

การศึกษาและพัฒนาระบบทำความเย็นแบบ อีเจกเตอร์โดยใช้วิธีเชิงตัวเลขสำหรับการไหล*

วิระพันธ์ สีหานาม¹⁾ กุลเชษฐ์ เพียรทอง¹⁾ Masud Behnia²⁾ ธนรัฐ ศรีวีระกุล¹⁾ และศรัทธา อภรณ์รัตน์³⁾

¹⁾ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี

²⁾Dean of Postgraduate Study, University of Sydney, Sydney, NSW, Australia

³⁾ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จ.ปทุมธานี

Email: wirapan_seehanam@yahoo.com

บทคัดย่อ

ระบบทำความเย็นแบบอีเจกเตอร์ (ejector refrigeration) เป็นระบบที่ใช้พลังงานความร้อนทั้งมาขับเคลื่อนระบบทำความเย็น มีต้นทุนการบำรุงรักษาราคาต่ำเนื่องจากไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนที่เพราะไม่มีเครื่องอัดไอ (compressor) สมรรถนะของระบบทำความเย็นนี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของอีเจกเตอร์เป็นหลักการศึกษาคุณลักษณะของอีเจกเตอร์และออกแบบอุปกรณ์อีเจกเตอร์อย่างมีประสิทธิภาพจึงสำคัญต่อการพัฒนาระบบทำความเย็นแบบอีเจกเตอร์อย่างยิ่ง ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงได้นำเอาความรู้ด้าน Computational Fluid Dynamics (CFD) โดยโปรแกรม FLUENT มาใช้เพื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลและผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆที่เกิดกับอีเจกเตอร์แบบ CPM และ CMA ในระบบทำความเย็นที่ใช้ น้ำเป็นสารทำงาน โดยศึกษาที่สภาวะเครื่องกำเนิดไอ และเครื่องระเหยที่ 120°C-140°C และ 5°C-15°C ตามลำดับ จากผลของ CFD สามารถคาดคะเนสมรรถนะอีเจกเตอร์และแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของเงื่อนไขการทำงานที่มีต่อการเกิด พื้นที่ประสิทธิภาพ (effective area) ซึ่งเชื่อมโยงกับสมรรถนะอีเจกเตอร์โดยตรง นอกจากนี้พบว่าท่อจุดมีผลกับรูปแบบการไหลในอีเจกเตอร์น้อยมาก เพราะผลจากรูปแบบจำลองแบบสมมาตรในแนวแกน (axis symmetric) และ 3 มิติ (3D) ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งข้อมูลในการศึกษานี้จะทำให้เข้าใจปรากฏการณ์การไหลในอีเจกเตอร์มากขึ้น อีกทั้งยังช่วยให้การออกแบบอีเจกเตอร์มีความเหมาะสมกับสภาวะการทำงานให้ดียิ่งขึ้น

คำสำคัญ : อีเจกเตอร์, ระบบทำความเย็นแบบอีเจกเตอร์, Computational Fluid Dynamics (CFD)

* รัับต้นฉบับเมื่อวันที่ 1 มิถุนายน 2549 และได้รับบทความฉบับแก้ไขเมื่อวันที่ 28 กันยายน 2549

Investigation on Characteristics of Ejector Refrigeration Using CFD*

Wirapan Seehanam¹⁾ Kulachate Pianthong¹⁾ Masud Behnia²⁾ Thanarath Sriveerakul¹⁾
and Satha Aphornratana³⁾

1) Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchatany University.

2) Dean of Postgraduate Study, University of Sydney, Sydney, NSW, Australia.

3) Department of Mechanical Engineering, Sirinhorn International Institute of Technology, Tammasat University.

ABSTRACT

Ejector refrigeration system is usually designed to utilize the low-grade energy for driving the cycle. It also has a low maintenance cost, because it operates without compressor. Mainly, the ejector performance directly affects the refrigerating performance. Therefore, an investigation on characteristics and an efficient design of the ejector are important to improve the ejector refrigeration system. In this study, Computational Fluid Dynamics (CFD) code (FLUENT) is employed to predict the flow phenomena and performance of CPM and CMA steam ejector. The ejector refrigeration system, using water as the working fluid, is operated at 120°C-140°C of boiler and 5°C-15°C of evaporator temperature. CFD can predict the ejector performance, very well and reveals the effect of operating conditions on an effective area which is directly related to its performance. Besides, it is found that the flow pattern does not depend much on suction zone because the results of axis symmetric and 3D simulation are similar. This investigation aids to understand the ejector characteristics and provide the information for designing ejector to suited the optimum condition.

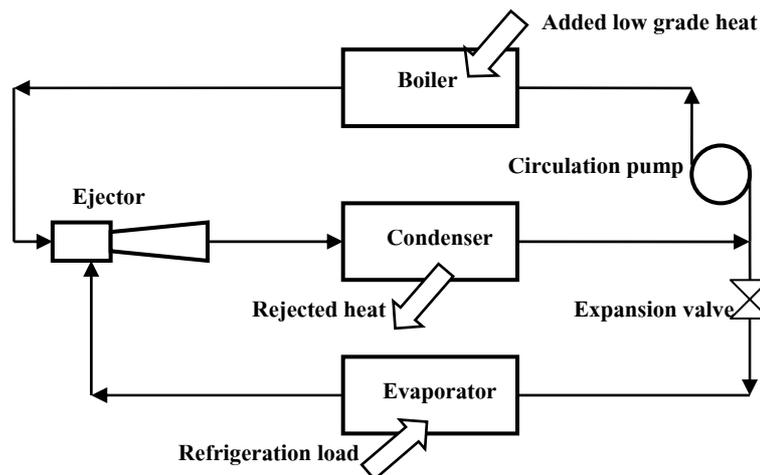
Keywords : Ejector, Ejector refrigeration, Computational Fluid Dynamics(CFD)

* Original manuscript submitted: June 1, 2006 and Final manuscript received: September 28, 2006

บทนำ

ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ถูกพัฒนาครั้งแรกโดย Maurice Leblanc ในปี ค.ศ. 1910 (Chunnanond, K.,2005) ซึ่งเป็นการนำความร้อนทั้งมาขับเคลื่อนวัฏจักรทำความเย็น ข้อดีของระบบนี้คือมีส่วนประกอบที่เคลื่อนที่น้อย ทำให้ระบบมีความทนทานและไม่เกิดการสึกหรอน มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน สามารถใช้น้ำเป็นสารทำงานซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แต่ข้อด้อยของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์มีจุดอ่อนที่ต้องปรับปรุง คือ สมรรถนะทำความเย็นต่ำกว่าระบบทั่วไป ซึ่งสมรรถนะของระบบนี้จะขึ้นอยู่กับสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์เป็นหลัก

รูปที่ 1 แสดงภาพ วัฏจักรการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ สังเกตเห็นได้ว่าอีเจ็คเตอร์ (ejector), เครื่องกำเนิดไอ (generator or boiler) และ ปั๊มหมุนเวียนสารทำงาน (circulating pump) ถูกติดตั้งแทนที่เครื่องอัดไอ (compressor) ในระบบทำความเย็นทั่วไป(ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ) โดยสารทำงานความดันสูงที่ได้จากการเดือดภายในเครื่องกำเนิดไอ จะถูกใช้เป็นก๊าซปฐมภูมิของอีเจ็คเตอร์ ก๊าซความดันสูงนี้จะไหลและขยายตัวผ่านหัวฉีด (nozzle) ภายในอีเจ็คเตอร์ด้วยความเร็วสูง ก่อให้เกิดความดันต่ำบริเวณปากทางออกของหัวฉีดซึ่งต่อกับเครื่องระเหย (evaporator) ทำให้ความดันของเครื่องระเหยลดลงด้วย ดังนั้นสารทำงานในเครื่องระเหยจึงสามารถเดือดและระเหยได้ในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า สารทำงานในเครื่องระเหยหรือก๊าซทุติยภูมิของอีเจ็คเตอร์จะถูกดูดพร้อมเพิ่มความดันให้สูงขึ้น ในห้องผสมและทางออกของอีเจ็คเตอร์ตามลำดับ จากนั้นจะกลั่นตัวกลับเป็นสารทำงานเหลวภายในเครื่องควบแน่น (condenser) สารทำงานเหลวนี้นี้จะถูกหมุนเวียนกลับไปเครื่องกำเนิดไอด้วยปั๊ม สารทำงานบางส่วนจะถูกลดความดันผ่านวาล์วลดความดัน (expansion valve) ก่อนจะไหลกลับเข้าสู่เครื่องระเหย เป็นการครบวัฏจักรการทำงาน จะสังเกตเห็นได้ว่า สมรรถนะการทำความเย็นของระบบจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพและความสามารถในการเหนี่ยวนำสารจากเครื่องระเหยของอีเจ็คเตอร์

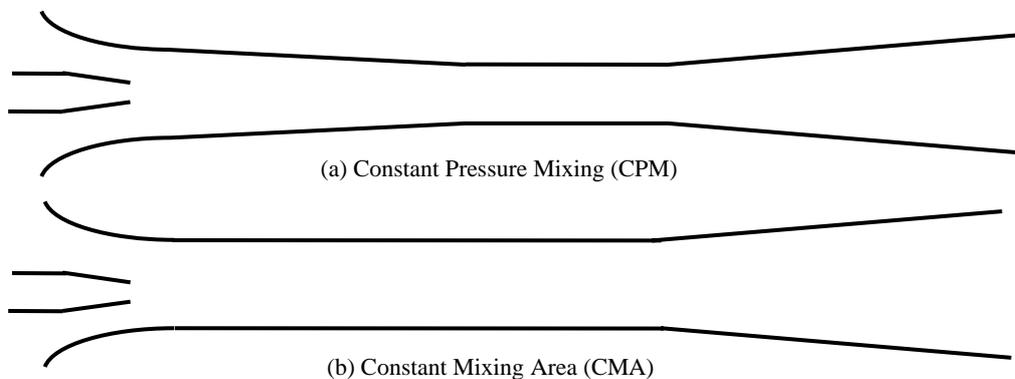


รูปที่ 1 วัฏจักรการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์

คุณลักษณะที่บ่งบอกประสิทธิภาพของอีเจ็กเตอร์มี 2 อย่างด้วยกันคือ Entrainment ratio, E_m เป็นดัชนีบ่งชี้ประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำสารทำงาน ซึ่ง มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (1) และ Critical Back Pressure (CBP) คือ ค่าความดันของเครื่องควบแน่นสุดท้ายที่อีเจ็กเตอร์ยังสามารถทำงานได้โดยสมรรถนะของอีเจ็กเตอร์ไม่ลดลง เป็นดัชนีบ่งชี้ความสามารถทำความดันของอีเจ็กเตอร์

$$\text{Entrainment ratio } E_m = \frac{\text{mass flow rate of secondary flow}}{\text{mass flow rate of primary flow}} \quad (1)$$

โดยทั่วไปอีเจ็กเตอร์แบ่งตามรูปร่างออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ อีเจ็กเตอร์แบบ constant pressure mixing (CPM) และ constant mixing area (CMA) (แสดงดังรูปที่ 2.7) ทั้งนี้ อีเจ็กเตอร์ทั้งสองประเภท มีคุณสมบัติแตกต่างกัน โดย อีเจ็กเตอร์แบบ CMA มีค่า R_m หรือ สามารถเหนี่ยวนำสารทุติยภูมิได้มาก แต่มีจุด CBP ต่ำ ขณะที่ อีเจ็กเตอร์แบบ CPM มีค่า R_m ต่ำ แต่จุด CBP สูง การเลือกใช้อีเจ็กเตอร์ทั้งสองประเภท ขึ้นอยู่กับ ช่วงความดันและอัตราการเหนี่ยวนำสารของการใช้งาน แต่อย่างไรก็ตาม ในระบบทำความเย็นแบบอีเจ็กเตอร์ ยังไม่สามารถบ่งชี้ได้ว่า อีเจ็กเตอร์รูปร่างใดเหมาะสมที่สุด เนื่องจากตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของอีเจ็กเตอร์มีมาก จึงเป็นเรื่องยากในการศึกษาและทดลองเปรียบเทียบ ด้วยเหตุนี้ เราจึงได้นำ การจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหล (Computational Fluid Dynamics : CFD) เข้ามาช่วยเพื่อใช้ในการศึกษาถึงผลของตัวแปรเหล่านั้นที่มีต่ออีเจ็กเตอร์เพื่อลดต้นทุนและเวลาในการทดลองจริง

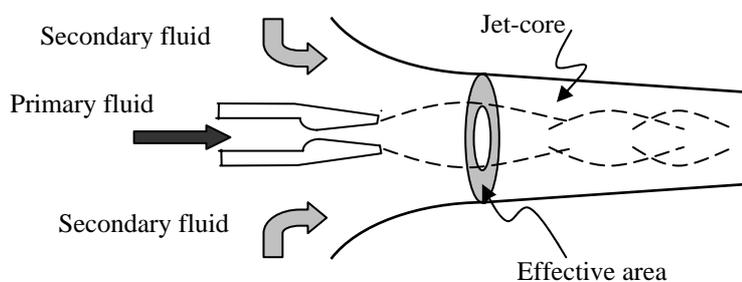


รูปที่ 2 อีเจ็กเตอร์แบบ (a) constant-pressure mixing ejector (b) constant-area mixing ejector

นักวิจัยพยายามที่จะศึกษาและอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็กเตอร์ เพื่อใช้เป็นรากฐานในการออกแบบและหาทางเพิ่มสมรรถนะ Keenan และคณะ (Keenan, J.H. *et al.*, 1942 and Keenan, J.H. *et al.*, 1950) เป็นนักวิจัยกลุ่มแรกที่เสนอทฤษฎีการออกแบบอีเจ็กเตอร์โดยวิเคราะห์การไหลใน 1 มิติ เพื่อคาดคะเนคุณลักษณะของอีเจ็กเตอร์ โดยใช้ข้อสมมติฐานของลักษณะการผสมกันระหว่างของไหลทั้งสองร่วมกับทฤษฎีพื้นฐานการไหลของก๊าซ ทฤษฎีของเขาให้ผลที่ยอมรับได้และถูกใช้ในการออกแบบกันอย่างกว้างขวาง แต่อย่างไรก็ตามหลักการนี้ก็ยังไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่

อีเจ็คเตอร์เหนี่ยวนำสารไคคองที่ เมื่อความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ลดลง (constant capacity effect) ซึ่งต่อมา Munday J.T. และคณะ (Munday, J.T. *et al.*, 1997) ได้ศึกษาปรากฏการณ์ดังกล่าวและอธิบายว่าของไหลทั้งสองจะยังไม่ผสมกัน จนกว่าสารทุติยภูมิจะมีความเร็วเท่ากับเสียง (sonic condition) โดยเสมือนการเคลื่อนที่ผ่านคอขวดในหัวฉีด (การ choking ของสารทุติยภูมิ) พร้อมทั้งนิยามพื้นที่หน้าตัดบริเวณที่สารทุติยภูมิมีความเร็วเท่ากับเสียงว่า พื้นที่ประสิทธิผล (effective area) แสดงดังรูปที่ 3 แต่อย่างไรก็ตามทฤษฎีทั้งสองก็ยังไม่มีการประเมินเปรียบเทียบความถูกต้อง ที่แน่ชัด

นอกจากนี้พฤติกรรมกรรมการไหลภายในอีเจ็คเตอร์ที่เกิดขึ้นจริงสำหรับรูปร่างที่แตกต่างกันออกไปหลาย ๆ ลักษณะ ยังมีผู้ทำการศึกษาและวิจัยน้อย เนื่องจากข้อจำกัดในด้านงบประมาณและเวลา ด้วยเหตุนี้ จึงได้มีการนำเอา CFD เข้ามาช่วยเพื่อแก้ปัญหาและอธิบายพฤติกรรมกรรมการไหลในอีเจ็คเตอร์ ซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการทดลอง



รูปที่ 3 พื้นที่ประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในอีเจ็คเตอร์

การใช้ CFD เป็นเครื่องมือจะช่วยลดต้นทุนและเวลาในการศึกษาในการจำลองพฤติกรรมภายในอีเจ็คเตอร์ Riffat, S.B. และคณะ (Riffat, S.B. *et al.*, 2001) ทำการจำลองการไหลที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์กับระบบทำความเย็นที่ใช้เมทานอล (methanol) เป็นสารทำงานและทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบ พบว่าให้ผลเป็นที่ยอมรับได้ Rusly, E. และคณะ (Rusly, E. *et al.*, 2002 and Rusly, E. *et al.*, 2005) ทำการจำลองอีเจ็คเตอร์เป็นแบบ 2 มิติ และปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใหม่ เพื่อให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งกว่าเดิม พร้อมกำหนดสมบัติของสารทำความเย็นเป็น real gas model ซึ่งใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น จากการพัฒนาของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อที่ให้ความแม่นยำและใกล้เคียงความจริงสำหรับกรณีของการไหลในอีเจ็คเตอร์มากขึ้น ต่อมา Seehanam, W. และคณะ (Seehanam, W. *et al.*, 2005) ได้นำแบบจำลองของ Rusly, E. และคณะ มาใช้สำหรับช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบอีเจ็คเตอร์แบบ โดยใช้แนวคิด “ การเท่ากันของอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมภายในอีเจ็คเตอร์คงที่ ” (Constant Rate of Momentum Changes ,CRMC) ซึ่งช่วยให้อีเจ็คเตอร์สามารถทำงานได้ช่วงความดันที่กว้าง และเหนี่ยวนำสารไคคองได้ดีขึ้น ดังนั้นในการศึกษานี้จะทำการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีต่อสมรรถนะอีเจ็คเตอร์ แบบ CMA และ CPM โดยใช้ CFD เพื่อศึกษาปรากฏการณ์และคุณลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นในอีเจ็คเตอร์

แบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหล

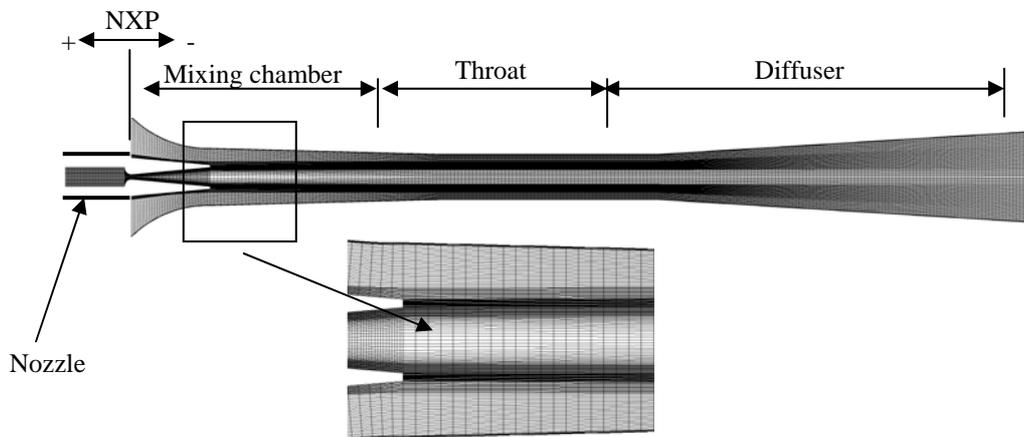
แบบจำลองเชิงตัวเลขของอีเจ็ทเตอร์

รูปร่างองค์ประกอบทั่วไปของอีเจ็ทเตอร์แสดงดังรูปที่ 4 โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ 1) หัวฉีดสารปฐมภูมิ (primary nozzle) ภายในมีขอคอด ทำหน้าที่เปลี่ยนความดันสถิตเป็นความเร็ว และ 2) อีเจ็ทเตอร์ แบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ ทางเข้าสารทุติยภูมิ (secondary inlet) ,ห้องผสม(mixing chamber), บริเวณพื้นที่หน้าตัดคงที่ (throat) และ ท่อกระจายตัว (diffuser) ซึ่งองค์ประกอบรูปร่างของอีเจ็ทเตอร์และตำแหน่งการวางตัวของหัวฉีดจะมีผลต่อประสิทธิภาพของอีเจ็ทเตอร์

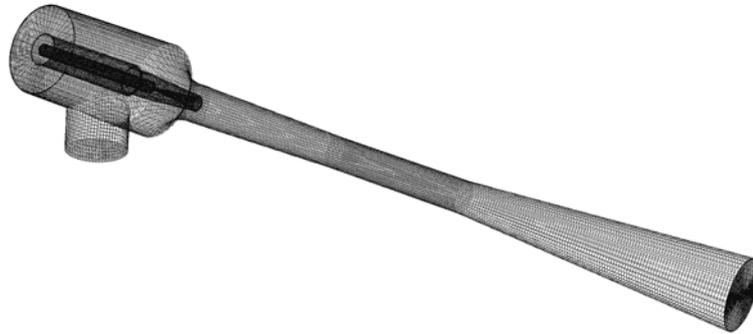
การจำลองปรากฏการณ์การไหลและตรวจสอบสมรรถนะของอีเจ็ทเตอร์จะทำการคำนวณโดยใช้โปรแกรม FLUENT ใช้ขนาดรูปร่างอีเจ็ทเตอร์ตามเอกสารอ้างอิง (Chunnanond, K *et al.*, 2004) โดยจำลองเป็นแบบสมมาตรในแนวแกน (axis symmetry) ใช้กริดสี่เหลี่ยม ประมาณ 48,000 โหนด และจะเพิ่มความหนาแน่นของ กริดที่บริเวณช่วงที่ของไหลทั้งสองชนิดผสมกันแสดงดังรูปที่ 4 แบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้เป็น $k-\epsilon$ แบบ realizable ระเบียบวิธีแก้ปัญหาคาร์ไหลบริเวณใกล้ผนัง (Near-wall treatment) เป็นแบบจำลองมาตรฐาน (standard near wall function) ใช้ couple-implicit เป็นลำดับขั้นตอนการแก้ปัญหา กำหนดเงื่อนไขขอบเขตทางเข้าและทางออกเป็น pressure inlet และ pressure outlet ตามลำดับ อีกทั้งเพิ่มการคำนวณในส่วนของการผสมพลังงาน (energy equation) นอกจากนี้แล้วยังได้จำลองรูปร่างอีเจ็ทเตอร์ใน 3 มิติ ซึ่งใช้กริด hexahedral จำนวนประมาณ 5,000,000 โหนด แสดงดังรูปที่ 5 เพื่อการศึกษาผลกระทบของการไหลในมิติที่ 3 และผลของท่อดูดที่มีต่อสมรรถนะของอีเจ็ทเตอร์

สมบัติของของไหลกำหนดเป็น ก๊าซอุดมคติ (ideal gases) เนื่องจากอีเจ็ทเตอร์มีความดันภายในต่ำและการไหลเป็นแบบยุบตัวได้ อีกทั้งสารจากเครื่องกำเนิดไอมีสถานะเป็นไอคงสูง โดยความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกับความดัน แสดงตามสมการที่ (2) โดย P_{op} คือ ความดันที่ทำงานหรือ ความดันอ้างอิง ρ ที่นี้กำหนดเป็นค่าให้เป็น 0

$$\rho = \frac{P_{op} + P}{RT} \quad (2)$$



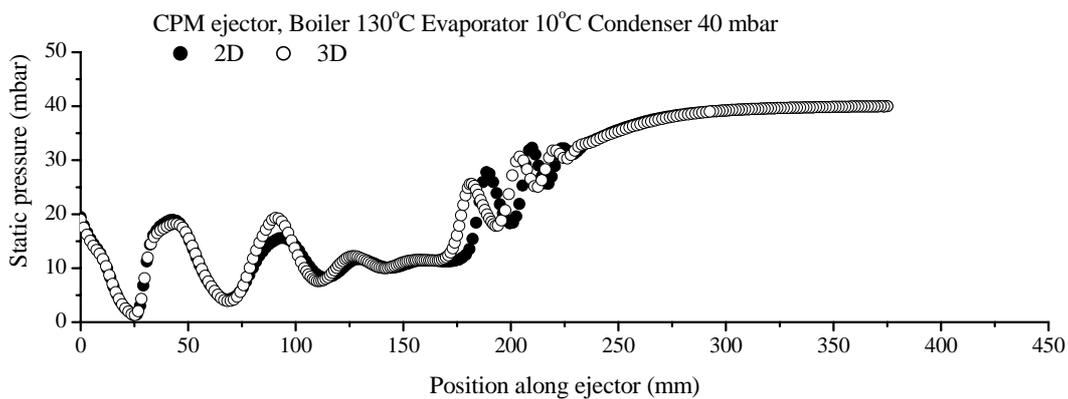
รูปที่ 4 รูปร่างแบบสมมาตรในแนวแกน และ กริดของแบบจำลองอีเจ็ทเตอร์ใน CFD



รูปที่ 5 รูปร่าง 3D และ กริดของแบบจำลองอีเจ็กเตอร์ใน CFD

ยืนยันผลระหว่างแบบจำลองใน 2 มิติ และ 3 มิติ

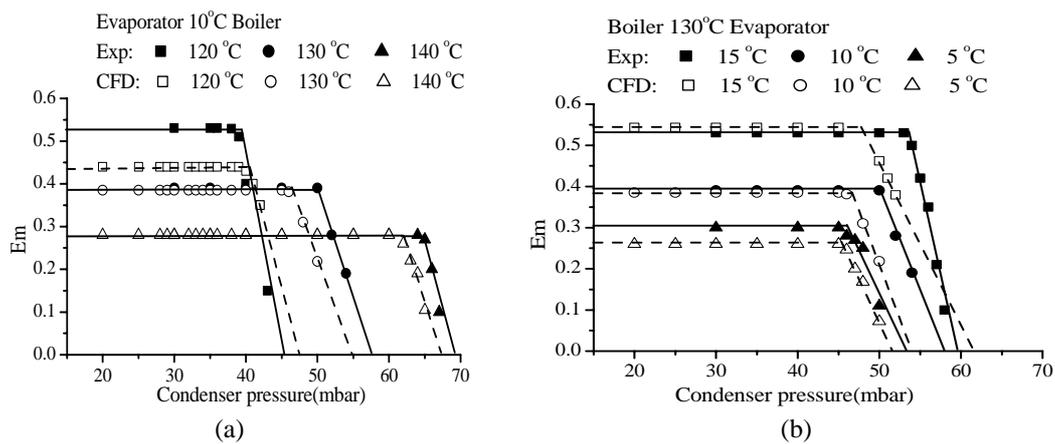
จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่กล่าวไว้ในหัวข้อข้างต้นนำมาคำนวณปรากฏการณ์การไหลในอีเจ็กเตอร์ที่รูปร่างแบบสมมาตรในแนวแกน และ 3 มิติ โดยขนาดของอีเจ็กเตอร์ที่ใช้ในการจำลองนั้นเป็นแบบ CPM ซึ่งให้ผลเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 6 เมื่อเปรียบเทียบความดันสถิตตามแนวแกน (เริ่มจากปากทางออกของ nozzle) พบว่า ทั้งสองแบบจำลองให้ผลที่ไม่ต่างกัน ค่าความดันต่ำที่สุดจะอยู่ประมาณ 1 mbar และจะเพิ่มขึ้นแบบสั้น (fluctuation) ตาม shock train จนถึงที่ทางเข้าท่อกระจายตัว การสั้นของค่าความดันจะหยุด แต่ความดันก็ยังคงเพิ่มขึ้นจนเท่ากับความดันที่ทางออกของอีเจ็กเตอร์ ซึ่งผลของแบบจำลองทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น shock train จะมีรูปร่างคล้ายกัน นั้นหมายถึง พื้นที่ประสิทธิภาพ ของทั้งสองแบบจำลองจะให้ค่าใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าในรูปร่าง 3 มิติ จะมีท่อดูดต่อเข้ามา ก็ไม่มีผลต่อรูปแบบการไหล และ ต้องใช้เวลาคำนวณในคอมพิวเตอร์มากกว่าแบบสมมาตรในแนวแกน ดังนั้น การศึกษาลักษณะการไหลและคาดคะเนสมรรถนะของอีเจ็กเตอร์ จึงใช้แบบจำลองรูปร่างแบบสมมาตรในแนวแกน เป็นหลัก



รูปที่ 6 เปรียบเทียบผลการคำนวณของแบบจำลองใน 2 มิติ (แบบสมมาตรในแนวแกน) และ 3 มิติ

การยืนยันผลระหว่างแบบจำลองเชิงตัวเลขกับผลการทดลอง

การศึกษาเปรียบเทียบพบว่าผลของ CFD และผลการทดลองนั้นให้ค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งยืนยันได้ว่า CFD สามารถนำมาเป็นเครื่องมือช่วยในการศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับอีเจ็คเตอร์ Chunnanond, K. (Chunnanord, K. *et al.*, 2005) ได้เปรียบเทียบผลของ CFD และ ผลการทดลอง โดยศึกษาผลกระทบ ความดันของเครื่องควบแน่น อุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ และ เครื่องระเหย ที่มีต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ดังแสดงผล ดังรูปที่ 7 พบว่า ค่า E_m และ CBP มีค่าคาดเคลื่อนโดยค่าเฉลี่ยประมาณ 10% และ 6% ตามลำดับ จากข้อยืนยันนี้ทำให้เรามั่นใจได้ว่า CFD สามารถนำมาเป็นเครื่องมือสำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในอีเจ็คเตอร์ จากรูปที่ 7 เมื่อเราเพิ่มความดันและอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ จะทำให้อีเจ็คเตอร์สามารถทำความดันได้มากขึ้นแต่จะเหนี่ยวนำสารได้น้อยลง ถ้าเพิ่มความดันของเครื่องระเหย อีเจ็คเตอร์จะเหนี่ยวนำสารได้มากขึ้น อีกทั้งยังทำความดันได้มากขึ้นด้วย โดยทั้งการทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลขก็ให้แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงเหมือนกัน



รูปที่ 7 เปรียบเทียบผลของ CFD กับ การทดลองที่เงื่อนไขการทำงานของ (a) เครื่องกำเนิดไอ และ (b) เครื่องระเหย

ผลการศึกษา

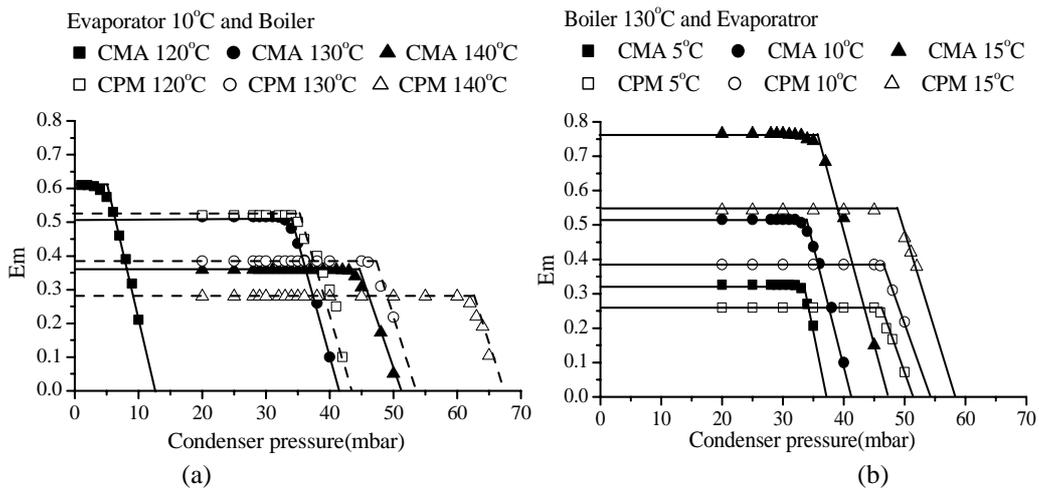
เนื่องจากอีเจ็คเตอร์เป็นอุปกรณ์สำคัญในระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ เพราะเป็นอุปกรณ์ที่กำหนดอัตราการไหลของสารทำความเย็นที่ผ่านเครื่องระเหย และความดันของเครื่องควบแน่น ด้วยเหตุนี้เราจึงได้ทำการศึกษาวารามิเตอร์ต่างๆที่มีต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ โดยทำการศึกษากับอีเจ็คเตอร์แบบ CPM และ CMA

ผลกระทบต่อเงื่อนไขการทำงาน

จากหัวข้อที่ผ่านมาแสดงให้เห็นแล้วว่าผลของเงื่อนไขการทำงานในระบบทำความเย็นจะมีต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์แตกต่างกันไป สภาวะการทำงานเครื่องกำเนิดไอ จะส่งผลต่อค่า E_m และ CBP

หากความดันสูงขึ้นอีเจ็คเตอร์จะมีค่า E_m ลดลงแต่จุด CBP จะสูงขึ้น สภาวะการทำงานของเครื่องระเหย จะมีผลต่อการทำงานของอีเจ็คเตอร์เช่นเดียวกับเครื่องกำเนิดไอ แต่เมื่อความดันและอุณหภูมิของเครื่องระเหยเพิ่มขึ้นอีเจ็คเตอร์จะมีค่า E_m และ CBP สูงขึ้น ซึ่งแปรผันตามกัน อิทธิพลจากสภาวะการทำงานของเครื่องกำเนิดไอกับอีเจ็คเตอร์ทั้งสองประเภทเหมือนกัน อีเจ็คเตอร์แบบ CMA จะมีความสามารถเหนี่ยวนำสาร (E_m) ได้ดีกว่าแบบ CPM แต่อีเจ็คเตอร์แบบ CMA สามารถทำความดันได้ดีกว่าแบบ CPM สังเกตได้จากรูปที่ 8 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_m กับความดันที่ทางออกของอีเจ็คเตอร์หรือความดันเครื่องควบแน่นที่ค่าต่างๆ ตามเงื่อนไขการทำงานของเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหย

จากรูปที่ 8(a) จะเห็นว่า การเพิ่มความดันหรืออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอจะส่งผลต่อการเพิ่มหรือลดความสามารถในการเหนี่ยวนำสารและทำความดันของอีเจ็คเตอร์ ซึ่งทั้งสองค่าจะผกผันกันตามการเปลี่ยนแปลงสภาวะของเครื่องกำเนิดไอ ด้วยเหตุนี้ทำให้เราเข้าใจได้มากขึ้นว่ารูปร่างของมุมขยายตัวที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์จะมีผลต่อความสามารถในการเหนี่ยวนำสารและทำความดันของอีเจ็คเตอร์โดยตรง ในทำนองคล้ายกัน จากรูปที่ 8(b) แสดงให้เห็นสภาวะของเครื่องระเหยที่มีต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ ซึ่งให้ผลในทางกลับกันกับเครื่องกำเนิดไอ



รูปที่ 8 ผลกระทบของเงื่อนไขการทำงานที่มีต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์

(a) เครื่องกำเนิดไอ (b) เครื่องระเหย

ผลกระทบจากรูปร่างของอีเจ็คเตอร์

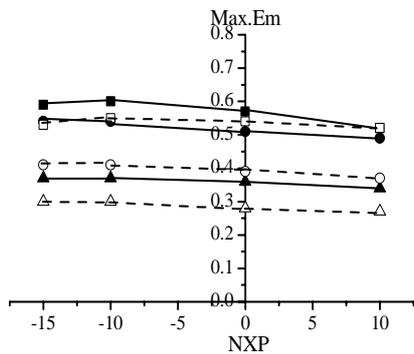
ผลกระทบของ NXP ต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์

ในการศึกษาผลกระทบของตำแหน่งปากทางออกของหัวฉีด (NXP) จะทำการจำลองการไหลและคาดการณ์สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ทั้งสองประเภทตามเงื่อนไขการทำงานต่างๆ เช่น ผลกระทบของเครื่องกำเนิดไอ เครื่องระเหย และเครื่องควบแน่น รูปที่ 9 แสดงผลกระทบของเครื่องกำเนิดไอที่ตำแหน่งหัวฉีด (Nozzle Exit Position, NXP) ค่าต่างๆ ที่มีต่อการเหนี่ยวนำสูงสุด (Maximum entrainment ratio, Max. E_m) พบว่าเมื่อถอยหัวฉีดออกจากทางเข้าห้องผสมทำให้อีเจ็คเตอร์สามารถ

เหนี่ยวนำสารไต้มากขึ้นแต่ถ้าถ้อยออกมากเกินไปค่านี้จะลดลง การถอยหัวฉีดออกห่างห้องผสมจะทำให้พื้นที่ประสิทธิภาพ มีขนาดโตขึ้น แต่จะทำให้โมเมนต์ของการไหลลดลง ดังนั้นการถอยหัวฉีดห่างมากเกินไป E_m จึงลดลง ด้วยเหตุนี้การเลื่อนตำแหน่ง NXP จึงต้องคำนึงถึงความเหมาะสมและจำเป็นต้องทดสอบก่อนหากต้องการได้อีเจ็คเตอร์ที่มีสมรรถนะสูง ซึ่ง CFD ก็สามารถช่วยแก้ปัญหาในข้อนี้ได้

Evaporator 10°C Boiler

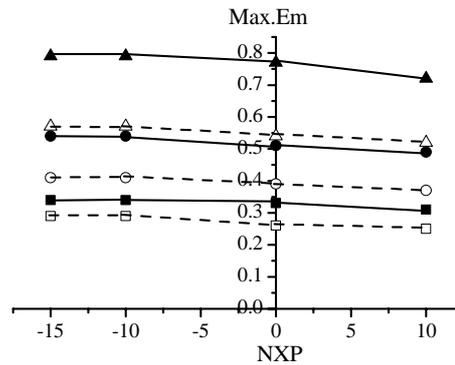
■ CMA 120°C ● CMA 130°C ▲ CMA 140°C
□ CPM 120°C ○ CPM 130°C △ CPM 140°C



(a)

Boiler 130°C Evaporator

■ CMA 5°C ● CMA 10°C ▲ CMA 15°C
□ CPM 5°C ○ CPM 10°C △ CPM 15°C



(b)

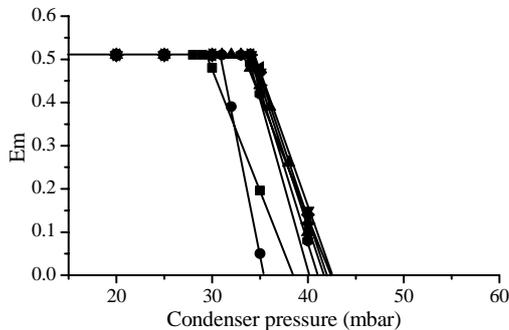
รูปที่ 9 ผลกระทบของตำแหน่งหัวฉีดที่มีต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์

(a) เครื่องกำเนิดไอ (b) เครื่องระเหย

ผลกระทบของความยาว Throat ต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์

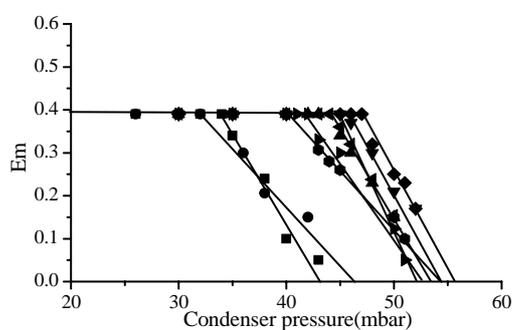
รูปร่างอีเจ็คเตอร์ที่สำหรับการศึกษาอิทธิพลของความยาวบริเวณพื้นที่หน้าตัดคงที่ (TL) มีค่า NXP = 0 mm และ ความยาวของห้องผสม = 125 mm ตามรูปที่ 4 ใช้กับอีเจ็คเตอร์ทั้งสองรูปร่าง คืออีเจ็คเตอร์แบบ CPM และ CMA โดยทดสอบผลกระทบเช่นเดียวกับหัวข้อที่ผ่านมา

CMA Ejector Boiler 130°C and Evaporator 10°C
Throat length, TL-125 (mm) ■ 40 ● 80 ▲ 95
▼ 120 ◆ 160 ◀ 180 ▶ 200 ● 220



(a)

CPM Ejector Boiler 130°C and Evaporator 10°C
Throat length, TL(mm) ■ 10 ● 40 ▲ 70
▼ 95 ◆ 130 ◀ 160 ▶ 190 ● 220

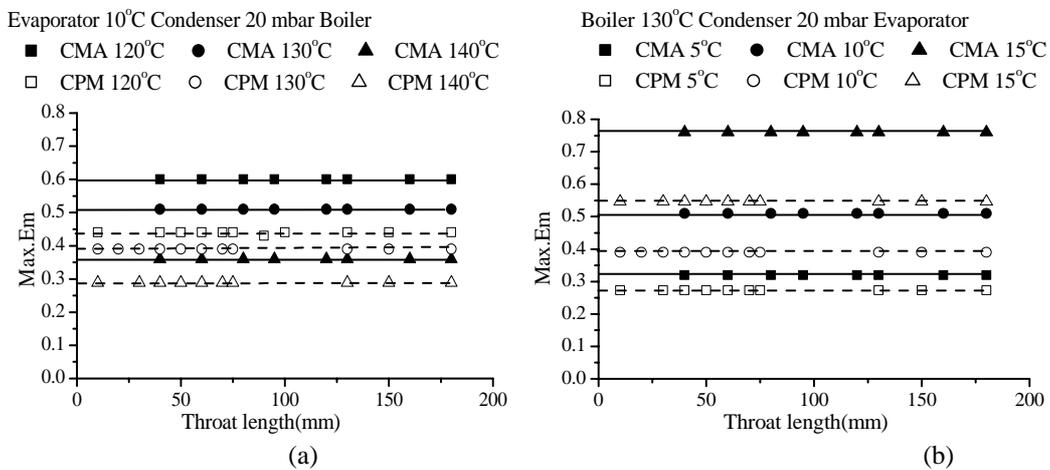


(b)

รูปที่ 10 ผลกระทบของความยาว throat ที่มีต่อความสามารถทำความดันของอีเจ็คเตอร์

(a) CMA (b) CPM

จากรูปที่ 10 แสดงผลกระทบของ TL ต่อสมรรถนะอีเจ็คเตอร์ที่เงื่อนไขการทำงานต่างๆ พบว่าเมื่อ TL ยาวมากขึ้น จุด CBP จะเพิ่มขึ้นแต่ความสามารถในการเหนี่ยวนำจะคงที่ จากรูปที่ 10 (a) อีเจ็คเตอร์แบบ CMA ให้ ค่า TL-125 ที่ให้ค่า CBP สูงสุดอยู่ที่ประมาณ 95-120 mm. และ จากรูปที่ 10(b) พบว่า TL อยู่ที่ประมาณ 130 mm. ที่ทำให้ CPM มีค่า CBP สูงสุด ซึ่งหากค่า TL เกินค่าเหล่านี้ไป CBP จะลดลง รูปที่ 11 และ 12 แสดงอิทธิพล ของ TL และ สภาวะเงื่อนไขที่มีต่อค่า Max.E_m ที่อีเจ็คเตอร์ทำได้ พบว่าการเพิ่มค่า TL จะไม่ทำให้ค่า E_m เปลี่ยนแปลง ทำให้ยืนยันได้ว่า TL จะไม่ส่งผลให้อีเจ็คเตอร์เหนี่ยวนำสารเปลี่ยนแปลง



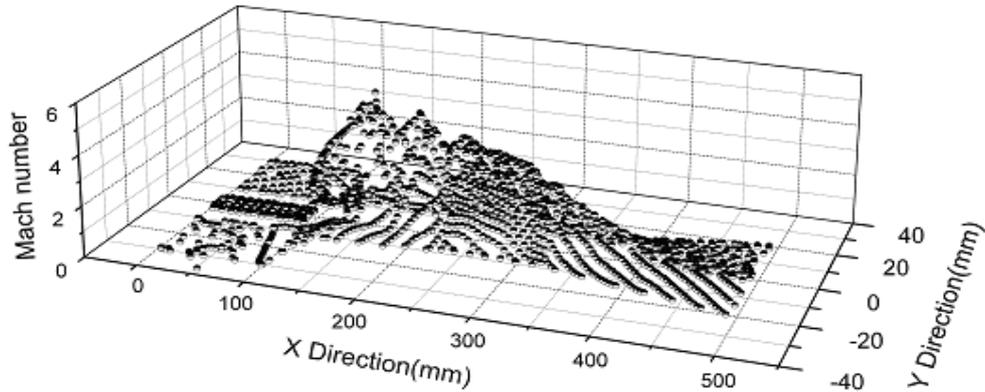
รูปที่ 11 ผลกระทบของความยาว TL ที่มีต่อค่า E_m สูงสุดของอีเจ็คเตอร์
(a) เครื่องกำเนิดไอ (b) เครื่องระเหย

จากการศึกษาข้างต้นทำให้เราทราบถึงผลกระทบต่างๆที่มีต่ออีเจ็คเตอร์ ทั้งที่เกิดจากสภาวะการทำงานและรูปร่างของอีเจ็คเตอร์เอง โดยใช้ CFD เป็นเครื่องมือช่วยคาดคะเนสมรรถนะ ตามเงื่อนไขต่างๆ ทำให้เราเข้าใจผลต่างเหล่านั้นมากขึ้น นอกจากนี้แล้วผลที่ได้จาก CFD ทำให้เราทราบได้ว่าปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์เป็นอย่างไร ในลำดับต่อไปเราจะได้นำผลดังกล่าวมาวิเคราะห์และวิจารณ์ผลกับสิ่งที่เกิดขึ้นโดยเชื่อมโยงกับการเปลี่ยนแปลงสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ ตามพารามิเตอร์ต่างๆ

อภิปรายผลการศึกษา

ปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้นในอีเจ็คเตอร์

การสามารถมองเห็นภาพปรากฏการณ์ไหลที่เกิดขึ้นกับอีเจ็คเตอร์ ถือเป็นข้อได้เปรียบของผลที่ได้จาก CFD ซึ่งจะช่วยให้เราสามารถเข้าใจผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีต่ออีเจ็คเตอร์ได้มากขึ้น



รูปที่ 12 เลขมัค ของอีเจ็คเตอร์ในระบบแกน 3 มิติ

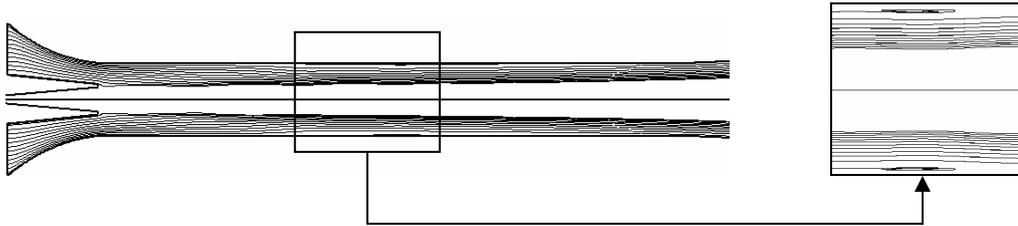
รูปที่ 12 แสดงกราฟ 3 มิติของเลขมัค (Mach number) ที่ ตำแหน่งแกน X และ Y ของอีเจ็คเตอร์โดยเป็นเงื่อนไขการทำงานที่ เครื่องกำเนิดไอน์มีอุณหภูมิ 130°C , เครื่องระเหยมีอุณหภูมิ 10°C และความดันของเครื่องควบแน่น 30 mbar จากกราฟพบว่า ความเร็วอีเจ็คเตอร์จะสูงพร้อมกับการสลับสูงต่ำจนสังเกตเห็นได้ชัด ที่บริเวณเส้นแกนและ ปากทางออกของหัวฉีด และจะลดลงเรื่อยๆ เมื่ออยู่ใกล้บริเวณผนังและปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ นอกจากนี้ยังพบว่า ความเร็วที่บริเวณท่อสุดมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับที่บริเวณภายในอีเจ็คเตอร์ ดังนั้นเราสามารถสมมติได้ว่าความเร็วของสารทำงานเกือบหยุดนิ่ง ก่อนที่จะเข้าห้องผสมของอีเจ็คเตอร์ ความแตกต่างระหว่างความเร็วของสารระหว่างบริเวณใกล้ผนังกับแกนกลาง ทำให้ในช่วงแรกสารทั้งสองแยกชั้นไหลกันอย่างชัดเจนที่บริเวณห้องผสม สารความเร็วสูงจะเสมือนเป็นผนังของท่อที่ดูดให้สารทุติยภูมิเกิดปรากฏการณ์ choking

ความเร็วที่ท่อสุดเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณห้องผสมจนถึงปากทางออกของอีเจ็คเตอร์มีค่าต่ำกว่ามาก ทำให้ลักษณะรูปร่างของท่อสุด มีผลต่อการไหลและการเปลี่ยนแปลงสมบัติการไหลโดยรวม น้อยมาก ด้วยเหตุนี้เองผลของการจำลองการไหลแบบ แบบสมมาตรในแนวแกน (ไม่รวมท่อสุด) กับ 3 มิติ ให้ผลใกล้เคียงกัน เนื่องจากความเร็วสารต่ำมากๆ ความหนืดของสารจึงมีค่าน้อย ทำให้รูปร่างการไหลไม่แตกต่างกัน ดังนั้นการจำลองการไหลรูปร่างแบบสมมาตรในแนวแกน สำหรับอีเจ็คเตอร์ จึงน่าจะเพียงพอแล้ว

การไหลย้อนกลับที่สภาวะความดันที่ปากทางออกสูง

การศึกษาปรากฏการณ์การไหลในอีเจ็คเตอร์โดยทั่วไปแล้วเราจะพยายามทำความเข้าใจในช่วงการออกแบบ (on design conditions) ซึ่งเป็นช่วงที่ค่า E_m คงที่เมื่อความดันปากทางออก (back pressure) เพิ่มขึ้นโดยไม่เกินจุด CBP แต่อย่างไรก็ตามการทราบถึงปรากฏการณ์นอกช่วงการออกแบบ (off design condition) จะทำให้เราเข้าใจปรากฏการณ์ในอีเจ็คเตอร์ได้ดียิ่งขึ้น

รูปที่ 13 แสดงลายเส้นการไหล (path line) ของสารปฐมภูมิที่ความดันปากทางออกอยู่ในช่วงนอกการออกแบบของอีเจ็คเตอร์แบบ CMA จะเห็นได้ว่าสารทุติยภูมิจะเกิดการไหลย้อนกลับ (reverse flow) หลังตำแหน่งของพื้นที่ประสิทธิผล ทำให้สารทุติยภูมิที่ถูกเหนี่ยวนำเผชิญกับการสูญเสียพลังงานการไหลที่บริเวณดังกล่าว ทำให้อัตราการไหลลดลง (ค่า E_m ลดลง)

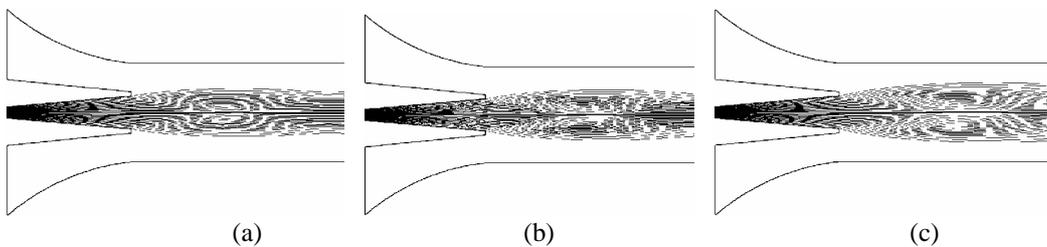


รูปที่ 13 ลายเส้นแสดงการไหลที่เกิดขึ้นเมื่อความดันของเครื่องควมแน่นสูงขึ้น

โดยปกติแล้ว การเกิดการไหลย้อนกลับ จะเกิดขึ้นอยู่แล้วในอีเจ็คเตอร์บริเวณท่อกระจายตัวเพื่อลดความเร็ว และทำความดันให้ได้เท่ากับที่ปากทางออก แต่การที่การไหลย้อนกลับเกิดที่ห้องผสม หรือ throat จะทำให้การเหนี่ยวนำสารของอีเจ็คเตอร์ลดลงเพราะการสูญเสียพลังงานไปกับการไหลวนนั่นเอง จากเหตุดังกล่าวทำให้เราต้องใส่ใจกับการเกิดการไหลย้อนกลับ ในการออกแบบรูปร่างอีเจ็คเตอร์ ซึ่งไม่ควรให้เกิดขึ้น บริเวณที่กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งในทางปฏิบัติก็เป็นไปได้ยากมากที่จะทราบได้ ดังนั้นการนำ CFD เข้ามาช่วยจึงเป็นทางออกของการแก้ปัญหานี้ได้เป็นอย่างดี

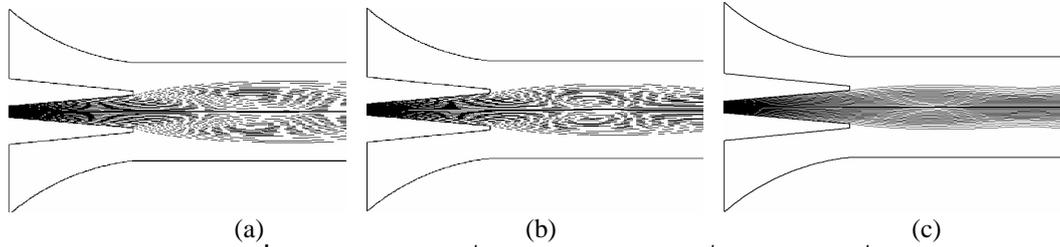
ผลของพื้นที่ประสิทธิผล ที่มีต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์

ผลที่แสดงได้ใน CFD ทำให้เราเข้าใจสิ่งที่เกิดขึ้นในอีเจ็คเตอร์ขณะของไหลวิ่งผ่านได้มากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะการเกิดพื้นที่ประสิทธิผล (แสดงดังรูปที่ 3) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์สำคัญ ที่บ่งชี้สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ และ ยังเป็นข้อถกเถียงกันอย่างกว้างขวางในปัจจุบันถึงปัจจัยต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการเกิดพื้นที่ประสิทธิผล โดยผล CFD สามารถแสดงให้เห็น ลายเส้นการไหล ของสารปฐมภูมิ ซึ่งเสมือนขอบของท่อสุดที่เหนี่ยวนำสารทุติยภูมิ จากผลของ CFD ทำให้เราทราบว่าพื้นที่ประสิทธิผลจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการทำงานของอีเจ็คเตอร์ ทั้งที่ทางเข้าหัวฉีดและท่อสุด รูปที่ 14 และ 15 แสดงมุมมองขยายตัวของ jet-core บริเวณปากหัวฉีด ที่สภาวะของเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหยต่างๆ ตามลำดับ



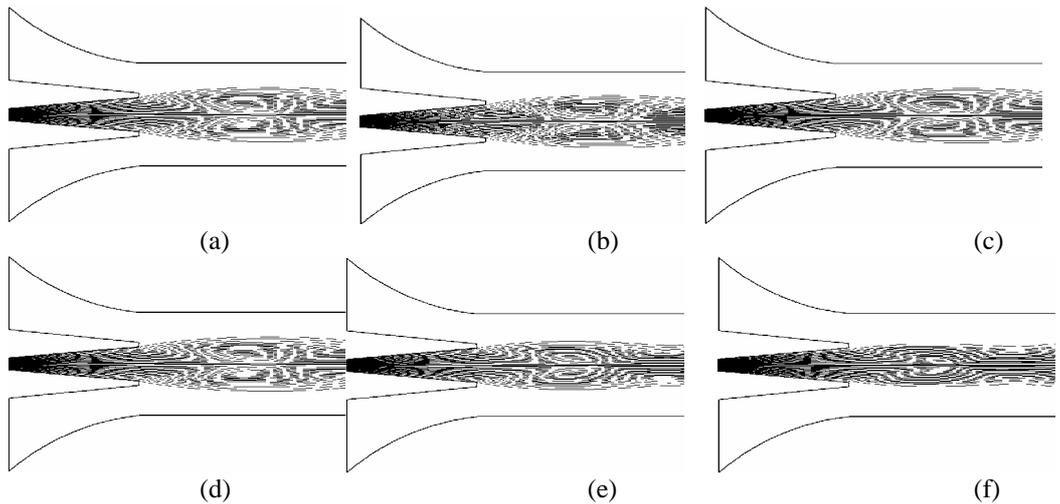
รูปที่ 14 รูปร่าง jet-core ที่ปากทางออกของหัวฉีดที่อุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ

(a) 120°C, (b) 130°C และ (c) 140°C



รูปที่ 15 รูปร่าง jet-core ที่ปากทางออกของหัวฉีดที่อุณหภูมิของเครื่องระเหย
(a) 5°C, (b) 10°C และ (c) 15°C

จากรูปที่ 14 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิหรือความดันที่ทางเข้าหัวฉีดมีค่ามากขนาดของ มุม ขยายตัว มีขนาดโตขึ้น สังเกตที่ขนาดของรูปร่าง jet-core ที่อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอที่ค่า 140°C (รูป 14 (c) มีขนาดโตกว่าที่อุณหภูมิ 120°C ด้วยเห็นนี้ พื้นที่ประสิทธิผลจึงมีขนาดเล็กกว่า ทำให้เห็นยวน่าสาร ทุติยภูมิได้น้อย อย่างไรก็ตามเมื่อความดันของสารปฐมภูมิมีค่าสูง โมเมนตัมของการไหลจะมีมาก ความดันที่อีเจกเตอร์ทำได้จึงมีค่าสูงตามด้วย ดังผลใน รูปที่ 8 (a) รูปที่ 15 แสดงภาพความสัมพันธ์ระหว่าง สภาวะของที่ทางเข้าของสารทุติยภูมิกับขนาดของ jet-core ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิหรือความดันของสาร ที่มาจากเครื่องระเหยมีค่าสูงขนาดของมุมขยายตัว จะมีขนาดเล็กส่งผลต่อการเห็นยวน่าสารได้ดีขึ้น นอกจากนี้แล้วการเพิ่มความดันของสารทุติยภูมิให้สูงขึ้น ทำให้อีเจกเตอร์สามารถทำความดันได้สูงขึ้น ตามด้วย ดังเห็นได้จากรูปที่ 8 (b) จากรูปที่ 14 และ 15 ทำให้เรารู้และเข้าใจได้ ว่าเงื่อนไขการทำงาน ของทางเข้าอีเจกเตอร์ จะส่งผลต่อขนาดของพื้นที่ประสิทธิผล และ สมรรถนะของอีเจกเตอร์ โดยตรง



รูปที่ 16 รูปร่าง jet core ที่ปากทางออกของหัวฉีดที่ความดันของเครื่องควบแน่น
(a) 20 mbar , (b) 25 mbar , (c) 30 mbar, (d) 35 mbar(CBP), (e) 38 mbar และ (f) 40 mbar

เมื่อเราทำการศึกษาผลกระทบของสภาวะที่ปากทางออกของฮีเจ็คเตอร์ (back pressure) ดังแสดงในรูปที่ 16 ซึ่งแสดงผลความดันของเครื่องควบแน่น เพิ่มขึ้นในช่วงการออกแบบ ก่อนจุด CBP ขนาดของมุมขยายตัวจะไม่มีเปลี่ยนแปลง ด้วยเหตุนี้ค่า E_m ของฮีเจ็คเตอร์จึงมีค่าคงที่ ในช่วงความดันนี้ แต่เมื่อเพิ่มขึ้นเลขจุด CBP ค่า E_m จะเปลี่ยนแปลงตามความดันนั้น ซึ่งพื้นที่ประสิทธิภาพ จะมีขนาดโตขึ้น แต่ไม่ทำให้ฮีเจ็คเตอร์สามารถเหนี่ยวนำสารได้มากขึ้นเพราะการสูญเสียพลังงานของการไหล

จากข้อมูลและเหตุผลด้านบนทำให้เราเข้าใจได้ว่า ที่เงื่อนไขการออกแบบ (ก่อนจุด CBP) เงื่อนไขการทำงานของฮีเจ็คเตอร์ที่ทางเข้า จะส่งผลต่อขนาดของพื้นที่ประสิทธิภาพ โดยจะไม่ขึ้นกับความดันที่ปากทางออกเลย แต่อย่างไรก็ตามเมื่อความดันปากทางออกมีค่าเกินจุด CBP ความดันที่ปากทางออกจะมีผลต่อค่า E_m ให้ลดลง เพราะการสูญเสียพลังงานสำหรับการไหลวน แม้ว่าขนาดของพื้นที่ประสิทธิภาพ จะโตขึ้นก็ตาม

ผลของกระบวนการที่เกิดในห้องผสมที่มีต่อสมรรถนะของฮีเจ็คเตอร์

การผสมกันระหว่างสารทุติยภูมิกับปฐมภูมิ เป็นกระบวนการส่งถ่ายพลังงานโมเมนตัมระหว่างทั้งสองสารผ่านชั้น (layer) ของของไหล ซึ่งประสิทธิภาพของกระบวนการ จะมีผลกับความดันที่ฮีเจ็คเตอร์ทำได้ โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 อย่างก็คือ อันที่ 1 ขนาดของห้องผสมหากขนาดห้องผสมมีขนาดโตมากเกิดไปการถ่ายเทพลังงานระหว่างชั้นของไหลจะไม่ทั่วถึง เห็นได้จากที่ ฮีเจ็คเตอร์แบบ CPM จะสามารถทำความดันได้สูงกว่าแบบ CMA เพราะขนาดของห้องผสมที่เล็กกว่า แต่อย่างไรก็ตามการที่ห้องผสมมีขนาดเล็กเกินไปจะทำให้พื้นที่ประสิทธิภาพ มีขนาดเล็ก ค่า E_m จึงมีค่าน้อยลง ปัจจัยที่ 2 คือระยะเวลาของการถ่ายเทพลังงานระหว่างสองสาร หากมีเวลาเพียงพอ การถ่ายเทพลังงานจะสมบูรณ์มากกว่าที่ระยะเวลาสั้นๆ ยืนยันได้ผลจากการเปลี่ยนแปลงค่า TL ที่มีต่อสมรรถนะของฮีเจ็คเตอร์ ในรูปที่ 10 และ 11 ซึ่ง TL จะทำให้ฮีเจ็คเตอร์ทำความดันได้สูงขึ้น แต่ไม่มีผลต่อพื้นที่ประสิทธิภาพ เพราะค่า E_m คงที่ อย่างไรก็ตามการเพิ่มความยาวมากเกินไปจะเป็นการเพิ่มการสูญเสียพลังงานของการไหลได้เช่นกัน ดังนั้นหากยาวมากเกินไปความดันที่ฮีเจ็คเตอร์ทำได้อาจตกลงได้เช่นกัน

สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้ เราได้นำเอาระเบียบวิธีการทางตัวเลขสำหรับการไหล เข้ามาช่วยศึกษาพฤติกรรม การไหลที่เกิดขึ้นกับฮีเจ็คเตอร์ โดยทำการจำลองรูปร่างแบบ แบบสมมาตรในแนวแกน และ 3 มิติ ที่คิดรูปร่างของท่อด้วย พบว่าท่อชุดมีผลกับรูปแบบการไหลในฮีเจ็คเตอร์น้อยมาก เนื่องจาก ผลของทั้งสองแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกัน CFD ทำให้เราเห็นภาพปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นทำได้ยากในการทดลองจริง ทำให้เราได้เห็นอิทธิพลของเงื่อนไขการทำงานที่มีต่อการเกิดพื้นที่ประสิทธิภาพซึ่งเกี่ยวข้องกับสมรรถนะฮีเจ็คเตอร์โดยตรง นอกจากนี้แล้วเรายังสามารถใช้ CFD ช่วยในการคาดคะเนสมรรถนะของฮีเจ็คเตอร์ได้เนื่องจากผลของการทดลองกับผล CFD ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ผลการศึกษาที่ได้สามารถใช้เป็นข้อมูล เพื่อการออกแบบฮีเจ็คเตอร์ให้เหมาะสมกับสภาวะการทำงานให้ดีที่สุดอีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

- Chunnanond, K. 2005. "A study of steam ejector refrigeration cycle, parameters affecting performance of ejector". **Ph.D. Thesis**, Sirindhorn International Institute of Technology University Thailand
- Chunnanond. K. and Aphornratana, S. 2004. "An experimental investigation of a steam ejector refrigerator: the analysis of the pressure profile along the ejector". **Applied Thermal and Energy**, 24:311-322.
- Keenan, J.H. and Neumann, E.P. 1942. "A simple air ejector". **Transactions of the ASME. Journal of Mechanics**. 64:75-81.
- Keenan , J.H., Neumann, E.P. and Lustwerk. 1950. "An investigation of ejector design by analysis and experiment" **Transactions of the ASME. Journal of Mechanics**. 72 : 299-309.
- Munday, J.T. and Bagster, D.F. 1997 . "A new theory applied to steam jet refrigeration". **Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development**.16(4) : 442-449.
- Riffat, S.B. and Omer, S.A. 2001. "CFD modeling and experimental investigation of an ejector refrigeration system using methanol as the working fluid". **International Journal of Energy Research**. 25:115 -128.
- Rusly, E., Lu Aye., Charters, W.W.S., Ooi, A. and Pianthong, K. 2002. "Ejector CFD modelling with real gas model" **Proceedings of the 16th Annual conference of Mechanical Engineering Network Thailand**, Phuket, Thailand : Paper TF 136.
- Sehanam, W., Sahumin, K.,Pianthong, K. and Behnia, M. 2005. "Prediction of flow characteristic and performance of steam ejector in refrigeration cycle using CFD". **Proceedings of the 8th Asian Symposium on Visualization**, Chiangmai, Thailand : Paper 10.