

การศึกษาการไหลในอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด โดยใช้โปรแกรมจำลองการไหลเชิงตัวเลข

ณัฐ สุวรรณภูมิ¹⁾ ไกรวุฒิ อุทัยกรณ²⁾ ธนรัฐ ศรีวีระกุล³⁾ และ ศรัทธา อามรณรัตน์⁴⁾

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอ การศึกษาการไหลในอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด โดยใช้วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ช่วยวิเคราะห์ลักษณะของสารผสม และอธิบายพฤติกรรมของการไหล รวมทั้งคุณลักษณะของไหลในอีเจ็คเตอร์ ซึ่งรูปร่างของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้สร้างแบบจำลอง 2 มิติ (2D-Model) ในงานวิจัยเป็นแบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric) และใช้แบบจำลองความปั่นป่วนของการไหล Realizable k- ϵ ซึ่งมีสารทำความเย็น R141b เป็นสารทำงาน โดยในงานวิจัยนี้จะใช้การเปลี่ยนตำแหน่งของลิ้มผ่านหัวฉีดเพื่อปรับเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดของหัวฉีด ซึ่งเปรียบเสมือนการเปลี่ยนเส้นผ่าศูนย์กลางที่คอคอดของหัวฉีด ทำให้อีเจ็คเตอร์ทำงานได้หลากหลายขึ้น โดยกำหนดตำแหน่งต่างๆของลิ้มเป็นตำแหน่ง NTP (Needle Tip Position) และผลที่ได้จากการศึกษาจะนำไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์ต้นแบบ (Sriveerakul, 2008) พบว่าเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของลิ้ม (NTP) ที่ระยะ 0.5 และ 10 มิลลิเมตร โดยกำหนดให้อีเจ็คเตอร์ทำงานภายใต้เงื่อนไขเดียวกันกับอีเจ็คเตอร์ต้นแบบ ซึ่งมีอุณหภูมิทางเข้าปฐมภูมิ (T_p) เท่ากับ 100 °C และอุณหภูมิทางเข้าทุติยภูมิ (T_s) เท่ากับ 5 °C จะมีค่าสมรรถนะการเหนี่ยวนำ (Entrainment ratio, R_m) เท่ากับ 0.24 0.30 และ 0.52 และค่าความดันวิกฤต (Critical Back Pressure, CBP) ที่ 120.1 112.2 และ 84.5 kPa ตามลำดับ ซึ่งที่ตำแหน่ง NTP เท่ากับ 5 มิลลิเมตร จะให้ผลการจำลองการไหลที่ใกล้เคียงกับอีเจ็คเตอร์ต้นแบบ

คำสำคัญ: อีเจ็คเตอร์ ซี-เอฟ-ดี อาร์141บี

¹⁾ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี 34190
อีเมล: dokebi@hotmail.com

²⁾ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี 34190
อีเมล: tudcheegang@hotmail.com

³⁾ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี 34190
อีเมล: tsriveerakul@yahoo.com

⁴⁾ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
จังหวัดปทุมธานี 12121 อีเมล: satha@siit.tu.ac.th

* Corresponding Author

A study of flow in an ejector equipped with variable throat area of the primary nozzle using CFD simulation

Nat Suvarnakuta¹⁾ Kraiwut Uthaikorn²⁾ Thanarath Sriveerakul^{*3)} and Satha Aphornratana⁴⁾

Abstract

The aim of this research is to study a flow in an ejector equipped with variable throat area of the primary nozzle. Using a CFD technique, flow phenomena, mixing structure and performance of the ejector were analyzed and explained. In this study, a 2D-axisymmetric model was used. Realizable k-epsilon model was applied for a turbulence model. R141b was selected as a refrigerant fluid. Instead of changing the size of the throat diameter, variation of throat area of the primary nozzle was achieved by changing a wedge's position. The wedge's position or the needle tip position (NTP) is defined as a distance between a plane of needle's tip and a plane of the primary nozzle's throat. Results show that altering the needle tip position (NTP) affects the ejector's performance. For example, changing the NTP to 0, 5 and 10 mm., under the primary fluid saturated temperature of 100 °C and the secondary fluid saturated temperature of 5 °C, the entrainment ratio was subjected to increased from 0.24 to 0.30, and 0.52, respectively. While its critical back pressure (CBP) trend to reduce from 120.1 kPa to 112.2 kPa and 84.5 kPa. The results of this study were verified with a CFD simulation of a typical R141b ejector (Sriveerakul, 2008). A CFD simulation at 5 mm. of NTP presents a closest CFD result to the typical ejector (the ejector without a wedge).

Keywords: Ejector, CFD, R141b

¹⁾ Post graduated Students, Department of Mechanical Engineering, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani 34190, Corresponding Author, E-mail: dokebi_@hotmail.com

²⁾ Post graduated Students, Department of Mechanical Engineering, Ubon Ratchathani University, E-mail: tudcheegang@hotmail.com

^{*3)} Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani 34190, E-mail: tsriveerakul@yahoo.com

⁴⁾ Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University, Pathumthani 12121, E-mail: satha@siit.tu.ac.th

^{*} Corresponding Author

1. บทนำ

อีเจ็คเตอร์ คืออุปกรณ์สำหรับการถ่ายเทมวลสารโดยอาศัยหลักการของการเหนี่ยวนำ ซึ่งของไหลที่มีความเร็วสูงจะดูดมวลสารที่มีความเร็วต่ำกว่าให้เคลื่อนที่ตาม (Keenan and Neumann, 1942 และ Keenan et al, 1950) โดย Keenan และ Neumann เป็นนักวิจัยกลุ่มแรกที่ได้เสนอทฤษฎีการไหล 1 มิติในอีเจ็คเตอร์ ซึ่งในปัจจุบันนี้ได้มีการนำเอาหลักการการทำงานของอีเจ็คเตอร์ไปใช้ร่วมกับงานอื่นๆ หลายด้าน เช่น ในระบบทำความเย็น (Chunnanond and Aphornratana, 2004) กระบวนการอบแห้งแบบสุญญากาศ รวมทั้งการส่งอนุภาคของแข็งขนาดเล็ก โดยประสิทธิภาพการทำงานของอีเจ็คเตอร์นอกจากจะขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานของอีเจ็คเตอร์แล้ว (Aidoun and Ouzzane, 2004) ยังขึ้นอยู่กับรูปร่างของอีเจ็คเตอร์เองอีกด้วย (Aphornratana et al, 2001 และ Zhu et al, 2009) รวมทั้ง Area ratio (A) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดที่เล็กที่สุดของห้องผสมต่อพื้นที่หน้าตัดที่เล็กที่สุดของหัวฉีด จะมีผลอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพการทำงานของอีเจ็คเตอร์ (Yapici et al, 2008 และ Varga et al, 2009) โดยในการจะศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดของหัวฉีดนั้น จะทำโดยการเปลี่ยนแปลงหัวฉีดใหม่เข้าไปในระบบซึ่งจำเป็นจะต้องหยุดการทำงานของระบบแล้วจึงทำการเปลี่ยนหัวฉีด ดังนั้นจึงได้มีแนวความคิดที่จะออกแบบอีเจ็คเตอร์ที่มีหัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดได้แม้ในระหว่างที่ระบบกำลังทำงานอยู่ โดยคาดว่าแนวคิดดังกล่าวจะช่วยให้อีเจ็คเตอร์มีความยืดหยุ่นต่อสภาวะการทำงาน ซึ่งเมื่อสภาวะการทำงานเปลี่ยนก็สามารถปรับเปลี่ยนขนาดพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดของหัวฉีดให้สอดคล้องกับสภาวะการทำงานนั้นๆได้ เพื่อรักษาประสิทธิภาพการทำงานที่ดีที่สุดของอีเจ็คเตอร์ไว้ โดยคุณลักษณะที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของอีเจ็คเตอร์มี 2 อย่าง คือ 1) ค่าสมรรถนะการเหนี่ยวนำ (Entrainment ratio, Rm) และ 2) อัตราส่วนความดัน (Pressure Lift Ratio, PLR) โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

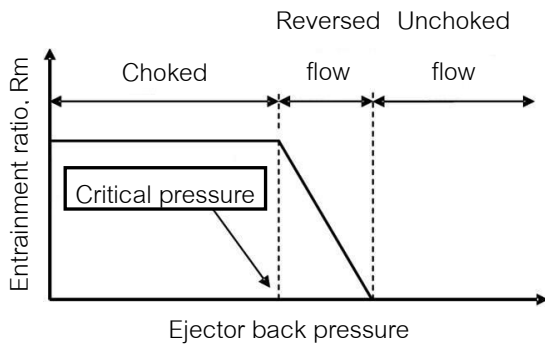
$$Rm = \frac{\text{อัตราการไหลเชิงมวลที่ทางเข้าทุติยภูมิ}}{\text{อัตราการไหลเชิงมวลที่ทางเข้าปฐมภูมิ}} \quad (1)$$

$$PLR = \frac{\text{ความดันสถิตที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์}}{\text{ความดันสถิตที่ทางเข้าทุติยภูมิ}} \quad (2)$$

ค่าสมรรถนะการเหนี่ยวนำ (Rm) ของอีเจ็คเตอร์นั้นจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของอีเจ็คเตอร์โดยตรง และอัตราส่วนความดัน (PLR) จะบ่งชี้ถึงข้อจำกัดในการทำความดัน ซึ่งในส่วนของ PLR สำหรับอีเจ็คเตอร์ที่ใช้ในระบบทำความเย็นมักนิยมใช้ตัวแปรที่อยู่ในรูปของความดันวิกฤต (Critical Back Pressure, CBP) ในการระบุค่าความดันสูงสุดที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ โดยปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของอีเจ็คเตอร์ คือ

1) สภาวะการทำงาน ซึ่งค่าสมรรถนะการเหนี่ยวนำของอีเจ็คเตอร์นั้นจะถูกจำกัดด้วยความดันจากปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ หรือค่าความดันวิกฤต ซึ่งเป็นค่าความดันที่สูงสุดที่อีเจ็คเตอร์สามารถทำงานได้โดยค่า Rm ไม่ลดลง นักวิจัยได้พยายามศึกษาอิทธิพลจากสภาวะการทำงานที่มีต่ออีเจ็คเตอร์โดยการทดลองเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความดันที่ทางเข้าปฐมภูมิและทางเข้าทุติยภูมิ รวมถึงที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ พบว่าเมื่อลดความดันที่ทางเข้าปฐมภูมิ หรือเพิ่มความดันที่ทางเข้าทุติยภูมิจะทำให้อีเจ็คเตอร์มีการเหนี่ยวนำสูงขึ้น โดยที่ความดันทางเข้าปฐมภูมิและความดันทางเข้าทุติยภูมิใดๆ ค่า Rm จะคงที่หากเพิ่มความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ให้สูงขึ้นโดยไม่เกินจุด CBP ซึ่งคุณลักษณะทั่วไปของอีเจ็คเตอร์จากรูปที่ 1 สามารถแบ่งคุณลักษณะของการไหลตามความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์เป็น 3 ช่วง คือ 1) Choked flow 2) Unchoked flow และ 3) Reversed flow กรณีความดันที่ปากทางออกต่ำกว่าจุด CBP การไหลจะอยู่ในช่วง Choked flow โดยค่า Rm จะคงที่ และถ้าความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์เกินจุด CBP การไหลจะอยู่ในช่วง Unchoked flow ซึ่งค่า Rm จะลดลงเมื่อเพิ่มความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์

แต่ถ้าหากความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์สูงมากเกินไปการไหลจะอยู่ในช่วง Reversed flow ซึ่งจะไม่เกิดการเหนี่ยวนำของไหลจากทางเข้าทุติยภูมิ



รูปที่ 1 คุณลักษณะการไหลในอีเจ็คเตอร์

2) รูปร่างของอีเจ็คเตอร์ โดยมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนของหัวฉีดปฐมภูมิ (Primary Nozzle) ซึ่งภายในของหัวฉีดจะมีคอขวดซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนความดันสถิตเป็นความเร็ว และส่วนของอีเจ็คเตอร์ซึ่งแบ่งรูปร่างออกเป็น 4 ส่วนคือ 1) ห้องผสม (Mixing Chamber) 2) บริเวณพื้นที่ที่หน้าตัดคดงที่ (Throat) 3) ท่อกระจายตัว (Diffuser) และ 4) ทางเข้าสารทุติยภูมิ (Secondary inlet) ดังรูปที่ 2 โดยงานวิจัยนี้จะให้ความสำคัญในเรื่องของ Area ratio (A_r) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดที่เล็กที่สุดของห้องผสมหรือบริเวณพื้นที่หน้าตัดคดงที่ (A_t) ต่อพื้นที่หน้าตัดที่เล็กที่สุดของหัวฉีด (A_n) ดังนี้

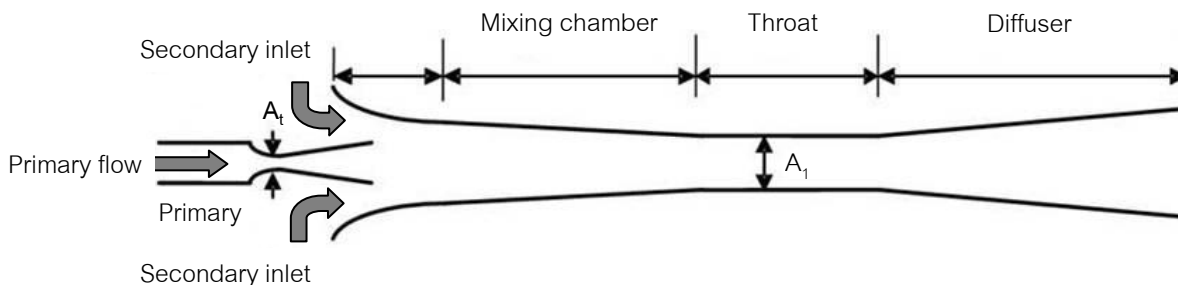
$$\text{Area ratio } (A_r) = \frac{A_t}{A_n} \quad (3)$$

ซึ่งค่า A_r คือพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอีเจ็คเตอร์อย่างมาก โดยมีนักวิจัยหลายท่านได้พยายามศึกษาและเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำงานของอีเจ็คเตอร์ ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าเมื่อ A_r มีค่าสูงจะส่งผลทำให้อีเจ็คเตอร์เหนี่ยวนำสารจากทางเข้าทุติยภูมิได้มาก แต่ในทางตรงกันข้ามจะทำให้ค่าความดันวิกฤต (CBP) ของอีเจ็คเตอร์นั้นมีค่าลดลง

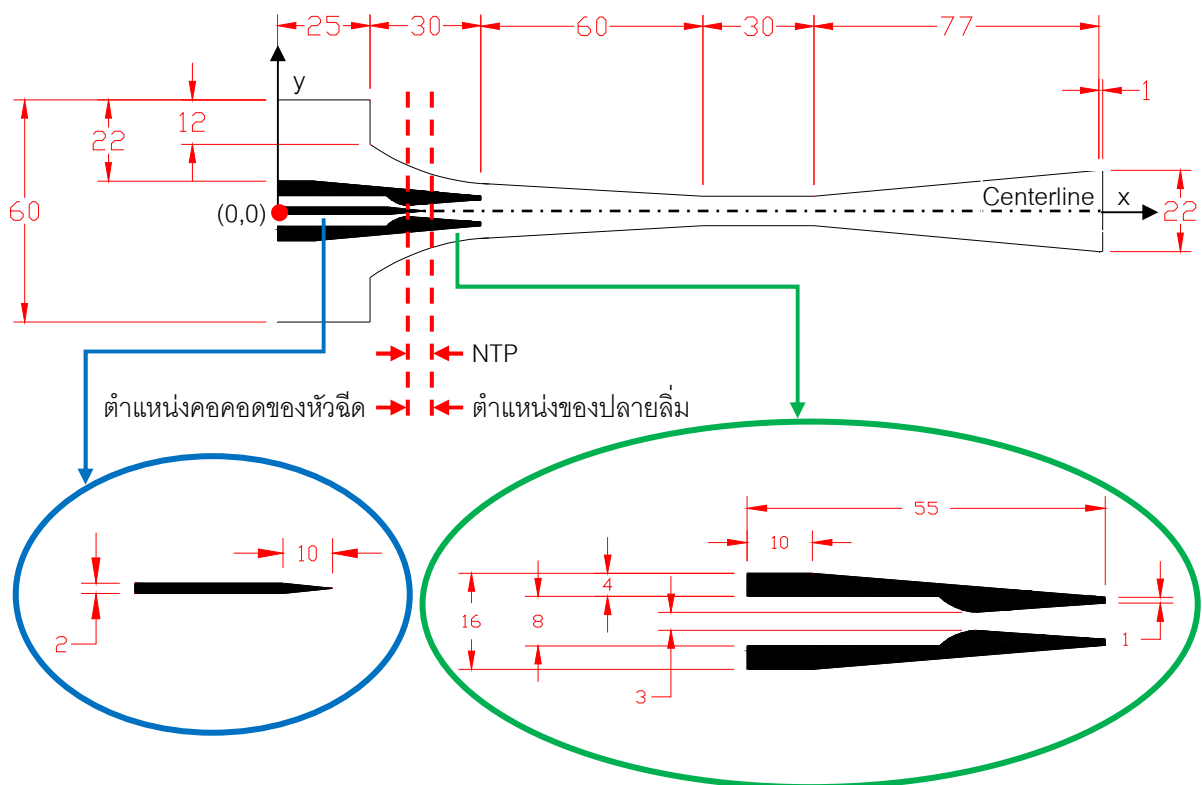
2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การสร้างแบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์

ในการสร้างแบบจำลองของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอขวด ได้นาขนาดและรูปร่างมาจากอีเจ็คเตอร์ต้นแบบ (Sriveerakul, 2008) โดยอีเจ็คเตอร์ต้นแบบได้ออกแบบให้ทำงานในระบบทำความเย็น ภายใต้อุณหภูมิทางเข้าปฐมภูมิ (T_p) เท่ากับ 100°C และอุณหภูมิทางเข้าทุติยภูมิ (T_s) เท่ากับ 5°C ซึ่งมีหัวฉีดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2.8 มิลลิเมตร แต่สำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้อีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอขวด มีหัวฉีดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 รูปลักษณะของอีเจ็คเตอร์

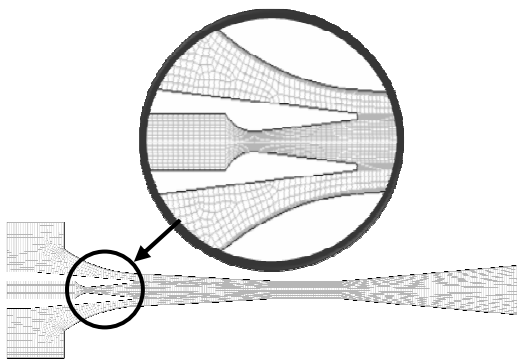


รูปที่ 3 รูปร่างและขนาดของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด (มิลลิเมตร)

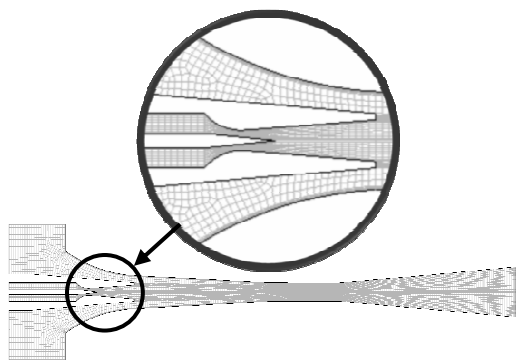
การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของลิ้นที่คอคอดของหัวฉีด จะกำหนดโดยให้ตำแหน่งต่างๆของลิ้นเป็นตำแหน่ง NTP (Needle Tip Position) ซึ่งคือระยะห่างระหว่างตำแหน่ง คอคอดของหัวฉีดกับตำแหน่งของปลายลิ้น โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดระยะตำแหน่งของลิ้นที่ผ่านคอคอดของหัวฉีดไว้ 3 ตำแหน่ง คือ NTP เท่ากับ 0 5 และ 10 มิลลิเมตร โดยอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด จะใช้ลิ้นในการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดของหัวฉีด เช่น หากต้องการให้อีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด ซึ่งมีหัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 3 มิลลิเมตร และอีเจ็คเตอร์ต้นแบบที่มีหัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 2.8 มิลลิเมตร มีพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดของหัวฉีดเท่ากัน จะต้องใส่ลิ้นผ่านเข้าไปในหัวฉีดของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด จนมีพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดของหัวฉีดเท่ากับอีเจ็คเตอร์ต้นแบบ ซึ่งตำแหน่งของลิ้นที่ทำให้อีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดมี

พื้นที่หน้าตัดที่คอคอดของหัวฉีดเท่ากับอีเจ็คเตอร์ต้นแบบ นั่นก็คือที่ตำแหน่ง NTP เท่ากับ 5 มิลลิเมตร

งานวิจัยนี้ได้นำความรู้ด้านการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ช่วยวิเคราะห์ลักษณะของสารผสม และอธิบายพฤติกรรมการทำงานของอีเจ็คเตอร์ รวมทั้งสมรรถนะต่างๆ ของอีเจ็คเตอร์ โดยมีระเบียบขั้นตอนการทำงานหลักๆ อยู่ 3 ขั้นตอน คือ 1) กระบวนการขั้นต้น (pre-processor) 2) การวิเคราะห์ (solution) และ 3) การแสดงผล (post-processor) ซึ่งในส่วน of กระบวนการขั้นต้นนั้นจะเป็นขั้นตอนการกำหนดรูปร่างลักษณะ และขอบเขตของการไหล โดยแบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์ต้นแบบและอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด (NTP = 5 mm) นั้น ได้สร้างขึ้นโดยการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป GAMBIT 2.3 ซึ่งรูปร่างของแบบจำลอง 2 มิติ (2D-Model) เป็นแบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric) และขอบเขตของปัญหานั้นจะถูกแบ่งด้วยโครงข่ายสี่เหลี่ยม (Quad Grid) ดังรูปที่ 4



(ก) อีเจ็คเตอร์ต้นแบบ (Sriveerakul, 2008)



(ข) อีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอขวด (NTP = 5 mm)

รูปที่ 4 แบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์

การสร้างแบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอขวด ในตำแหน่งต่างๆของลิ้ม (NTP) และแบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์ต้นแบบ จะได้โครงข่ายสี่เหลี่ยม (Quad Grid) ของอีเจ็คเตอร์ต้นแบบเท่ากับ 5,112 และอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอขวดที่ตำแหน่ง NTP เท่ากับ 0 5 และ 10 เท่ากับ 7,320 7,161 และ 7,509 ตามลำดับ โดยจำนวนโครงข่ายสี่เหลี่ยมของอีเจ็คเตอร์นี้ได้ผ่านการตรวจสอบผลสำเร็จของการจำลองการไหลในอีเจ็คเตอร์แล้ว

2.2 การตั้งค่าตัวแปรต่างๆที่จำเป็นสำหรับแบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์

จากขั้นตอนของกระบวนการขั้นตอน เมื่อได้สร้างแบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์แล้ว จากนั้นจะใช้โปรแกรมสำเร็จรูป FLUENT 6.3 ในส่วนของขั้นตอนการ

วิเคราะห์ รวมทั้งขั้นตอนการแสดงผล โดยในขั้นตอนการวิเคราะห์นั้น จะทำการกำหนดเงื่อนไข ขอบเขต และค่าตัวแปรต่างๆ ให้กับแบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์ ซึ่งกำหนดให้ใช้สารทำความเย็น R141b เป็นสารทำงาน และคุณสมบัติที่ใช้เป็นก๊าซอุดมคติ (Ideal Gas) รวมทั้งเป็นของไหลแบบอัดตัวได้ โดยคุณสมบัติของสารทำความเย็นแสดงดังตารางที่ 1 และเงื่อนไขการคำนวณของ CFD ดังตาราง ที่ 2

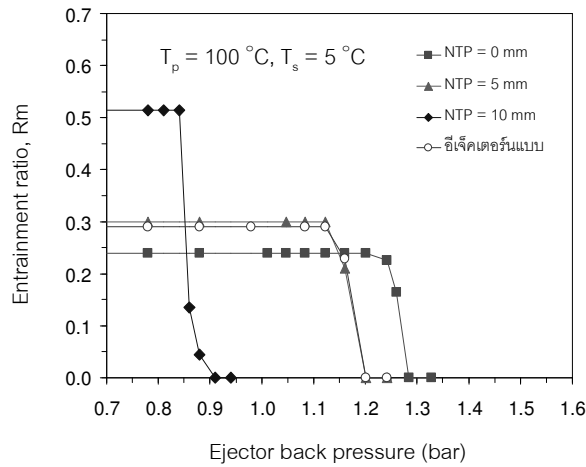
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของสารทำความเย็น R141b

สมบัติของสาร	ค่า
ความร้อนจำเพาะ, C_p (J/kg-K)	956
ค่านำความร้อน, k (W/m-K)	0.0083
ความหนืด, μ (kg/m-s)	1.199×10^{-5}
น้ำหนักโมเลกุล, M (kg/kgmol)	116.95

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการคำนวณของ CFD

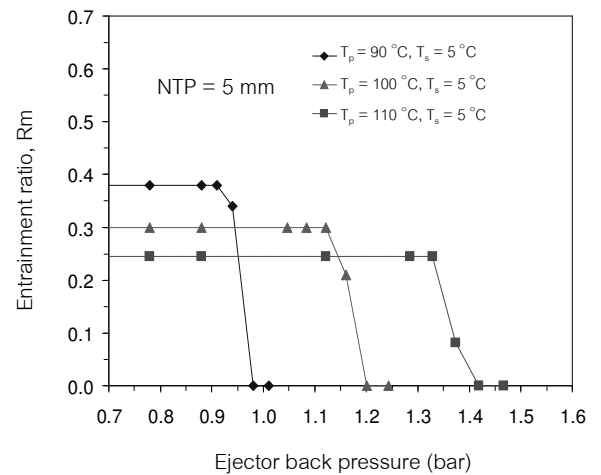
เงื่อนไข	รูปแบบที่เลือกใช้
ขอบเขตของทางเข้า (inlet boundary condition)	Pressure inlet
ขอบเขตของทางออก (outlet boundary condition)	Pressure outlet
ระเบียบขั้นในการแก้ไขปัญหา (Solver)	Density base
ระเบียบวิธีการคำนวณ (Linearization)	Implicit
แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence model)	Realizable k- ϵ model
ระเบียบวิธีการแก้ปัญหาคารไหลบริเวณใกล้ผนัง (Near-wall treatment method)	Standard near wall function

3. ผลการวิจัย



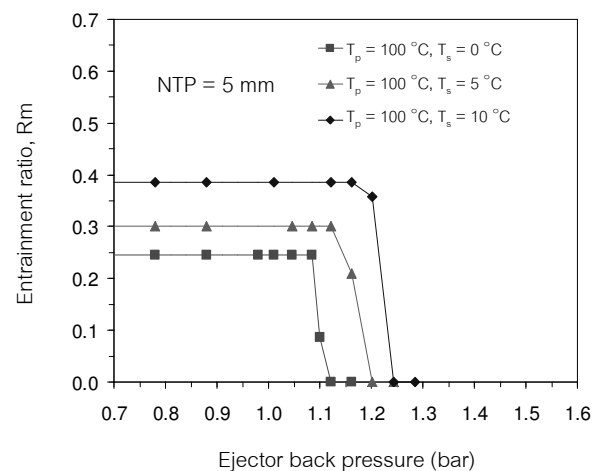
รูปที่ 5 กราฟแสดงค่า R_m ของอีเจ็คเตอร์ต้นแบบ และอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด ในตำแหน่งต่างๆของลิ้ม (NTP)

จากรูปที่ 5 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าสมรรถนะการเหนี่ยวนำ (Entrainment ratio, R_m) ของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด ในตำแหน่งต่างๆของลิ้ม (NTP) และอีเจ็คเตอร์ต้นแบบ โดยกำหนดให้อีเจ็คเตอร์ทำงานภายใต้เงื่อนไขเดียวกันกับอีเจ็คเตอร์ต้นแบบ ซึ่งทำงานที่อุณหภูมิทางเข้าปฐมภูมิ (T_p) เท่ากับ 100°C และอุณหภูมิทางเข้าทุติยภูมิ (T_s) เท่ากับ 5°C พบว่าอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด ที่ตำแหน่งของลิ้ม NTP เท่ากับ 0 5 และ 10 มิลลิเมตร มีค่าสมรรถนะการเหนี่ยวนำเท่ากับ 0.24 0.30 และ 0.52 และมีค่าความดันวิกฤต (CBP) เท่ากับ 120.1 112.2 และ 84.5 kPa ตามลำดับ โดยที่อีเจ็คเตอร์ต้นแบบ นั้นจะมีค่าสมรรถนะการเหนี่ยวนำเท่ากับ 0.29 และค่าความดันวิกฤตเท่ากับ 112.2 kPa แสดงให้เห็นว่าอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด ที่ตำแหน่ง NTP เท่ากับ 5 มิลลิเมตร ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดของหัวฉีดเท่ากับอีเจ็คเตอร์ต้นแบบ นั้น มีค่าสมรรถนะการเหนี่ยวนำลดลงเล็กน้อยเฉลี่ยเท่ากับ 3.45% เมื่อเทียบกับอีเจ็คเตอร์ต้นแบบ แต่มีค่าความดันวิกฤตที่เท่ากัน



รูปที่ 6 กราฟแสดงค่า R_m ของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด (NTP = 5 mm) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของทางเข้าปฐมภูมิ

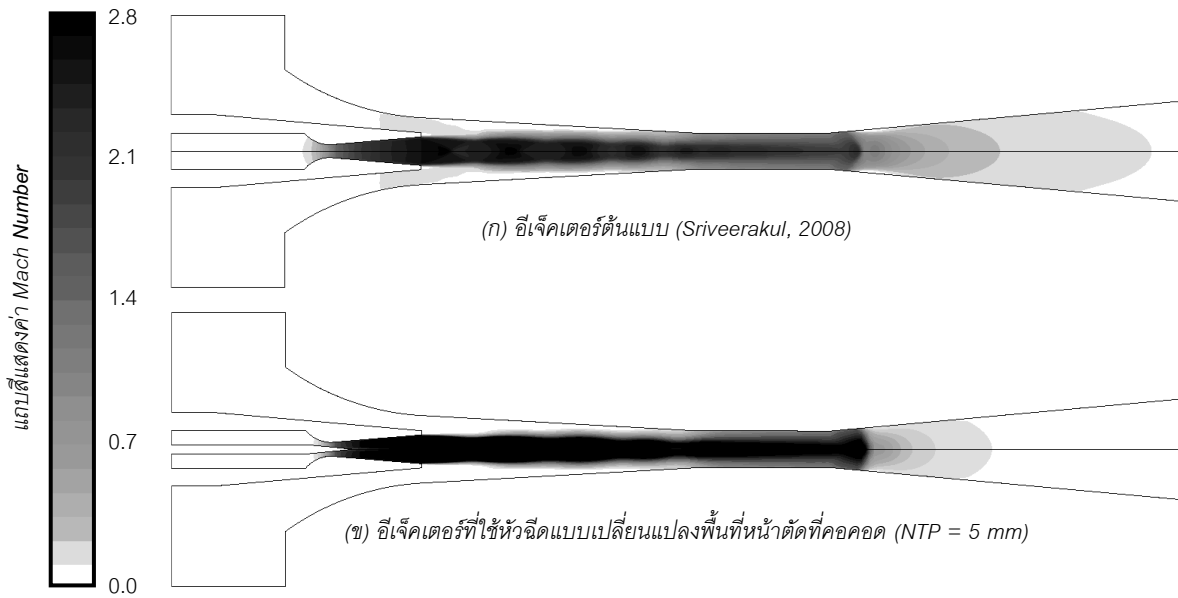
จากรูปที่ 6 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าสมรรถนะการเหนี่ยวนำ (Entrainment ratio, R_m) ของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด ที่ตำแหน่ง NTP เท่ากับ 5 มิลลิเมตร โดยกำหนดให้อีเจ็คเตอร์ทำงานภายใต้เงื่อนไขซึ่งมีอุณหภูมิทางเข้าปฐมภูมิ (T_p) เท่ากับ 90 100 และ 110°C และอุณหภูมิทางเข้าทุติยภูมิ (T_s) เท่ากับ 5°C พบว่าจะมีค่าสมรรถนะการเหนี่ยวนำเท่ากับ 0.38 0.30 และ 0.25 และมีค่าความดันวิกฤตเท่ากับ 90.8 112.2 และ 132.9 kPa ตามลำดับ



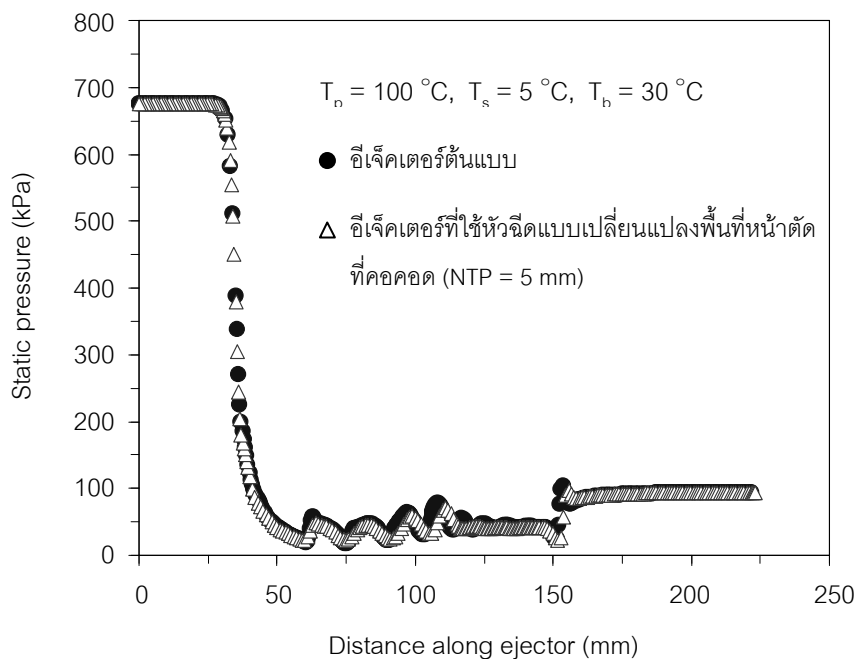
รูปที่ 7 กราฟแสดงค่า R_m ของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด (NTP = 5 mm) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของทางเข้าทุติยภูมิ

จากรูปที่ 7 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าสมรรถนะการเหนียวน้ำ (Entrainment ratio, R_m) ของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด ที่ตำแหน่ง NTP เท่ากับ 5 มิลลิเมตร โดยกำหนดให้อีเจ็คเตอร์ทำงานภายใต้เงื่อนไขซึ่งมีอุณหภูมิทางเข้าป้อน (T_p) เท่ากับ

100 °C และอุณหภูมิทางเข้าทุติยภูมิ (T_s) เท่ากับ 0 °C และ 10 °C พบว่าจะมีค่าสมรรถนะการเหนียวน้ำเท่ากับ 0.25 0.30 และ 0.39 และมีค่าความดันวิกฤต (CBP) เท่ากับ 108.4 112.2 และ 116.1 kPa ตามลำดับ



รูปที่ 8 แถบสีแสดงค่า Mach Number ของอีเจ็คเตอร์ต้นแบบ และอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด (NTP = 5 mm) ที่ $T_p = 100$ °C, $T_s = 5$ °C, $T_b = 30$ °C



รูปที่ 9 กราฟ Static Pressure ที่แกนกลางของการไหล (Centerline) ของอีเจ็คเตอร์ต้นแบบ และอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด (NTP = 5 mm) ที่ $T_p = 100$ °C, $T_s = 5$ °C, $T_b = 30$ °C

จากรูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบค่า Mach Number ของอีเจ็คเตอร์ต้นแบบ และอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด ที่ตำแหน่ง NTP เท่ากับ 5 มิลลิเมตร โดยใช้แถบสีแสดงค่า Mach Number (M) ซึ่งคือความเร็วของของไหลในอีเจ็คเตอร์เทียบกับความเร็วของเสียง โดยอีเจ็คเตอร์ทำงานภายใต้เงื่อนไขที่มีอุณหภูมิทางเข้าปฐมภูมิ (T_p) เท่ากับ 100°C อุณหภูมิทางเข้าทุติยภูมิ (T_s) เท่ากับ 5°C และอุณหภูมิที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ (T_e) เท่ากับ 30°C พบว่าลักษณะลำพุ่ง (jet-core) หรือลักษณะรูปแบบการไหลที่ผ่านออกมาจากหัวฉีดของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด และอีเจ็คเตอร์ต้นแบบนั้น ไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งลำพุ่งของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด จะมีลักษณะของลำพุ่งที่กว้างและยาวกว่าลำพุ่งของอีเจ็คเตอร์ต้นแบบ แต่เมื่อสังเกตถึงแถบสีแสดงค่า Mach Number ก็จะพบว่าความเร็วของลำพุ่งที่เกิดจากอีเจ็คเตอร์ต้นแบบนั้น จะสูงกว่าอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด

จากรูปที่ 9 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า Static Pressure ที่แกนกลางของการไหล (Centerline) ของอีเจ็คเตอร์ต้นแบบ และอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด ที่ตำแหน่ง NTP เท่ากับ 5 มิลลิเมตร โดยอีเจ็คเตอร์ทำงานภายใต้เงื่อนไขซึ่งมีอุณหภูมิทางเข้าปฐมภูมิ (T_p) เท่ากับ 100°C อุณหภูมิทางเข้าทุติยภูมิ (T_s) เท่ากับ 5°C และอุณหภูมิที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ (T_e) เท่ากับ 30°C พบว่าขนาดของคลื่น shock ที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดนั้น จะมีความรุนแรงน้อยกว่าอีเจ็คเตอร์ต้นแบบ โดยสังเกตได้จากความสูงของคลื่น shock ที่เกิดขึ้นตลอดความยาวของอีเจ็คเตอร์ ซึ่งการเกิดคลื่น shock ภายในอีเจ็คเตอร์ เกิดจากการไหลของของไหลที่มีการไหลแบบอัดตัวได้ โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับความเร็วของการไหล และการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดในระหว่างการไหล

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัย การศึกษาการไหลในของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด โดยใช้สาร R141b พบว่าเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของลิ้ม (NTP) จะส่งผลทำให้ค่าสมรรถนะการเหวี่ยงของอีเจ็คเตอร์เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งของลิ้มนั้นเปรียบเสมือนการเปลี่ยนแปลงค่า Area ratio (A_r) ซึ่งค่า A_r เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอีเจ็คเตอร์เป็นอย่างมาก โดยที่ตำแหน่ง NTP เท่ากับ 0 5 และ 10 มิลลิเมตร จะมีค่า A_r เท่ากับ 7.11 8.16 และ 12.8 ตามลำดับ โดยหากอีเจ็คเตอร์มีค่า A_r ที่สูง จะทำให้อีเจ็คเตอร์นั้นมีความสามารถในการเหวี่ยงของไหลจากทางเข้าทุติยภูมิได้มากขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามจะทำให้ค่าความดันวิกฤตของอีเจ็คเตอร์นั้นมีค่าลดลง

และเมื่ออุณหภูมิทางเข้าปฐมภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นโดยที่อุณหภูมิทางเข้าทุติยภูมิคงที่ จะส่งผลทำให้ค่าสมรรถนะการเหวี่ยงของอีเจ็คเตอร์นั้นลดลง เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิทางเข้าปฐมภูมิมีค่าสูง จะเกิดลำพุ่งที่มีขนาดกว้างและใหญ่ผ่านออกมาจากหัวฉีด ซึ่งจะขัดขวางการไหลของของไหลจากทางเข้าทุติยภูมิ แต่ในทางตรงกันข้ามจะส่งผลดีต่อค่าความดันวิกฤตของอีเจ็คเตอร์ โดยจะทำให้อีเจ็คเตอร์มีค่าความดันวิกฤตที่เพิ่มสูงขึ้น

นอกจากนี้ เมื่ออุณหภูมิทางเข้าทุติยภูมิมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิของทางเข้าปฐมภูมิคงที่ จะส่งผลทำให้ค่าสมรรถนะการเหวี่ยงรวมทั้งค่าความดันวิกฤตของอีเจ็คเตอร์เพิ่มสูงขึ้นด้วย

5. ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการไหลในอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด พบว่าวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) สามารถใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดของหัวฉีดที่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพการทำงานของอีเจ็คเตอร์ได้ อย่างไรก็ตามควรจะได้มีการศึกษาในรูปแบบของการทดลองจริง เพื่อที่จะได้สามารถนำเอาผลงานนี้ไปประยุกต์ใช้กับการทำงานจริงของอีเจ็คเตอร์ต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

- Aidoun, Z. and Ouzzane, M. (2004). The effect of operation conditions on the performance of a supersonic ejector for refrigeration, *International Journal of Refrigeration*. 27: 974-984.
- Aphornratana, S., Chungpaibulpatana, S. and Srikgirin, P.(2001).Experimental investigation of An ejector refrigerator:Effect of mixingchamber geometry on system performance, *International Journal of Energy Research*. 25: 397-411.
- Chunnanond, K. and Aphornratana, S. (2004). Ejectors: application in refrigeration technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 8: 129-155.
- Keenan, J.H. and Neumann, E.P. (1942). A simple air ejector, *Transactions of the ASME Journal of Applied Mechanics*. 64: 75-81.
- Keenan, J.H., Neumann, E.P. and Lustwerk, F. (1950). An investigation of ejector design by analysis and experiment, *Transactions of the ASME Journal of Applied Mechanics*. 72: 299-309.
- Striveerakul, T. (2008). CFD and experrimental analysis of an r141b ejector used in a jet refrigerator, Doctor's Thesis: Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University.
- Varga, S., Oliveira, A.C. and Diaconu, B. (2009). Influence of geometrical factors on steam ejector performance - A numerical assessment, *International Journal Of Refrigeration*. 1-8.
- Yapici, R., Ersoy, H.K., Aktoprakoglu, A., Halkci, H.S. and Yigit, O. (2008). Experimental Determination of the optimum performance of ejector refrigeration system depending on ejector area ratio, *International Journal of Refrigeration*. 31: 1183-1189.
- Zhu, Y., Cai, W., Wen, C. and Li, Y.(2009). Numerical investigation of geometry parameters for design of high performance ejectors, *Applied Thermal Engineering*. 29: 898-905.