

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

การศึกษาประสิทธิภาพของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัด ที่คอคอด โดยใช้วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล

Performance Study of an Ejector with a Throat Controllable Nozzle Using CFD Simulation

ณัฏฐ์ สุวรรณภูมิ และ ธนรัฐ ศรีวีระกุล*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จ.อุบลราชธานี 34190
E-mail: tsriveerakul@yahoo.com, โทรศัพท์: 045 353 309, โทรสาร: 045 353 308

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอ การศึกษาการไหลในอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด โดยใช้วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ซึ่งวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหลจะช่วยวิเคราะห์ และอธิบายพฤติกรรมของการไหล รวมทั้งคุณลักษณะของไหลในอีเจ็คเตอร์ โดยรูปร่างของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้สร้างแบบจำลอง 2 มิติ (2D-Model) ในงานวิจัยเป็นแบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric) และใช้แบบจำลองความปั่นป่วนของการไหลแบบ Realizable $k-\epsilon$ ซึ่งอีเจ็คเตอร์จะทำงานโดยการใช้อากาศอัด โดยในงานวิจัยนี้จะใช้การเปลี่ยนตำแหน่งของลิ้นผ่านหัวฉีดเพื่อปรับเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดของหัวฉีด ซึ่งเปรียบเสมือนการเปลี่ยนเส้นผ่าศูนย์กลางที่คอคอดของหัวฉีด ทำให้อีเจ็คเตอร์ทำงานได้หลากหลายขึ้น โดยกำหนดตำแหน่งต่างๆของลิ้นเป็นตำแหน่ง NTP (Needle Tip Position) และผลที่ได้จากการศึกษาด้วยวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล พบว่าเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของลิ้น (NTP) ที่ระยะ 0.5 และ 10 มิลลิเมตร โดยกำหนดให้อีเจ็คเตอร์ทำงานภายใต้เงื่อนไขซึ่งมีความดันทางเข้าปฐมภูมิ (P_p) เท่ากับ 6 bar และความดันทางเข้าทุติยภูมิ (P_s) เท่ากับ 1 bar จะมีค่าสมรรถนะการเหนี่ยวนำ (Entrainment ratio, R_m) เท่ากับ 0.21 0.25 และ 0.40 และค่าความดันวิกฤต (Critical Back Pressure, CBP) ที่ 2.3 2.1 และ 1.5 bar ตามลำดับ

คำหลัก: อีเจ็คเตอร์, อากาศอัด, CFD

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. Ejector is operated by using compressed air. 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 inlet pressure of 6 bar and the secondary inlet pressure of 1 bar, the entrainment ratio was subjected to increased from 0.21 to 0.25, and 0.40, respectively. While its critical back pressure (CBP) trend to reduce from 2.3 bar to 2.1 bar and 1.5 bar.

Keywords: Ejector, Compressed air, CFD

1. บทนำ

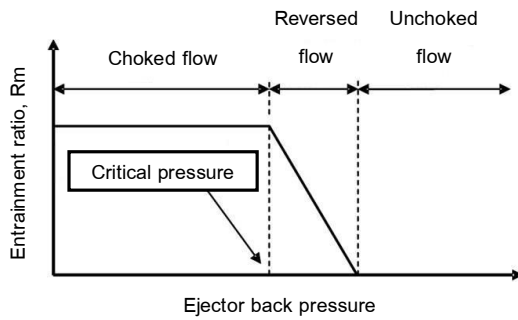
ปัจจุบันได้มีการนำหลักการทำงานของอีเจ็คเตอร์ใช้ร่วมกับงานในหลายด้าน เช่น ในระบบทำความเย็น [1] กระบวนการอบแห้งแบบสูญญากาศ รวมทั้งการส่งอนุภาคของแข็งขนาดเล็ก โดยอีเจ็คเตอร์เป็นอุปกรณ์สำหรับการถ่ายเทมวลสารซึ่งอาศัยหลักการของการเหนี่ยวนำ โดยของไหลที่มีความเร็วสูงจะดูดมวลสารที่มีความเร็วต่ำกว่าให้เคลื่อนที่ตาม ซึ่งประสิทธิภาพการทำงานของอีเจ็คเตอร์ นอกจากจะขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานของอีเจ็คเตอร์แล้ว [2] ยังขึ้นอยู่กับรูปร่างของอีเจ็คเตอร์เองอีกด้วย [3-6] รวมทั้ง Area ratio (A_r) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดที่เล็กที่สุดของห้องผสมต่อพื้นที่หน้าตัดที่เล็กที่สุดของหัวฉีด จะมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอีเจ็คเตอร์ [7,8] เป็นอย่างมาก โดยในการศึกษาค่า Area ratio (A_r) ของอีเจ็คเตอร์สามารถศึกษาได้จากการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดของหัวฉีด ซึ่งจะทำให้ได้โดยการเปลี่ยนหัวฉีดใหม่เข้าไปในระบบ และจะต้องหยุดการทำงานของระบบแล้วจึงทำการเปลี่ยนหัวฉีด ดังนั้นจึงได้มีแนวความคิดที่จะออกแบบอีเจ็คเตอร์ที่มีหัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดได้แม้ในระหว่างที่ระบบกำลังทำงานอยู่ [9] โดยคาดว่าแนวคิดดังกล่าวจะช่วยให้อีเจ็คเตอร์มีความยืดหยุ่นต่อสภาวะการทำงาน ซึ่งเมื่อสภาวะการทำงานเปลี่ยนก็สามารถปรับเปลี่ยนขนาดพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดของหัวฉีดให้สอดคล้องกับสภาวะการทำงานนั้นๆได้ เพื่อรักษาประสิทธิภาพการทำงานที่ดีที่สุดของอีเจ็คเตอร์ไว้

โดยคุณลักษณะที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของอีเจ็คเตอร์ คือ 1. ค่าสมรรถนะการเหนี่ยวนำ (Entrainment ratio, R_m) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลที่ทางเข้าทุติยภูมิต่อ

อัตราการไหลเชิงมวลที่ทางเข้าปฐมภูมิ และ 2. อัตราส่วนความดัน (Pressure Lift Ratio, PLR) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความดันสถิตที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ต่อความดันสถิตที่ทางเข้าทุติยภูมิ โดยค่าสมรรถนะการเหนี่ยวนำของอีเจ็คเตอร์นั้น จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของอีเจ็คเตอร์โดยตรง และอัตราส่วนความดันจะบ่งชี้ถึงข้อจำกัดในการทำความดัน ซึ่งในส่วนของ PLR มักนิยมใช้ตัวแปรที่อยู่ในรูปของความดันวิกฤตในการระบุค่าความดันสูงสุดที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ โดยปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของอีเจ็คเตอร์คือ

1. สภาวะการทำงาน ซึ่งค่าสมรรถนะการเหนี่ยวนำของอีเจ็คเตอร์นั้นจะถูกจำกัดด้วยความดันจากปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ หรือค่าความดันวิกฤต (CBP) โดยความดันทางเข้าปฐมภูมิและความดันทางเข้าทุติยภูมิใดๆ ค่า R_m จะคงที่หากเพิ่มความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ให้สูงขึ้นโดยไม่เกินจุด CBP ซึ่งคุณลักษณะทั่วไปของอีเจ็คเตอร์จากรูปที่ 1 สามารถแบ่งคุณลักษณะของการไหลตามความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์เป็น 3 ช่วง คือ

1. Choked flow เป็นกรณีที่ค่า R_m คงที่ โดยหากความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ต่ำกว่าจุด CBP
2. Unchoked flow เป็นกรณีที่ค่า R_m ลดลง โดยหากความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์เกินจุด CBP
- และ 3. Reversed flow เป็นกรณีที่จะไม่เกิดการเหนี่ยวนำของไหลจากทางเข้าทุติยภูมิ ซึ่งเกิดจากความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์สูงมากเกินไป

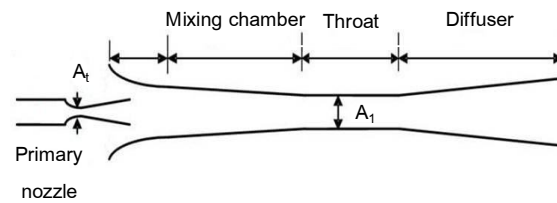


รูปที่ 1 คุณลักษณะการไหลในอีเจ็คเตอร์

2. รูปร่างของอีเจ็คเตอร์ โดยมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญ 2 ส่วน คือส่วนของหัวฉีดปฐมภูมิ (Primary Nozzle) ซึ่งภายในของหัวฉีดจะมีคอขวดซึ่งจะทำให้พื้นที่เปลี่ยนความดันสถิตเป็นความเร็ว และส่วนของอีเจ็คเตอร์ ซึ่งแบ่งรูปร่างออกเป็น 3 ส่วนคือ 1. ห้องผสม (Mixing Chamber) 2. บริเวณพื้นที่หน้าตัดคองที่ (Throat) และ 3. ท่อกระจายตัว (Diffuser) ดังรูปที่ 2 โดยในงานวิจัยนี้จะให้ความสำคัญต่อค่า Area ratio (A_r) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดที่เล็กที่สุดของห้องผสมหรือบริเวณพื้นที่หน้าตัดคองที่ (A_1) ต่อพื้นที่หน้าตัดที่เล็กที่สุดของหัวฉีด (A_t) ดังสมการที่ 1

$$\text{Area ratio } (A_r) = \frac{A_1}{A_t} \quad (1)$$

ซึ่งค่า A_r คือพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอีเจ็คเตอร์อย่างมาก โดยมีนักวิจัยหลายท่านได้พยายามศึกษาและเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาค่า A_r ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำงานของอีเจ็คเตอร์ ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าเมื่อ A_r มีค่าสูง จะส่งผลทำให้อีเจ็คเตอร์เหนียวนำสารจากทางเข้าทุติยภูมิได้มาก แต่ในทางตรงกันข้ามจะทำให้ค่าความดันวิกฤต (CBP) ของอีเจ็คเตอร์นั้นมีค่าลดลง

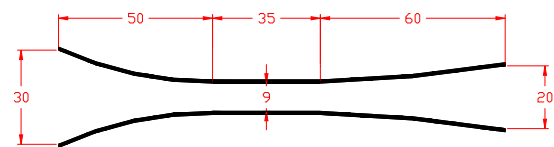


รูปที่ 2 รูปลักษณะของอีเจ็คเตอร์

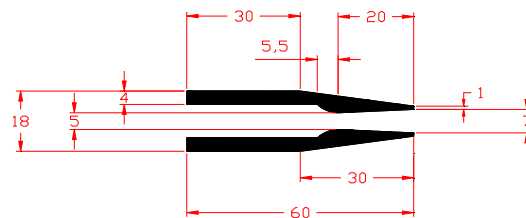
2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การสร้างแบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์

ในการสร้างแบบจำลองของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอขวด ได้ออกแบบรูปร่างและขนาดของอีเจ็คเตอร์ [10-14] โดยอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอขวด ได้ออกแบบให้ทำงานภายใต้ความดันทางเข้าปฐมภูมิ (P_p) เท่ากับ 6 bar ความดันทางเข้าทุติยภูมิ (P_s) เท่ากับ 0.5 bar และกำหนดให้อีเจ็คเตอร์มีหัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3



(ก) อีเจ็คเตอร์ (มิลลิเมตร)



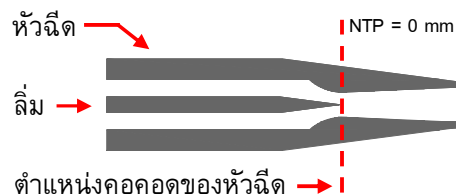
(ข) หัวฉีด (มิลลิเมตร)



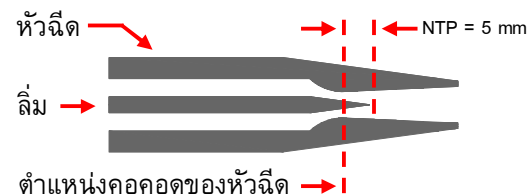
(ค) ลิ้ม (มิลลิเมตร)

รูปที่ 3 รูปร่างและขนาดของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอขวด

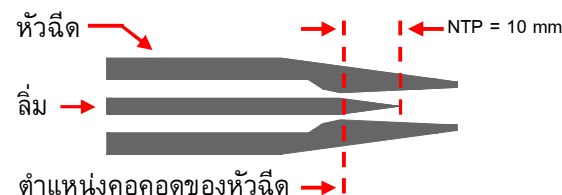
การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของลิ้มที่คอคอดของหัวฉีด จะกำหนดโดยให้ตำแหน่งต่างๆของลิ้มเป็นตำแหน่ง NTP (Needle Tip Position) ซึ่งคือระยะห่างระหว่างตำแหน่งคอคอดของหัวฉีดกับตำแหน่งของปลายลิ้ม ดังตัวอย่างในรูปที่ 4



(ก) NTP เท่ากับ 0 มิลลิเมตร



(ข) NTP เท่ากับ 5 มิลลิเมตร

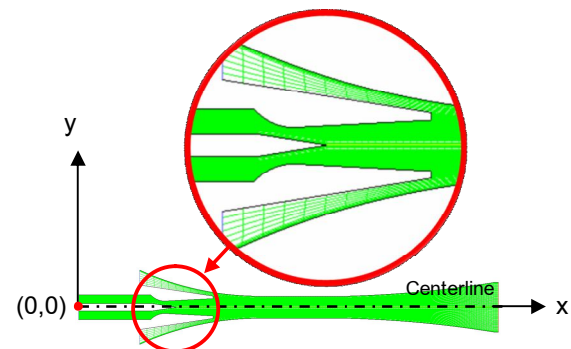


(ค) NTP เท่ากับ 10 มิลลิเมตร

รูปที่ 4 ตำแหน่ง NTP ต่างๆของลิ้ม

โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดระยะตำแหน่งของลิ้มที่ผ่านคอคอดของหัวฉีดไว้ 11 ตำแหน่ง คือ NTP เท่ากับ 0 ถึง 10 มิลลิเมตร โดยอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด จะใช้ลิ้มในการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดของหัวฉีด ซึ่งเปรียบเสมือนการเปลี่ยนเส้นผ่าศูนย์กลางที่คอคอดของหัวฉีด ส่งผลทำให้ค่า Area ratio ของอีเจ็คเตอร์เปลี่ยนแปลงไป เช่น ที่ตำแหน่งของลิ้ม NTP เท่ากับ 0 5 และ 10 มิลลิเมตร จะมีค่า Area ratio เท่ากับ 3.24 3.56 และ 5.06 ตามลำดับ

งานวิจัยนี้ได้นำความรู้ด้านการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ช่วยวิเคราะห์ และอธิบายพฤติกรรมของการไหลในอีเจ็คเตอร์ รวมทั้งสมรรถนะต่างๆ ของอีเจ็คเตอร์ โดยมีระเบียบขั้นตอนการทำงานหลักๆอยู่ 3 ขั้นตอน คือ 1. กระบวนการขั้นต้น (pre - processor) 2. การวิเคราะห์ (solution) และ 3. การแสดงผล (post - processor) ซึ่งในส่วนของการกระบวนการขั้นต้นนั้นจะเป็นขั้นตอนการกำหนดรูปร่างลักษณะ และขอบเขตของการไหล โดยแบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดได้สร้างขึ้นโดยการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป GAMBIT 2.3 ซึ่งรูปร่างของแบบจำลอง 2 มิติ (2D-Model) จะเป็นแบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric) และขอบเขตของปัญหานั้นจะถูกแบ่งด้วยโครงข่ายสี่เหลี่ยม (Quad Grid) ดังตัวอย่างในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด (NTP = 5 mm)

การสร้างแบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด ในตำแหน่งต่างๆของลิ้ม (NTP) จะได้โครงข่ายสี่เหลี่ยม (Quad Grid) ดังตารางที่ 1 โดยจำนวนโครงข่ายสี่เหลี่ยมของอีเจ็คเตอร์นี้ได้ผ่านการตรวจสอบผลสำเร็จของการจำลองการไหลในอีเจ็คเตอร์แล้ว

ตารางที่ 1 จำนวนโครงข่ายสี่เหลี่ยมของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด

NTP (mm)	Cells	Faces	Nodes
0	7200	14618	7419
1	7440	15106	7667
2	7440	15106	7667
3	7440	15106	7667
4	7590	15411	7822
5	7100	14435	7326
6	7290	14801	7512
7	7500	15228	7729
8	7440	15106	7667
9	7650	15533	7884
10	7050	14313	7264

2.2 การตั้งค่าตัวแปรต่างๆที่จำเป็นสำหรับแบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์

จากขั้นตอนของกระบวนการขั้นตอน เมื่อได้สร้างแบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์แล้ว จากนั้นจะใช้โปรแกรมสำเร็จรูป FLUENT 6.3 ในส่วนของขั้นตอนการวิเคราะห์ รวมทั้งขั้นตอนการแสดงผล โดยในขั้นตอนการวิเคราะห์นั้น จะทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และค่าตัวแปรต่างๆ ให้กับแบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์ ซึ่งกำหนดให้อีเจ็คเตอร์ทำงานโดยใช้อากาศ และคุณสมบัติที่ใช้เป็นก๊าซอุดมคติ (Ideal Gas) รวมทั้งเป็นของไหลแบบอัดตัวได้ โดยคุณสมบัติของอากาศแสดงดังตารางที่ 2 และเงื่อนไขการคำนวณของ CFD ดังตารางที่ 3

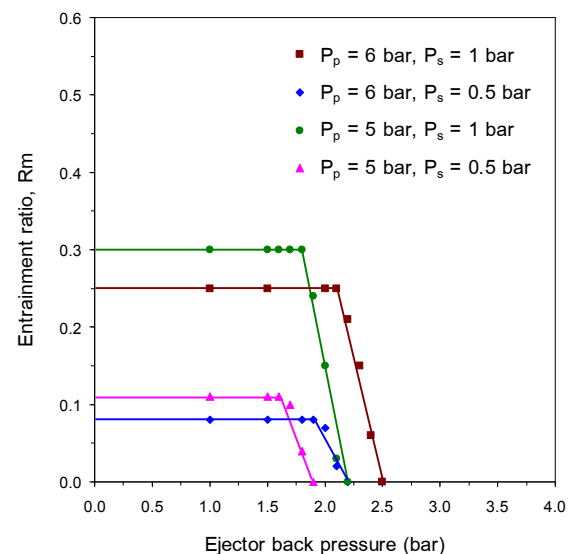
ตารางที่ 2 คุณสมบัติของอากาศ

คุณสมบัติของอากาศ	ค่า
ความร้อนจำเพาะ, C_p (J/kg-K)	1006.43
ค่านำความร้อน, k (W/m-K)	0.0242
ความหนืด, μ (kg/m-s)	1.7894×10^{-5}
น้ำหนักโมเลกุล, M (kg/kgmol)	28.966

ตารางที่ 3 เงื่อนไขการคำนวณของ CFD

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

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล



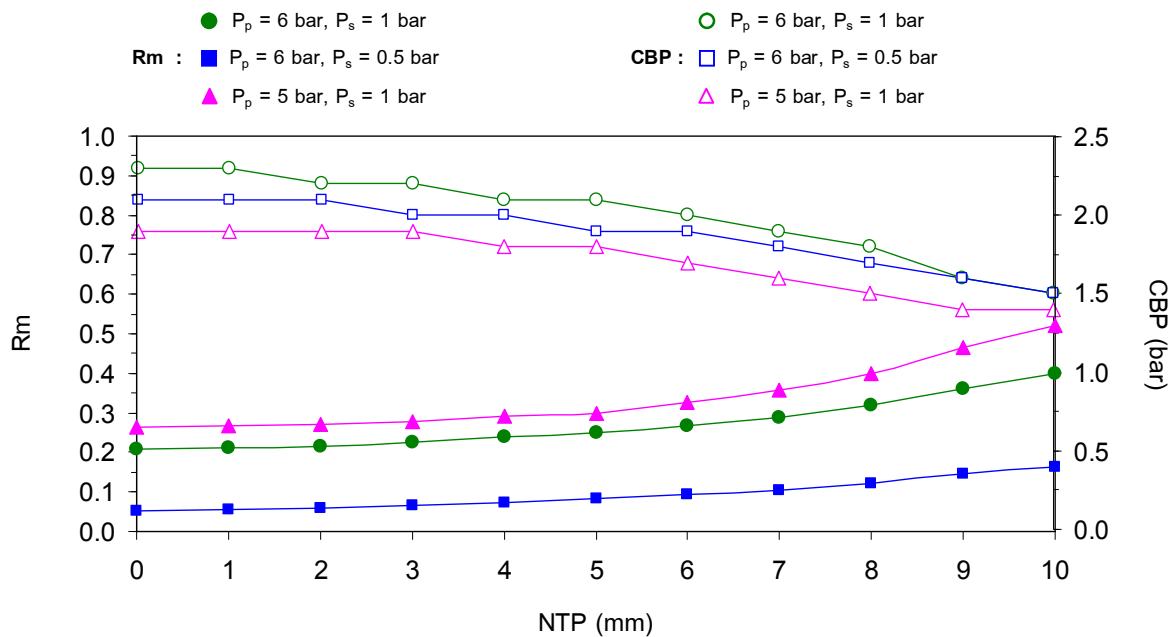
รูปที่ 6 กราฟแสดงค่า R_m ของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด (NTP = 5 mm) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันทางเข้าปฐมภูมิและความดันทางเข้าทุติยภูมิ

จากรูปที่ 6 จะเห็นว่าอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด (NTP = 5) เมื่อทำงานภายใต้เงื่อนไขซึ่งมีความดันทางเข้าปฐุมุมุมิ (P_p) เท่ากับ 5 bar ความดันทางเข้าทุติยภูมิ (P_s) เท่ากับ 1 bar จะมีค่าสมรรถนะการเหวี่ยงน้ำ (Rm) สูงที่สุด คือ 0.3 และเมื่อทำงานภายใต้เงื่อนไขซึ่งมีความดันทางเข้าปฐุมุมุมิเท่ากับ 6 bar ความดันทางเข้าทุติยภูมิเท่ากับ 0.5 bar จะมีค่าสมรรถนะการเหวี่ยงน้ำต่ำที่สุด คือ 0.08

ซึ่งเมื่อความดันทางเข้าปฐุมุมุมิมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ความดันทางเข้าทุติยภูมิคงที่ จะส่งผลทำให้ค่า

สมรรถนะการเหวี่ยงน้ำของอีเจ็คเตอร์นั้นลดลง เนื่องจากเมื่อความดันทางเข้าปฐุมุมุมิมีค่าสูง จะเกิดลำพุ่ง (jet-core) ที่มีขนาดกว้างและใหญ่ผ่านออกมาจากหัวฉีด ซึ่งจะขัดขวางการไหลของของไหลจากทางเข้าทุติยภูมิ แต่ในทางตรงกันข้ามจะส่งผลดีต่อค่าความดันวิกฤต (CBP) ของอีเจ็คเตอร์ โดยจะทำให้อีเจ็คเตอร์มีค่าความดันวิกฤตที่เพิ่มสูงขึ้น

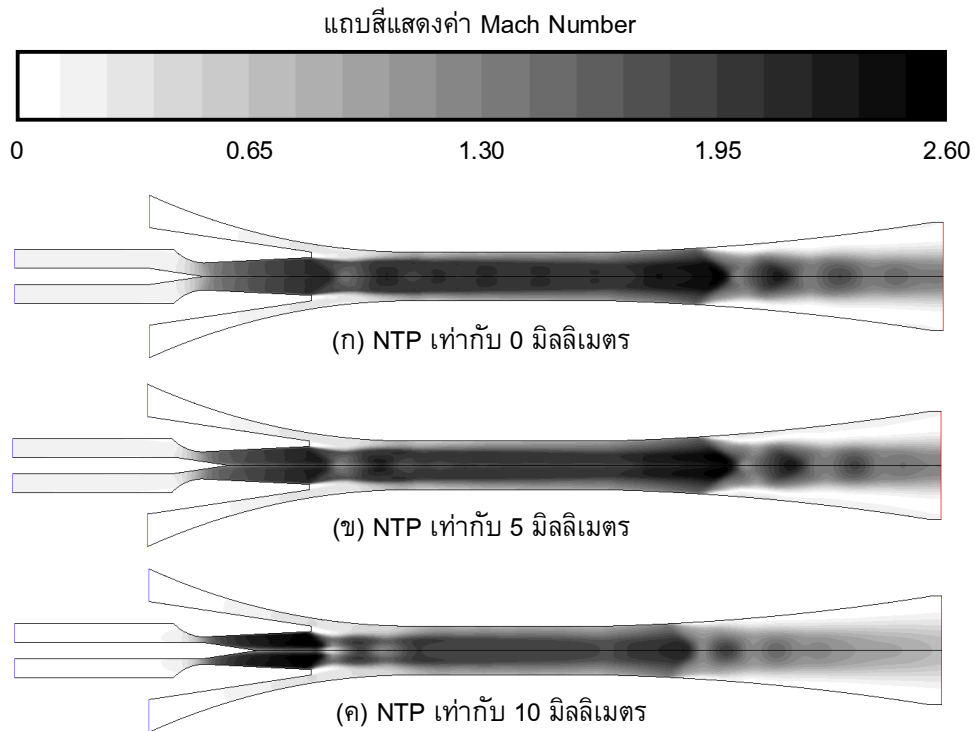
นอกจากนี้ เมื่อความดันทางเข้าทุติยภูมิมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ความดันทางเข้าปฐุมุมุมิคงที่ จะทำให้ค่าสมรรถนะการเหวี่ยงน้ำ รวมทั้งค่าความดันวิกฤตของอีเจ็คเตอร์เพิ่มสูงขึ้นด้วย



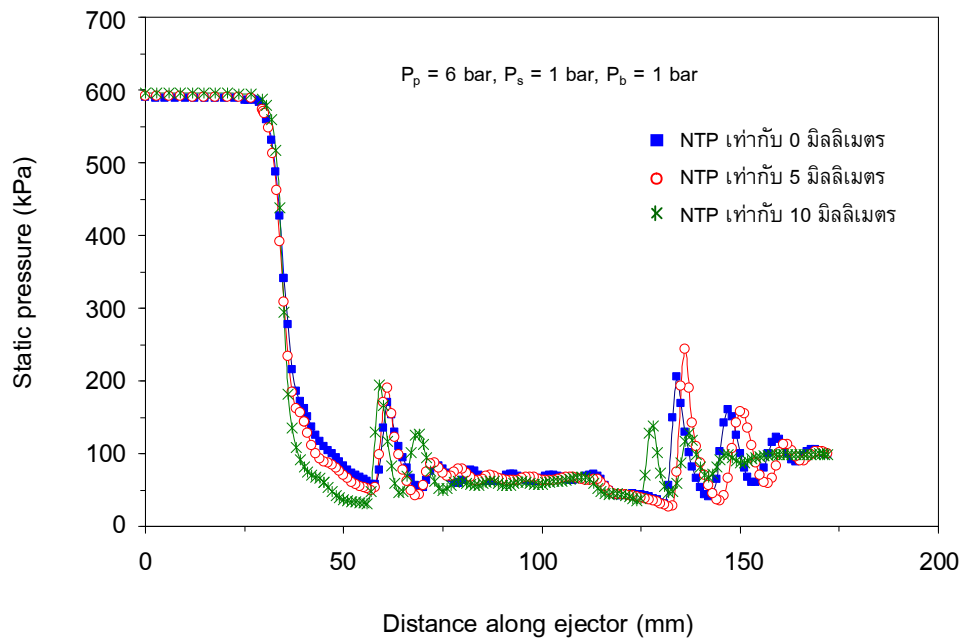
รูปที่ 7 กราฟแสดงค่า Rm และ CBP ของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด ในตำแหน่งต่างๆ ของลิ้ม (NTP)

จากรูปที่ 7 เป็นกราฟแสดงค่าสมรรถนะการเหวี่ยงน้ำ (Rm) และค่าความดันวิกฤต (CBP) ของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดในตำแหน่งต่างๆ ของลิ้ม (NTP) ในสภาวะการทำงานที่แตกต่างกัน โดยเมื่ออีเจ็คเตอร์ทำงานภายใต้เงื่อนไขซึ่งมีความดันทางเข้าปฐุมุมุมิ (P_p) เท่ากับ 6 bar และความดันทางเข้าทุติยภูมิ (P_s) เท่ากับ 1 bar

พบว่าอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด ที่ตำแหน่งของลิ้ม NTP เท่ากับ 0 5 และ 10 มิลลิเมตร มีค่าสมรรถนะการเหวี่ยงน้ำเท่ากับ 0.21 0.25 และ 0.40 และมีค่าความดันวิกฤตเท่ากับ 2.3 2.1 และ 1.5 bar ตามลำดับ



รูปที่ 8 แถบสีแสดงค่า Mach Number ของเจ็ทเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด
ในตำแหน่งต่างๆของลิ้ม (NTP) ที่ $P_p = 6 \text{ bar}$ $P_s = 1 \text{ bar}$ $P_b = 1 \text{ bar}$



รูปที่ 9 กราฟ Static Pressure ที่แกนกลางของการไหล (Centerline) ของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบ
เปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด ในตำแหน่งต่างๆของลิ้ม (NTP) ที่ $P_p = 6 \text{ bar}$ $P_s = 1 \text{ bar}$ $P_b = 1 \text{ bar}$

จากรูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบค่า Mach Number ของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด ที่ตำแหน่งของลิ้ม NTP เท่ากับ 0 5 และ 10 มิลลิเมตร โดยใช้แถบสีแสดงค่า Mach Number (M) ซึ่งคือความเร็วของของไหลในอีเจ็คเตอร์ เทียบกับความเร็วของเสียง โดยอีเจ็คเตอร์ทำงานภายใต้เงื่อนไขที่มีความดันทางเข้าปฐุมภูมิ (P_p) เท่ากับ 6 bar ความดันทางเข้าทุติยภูมิ (P_s) เท่ากับ 1 bar และความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ (P_b) เท่ากับ 1 bar พบว่าลักษณะลำพุ่ง (jet-core) หรือลักษณะรูปแบบการไหลที่ผ่านออกมาจากหัวฉีดของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด ที่ตำแหน่งของลิ้ม NTP เท่ากับ 0 มิลลิเมตร จะมีลำพุ่งที่มีขนาดกว้างและยาวที่สุดผ่านออกมาจากหัวฉีด ซึ่งจะขัดขวางการไหลของของไหลจากทางเข้าทุติยภูมิ ทำให้ประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำ (R_m) ของอีเจ็คเตอร์ลดลง แต่ในทางตรงกันข้ามจะส่งผลดีต่อค่าความดันวิกฤต (CBP) ของอีเจ็คเตอร์ โดยจะทำให้อีเจ็คเตอร์มีค่าความดันวิกฤตที่เพิ่มสูงขึ้น

จากรูปที่ 9 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า Static Pressure ที่แกนกลางของการไหล (Centerline) ของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด ที่ตำแหน่งของลิ้ม NTP เท่ากับ 0 5 และ 10 มิลลิเมตร โดยอีเจ็คเตอร์ทำงานภายใต้เงื่อนไขที่มีความดันทางเข้าปฐุมภูมิ เท่ากับ 6 bar ความดันทางเข้าทุติยภูมิเท่ากับ 1 bar และความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์เท่ากับ 1 bar พบว่าขนาดของคลื่น shock ที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดนั้น จะมีความรุนแรงใกล้เคียงกัน โดยสังเกตได้จากความสูงของคลื่น shock ที่เกิดขึ้นตลอดความยาวของอีเจ็คเตอร์ ซึ่งการเกิดคลื่น shock ภายในอีเจ็คเตอร์ เกิดจากการไหลของของไหลที่มีการไหลแบบอัดตัวได้ โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับความเร็วของการไหล และการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดในระหว่างการไหล

4. สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัย การศึกษาการไหลของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด โดยใช้อากาศอัด พบว่าเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของลิ้มจะส่งผลทำให้ค่าสมรรถนะการเหนี่ยวนำของอีเจ็คเตอร์เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งของลิ้มนั้นเปรียบเสมือนการเปลี่ยนแปลงค่า A_r ซึ่งค่า A_r เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอีเจ็คเตอร์เป็นอย่างมาก เช่นที่ตำแหน่งของลิ้ม NTP เท่ากับ 0 5 และ 10 มิลลิเมตร จะมีค่า A_r เท่ากับ 3.24 3.56 และ 5.06 ตามลำดับ โดยหากอีเจ็คเตอร์มีค่า A_r ที่สูง จะทำให้อีเจ็คเตอร์นั้นมีความสามารถในการเหนี่ยวนำของไหลจากทางเข้าทุติยภูมิได้มากขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามจะทำให้ค่าความดันวิกฤตของอีเจ็คเตอร์นั้นมีค่าลดลง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ให้การสนับสนุนงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Chunnanond, K. and Aphornratana, S. (2004). Ejectors: application in refrigeration technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 8, pp. 129-155.
- [2] Aidoun, Z. and Ouzzane, M. (2004). The effect of operation conditions on the performance of a supersonic ejector for refrigeration, *International Journal of Refrigeration*, vol. 27, pp. 974-984.
- [3] 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*, vol. 25, pp. 397-411.
- [4] Sriveerakul, T., Aphornratana, S. and Chunnanond, K. (2007). Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics: Part 1. Validation of the CFD results,

International Journal of Thermal Sciences, vol. 46, pp. 812-822.

[5] Sriveerakul, T., Aphornratana, S. and Chunnanond, K. (2007). Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics: Part 2. Flow structure of a steam ejector influenced by operating pressures and geometries, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 46, pp. 823-833.

[6] Zhu, Y., Cai, W., Wen, C. and Li, Y. (2009). Numerical investigation of geometry parameters for design of high performance ejectors, *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, pp. 898-905.

[7] 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*, vol. 31, pp. 1183-1189.

[8] Varga, S., Oliveira, A.C. and Diaconu, B. (2009). Influence of geometrical factors on steam ejector performance - A numerical assessment, *International Journal Of Refrigeration*, pp. 1-8.

[9] Ma, X., Zhang, W., Omer, S.A. and Riffat, S.B. (2010). Experimental investigation of a novel steam ejector refrigerator suitable for solar energy applications, *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, pp. 1320-1325.

[10] Keenan, J.H. and Neumann, E.P. (1942). A simple air ejector, *Transactions of the ASME Journal of Applied Mechanics*, vol. 64, pp. 75-81.

[11] 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*, vol. 72, pp. 299-309.

[12] Aphornratana, S. (1996). Theoretical Study of a Steam-Ejector Refrigerator, *RERIC International Energy Journal*, vol. 18(1), pp. 61-74.

[13] He, S., Li, Y. and Wang, R.Z. (2009). Progress of mathematical modeling on ejectors, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 1760-1780.

[14] ESDU International Ltd. (1985). Design for steam driven flow, *Ejector and jet pump*, Data item 86030, UK