตอร์ ที่ใช้ในระบบทำความเย็น ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2. ปัจจัยบ่งชี้สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์

2.1 ประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์

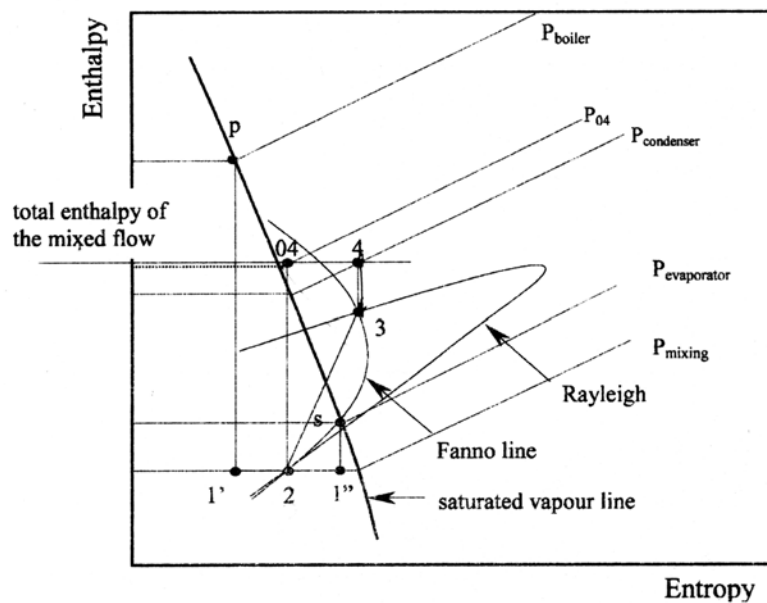
คุณลักษณะที่บ่งบอกประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์มี 2 อย่างด้วยกันคือ Entrainment ratio, R_m และ Pressure lift ratio, PLR โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{Entrainment ratio} \quad R_m = \frac{\text{mass of secondary flow}}{\text{mass of primary flow}} \quad (2.1)$$

$$\text{Pressure lift ratio} \quad PLR = \frac{\text{static pressure at diffuser exit}}{\text{static pressure of secondary flow}} \quad (2.2)$$

ทั้งนี้ค่า R_m จะส่งผลกระทบต่อความสามารถทำความเย็นของระบบโดยตรง และ PLR จะบ่งชี้ถึงข้อจำกัดในด้านการทำความดันระหว่างห้องทำความเย็นกับสิ่งแวดล้อม ตัวแปรทั้งสองนี้มักจะแปรผกผันกัน หากอีเจ็คเตอร์สามารถมี R_m ที่สูงจะทำให้ PRL มีค่าลดลง เหตุนี้ทำให้เป็นอุปสรรคในการพัฒนา อีเจ็คเตอร์ให้มีประสิทธิภาพสูง

การสูญเสียที่เกิดขึ้นในอีเจ็คเตอร์นั้นส่วนหนึ่งจะเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “shock” ของสารทำงาน เมื่อไหลผ่านอีเจ็คเตอร์ เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความดันสูญเสีย จาก Mollier's chart ของอีเจ็คเตอร์ (รูปที่ 2.4) หากกระบวนการในอีเจ็คเตอร์ไม่เกิด shock ขึ้น ความดันที่อีเจ็คเตอร์ทำได้จะสูงสุดที่ P_{04} ซึ่งอีเจ็คเตอร์ที่สามารถทำได้เช่นนี้ เป็นอีเจ็คเตอร์ในอุดมคติ (ideal ejector) เท่านั้น นอกจากนี้แล้วจากรูปที่ 2.4 จะเห็นว่าการสูญเสียอีกประการที่เกิดขึ้นก็คือกระบวนการการผสมกันของสารทำงานในอีเจ็คเตอร์ (จาก 1' ไป 2 และ 1'' ไป 2) ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วกระบวนการที่เกิดขึ้นผ่านอีเจ็คเตอร์จึงเป็นกระบวนการผันกลับไม่ได้ (irreversible process)

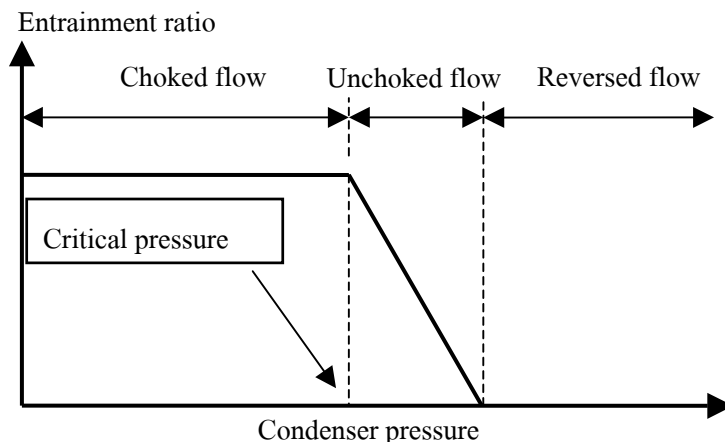


รูปที่ 2.4 Mollier's chart ของ ejector(Chunnanond K และคณะ[1])

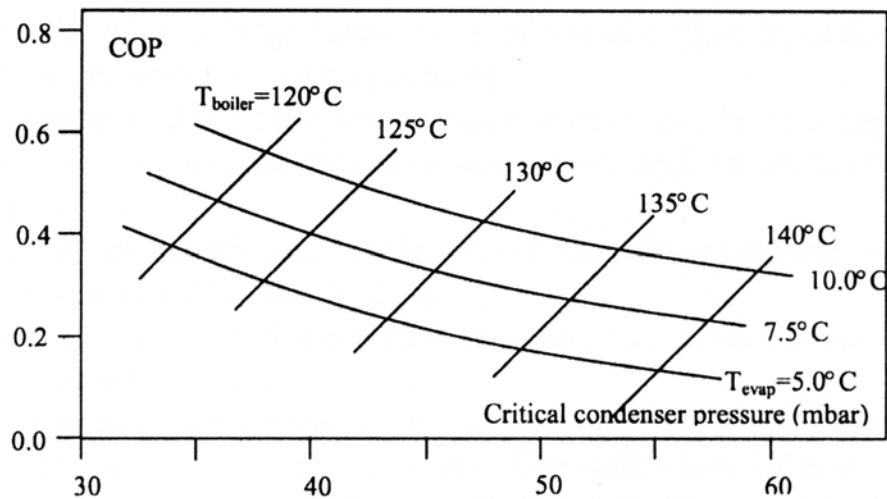
2.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์

2.2.1 ผลกระทบจากเงื่อนไขการทำงาน

ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ว่าค่า R_m จะถูกจำกัดอยู่ด้วยค่า critical back pressure (CBP) ซึ่งเป็นค่าความดันของ condenser สุดท้ายที่อีเจ็คเตอร์สามารถทำงานได้โดยสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ไม่ลดลงที่ผ่านมามีการศึกษาวิจัย สภาพการทำงานจากระบบที่มีผลต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์อย่างกว้างขวาง โดยทำการการศึกษาคุณลักษณะทั่วไปของอีเจ็คเตอร์ เมื่อเปลี่ยนแปลงไปสภาพการทำงาน ของเครื่องควบแน่น, เครื่องกำเนิดไอ และ เครื่องระเหย จากการศึกษาที่ผ่านมา [6, 9,13,15,17-23] พบว่าเมื่อลดอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ และเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องระเหย ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์จะมีสมรรถนะทำความเย็นสูงขึ้น ซึ่ง Aphornratana [1] เสนอแผนผังคุณลักษณะของอีเจ็คเตอร์ ดังรูปที่ 2.5 โดยทั่วไปแล้วเมื่อเปลี่ยนแปลง ความดันของเครื่องควบแน่น คุณลักษณะของอีเจ็คเตอร์ จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.6 และสามารถแบ่งช่วงการไหลที่เกิดขึ้นในอีเจ็คเตอร์ได้ออกเป็น 3 ช่วงคือ 1) Choked flow 2) Unchoked flow และ 3) Reversed flow เมื่อความดันของ condenser ต่ำกว่า CBP อีเจ็คเตอร์จะมีค่า R_m คงที่ ทำให้ สมรรถนะการทำความเย็นมีค่าคงที่ด้วย พฤติกรรมที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ Munday และ Bagster ได้อธิบายไว้ว่าสาเหตุจากการเกิด choking ของสารทำงานที่มาจากเครื่องระเหย ภายในห้องผสม [15] สังเกตได้จากอัตราการไหลของของไหลทุติยภูมิจะไม่ขึ้นอยู่กับค่าความดันของ condenser แต่จะสามารถมีค่าสูงได้ขึ้นด้วยการเพิ่มความดันของ evaporator เท่านั้น



รูปที่ 2.5 คุณลักษณะโดยทั่วไปของอีเจ็คเตอร์

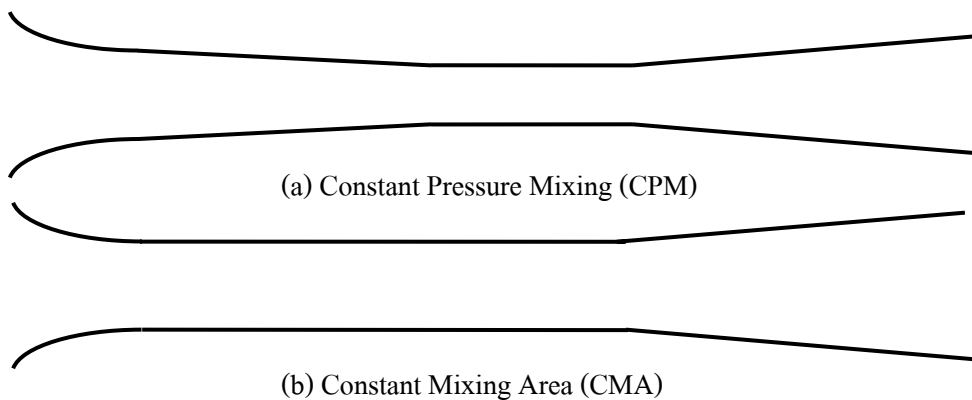


รูปที่ 2.6 ผลกระทบจากอุณหภูมิ boiler ที่มีต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ (Chunnanond และคณะ[1])

2.2.2 ผลกระทบจากรูปร่างของอีเจ็คเตอร์

โดยทั่วไปอีเจ็คเตอร์ที่ใช้ในระบบทำความเย็นจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทแบ่งตามรูปร่างของอีเจ็คเตอร์ อันได้แก่ อีเจ็คเตอร์แบบ constant pressure mixing (CPM) และ constant mixing area (CMA)

(แสดงดังรูปที่ 2.7) CMA อีเจ็คเตอร์ จะให้ความสามารถด้านการเหนี่ยวของไหลทุติยภูมิได้มากกว่าแบบ CPM แต่ทำความดันได้น้อยกว่า [11-12, 19] ดังนั้นการใช้งานอีเจ็คเตอร์ทั้งสองประเภทจึงแตกต่างกันตามการประยุกต์ใช้ สำหรับระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์แล้วอีเจ็คเตอร์แบบ CPM จะมีความเหมาะสมเพื่อการใช้งานมากกว่าแบบ CMA [11] เนื่องจากอีเจ็คเตอร์จะต้องทำงานระหว่างสองช่วงความดัน



รูปที่ 2.7 ประเภทของอีเจ็คเตอร์ (a) อีเจ็คเตอร์แบบ CPM (b)อีเจ็คเตอร์แบบ CMA

โดยทั่วไปอีเจ็คเตอร์มีรูปร่างองค์ประกอบดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งแบ่งออกเป็น primary nozzle ภายในจะมีขาคอดสำหรับเปลี่ยนความดันสถิตเป็นความเร็ว และ ตัวอีเจ็คเตอร์ที่แบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ secondary inlet, mixing chamber, throat และ diffuser ซึ่งผลขององค์ประกอบรูปร่างที่มีต่อประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ ESDU (Engineering Science Design Unit) [24] ซึ่งได้เสนอข้อเสนอแนะไว้ดังนี้

หัวฉีดสารปฐมภูมิ (Primary nozzle) และ ตำแหน่งของหัวฉีด (position of nozzle): เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนความดันสถิตของของไหลให้เป็นความเร็ว ภายในหัวฉีดจะมีขาคอด และทั่วไปจะเป็นชนิด convergent-divergent เพื่อการควบคุมรูปร่างและเพิ่มความเร็วของของไหลที่ปากทางออกของหัวฉีด ขนาดของพื้นที่หน้าตัดของคอขอดในหัวฉีดนั้นจะมีผลต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์มาก (จะกล่าวรายละเอียดในหัวข้ออื่นถัดไป) นอกจากนี้แล้วตำแหน่งของหัวฉีดยังมีผลต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์เช่นกันและยังไม่มีหลักการที่แน่นอนสำหรับกำหนดตำแหน่งหัวฉีดที่เหมาะสม โดยทั่วไปเมื่อเคลื่อนหัวฉีดเข้าไปเข้าหาห้องผสมมากขึ้น ความสามารถในการเหนี่ยวนำของอีเจ็คเตอร์จะลดลง [5, 11, 25] เนื่องจากขนาดช่องทางเข้าของสารทุติยภูมิมีขนาดเล็กลง การสูญเสียที่เกิดขึ้นในหัวฉีดส่วนใหญ่แล้วจะเกิดจากความเสียดทานระหว่างผิวผนังกับสารทำงานซึ่งจะมากขึ้นตามความเร็วของของไหลที่สูงมาก ดังนั้นในการสร้างหัวฉีดผิวภายในจะต้องละเอียดมากเพื่อลดการสูญเสียความดันที่เกิดขึ้น

ทางเข้าสารทุติยภูมิ (Secondary inlet): เป็นอุปกรณ์กำหนดหรือบังคับมุมของสารทุติยภูมิ ก่อนเข้าผสมกับสารปฐมภูมิที่ห้องผสม เนื่องจากความเร็วที่ทางเข้าของสารทุติยภูมิมีความเร็วต่ำทำให้การสูญเสียที่เกิดขึ้นจะน้อยกว่าที่เกิดขึ้นในหัวฉีด อย่างไรก็ตามท่อทางเข้าของสารทุติยภูมิจะไม่ขนานกับทิศทางของไหลของสารปฐมภูมิ แต่จะเป็นท่อดูดที่ตั้งฉากกับหัวฉีด ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียได้เช่นกัน หากมุมของท่อดูดนี้มีขนาดโตมากเกินไป

ห้องผสม (Mixing chamber) และ throat: เป็นช่วงบริเวณที่ของไหลทั้งสองเข้ามาผสมกัน ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างสารทั้งสอง ก่อนถูกส่งออกไปยัง diffuser ด้วยเหตุนี้รูปร่างของห้องผสมจึงมีผลกับประสิทธิภาพการผสมกันของสารทั้งสองโดยตรง หากผสมกันได้ดีอีเจกเตอร์จะสามารถทำความดันได้สูงขึ้น ความยาวของห้องผสมและ throat ก็มีผลกับสมรรถนะของอีเจกเตอร์ Chunnanond แสดงให้เห็นว่าความยาวของ ห้องผสมจะไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการเหนี่ยวนำมวลสารของอีเจกเตอร์แต่จะส่งผลต่อความดันที่อีเจกเตอร์สามารถทำได้ [25]

Diffuser: เป็นช่วงปรับความดันของอีเจกเตอร์ให้สามารถทำงานได้เท่ากับที่ทางออกหรือเท่ากับความดันของอุปกรณ์ที่ต่อพ่วงอยู่ด้านปากทางออกของอีเจกเตอร์ ทั้งนี้มุมและความยาวของ Diffuser จะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของอีเจกเตอร์ เนื่องจากจะมีผลโดยตรง ต่อการสูญเสียที่เกิดขึ้นใน Diffuser

Area ratio (AR): เป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดที่เล็กที่สุดของห้องผสมต่อพื้นที่หน้าตัดที่เล็กที่สุดของคอคอดในหัวฉีดดังกล่าว

$$AR = \frac{A_m}{A_t} \quad (2.3)$$

ค่า AR เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะของอีเจกเตอร์อย่างมาก มีนักวิจัยได้ศึกษาและเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับหาค่าที่เหมาะสมกับงานประยุกต์ใช้ โดยทั่วไปแล้วหากค่า AR สูงอีเจกเตอร์นั้นจะสามารถเหนี่ยวนำสารทำงานได้มากขึ้นแต่ความดันที่ทำได้จะลดลง แต่กระนั้นค่า AR ที่เหมาะสมก็ขึ้นอยู่กับ เงื่อนไขการทำงานหรือเงื่อนไขการออกแบบของอีเจกเตอร์ด้วย [6, 9,13,15,17-23]

3. การออกแบบอีเจกเตอร์

ทั่วไปแล้วการออกแบบอีเจกเตอร์จะใช้หลักการและคำแนะนำของ ESDU ซึ่งเป็น มาตรฐานการออกแบบ ที่ใช้ทฤษฎีร่วมกับผลการทดลอง โดยออกแบบรูปร่างได้ใน 1 มิติ กล่าวคือ สามารถคำนวณ เพื่อกำหนดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางอีเจกเตอร์ได้ 3 ตำแหน่ง คือ ที่หน้าตัดที่เล็กที่สุดของห้องผสม คอคอดและปากทางออกของหัวฉีด โดย ESDU จะแนะนำช่วงประมาณความยาวและรูปร่างของอีเจกเตอร์โดยใช้ข้อมูลจากการทดลอง จะเห็นได้ว่าอีเจกเตอร์ที่ออกแบบโดย ESDU อาจจะไม่ได้ออกแบบรูปร่างที่ดีเพราะมีการประมาณความยาวและบางองค์ประกอบของอีเจกเตอร์ มีนักวิจัยหลายท่านที่พยายามค้นหารูปร่างลักษณะอีเจกเตอร์ที่ให้สมรรถนะที่ดีกว่าที่มีอยู่ในปัจจุบัน

Eames [4] เสนอหลักการออกแบบ diffuser ของอีเจ็คเตอร์ใหม่โดยใช้แนวคิด “การเท่ากันของอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมภายใน diffuser ของอีเจ็คเตอร์ (constant rate of momentum change, CRMC)” เพื่อลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นจาก Shock ที่เกิดขึ้นในอีเจ็คเตอร์ พบว่า อีเจ็คเตอร์รูปร่างใหม่นี้สามารถทำความดันได้สูงกว่าอีเจ็คเตอร์ทั่วไปประมาณ 40% โดยความสามารถในการเหนี่ยวนำ(R_m)ไม่ลดลง

จากการศึกษาของ Garris [26, 27] ที่พยายามเพิ่มประสิทธิภาพอีเจ็คเตอร์ ด้วยการลดความเร็วของการขยายของก๊าซปฏุมุมิ โดยให้ขยายตัวผ่าน self-rotating skew การเคลื่อนที่แบบหมุนของของไหลปฏุมุมิในห้องผสมจะช่วยลดการสูญเสียอันเนื่องมาจากกระบวนการผสมกัน จากแนวความคิดนี้ ต่อมา Chang YJ และ Chen YM [28] สร้างหัวฉีดเป็นแบบ petal nozzle จากการทดลองพบว่า อีเจ็คเตอร์สามารถทำความดันได้สูงขึ้นและค่า R_m ค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามอีเจ็คเตอร์ของ Garris และ Chang ก็มีโครงสร้างที่ยุ่งยากกว่าอีเจ็คเตอร์รูปร่างทั่วไป ทำให้เป็นปัญหาสำหรับการนำไปใช้ในงานจริง

4. แบบจำลอง CFD ของอีเจ็คเตอร์

กลุ่มนักวิจัยเรื่องอีเจ็คเตอร์ได้พยายามศึกษาและค้นคว้าข้อมูลและคุณลักษณะต่างๆ ด้วยวิธีการทดลองแล้วเปรียบเทียบกับทฤษฎี แต่ได้มีผู้ที่พยายามลดจำนวนการทดลองจริงโดยใช้ CFD ช่วยจำลองพฤติกรรมภายในอีเจ็คเตอร์ เพื่อลดต้นทุนและเวลาก่อนที่จะต้องไปทำการทดลองจริง

Riffat และคณะ [29] ทำการจำลองการไหลที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์ ในระบบทำความเย็นที่ใช้ methanol เป็นสารทำความเย็น โดยใช้แบบจำลองการไหลใน 3 มิติ จำลองการปั่นป่วนเป็นแบบ $k-\epsilon$ model แบบ Renormalization (RNG) และ กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ที่ทางเข้า และออกเป็น flow inlet และ flow outlet ตามลำดับ ทั้งนี้เพื่อการศึกษาผลกระทบของคุณลักษณะของอีเจ็คเตอร์เมื่อเปลี่ยนแปลงตำแหน่งปากทางออกของ nozzle (nozzle exit position, NXP) และทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จาก CFD ซึ่งพบว่าให้ผลที่ใกล้เคียงกัน

Rusly และคณะ [3, 30] ได้ทำการจำลองอีเจ็คเตอร์เป็นแบบ 2 มิติและปรับปรุงแบบจำลองการปั่นป่วนเป็น $k-\epsilon$ model แบบ realisable ซึ่งเป็น turbulent model ใหม่ โดย กำหนดแบบจำลองสมบัติของสารทำความเย็นเป็น real gas model ทำให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น นอกจากนี้แล้ว Chunnanond และคณะ [25], และ Piantong และคณะ [31], นำแบบจำลองของ Rusly ช่วยศึกษาถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่มีต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ และ ตรวจสอบผลจาก CFD กับผลการทดลองพบว่าให้ผลที่ใกล้เคียงกัน

การศึกษาของ Bartosiewicz และคณะ [32] เพื่อทดสอบ แบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้สำหรับคำนวณในCFD โดยนำผล เปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่า แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุด นอกจากนี้แล้ว Y.Bartosiewicz และคณะ [34] ยังได้เปรียบเทียบผลของ CFD กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Aidoun และคณะ [10] ซึ่งวิเคราะห์การไหลใน 1 มิติ ปรากฏว่า CFD ให้ผลดีกว่า ทั้งยังสามารถศึกษาพฤติกรรมการไหลในอีเจกเตอร์ในช่วง reverse flow ได้ด้วย

บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

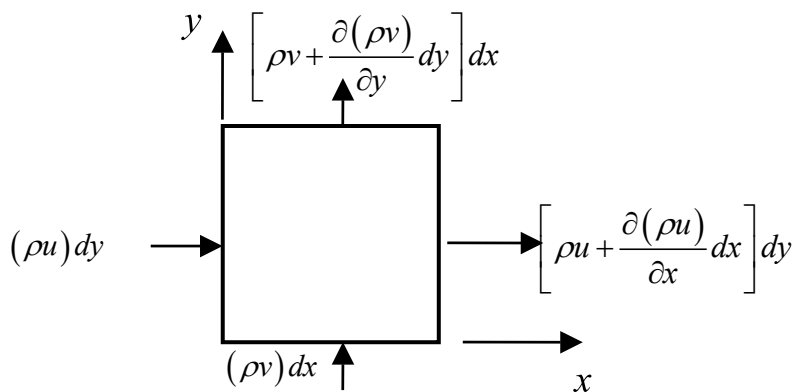
จากบทที่ผ่านมาเราได้เสนอวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ของนักวิจัยท่านอื่นซึ่งได้ทำมาก่อนหน้า เพื่อเป็นการเสนอแนวทางการศึกษาวิจัยในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ โดยทั่วไปแล้วการศึกษาวิจัยจะกระทำภายใต้ข้อสมมติฐานหรือทฤษฎีพื้นฐานของของไหล ดังนั้นในบทนี้เราจึงจะได้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการไหลที่เกิดขึ้นในอีเจ็คเตอร์ อันได้แก่ สมการอนุรักษ์ของของไหล การจำลองความปั่นป่วน การไหลแบบขุบตัว [34, 35, 36, 37] แบบจำลองการไหลใน 1 มิติของอีเจ็คเตอร์ และนอกจากนี้ยังจะได้นำเสนอระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาการไหลที่เกิดขึ้นในอีเจ็คเตอร์

1. สมการอนุรักษ์การไหลของของไหล

สมการการไหลเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ของของไหลที่เกิดขึ้นจริงในการไหล ซึ่งจะแสดงในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ ในเทอมของการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆของของไหลที่เกิดขึ้น สมการเหล่านี้ได้มาจากกฎการอนุรักษ์ 3 ข้อได้แก่ การอนุรักษ์มวล อนุรักษ์พลังงาน และ อนุรักษ์โมเมนตัม ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.1 สมการเชิงอนุพันธ์มวล

พิจารณาเมื่อของไหลเดินทางผ่านกรอบเล็กๆขนาด dx และ dy ดังรูปที่ 3.1 เนื่องจากหลักความเป็นจริงที่ว่า มวลไม่สามารถสูญหายไปไหน ดังนั้นมวลที่ไหลเข้าและไหลออกบริเวณควบคุมนี้จะเท่ากันนั่นคือ



รูปที่ 3.1 รูปแบบของมวลผ่านกรอบขนาดเล็ก

$$\text{ในทิศแกน } x; \quad \frac{\partial}{\partial t} \int_{\text{CV}} u + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{r u}{\rho} \right) dx dy - \int_{\text{CV}} [r u] dy = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{r u}{\rho} \right) dx dy \quad (3.1)$$

$$\text{ในทิศแกน } y; \quad \frac{\partial}{\partial t} \int_{\text{CV}} v + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{r v}{\rho} \right) dy dx - \int_{\text{CV}} [r v] dx = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{r v}{\rho} \right) dy dx \quad (3.2)$$

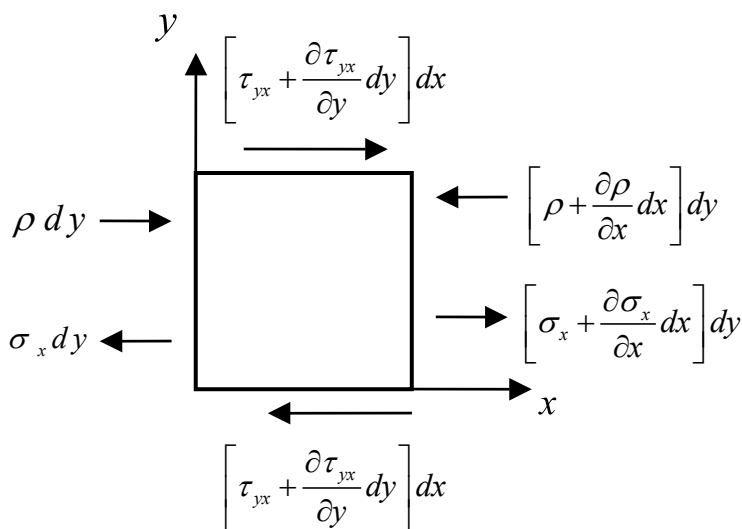
โดย u และ v เป็นความเร็วย่อยในแนวแกน x และ y ตามลำดับ ซึ่ง ความเร็วย่อยนี้จะมีค่าขึ้นอยู่กับพิกัด x, y และ นั่นคือ $u = u(x, y, t)$ และ $v = v(x, y, t)$ เนื่องจากปริมาณมวลในกรอบเล็ก ๆ นี้ คือ $r dx dy$ ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลที่ลดลงไปคือ $-\frac{\partial r}{\partial t} dx dy$ หมายความว่าปริมาณที่เพิ่มขึ้นของมวลเท่ากับมวลที่ลดลงในกรอบเล็ก ๆ นี้ได้ สมการที่ (3.4) ซึ่งเป็นสมการเชิงอนุพันธ์มวลเป็นสมการอธิบายการไหลสมการแรก

$$\frac{\partial r}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{r u}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{r v}{\rho} \right) = 0 \quad (3.3)$$

$$\text{หรือ} \quad \frac{\partial r}{\partial t} + \text{div}(r \vec{V}) = 0 \quad (3.4)$$

1.2 สมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัม

พิจารณามวลของไหลเล็กน้อยขนาด dx และ dy ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 รูปแบบของแรงที่กระทำกับมวลของไหลขนาดเล็ก

จากกฎข้อที่สองของนิวตัน $F = ma$ เมื่อพิจารณาแรงรวมในทิศแกน x จะได้

$$F_x = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{CV} \rho u dx dy \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{CV} \rho u^2 dx dy \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{CV} \rho uv dx dy \right) + \int_{CV} r f_x dx dy \quad (3.5)$$

มวลของก้อนของไหลนี้คือ $m = \rho \int_{CV} dx dy$ และ ความเร่งตามแนวแกน x คือ $a_x = \frac{Du}{Dt}$ แทนค่า m, a_x ลงในกฎข้อที่สองของนิวตัน สมการที่ (2.5) จะได้

$$\rho \frac{Du}{Dt} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{CV} \rho u^2 dx dy \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{CV} \rho uv dx dy \right) + \int_{CV} r f_x dx dy \quad (3.6a)$$

ทำนองเดียวกันตามแนวแกน y จะได้

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{CV} \rho v^2 dx dy \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{CV} \rho uv dx dy \right) + \int_{CV} r f_y dx dy \quad (3.6b)$$

จากสมการที่ (3.7 a และ 3.7 b) เป็นสมการอนุพันธ์สามัญซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ธรรมดาเช่นสมการที่ (3.4) จะได้

ในทิศแกน x

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u^2) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho uv) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{CV} \rho u^2 dx dy \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{CV} \rho uv dx dy \right) + \int_{CV} r f_x dx dy \quad (3.7a)$$

ในทิศแกน y

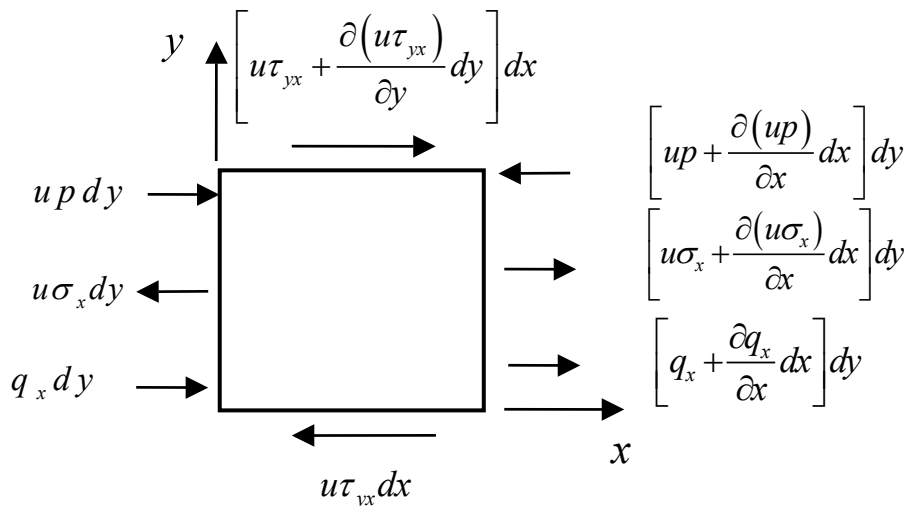
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v^2) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho uv) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{CV} \rho v^2 dx dy \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{CV} \rho uv dx dy \right) + \int_{CV} r f_y dx dy \quad (3.7b)$$

สมการ (3.7a-3.7b) นี้แสดงถึงสมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัมของมวลของไหล

1.3 สมการเชิงอนุพันธ์พลังงาน

พิจารณางานและพลังงานที่เกิดขึ้นกับก้อนมวลขนาด dx และ dy ดังรูปที่ 3.3 หลักการอนุพันธ์พลังงานของของไหลนั้น ใช้กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิก ในการสร้างความสัมพันธ์ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ นั่นคือ “อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในก้อนมวลจะเท่ากับปริมาณความร้อนที่ให้แก่มวลบวกกับอัตราของงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงต่างๆที่กระทำบนก้อนมวลนั้น” [7] ซึ่งจะได้สมการเชิงอนุพันธ์สมบูรณ์เป็น

$$\begin{aligned} \rho \frac{D}{Dt} e + \frac{V^2}{2} = \rho \bar{Q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{T}{\partial y} \right) - \frac{\partial (up)}{\partial x} - \frac{\partial (vp)}{\partial y} + \frac{\partial (u s_x)}{\partial x} + \frac{\partial (u t_{yx})}{\partial y} \\ + \frac{\partial (v s_y)}{\partial y} + \frac{\partial (v t_{xy})}{\partial x} + \rho \bar{f} \cdot \bar{V} \end{aligned} \quad (3.8)$$



รูปที่ 3.3 พิจารณางานและพลังงานที่เกิดขึ้นกับก้อนมวลขนาด dx และ dy [6]

จากสมการ (3.8) สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ธรรมดาได้เป็น

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho e + \frac{V^2}{2} \right) + \text{div} \left(\rho \bar{Q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{T}{\partial y} \right) - \frac{\partial (up)}{\partial x} - \frac{\partial (vp)}{\partial y} + \frac{\partial (u s_x)}{\partial x} + \frac{\partial (u t_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (v s_y)}{\partial y} + \frac{\partial (v t_{xy})}{\partial x} + \rho \bar{f} \cdot \bar{V} \right) \end{aligned} \quad (3.9)$$

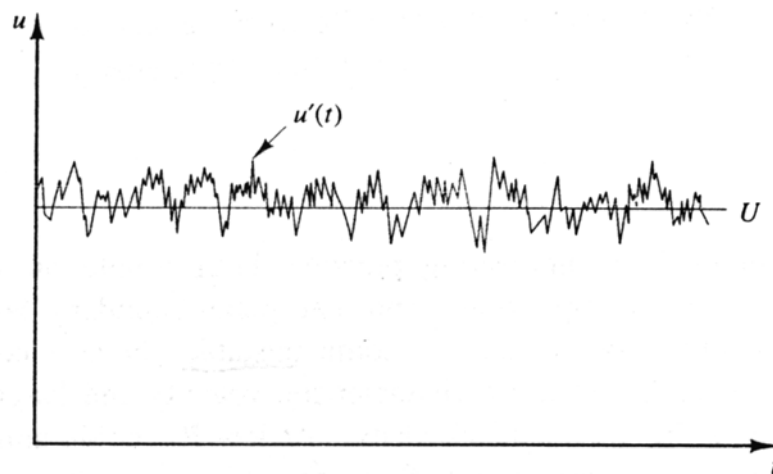
เราเรียกกลุ่มสมการที่เกิดขึ้นจากสมการที่ (3.4, 3.7) และ (3.9) ว่าระบบสมการ Navier-Stokes equations เป็นระบบสมการตัวแทนที่เกิดขึ้นในปรากฏการณ์ไหลของของไหล จะเห็นว่าสมการเหล่านี้ อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ การจะแก้ปัญหากลไกการไหล ด้วยการแก้สมการ Navier-Stokes ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์โดยตรงนั้นเป็นเรื่องที่ยากในทางปฏิบัติ แต่เราสามารถนำความรู้ทางวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical Method) มาช่วยในการหาคำตอบของระบบสมการนี้ได้ เป็นที่มาของ Computational Fluid Dynamics หรือ CFD ในลำดับต่อไปจะเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปรากฏการณ์ไหลต่างๆ ในโปรแกรม CFD (code FLUENT) [37]

2. แบบจำลองความปั่นป่วนของการไหล

การไหลที่ค่า Reynolds's number สูงการไหลจะเป็นแบบปั่นป่วนซึ่งการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของการไหลจะไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นการแก้ปัญหากลไกการไหลจึงด้วยวิธีเชิงตัวเลขจึงเป็นเรื่องยากและใช้เวลามาก จึงมีผู้พยายามที่พยายามจำลองของความไม่เป็นระเบียบของการไหลเพื่อใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหล แต่ก่อนที่จะกล่าวถึงแบบจำลองเหล่านั้นจำเป็นต้องทราบถึงพฤติกรรมของความปั่นป่วนของการไหลและสมการค่าเฉลี่ยของ Reynolds เนื่องจากเป็นแนวคิดพื้นฐานในการจำลองการไหลแบบปั่นป่วน

2.1 สมการค่าเฉลี่ยของ Reynolds

ความเร็วและค่าคุณสมบัติต่างๆของการไหลแบบปั่นป่วนจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ไม่เป็นระเบียบดังรูปที่ 3.4 โดยให้ $u(x, y, z, t)$ เป็นคุณสมบัติของของไหล เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งและเวลา



รูปที่ 3.4 การเปลี่ยนแปลงอย่างไม่เป็นระเบียบของการไหลแบบปั่นป่วน [36]

เพื่อให้ง่ายขึ้นในการแก้ปัญหาระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์ Osborne Reynolds ได้กำหนดค่าเฉลี่ย $\bar{u}$ จาก

$$\bar{u} = \frac{1}{\Delta t} = \int_0^{\Delta t} u dt \quad (3.10)$$

ทั้งนี้ Δt เป็นช่วงเวลาเฉลี่ย ยังมีช่วงกว้างยิ่งได้ค่าที่ถูกต้อง โดยมากจะกำหนดให้ $\Delta t \rightarrow \infty$ โดยกำหนดคุณสมบัติของการไหลเป็น $u_i = \bar{u}_i + u'_i$ ในรูปของเวกเตอร์เป็น $U = \bar{U} + U'$ และเมื่อนำสมการนี้ไปแทนในระบบสมการเวียร์-สโตกส์ จะได้

สมการการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{U}) = 0 \quad (3.11)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมใน 3 มิติ

$$\frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{u} \bar{U}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad} \bar{u}) + \left[-\frac{\partial(\rho \bar{u}^2)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \bar{u}' v')}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \bar{u}' w')}{\partial z} \right] + \rho f_x \quad (3.12a)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{v})}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{v} \bar{U}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad} \bar{v}) + \left[-\frac{\partial(\rho \bar{u}' v')}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \bar{v}^2)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \bar{v}' w')}{\partial z} \right] + \rho f_y \quad (3.12b)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{w})}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{w} \bar{U}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad} \bar{w}) + \left[-\frac{\partial(\rho \bar{u}' w')}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \bar{v}' w')}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \bar{w}^2)}{\partial z} \right] + \rho f_z \quad (3.12c)$$

สมการข้างต้นนี้เราเรียกว่าสมการของ Reynolds หรือ Reynolds-Average Navier-Stokes equation (RANS) จะเห็นได้ว่ารูปสมการนี้คล้ายกับสมการนาเวียร์-สโตกส์เดิม แต่มีเทอมความเค้นในวงเล็บทางขวามือเพิ่มเข้ามา ใน 3 มิติ จะมีทั้งหมดหกเทอมด้วยกัน เราเรียกความเค้นเหล่านี้ว่า Reynolds stresses จากการทดลองของ Boussineq ได้เสนอความสัมพันธ์ของความเค้นนี้ที่มีกับความเร็วเฉลี่ยของการไหล จากอัตราการเปลี่ยนรูปของอิลิเมนต์ของไหล ไว้ดังนี้

$$\text{Renolds stresses, } -\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial z_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (3.13)$$

โดย μ_t คือ Turbulent viscosity เป็นตัวแปรที่จำเป็นจะต้องสร้างสมการเข้ามาเพิ่มเติมเพื่อให้ระบบสมการสามารถหาคำตอบได้ สมการเหล่านี้คือแบบจำลองของการไหลแบบปั่นป่วน

2.2 แบบจำลองความปั่นป่วน แบบ Standard $k - \varepsilon$

แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard $k - \varepsilon$ เป็นแบบจำลองที่ turbulent viscosity เป็นฟังก์ชันของ พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (turbulence kinetic energy, k) และ อัตราการกระจายของพลังงานจลน์ (dissipation of turbulence kinetic energy, ε) โดยมีสมการส่งถ่าย 2 ชุดเป็นสมการของ k และ ε อย่างละชุดซึ่ง ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \bar{U}) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad } k \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \bar{U}) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \text{grad } \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (3.15)$$

โดย G_k คือ ค่าพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเร็วเฉลี่ย G_b คือ ค่าพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากการลอยตัว (buoyancy) Y_M คือ ค่าผลของการกกดัดได้ที่มีผลต่อความปั่นป่วนของของไหล $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ เป็นค่าคงที่ σ_k และ σ_ε เป็นค่า Prandtl number ของ k และ ε ตามลำดับ

แบบจำลองของค่า turbulent viscosity, μ_t คือ

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.16)$$

ซึ่ง C_μ เป็นค่าคงที่ โดยทั่วไปค่าคงที่ในสมการถ่ายเทข้างต้นจะมีค่าเป็น

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

2.2.1 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k - \varepsilon$

RNG $k - \varepsilon$ เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่ประดิษฐ์ขึ้นมาจากสมการนาเวียร์-สโตกส์ที่ใช้ระเบียบวิธีที่เรียกว่า Renormalization Group (RNG) [37] แบบจำลองนี้จะมีค่าคงที่ที่แตกต่างและเพิ่มบางเทอมจากแบบจำลอง Standard $k - \varepsilon$ ซึ่งมีสมการส่งถ่ายคือ

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \bar{U}) = \text{div}[\alpha_k \mu_{eff} \text{grad } k] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \bar{U}) = \text{div}[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \text{grad } \varepsilon] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (3.18)$$

ค่า G_k , G_b , และ Y_M มีความหมายเช่นเดียวกับสมการส่งถ่ายของแบบจำลอง Standard $k - \varepsilon$ ขณะที่ α_k และ α_ε คือ inverse effective Prandtl numbers สำหรับ k และ ε ตามลำดับ แบบจำลองของค่า turbulent viscosity ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ สำหรับ แบบจำลอง RNG $k - \varepsilon$ คือ

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}}\right) = 1.72 \frac{\hat{\nu}}{\sqrt{\hat{\nu}^3 - 1 + C_v}} \quad (3.19)$$

โดย

$$\hat{\nu} = \mu_{eff} / \mu \text{ และ } C_v \approx 100$$

สมการ (3.19) จะใช้ได้เมื่อการไหลนั้นเป็นการไหลที่มีค่า Reynolds number ต่ำ หากแต่ถ้าการไหลนั้นมีค่าที่สูงจะต้องใช้สมการ (3.17) แทนโดยกำหนดให้ค่า $C_\mu = 0.0845$ การคำนวณเพื่อหาค่า α_k และ α_ε นั้นใช้สมการ

$$\left| \frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929} \right|^{0.6321} \left| \frac{\alpha - 2.3929}{\alpha_0 - 2.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}} \quad (3.20)$$

ถ้าหากเป็นกรณีค่า Reynolds number สูง α_k และ $\alpha_\varepsilon \approx 1.393$ ค่า R_ε ในสมการ (3.18) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\text{Re} = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.21)$$

ค่าคงที่สำหรับสมการ (3.17) และ (3.18) จะมีค่าเป็น $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$

2.2.2 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Realizable $k - \varepsilon$

แบบจำลอง Realizable $k - \varepsilon$ ถูกคิดขึ้นโดยกลุ่มนักวิจัยของ Shih [9] เป็นแบบจำลองที่แตกต่างจาก 2 แบบข้างต้น คือ การประดิษฐ์ความสัมพันธ์ eddy-viscosity สมการที่ (3.16) โดยหาค่า C_μ มาจากข้อเสนอของ Reynolds และสร้างสมการของ ε ด้วยสมการพลศาสตร์ แบบจำลอง Realizable $k - \varepsilon$ มีสมการส่งถ่ายคือ

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \bar{U}) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad } k \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \bar{U}) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad } \varepsilon \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (3.23)$$

ซึ่ง

$$C_1 = \max \left[0.43 \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (3.24)$$

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (3.25)$$

ความสัมพันธ์ที่ใช้สำหรับหา turbulent viscosity นั้นใช้สมการ (3.16) เช่นเดียวกับแบบจำลอง $k - \varepsilon$ มาตรฐาน แต่ในการหาค่า C_μ จะใช้ความสัมพันธ์ของ

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S \frac{k U^*}{\varepsilon}} \quad (3.26)$$

ณ ที่นี้ U^* หาได้จาก

$$U^* \equiv \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \overline{\Omega_{ij}} \overline{\Omega_{ij}}}$$

และ

$$\begin{aligned} \overline{\Omega_{ij}} &= \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk} \omega_k \\ \Omega_{ij} &= \overline{\Omega_{ij}} - \varepsilon_{ijk} \omega_k \end{aligned}$$

ซึ่ง $\overline{\Omega}_{ij}$ คือ Mean rate-of-rotation tensor โดยค่าคงที่ $A_0 = 4.04$, $A_s = \sqrt{6} \cos \phi$ ทั้งนี้

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6W}), W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\bar{S}}, \bar{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

ค่าคงที่ สำหรับสมการส่งถ่านนั้นจะมีค่าดังนี้ $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_2 = 1.9$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$

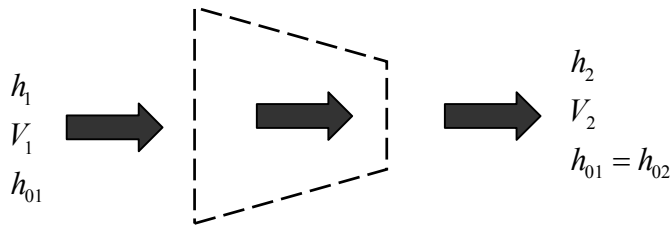
จากหัวข้อนี้ได้เสนอสมการรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นจริงและแบบจำลองความปั่นป่วนของการไหลซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่ค่อนข้างครอบคลุมทุกกรณี แต่ในเพื่อลดความยุ่งยากในการแก้ความสัมพันธ์เหล่านี้ เทอมบางเทอมในสมการอนุพันธ์จะถูกกำหนดให้ง่ายขึ้นหรือตัดออกตามแล้วแต่เงื่อนไขต่างๆของการไหล เช่นเดียวกับกรณีการศึกษากรณีการไหลที่เกิดขึ้นในอีเจกเตอร์ ที่สมมติให้เป็นการไหลแบบอัดตัว ของก๊าซอุดมคติ และการไหลเป็นแบบสภาวะคงที่

3. การไหลแบบอัดตัว (Compressible flow)

การไหลแบบอัดตัวได้ เป็น การไหลที่ความหนาแน่นของของไหลเปลี่ยนแปลงและมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของของไหล โดยทั่วไปแล้วมักจะเกิดขึ้นกับของไหลที่อยู่ในสถานะก๊าซ เช่น การเคลื่อนที่ของอากาศความดันสูงผ่านท่อขอคอด การแหวกอากาศของเครื่องบินที่บินด้วยความเร็วเหนือเสียง และ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในอีเจกเตอร์ การไหลแบบอัดตัวได้ของของไหลส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ที่ไม่สามารถเกิดได้กับการไหลโดยทั่วไป ได้แก่ การเกิด Shock wave และการไหลแบบ Choking ทั้งนี้ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับ ความเร็วของการไหล และ การเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของท่อ ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในระดับต่อไป

3.1 คุณสมบัติรวมของของไหล (Stagnation properties)

กระบวนการอุณหพลศาสตร์ทั่วไปจะไม่นำความเร็วของของไหลมาพิจารณาด้วย เนื่องจากอิทธิพลของความเร็วที่มีต่อคุณสมบัติของสารมีน้อย แต่กรณีการไหลแบบอัดตัวจะต้องนำเอาผลของความเร็วเข้ามาพิจารณาด้วยเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วและความหนาแน่นของสารจะทำให้คุณสมบัติของการไหลเปลี่ยนแปลงโดยตรง เราเรียกคุณสมบัติที่นำอิทธิพลของความเร็วของของไหลมาพิจารณาด้วยว่า “คุณสมบัติรวมของของไหล (Stagnation properties)”



รูปที่ 3.5 ปริมาตรควบคุมเมื่อของไหลผ่านท่อ

พิจารณาปริมาตรควบคุมตามรูปที่ 3.5 กำหนดให้ พลังงานภายในและพลังงานการไหลอยู่ในรูปของเทอมเดียวเรียกว่า Enthalpy (h) จากสมการอนุรักษ์พลังงาน (กฎข้อที่ 1 ของอุณหพลศาสตร์) เมื่อไม่คำนึงผลจาก พลังงานภายนอก งานที่ระบบกระทำ และการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ของการไหล จะได้

$$\left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} \right) = \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} \right) \quad (3.27)$$

โดย $h_0 = h + \frac{V^2}{2}$ ดังนั้นสมการ (3.27) จะเป็น

$$h_{01} = h_{02} \quad (3.28)$$

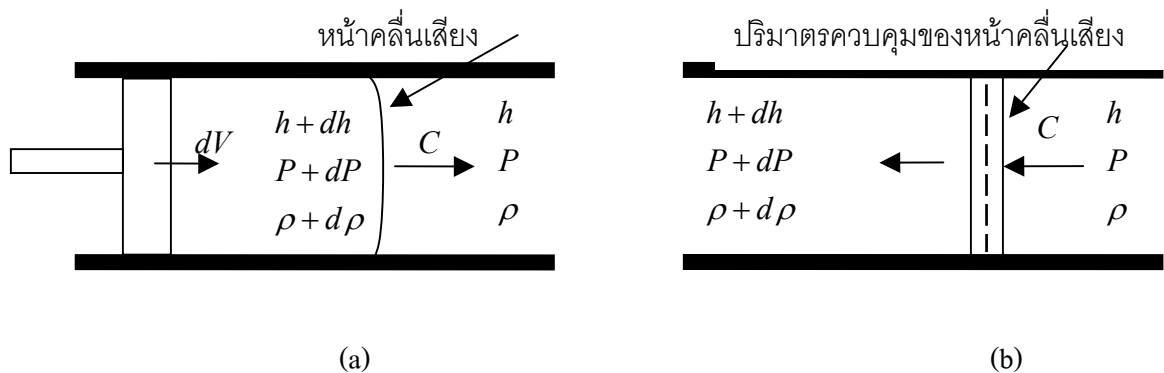
จะเห็นว่า h_0 เป็น Enthalpy รวมของกระบวนการที่เกิดขึ้น กรณีที่ h เท่ากับ h_0 นั้นจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อของไหลอยู่กับที่ นอกจากค่า Enthalpy แล้ว คุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของของไหลยังแปรเปลี่ยนตามความเร็วของการไหลด้วย เช่น อุณหภูมิ ความดัน ความหนาแน่น ดังสมการ (3.29-3.31) ตามลำดับ

$$T_0 = T + \frac{V^2}{2C_p} \quad (3.29)$$

$$\frac{P_0}{P} = \left(\frac{T_0}{T} \right)^{k/(k-1)} \quad (3.30)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left(\frac{T_0}{T} \right)^{1/(k-1)} \quad (3.31)$$

โดย k คือ อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ (Specific heat ratio) และ C_p คือ ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ (Constant-pressure specific heat) ทั้งนี้อิทธิพลของความเร็วที่มีต่อคุณสมบัติของของไหลจะมากหรือน้อย จะขึ้นอยู่กับความเร็วของของไหลนั้นซึ่งหากไม่เร็วมากก็สามารถตัดเทอมนี้ออกไปได้ แต่ถ้าความเร็วสูง(ความเร็วเหนือเสียง)ก็ต้องนำผลการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติสารมาพิจารณาด้วย



รูปที่ 3.6 การเคลื่อนที่ของหน้าคลื่นเสียง (a) คลื่นที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของลูกสูบเท่าความเร็วเสียง
(b) การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติสารผ่านคลื่นเสียง

3.2 ความเร็วเสียง (Speed of sound or Sonic velocity)

ความเร็วเสียงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับศึกษาพฤติกรรมของการไหลแบบอัดตัว เราใช้ความเร็วเสียงแบ่งช่วงประเภทของการไหล เพราะความเร็วเสียงเป็น ความเร็วของคลื่นความดันที่กระจายตัวได้ที่เท่ากับ การกระจายพลังงานระหว่างอนุภาคของของไหล ความเร็วเสียงเป็นคุณสมบัติเฉพาะของสารแต่ละชนิด พิจารณารูปที่ 3.6 (a) เมื่อกลูกสูบด้วยความเร็ว dV ในกระบอกสูบที่บรรจุก๊าซที่ไม่มีการเคลื่อน จะทำให้เกิดคลื่นเสียงความเร็ว C ซึ่งแบ่งของไหลออกเป็นสองส่วน คือ ด้านซ้ายมือเป็นของไหลที่เคลื่อนที่ และด้านขวามือเป็นของไหลที่นิ่งอยู่กับที่ คุณสมบัติของของไหลด้านซ้ายมือจะเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความเร็วของการไหล ขณะที่ด้านขวามือจะมีค่าคงที่ เพื่อให้ง่ายขึ้น เราพิจารณาให้หน้าคลื่นเป็นปริมาตรควบคุมดังรูปที่ 3.6 (b) และให้สารที่นิ่งอยู่กับที่เคลื่อนที่ผ่านจากขวามือไปซ้ายมือ ทำให้คุณสมบัติของของไหลด้านซ้ายมือเปลี่ยนแปลง เมื่อกระบวนการเป็นแบบไม่ขึ้นกับเวลา จากกฎทรงมวลจะได้ จะได้ความสัมพันธ์เป็น

$$\dot{m}_{right} = \dot{m}_{left} \quad (3.32)$$

$$\rho AC = (\rho + d\rho)A(C - dV) \quad (3.33)$$

เมื่อพื้นที่หน้าตัด A คงที่ตลอดความยาว

$$Cd\rho - \rho dV = 0 \quad (3.34)$$

จากกฎอนุรักษ์พลังงานเมื่อไม่พิจารณางานของกระบวนการ พลังงานศักย์ และ เป็นกระบวนการไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

$$h + \frac{C^2}{2} = h + dh + \frac{(C - dV)^2}{2} \quad (3.35)$$

หรือ

$$dh - CdV = 0 \quad (3.36)$$

จากความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลง Entropy, s ในกระบวนการซึ่งกำหนดให้เป็นแบบ Isentropic ($ds = 0$) จะได้

$$dh = \frac{dP}{\rho} \quad (3.37)$$

จากสมการ (3.34), (3.36) และ (3.37) จะได้ความสัมพันธ์ของความเร็วเสียงเป็น $C^2 = \frac{dP}{d\rho}$ เมื่อ s คงที่ หรือ

$$C^2 = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_s \quad (3.38)$$

ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

$$C^2 = k \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_T \quad (3.39)$$

จากสมการ (3.39) จะเห็นได้ว่าความเร็วเสียงเป็นคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดและสถานะของของไหลนั้นๆ เมื่อพิจารณาของไหลเป็นก๊าซในอุดมคติ (ideal gas, $P = \rho RT$) จากสมการ (3.39) สามารถสร้างความสัมพันธ์ได้เป็น

$$C^2 = k \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_T = k \left(\frac{\partial (\rho RT)}{\partial \rho} \right)_T = kRT \quad (3.40)$$

หรือสามารถเขียนได้เป็น

$$C = \sqrt{kRT} \quad (3.41)$$

จากสมการ (3.41) พบว่าความเร็วของคลื่นเสียงที่ผ่านของก๊าซอุดมคติจะเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของของไหลด้วย

นอกจากความเร็วเสียงแล้ว ยังมีพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกประการ นั่นคือ Mach number, M (ให้ชื่อตามนักวิทยาศาสตร์ชาวออสเตรีย) เป็นอัตราส่วนความเร็วของวัตถุในของไหล, V ต่อความเร็วเสียงในของไหล, C ดังความสัมพันธ์

$$M = \frac{V}{C} \quad (3.42)$$

เนื่องจาก M ขึ้นอยู่กับความเร็วเสียงของของไหลซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับสถานะของของไหล ดังนั้น M จึงเป็นคุณสมบัติที่ขึ้นกับสภาวะการไหลเช่นกัน เราแบ่งสภาวะการไหลออกเป็น 3 ช่วงตามค่า Mach number ดังนี้

การไหลแบบ Subsonic	เมื่อ $M < 1$
การไหลแบบ Sonic	เมื่อ $M = 1$
การไหลแบบ Supersonic	เมื่อ $M > 1$
การไหลแบบ Hypersonic	เมื่อ $M \gg 1$

3.3 การไหลแบบไอเซนทรอปิกผ่านท่อหน้าตัด

กระบวนการไหลผ่านท่อหน้าตัดเปลี่ยนแปลงของก๊าซ ขณะกระบวนการเกิดขึ้น ความเร็วของของไหลจะเปลี่ยนแปลง ซึ่งส่งผลให้คุณสมบัติของสาร เช่น ความดัน ความหนาแน่น และอุณหภูมิ มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ในหัวข้อเราจะจะได้กล่าวถึง กระบวนการไหลผ่านท่อหน้าตัด

เปลี่ยนแปลงของ ก๊าซในอุดมคติ (Ideal gas) ไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างกระบวนการ (Adiabatic process) และเป็นกระบวนการไอเซนโทรปิก (Isentropic process) จากกฎทรงมวล จะได้ว่า

$$\dot{m} = \rho AV = \text{constant} \quad (3.43)$$

หรือเขียนในรูปของสมการอนุพันธ์

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dA}{A} + \frac{dV}{V} = 0 \quad (3.44)$$

จากสมการอนุรักษ์พลังงานโดยไม่พิจารณาพลังงานศักย์ ไม่มีการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการและไม่มีการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกจะทำ ได้

$$\frac{dP}{\rho} + VdV = 0 \quad (3.45)$$

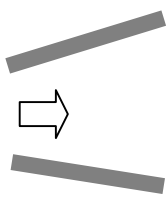
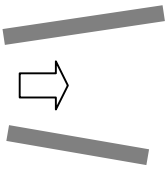
นำสมการที่ (3.44) กับ (3.45) มาร่วมกัน และ แทนค่าจากสมการ (3.21)

$$\frac{dV}{V} = \frac{dA}{A} = \frac{dP}{\rho V^2} (1 - M^2) \quad (3.46)$$

ความสัมพันธ์ของสมการ (3.46) มีความสำคัญกับการศึกษาพฤติกรรมการไหลของก๊าซผ่านท่อหน้าตัดเปลี่ยนแปลงมาก พบว่าหาก การไหลเข้าท่อเป็นแบบ Subsonic, $M < 1$ เทอมของ $1 - M^2$ จะเป็นบวก ซึ่งทำให้การเปลี่ยนแปลงของ dA และ dP จะเปลี่ยนแปลงตามกัน นั่นคือความดันของไหลจะเพิ่มขึ้นเมื่อท่อมีขนาดโตขึ้นเรื่อยๆ หรือความดันจะลดลงเมื่อท่อมีขนาดเล็กลง สำหรับกรณีการไหลเข้าท่อเป็นแบบ Supersonic, $M > 1$ เทอมของ $1 - M^2$ จะมีค่าเป็นลบซึ่งทำให้ค่า dA และ dP จะเปลี่ยนแปลงผกผันกัน กล่าวคือ ความดันจะลดลงหากขนาดของท่อเพิ่ม ทั้งหมดนี้การเปลี่ยนแปลงความเร็ว dV จะผกผันกลับความดันเสมอ ความสัมพันธ์ของ dA , dV และ dP สำหรับการไหลเป็นแบบต่างๆ แสดงไว้ดังรูปที่ 3.7

กรณีการไหลเป็นแบบ Sonic, $M = 1$ เทอมของ $1 - M^2$ เป็นศูนย์ ทำให้สมการ (3.46) มีเทอมที่หารด้วยศูนย์ ซึ่งไม่มีค่าในจำนวนจริง แต่เราสามารถพิจารณาศึกษาโดยให้ $M \rightarrow 1$ ทั้งนี้พฤติกรรมนี้สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อ $dA \rightarrow 0$ หรือ $dA \rightarrow \infty$ นั้นหมายความว่า การไหลแบบ Subsonic M จะเข้าสู่ 1 ได้นั้น dA ต้องเปลี่ยนแปลงเข้าสู่ค่าที่น้อยที่สุด ($dA \rightarrow 0$) หรือพื้นที่หน้าตัดที่น้อยที่สุดของ

ท่อ และ การไหลแบบ Supersonic dA ต้องเข้าสู่ค่าอนันต์ ($dA \rightarrow \infty$) หรือพื้นที่หน้าตัดของท่อที่โตสุด เราเรียกสภาวะที่ความเร็วของการไหลในท่อเท่ากับความเร็วเสียง ($M = 1$) ว่า “สภาวะวิกฤต (Critical condition)” ซึ่งเป็นสภาวะอ้างอิง (Reference condition) ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของการไหลแบบอัดตัวได้

รูปร่างท่อ	Subsonic, $M < 1$	Supersonic, $M < 1$
 $dA > 0$	$dV < 0$ $dp > 0$	$dV < 0$ $dp > 0$
 $dA < 0$	$dV < 0$ $dp > 0$	$dV < 0$ $dp > 0$

รูปที่ 3.7 ผลของ Mach number ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดของท่อ

3.4 ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติก๊าซอุดมคติ

ในหัวข้อนี้จะได้นำเสนอความสัมพันธ์ของคุณสมบัติ เมื่อพิจารณาความเร็ว หรือ คุณสมบัติรวมของของไหลของก๊าซอุดมคติ ในเทอมของ อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ, k และ Mach number, M ภายใต้สมมติ กระบวนการเป็นแบบไอเซนทรอปิก และ อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ มีค่าคงที่ อุณหภูมิ T ของไหล สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของคุณสมบัติรวมแทนค่า $M = V/C$ และ $C_p = kR/(k-1)$, $C^2 = kRT$, จะได้

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \left(\frac{k-1}{2} \right) M^2 \quad (3.47)$$

เช่นเดียวกัน จะได้ความสัมพันธ์ของความดัน และความหนาแน่นดังสมการ (3.48) และ (3.49) ตามลำดับ

$$\frac{P_0}{P} = \left[1 + \left(\frac{k-1}{2} \right) M^2 \right]^{k/(k-1)} \quad (3.48)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left[1 + \left(\frac{k-1}{2} \right) M^2 \right]^{1/(k-1)} \quad (3.49)$$

คุณสมบัติที่ $M = 1$ เราเรียกว่า “คุณสมบัติที่สภาวะวิกฤต” (แทนด้วย * อยู่เหนืออักษรอังกฤษ ตัวใหญ่) จากสมการ (3.47) (3.48) และ (3.49) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติร่วมกับคุณสมบัติที่สภาวะวิกฤต ดังนี้

$$\frac{T^*}{T_0} = \frac{2}{k+1} \quad (3.50)$$

$$\frac{P^*}{P_0} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)} \quad (3.51)$$

$$\frac{\rho^*}{\rho_0} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{1/(k-1)} \quad (3.52)$$

ความสัมพันธ์ของความเร็วของของไหลและความเร็วเสียงที่สภาวะวิกฤตเขียนได้เป็น

$$V^* = C^* = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_0} \quad (3.53)$$

3.5 การไหลผ่านท่อคอขวด(Isentropic flow through nozzles)

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นผ่านท่อคอขวดซึ่งมี 2 ชนิด คือ ท่อหน้าตัดลู่เข้า (Converging nozzle) และ ท่อหน้าตัดลู่เข้า-ลู่ออก (Converging – diverging) ในหัวข้อนี้เราจะกล่าวถึงผลกระทบจากความดันที่ปากทางออก (Back pressure) อัตราการไหล และการกระจายความดันตลอดท่อคอขวด

3.5.1 ท่อหน้าตัดลู่เข้า (Converging nozzle)

พิจารณาการไหลแบบ Subsonic ผ่านท่อหน้าตัดลู่เข้าดังรูปที่ 3.8 จากภาพ สมมติให้ของไหลจากที่อยู่นิ่ง $V_0 = 0$ ถูกเหวี่ยงและไหลผ่านท่อหน้าตัดลู่เข้า ด้วยปั๊มลดความดัน (Vacuum pump)

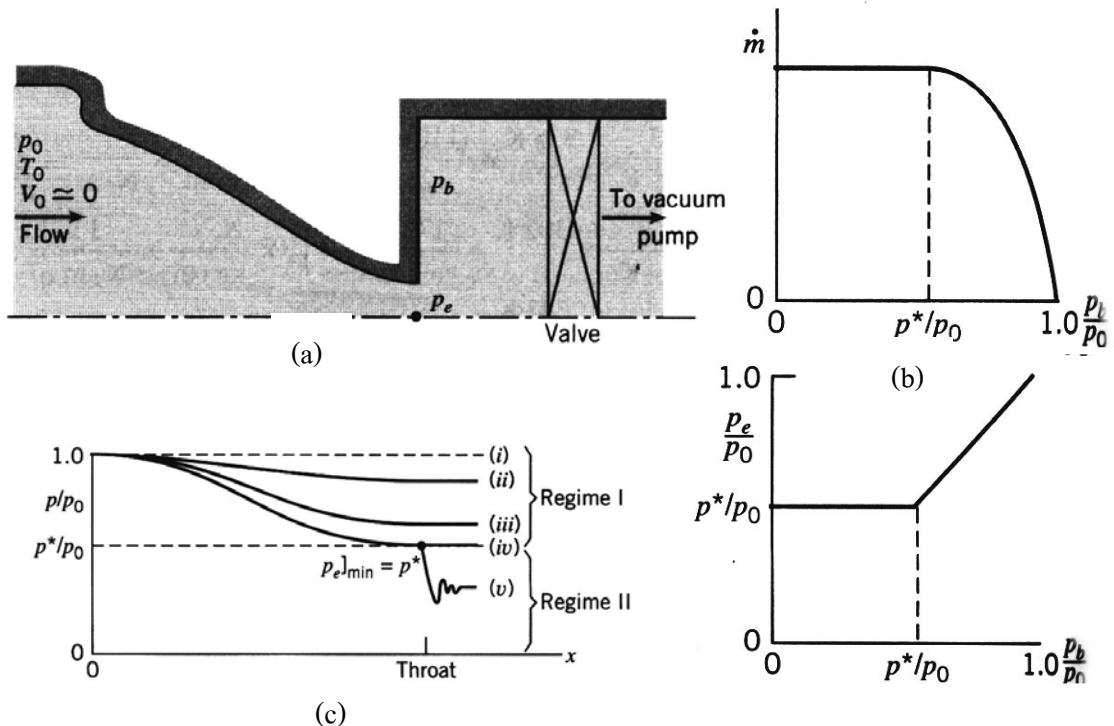
เมื่อลดความดันที่ปากทางออก (back pressure, P_b) จะได้กราฟความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความดันต่อความดันรวม (P/P_0) ตลอดท่อความยาวท่อ ดังรูป 3.8 (a) ในช่วงแรก (Regime 1) ความดันที่ปากทางออกจะเท่ากับความดันของปั๊มลดความดัน $P_e = P_b$ สังเกตจากรูปที่ 3.8 (d) เมื่อลดความดันของปั๊มลดความดัน ถึงสภาวะที่ iv ซึ่ง $P_e = P^*$ หากลดความดันลงอีก (สภาวะ v) ความดันที่ปากทางออกจะไม่เท่ากับความดันของปั๊มลดความดัน $P_e \neq P_b$ (Regime 2)

การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลที่เกิดจากการลดความดันปากทางออกของอีเจกเตอร์ จากรูปที่ 3.7(b) จะเห็นว่าหากลดความดันของปั๊มลดความดันจนมีค่าน้อยกว่าความดันวิกฤติที่คอขวด $P_b < P^*$ อัตราการไหลผ่านคอขวดจะมีค่าคง แต่จะลดลงทันทีหากค่า $P_b > P^*$ เราเรียกการไหลผ่านท่อคอขวดที่รูปแบบการไหลที่คอขวดเป็น sonic flow และมีอัตราการไหลสูงสุดว่า “การไหลแบบ Choke (Choking flow)” หรือ ท่ออยู่ในสภาวะ Choked โดยหาความสัมพันธ์ของอัตราการไหลผ่านภายใต้เงื่อนไขสภาวะคงที่ของก๊าซอุดมคติ จาก

$$\dot{m} = \rho AV = \left(\frac{P}{RT} \right) A (M \sqrt{kRT}) = PAM \sqrt{\frac{k}{RT}} \quad (3.54)$$

เขียนให้อยู่ในรูปของสมบัตินรวมได้โดย แทนสมการ(3.43) และ (3.44) ในสมการ (3.54)

$$\dot{m} = \frac{AMP_0 \sqrt{k/(RT_0)}}{\left[1 + (k-1)M^2/2 \right]^{(k+1)/[2(k-1)]}} \quad (3.55)$$



(d)

รูปที่ 3.8 การไหลผ่านท่อคอขวดของอากาศด้วยปั๊มลดความดัน [35]

จากสมการ (3.42) สามารถหาอัตราการไหลสูงสุดได้โดยหาอนุพันธ์ เทียบกับ M ให้เท่ากับ 0 จะได้ดังสมการข้างล่างนี้

$$\dot{m}_{\max} = A^* P_0 \sqrt{\frac{k}{RT_0}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/[(k-1)]} \quad (3.56)$$

โดยค่า A^* คือค่าพื้นที่หน้าตัดที่เล็กที่สุดหรือพื้นที่หน้าตัดวิกฤต ที่ทำให้อัตราการไหลมีค่าสูงที่สุดของคอขวด ค่าพื้นที่หน้าตัดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเทอมไรมิติของอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัด A แต่ละช่วงของท่อ ต่อพื้นที่หน้าตัดวิกฤต A^* ได้จาก สมการ (3.42) และ (3.43)

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{M} \left[\left(\frac{2}{k+1} \right) \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right) \right]^{(k+1)/[2(k-1)]} \quad (3.57)$$

พารามิเตอร์อีกค่าที่มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์การไหลผ่านท่อคอขวดแบบไอเซนทรอปิก ของก๊าซอุดมคติ นั่นคือค่า Mach number วิกฤติ, M^* ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วของของไหล, V ต่อความเร็วเสียงที่คอขวด C^* นั่นคือ

$$M^* = \frac{V}{C^*} \quad (3.58)$$

ซึ่งกระจายสมการจะได้

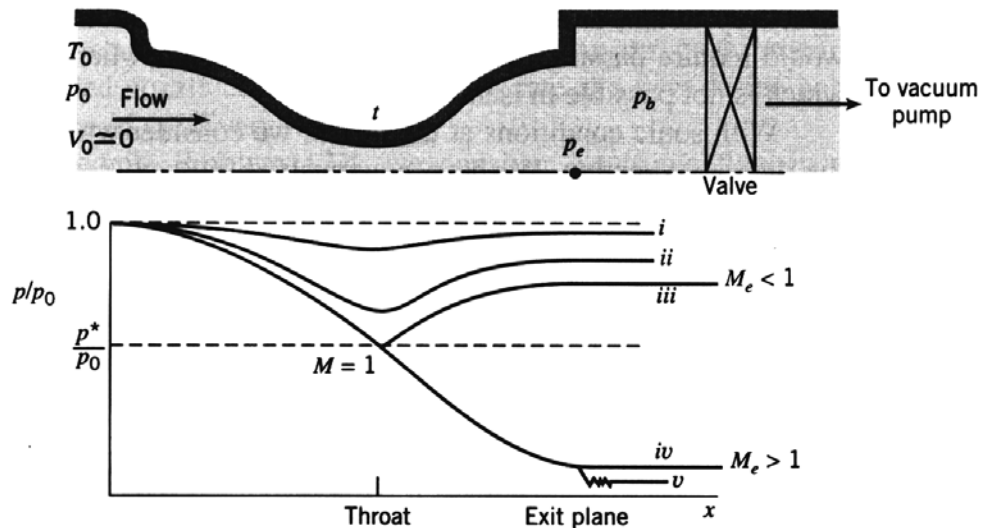
$$M^* = M \sqrt{\frac{k+1}{2+(k-1)M^2}} \quad (3.59)$$

ทั้งนี้ค่า M เป็นจะเป็นอัตราส่วนระหว่าง ความเร็วของของไหลต่อความเร็วเสียงของของไหลที่สภาวะนั้นซึ่งมีค่าต่างจาก M^* ที่เป็นอัตราส่วนของความเร็วของของไหลต่อความเร็วเสียงของของไหลที่สภาวะนั้นกับความเร็วของเสียงที่คอขวด

3.5.2 ท่อหน้าตัดลู่เข้า-ลู่ออก (Converging-divergent nozzle)

การไหลจาก Subsonic ผ่านท่อหน้าตัดลู่เข้า-ลู่ออก สมมติให้ของไหลจากที่อยู่นิ่ง $V_0 = 0$ ถูกเหวี่ยงและไหลผ่านท่อหน้าตัดลู่เข้า-ลู่ออก ด้วยปั๊มลดความดัน (Vacuum pump) และ เมื่อลดความดันของปั๊มความดัน (back pressure, P_b) ลงเรื่อยๆ เมื่อนำค่าอัตราส่วนความดันต่อความดันรวม (P/P_0) ลงจุดตลอดความยาวท่อจะได้กราฟดังรูปที่ 3.9

จากรูป 3.9 เมื่อวาล์วของปั๊มลดความดันถูกเปิดความดันที่ปากทางออก P_b จะลดลงเรื่อยๆ และจะเพิ่มขึ้นหลังจากไหลผ่านคอขวดแล้ว (เส้น *i* และ *ii*) การไหลในตลอดช่วงนี้จะเป็นแบบ Subsonic แม้ความเร็วที่คอขวดจะเพิ่มขึ้นแล้วแต่ก็ยังมีค่าไม่มาก และเมื่อลดความดัน P_b ลงอีกความเร็วที่คอขวดสูงขึ้นจนทำให้การไหลเป็นแบบ Sonic ซึ่งทำให้ท่อหน้าตัดลู่เข้า-ลู่ออก อยู่ในสถานะ Choked ทั้งนี้สมการความสัมพันธ์ของอัตราการไหลสูงสุดสามารถหาได้จาก สมการ (3.44) โดย $A_t = A^*$, โดย A_t เป็นพื้นที่หน้าตัดของคอขวดของท่อ



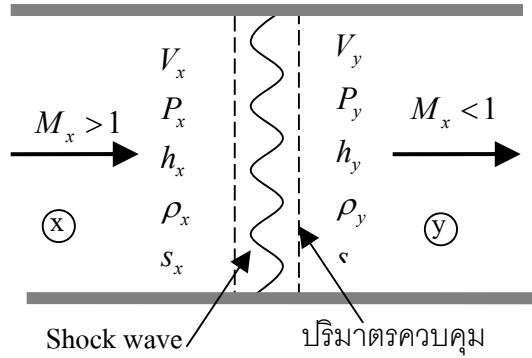
รูปที่ 3.9 การไหลผ่านท่อลู่เข้า-ลู่ออก ของอากาศด้วยปั๊มลดความดัน[35]

จากเส้นสถานะที่ *i, ii* และ *iii* ความดันที่ปากทางออกจะเท่ากับความดันของปั๊มลดความดัน ($P_e = P_b$) หากลดความดันลงอีก (เส้น *iv* และ *v*) จะทำให้การไหลที่ปากทางออกเป็น Supersonic, $M_e > 1$ ซึ่งทำให้ความดันที่ปากทางออก P_e น้อยกว่าความดันของปั๊มลดความดัน การเปลี่ยนแปลงการไหลจากการบริเวณความดันต่ำเป็นความดันสูงจะเกิดขึ้นในทันทีทันใด เป็นเหตุให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “shock wave”

3.6 Shock wave ของการไหลในท่อ

ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น Shock wave เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนความดันทันทีทันใดของสนามการไหล จากความดันต่ำหรือความเร็วสูงเป็นความดันสูงหรือที่ความเร็วต่ำ ปรากฏ

การนี้ทำให้การไหลในท่อเป็นกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดันหรือความเร็วทันทีทันใดเป็นการเพิ่ม เอนโทรปีในกระบวนการ พิจารณาได้ดังนี้ จากรูปที่ 3.10 ของไหลความเร็วสูง, $M > 1$ (สถานะ x) ไหลผ่านปริมาตรควบคุมของ Shock wave กลายเป็นสถานะความเร็วต่ำ, $M < 2$ (สถานะ y) สามารถสร้างความสัมพันธ์ของคุณสมบัติของของไหลระหว่างก่อนและหลังการเกิดของ Shock wave ได้ดังนี้



รูปที่ 3.10 ปริมาตรควบคุมของ Shock

จากสมการกฎทรงมวล

$$\rho_x V_x = \rho_y V_y \quad (3.60)$$

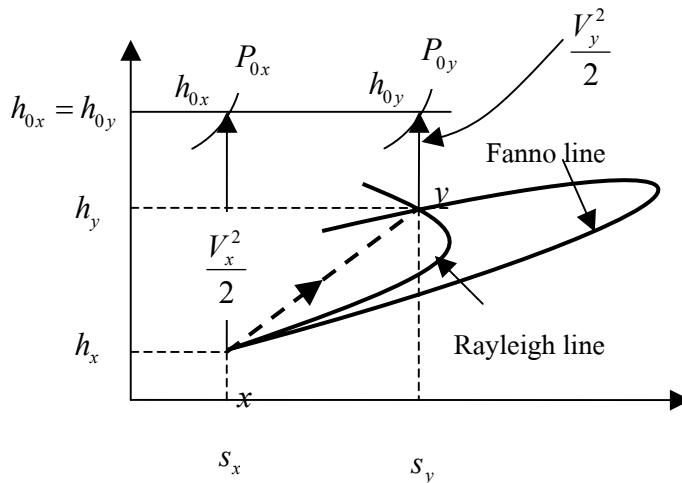
กฎอนุรักษ์พลังงาน

$$h_{0x} = h_{0y} \quad (3.61)$$

กฎอนุรักษ์โมเมนตัม

$$A(P_x - P_y) = m^* (V_y - V_x) \quad (3.62)$$

จากความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ สมการกฎทรงมวล(3.60) และ สมการอนุรักษ์พลังงาน(3.61) หากาลงจุดบนกราฟ $h-s$ จะได้เส้นความสัมพันธ์ที่เรียกว่า “เส้นแฟนโน (Fanno line)” และต่อมาคำนวณค่าดังเส้นแฟนโนแต่ใช้สมการกฎอนุรักษ์โมเมนตัม (3.62)แทนความสัมพันธ์อนุรักษ์พลังงาน จะได้เส้นความสัมพันธ์ที่เรียกว่า “เส้นเลย์เลจ (Reyleigh line) แสดงดังรูปที่ 3.11 จะเห็นได้ว่าการเกิด Shock ทำให้กระบวนการที่เกิดขึ้นมีค่าเอนโทรปีเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นปัจจัยให้เกิดการสูญเสียขึ้นในกระบวนการและกระบวนการเป็นกระบวนการผันกลับไม่ได้



รูปที่ 3.11 Mollier's chart

จากสมการอนุรักษ์พลังงาน (3.61) และสมการของก๊าซอุดมคติจะให้ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิรวมทั้งตำแหน่ง x และ y เป็น $T_{0x} = T_{0y}$ ซึ่งทำให้เราได้รับความสัมพันธ์ของคุณสมบัติก๊าซก่อนและหลังเกิด *Shock* เมื่ออัตราส่วนความร้อนจำเพาะคงที่ ได้ดังนี้

อัตราส่วนอุณหภูมิ

$$\frac{T_x}{T_y} = \frac{1 + M_x^2 (k-1)/2}{1 + M_y^2 (k-1)/2} \quad (3.63)$$

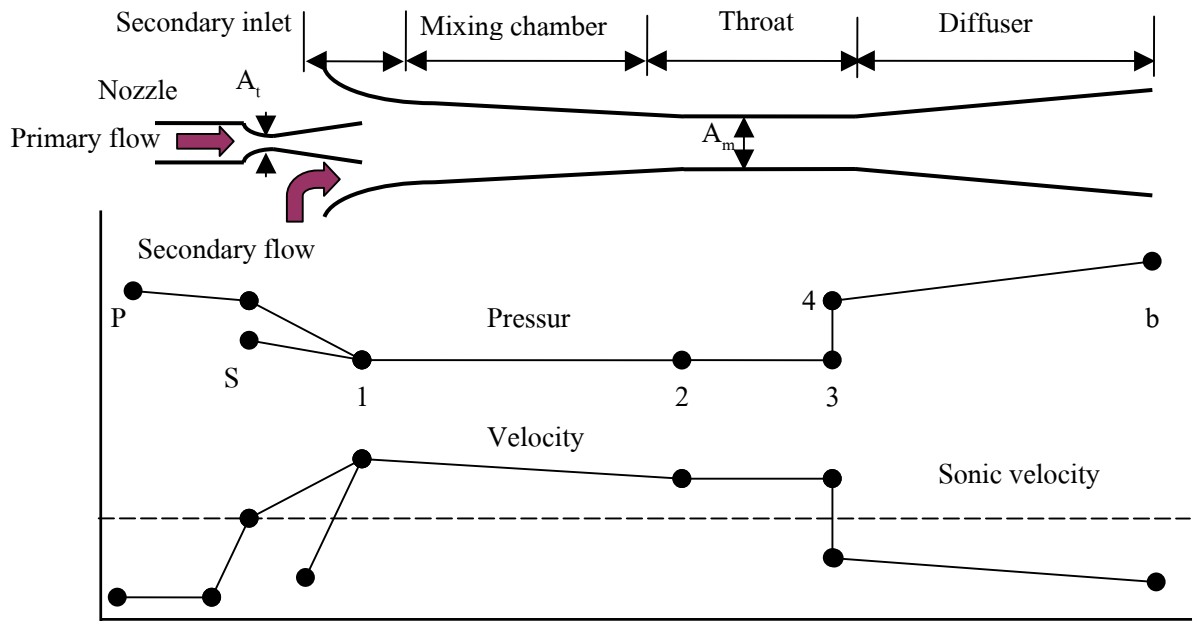
อัตราส่วนความดัน

$$\frac{P_y}{P_x} = \frac{M_x \sqrt{1 + M_x^2 (k-1)/2}}{M_y \sqrt{1 + M_y^2 (k-1)/2}} \quad (3.64)$$

อัตราส่วน *Mach number*

$$M_y^2 = \frac{M_x^2 + 2/(k-1)}{2M_x^2 k/(k-1) - 1} \quad (3.65)$$

จากหัวข้อที่ผ่านเราได้เสนอทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ที่เป็นการศึกษาการทำงานและพฤติกรรมกาไหลที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์ การไหลในอีเจ็คเตอร์เป็นแบบการไหลแบบอัดตัว



รูปที่ 3.12 ลักษณะการไหลภายในอีเจ็คเตอร์

4. แบบจำลองการไหลใน 1 มิติของอีเจ็คเตอร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลในอีเจ็คเตอร์เป็นการนำเอาความรู้พื้นฐานของกลศาสตร์ของไหลมาประยุกต์กับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นและหลักการทำงานของอีเจ็คเตอร์ จากรูปที่ 3.12 สารทำงานความดันสูง (ความเร็วต่ำเสมือนอยู่นิ่ง, P_{0p}) จากเครื่องกำเนิดไอไหลเข้าสู่หัวฉีด และ ผ่านคอขวดทำให้ความเร็วสูงขึ้นเรื่อยๆจนถึงปากทางออกของหัวฉีด ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความดัน ตกคร่อมหัวฉีดในเทอมของ *Mach number* จากสมการ(3.48) เป็น

$$M_p = \sqrt{\frac{2\eta_p}{k-1} \left[\left(\frac{P_{0p}}{P_{1p}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} \quad (3.66)$$

โดย η_p เป็นประสิทธิภาพของหัวฉีด

สารความเร็วสูงที่ปากหัวฉีด ทำให้เกิดบริเวณความดันต่ำ ส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำสารทุติยภูมิจากหยดน้ำให้เพิ่มความเร็วขึ้น และไหลเข้าอีเจ็คเตอร์ก่อนผสมกับสารปฐมภูมิ ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความดันตกคร่อมท่อสารทุติยภูมิเป็น

$$M_s = \sqrt{\frac{2}{k-1} \left[\left(\frac{P_{0s}}{P_{1s}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} \quad (3.67)$$

สารทั้งสองผสมกันที่ห้องผสม (ช่วง 1-3) จากสมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$m_s \dot{V}_{1s} + m_p \dot{V}_{1p} = (m_s + m_p) \dot{V}_3 \quad (3.68)$$

เมื่อของไหลสมมติฐานให้เป็นก๊าซอุดมคติ ดังนั้น $C^2 = kRT$, และ $M = V / C$ ในค่าในสมการ 3.68 ให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของ *Mach number* และสมมติให้การผสมกันเป็นไปโดยความดันคงที่ จะได้

$$M_3 = \eta_m \left[\frac{M_p + RmM_s \sqrt{T_s / T_p}}{\sqrt{(1 + Rm)(1 + RmT_s / T_p)}} \right] \quad (3.69)$$

โดย η_m เป็นประสิทธิภาพของห้องผสม

จากความความสัมพันธ์ระหว่าง *Mach number* เฉพาะช่วง กับ *Mach number* วิกฤต จากสมการ (3.59) จัดรูปใหม่จะได้

$$M = \sqrt{\frac{(k+1)(M^{*2} / 2)}{1 + (k+1)(M^{*2} / 2)}} \quad (3.70)$$

เมื่อของไหลทั้งสองสิ้นสุดกระบวนการผสมกัน (ช่วงที่ 3) ของผสมความดันต่ำต้องเปลี่ยนแปลงความดันทันทีทันใดเกิด Shock wave เพื่อเพิ่มความดันให้สูงขึ้นเท่ากับความดันที่ปากทางออกของอีเจกเตอร์ (ช่วง3-4) จากสมการ (3.65) ความสัมพันธ์ของ *Mach number* ตกคร่อม Shock wave

$$M_4 = \sqrt{\frac{M_3^2 + 2/(k+1)}{(2k/(k-1)M_3^2 - 1)}} \quad (3.71)$$

และการเปลี่ยนแปลงความดันตกคร่อม Shock wave จากสมการ (3.64)

$$\frac{P_4}{P_3} = \frac{1 + kM_3^2}{1 + kM_4^2} \quad (3.72)$$

หลังจากสารทำงานเพิ่มความดันความเร็วจะลดลงเรื่อยและสมมติให้ว่าจะหยุดนิ่งที่ทางออกของอีเจ็คเตอร์ (ช่วง 4-b) สามารถหาอัตราส่วนความดันได้จากสมการ (3.48) จะได้

$$\frac{P_b}{P_4} = \left[\frac{\eta_d (k-1)}{2} M_4^2 + 1 \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (3.73)$$

โดย η_d คือ ประสิทธิภาพ isentropic ของ diffuser

สมการ (3.66-3.73) เป็นสมการแบบจำลองการไหลพื้นฐานในอีเจ็คเตอร์ที่เสนอโดย Aphornratana [13] ซึ่งปรับปรุงจากข้อสมมติฐานและความสัมพันธ์ของ Keenann และคณะ [11] ถึงแม้ว่านักวิจัยที่พยายามหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อื่น เพื่อเพิ่มความถูกต้องมากขึ้นแต่แบบจำลองนี้ก็ยังเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

5. Computational Fluid Dynamics (CFD)

CFD (Computational Fluid Dynamics) คือ การวิเคราะห์ระบบที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล โดยใช้คอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณหาผลเฉลยเชิงตัวเลขและจำลองลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นในระบบ CFD จะมีระเบียบขั้นตอนการทำงานอยู่ 3 ขั้นตอนใหญ่ ๆ คือ

- 1) ขั้นตอนการประมวลผล (Pre-processor) เป็นขั้นตอนของการกำหนดรูปร่างลักษณะและเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา รวมทั้งการแบ่งปัญหาออกเป็นเซลล์เล็กๆ
- 2) ขั้นตอนการคำนวณ จะทำการแก้ปัญหามาจากขั้นตอนที่ 1 โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาผลเฉลยของปัญหานั้นๆ ทั้งนี้ระเบียบวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีอยู่ 3 วิธีด้วยกันอันได้แก่ 1)วิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite difference method) 2)วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) 3)วิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite volume method) ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อต่อไป
- 3) ขั้นตอนการแสดงผล (Post-processor) เป็นขั้นตอนแสดงผลเฉลยหรือแสดงการจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นของปัญหา อาจอยู่ในรูปของ แอ็บสึ (Contour) กราฟ หรือแสดงในลักษณะของเวกเตอร์

การวิเคราะห์ปัญหาทางพลศาสตร์ของไหลนั้น จะเกี่ยวข้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่อธิบายถึงความเป็นจริงของการไหลที่เกิดขึ้นซึ่งเกิดจากสมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน ซึ่งรายละเอียดได้จากหัวข้อที่ผ่านมา ในการคำนวณหรือแก้ปัญหามสมการเชิงอนุพันธ์เหล่านี้จะมีหลาย

ระเบียบ ในรายงานจะได้เสนอระเบียบเชิงตัวเลขแบบ “ปริมาตรสืบเนื่อง” ทั้งนี้เนื่องจากซอฟต์แวร์ FLUENT 6.1 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้ระเบียบวิธีดังกล่าวเพื่อแก้สมการเชิงอนุพันธ์หรือปัญหาของการไหล

5.1 ระเบียบวิธี finite volume

เทคนิคการคำนวณการไหลของของไหล CFD ในปัจจุบัน ส่วนใหญ่แล้วมักจะใช้ระเบียบวิธี finite volume เป็นขั้นตอนหลักในการสร้างโปรแกรมคำนวณการไหล เนื่องจากเป็นระเบียบวิธีที่ประดิษฐ์ขึ้นมาใช้สำหรับการการคำนวณพฤติกรรมของการไหลในของไหลโดยเฉพาะ ระเบียบวิธีนี้จะอินทิเกรตสมการของปัญหาตลอดปริมาตรควบคุมที่กำหนด ตัวอย่างเช่น กำหนดสมการการนำความร้อนใน 1 มิติแบบสภาวะคงดังสมการ ดังแสดงดังรูปที่ 3.13

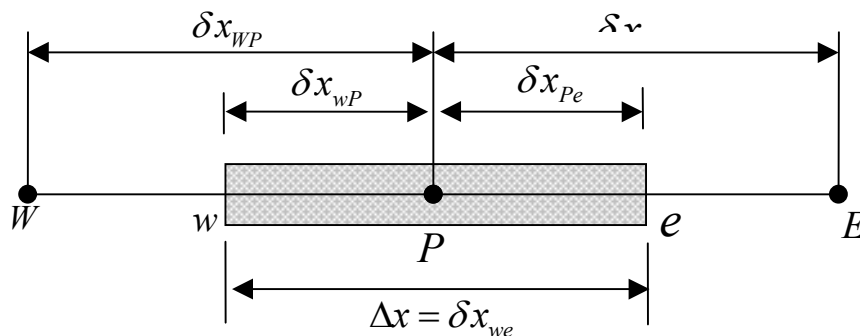
$$\frac{df}{dx} K \frac{dT}{dx} + S_x = 0 \quad (3.74)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการ (3.74) ตลอดปริมาตรควบคุมในรูปที่ 3.13 ที่กำหนดจะได้

$$\int_V \frac{df}{dx} K \frac{dT}{dx} dV + \int_V S_x dV = \left[K A \frac{dT}{dx} \right]_w^e + \bar{S}_D V = 0 \quad (3.75)$$

ประมาณการเปลี่ยนแปลง K เป็นแบบเชิงเส้นตลอดความยาวจะได้

$$K_w = \frac{K_w + K_P}{2} \text{ และ } K_e = \frac{K_w + K_P}{2} \quad (3.76)$$



รูปที่ 3.13 finite volume method ใน 1 มิติ

และในเทอมของการนำความร้อนจะได้

$$\left(KA \frac{dT}{dx} \right)_e = K_e A_e \left(\frac{T_E - T_P}{\delta x_{PE}} \right) \text{ และ } \left(KA \frac{dT}{dx} \right)_w = K_w A_w \left(\frac{T_P - T_W}{\delta x_{WP}} \right) \quad (3.77)$$

แทนค่าในสมการ (3.40) จะได้

$$\left(\frac{K_e}{\delta x_{PE}} A_e + \frac{K_w}{\delta x_{WP}} A_w - S_P \right) T_P = \left(\frac{K_w}{\delta x_{WP}} A_w \right) T_W + \left(\frac{K_e}{\delta x_{PE}} A_e \right) T_E + S_u \quad (3.78)$$

สมการ (3.43) จะเป็นสมการประมาณการสำหรับการแก้ปัญหาการถ่ายเทความร้อนของสมการ (3.39) ด้วยวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม ซึ่งในขั้นตอนต่อไปจะเป็นการคำนวณทางคณิตศาสตร์ไปยังจุดอื่นรอบๆต่อไปเรื่อยๆ และเมื่อถึงขอบของปัญหาแล้ว นำค่าเศษเหลือของรอบมาเทียบกับค่าพึงพอใจ หากเศษเหลือมีค่าเกินอยู่ก็ทำการคำนวณอีกวนไปมาเรื่อยๆ จนกว่าจะได้ค่าเศษเหลือน้อย(residual) เท่าที่กำหนดไว้

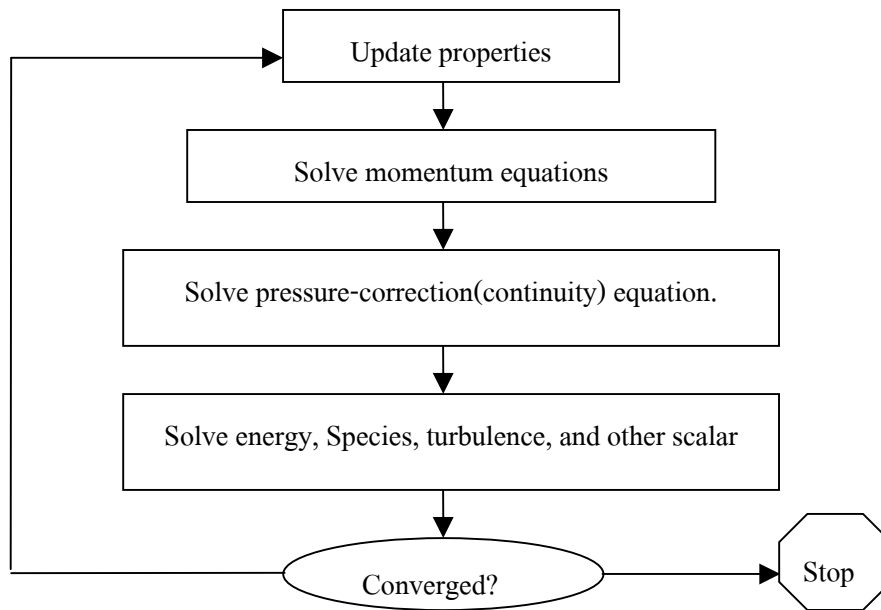
จากตัวอย่างข้างต้นจะเห็นว่าหากปัญหานั้นมีความซับซ้อนยิ่งขึ้น สมการเชิงอนุพันธ์จะมีหลายเทอมมากขึ้น การแก้สมการจึงยุ่งยากและต้องใช้ความแม่นยำสูง ดังนั้นการแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมจึงต้องมีลำดับขั้นการแก้สมการ เพื่อจดลำดับของชุดสมการก่อนจะนำมาเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่อไป

5.2 ระเบียบขั้นการแก้ปัญหา

การแก้ปัญหาเชิงตัวเลขของการไหล จะเป็นการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ทั้งสามสมการและสมการอื่น เช่น แบบจำลองความปั่นป่วน สมการชนิดของของไหล (กรณีของไหลมีหลายชนิด) และ สมการสเกลาร์อื่นๆ ซึ่งลำดับการหาคำตอบของสมการแต่ละอย่างจะมีผลต่อการรู้ค่าของคำตอบและค่าผลเฉลย โดยทั่วไประเบียบวิธีเชิงตัวเลขจะมีระเบียบของลำดับขั้นการแก้ปัญหาย่อย 2 อย่างตามแต่ลักษณะของปัญหา ดังนี้

5.2.1 ระเบียบขั้น Segregated solver

เป็นระเบียบขั้นที่จะแก้สมการอนุพันธ์โมเมนตัมก่อนสมการอื่น ทั้งนี้การแก้ปัญหาคู่สมการจะกระทำเป็นรอบๆซ้ำ เนื่องจากสมการอนุพันธ์จะอยู่ในรูปไม่เชิงเส้น ขั้นตอนการแก้ปัญหาดังกล่าวตามระเบียบขั้น Segregated solver แสดงดังรูปที่ 3.14 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้



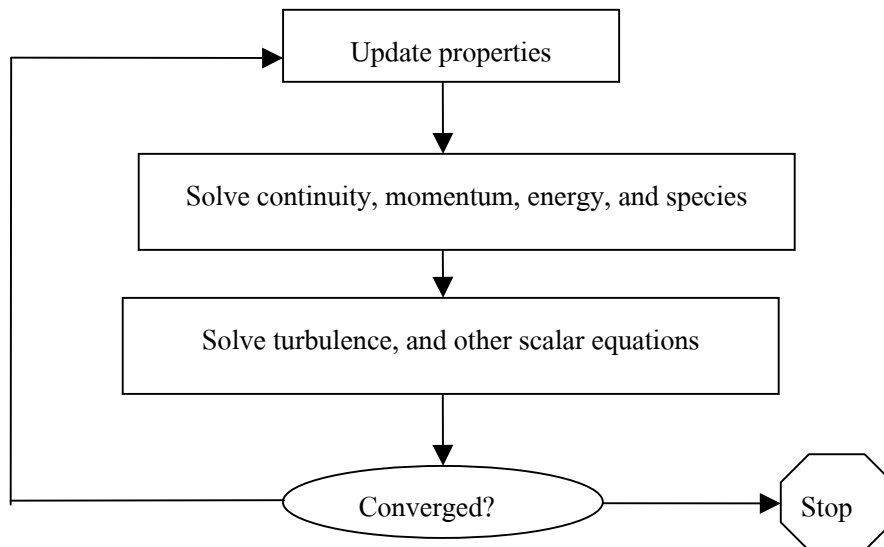
รูปที่ 3.14 แผนภาพลำดับการคำนวณของระเบียบขั้นแบบ Segregated solver

1. สมบัติของสารจะถูกป้อนเข้าสู่ขั้นตอนการแก้สมการ หากเป็นการเริ่มการคำนวณค่าคุณสมบัติที่จะใช้ค่ากำหนดเริ่มต้นของปัญหา และจะมีการปรับปรุงค่าทุกๆรอบของการคำนวณ
2. คำนวณสมการอนุรักษ์โมเมนตัมทั้งสามสมการ เพื่อคำนวณหาค่าความดันและอัตราการไหล ซึ่งจะได้ความเร็วของการไหล
3. เนื่องจากค่าความเร็วที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 อาจเป็นค่าที่ไม่เหมาะสมกับสมการอนุรักษ์มวล ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าที่ได้ ด้วยสมการปรับแก้ความดัน (Pressure-correction equation) ซึ่งประคิษฐ์จากสมการอนุรักษ์มวลกับโมเมนตัม โดย ค่าความดัน อัตราการไหล และความเร็วที่ได้จะมีค่าเหมาะสมมากขึ้น
4. ขั้นตอนนี้จะเป็นการแก้สมการอื่นๆที่เพิ่มเติมเข้ามาสำหรับแต่ละปัญหา เช่น สมการพลังงาน แบบจำลองความปั่นป่วน และสมการสเกลาร์อื่นๆ โดยใช้ค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 3
5. การยอมรับค่าที่ได้จากการคำนวณ จะถูกกำหนดขึ้นในขั้นตอนนี้ จากผลต่างของเศษเหลือในแต่ละรอบของการคำนวณ หากมีค่าสูงกว่าที่ยอมรับได้จะต้องทำการคำนวณซ้ำ (กลับไปขั้นตอนที่ 1) จนกว่าจะได้ค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าที่ยอมรับได้

5.2.2 ระเบียบขั้น Coupled solver

เป็นระเบียบขั้นที่ค่อนข้างใหม่สำหรับการคำนวณเชิงตัวเลข เป็นวิธีที่เอา สมการอนุรักษ์ทั้งสามสมการ และ สมการชนิดของของไหล (กรณีของไหลมีหลายชนิด) แก้สมการพร้อมกัน ก่อนจะ

แก้สมการสเกลาร์อื่นๆ และการคำนวณสมการเหล่านี้ยังต้องทำเป็นรอบเช่นเดียวกับระเบียบขั้นตอนแรก ระเบียบขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แผนภาพลำดับการคำนวณของระเบียบขั้นตอนแบบ Coupled solver

1. ดังเช่นระเบียบขั้นตอนแรก สมบัติของสารจะถูกป้อนเข้าสู่ขั้นตอนการแก้สมการ หากเป็นการเริ่มการคำนวณค่าคุณสมบัติที่จะใช้ค่ากำหนดเริ่มต้นของปัญหา และจะมีการปรับปรุงค่าทุกๆรอบของการคำนวณ
2. ขั้นตอนต่อมา คำนวณสมการอนุรักษ์ทั้งสามสมการ และ สมการชนิดของของไหล (กรณีของไหลมีหลายชนิด)
3. คำนวณสมการแบบจำลองความปั่นป่วน และ สมการสเกลาร์อื่น จากค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 2
4. ประเมินผลต่างเศษเหลือของรอบว่ายอมรับได้หรือไม่ หากมีค่าสูงกว่าที่ยอมรับได้จะต้องทำการคำนวณกลับไปขั้นตอนที่ 1 และวนซ้ำจนกว่าจะได้ค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าที่ยอมรับได้

5.3 ระเบียบวิธีคำนวณ

ระเบียบวิธีในการคำนวณสมการเชิงอนุพันธ์ในรูปแบบของวิธีการเชิงตัวเลขนั้นมี 2 ระเบียบวิธีด้วยกัน คือ ระเบียบวิธีแบบชัดแจ้ง (Explicit method) และ ระเบียบวิธีแบบปริยาย (Implicit method) ข้อแตกต่างของระเบียบวิธีทั้งสองนี้คือ การสร้างสมการเชิงตัวเลขที่เป็นเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างโนดหรืออีลิเมนต์ เพื่อแทนความสัมพันธ์ของสมการเชิงอนุพันธ์ กล่าวคือ ระเบียบวิธี

แบบชัดเจน ตัวรู้ค่าจะถูกสร้างเป็นความสัมพันธ์เพื่อหาตัวไม่รู้ค่าหนึ่งตัวของอีลิเมนต์ต่อไป แต่ระเบียบวิธีแบบปริยาย สมการหนึ่งสมการจะประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าอีลิเมนต์ต่อไปมากกว่าหนึ่งตัว ระเบียบวิธีแบบปริยายจะใช้กับการคำนวณแบบ segregated solver เพราะการคำนวณแบบ segregated solver จะคำนวณค่าตัวแปรเดียวของทุกอีลิเมนต์พร้อมกันที่เวลาเดียวกัน ก่อนคำนวณตัวแปรอื่นๆ ที่ละตัวแปร ทั้งนี้ระเบียบวิธี Coupled solver สามารถใช้เลือกใช้ทั้งสองระเบียบวิธีเพื่อการแก้ปัญหาได้

5.4 ระเบียบวิธีแก้ปัญหาคารไหลของบริเวณใกล้ผนัง

พฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นบริเวณใกล้กับผนัง เป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งกับการจำลองการไหลเชิงตัวเลขเนื่องจาก ที่ผนังความเร็วของของไหลจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์หรือเป็นศูนย์ เนื่องจาก การหน่วงของความหนืดของของไหลจะมีผลมาก นอกจากนี้แล้วความเสียดทานที่ผนังเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการหมุนวนและความปั่นป่วนของของไหล ดังนั้นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจึงต้องมีวิธีที่ใช้สำหรับแก้ปัญหานี้

ในโปรแกรม FLUENT จะมีระเบียบวิธี 2 อย่างที่ใช้แก้ปัญหที่เกิดขึ้นของการไหลบริเวณใกล้ผนัง อันได้แก่ Near wall function และ Near-wall model ทั้งสองวิธีแตกต่างกันที่วิธีการคำนวณปัญหา โดย Near-wall model จะมีเป็นเทอมของฟังก์ชันในแบบจำลองความปั่นป่วน เพื่อการแก้ปัญหาคารไหลบริเวณใกล้ผนัง โดยจะต้องทำอีลิเมนต์บริเวณใกล้ผนังให้เล็กและจะคำนวณแต่ละอีลิเมนต์ไปเรื่อยๆจนติดผนัง ในขณะที่ Near wall function จะทำการสร้างฟังก์ชันแยกจากแบบจำลองความปั่นป่วน เพื่อคำนวณค่าคุณสมบัติการไหลต่างๆที่ อีลิเมนต์ติดกับผนัง ฟังก์ชันที่วางไว้ใน FLUENT มี 2 ประเภทได้แก่ Standard near wall function และ Non - equilibrium near wall function ซึ่งข้อจำกัดของ Near wall function ทั้งสองก็คือสามารถคำนวณการไหลที่ค่า Re ต่ำได้ไม่มากนัก และมีข้อสมมติฐานของฟังก์ชันทำให้ไม่ครอบคลุมของทุกปัญหาได้ ด้วยเหตุนี้ เพื่อแก้ปัญหาแบบจำลองที่ไม่มีแบบจำลองที่รองรับการคำนวณการไหลใกล้บริเวณผนัง จึงได้มีการสร้างแบบจำลองที่สามารถใช้ได้กับแบบจำลองความปั่นป่วนดังกล่าว แบบจำลองที่วางไว้คือ Enhanced near-wall model โดยใช้หลักการของการสร้างฟังก์ชันนำไปปรับปรุงแบบจำลองความปั่นป่วนซึ่งทำให้การแก้ปัญหาคารไหลที่ผนังมีประสิทธิภาพและสามารถใช้งานได้ครอบคลุมปัญหามากขึ้น

บทที่ 4

การจำลองหาสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์

การศึกษาและวิจัยเพื่อพัฒนาระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ จะเริ่มที่การออกแบบหรือศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์เนื่องจากอีเจ็คเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำความเย็นโดยตรง แต่โดยมากแล้วผู้วิจัยจะทำการทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะของสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ วิธีนี้ค่อนข้างใช้เวลาและงบประมาณสูงการนำการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขของการไหลมาใช้ศึกษาวิจัยอีเจ็คเตอร์ ด้วยเหตุนี้ ปัจจุบันได้มีการนำความรู้เชิงตัวเลขเข้ามาช่วยศึกษาคุณลักษณะของอีเจ็คเตอร์ เนื่องจากความรู้ด้านการคำนวณเชิงตัวเลขถูกพัฒนาเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาให้ครอบคลุมมากขึ้น ประกอบกับสมรรถนะของคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันสูงขึ้นกว่าในอดีตมาก ในบทนี้เราจะได้นำเสนอแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้ในการศึกษาสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ การยืนยันผลของการจำลองเชิงตัวเลขกับผลการทดลองของอีเจ็คเตอร์ และผลกระทบของพารามิเตอร์บางตัวที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์

1. แบบจำลองเชิงตัวเลขของอีเจ็คเตอร์

1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ถึงระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการจำลองการไหลแบบต่างๆ ซึ่งแต่ละระเบียบวิธีจะมีความเหมาะสมแล้วแต่ปัญหาที่เกิดขึ้น การจำลองการไหลเพื่อหาสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ มีการพัฒนาศึกษากันอย่างต่อเนื่องดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าแบบจำลองที่ให้ค่าที่ยอมรับได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 โปรแกรมที่ใช้เป็น FLUENT 6.0 ซึ่งใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการคำนวณของ CFD

Condition	Type
ขอบเขตทางเข้า(inlet boundary condition)	Pressure inlet
ขอบเขตทางออก(outlet boundary condition)	Pressure out
ระเบียบขั้นตอนการแก้ปัญหา(Solver)	Coupled solver
ระเบียบวิธีคำนวณ(Linearization)	Explicit method
แบบจำลองความปั่นป่วน(Turbulence model)	Standard $k - \epsilon$ model
ระเบียบวิธีแก้ปัญหการไหลของบริเวณใกล้ผนัง (Near-wall treatment method)	Standard near wall function

1.2 คุณสมบัติของสารทำงาน

สารทำงานที่ใช้ในชุดทดลองของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์เป็นน้ำ มีสถานะเป็นไอ (water vapor) ที่อีเจ็คเตอร์ซึ่งในแบบจำลองเชิงตัวเลขจะกำหนดคุณสมบัติสารเป็นก๊าซในอุดมคติ (Ideal gases) เนื่องจากความดันภายในอีเจ็คเตอร์ต่ำ ซึ่งคุณสมบัติโดยสรุปของสารทำงานแสดงดังตารางที่ 4.2 โดยโปรแกรม Fluent กำหนดเงื่อนไขของก๊าซอุดมคติที่แบบยวบตัวได้ จะใช้ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นเป็น, ρ ที่ความดันต่างๆ ตามสมการ (4.1)

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของสารในการคำนวณ

สมบัติสาร	ค่า
ความหนืด, μ (kg / m^3)	1.34×10^{-5}
ค่านำความร้อน, k (W / mK)	0.0261
ความร้อนจำเพาะ, C_p (J / kgK)	2014.00
น้ำโมลิกุล, M ($kg / kmol$)	18.01534

$$\rho = \frac{P_{op} + P}{RT} \quad (4.1)$$

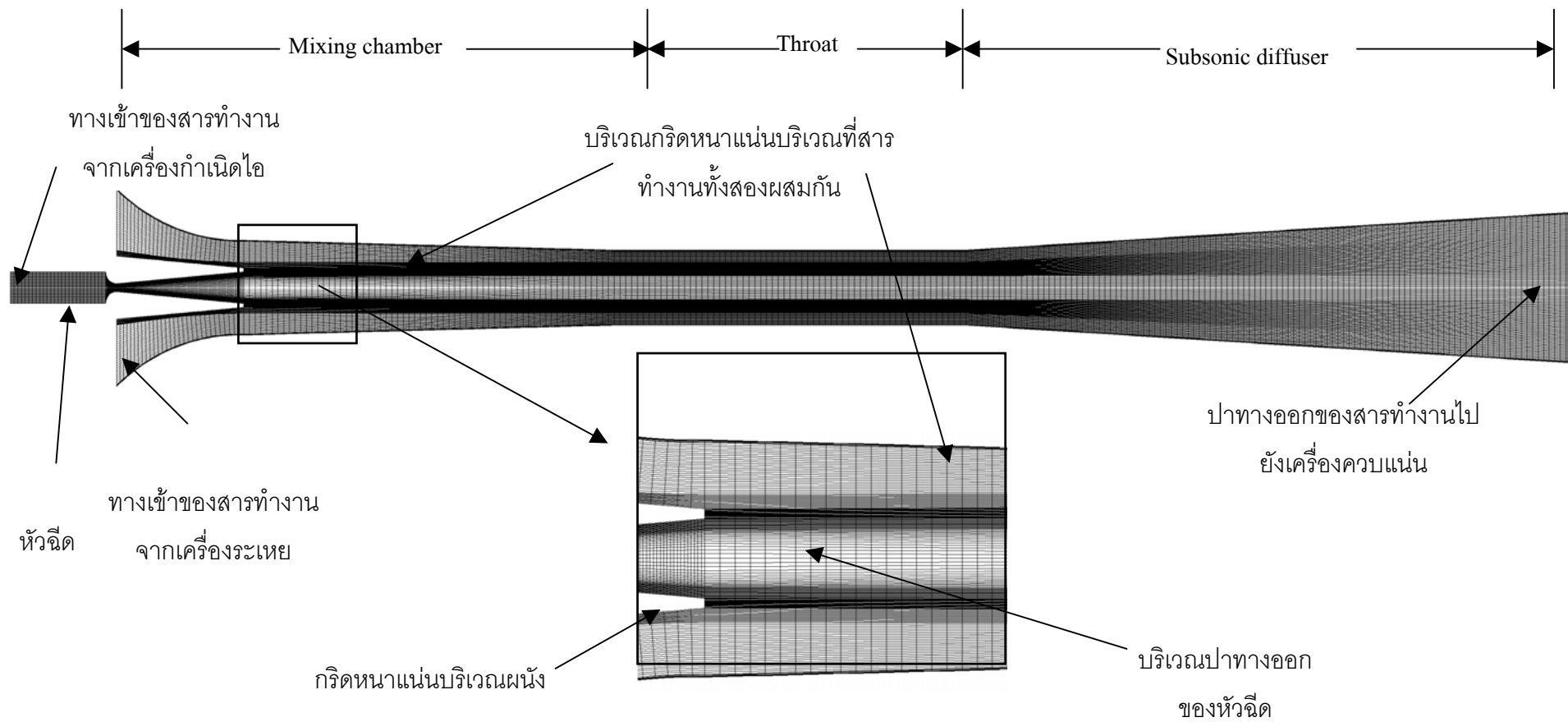
โดย P_{op} คือความดันที่ทำงานซึ่งเป็นความดันอ้างอิง ทั้งนี้ในการจะกำหนดเป็น 0 สำหรับการจำลองการไหลในอีเจ็คเตอร์

1.3 โดเมนของปัญหาและรูปร่างของกริด

โดเมนของปัญหาการไหลที่เกิดขึ้นในอีเจ็คเตอร์จะประกอบด้วยอุปกรณ์ 2 อย่าง คือ หัวฉีดและอีเจ็คเตอร์ ซึ่งโดเมนของปัญหาจะครอบคลุมบริเวณที่ของไหล ไหลผ่านอันได้แก่จากปากทางเข้าของอีเจ็คเตอร์และหัวฉีดจนถึงทางออกของอีเจ็คเตอร์ รูปร่างของอีเจ็คเตอร์จะถูกวาดในโปรแกรม GAMBIT ก่อนจะนำไปคำนวณในโปรแกรม FLUENT ทั้งนี้รูปร่างของแบบจำลองของเราจะกำหนดเป็นแบบ Axis-symmetry และนอกจากนี้แล้วเรายังได้จำลองรูปร่างจริงของอีเจ็คเตอร์แบบ 3 มิติ เพื่อทำการเปรียบเทียบผลอีกด้วย

โดเมนของปัญหาจะถูกแบ่งออกด้วยกริดรูปร่างสี่เหลี่ยม จำนวนประมาณ 40,000 โหนด ทั้งนี้กริดจะหนาแน่นสูงที่บริเวณใกล้ผนังและตลอดบริเวณที่ของไหลทั้งสองผสมกันในอีเจ็คเตอร์ เพราะ

การเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรเพื่อการคำนวณของสารมีมากที่บริเวณทั้งสอง แบบจำลองรูปร่างของอีเจ็คเตอร์ในโปรแกรม FLUENT แสดงดังรูปที่ 4.1

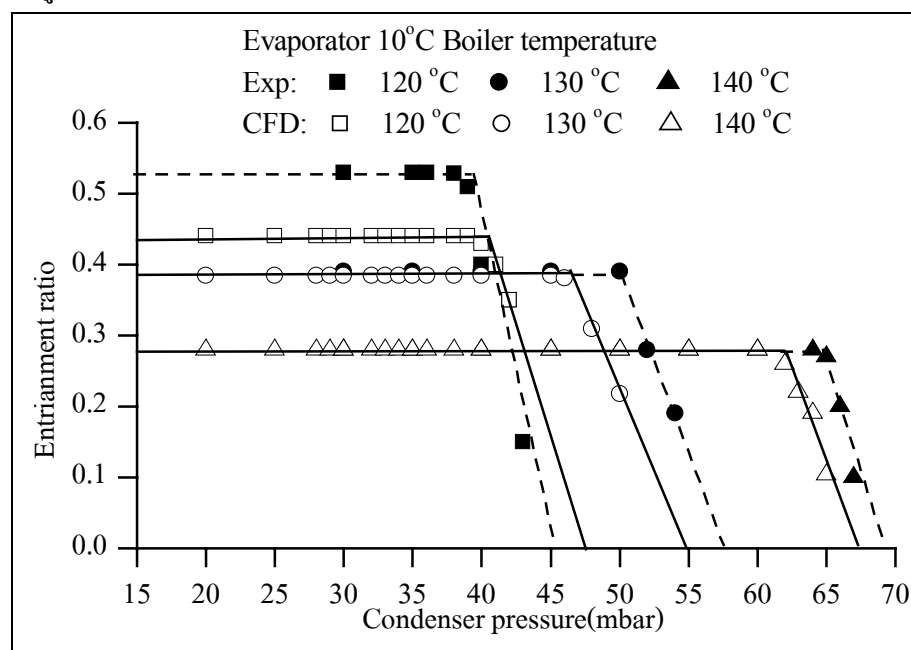


รูปที่ 4.1 รูปร่างและการแบ่งกริดภายในอีเจกเตอร์

2. ผลยืนยันแบบจำลอง CFD ของอีเจ็คเตอร์

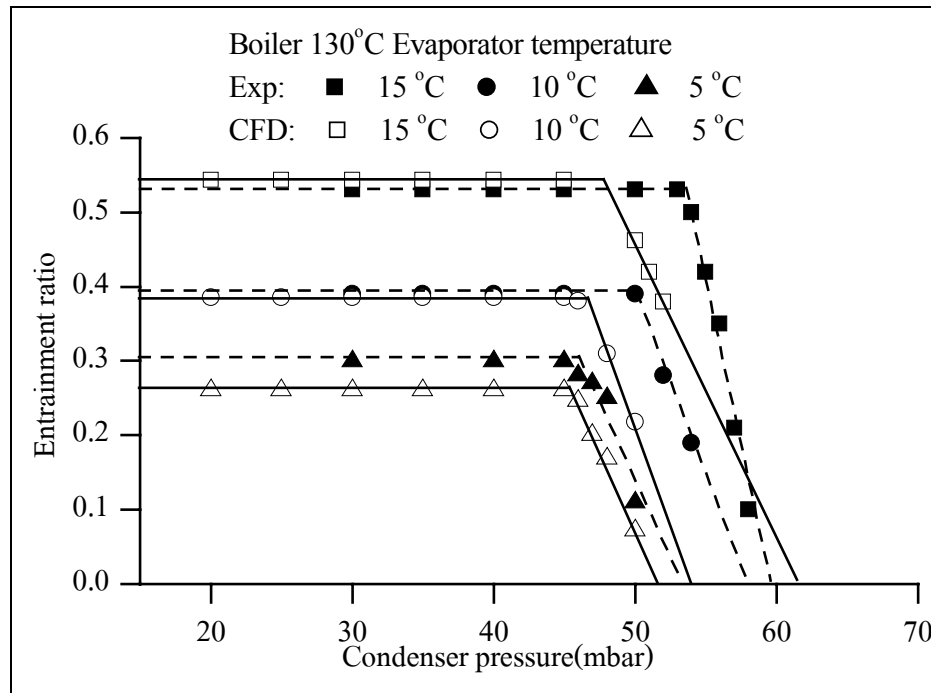
2.1 ผลกระทบจากเงื่อนไขการทำงานที่มีต่ออีเจ็คเตอร์

การศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้เราได้แบบจำลอง CFD ของอีเจ็คเตอร์ดังกล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา การหาสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์โดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขจะให้ค่าพารามิเตอร์ 2 ค่า นั่นคือค่า Critical Back Pressure (CBP) และ Entrainment ratio (R_m) ทั้งนี้เราได้ทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Chunnanond [25] ที่ทำการทดสอบอีเจ็คเตอร์ในระบบทำความเย็น และทดสอบผลกระทบของเงื่อนไขการทำงานของแต่ละอุปกรณ์ อันได้แก่ผลกระทบของ เครื่องกำเนิดไอ เครื่องระเหย และเครื่องควบแน่น เมื่อนำผลการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองเชิงตัวเลข แสดงดังรูปที่ 4.2 -4.3



รูปที่ 4.2 สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์จากผลของอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ

เมื่อเปรียบเทียบผลของแบบจำลองเชิงตัวเลขกับผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการทำงานของอีเจ็คเตอร์พบว่า ค่า CBP ของ CFD มีค่าน้อยกว่าที่ได้จากการทดลองเนื่องจากในระเบียบวิธีเชิงตัวเลขไม่สามารถคำนวณค่าการสูญเสียของความดันที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์ เช่น การสูญเสียจากการไหลสัมผัสผนังของของไหล และการสูญเสียจากกระบวนการผสมกันของของไหลทั้งสอง ได้อย่างสมบูรณ์ทั้งหมด แต่ค่า R_m ให้ผลที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน จากข้อมูลข้างต้นสนับสนุนผลการวิจัยของ Rustly และคณะ [3] Chunnanod [25] และ Riffat และคณะ [29] ทำให้มั่นใจได้ว่าแบบจำลองที่มีให้ค่าหรือผลที่ยอมรับได้กับการทดลอง ดังนั้นเราจึงสามารถนำวิธีเชิงตัวเลขมาใช้แทนการทดลองเพื่อหาสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ เพื่อลดเวลาและต้นทุนการสร้างชุดทดลอง



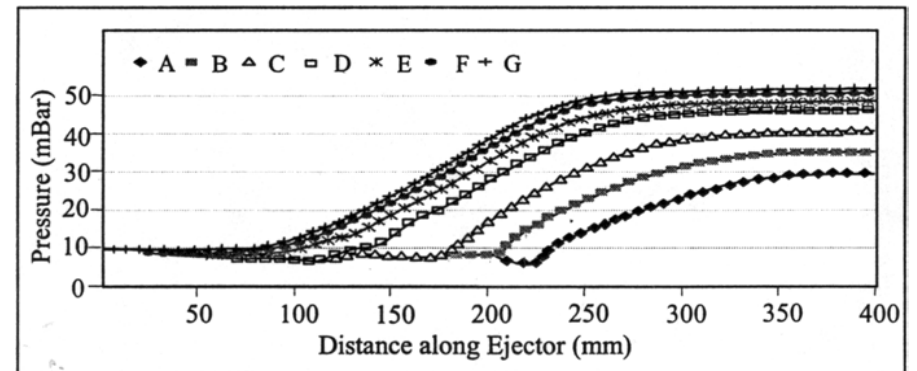
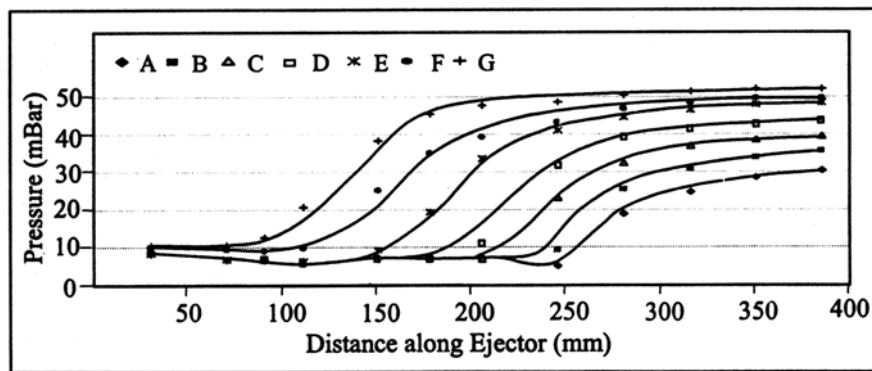
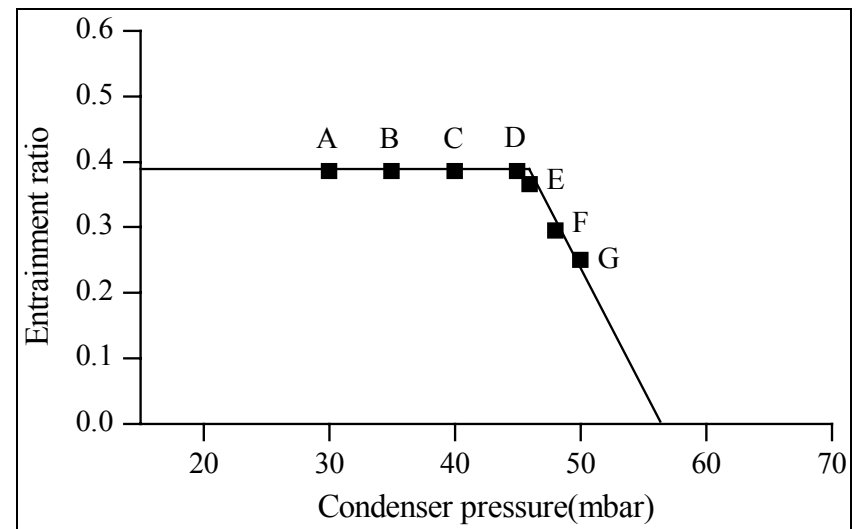
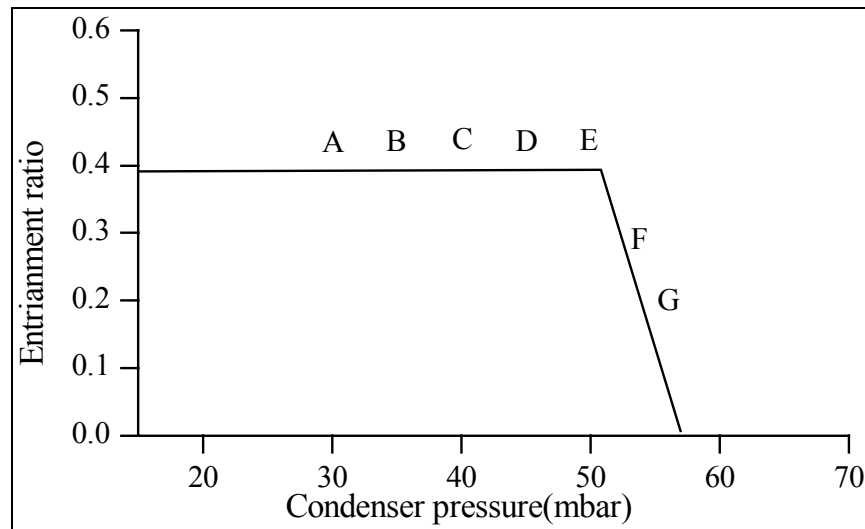
รูปที่ 4.3 สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์จากผลของอุณหภูมิเครื่องระเหย

2.2 รูปแบบความดันตลอดความยาวของอีเจ็คเตอร์

เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์ Chunnanod และคณะ [5] ได้ทำการวัดความดันสถิต ตลอดความยาวของอีเจ็คเตอร์ที่ความดันของเครื่องควบแน่นเปลี่ยนแปลง ทำให้เราทราบตำแหน่งการเกิด Chocking และ Shock ดังรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อความดันของเครื่องควบแน่นน้อยจะทำให้เราสามารถระบุตำแหน่งของปรากฏการณ์ทั้งสองได้อย่างชัดเจนแต่เมื่อความดันเครื่องควบแน่นสูงขึ้นพบว่า จะไม่สามารถสังเกตเห็นตำแหน่งการเกิด Chocking และ Shock เนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์ทั้งสองจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการทำงานของอีเจ็คเตอร์ขึ้นกับตำแหน่ง Shock จะเปลี่ยนแปลงตามความดันของเครื่องควบแน่น

เมื่อนำ CFD เข้ามาช่วยศึกษาความดันสถิตบริเวณผนังของอีเจ็คเตอร์พบว่าให้ผลแนวโน้มเช่นเดียวจากการทดลองดังแสดงดังรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นค่าความดันสถิตตามผนังของอีเจ็คเตอร์จากผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าความดันของเครื่องควบแน่น(ความดันที่ปากทางออก) จะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลข จะให้ค่าความดันที่สูงกว่าค่าจากการทดลองทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการสูญเสียในการทดลองจริงมีมากกว่าที่สามารถคำนวณได้

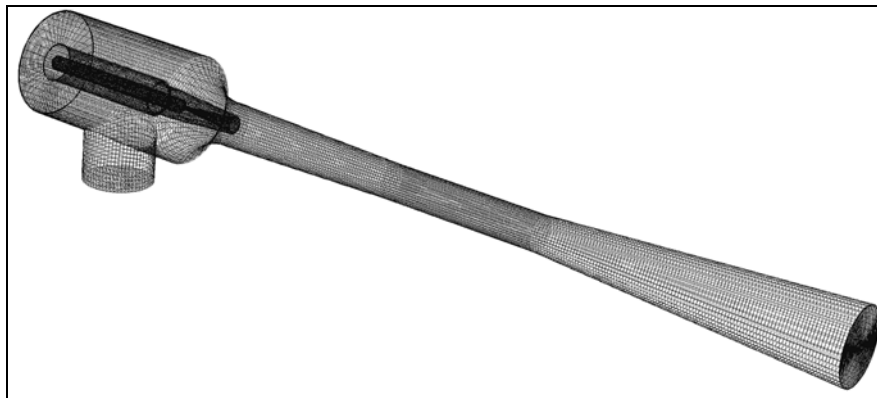
จากหัวข้อ 2.1 และ 2.2 สามารถยืนยันได้ว่าการคำนวณเชิงตัวเลขหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอีเจ็คเตอร์ สามารถที่จะทำนายพฤติกรรมและสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ได้แทนการทดลองจริง



รูปที่ 4.4 การทดลองและCFD ของความดันสถิตที่บริเวณผนังอีเจ็คเตอร์ [5]

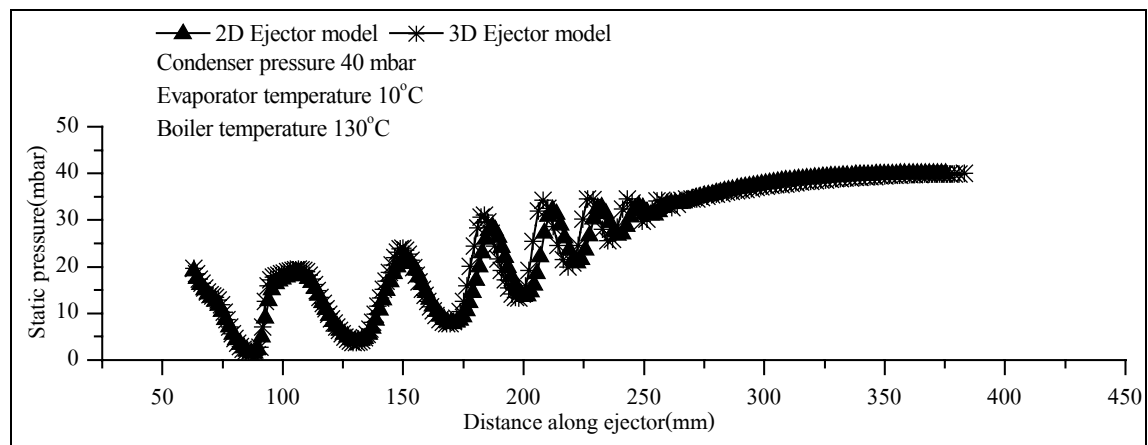
3. แบบจำลองของอีเจ็คเตอร์ใน 2 มิติ และ 3 มิติ

เนื่องจากการจำลองการไหลที่เกิดขึ้นกับอีเจ็คเตอร์จำเป็นต้องทำให้ได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด แต่โดยมากแล้วนักวิจัยจะจำลองในรูป 2 มิติ ทั้งที่รูปร่างจริงของอีเจ็คเตอร์เป็น 3 มิติ เนื่องจากในอดีตการคำนวณใน 3 มิติต้องใช้เครื่องคำนวณที่มีประสิทธิภาพและความเร็วสูง แต่ในปัจจุบันเครื่องคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะสูงขึ้น ทำให้เราสามารถนำมาคำนวณแบบจำลองเชิงตัวเลขที่สลับซับซ้อนได้ ดังนั้นเราจึงได้ทำการคำนวณแบบจำลองของอีเจ็คเตอร์ใน 3 มิติ (แสดงดังรูปที่ 4.5) เพื่อเปรียบเทียบผลกับแบบจำลอง 2 มิติ ศึกษาผลกระทบของท่อคูดที่มีต่อสมรรถนะอีเจ็คเตอร์ และสังเกตรูปแบบการไหลภายในอีเจ็คเตอร์ ในมิติที่ 3

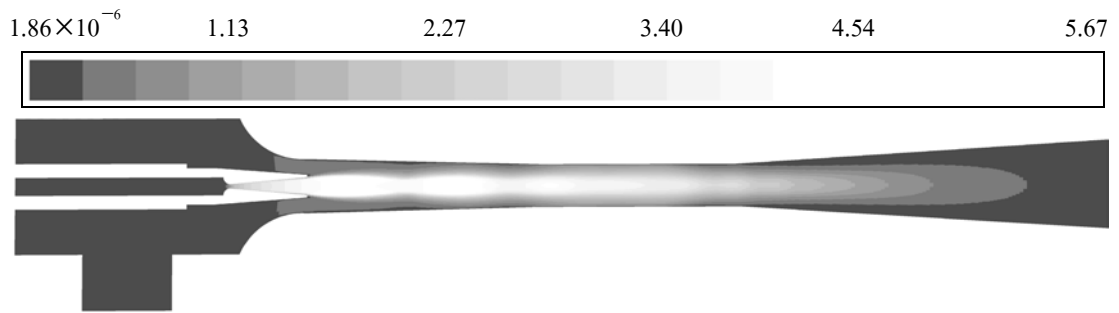


รูปที่ 4.5 รูปร่างแบบจำลองอีเจ็คเตอร์ใน 3 มิติ

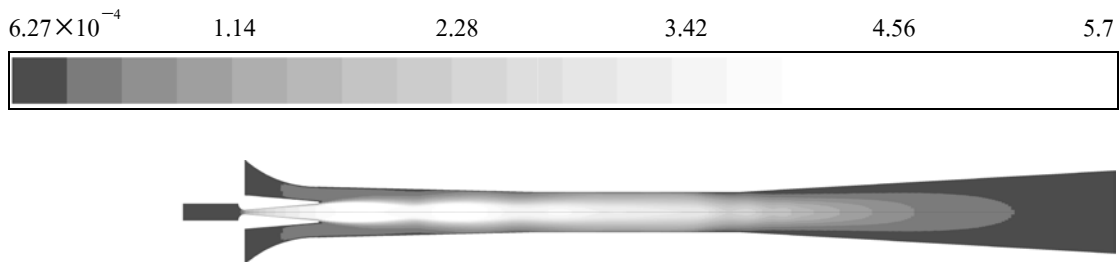
รูปที่ 4.5 แสดงโดเมนปัญหาในสามมิติของอีเจ็คเตอร์ จะเห็นว่าเราพิจารณาส่วนของท่อคูดและหัวฉีดด้วย แบบจำลองถูกแบ่งออกด้วยกริดสี่เหลี่ยมประมาณ 850,000 โหนด ทั้งนี้การคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และคุณสมบัติของสารยังใช้เช่นเดียวกับใน 2 มิติ (ตาราง 4.1-4.2) การคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์สำนักงานความเร็ว 3.5 GHz มี Memory capacity (RAM) 2 GHz โดยต้องใช้เวลาประมาณ 15 วันสำหรับแต่ละเงื่อนไขการทำงาน จะเห็นได้ว่าใช้เวลามากกว่าแบบจำลอง 2 มิติมาก



รูปที่ 4.6 ความดันสถิตตามแนวแกนของแบบจำลองอีเจ็คเตอร์ 2 มิติและ 3 มิติ



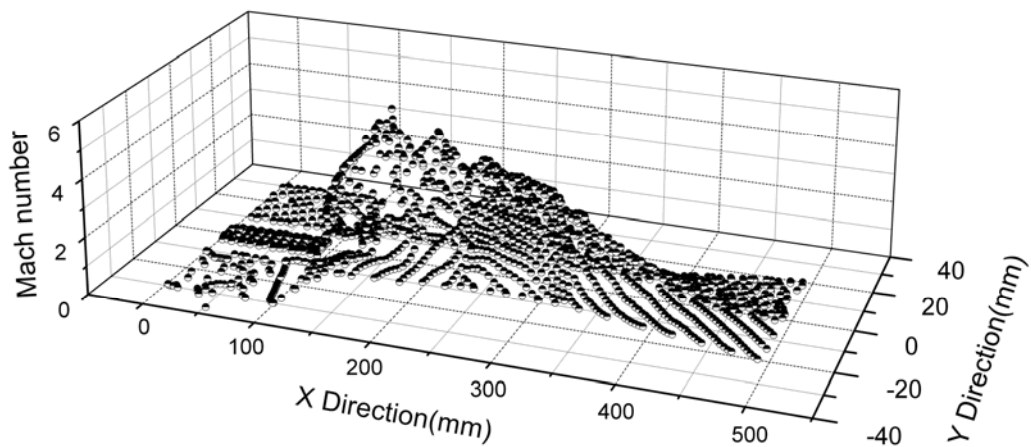
(a) Mach number contour on 3D model



(b) Mach number contour on 2D model

รูปที่ 4.7 Mach number บนระนาบของอีเจ็คเตอร์ (a) Axis symmetry (b) 3D

เมื่อพิจารณาผลเปรียบเทียบจากแบบจำลอง 2 มิติและ 3 มิติดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 เป็นกราฟความดันสถิตที่เส้นตามแนวแกน และ แถบสี Mach number ของอีเจ็คเตอร์ตามลำดับ ที่ เครื่องกำเนิดไอน้ำอุณหภูมิ 130°C , เครื่องระเหยมีอุณหภูมิ 10°C และ ความดันของเครื่องควบแน่น 40 mbar พบว่าเส้นกราฟความดันสถิตและแถบสีของทั้งสองให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมาก สังเกตว่าความดันสถิตภายในอีเจ็คเตอร์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงค่ากลับไปกลับมาซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความแรงเหนือบริเวณผนังบางครั้ง นักวิจัยอ้างท่านนิยารูปแบบการไหลภายในอีเจ็คเตอร์ที่เกิดขึ้นว่า “Pseudo shock” [38] โดยรูปร่างของ Shock จะขึ้นอยู่กับความเร็วที่ทางเข้า รูปร่างอีเจ็คเตอร์ และเงื่อนไขการทำงาน



รูปที่ 4.8 Mach number ของอีเจ็คเตอร์ในระบบแกน 3 มิติ

ข้อได้เปรียบของการจำลองการไหลใน 3 มิติ คือสามารถแสดงผลต่างๆได้ในรูปแบบ 3 มิติ ทำให้สามารถมองปัญหาได้ครอบคลุมมากขึ้น ซึ่งแบบจำลองใน 2 มิติทำไม่ได้ จากรูปที่ 4.8 แสดงกราฟ 3 มิติของ Mach number ที่ ตำแหน่งแกน X และ Y ของอีเจ็คเตอร์โดยเป็นเงื่อนไขการทำงานที่ เครื่องกำเนิดไอน้ำอุณหภูมิ 130°C , เครื่องระเหยมีอุณหภูมิ 10°C และ ความดันของเครื่องควบแน่น 30 mbar จากกราฟพบว่า ความเร็วอีเจ็คเตอร์จะสูงพร้อมกับการสลับสูงต่ำจนสังเกตเห็นได้ชัด ที่ บริเวณเส้นแกนและ ปากทางออกของหัวฉีด ที่บริเวณห้องผสม ซึ่งจะลดลงเรื่อยๆ เมื่ออยู่ใกล้บริเวณผนังและปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ นอกจากนี้ยังพบว่า ความเร็วที่บริเวณท่อคูดมิก้าน้อยมากเมื่อเทียบกับที่บริเวณภายในอีเจ็คเตอร์ เราสามารถเสมือนได้ว่าความเร็วของสารทำงานเกือบหยุดนิ่ง ก่อนที่จะเข้าห้องผสมของอีเจ็คเตอร์ และ ความเสียหายจากผนังท่อคูดมิก้าน้อยลงด้วย เพราะเหตุนี้ ทำให้ผลการจำลองใน 2 มิติและ 3 มิติมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ แบบจำลองใน 2 มิติ เพื่อลดเวลาคำนวณของปัญหา ก่อนนำมาเป็นเครื่องมือศึกษาปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้น และ ทดสอบสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อถัดไป

4. ผลกระทบของพารามิเตอร์บางตัวที่มีต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์

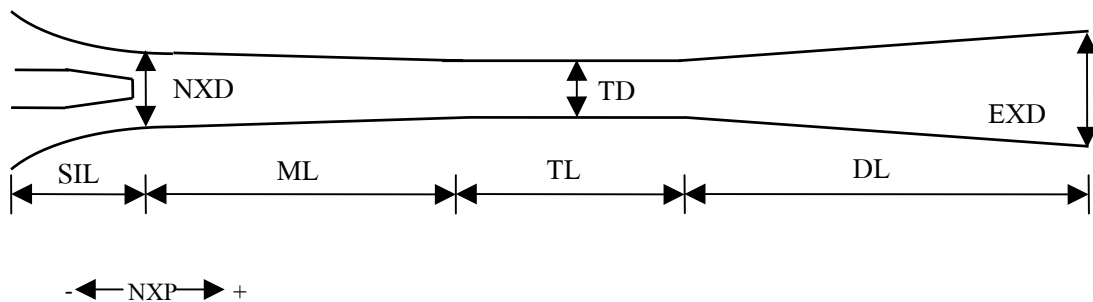
ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วตอนต้นถึงตัวสิ่งที่ส่งผลต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์นั้นมีหลายอย่าง ทั้งที่มาจากตัวของอีเจ็คเตอร์เอง เช่น รูปร่างลักษณะของอีเจ็คเตอร์ ตำแหน่งของหัวฉีดและประเภทของอีเจ็คเตอร์ที่นำมาใช้ นอกจากนี้แล้วเงื่อนไขการทำงานก็ส่งผลต่อความสามารถหรือประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ได้เช่นกัน ซึ่งในหัวนี้เราได้นำเอาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการไหลเข้ามาศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์เหล่านี้ ที่มีต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ และทำความเข้าใจลักษณะการไหลภายในอีเจ็คเตอร์ที่เกิดขึ้นด้วย โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างอีเจ็คเตอร์แบบ Constant Pressure Mixing (CPM) และ Constant Mixing Area (CMA)

4.1 ผลกระทบของเงื่อนไขการทำงาน

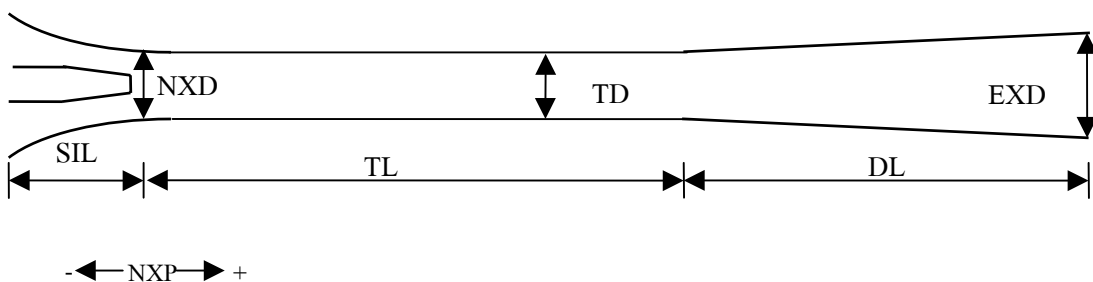
การทำงานของอีเจ็คเตอร์จะอยู่ภายใต้เงื่อนไขการทำงานของอุปกรณ์ 3 อย่างด้วยกัน คือ 1) เครื่องกำเนิดไอน้ำ ซึ่งจะส่งสารทำงานความดันสูงเข้าที่ ทางเข้าของหัวฉีด 2) เครื่องระเหย เป็นอุปกรณ์ที่ต่อเข้ากับท่อคูดมิกของอีเจ็คเตอร์ และ 3) เครื่องควบแน่น เป็นอุปกรณ์รับสารทำงานจากอีเจ็คเตอร์และเป็นอุปกรณ์กำหนดความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ ในตรวจสอบสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์เราใช้รูปร่างอีเจ็คเตอร์ตามตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.3 ขนาดของอีเจ็คเตอร์

ชนิด	Secondary inlet length SIL(mm)	Mixing length ML(mm)	Throat length TL(mm)	Diffuser length DL(mm)	Nozzle-exit position NXD(mm)	Throat diameter TD(mm)	Exit diameter EXD(mm)
CPM	30	125	95	180	24	19	40
CMA	30	-	220	180	-	24	40



(a) Constant pressure mixing (CPM) ejector



(b) Constant mixing area (CMA) ejector

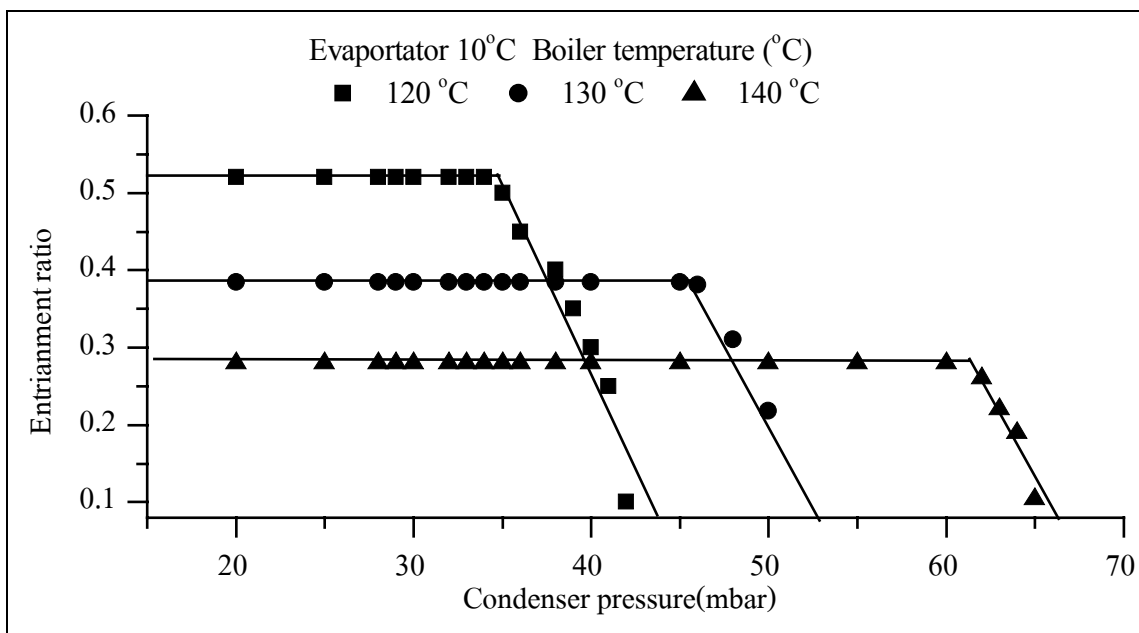
รูปที่ 4.9 รูปร่างของอีเจ็คเตอร์แบบ (a) CPM และ (b) CMA

4.1.1 ผลกระทบจากสถานะของเครื่องกำเนิดไอ

เครื่องกำเนิดไอเป็นอุปกรณ์ที่กำหนดความดันและอุณหภูมิของสารป้อนที่ทางเข้าของหัวฉีด ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของอีเจ็คเตอร์ เนื่องจากเป็นสารทำงานที่สร้างบริเวณความดันต่ำและเกิดการเหนี่ยวนำสารทำงาน ความเร็วและความรุนแรงของการเกิด Shock ของสารทำงานในอีเจ็คเตอร์จะถูกผูกโยงกับการทำงานของเครื่องกำเนิดไอ

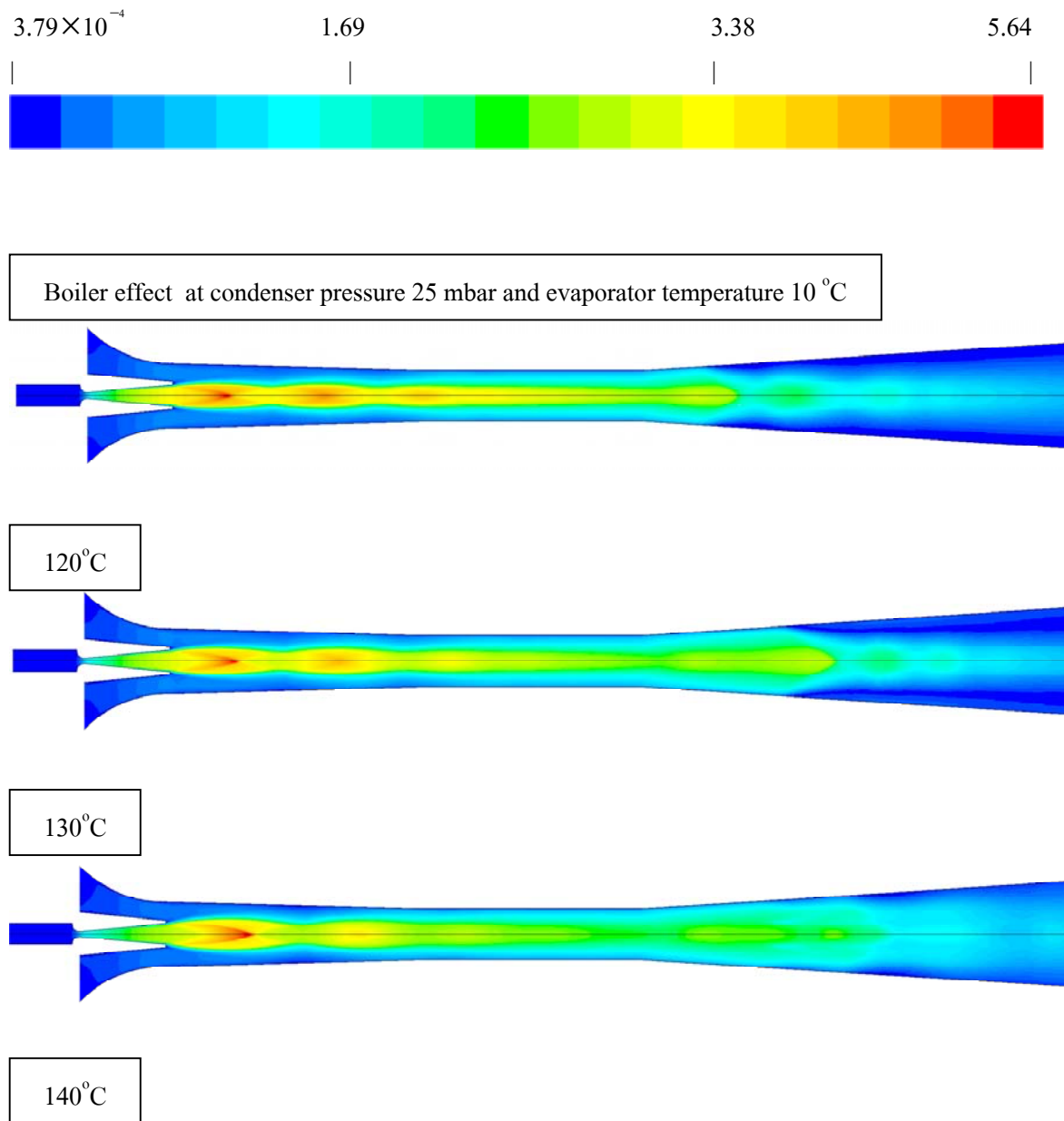
1) อีเจ็คเตอร์แบบ CPM

จากรูปที่ 4.10 แสดงค่า Em (Entrainment ratio) ต่อความดันของเครื่องควบแน่น ที่อุณหภูมิเครื่องระเหย 10°C และ อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 120°C , 130°C และ 140°C จากกราฟพบว่าเมื่ออุณหภูมิและความดันของเครื่องกำเนิดไอสูงขึ้น ค่า Entrainment ratio จะลดลง แต่ค่า CBP จะเพิ่มขึ้น ซึ่งจะให้ผลตรงข้ามหากเครื่องกำเนิดไอมีความดันและอุณหภูมิต่ำ จะสังเกตเห็นว่าเมื่อลดความดันของ เครื่องควบแน่นลงเรื่อยๆจะไม่ส่งผลต่อค่า Em โดยจะมีค่าคงที่ตลอดหากความดันเครื่องควบแน่นน้อย จะเห็นว่าให้ผลสอดคล้องกับการศึกษาของ Munday และ Bagster [15]



รูปที่ 4.10 สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์แบบ CPM เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ

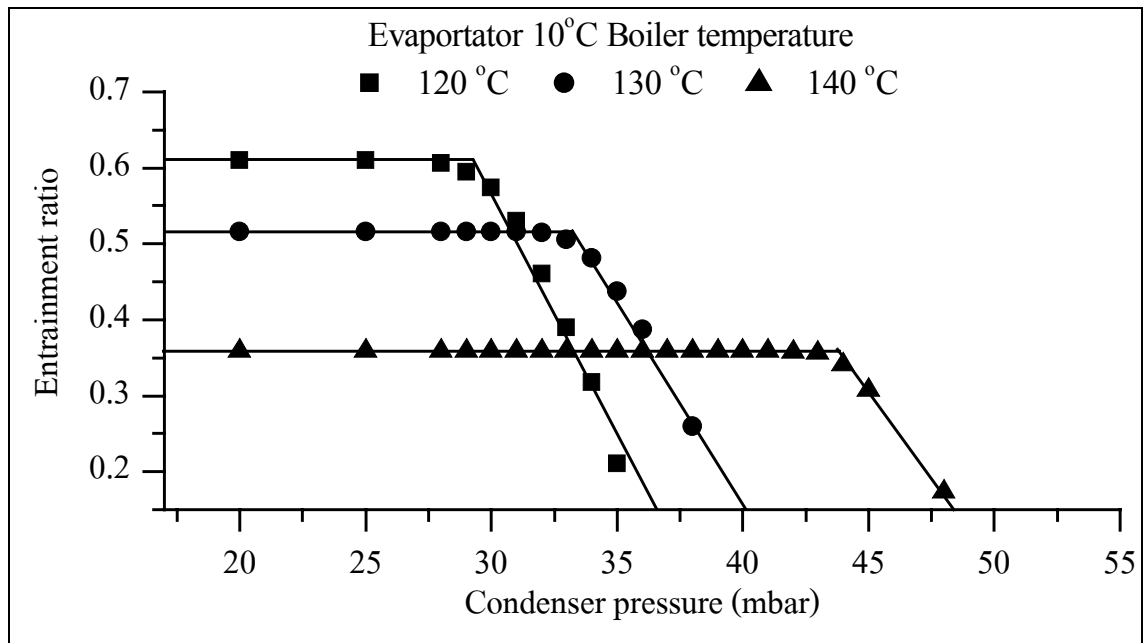
เมื่อพิจารณารูปที่ 4.11 ซึ่งเป็นภาพแสดงแถบสีของ Mach number ที่อุณหภูมิเครื่องระเหย 10°C , ความดันเครื่องควบแน่น 25 mbar และ อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 120°C , 130°C และ 140°C จากภาพการจำลองการไหล โดยการคำนวณของระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการไหลทำให้เราสามารถมองเห็นปรากฏการณ์การไหลภายในอีเจ็คเตอร์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอสูงขึ้น มุมขยายตัว (Expansion angle) จะมีขนาดโตและยาวมากขึ้น ซึ่งทำให้ Effective area มีขนาดเล็กลง อัตราการไหลเข้าของสารทฤษฎีก็ลดลง แต่จะสังเกตได้ว่าเมื่อความดันของเครื่องกำเนิดไอสูงรูปร่างของ Shock ในอีเจ็คเตอร์จะยาวขึ้นเนื่องจากมีโมเมนตัมของการไหลสูง สามารถทำความดันได้สูงด้วย



รูปที่ 4.11 แถบสีของ Mach number ที่อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอต่างกันของอีเจ็คเตอร์แบบ CPM

2) CMA อีเจ็คเตอร์

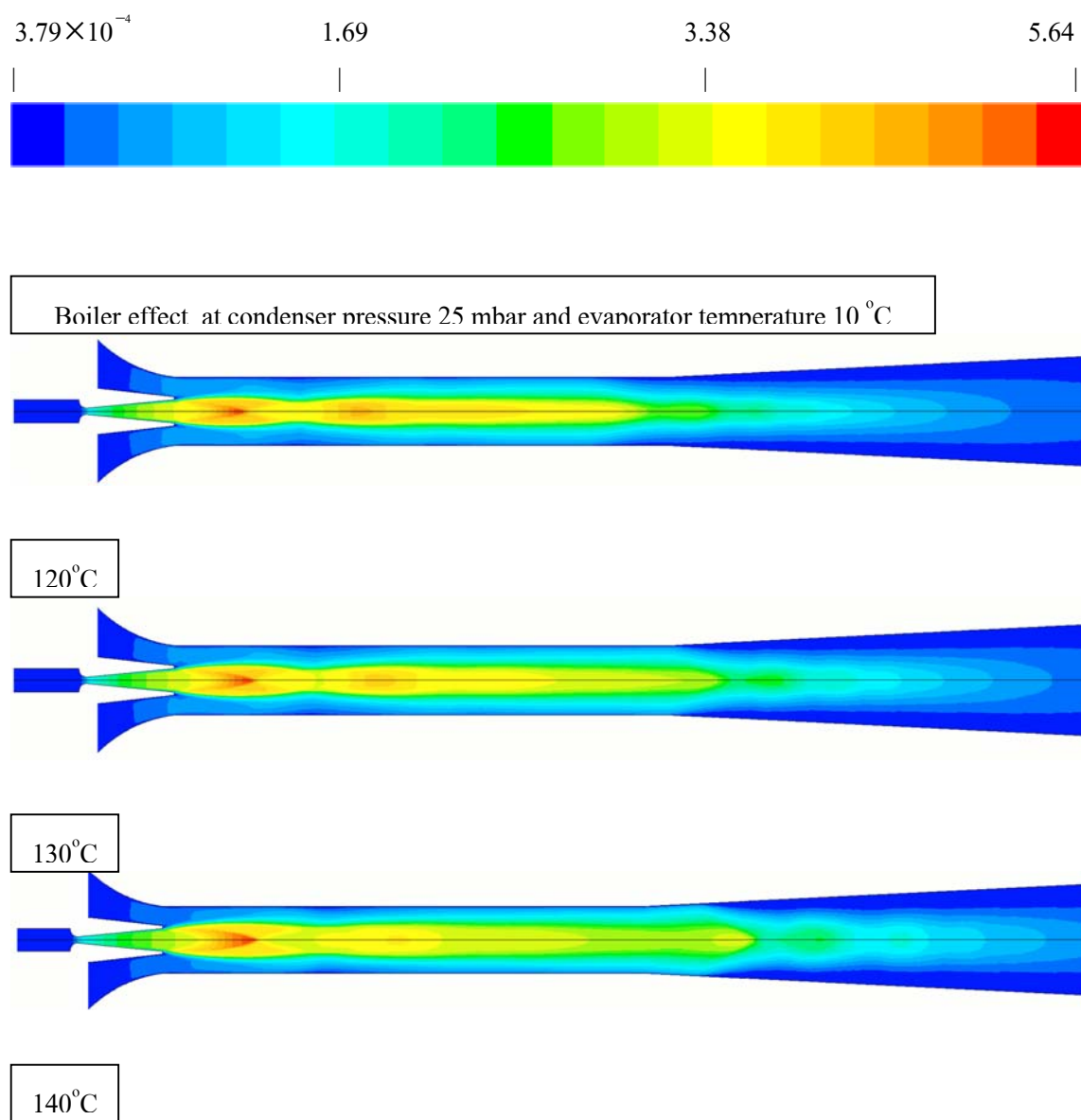
สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์แบบ CMA แสดงดังรูปที่ 4.12 เป็นกราฟของค่า Entrainment ratio ต่อความดันของเครื่องควบแน่นที่ อุณหภูมิของเครื่องระเหย 10°C และอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ 120°C, 130°C และ 140°C จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของกราฟจะเหมือนกับสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์แบบ CPM เมื่ออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอสูงขึ้น อีเจ็คเตอร์จะเหนี่ยวนำสารได้น้อยลง แต่จะสามารถทำความดันได้สูงขึ้น



รูปที่ 4.12 สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์แบบ CMA เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ

จากภาพที่ 4.13 แสดง แถบสี Mach number ที่ความดันของเครื่องระเหย 25 mbar อุณหภูมิเครื่องระเหย 10 °C และ อุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ 120 °C, 130 °C และ 140 °C จะเห็นได้ว่าเมื่อความดันหรืออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอสูงขึ้นรูปร่าง Shock จะยาวขึ้นและ Effective area มีขนาดโตขึ้น ซึ่งเป็นเหตุให้อีเจ็คเตอร์ สามารถนํ้าสารลดลงแต่สามารถทำความดันได้เพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ทั้งสองชนิด เมื่อเปลี่ยนแปลงความดันหรืออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอจะพบว่า (จากรูปที่ 4.10 และ 4.12) อีเจ็คเตอร์แบบ CMA จะสามารถนํ้าสารได้มากกว่าอีเจ็คเตอร์แบบ CPM แต่อีเจ็คเตอร์แบบ CPM จะสามารถทำความดันได้มากกว่า ที่เงื่อนไขการทำงานของเครื่องกำเนิดไอเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจาก อีเจ็คเตอร์แบบ CMA มีพื้นที่หน้าตัด Throat ของอีเจ็คเตอร์โตกว่าอีเจ็คเตอร์แบบ CPM จากรูปที่ 4.11 และ 4.13 ลักษณะรูปร่างของ Shock ที่เกิดขึ้นในอีเจ็คเตอร์แบบ CMA มีแนวโน้มเป็นระเบียบมากกว่าอีเจ็คเตอร์แบบ CPM เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของห้องผสมคงที่ต่างจากแบบ CPM ที่จะลดลงเรื่อยๆ อิทธิพลของแรงหนืดเฉือน (Viscous shear layer) ที่ผนังทำให้รูปร่าง Shock ของอีเจ็คเตอร์ทั้งสองประเภทแตกต่างกัน



รูปที่ 4.13 แถบสีของ Mach number ที่อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอต่างกันของอีเจ็คเตอร์แบบ CMA

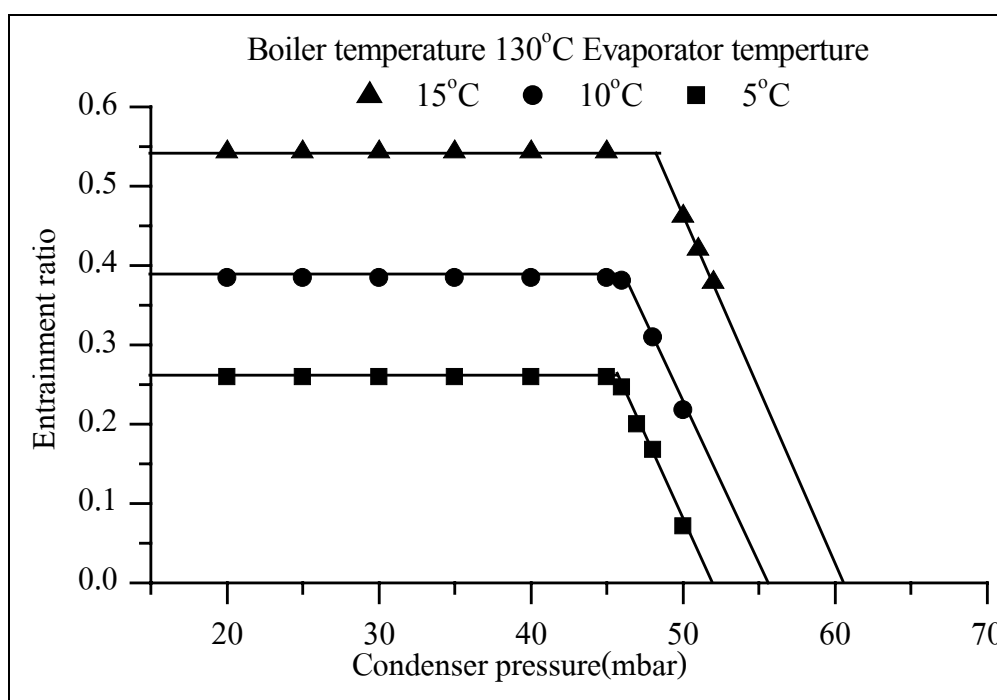
4.1.2 ผลกระทบจากสถานะของเครื่องระเหย

เครื่องระเหย (Evaporator) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่นำความร้อนจากสิ่งแวดล้อมหรือห้องทำความเย็นมาใช้ขับเคลื่อนการทำงานให้เดินในสถานะที่ความดันต่ำและส่งผลให้ห้องทำความเย็นอุณหภูมิลดลง เครื่องระเหยจะส่งไอสารทำงานที่ระเหยไปยังอีเจ็คเตอร์ ที่ท่อดูด เครื่องระเหยจะสามารถทำงานได้ดีจะขึ้นอยู่กับการทำงานของอีเจ็คเตอร์เป็นหลักเนื่องจาก อีเจ็คเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่กำหนด

ความดันในเครื่องระเหย หากความดันที่อีเจกเตอร์สามารถทำให้เครื่องระเหยได้ต่ำ ประสิทธิภาพการทำความเย็นก็จะสูงขึ้นด้วย ซึ่งในหัวข้อนี้เราได้ทำการศึกษาสมรรถนะของอีเจกเตอร์จากสภาวะการทำงาน of เครื่องระเหย เพื่อศึกษาผลกระทบและปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากสภาวะการทำงาน of เครื่องระเหย

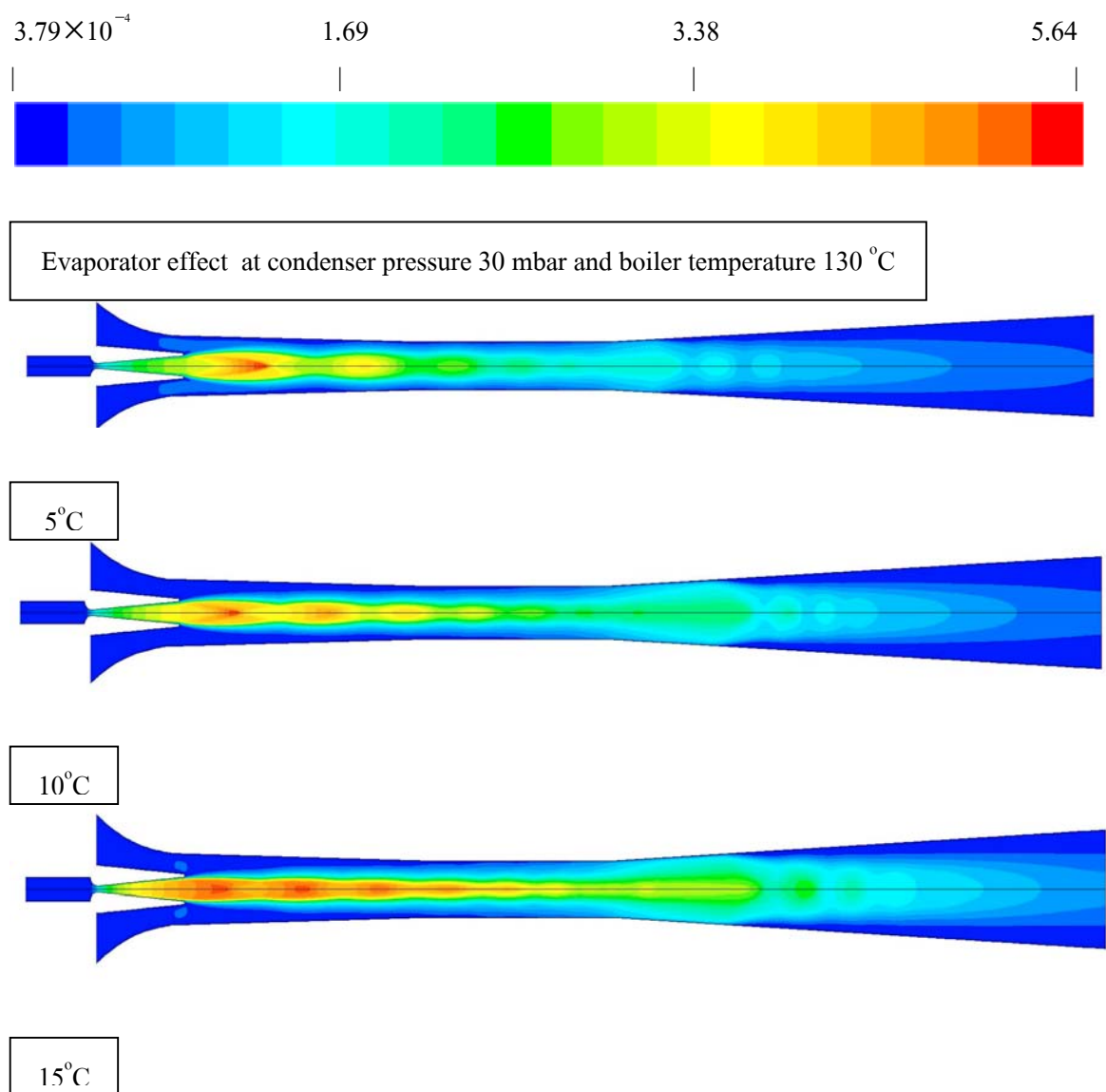
1) อีเจกเตอร์แบบ CPM

จากรูปที่ 4.14 เป็นกราฟแสดง ค่า Entrainment ratio กับ ความดันของเครื่องควบแน่น ที่อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 130°C และ อุณหภูมิเครื่องระเหย 5°C , 10°C และ 15°C จะพบว่าที่เครื่องระเหยอุณหภูมิ 5°C จะมีค่า R_m ประมาณ 0.27 ขณะที่ เครื่องระเหยอุณหภูมิ 15°C จะมีค่าอยู่ที่ 0.54 จะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิของเครื่องระเหยเพิ่มขึ้น ความสามารถเหนี่ยวนำสาร (ค่า R_m) ของอีเจกเตอร์จะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้แล้วเรายังสังเกตได้ว่าเมื่อความดันหรืออุณหภูมิของเครื่องระเหยเพิ่มขึ้นจะทำให้อีเจกเตอร์สามารถทำความดันได้สูงขึ้น ดังเหตุได้จากจุด CBP เพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิของเครื่องระเหยเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.14 สมรรถนะของอีเจกเตอร์แบบ CPM เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องระเหย

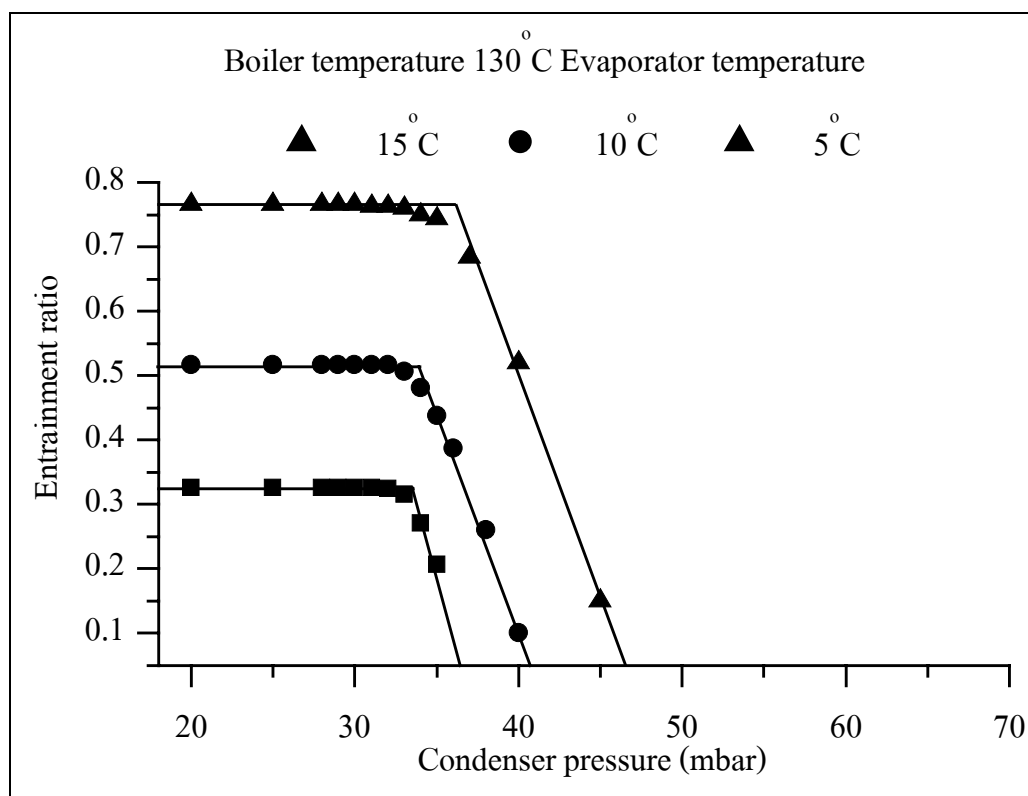
เมื่อความดันหรืออุณหภูมิของเครื่องระเหยเพิ่มขึ้น โมเมนตัมของการไหลของสารทำงานทุติยภูมิจะมีค่ามากทำให้ อีเจ็คเตอร์ สามารถเหวี่ยงนำสารและทำความดันได้สูง นอกจากนี้แล้ว เมื่อเราสังเกตแถบสี Mach number (ภาพที่ 4.15) จะเห็นรูปร่าง Shock จะยาวมากขึ้นและ Effective area ขยายโตขึ้น เมื่อเครื่องระเหยมีอุณหภูมิหรือความดันสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้เมื่อเครื่องระเหยมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะให้อีเจ็คเตอร์มีสมรรถนะที่สูงขึ้นด้วย



รูปที่ 4.15 แถบสีของ Mach number ที่อุณหภูมิเครื่องระเหยต่างกันของอีเจ็คเตอร์แบบ CPM

2)อีเจ็คเตอร์แบบ CMA

จากภาพที่ 4.16 แสดงกราฟของ ค่า R_m ต่อ ความดันของเครื่องควบแน่น ที่ อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 130°C และ อุณหภูมิเครื่องระเหย 5°C , 10°C และ 15°C ของอีเจ็คเตอร์แบบ CMA จะพบว่ากราฟมีแนวโน้มดังเช่นอีเจ็คเตอร์แบบ CPM ซึ่งที่เครื่องระเหยอุณหภูมิ 5°C จะมีค่า R_m ประมาณ 0.32 ที่เครื่องระเหยอุณหภูมิ 15°C จะมีค่าอยู่ที่ 0.72 เมื่ออุณหภูมิของเครื่องระเหยเพิ่มขึ้น อีเจ็คเตอร์จะสามารถเหนี่ยวนำสารและทำความดันได้เพิ่มขึ้น เหมือนกับอีเจ็คเตอร์แบบ CPM การเพิ่มความดันของสารทุติยภูมิจะทำให้รูปร่างของ Shock เปลี่ยนแปลง (จากรูปที่ 4.17) ซึ่งส่งผลต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมาแล้ว



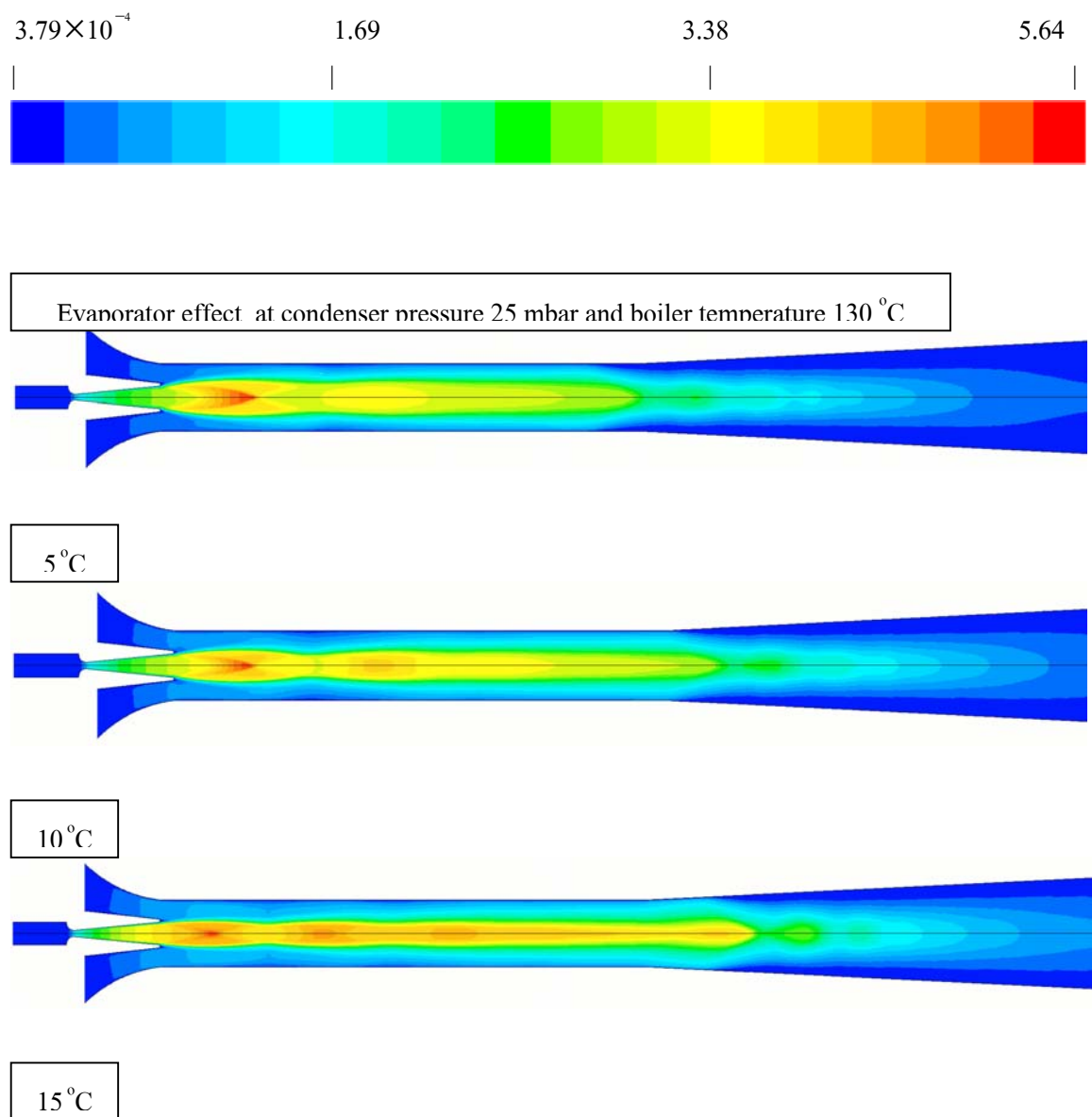
รูปที่ 4.16 สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์แบบ CMA เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องระเหย

เมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ทั้งสองชนิด อีเจ็คเตอร์แบบ CPM จะให้ความดันได้สูงกว่าแบบ CMA แต่สามารถเหนี่ยวนำสารได้ต่ำกว่า อีเจ็คเตอร์แบบ CMA ซึ่งจะให้รูปร่างของ Shock ราบเรียบ (จากรูปที่ 4.17) การผสมกันของสารปฐมภูมิและทุติยภูมิไม่สมบูรณ์ดังนั้นประสิทธิภาพการทำความดันจึงต่ำกว่าแบบ CPM

4.2 ผลกระทบจากรูปร่างของอีเจ็คเตอร์

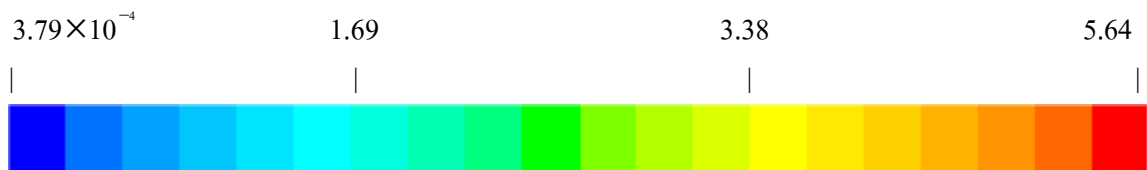
4.2.1 ตำแหน่งปากทางออกของหัวฉีด (Nozzle exit position, NXP)

ในการศึกษาผลกระทบของตำแหน่งปากทางออกของ Nozzle (NXP) จะใช้รูปร่างขนาดของอีเจ็คเตอร์ตามตารางที่ 4.3 โดยทำการจำลองการไหลและคาดการณ์สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ทั้งสองประเภทตามเงื่อนไขการทำงานต่างๆ เช่น ผลกระทบของเครื่องกำเนิดไอ เครื่องระเหย และแสดงแถบสีของ Mach number เพื่อทำความเข้าใจปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น

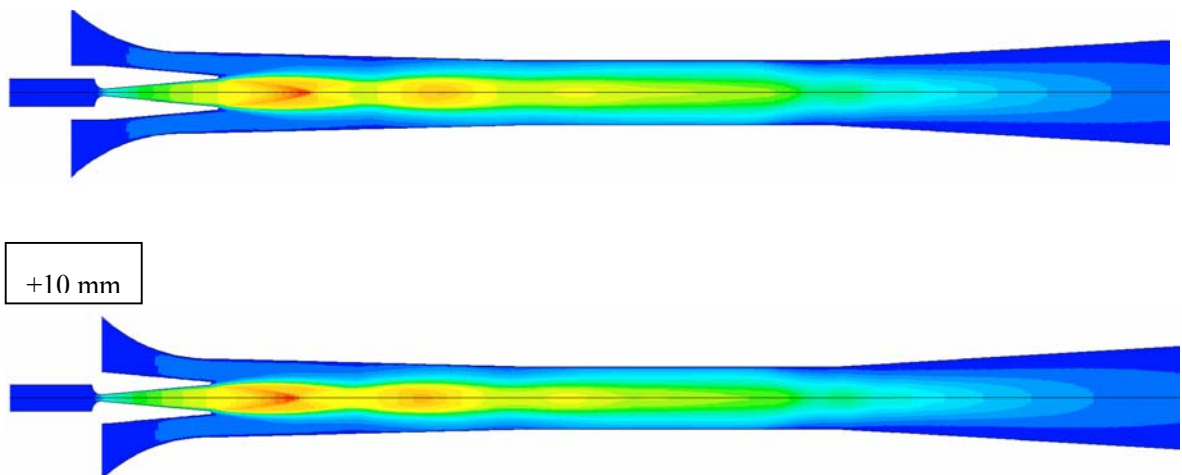


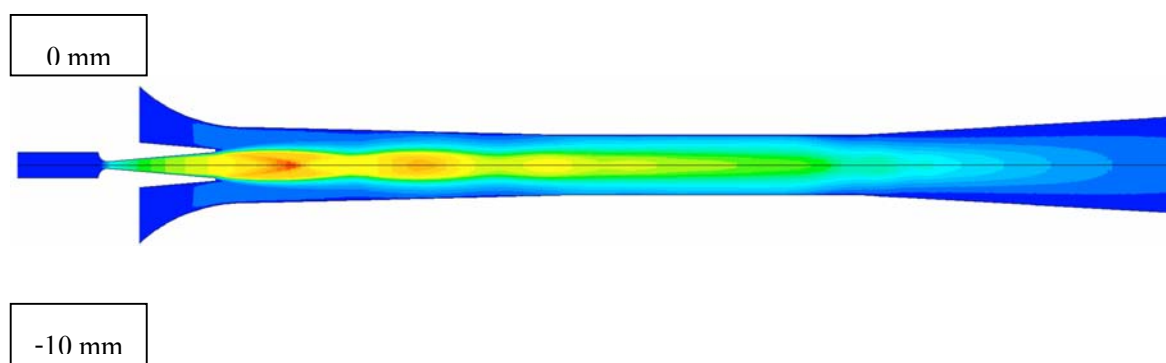
รูปที่ 4.17 แถบสีของ Mach number ที่อุณหภูมิเครื่องระเหยต่างกันของอีเจ็คเตอร์แบบ CMA

จากรูปที่ 4.18 แสดงแถบสีของ Mach number ที่เงื่อนไขการทำงานเดียวกัน แต่เปลี่ยนตำแหน่ง NXP ของหัวฉีด จะเห็นได้ว่ารูปแบบของ Shock ไม่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งของ NXP ทำให้เราทราบได้ว่ารูปร่างของ Shock นั้นจะขึ้นกับเงื่อนไขการทำงานเป็นหลัก แต่สังเกตได้ว่าการเลื่อนตำแหน่ง NXP ออกหากห้องผสมจะทำให้ขนาดของ Effective area ขยายโตขึ้นเพราะขนาดพื้นที่หน้าตัดตำแหน่งที่เกิด Effective area มีขนาดโตขึ้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง NXP จะทำให้ตำแหน่งการเกิด Effective area เปลี่ยนแปลงแต่ไม่ทำให้รูปร่างของ Shock เปลี่ยนแปลง

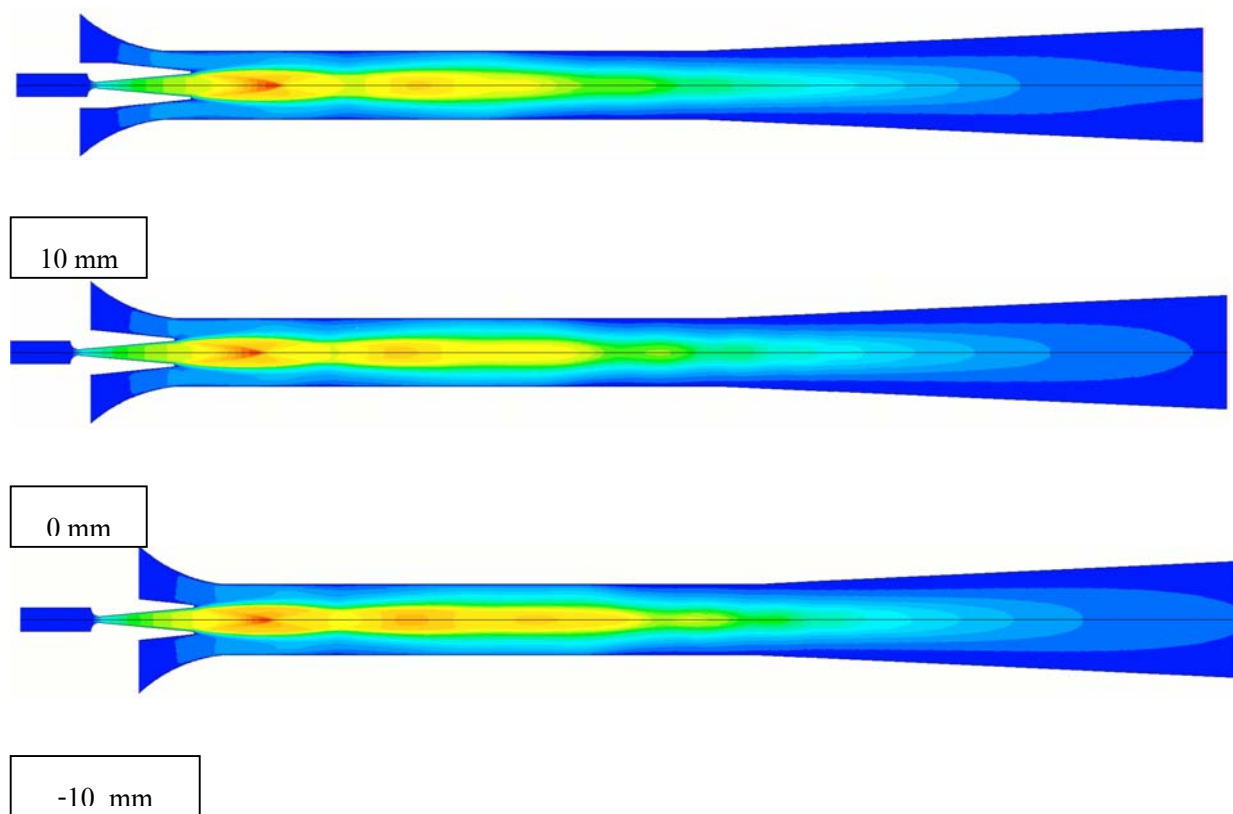


Effect of NXP distance at boiler temperature 130°C , evaporator temperature 10°C and condenser pressure 30 mbar





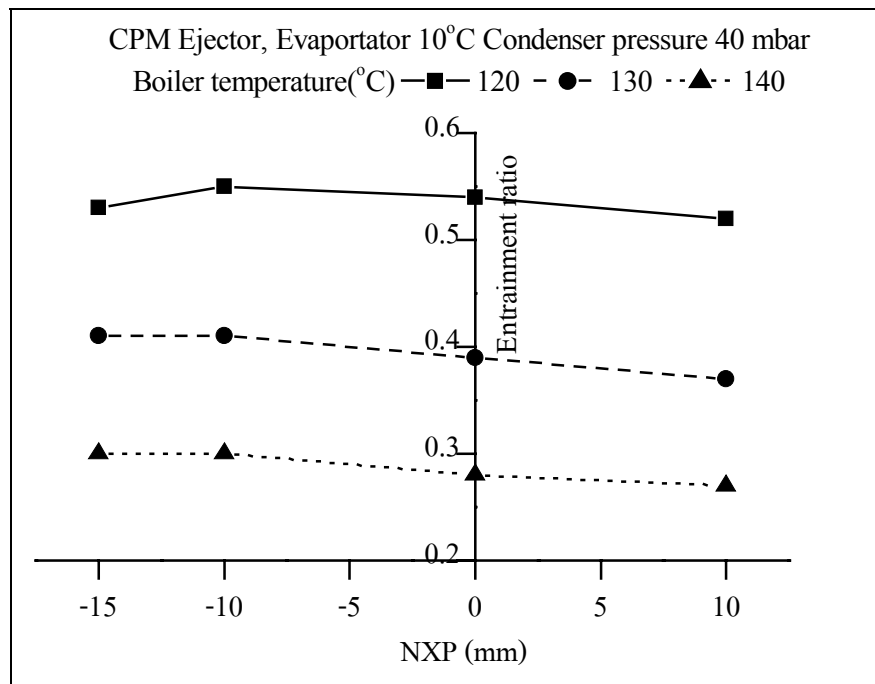
(a) อีเจ็คเตอร์แบบ CPM



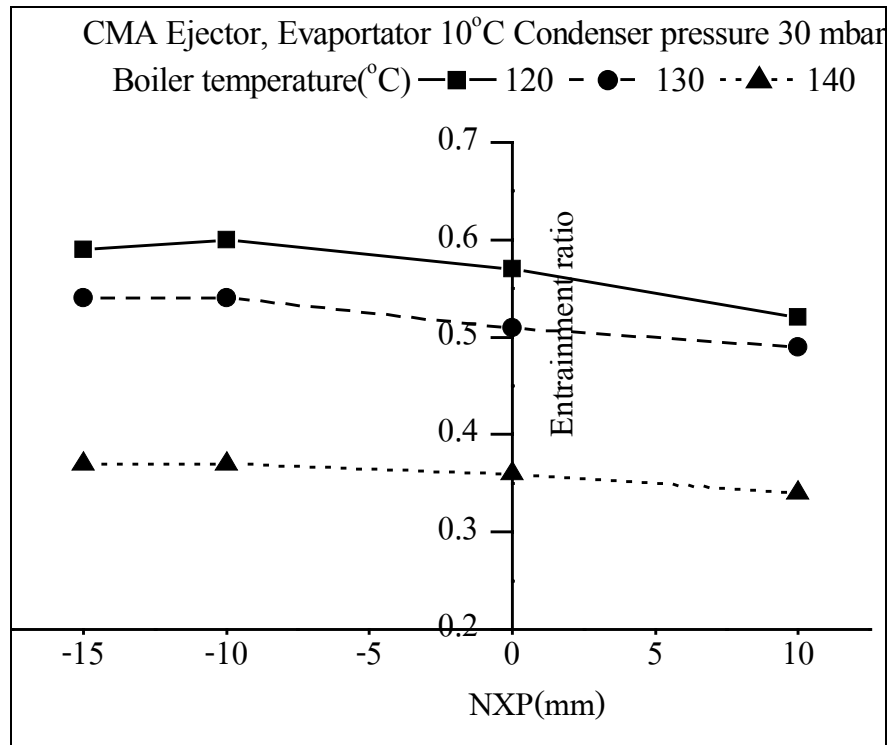
(b) อีเจ็คเตอร์แบบ CMA

รูปที่ 4.18 แถบสีของ Mach number ที่ตำแหน่งหัวฉีดต่างๆ ของอีเจ็คเตอร์แบบ (a)CPM และ (b)CMA

รูปที่ 4.19 และ 4.20 แสดงผลกระทบของอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหยที่ NXP ค่าต่างๆ ที่มีต่อค่า R_m สูงสุดของอีเจ็คเตอร์ จะเห็นได้ว่าเมื่อลดอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ ค่า R_m จะเพิ่มขึ้น พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องระเหยและเครื่องกำเนิดไอที่ 15 °C และ 120 °C จะให้ค่า R_m สูงสุด นอกจากนั้นยังพบว่าหากถอยหัวฉีดออกจากทางเข้าห้องผสมในตำแหน่งที่พอเหมาะ อีเจ็คเตอร์จะมีค่า R_m มากขึ้น แต่ถ้าถอยออกมากเกินไป ค่า R_m จะลดลง ดังที่กล่าวไว้แล้วว่าเมื่อถอยหัวฉีดออกจากห้อง Effective area จะเปลี่ยนตำแหน่งเกิดห้วงออกมาจากห้องผสมด้วย และมีขนาดเพิ่มขึ้นจากพื้นที่หน้าตัดของอีเจ็คเตอร์โตขึ้น ทำให้ค่า R_m เพิ่มขึ้น

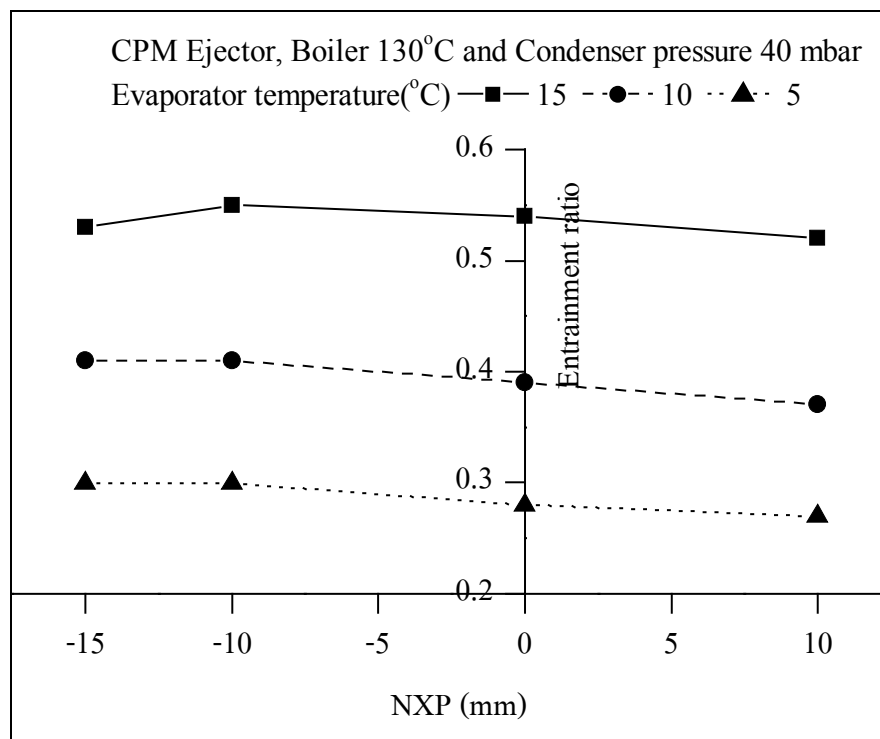


(a)CPM ejector

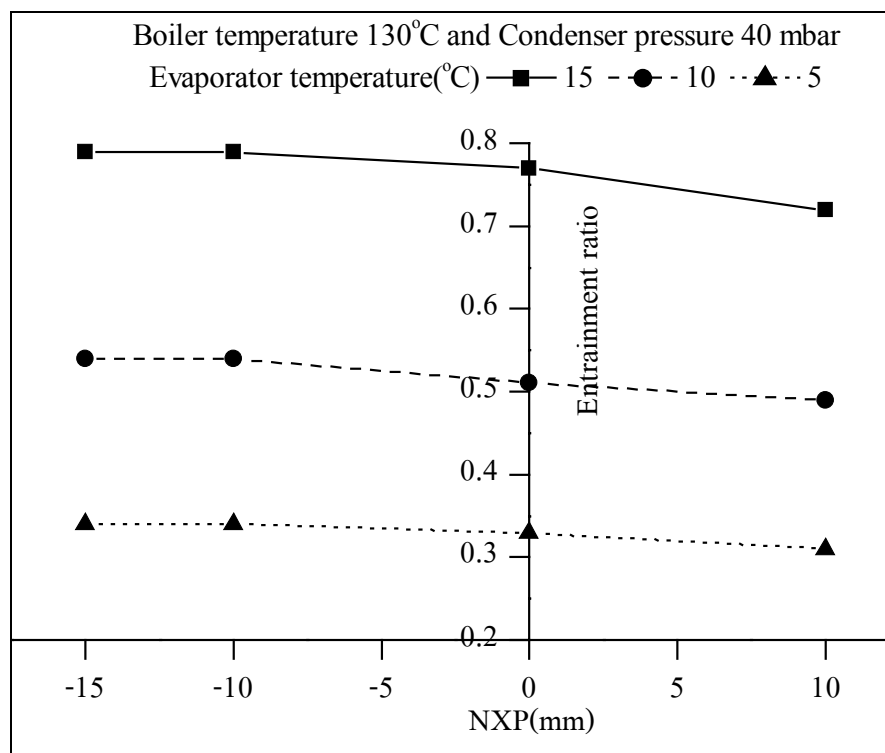


(b) CMA ejector

รูปที่ 4.19 อิทธิพลของของอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอและตำแหน่งหัวฉีดที่มีต่อค่า Entrainment ratio ของอีเจกเตอร์แบบ (a) CPM และ (b) CMA



(a) CPM ejector

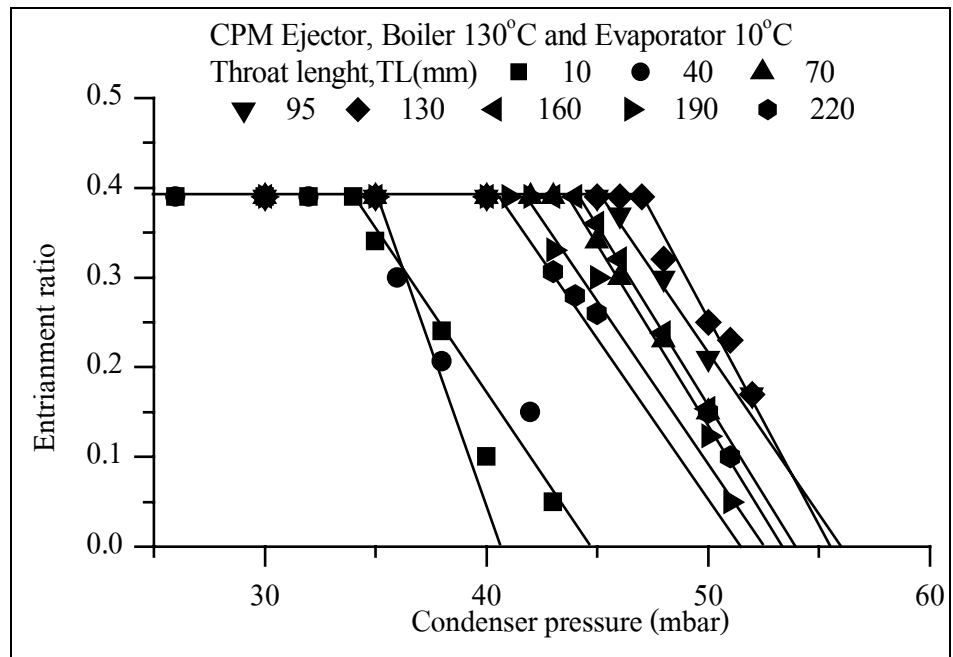


(b) CMA ejector

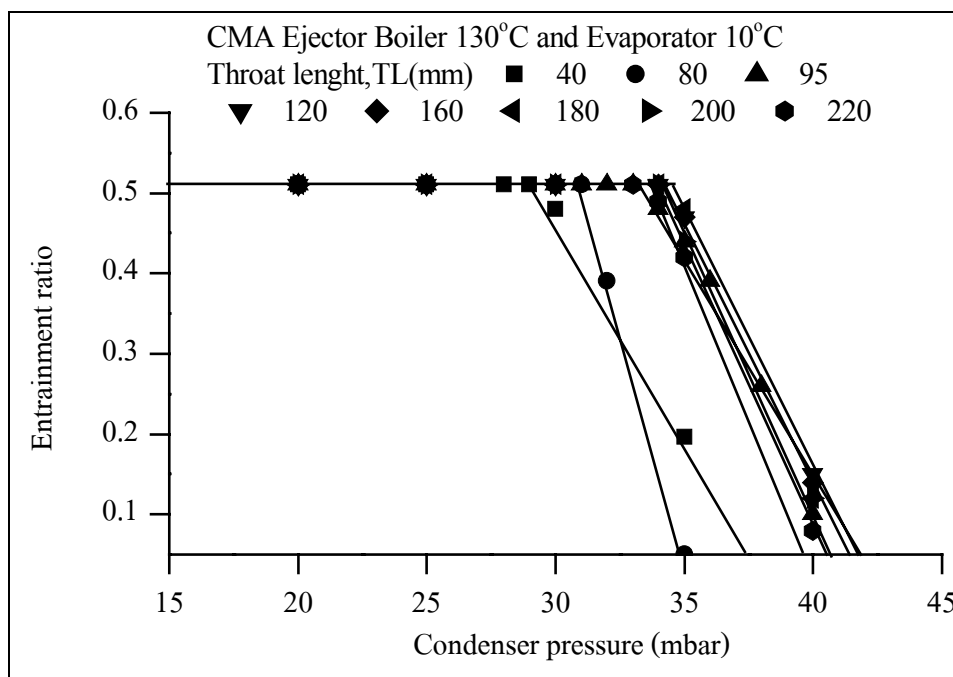
รูปที่ 4.20 อิทธิพลของอุณหภูมิเครื่องระเหยและตำแหน่งหัวฉีดที่มีต่อค่า Entrainment ratio ของอีเจกเตอร์แบบ (a) CPM และ (b) CMA

4.2.2 ความยาวของ throat

อีเจกเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาสมรรถนะจากอิทธิพลของความยาว throat (TL) นั้นจะใช้รูปร่างที่ $NXP = 0$ mm และรูปร่างตามตารางที่ 1 แต่จะเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของ TL ซึ่งใช้กับอีเจกเตอร์ทั้งสองรูปร่างคือ CPM และ CMA โดยทดสอบผลกระทบเช่นเดียวกับหัวข้อที่ผ่านมา นั่นคือศึกษาถึงผลกระทบจากเงื่อนไขการทำงานด้วย ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 4.21, 4.22 และ 4.23



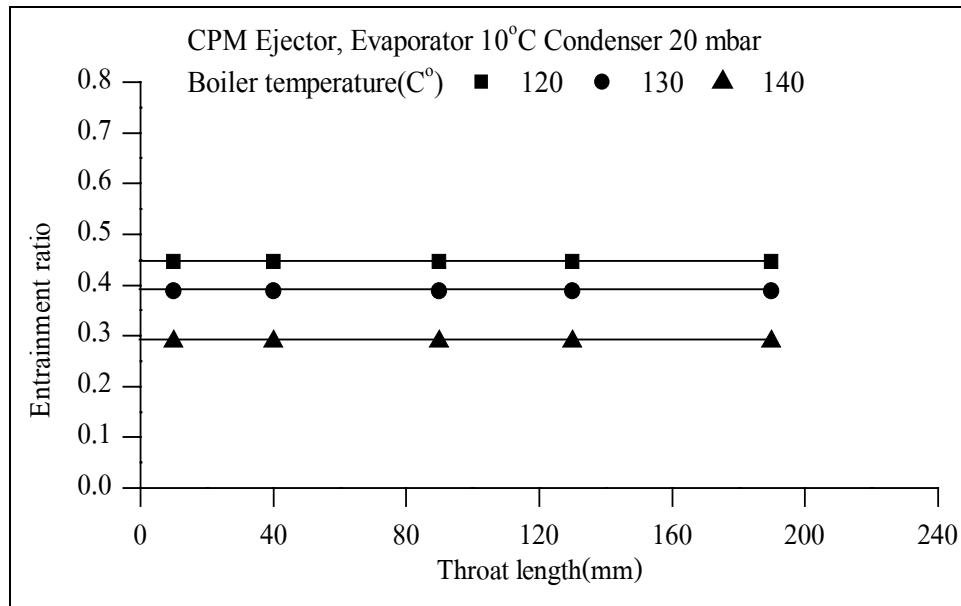
(a) CPM ejector



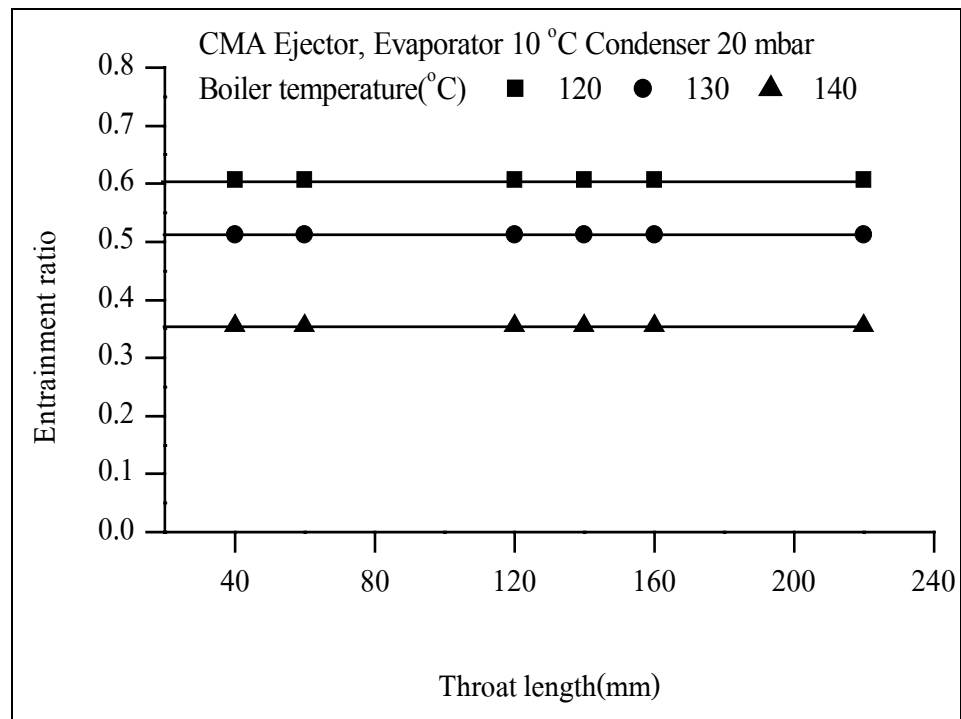
(b) CMA ejector

รูปที่ 4.21 ผลของความยาว Throat ที่มีต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์แบบ (a) CPM และ (b) CMA

จากรูปที่ 4.21 พบว่าเมื่อเพิ่มค่า TL มากขึ้นจะทำให้ค่า CBP เพิ่มขึ้นแต่ความสามารถในการเหนี่ยวนำจะคงที่ซึ่ง ณ ที่นี้พบว่า อีเจ็คเตอร์แบบ CPM ได้ค่า TL ที่ให้ค่า CBP สูงสุดตามเงื่อนไขในรูปที่ 4.21(a) อยู่ที่ประมาณ 130 mm และ จากรูป 4.21(b) อีเจ็คเตอร์แบบ CMA ให้ ค่า TL-125 ที่ให้จุด CBP สูงสุดอยู่ที่ประมาณ 95-120 mm ซึ่งหากค่า TL เกิดจากค่าเกินค่าเหล่านี้ไป จุด CBP จะลดลง



(a) CPM ejector

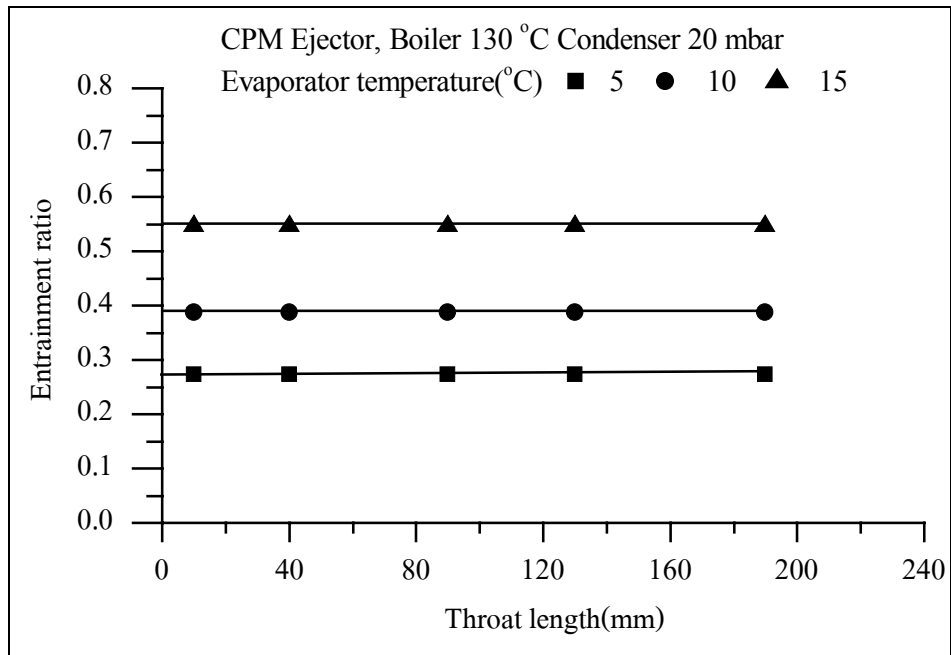


(b) CMA ejector

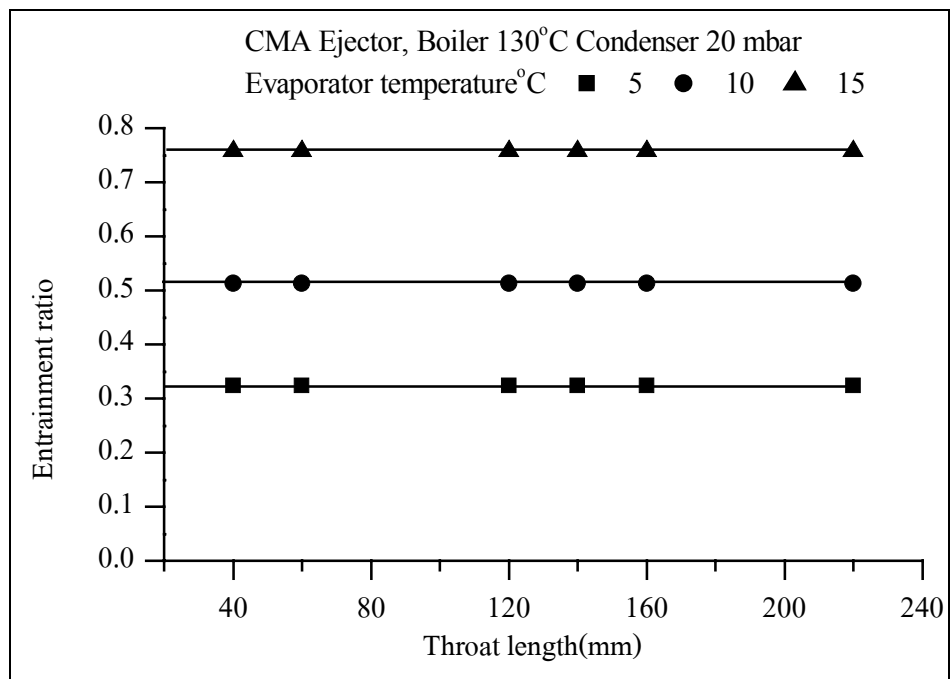
รูปที่ 4.22 อิทธิพลของอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอและความยาว Throat ที่มีต่อค่า Entrainment ratio

ของอีเจกเตอร์แบบ (a) CPM และ (b) CMA

จากรูปที่ 4.22 และ 4.23 แสดงผลกระทบของเครื่องกำเนิดไอ และ เครื่องระเหยกับ TL ค่าต่างๆที่มีต่อค่า R_m จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหยจะมีผลต่อค่า R_m สูงสุดแต่การเปลี่ยนแปลงความยาว TL จะไม่ทำให้ค่า R_m เปลี่ยนแปลง

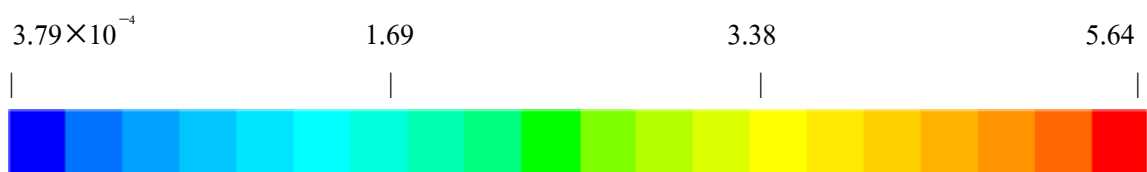


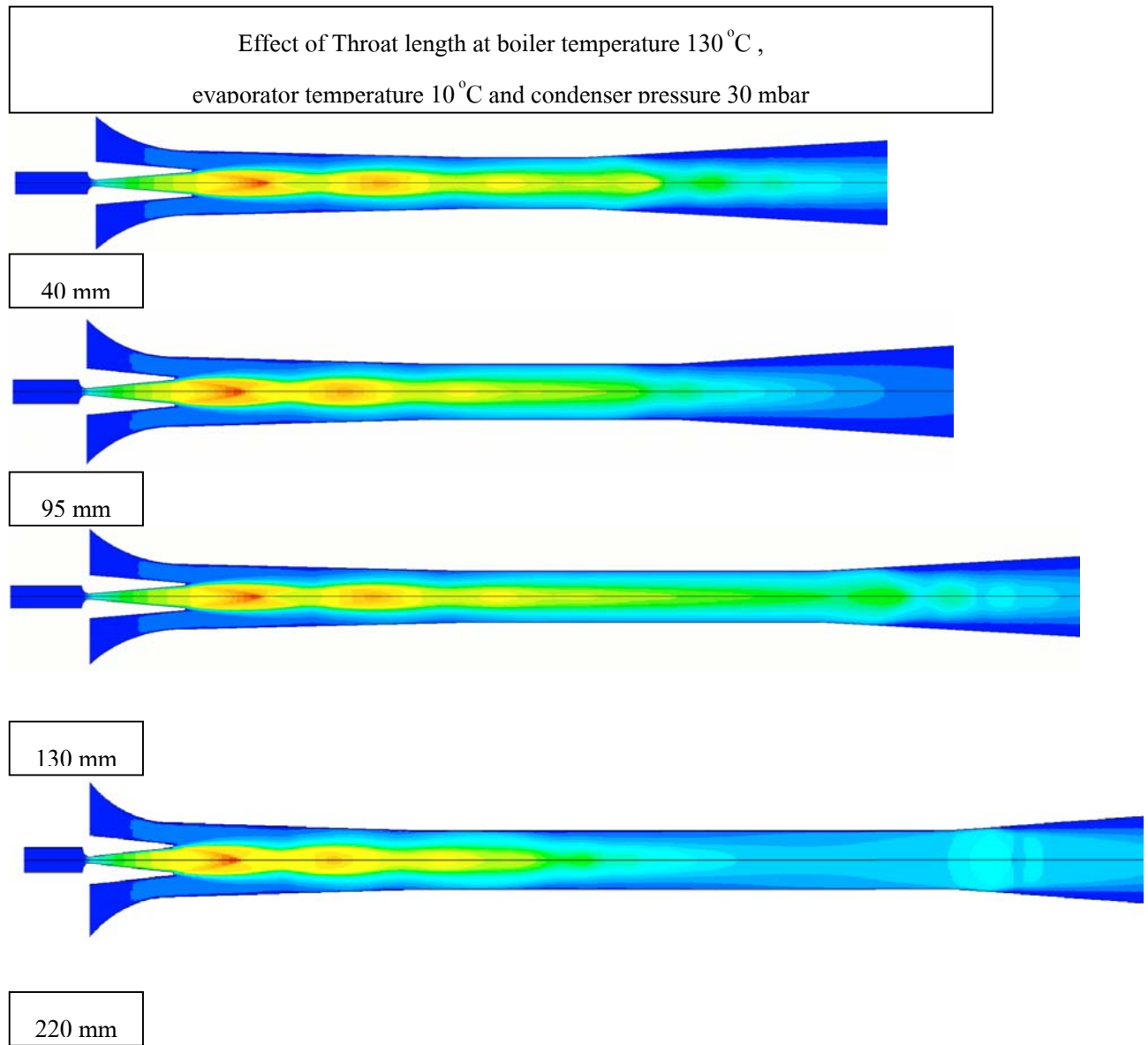
(a) CPM ejector



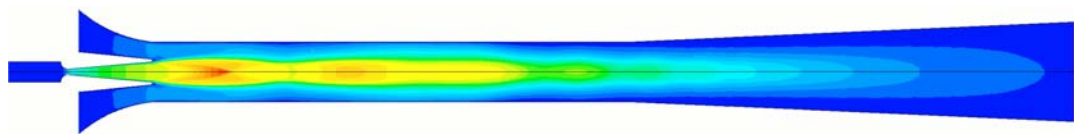
(b) CMA ejector

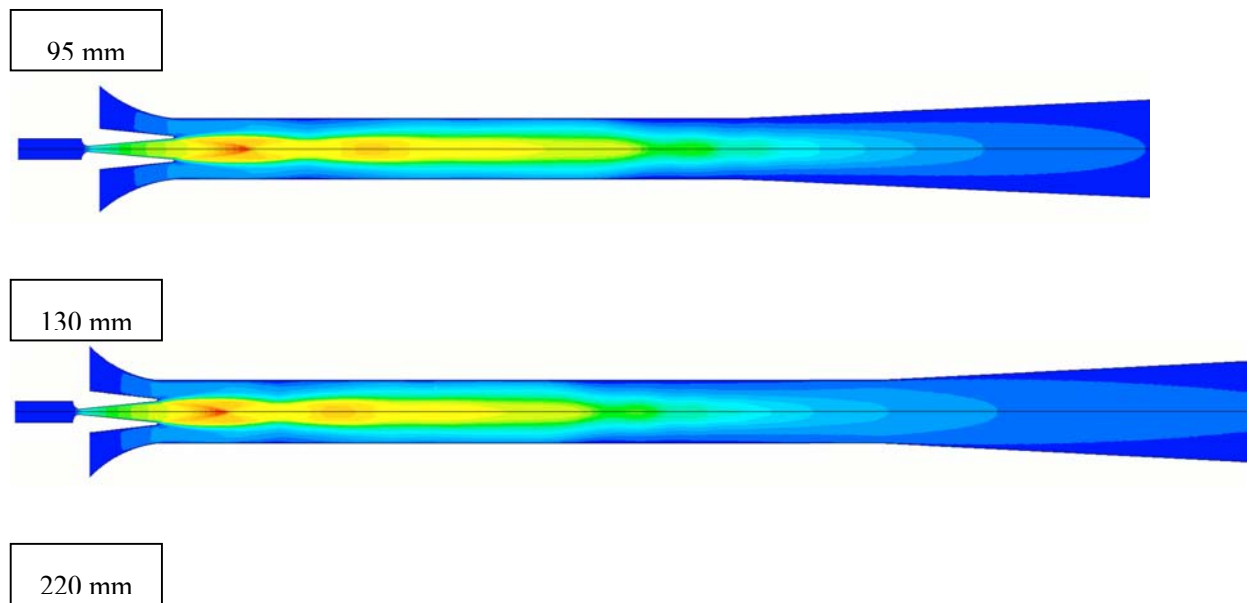
รูปที่ 4.23 ค่า Entrainment ratio สูงสุดที่ความยาว Throat และ
อุณหภูมิเครื่องระเหยค่าต่างๆของอีเจ็คเตอร์แบบ (a) CPM และ (b) CMA





(a) อีเจ็คเตอร์แบบ CPM





(b) CMA

รูปที่ 4.24 แถบสี Mach number ตามความยาว Throat ของอีเจ็คเตอร์แบบ (a)CPM และ (b)CMA

จากรูปที่ 4.24 การเพิ่มความยาว TL จะทำให้สารทั้งสองมีเวลาผสมกันมากขึ้นแต่ไม่ทำให้ตำแหน่งของ Effective area และรูปร่าง Shock เปลี่ยนแปลง ทำให้การสูญเสียจากการผสมกันของของไหลทั้งสองลดลง ดังนั้นอีเจ็คเตอร์จึงสามารถทำความดันได้สูงขึ้น แต่ R_m มีค่าคงที่ อย่างไรก็ตามการเพิ่มค่า TL ก็มีข้อจำกัด เนื่องจากยิ่ง TL มีค่ามาก การสูญเสียจากการเสียดทานระหว่างผนังของอีเจ็คเตอร์กับของไหลจะเพิ่มขึ้น อีเจ็คเตอร์จะทำความดันได้ต่ำลงหาก Throat ยาวเกินไป

5. สรุป

พารามิเตอร์ที่บ่งชี้สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ได้แก่ ค่า R_m และจุด CBP จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการทำงานของอุปกรณ์ในระบบ และ รูปร่างของอีเจ็คเตอร์เอง เมื่ออีเจ็คเตอร์รูปร่างเดียวกัน ค่า R_m จะแปรผกผันกับ CBP ซึ่งผลของพารามิเตอร์จากการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการทำงานและบางรูปร่างลักษณะของอีเจ็คเตอร์ แสดงสรุปไว้ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลของเงื่อนไขการทำงานและรูปร่างลักษณะอีเจ็คเตอร์ที่มีต่อสมรรถนะ

อิทธิพลของพารามิเตอร์			Entrainment ratio (R_m)	Critical back pressure (CBP)
เงื่อนไข	ชนิดพารามิเตอร์	กระทำ		
การทำงาน	อุณหภูมิของ เครื่องกำเนิดไอ	↑	↓	↑
	อุณหภูมิของ เครื่องระเหย	↑	↑	↓
รูปร่างลักษณะ	ตำแหน่งของหัว ฉีด (NXP)	↓ *	↑	—
	ความยาวของ Throat	↑ *	—	↑

*เปลี่ยนแปลงในค่าที่ไม่มากเกินไปหากมากเกินไปจะให้ผลตรงข้าม

บทที่ 5

การออกแบบอีเจ็คเตอร์ตามแนวคิด CRMC

โดยทั่วไปการออกแบบอีเจ็คเตอร์ จะคำนึงถึงการประยุกต์ใช้งานอีเจ็คเตอร์เป็นหลัก หากต้องการความสามารถเพื่อการเหินวนำสารที่ความดันตกคร่อมไม่ต่างกันมาก อีเจ็คเตอร์แบบ CMA จะถูกนำมาใช้งานมากกว่าแบบ CPM แต่สำหรับอีเจ็คเตอร์ที่ประกอบกับระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ จะต้องทำงานภายใต้ความดันตกคร่อมที่สูง(ความดันระหว่างเครื่องระเหยกับเครื่องควบแน่น) ดังนั้นอีเจ็คเตอร์แบบ CPM จึงเหมาะสมมากกว่าแบบ CMA ทั้งนี้อีเจ็คเตอร์ต้องทำความดันให้ได้สูง ดังนั้นความเร็วภายในอีเจ็คเตอร์จึงมีค่าสูง ทำให้การไหลเกิดคลื่น Shock ขึ้น ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดการสูญเสียในอีเจ็คเตอร์เพิ่มขึ้นนอกจาก การสูญเสียที่ผิวผนังและการผสมกันระหว่างของไหลทั้งสอง จึงได้มีนักวิจัยที่พยายามออกแบบอีเจ็คเตอร์ เพื่อให้ลดปรากฏการณ์นี้ Eames [4] ได้เสนอวิธีการออกแบบอีเจ็คเตอร์แบบ Constant Rate of Momentum Changes (CRMC) จุดประสงค์นั้นเพื่อลดการสูญเสียที่เกิดจากคลื่น Shock ในอีเจ็คเตอร์ ซึ่งในบทนี้เราจะนำเสนอ ระเบียบวิธีการออกแบบ อีเจ็ค-เตอร์ แบบ CRMC ข้อดีและข้อบกพร่องของระเบียบวิธีดังกล่าว และสุดท้ายเป็นการนำ CFD เข้ามาประยุกต์ใช้ร่วมกับการออกแบบอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC

1. แนวคิดการออกแบบอีเจ็คเตอร์ Constant Rate of Momentum Changes (CRMC)

การออกแบบอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC จะใช้หลักการ การเท่ากันของการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมที่ช่วง Diffuser ของอีเจ็คเตอร์ จากรูปที่ 5.1 สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

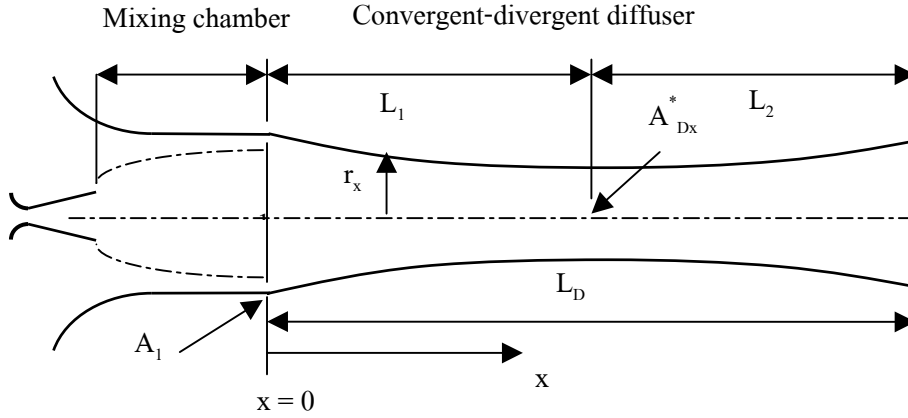
$$\frac{dM_o}{dx} = m_g^* (1 + R_m) \frac{dV}{dx} = b \quad (5.1)$$

เมื่อ M_o^* คือ โมเมนตัมของของไหล, m_g^* คือ อัตราการไหลของของไหลจากเครื่องกำเนิดไอ และ V คือ ความเร็วของของไหล

จากสมการที่ (3) และรูปที่ 5.1 มีเงื่อนไขขอบเขตของสมการเป็น $V_{D,x} = V_1$ at $x = 0$ ที่ทางเข้า diffuser

และ $V_{D,x} = V_{DE}$ at $x = L_D$ ที่ทางออกของ diffuserจะได้

$$V_{D,x} = V_1 - \frac{(V_1 - V_{DE})x}{L_D} \quad \text{for } 0 \leq x \leq L_D \quad (5.2)$$



รูปที่ 5.1 CRMC ejector

ความดันคงที่ที่ช่วงการผสมกันของของไหลจากสมการอนุรักษ์ momentum จะได้

$$V_1 = \frac{V_{NE} + R_m V_s}{1 + R_m} \quad (5.3)$$

โดย V_{NE} และ V_s เป็นความเร็วที่ปลายทางออกของหัวฉีดและปากทางเข้าของของไหลทุติยภูมิตามลำดับ สมดุลพลังงานในช่วงการผสมกันจะได้สมการ อุณหภูมิสถิต ($T_{o,1}$) และ อุณหภูมิรวม (T_1) ที่ทางเข้าของ diffuser เป็น

$$T_{o,1} = \frac{T_{o,p} + R_m T_{o,s}}{1 + R_m} \quad (5.4)$$

$$T_1 = T_{o,1} - \frac{V_1^2}{2C_p} \quad (5.5)$$

โดย c_p คือค่าความร้อนจำเพาะ (Specific heat) ของของไหล

กำหนดให้ความดันสถิตที่กระบวนการผสมกันเท่ากับ P_{NE} จะได้ ความดันสถิต ($P_{o,1}$) และความดันรวม (P_1) ที่ทางเข้า diffuser เป็น

$$P_{o,1} = P_{NE} \left(\frac{T_{o,1}}{T_1} \right)^{k/(k-1)} \quad (5.6)$$

$$P_1 = P_{O,s} - \frac{\rho_s V_s^2}{2} \quad (5.7)$$

อุณหภูมิรวม ความดันรวม และ ความหนาแน่น ที่ตำแหน่ง x ใดๆจะได้

$$T_x = T_{0,1} - \frac{V_{D,x}^2}{2C_p} \quad (5.8)$$

$$P_x = P_{0,1} \left(\frac{T_x}{T_{0,1}} \right)^{k/(k-1)} \quad (5.9)$$

$$\rho_x = \frac{P_x}{RT_x} \quad (5.10)$$

จากกฎทรงมวล จะได้เส้นผ่านศูนย์กลางของรูปร่าง diffuser เป็น

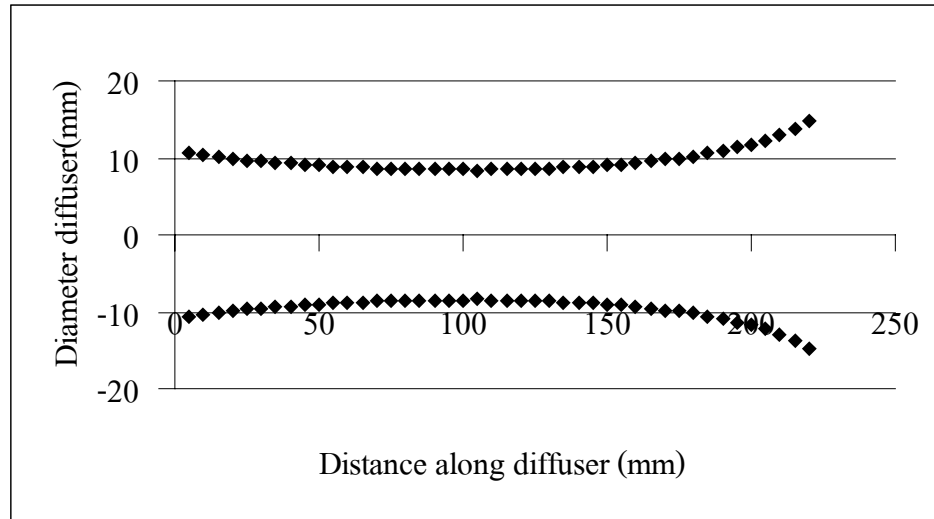
$$D_{D,x} = 2 \sqrt{\frac{m_g (1 + R_m) RT_x}{\pi P_x V_{D,x}}} \quad (5.11)$$

ในการแก้สมการ (5.2-5.11) นั้นเราจำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขการทำงานของอีเจ็คเตอร์ คุณสมบัติของสารทำงาน และค่า R_m แสดงในตารางที่ 5.1 โดยสมมติฐานให้กระบวนการที่หัวฉีดและ Diffuser เป็นแบบ Isentropic และที่บริเวณท่อดูดกำหนดไม่มีความเสียดทาน ซึ่งจะได้รูปร่างของกราฟ Diffuser ดังรูปที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 เงื่อนไขการออกแบบอีเจ็คเตอร์

เงื่อนไขการทำงาน	อุณหภูมิ	ความดัน
เครื่องกำเนิดไอ	403 K	270.1×10^3 Pa
เครื่องระเหย	283 K	2.2276×10^3 Pa
เครื่องควบแน่น	302 K	4×10^3 Pa

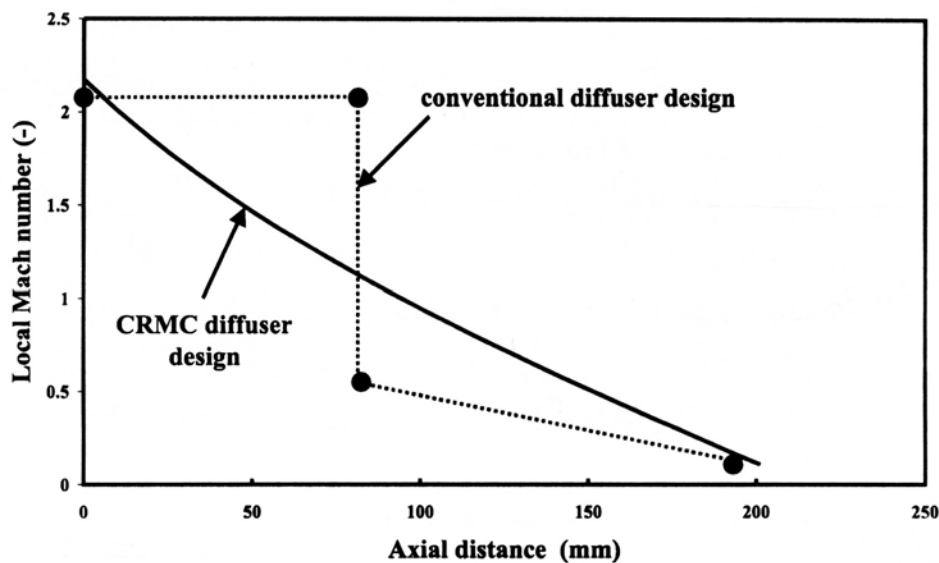
สารทำงานที่ใช้ เป็น ไอโซน้า โดยค่าอัตราส่วนความร้อนจำเพาะเป็น 1.3, ค่าคงที่ของก๊าซเป็น $462 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ และ กำหนดค่า Entrainment ratio เป็น 0.5



รูปที่ 5.2 พื้นที่หน้าตัดตลอดความยาวของ Diffuser

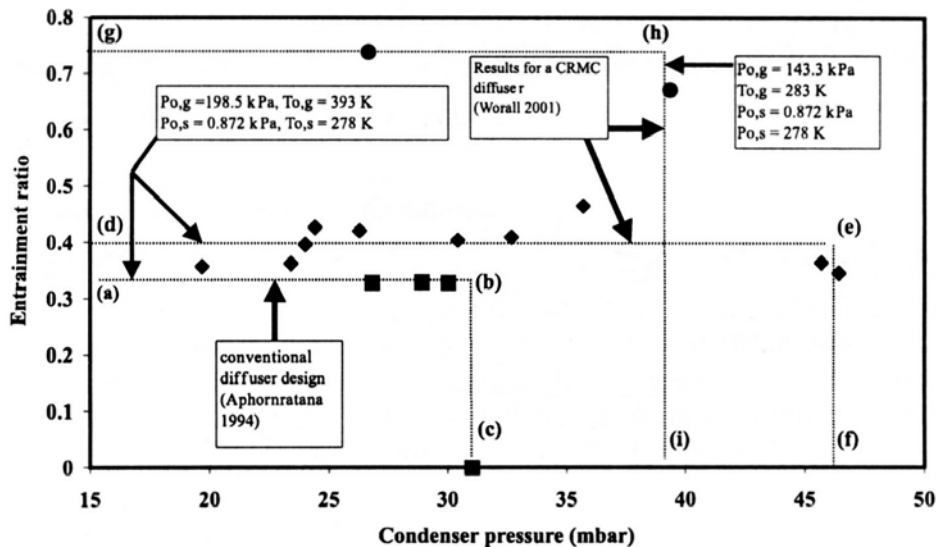
2. สมรรถนะของอีเจกเตอร์แบบ CRMC

จากการศึกษาของ Eames [4] เมื่อนำเอาค่า Mach number ที่ได้จากการสมการของ CRMC มาสร้างกราฟตลอดความยาวของ Diffuser พบว่าจะลดความรุนแรงของ Shock ได้เมื่อเทียบกับอีเจกเตอร์รูปร่างทั่วไป แสดงดังภาพที่ 5.3 จากภาพโดยทั่วไปคลื่น Shock จะเกิดขึ้นใน Diffuser (ที่ตำแหน่ง Mach number เปลี่ยนแปลงค่าทันทีทันใด) และเป็นสาเหตุของการสูญเสียในอีเจกเตอร์ แต่เมื่อเทียบกับ Diffuser แบบ CRMC จะเห็นว่า Mach number จะลดลงอย่างต่อเนื่องไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าอย่างทันทีทันใด



รูปที่ 5.3 Mach number ตามแนวแกนของ Diffuser [4]

สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC เมื่อเปรียบเทียบกับอีเจ็คเตอร์ทั่วไปพบว่าสามารถทำความดันได้สูงกว่า 48 % และมีค่า Entrainment ratio (R_m) สูงกว่า 3-4 % แสดงผลดังรูปที่ 5.4 ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการลดการสูญเสียจากการเกิด Shock ในอีเจ็คเตอร์แต่เปลี่ยนแปลงขนาดของ Effective area ของ อีเจ็คเตอร์แบบ CRMC



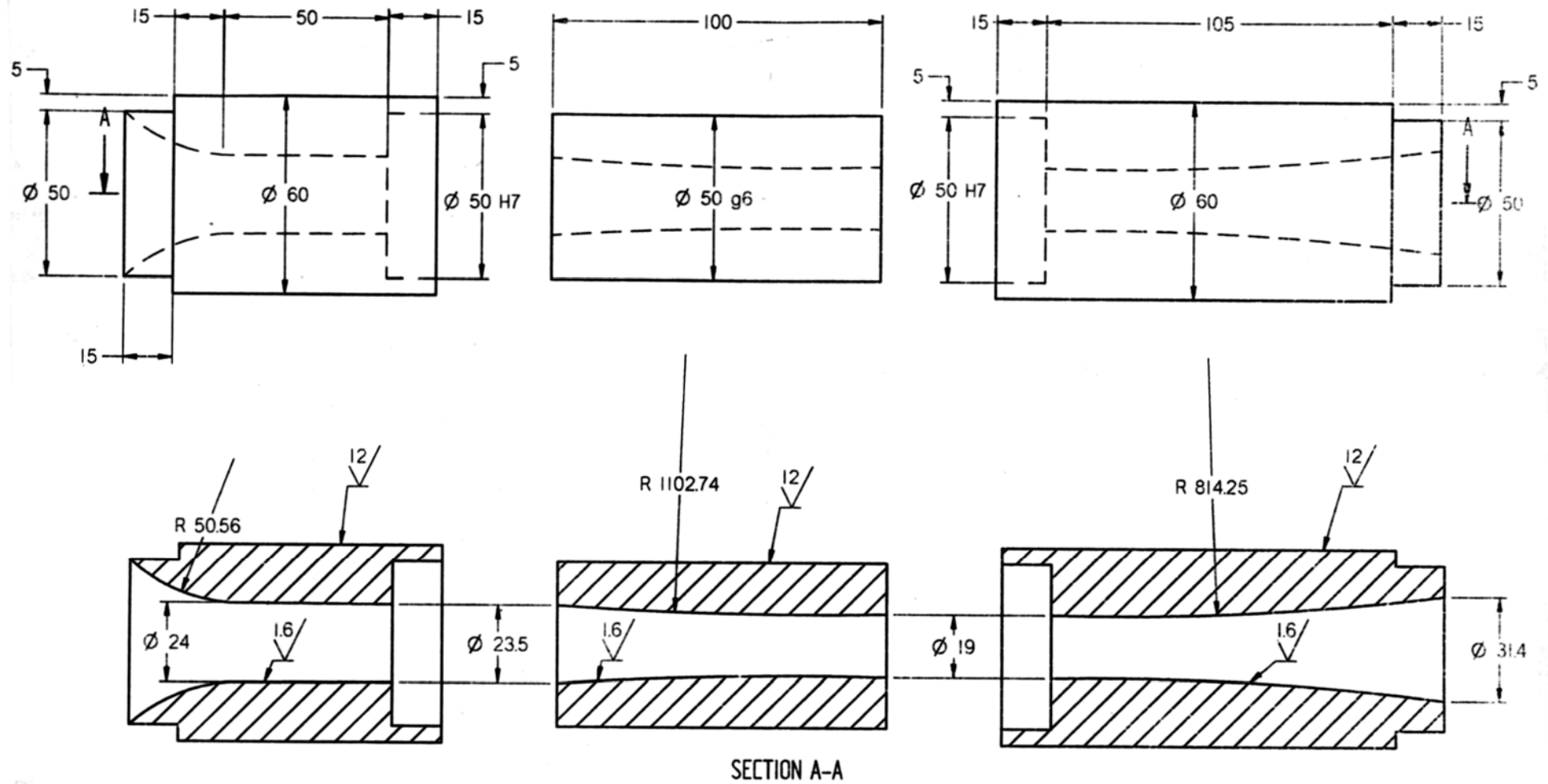
รูปที่ 5.4 สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC [4]

3. การประยุกต์ใช้ CFD กับการออกแบบอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC

การออกแบบอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC ที่เสนอโดย Eames ไม่ได้แนะนำรูปร่างของอีเจ็คเตอร์ส่วนอื่น เช่น รูปร่างห้องผสม และ รูปร่างของ Throat ที่เหมาะกับ Diffuser แบบ CRMC ดังนั้นเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพและสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์แบบ CMC เราจึงได้นำเอา ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับของไหล (CFD) มาเป็นตัวช่วยหารูปร่างของห้องผสมที่เหมาะสมกับ Diffuser แบบ CRMC และ คาดคะเนสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ที่ได้ ก่อนนำไปสร้างจริงและทดลอง

3.1 การปรับปรุงรูปร่างอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC โดยใช้ CFD

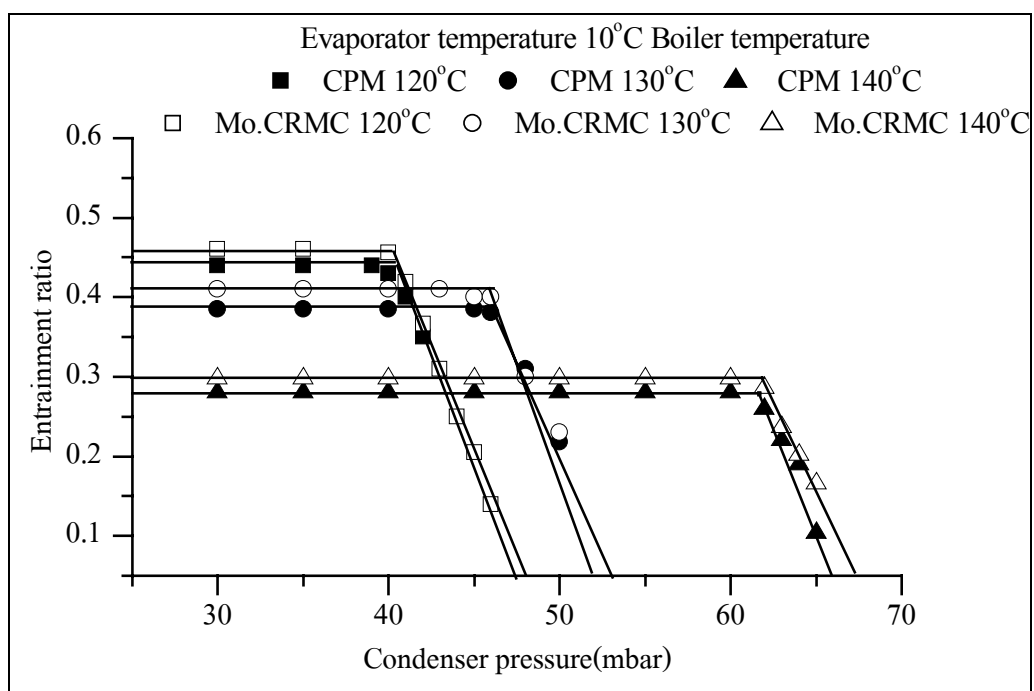
การออกแบบอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC โดยใช้ CFD เข้ามาช่วยนั้น ขนาดของปากทางเข้าและออกของ Diffuser จะใช้ขนาดที่ได้จากการคำนวณสมการ (5.2-5.11) ขนาดและรูปร่างของหัวฉีดและปากทางเข้าของสารทุติยภูมิ ใช้ตามเอกสารอ้างอิง [5, 25] เราใช้ CFD เพื่อหาความยาวและรูปร่างของห้องผสมของอีเจ็คเตอร์ซึ่งเป็นส่วนที่ติดกับ Diffuser แบบ CRMC ด้วยวิธีการหาค่าเฉลี่ยแล้วคำนวณทดสอบค่า (R_m) และจุด CBP ของอีเจ็คเตอร์ตัวนั้น ก่อนเลือกขนาดและรูปร่างของอีเจ็คเตอร์ที่ทำให้ค่าสมรรถนะที่น่าพอใจ ซึ่งได้รูปร่างและขนาดอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC ที่ปรับปรุงแล้วดัง รูปที่ 5.5 จากภาพจะเห็นว่า อีเจ็คเตอร์ถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ทั้งนี้เนื่องจาก ติดอุปกรณ์ดูดเครื่องมื่อ และ เทคนิคในการสร้างเราจึงจำเป็นต้อง แบ่งการสร้างออกเป็น 3 ชิ้นดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แบบของอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC ที่ปรับปรุงแล้ว

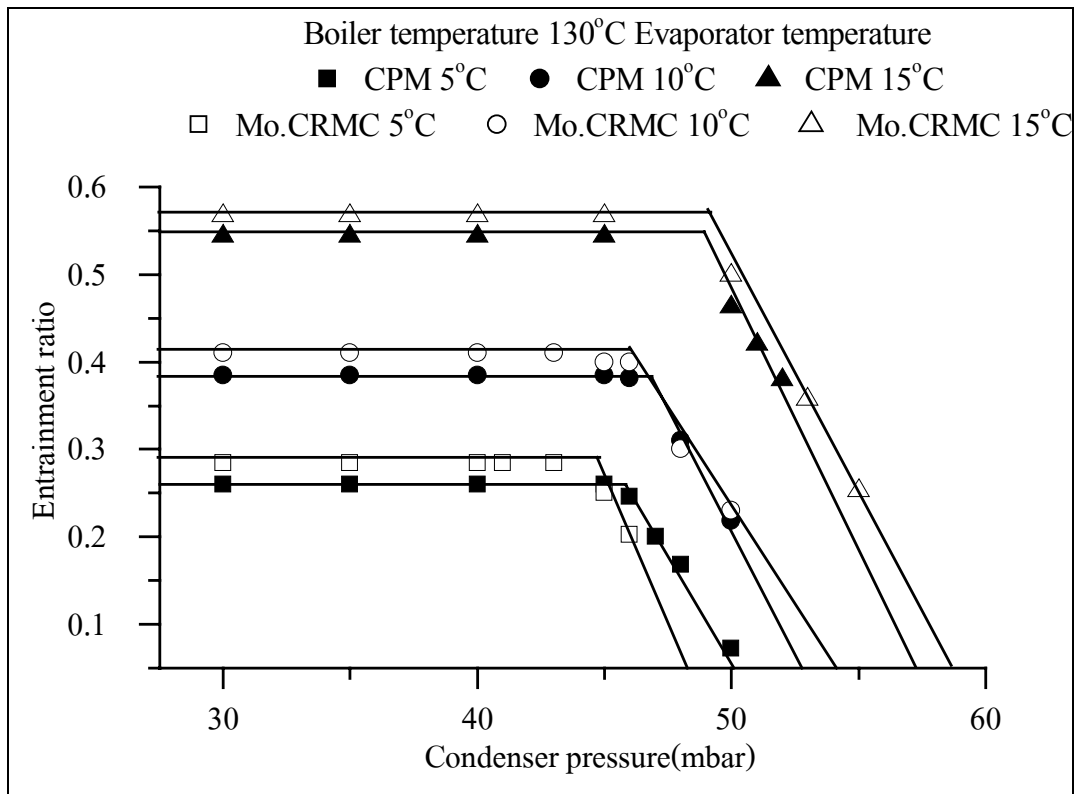
3.2 การศึกษาและคาดคะเนสมรรถนะอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC ด้วย CFD

เราได้นำข้อได้เปรียบในการใช้ CFD ช่วยศึกษาและคาดคะเนสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ ซึ่งไม่จำเป็นต้องสร้างชุดทดลองจริง ทุกอย่างสามารถกำหนดตัวแปรลงได้ในคอมพิวเตอร์ ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาอย่างมากเมื่อทำการคำนวณสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ที่ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 3.1 ด้วย CFD เราได้กราฟความสัมพันธ์ของค่า R_m ต่อค่าความดันของเครื่องควบแน่น จากผลกระทบของเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหย ตาม รูปที่ 5.6 และ 5.7 ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบกับกราฟของอีเจ็คเตอร์แบบ CPM จากภาพพบว่า อีเจ็คเตอร์ที่ออกแบบไว้ ให้ค่า R_m มากกว่าอีเจ็คเตอร์แบบ CPM แต่มีจุด CBP เท่ากัน



รูปที่ 5.6 ผล CFD ของอิทธิพลของเครื่องกำเนิดที่มีต่อสมรรถนะอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC

เมื่อนำแถบสีของ Mach number ของอีเจ็คเตอร์แบบ CPM, CMA และ CRMC ที่ปรับปรุงแล้ว มาเปรียบเทียบกับกัน (แสดงดังรูปที่ 5.8) จะเห็นว่าอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC จะมีขนาดเล็กกว่าแบบอื่น เนื่องจากมีช่วงของห้องผสมสั้น รูปร่าง Shock ที่ห้องผสมของอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC มีรูปร่างใกล้เคียงกับรูปร่าง Shock ที่เกิดขึ้นกับอีเจ็คเตอร์แบบ CMA แต่ที่ Diffuser กลับมีแนวโน้มคล้ายกับอีเจ็คเตอร์แบบ CPM ด้วยลักษณะของ Shock เช่นนี้ ทำให้อีเจ็คเตอร์ที่ออกแบบไว้ (MoCRMC) สามารถเหนี่ยวนำสารได้มากกว่า แบบ CPM แต่ทำความดันได้มากกว่าแบบ CMA ที่เงื่อนไขการทำงานเดียวกัน

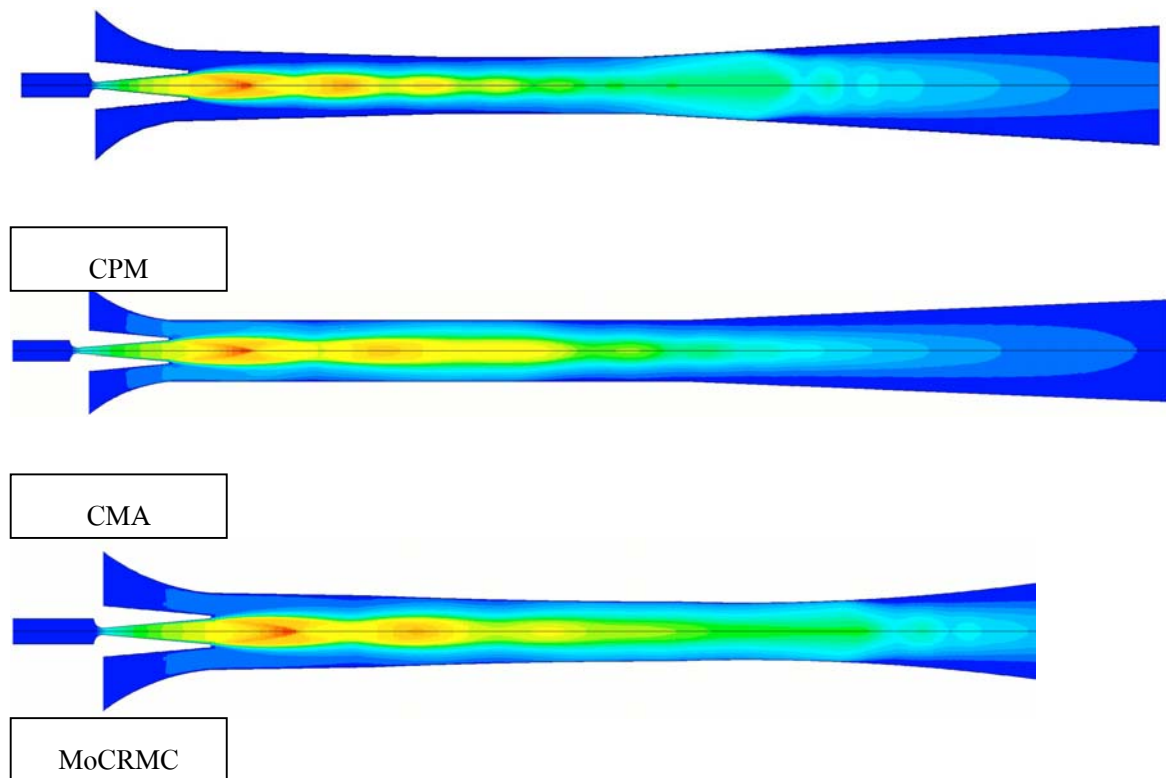


รูปที่ 5.7 ผล CFD ของอิทธิพลของเครื่องระเหยที่มีต่อสมรรถนะอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC

ด้วยรวมแล้วบทนี้เราได้กล่าวถึงแนวคิดการออกแบบ diffuser ของอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC โดยแนวคิดนี้มีข้อจำกัดด้านออกแบบองค์ประกอบส่วนอื่น ที่ไม่มีข้อมูลการออกแบบเพื่อรองรับ ดังนั้นเราจึงได้นำ CFD เข้ามาช่วยจำลองการไหลภายในและออกแบบอีเจ็คเตอร์ตามแนวคิดแบบ CRMC จากอีเจ็คเตอร์ที่ออกแบบไว้ ในบทต่อไปจะเป็นการนำมาสร้างจริงและทำการทดลอง พร้อมทั้งอธิบายถึงชุดทดลองของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ และระเบียบขั้นตอนการทดลอง ของการเก็บผลข้อมูล เพื่อเปรียบเทียบกับผลของ CFD โดย วิเคราะห์ผลของ ความดันสถิตตลอดความยาวบนผนังของอีเจ็คเตอร์ พร้อมทั้งตรวจสอบ ค่า R_m และจุด CBP เพื่อเทียบเคียงกับผลที่ได้จาก CFD



CPM, CMA and MoCRMC Mach number contour at Condenser pressure 30 mbar,
boiler temperature 130 °C and evaporator temperature 10 °C



รูปที่ 5.8 Mach number ของอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC เปรียบเทียบกับอีเจ็คเตอร์ทั่วไป

บทที่ 6

การทดลองและผลการทดลอง

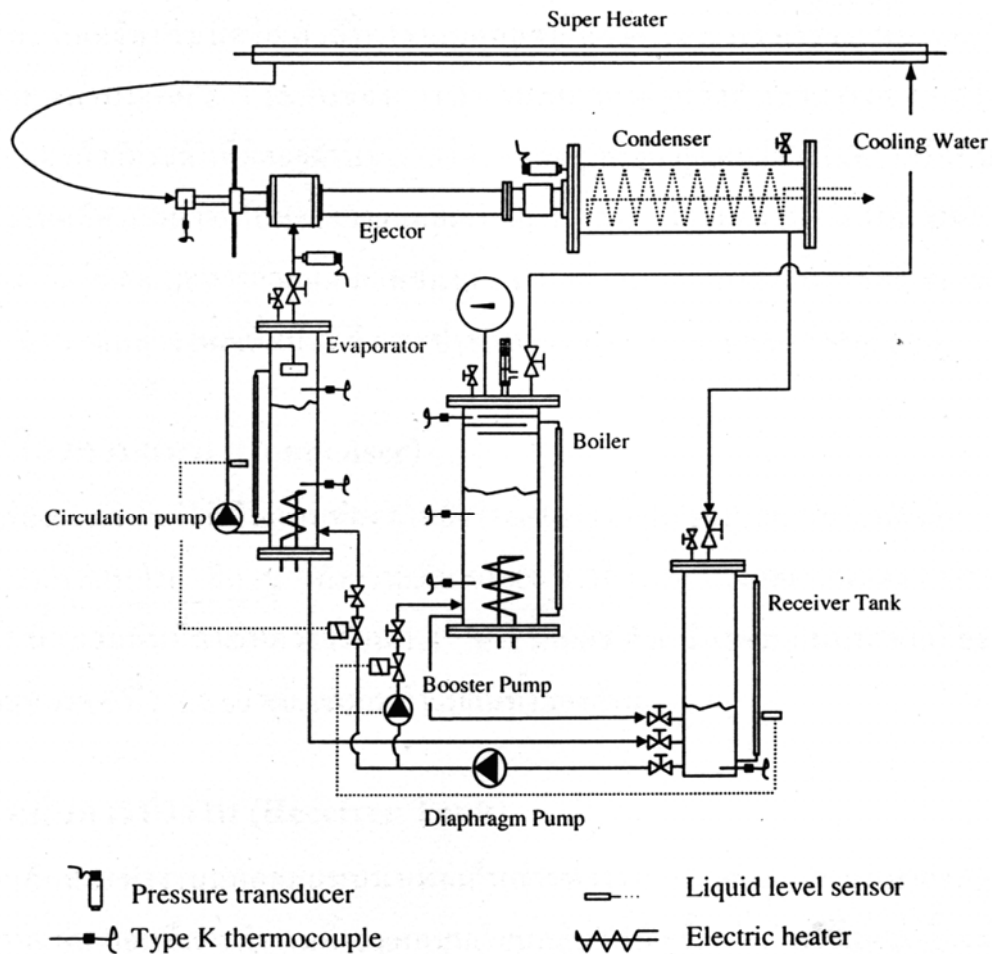
จากบทที่ผ่านมาเราได้ทำการศึกษาและออกแบบอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC โดยใช้ CFD ช่วยทำให้เราได้อีเจ็คเตอร์ที่พร้อมสำหรับสร้างและการทดลอง ลำดับต่อไปจะกล่าวถึงรายละเอียดของชุดอุปกรณ์การทดลอง ระบบควบคุม เครื่องมือวัด และวิธีการทำการทดลอง นอกจากนี้ยังจะได้นำเสนอและวิเคราะห์ผลการทดลองของอีเจ็คเตอร์ที่ออกแบบไว้ในบทที่ 5

1. ชุดการทดลอง

ชุดทดลองเครื่องทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์โดยใช้น้ำเป็นสารทำความเย็น ดังรูปที่ 6.1 จะใช้สำหรับทดสอบสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ ซึ่งชุดทดลองนี้ติดตั้งอยู่ที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นชุดทดสอบที่มีส่วนประกอบหลัก 7 ส่วน คือ เครื่องกำเนิดไอ (boiler) เครื่องกำเนิดไอความร้อนยิ่งยวด (superheater) เครื่องระเหย (evaporator) อีเจ็คเตอร์ (ejector) เครื่องควบแน่นชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ (condenser) ถังเก็บสารทำงาน (receiver tank) และปั๊มชุดหมุนเวียนทำงาน (circulation pump)



รูปที่ 6.1 ชุดทดลองระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์



รูปที่ 6.2 แผนภาพชุดทดลองระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ [5]

1.1 เครื่องกำเนิดไอ (boiler)

เครื่องกำเนิดไอที่ใช้นี้ถูกออกแบบมาเพื่อผลิตไอสารทำงานที่มีความดันได้ 10 bar โดยใช้ขดลวดทำความร้อนไฟฟ้าขนาด 4 kW จำนวน 2 ชุด ใช้ความร้อนจากพลังงานไฟฟ้าทำให้สามารถทำการทดลองได้สะดวกมากยิ่งขึ้น เพราะสามารถวัดปริมาณความร้อนและควบคุมระบบได้อย่างแม่นยำ ไอสารทำงานที่ได้จะไหลไปตามท่อทองแดงไปสู่เครื่องกำเนิดไอความร้อนยิ่งยวด ก่อนที่จะถูกใช้ไปเป็นสารปฏิกิริยาในอีเจ็คเตอร์ ระดับของสารทำงานภายในเครื่องกำเนิดไอดูได้จากแท่งแก้ววัดระดับที่อยู่ด้านข้าง เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนถึงเครื่องกำเนิดไอก็จะถูกหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วหนา 1 นิ้ว กันความร้อนพร้อมทั้งหุ้มแผ่นอลูมิเนียมบางอีกหนึ่งชั้น ขณะระบบทำงานสารทำงานภายในเครื่องกำเนิดไอก็จะอยู่ในสถานะของผสมอิ่มตัว

1.2 เครื่องระเหย (Evaporator)

เครื่องระเหยในชุดทดลองนี้สามารถรับภาระความเย็นได้ 4 kW ขดลวดความร้อนถูกใช้แทนภาระความร้อนที่เครื่องระเหยได้รับเนื่องจากเหตุผลเช่นเดียวกับเครื่องกำเนิดไอ ระดับของสารทำงานในเครื่องระเหยสามารถสังเกตได้จากแท่งแก้วที่อยู่ด้านข้างของตัวถัง เครื่องระเหยจะถูกหุ้มด้วยแผ่นโฟมกันความร้อนหนา 1 นิ้ว เพื่อป้องกันความร้อนจากภายนอกบริเวณระบบไอระเหยจะถูกดูดผ่านท่อและวาล์วที่ติดตั้งบริเวณด้านบนของเครื่อง นอกจากนี้ภายในเครื่องกำเนิดไอยังได้ติดตั้งฝักบัวเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและประสิทธิภาพในการระเหยของก๊าซทุติยภูมิ เช่นเดียวกับเครื่องกำเนิดไอเมื่อระบบทำงาน สารทำงานจะอยู่ที่สถานะของผสม

1.3 เครื่องควบแน่น (Condenser)

เครื่องควบแน่นใช้เป็นแบบท่อขดในถัง (shell and coil) ระบายความร้อนด้วยน้ำโดยมีน้ำจากระบบทำความเย็นขนาด 50,000 BTU วิ่งผ่านภายในท่อทองแดง 2 ขด ขนาด 0.5 นิ้ว รวบรวมพื้นที่ถ่ายเทความร้อน 1.4 ตารางเมตร ด้านบนของเครื่องควบแน่นจะมีวาล์วสำหรับต่อเข้ากับปั๊มสุญญากาศ เพื่อทำการดันของเครื่องควบแน่นและระบบให้ต่ำ

1.4 ถังเก็บสารทำงาน (Receiver tank)

ถังเก็บสารทำงานจะเก็บสารทำงานที่อยู่ในสถานะของเหลวที่ควบแน่นมาจากเครื่องควบแน่น ทำจากท่อสเตนเลสขนาด 6 นิ้ว ยาว 60 ซม. โดยระดับของสารทำงานในถังจะสามารถดูได้จากแท่งแก้วด้านข้างถึงเช่นเดียวกับเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหย ถังเก็บสารทำงานจะทำหน้าที่เก็บสารก่อนส่งไปยังเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหยโดยชุดปั๊มหมุนเวียนสารทำงาน

1.5 ปั๊มหมุนเวียนสารทำงาน (Circulation pump)

เนื่องจากความแตกต่างของความดันระหว่างเครื่องกำเนิดไอและถังเก็บสารทำงานมีค่าค่อนข้างสูง ชุดปั๊มหมุนเวียนสารทำงานจึงประกอบด้วย diaphragm ปั๊มสองตัวโดยตัวที่หนึ่งเป็นปั๊มที่ใช้ลมความดันสูงเป็นตัวขับเคลื่อน ทำหน้าที่ดูดสารทำงานจากถังเก็บสารทำงานที่ความดันต่ำไปยังเครื่องระเหย ส่วนปั๊มตัวที่สองทำหน้าที่รับสารทำงานจากปั๊มตัวที่หนึ่งแล้วเพิ่มความดันให้สามารถส่งสารทำงานไปยังเครื่องกำเนิดไอได้

1.6 อีเจ็คเตอร์ (Ejector)

อีเจ็คเตอร์ที่ใช้ในชุดการทดลองนี้ ถูกออกแบบจาก ทฤษฎีการออกแบบต่างๆ ควบคู่กับการใช้ CFD ช่วยในการตรวจสอบสมรรถนะ ก่อนการนำไปสร้างและทดลองจริง โดยจะออกแบบให้ทางเข้าและทางออกของอีเจ็คเตอร์สามารถประกอบเข้ากับชุดทดลองได้

2. การวัดค่าตัวแปรในระบบ

ตัวแปรที่ต้องการวัดและควบคุมในระบบคือ อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล ระดับของสารทำงาน และพลังงานที่ใช้ทำหลอดไฟฟ้า โดย ค่าอุณหภูมิ ความดัน และพลังงานที่ใช้ทำหลอดไฟฟ้า จะถูกควบคุมและบันทึกด้วยระบบคอมพิวเตอร์

2.1 การวัดอุณหภูมิ

Thermocouple type-K ได้ถูกนำมาใช้ในการวัดอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ โดย thermocouple แต่ละตัวจะถูกสอบเทียบก่อนติดตั้ง สัญญาณของ thermocouple แต่ละตัวจะถูกขยายโดยวงจรขยายก่อนจะต่อเข้ากับชุดเก็บข้อมูลและแสดงผลบนคอมพิวเตอร์

2.2 การวัดความดัน

ค่าความดันที่เครื่องกำเนิดไอจะถูกวัดโดยมาตรวัดความดัน -1 ถึง 9 bar ส่วนค่าความดันภายในเครื่องระเหยและเครื่องควบแน่นใช้ absolute pressure transducer ขนาด 0 ถึง 0.25 และ 0 ถึง 1.25 bar เป็นตัวอ่านตามลำดับ ซึ่ง pressure transducer แต่ละตัวจะถูกสอบเทียบกับ barometer แบบที่ความดันบรรยากาศ ก่อนติดตั้งสายสัญญาณแต่ละเส้นจะต่อเข้ากับชุดเก็บข้อมูล

2.3 การวัดอัตราการไหล

อัตราการไหลของสารทำงานที่เครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหย เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะการทำงานคงที่แล้วจะสามารถวัดได้โดยการวัดระดับสารทำงานเหลวภายในถังที่ลดลงขณะหยุดการทำงานของปั๊มในหนึ่งช่วงเวลาโดยสารทำงานที่เดือดและระเหยออกมาจะถูกควบแน่นและเก็บที่ถังเก็บสารทำงาน

3. ระบบควบคุมในชุดอุปกรณ์การทดลอง

การควบคุมตัวแปรในระบบขณะทำการทดลองเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากการวัดการทำงานในแต่ละเงื่อนไขการทำงาน ผลของการทดลองต้องนิ่งและเป็นค่าที่เชื่อถือได้ โดยทั่วไปขณะทำการทดลองการควบคุมสภาวะของอุปกรณ์แต่ละตัวจะถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ ที่ต่อกับแผงวงจรควบคุม และต่อไปยังอุปกรณ์ควบคุมแต่ละตัวบนชุดทดลอง คอมพิวเตอร์ควบคุม แสดงดังภาพที่ 6.3

ทั้งนี้ขณะทำการทดลอง ชุดการทดลอง จำเป็นจะต้องมีระบบควบคุมตัวอยู่ 3 อย่างด้วยกันคือ ระดับของสาร กระแสไฟฟ้าที่ขดลวดทำความร้อน และ ความดันที่เครื่องควบแน่น โดยรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

3.1 การควบคุมระดับของสารทำงาน

ระดับของสารทำงานในเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหย จะถูกควบคุมโดยใช้ อุปกรณ์ตรวจจับระดับลูกลอย หากระดับของสารมีค่าน้อยกว่าที่กำหนด อุปกรณ์จะส่งสัญญาณไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อเปิดวาล์วและปั๊ม เพื่อปล่อยสารทำงานไปยังเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหย จนระดับน้ำได้ระดับตามที่ต้องการ สัญญาณจึงจะถูกตัด ทำให้ปั๊มและวาล์วหยุดการทำงาน นอกจากระบบอัตโนมัติแล้ว เรายังสามารถควบคุมปั๊มและวาล์วได้โดยตรง



รูปที่ 6.3 คอมพิวเตอร์และชุดควบคุม

3.2 การควบคุมกระแสไฟฟ้าของขดลวดทำความร้อน

ขดลวดทำความร้อนในชุดการทดลองจะติดตั้งที่เครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหย เพื่อเป็นแหล่งพลังงานความร้อนที่จำลองและการะความร้อนตามลำดับ การควบคุมค่าความต่างศักย์ที่ส่งไปยังขดลวดความร้อนจะเป็นวิธีควบคุมอุณหภูมิและความดันตามที่เรากำลังต้องการโดยทางอ้อม ซึ่งความต่างศักย์นี้จะถูกควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และแผงชุดส่งสัญญาณ พลังงานไฟฟ้าที่ถูกส่งไปยังขดลวดแต่ละชุด คือพลังงานของความร้อนที่ใช้ไปในระบบนั่นเอง

3.3 การควบคุมความดันของเครื่องควบแน่น

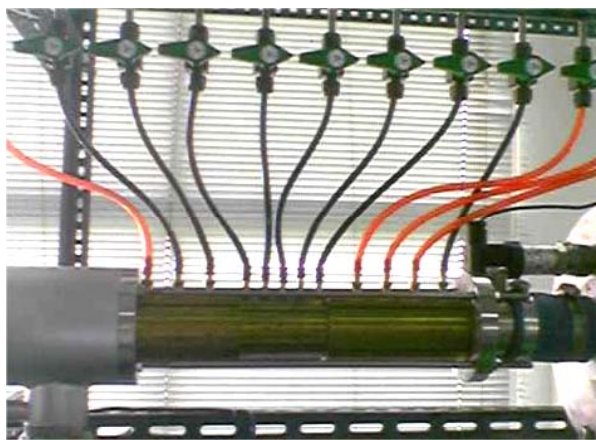
ความดันของเครื่องควบแน่น จะถูกควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนอีกต่อหนึ่ง ซึ่งจะไหลผ่านชุดท่อในเครื่องควบแน่น โดยคอมพิวเตอร์จะส่งสัญญาณเปิดปิดวาล์วของท่อน้ำระบายความร้อน เพื่อให้ได้ความดันของเครื่องควบแน่นที่ต้องการ

4. ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

อีเจกเตอร์ที่ใช้ในการทดลองที่จะกล่าวในระดับต่อไป เป็นอีเจกเตอร์ที่ออกแบบไว้ในบทที่ 5 ซึ่งในหัวข้อนี้เราจะได้กล่าวถึงรายละเอียดของขั้นตอนการทดลอง จากขั้นตอนการติดตั้งอีเจกเตอร์จนถึงขั้นตอนการเก็บค่าผลการทดลอง โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.1 ขั้นตอนการติดตั้งอีเจกเตอร์

ในการออกแบบอีเจกเตอร์สำหรับใช้ในชุดการทดลองนี้ จำเป็นต้องออกแบบตามลักษณะทางกายภาพ เบื้องต้นของชุดทดลองเป็นหลัก จะต้องออกแบบให้ร่องของท่อดูดและปากทางออกของอีเจกเตอร์ให้มีขนาดเท่ากับตัวชิ้นแผ่นประกบของชุดทดลอง



รูปที่ 6.4 อีเจกเตอร์ที่ติดตั้งพร้อมสำหรับการทดลอง

รูปที่ 6.4 แสดงภาพอีเจกเตอร์ที่ติดตั้งในชุดการทดลอง จะเห็นมีสายยางทนความร้อนสูงต่อจากหัวปลาไหลที่ผนังของอีเจกเตอร์ ทั้งนี้จุดประสงค์เพื่อทำการวัดความดันสถิตของอีเจกเตอร์ ด้วย Pressure transducers ที่ติดตั้งอยู่ท่อร่วมด้านบน โดยรูที่เจาะไว้บนอีเจกเตอร์ ที่ชั้นที่หนึ่งมี เจาะ 3 รู ชั้นที่สองเจาะ 5 รู และชั้นที่สามเจาะ 4 รู ทั้งหมดมี 12 ตำแหน่ง อีเจกเตอร์ต่อกับท่อทางทความร้อนสูงรัดด้วยเข็มขัดโลหะโดยปลายอีกด้านของท่อจะต่อกับเครื่องควบแน่น

4.2 ขั้นตอนการตรวจสอบหาตำแหน่งรั่วในระบบ

เนื่องจากชุดทดลองนี้ทำงานภายใต้ความดันที่ต่ำกว่าบรรยากาศ เมื่อเดินเครื่องทำงานอาจเป็นไปได้ที่อากาศจากภายนอกจะรั่วเข้าสู่ระบบและทำให้การทำงานของชุดทดลองล้มเหลวได้ ดังนั้น การหาตำแหน่งและหยุดการรั่วในระบบจึงเป็นขั้นตอนที่จำเป็น ซึ่งต้องใช้ความระมัดระวังและละเอียดถี่ถ้วนในการตรวจสอบ การตรวจสอบรั่วสามารถทำได้โดย การเปิดวาล์วที่เชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ทุกตัวแล้วปล่อยลมความดันสูงเข้าระบบ ที่วาล์วปล่อยสารของเครื่องกำเนิดไอ สังเกตเกจวัดความดันที่เครื่องกำเนิดไอ เมื่อถึง 4 bar ให้ปิดวาล์ว และทำการตรวจเช็คตำแหน่งรั่วด้วย ฟองของผงซักฟอง หรือน้ำยาล้างจาน หยดที่บริเวณที่ต้องการตรวจสอบ ทั้งนี้บริเวณที่มักเกิดการรั่วขึ้นจะเป็น ที่ข้อต่อหรือข้อหักต่างๆหาก เมื่อทำการตรวจสอบรอยรั่วเรียบร้อยแล้วจะต้องเปิดวาล์วที่เครื่องกำเนิดไอและเครื่องควบแน่นเพื่อปล่อยอากาศและปรับความดันของชุดทดลองให้อยู่เท่ากับความดันบรรยากาศ

4.3 ขั้นตอนการเตรียมสถานะของสารปฐุมภูมิและน้ำระบายความร้อน

การเตรียมสารสถานะของสารปฐุมภูมิหรือการต้มน้ำที่เครื่องกำเนิดไอและน้ำระบายความร้อน ถือเป็นการเตรียมสถานะอุปกรณ์แรกก่อนอุปกรณ์อื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากการต้มน้ำทำงานที่เครื่องกำเนิดไอและลดอุณหภูมิระบายความร้อนต้องใช้เวลานาน โดยเฉพาะการต้มน้ำทำงานจำเป็นต้องใช้ความระมัดระวังอย่างยิ่ง โดยก่อนการเปิดไฟฟ้าเข้าที่ขดลวดความร้อนที่เครื่องกำเนิดไอ วาล์วของท่อต่อจากเครื่องกำเนิดไอต้องปิดสนิท ยกเว้นวาล์วปล่อยสารต้องเปิดทิ้งไว้ เพื่อทำการต้มน้ำทำงานที่เป็นน้ำ ให้เดือดที่ความดันเท่ากับ ความบรรยากาศ เพราะหากต้มที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ขดลวดความร้อนอาจเสียหายได้ การควบคุมสถานะของเครื่องกำเนิดไอจะควบคุมผ่านการกำหนดอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอบนคอมพิวเตอร์ หากเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าที่กำหนดไว้ขดลวดความร้อนจะหยุดทำงาน โดยทั่วไปเมื่อเริ่มต้มน้ำจะตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 100°C เมื่อเห็นไอของสารทำงานพุ่งออกที่วาล์วปล่อยสารให้ปิดวาล์วปล่อยสารและเพิ่มอุณหภูมิที่กำหนดเป็นเงื่อนไขการทำงานที่ต้องการ ในการเตรียมน้ำระบายความร้อนนั้นทำได้โดยเปิดสวิทซ์เครื่องทำน้ำเย็น ซึ่งมีระบบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิของน้ำได้ โดยทั่วไปกำหนดน้ำเย็นไว้ที่ 15°C

4.4 ขั้นตอนการปรับลดความดันอากาศของระบบ

เนื่องจากชุดทดลองนี้ทำงานภายใต้ความดันที่ต่ำกว่าบรรยากาศ และ ขั้นตอนการตรวจสอบรั่วทำให้ระบบมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ จึงจำเป็นต้องลดความดันของระบบด้วยการปรับลดความดัน ต่อเข้ากับวาล์วปล่อยสารบนเครื่องควบแน่น ลดความดันของระบบลงเรื่อยๆจนไม่สามารถลดความดันได้อีกโดยสังเกตความดันของเครื่องควบแน่นที่คอมพิวเตอร์

ข้อควรระวัง ขณะปั๊มลดความดันทำงานวาล์วที่ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไอจะต้องปิดทุกตัวรวมทั้งวาล์วปล่อยสารด้วย เมื่อไม่สามารถลดความดันได้อีก ก่อนการปิดปั๊มลดความดันจะต้องปิดวาล์วปล่อยสารของเครื่องควบแน่นที่ต่อกับสายยางถึงปั๊ม เพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับของน้ำมันในปั๊มเข้าไปยังเครื่องควบแน่น

4.5 ขั้นตอนการเปิดให้ระบบทำงาน

เมื่อความดันของระบบต่ำเพียงพอ เครื่องกำเนิดไอได้อุณหภูมิของสภาวะที่ต้องการ และ น้ำทำความเย็นอุณหภูมิได้ตามที่กำหนด ถือได้ว่าระบบพร้อมสำหรับการเปิดให้ระบบทำงาน ซึ่งสามารถทำได้โดยเปิด วาล์วสองตัว คือ วาล์วของเครื่องกำเนิดไอที่ต่อกับหัวฉีดในอีเจ็คเตอร์ และ วาล์วที่เชื่อมต่อจากเครื่องระเหยกับอีเจ็คเตอร์ เมื่อเปิดวาล์วทั้งสองตัวแล้ว ระบบทำความเย็นจะเริ่มทำงานโดยเงื่อนไขการทำงานของเครื่องกำเนิดไอ เครื่องระเหย และเครื่องควบแน่น สามารถป้อนค่าลงที่คอมพิวเตอร์ ซึ่งระบบควบคุมจะปรับสภาวะของอุปกรณ์แต่ละตัวให้ได้ค่าตามที่ต้องการ ซึ่งจำเป็นต้องรอให้เข้าสู่สภาวะคงตัวก่อน การบันทึกผลการทดลอง

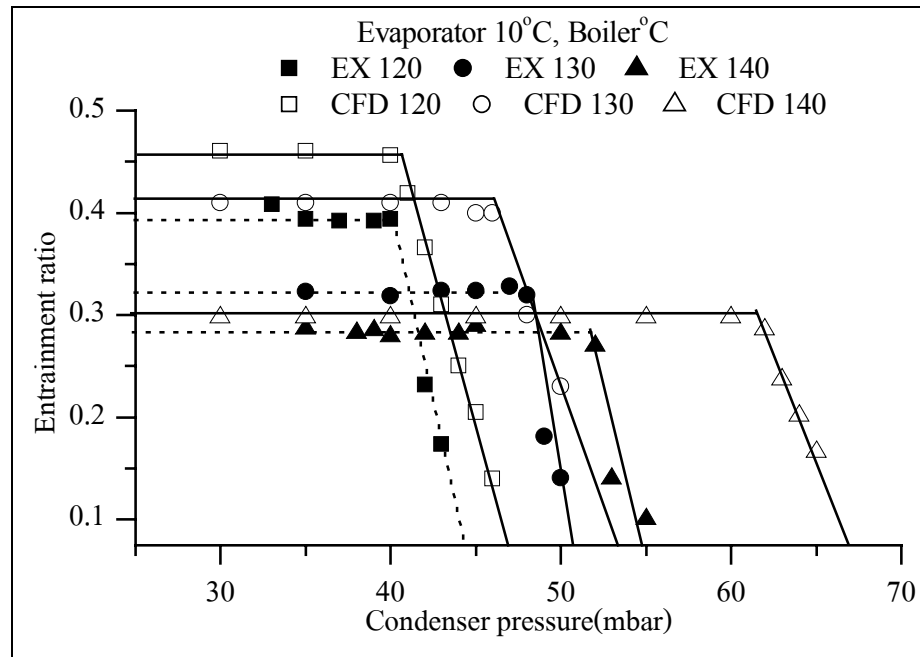
4.6 ขั้นตอนการเก็บผลการทดลอง

ผลที่ชุดทดลองนี้สามารถวัดได้มี 2 ค่าด้วยกัน คือ ค่า Entrainment ratio (R_m) ซึ่งสามารถวัดได้ด้วยวัดระดับต่างของสารทำงานในเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหย ก่อนและหลังการเปิดเครื่องทำงาน โดยนำผลที่ได้แปลงเป็นอัตราการไหลของสารปฐมภูมิและสารทุติยภูมิ และ ค่า ความดันสถิตที่ตำแหน่งต่างๆบนอีเจ็คเตอร์ผ่านรูเจาะ ซึ่งสามารถวัดได้ที่ละจุด โดยเปิดวาล์วประจำตำแหน่งที่ต้องการวัดและปิดวาล์วตัวอื่น ค่าความดันนั้นสามารถอ่านได้จากคอมพิวเตอร์

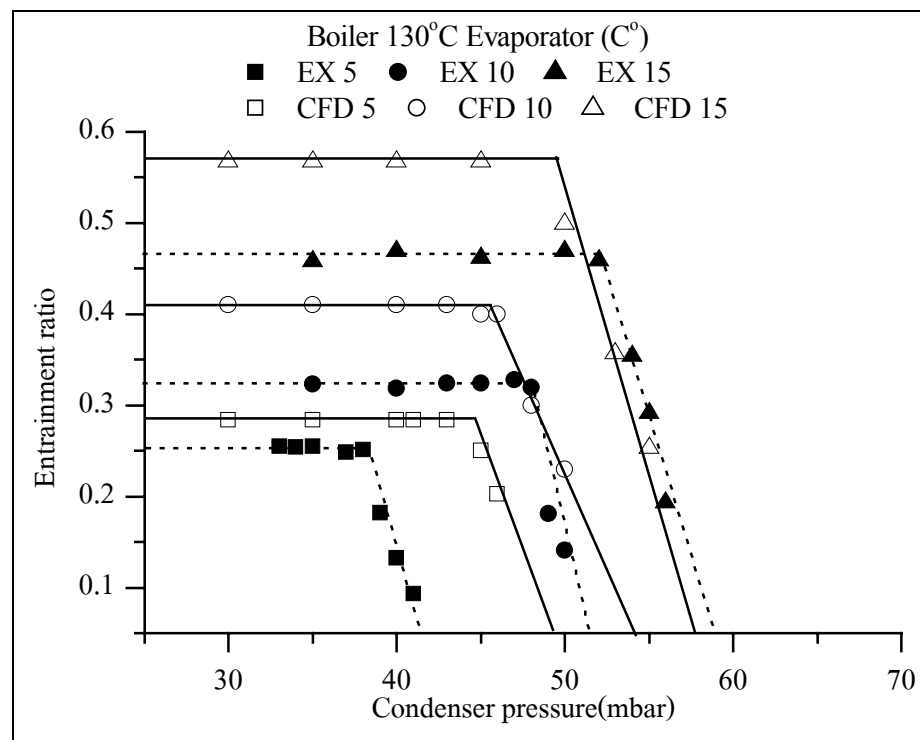
5. ผลการทดลองและผลจาก CFD ของอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC ที่ปรับปรุงแล้ว

5.1 ค่า R_m และ จุด CBP

จากการทดลอง เราได้ศึกษาผลกระทบของสภาวะการทำงานของอุปกรณ์ เครื่องกำเนิดไอ เครื่องระเหย และเครื่องควบแน่น ที่มีต่อสมรรถนะและคุณลักษณะของอีเจ็คเตอร์ โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ ของเครื่องกำเนิดไอและความดันของเครื่องระเหยกับเครื่องควบแน่น ตามผลการศึกษาและคาดคะเนที่ได้จาก CFD รูปที่ 6.5 แสดงความสัมพันธ์ของค่า R_m กับความดันของเครื่องควบแน่น ที่อุณหภูมิของเครื่องระเหย 10°C และ เครื่องกำเนิดไอ 120°C , 130°C และ 140°C เพื่อการการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอและหาจุด CBP ของอีเจ็คเตอร์ที่ออกแบบไว้ พบว่ามีคุณลักษณะคล้ายกับอีเจ็คเตอร์ทั่วไป คือ ที่ความดันของเครื่องควบแน่นต่ำๆ ค่า R_m จะไม่เปลี่ยนแปลงตามความดันของเครื่องควบแน่นซึ่งจะลดลงหากความดันนั้นสูงกว่าจุด CBP



รูปที่ 6.5 อิทธิพลของเครื่องกำเนิดไอที่มีต่ออีเจ็คเตอร์แบบ CRMC

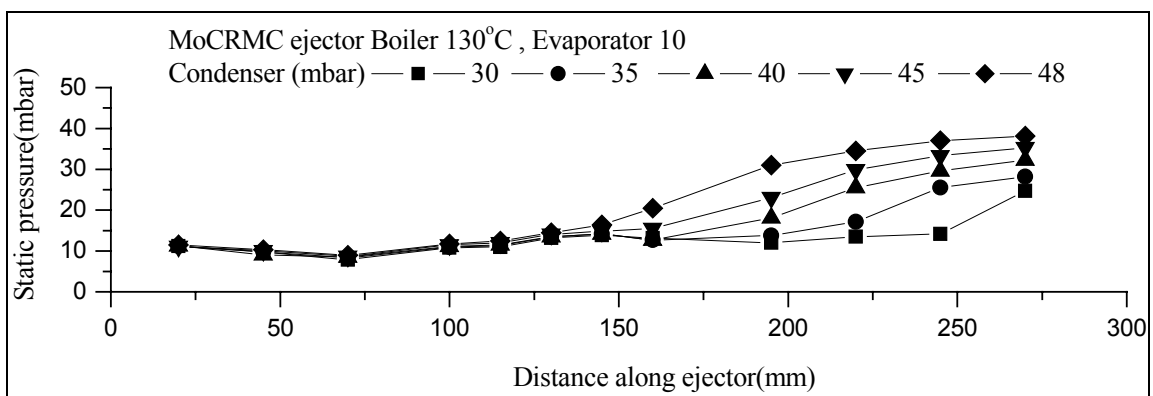


รูปที่ 6.6 อิทธิพลของเครื่องระเหยที่มีต่ออีเจ็คเตอร์แบบ CRMC

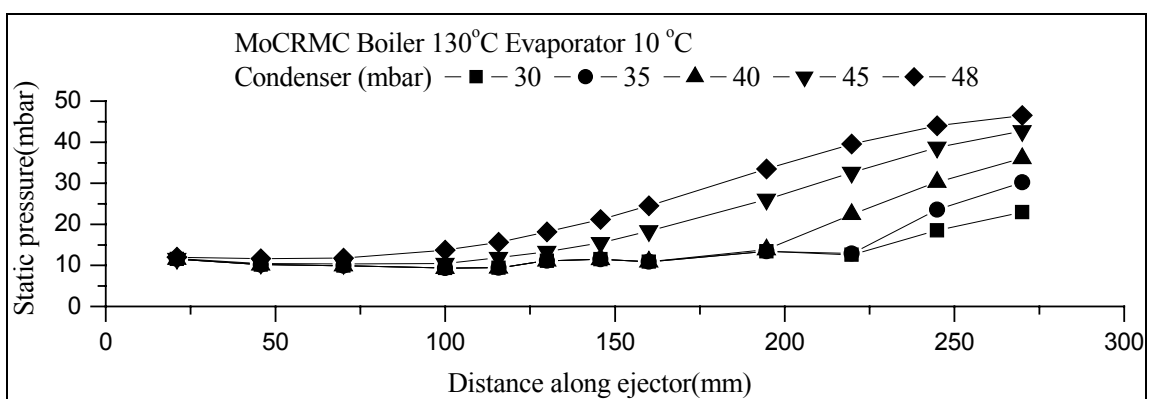
ทดลองจะทำงานอยู่ที่ 5°C , 10°C และ 15°C ที่อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 130°C พบว่าอีเจ็คเตอร์จะสามารถทำงานได้ดีขึ้นเมื่อเครื่องระเหยมีอุณหภูมิและความดันที่สูงขึ้นซึ่งคล้ายกับกับอีเจ็คเตอร์ลักษณะทั่วไป ทั้งนี้สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ ที่ได้จาก CFD จะมีค่าสูงกว่าที่ได้จากการทดลอง

5.2 รูปแบบความดันสถิตที่ผนังของอีเจ็คเตอร์

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความดันสถิต บริเวณผนังตลอดความยาวของอีเจ็คเตอร์ มีจุดประสงค์เพื่อทำความเข้าใจการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสารทุดิยภูมิที่มาจากเครื่องระเหย ตลอดทั้งอีเจ็คเตอร์ นอกจากนี้ในบางครั้งยังสามารถบอกตำแหน่งการเกิด Choking และ Shock ได้ ในการทดลองได้ทำการศึกษาผลกระทบของเงื่อนไขการทำงาน of เครื่องกำเนิดไอ เครื่องระเหย และเครื่องควบแน่น ที่มีต่อรูปแบบความดันสถิตบนผนังของอีเจ็คเตอร์ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.7-9 ซึ่งแสดงผลที่ได้จากจำลองการไหลการไหลของ CFD ควบคู่กันด้วยเพื่อทำการเปรียบเทียบผล



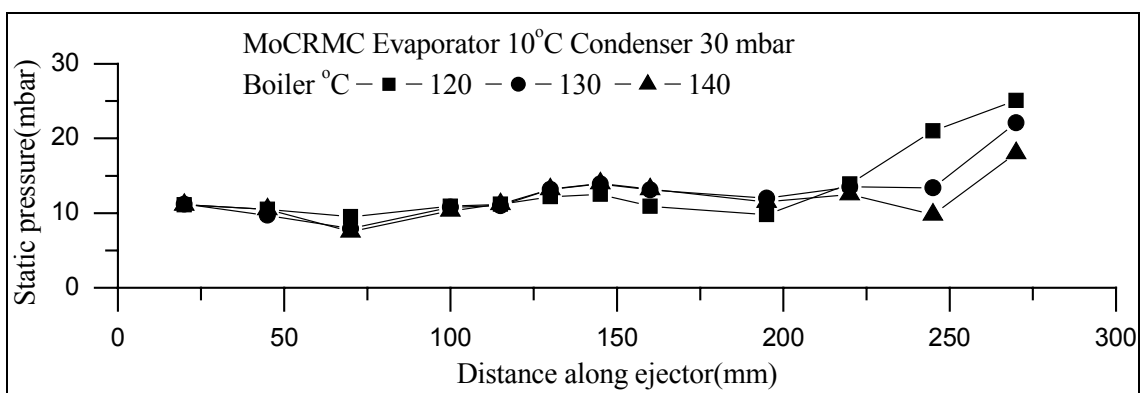
(a) ผลการทดลอง



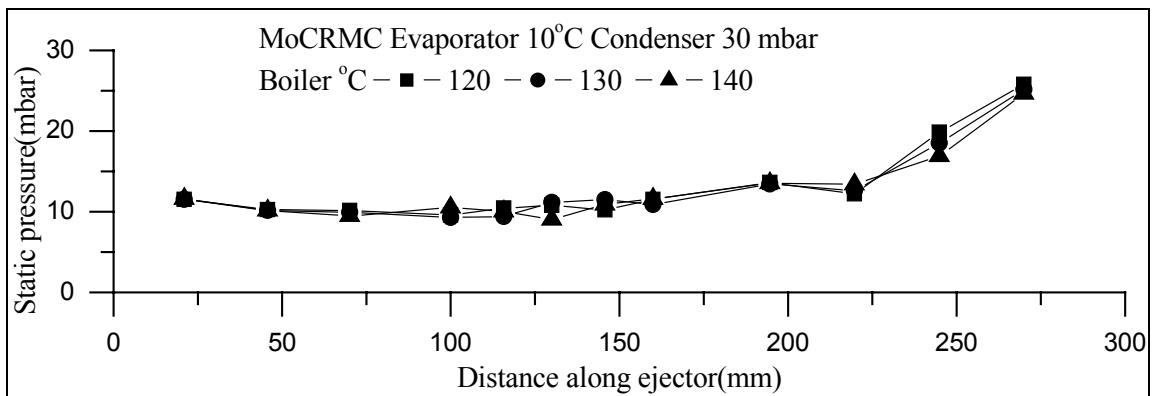
(b) CFD

รูปที่ 6.7 ผลความดันสถิตบนผนังของอีเจ็คเตอร์จากความดันเครื่องควบแน่น ผลจาก (a) ผลการทดลอง และ (b) CFD

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะการไหลของสารทุติยภูมิ ที่เกิดจากเปลี่ยนแปลงความดันของเครื่องควบแน่น เมื่อพิจารณาภาพที่ 6.7 ซึ่งเป็นความดันสถิตบริเวณผนังตลอดอีเจ็คเตอร์ที่ความดันเครื่องควบแน่นต่าง โดย อุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหยคงที่ พบว่าเมื่อความดันเครื่องควบแน่นสูงขึ้น ความดันที่ตำแหน่งใกล้ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์จะสูงขึ้นตาม จากภาพ 6.7 (a) ก่อนถึงจุด CBP (ความดันเครื่องควบแน่นต่ำกว่า 40 mbar) ความดันที่ตำแหน่งต่ำกว่า 160 mm ความดันสถิตจะมีค่าประมาณเท่ากัน แต่เมื่อความดันเกินจุด CBP ความดันเหล่านี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความดันของเครื่องควบแน่น เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับผลของ CFD พบว่าผลการทดลองมีค่าน้อยกว่า แต่กราฟทั้งสองมีแนวโน้มเดียวกัน



(a) ผลการทดลอง

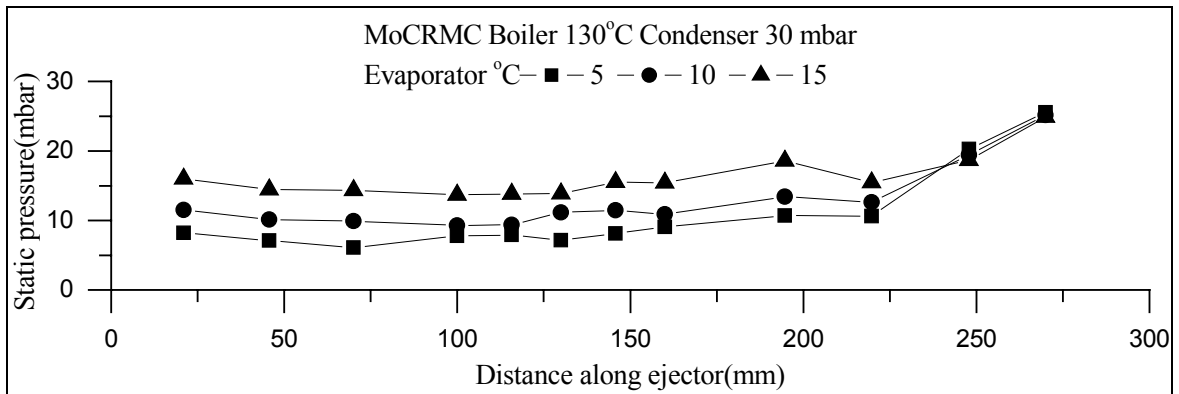


(b) CFD

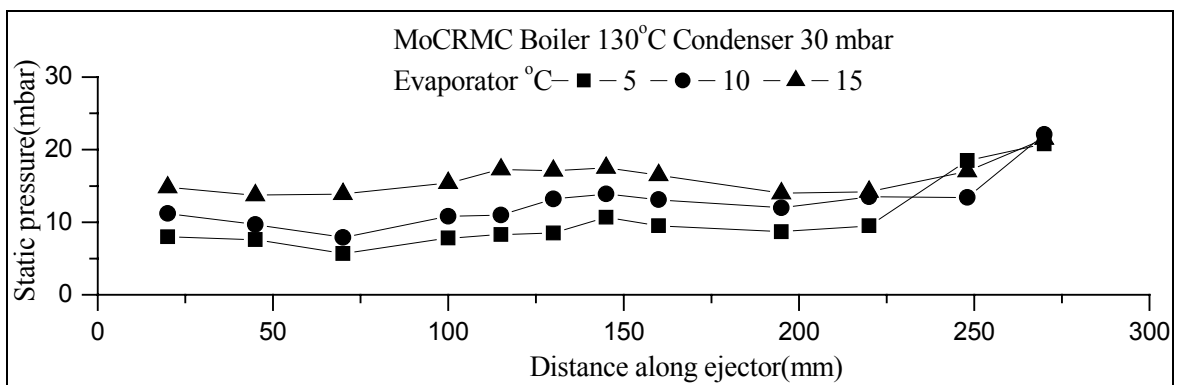
รูปที่ 6.8 ผลความดันสถิตบนผนังของอีเจ็คเตอร์จากอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ ผลจาก (a) ผลการทดลอง และ (b) CFD

รูปที่ 6.8 เป็นกราฟความดันสถิตบนผนังอีเจ็คเตอร์ที่ความดันเครื่องควบแน่น 30 mbar อุณหภูมิเครื่องระเหย 10°C และ เครื่องกำเนิดไอ 120°C, 130°C และ 140°C ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของอิทธิพลจากสถานะเครื่องกำเนิดไอที่มีต่อสมบัติการไหลของสารทุติยภูมิภายในอีเจ็คเตอร์

จากภาพ 6.8 แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิหรือความดันของเครื่องกำเนิดไม่ส่งผลต่อลักษณะการไหลของสารทฤษฎีที่ใกล้บริเวณผนัง เนื่องจากว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ ความดันสถิตบริเวณผนังของอีเจ็คเตอร์ยังให้ผลใกล้เคียงกัน ซึ่งผลจากการทดลองและผลของ CFD ให้ผลที่ตรงกัน แม้ค่าที่ได้จากการทดลองจะน้อยกว่าค่าจาก CFD ก็ตาม



(a) ผลการทดลอง



(b) CFD

รูปที่ 6.9 ผลความดันสถิตบนผนังของอีเจ็คเตอร์จากความดันเครื่องระเหย

ผลจาก(a) ผลการทดลอง และ (b) CFD

รูปที่ 6.9 แสดงกราฟความดันสถิตบนผนังอีเจ็คเตอร์ เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิของเครื่องระเหยที่มีต่อรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นกับสารทฤษฎีในอีเจ็คเตอร์ โดยทดลองที่ความดันเครื่องควบแน่น 10 mbar อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 130°C และเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเครื่องระเหยอยู่สามค่า คือ 5°C, 10°C และ 15°C ซึ่งพบว่าระดับความดันสถิตจะสูงขึ้นตามอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดเครื่องระเหยในช่วงแรก และ จะเริ่มมีค่าใกล้เคียงกันที่ตำแหน่งใกล้ปากทางออก(จากตำแหน่ง 225 เป็นต้นไป) แนวโน้มของกราฟระหว่างผลของ CFD กับผลการทดลองใกล้เคียงกัน แต่ค่าความดันที่ได้จากการทดลองจะต่ำกว่าที่ได้จาก CFD

6. สรุปและวิเคราะห์ผลการศึกษาระบบอีเจกเตอร์แบบ CRMC ที่ปรับปรุงแล้ว

จากผลการศึกษาของหัวข้อที่ผ่านมา ทำให้เราสามารถวิเคราะห์และสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

- จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบอีเจกเตอร์จะขึ้นอยู่กับสถานะการทำงานของอุปกรณ์ในระบบ นั้นหมายความว่า การควบคุมสถานะการทำงานของอุปกรณ์ในระบบจึงมีความสำคัญในการนำไปใช้ในงานจริง ตัวอย่างของตัวแปรที่จำเป็นต้องควบคุมหรือจำกัดช่วง เช่น สถานะของภาระความร้อนซึ่งส่งผลต่อสถานะของเครื่องระเหย อุณหภูมิหรือความดันของเครื่องควบแน่น และ อุณหภูมิของแหล่งพลังงานความร้อนที่ใช้ขับเคลื่อนระบบ ทั้งนี้เนื่องจากระบบทำความเย็นแบบอีเจกเตอร์จะมีสมรรถนะการทำงานขึ้นอยู่กับอุปกรณ์อีเจกเตอร์เป็นหลัก ซึ่งสมรรถนะของอีเจกเตอร์เองก็แปรเปลี่ยนตามเงื่อนไขการทำงานนั่นเอง
- สถานะการทำงานของอุปกรณ์แต่ละอย่างในระบบทำความเย็นแบบอีเจกเตอร์จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบแตกต่างกัน ดังนี้ อุณหภูมิหรือความดันเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหยจะบ่งชี้ถึงระดับความสามารถของระบบที่สามารถทำงานได้ เช่น หากอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอสูง ผู้ออกแบบอีเจกเตอร์จะมีทางเลือกของช่วงสมรรถนะที่กว้าง เนื่องจากพลังงานที่ใช้สำหรับเหนี่ยวนำสารมีสูง ขณะเดียวกัน หากภาระความร้อนที่ต้องการมีไม่มาก (อุณหภูมิที่ต้องการทำความเย็นไม่ต่ำมากนัก) ก็ไม่จำเป็นที่เราต้องใช้พลังงานขับเคลื่อนระบบที่สูงมากก็ได้ ความดันและอุณหภูมิของเครื่องควบแน่นคือตัวแปรที่กำหนดความยืดหยุ่นของการทำงานของอีเจกเตอร์และระบบทำความเย็น เนื่องจากสถานะของเครื่องควบแน่นจะไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำความเย็นแต่จะกำหนดช่วงว่าประสิทธิภาพนั้นจะทำงานได้ถึงความดันเครื่องควบแน่นมากน้อยเท่าใด
- เมื่ออุณหภูมิเครื่องกำเนิดไรมีค่าสูงขึ้นแต่ทำให้อีเจกเตอร์เหนี่ยวนำสารได้น้อยลงนั้น มีเหตุเนื่องมาจาก ความดันที่สูงของสารปฏิกิริยาทำให้เกิดมุมการกระจายตัว (Expansion angle) โตซึ่งทำให้ Effective area มีค่าลดลง แต่เนื่องจากพลังงานของสารมีมากขึ้นจุด CBP จึงมีค่าสูงขึ้น จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอจะไม่ส่งผลกระทบต่อรูปแบบการไหลของสารทุติยภูมิที่บริเวณใกล้ผนังของอีเจกเตอร์ แต่อย่างไรก็ตามค่า R_m ของอีเจกเตอร์ก็ขึ้นอยู่กับขนาดรูปร่างของอีเจกเตอร์ด้วย
- สถานะการไหลหรือคุณสมบัติการไหลของสารทุติยภูมิจะขึ้นอยู่กับความดันและอุณหภูมิของเครื่องระเหยเป็นหลัก ซึ่งค่า R_m และจุด CBP จะเพิ่มขึ้นตามความดันหรืออุณหภูมิของเครื่องระเหย เนื่องจากจะเป็นเพิ่มพลังงานการไหลของสารทุติยภูมิและอัตราการไหลก็เพิ่มตามด้วย เห็นได้จากค่าความดันสถิตที่ผนังของอีเจกเตอร์ที่เพิ่มขึ้นตามความดันเครื่องระเหย ทั้งนี้การเพิ่มความดันเครื่องระเหยจะไม่ส่งผลกระทบต่อขนาดของ Effective area ที่เกิดขึ้นใน

อีเจ็คเตอร์ เพราะแนวโน้มของกราฟความดันสถิตบริเวณผนังมีความใกล้เคียงกันแต่ต่างกันเฉพาะระดับความดันเท่านั้น

- การเปรียบเทียบค่าระหว่างผลการทดลองและ CFD นั้น ผลการทดลองมีค่าความดันที่ผนังอีเจ็คเตอร์ต่ำกว่าจาก CFD นั้นมีสาเหตุจากการสูญเสียที่เกิดขึ้นจริงที่ CFD คำนวณให้ไม่ได้ เช่น แรงเสียดทานที่ผนังของอีเจ็คเตอร์ เนื่องจากใน CFD กำหนดเป็นของแข็งผิวเรียบ ทำให้ผลของ CFD มีค่าสูงกว่าที่ได้จากการทดลอง

บทที่ 7

สรุป

ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์เป็น ระบบทำความเย็นและปรับอากาศที่ใช้ความร้อนทิ้ง เช่น ความร้อนเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรม พลังงานแสงอาทิตย์ หรือแม้แต่พลังงานศักย์ นำมาขับเคลื่อนระบบ มีความ คงทนมากกว่าระบบทั่วไปเนื่องจากไม่มีเครื่องอัดไอเหมือนระบบทำความเย็นทั่วไป แต่ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์มีข้อด้อย นั่นคือ สมรรถนะหรือประสิทธิภาพทำความเย็น ต่ำกว่าระบบทำความเย็นทั่วไป ทั้งนี้อีเจ็คเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ส่งผลต่อสมรรถนะของระบบมากที่สุด เพราะ เป็นอุปกรณ์ที่กำหนดอัตราการไหลที่ผ่านเครื่องระเหยและความดันของเครื่องควบแน่น ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการศึกษาอุปกรณ์อีเจ็คเตอร์ เพื่อทำความเข้าใจ ถึงอิทธิพลของเงื่อนไขการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์และรูปร่างของอีเจ็คเตอร์ ที่มีต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการไหล (Computational Fluid Dynamics,CFD) เข้ามาช่วยเนื่องจากประหยัดค่าใช้จ่ายจากการสร้างชุดทดลองจริง ช่วยลดเวลาทำการศึกษาลงได้ และ สามารถจำลองพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์ได้ ซึ่งทำได้ยากในการทดลองจริง

จากการตรวจสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า เงื่อนไขสำหรับกรณีการไหลในอีเจ็คเตอร์ของระบบทำความเย็นแสดงตารางดังตาราง ที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 เงื่อนไขการคำนวณของ CFD

Condition	Type
ขอบเขตทางเข้า(inlet boundary condition)	Pressure inlet
ขอบเขตทางออก(outlet boundary condition)	Pressure out
ระเบียบขั้นตอนการแก้ปัญหา(Solver)	Coupled solver
ระเบียบวิธีคำนวณ(Linearization)	Explicit method
แบบจำลองความปั่นป่วน(Turbulence model)	Standard $k - e$ model
ระเบียบวิธีแก้ปัญหการไหลของบริเวณใกล้ผนัง (Near-wall treatment method)	Standard near wall function

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการจำลองรูปร่างใน 2 มิติ และ 3 มิติที่รวมส่วนของท่อดูดสารจากเครื่องระเหยด้วย พบว่าให้ผลที่ไม่ต่างกันมากเนื่องจากความเร็วของสารทุดูดในท่อดูดมีค่าต่ำมากจึงมีผลต่อรูปแบบการไหลในอีเจ็คเตอร์น้อยมาก

จากการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างผลของ CFD กับผลการทดลองสำหรับกรณีทั่วไปพบว่า ให้ค่าผิดพลาดของค่า Entrainment ratio (R_m) ประมาณ 10% และ ค่า Critical back pressure(CBP) ประมาณ 5.8% เมื่อทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ 2 ชนิดคือ อีเจ็คเตอร์แบบ Constan pressure mixing (CPM) และ แบบ Constant mixing area(CMA) จะได้ว่าอีเจ็คเตอร์แบบ CPM จะทำความดันได้สูงกว่าแบบ CMA แต่ จะมีค่า R_m น้อยกว่า ผลกระทบของเงื่อนไขการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ที่มีต่อ ประสิทธิภาพหรือสมรรถนะของอุปกรณ์อีเจ็คเตอร์ พบว่า อุณหภูมิหรือความดันของเครื่องกำเนิดไอที่สูงขึ้นจะทำให้ค่า R_m แต่ ค่า CBP เพิ่มขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิหรือความดันของเครื่องระเหยค่า R_m และ CBP จะเพิ่มขึ้น และการเพิ่มความดันของเครื่องกำเนิดไอที่มีค่าไม่เกิดจุด CBP จะไม่ทำให้ ค่า R_m เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้เรายังได้ทำการศึกษาอิทธิพลของบางรูปร่างลักษณะของอีเจ็คเตอร์ที่มีต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ โดยการศึกษา อิทธิพลของความยาว Throat พบว่าการเพิ่มความยาวของ Throat จะทำให้อีเจ็คเตอร์สามารถทำความดันได้สูงขึ้น แต่ความยาวนั้นก็จำกัดที่หากยาวเกินไปความดันที่ทำได้จะตกลง ตำแหน่งหัวฉีดในอีเจ็คเตอร์หากเลื่อนเข้าใกล้ห้องผสมมากเกินไปจะทำให้ค่า R_m ลดลง ซึ่งผลการศึกษาอิทธิพลต่างๆที่ส่งผลต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ได้แสดงดังตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 สรุปอิทธิพลและผลของพารามิเตอร์ที่มีต่ออีเจ็คเตอร์

อิทธิพลของพารามิเตอร์			Entrainment ratio (R_m)	Critical back pressure (CBP)
เงื่อนไข	ชนิดพารามิเตอร์	กระทำ		
การทำงาน	อุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ	↑	↓	↑
	อุณหภูมิของเครื่องระเหย	↑	↑	↓
รูปร่างลักษณะ	ตำแหน่งของหัวฉีด (NXP)	↓ *	↑	—
	ความยาวของ Throat	↑ *	—	↑

* หากมากเกินไปไปจะทำให้ผลตรงข้าม

นอกจากนี้เราได้ทำการออกแบบอีเจ็คเตอร์ ตามแนวคิดแบบ Constant Rate of Momentum Changes (CRMC) และนำ CFD เป็นเครื่องมือช่วยหารูปทรงที่เหมาะสม เนื่องจากบางลักษณะของอีเจ็คเตอร์แนวการออกแบบตามแนวคิดนี้ไม่ได้แนะนำไว้ เมื่อได้รูปร่างอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC ที่เหมาะสมแล้วจึงได้สร้างและทำศึกษาทดลอง พบว่าสมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ จะขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานของแต่ละอุปกรณ์ในระบบ สภาวะการทำงานของอุปกรณ์แต่ละอย่างในระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์จะส่งผลกระทบแตกต่างกัน ดังนี้ อุณหภูมิหรือความดันเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหยจะบ่งชี้ถึงระดับความสามารถของระบบที่สามารถทำงานได้ จากการสังเกตค่าความดันสถิตหรือรูปแบบการไหลของสารทฤษฎีที่บริเวณใกล้ผนังของอีเจ็คเตอร์พบว่า จะขึ้นอยู่กับความดันและอุณหภูมิของเครื่องระเหย แต่ความดันและอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอจะไม่ส่งผลกระทบต่อรูปแบบของความดันสถิตที่ผนังของอีเจ็คเตอร์ ทำให้เราสรุปได้ว่าสภาวะของสารปฏุมุมทำให้เกิดมุมการกระจายตัว (Expansion angle) โต ทำให้ Effective area มีค่าลดลง แต่เนื่องจากพลังงานของสารมีมากขึ้นจุด CBP จึงมีค่าสูงขึ้น และ ค่า R_m และจุด CBP จะเพิ่มขึ้นตามความดันหรืออุณหภูมิของเครื่องระเหย เนื่องจากสภาวะของสารทฤษฎีไม่ทำให้มุมการกระจายตัวเปลี่ยนแปลงแต่ จะเพิ่มพลังงานการไหลของสารทฤษฎี

อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการทดลองและผลของ CFD สำหรับกรณีการไหลในอีเจ็คเตอร์แบบ CRMC ที่ปรับปรุงแล้วยังมีค่าที่แตกต่างกันอยู่ 5-10% อาจเนื่องมาจาก ตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ในการทดลอง ซึ่ง CFD ไม่สามารถคำนวณได้ เช่น ผิวของอีเจ็คเตอร์อาจไม่เรียบพอ เกิดการรั่วของสารทำงานที่รอยต่อระหว่างอีเจ็คเตอร์แต่ละท่อน หรือแม้แต่การเลือกโดเมนของปัญหา เพื่อมาจำลองใน CFD อาจครอบคลุมไม่ทั่วถึง เพราะในความเป็นจริงช่วงปากของอีเจ็คเตอร์ต่อกับเครื่องควบแน่น จะเชื่อมต่อกันด้วยท่อ ซึ่งใน CFD ไม่ได้นำส่วนท่อนี้มาคิด ซึ่งจะต้องมีการปรับปรุงแก้ไขต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chunnanond K, Aphornratana S, *Ejectors : application in refrigeration technology*. Renewable & Sustainable Energy Reviews 2004;8:129-155.
- [2] Sun DW, Eames IW. *Recent development in the design theories and applications of ejector-a review*. J Inst Energy 1995;68 (475): 65-79.
- [3] Rusly E, Lu Aye, Charters WWS, Ooi A and Pianthong K. (2002) “*Ejector CFD modelling with real gas model*” Proceedings of the 16th Annualconference of Mechanical Engineering Network Thailand, Phuket, 14-16 October
- [4] Eame IW. *A New Prescription for Desing of Supersonic Jet-Pumps: Constant Rate of Mometum Change Method*, Applied thermal engineering, 2002, Vol 22, pp.121-131
- [5] Chunnanond K, Aphornratana S. *An experimental investigation of a stream ejector refrigerator: the analysis of the pressure profile along the ejector*. Appl Therm Engng 2004;24:311-322.
- [6] Stoecker WF. *Steam-jet refrigeration*. Boston, MA: McGraw-Hill; 1958.
- [7] Huang BJ, Jiang CB, Hu FL. *Ejector performance charateristics and design analysis of jet refrigeration system*. Trans ASME, 1985;107:792-802.
- [8] Eames IW, Wu S, Worall M, Aphornratana S. *An experimental investication of stream ejector for application in jet-pump refrigerators powered by low-grade heat*. Proc Instn Mech Eng A 1999;213:351-61.
- [9] Chen YM, Sun CY. *Exprimental study of the performance characteristics of steam-ejector refrigerations system*. Exp Fluid Sci 1997;15:384-94.
- [10] Aidoun Z, Ouzzane M. *The effect of operating conditions on the performance of a supersonic ejector for refrigeration*. Int J Refrig; paper in pressed.
- [11] Keenan JH, Neumann EP. *A simple air ejector*. ASME J Appl MechTrans 1942; 64:75-81.
- [12] Keenan JH, Neumann EP, Lustwerk. *An investigation of ejector design by analysis and experiment*. ASME J Appl MechTrans 1950;72:299-309.
- [13] Aphornratana S. *Theoretical study of a steam-ejector refrigerator*. RERIC Int Energy J 1996;18(1):61-74.
- [14] Garriss Jr CA. *Pressure exchange ejector and refrigeration apparatus and method*. United states Partent, 1997, partent number 5,647,221.

- [15] Munday JT, Bagster DF. *A new theory applied to steam jet refrigeration*. Ind Eng Chem Process Des Dev 1997;16(4):442-9.
- [16] Huang BJ, Chang JM. *Empirical correlation of ejector design*. Int J Refrig 1999;22:379-88.
- [17] Rogdakis E.D. and Alexis G.K. *Investigation of ejector design at optimum operating condition*. Energy Convers Manag 2000;1841-1849
- [18] Aidoun Z. and Ouzzane M. *The effect of operating conditions on the performance of a supersonic ejector for refrigeration*. Int J Refrig; paper in pressed.
- [19] Aphornratana S, Chungpaibulpatana S, Srihirim P. *Experimental investigation of an ejector refrigerator: effect of mixing chamber geometry on system performance*. Int J Energy Res 2001;25:397-411.
- [20] Eames IW, Aphornratana S, Haider H. *A theoretical and experimental study of small-scale jet refrigeration*. Energy Convers Manag 1997;18(6):378-86
- [21] Sun DW. *Variable geometry ejectors and their application in ejector refrigeration system*. Energy 1996;21(10):919-929.
- [22] Al-Khalidy N. *An experimental study of an ejector cycle refrigeration machine operating on R113*. ASHRAE Trans 1997;20(5):56-64.
- [23] Alexis G.K. *Estimation of ejector's main cross sections in steam-ejector refrigeration system*. Appl Therm Engng 2004; paper in pressed.
- [24] ESDU. *Ejector and jet pump, data item 8603 0*. ESDU International Ltd 1985; UK.
- [25] Chunnanond K. *A study of steam ejector refrigeration cycle, parameters affecting performance of ejector*. PhD Thesis, Sirindhorn International Institute of Technology University, 1994; Thailand.
- [26] Garriss Jr CA. *Pressure exchange ejector and refrigeration apparatus and method*. United States Patent, 1997, patent number 5,647,221.
- [27] Mavriplis, Catherine, Garriss Jr., Charles A. *A novel pressure-exchange ejector refrigeration system with steam as the refrigerant*[online] 2004 [cited 2004 september 2004]. Available from: <http://www.seas.gwu.edu>
- [28] Chang YJ, Chen YM. *Enhancement of a steam-jet refrigerator using a novel application of the petal nozzle*. Exp Therm Fluid Sci 2000;22:203-11.

- [29] Riffat SB and Omer SA. *CFD modelling and experimental investigation of an ejector refrigeration system using metanol as the working fluid*. Int J Energy Res 2001;25:115-128.
- [30] Rusly E, Aye Lu, Charters W W S, Ooi A. *CFD analysis of ejector in a combined ejector cooling system*. Int J Refrig 2005; paper in pressed.
- [31] Pianthong K, Seehanam W, Chunnanond K, Aphornratana S and Behnia M. *Prediction of performance and flow behavior of steam ejector using computational fluid dynamics techniques*. Proceedings of the 8th Annual National Symposium on Computational Science and Engineering (ANSCSE8), at Nakorn Ratchaseema, Thailand, 2004, pp.CFDM-028.
- [32] Bartosiewicz Y, Aidoun Ai, Desevaux P, Mercadier Y. *Numerical and experimental investigations on supersonic ejectors*. Int J Heat and Fluid flow 2004; 26 : 56-70.
- [33] Bartosiewicz Y, Aidoun Ai, Mercadier Y. *Numerical assessment of ejector operation for refrigeration applications based on CFD*. App therm Eng. 2005; paper in pressed.
- [34] ปราโมทย์ เฉชะอำไพ. *ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการคำนวณพลศาสตร์ของไหล*. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; พ.ศ. 2545.
- [35] Fox RW, McDonald AT and Pritchard PJ. *Introduction to fluid dynamics*. USA: John Wiley & Sons, 2003; USA.
- [36] Versteeg HK, Malalasekera W. *AniIntroduction to computational fluid dynamics: The finnite volume method*. John Wiley & Sons.1995; USA.
- [37] FLUENT 6.0 *User's Guide*, FLUENT INC. Lebanon, NH, U.S.A.
- [38] Matsuo K, Miyazato Y, Kim HD. *Shock train and pseudo-shock phenomena in internal gas flows*. Prog Aerospace Sci, 1999; 35: 33-100.

ภาคผนวก ก

รายชื่อ บทความที่น่าสนใจในที่ประชุมวิชาการ

