

การตรวจสอบสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์อากาศอัดที่ใช้หัวฉีด แบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด

ณัฐ สุวรรณภูมิ¹ และ ธนรัฐ ศรีวีระกุล^{2*}

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาการไหลในอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดในระบบอากาศอัด โดยวิธีการทดลองและวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ช่วยวิเคราะห์ลักษณะของสสารผสม และอธิบายพฤติกรรมการไหล รวมทั้งคุณลักษณะของไหลในอีเจ็คเตอร์ ซึ่งรูปร่างของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้สร้างแบบจำลอง 2 มิติ นั้น เป็นแบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric) และใช้แบบจำลองความปั่นป่วนของการไหลแบบ Realizable k- ϵ โดยในงานวิจัยนี้ใช้อากาศอัดเป็นสารทำงานและจะใช้การเปลี่ยนตำแหน่งของลิ้นผ่านหัวฉีดเพื่อปรับเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดของหัวฉีด ซึ่งเปรียบเสมือนการเปลี่ยนเส้นผ่าศูนย์กลางที่คอคอดของหัวฉีด ทำให้อีเจ็คเตอร์ทำงานได้หลากหลายขึ้น โดยกำหนดตำแหน่งต่างๆ ของลิ้นเป็นตำแหน่ง NTP (Needle Tip Position)

และผลที่ได้จากวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) นั้น เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากชุดอุปกรณ์ทดลองของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด พบว่าหากกำหนดให้อีเจ็คเตอร์ทำงานภายใต้เงื่อนไขซึ่งมีความดันทางเข้าปฐมภูมิ (P_p) เท่ากับ 5 bar ความดันทางเข้าทุติยภูมิ (P_s) เท่ากับ 0.8 bar เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของลิ้น (NTP) ที่ระยะ 0, 5 และ 10 มิลลิเมตร วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) จะมีค่าความคลาดเคลื่อนของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (R_m) เท่ากับ 2.5, 8.3 และ 7.7 เปอร์เซ็นต์ และความคลาดเคลื่อนของค่าความดันวิกฤต (CBP) เท่ากับ 33.3, 31.3 และ 15.4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเทียบกับชุดอุปกรณ์ทดลอง

คำสำคัญ: เปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด CFD
อีเจ็คเตอร์ อากาศอัด

¹ อาจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-4535-3309 อีเมล: tsriveerakul@yahoo.com



Performance Investigation of a Compressed Air Ejector with a Variable Throat Area Nozzle

Nat Suvarnakuta¹ and Thanarath Sriveerakul^{2*}

Abstract

This paper presents a flow in an air ejector equipped with variable throat area of the primary nozzle. Using experimental measurement and CFD technique, flow phenomena, mixing structure and performance of the ejectors were analyzed and explained. In this study, 2D-axisymmetric model was used. Realizable $k-\varepsilon$ 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. It can be seen that altering the needle tip position (NTP) affects the ejector's performance. It was found that changing the NTP from 0 to 5 and 10 mm, under the primary inlet pressure of 5 bar and the secondary inlet pressure of 0.8 bar gives run to average relative errors between the CFD and experimental results up to 2.5%, 8.3% and 7.7% for the entrainment ratio and 33.3%, 31.3% and 15.4% for the critical back pressure.

Keywords: Variable Throat Area, CFD, Ejector, Compressed Air

¹ Lecturer, Faculty of Industrial Technology, Surindra Rajabhat University.

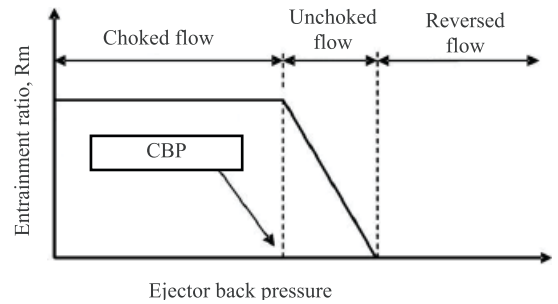
² Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University.

* Corresponding Author, Tel. 0-4535-3309, E-mail: tsriveerakul@yahoo.com

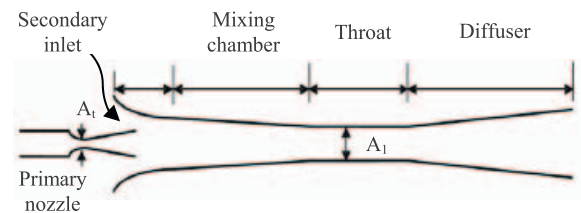
1. บทนำ

อีเจ็คเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการถ่ายเทมวลสาร หรือใช้ในการสร้างสูญญากาศ ซึ่งอาศัยหลักการของการเหนี่ยวนำ โดยมวลสารที่มีความเร็วสูงดูดมวลสารที่มีความเร็วต่ำให้เคลื่อนที่ตามกันไป และในปัจจุบันได้มีการนำอีเจ็คเตอร์มาประยุกต์ใช้ร่วมกับงานในระบบทำความเย็น [1], [2] กระบวนการอบแห้งแบบสูญญากาศ รวมถึงการส่งอนุภาคของแข็งขนาดเล็ก ซึ่งคุณลักษณะที่บ่งบอกถึงสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ คืออัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (Entrainment Ratio, R_m) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลที่ทางเข้าหุติยภูมิต่ออัตราการไหลเชิงมวลที่ทางเข้าปฐมภูมิ และอัตราส่วนความดัน (Pressure Lift Ratio, PLR) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความดันสถิตที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ต่อความดันสถิตที่ทางเข้าหุติยภูมิ โดยอัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (R_m) ของอีเจ็คเตอร์จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์โดยตรง และอัตราส่วนความดัน (PLR) จะบ่งชี้ถึงข้อจำกัดในการทำความดัน ซึ่งค่า PLR สำหรับการทำงานของอีเจ็คเตอร์มักนิยมใช้ตัวแปรที่อยู่ในรูปของความดันวิกฤต (Critical Back Pressure, CBP) ในการระบุค่าความดันสูงสุดที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ โดยปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์คือเงื่อนไขสภาวะการทำงาน [3] และรูปร่างของอีเจ็คเตอร์ [4]-[7] ดังนี้

1) เงื่อนไขสภาวะการทำงาน โดยอัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (R_m) ของอีเจ็คเตอร์นั้นจะถูกจำกัดด้วยความดันจากปากทางออกของอีเจ็คเตอร์หรือค่าความดันวิกฤต (CBP) ซึ่งเป็นค่าความดันที่สูงสุดที่อีเจ็คเตอร์สามารถทำงานได้โดยค่า R_m ของอีเจ็คเตอร์ไม่ลดลงหากนำตัวแปรคุณลักษณะทั้งสองมาทำการเขียนกราฟคุณลักษณะการทำงานของอีเจ็คเตอร์จะได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งสามารถแบ่งคุณลักษณะการไหลตามความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์เป็น 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 เป็น



รูปที่ 1 คุณลักษณะทั่วไปของอีเจ็คเตอร์



รูปที่ 2 รูปลักษณะของอีเจ็คเตอร์

กรณีที่อีเจ็คเตอร์ไม่สามารถเหนี่ยวนำมวลสารจากทางเข้าหุติยภูมิได้ ซึ่งเกิดจากความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์สูงมากเกินไป

2) รูปร่างของอีเจ็คเตอร์ ซึ่งมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญสองส่วน คือส่วนของหัวฉีดปฐมภูมิ (Primary Nozzle) ซึ่งภายในของหัวฉีดนั้นจะมีท่อลูเข้า-ลูออก ทำหน้าที่เปลี่ยนความดันสถิตของของไหลให้เป็นความเร็ว และส่วนของอีเจ็คเตอร์ แบ่งออกเป็น 4 ส่วนคือ 1. ทางเข้าของสารหุติยภูมิ (Secondary Inlet) 2. ห้องผสม (Mixing Chamber) 3. บริเวณพื้นที่หน้าตัดคงที่ (Throat) และ 4. ท่อกระจายตัว (Diffuser) ดังแสดงในรูปที่ 2

งานวิจัยนี้จะให้ความสำคัญต่อค่า Area Ratio (A_r) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดที่เล็กที่สุดของห้องผสมหรือบริเวณพื้นที่หน้าตัดคงที่ (A_1) ต่อพื้นที่หน้าตัดที่เล็กที่สุดของหัวฉีด (A_2) ดังสมการที่ 1

$$\text{Area Ratio } (A_r) = \frac{A_1}{A_2} \quad (1)$$

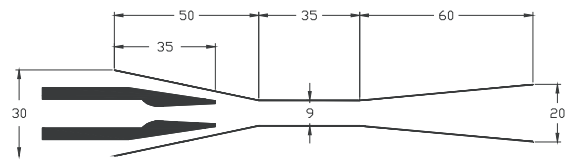
ซึ่งค่า Area Ratio (A_r) จะมีผลต่อสมรรถนะการทำงานของอ็เจ็คเตอร์ [8],[9] และหากจะศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า Area Ratio (A_r) ของอ็เจ็คเตอร์ที่มีต่อสมรรถนะการทำงานนั้นจะทำได้โดยการเปลี่ยนหัวฉีดใหม่เข้าไปในระบบ ซึ่งจำเป็นต้องหยุดการทำงานของระบบแล้วจึงทำการเปลี่ยนหัวฉีด ดังนั้นจึงได้มีแนวความคิดที่จะออกแบบอ็เจ็คเตอร์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดของหัวฉีดได้ ซึ่งจะช่วยให้การศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า Area Ratio (A_r) ของอ็เจ็คเตอร์นั้นสามารถทำได้แม้ในระหว่างที่ระบบกำลังทำงานอยู่ [10], [11] โดยในงานวิจัยนี้จะสร้างชุดอุปกรณ์ทดลองซึ่งใช้อากาศอัดเป็นสารทำงาน ศึกษาร่วมกับวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) และคาดว่าแนวคิดดังกล่าวจะช่วยให้อ็เจ็คเตอร์มีความยืดหยุ่นต่อสภาวะการทำงานเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเมื่อสภาวะการทำงานเปลี่ยนก็สามารถปรับเปลี่ยนขนาดพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดของหัวฉีดให้สอดคล้องกับสภาวะการทำงานนั้นๆ ได้ เพื่อรักษาสมรรถนะการทำงานที่ดีที่สุดของอ็เจ็คเตอร์ไว้ และจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าหากอ็เจ็คเตอร์มีค่า Area Ratio (A_r) ที่สูง จะส่งผลให้อ็เจ็คเตอร์นั้นสามารถเหนียวนามวลสารจากทางเข้าทุติยภูมิได้มาก แต่ในทางตรงกันข้ามจะทำให้ค่าความดันวิกฤต (CBP) ของอ็เจ็คเตอร์ลดลง

2. วิธีการวิจัย

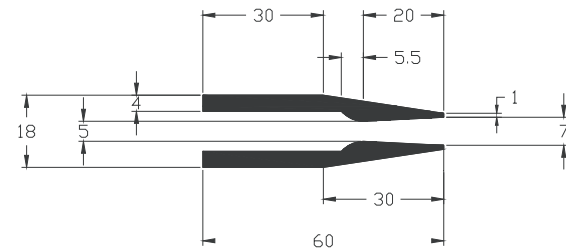
2.1 แบบจำลองการไหลของอ็เจ็คเตอร์

ในการสร้างแบบจำลองของอ็เจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด ได้ออกแบบขนาดและรูปร่างของอ็เจ็คเตอร์ [12]-[16] ให้ทำงานโดยการใช้อากาศอัด ภายใต้ความดันทางเข้าปฐมภูมิ (P_p) เท่ากับ 5 bar ความดันทางเข้าทุติยภูมิ (P_s) เท่ากับ 0.8 bar และกำหนดให้อ็เจ็คเตอร์มีหัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3

การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของลิ้มที่คอคอดของหัวฉีด จะกำหนดโดยให้ตำแหน่งต่างๆ ของลิ้มเป็นตำแหน่ง NTP (Needle Tip Position) ซึ่งคือระยะห่างระหว่างตำแหน่ง



(ก) อ็เจ็คเตอร์ (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)



(ข) หัวฉีด (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

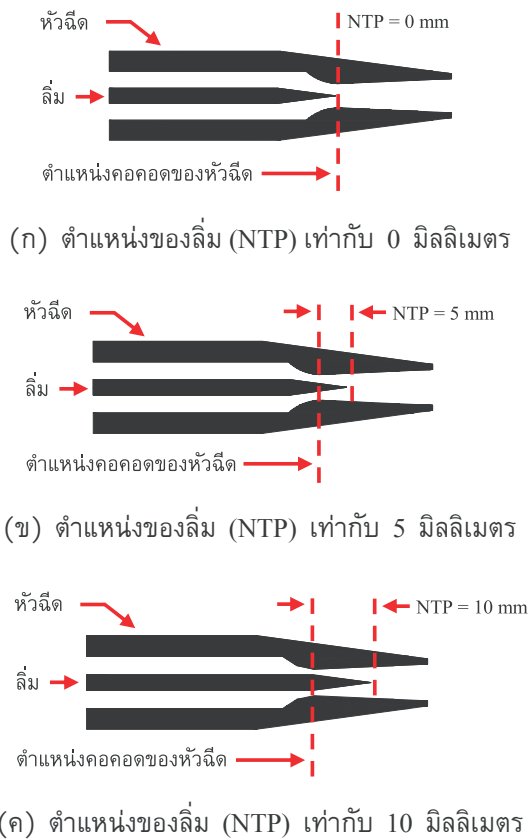


(ค) ลิ้ม (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

รูปที่ 3 ขนาดและรูปร่างของอ็เจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด

คอคอดของหัวฉีดกับตำแหน่งของปลายลิ้ม โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดระยะตำแหน่งของลิ้มที่ผ่านคอคอดของหัวฉีดไว้ 3 ตำแหน่ง คือตำแหน่งของลิ้ม (NTP) เท่ากับ 0, 5 และ 10 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4 ซึ่งการเปลี่ยนตำแหน่งของลิ้มนั้นจะส่งผลทำให้ค่า Area Ratio (A_r) ของอ็เจ็คเตอร์เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เช่นที่ตำแหน่งของลิ้ม (NTP) เท่ากับ 0.5 และ 10 มิลลิเมตร จะมีค่า Area Ratio (A_r) เท่ากับ 3.24, 3.56 และ 5.06 ตามลำดับ

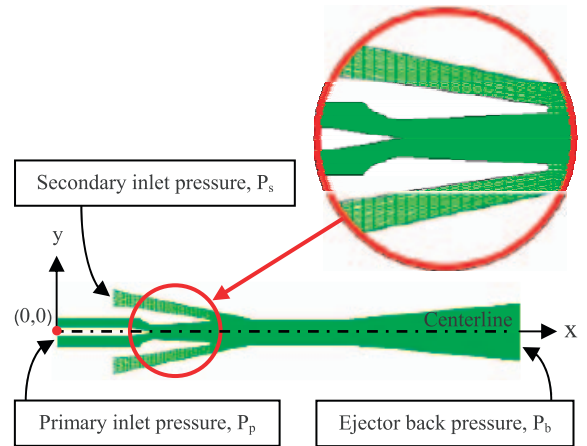
การนำความรู้ด้านการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ช่วยวิเคราะห์ลักษณะของสารผสม และอธิบายพฤติกรรมของการไหล รวมทั้งสมรรถนะของอ็เจ็คเตอร์ มีระเบียบขั้นตอนการทำงานหลักๆ อยู่ 3 ขั้นตอน คือ 1) กระบวนการขึ้นต้น



รูปที่ 4 ตำแหน่งต่างๆ ของลิม

(Pre-processor) 2) กระบวนการวิเคราะห์ (Solution) และ 3) การแสดงผล (Post-processor) ซึ่งในส่วนของการคำนวณการขึ้นต้นนั้นจะเป็นขั้นตอนการกำหนดรูปร่างลักษณะ และขอบเขตของการไหล โดยแบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอขวด ได้สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป GAMBIT 2.3 ซึ่งรูปร่างของแบบจำลอง 2 มิติ เป็นแบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric) และขอบเขตของปัญหานั้นจะถูกแบ่งด้วยโครงข่ายสี่เหลี่ยม (Quad Grid) ดังตัวอย่างในรูปที่ 5

การสร้างแบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอขวด ที่ตำแหน่งของลิม (NTP) เท่ากับ 0, 5 และ 10 มิลลิเมตรจะได้โครงข่ายสี่เหลี่ยม (Quad Grid) ของอีเจ็คเตอร์เท่ากับ



รูปที่ 5 แบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอขวด ที่ตำแหน่งของลิม (NTP) เท่ากับ 0 มิลลิเมตร

46,700, 48,700 และ 45,450 ตามลำดับ ซึ่งจำนวนโครงข่ายสี่เหลี่ยมของอีเจ็คเตอร์นี้ได้ผ่านการปรับและการทดสอบในความละเอียดที่แตกต่างกันเพื่อความถูกต้องของการจำลองการไหล และความสอดคล้องกับผลของการทดลองมากที่สุด โดยการเพิ่มจำนวนโครงข่ายสี่เหลี่ยมเป็นสองเท่า พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของอัตราส่วนการเหนียวนา (R_m) มีค่าน้อยกว่า 1%

2.2 การตั้งค่าตัวแปรที่จำเป็นสำหรับแบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์

จากขั้นตอนของการคำนวณการขึ้นต้น เมื่อได้สร้างแบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์แล้ว จากนั้นจะใช้โปรแกรมสำเร็จรูป FLUENT 6.3 ในส่วนของขั้นตอนการวิเคราะห์ รวมทั้งขั้นตอนการแสดงผล โดยในขั้นตอนการวิเคราะห์นั้น จะทำการกำหนดเงื่อนไข ขอบเขต และค่าตัวแปรต่างๆ ให้กับแบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์ ซึ่งกำหนดให้ใช้อากาศเป็นสารทำงานและคุณสมบัติที่ใช้เป็นก๊าซอุดมคติ (Ideal Gas) รวมทั้งเป็นของไหลแบบอัดตัวได้ โดยสมบัติของอากาศแสดงดังตารางที่ 1 และเงื่อนไขการคำนวณของ CFD ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 สมบัติของอากาศ

สมบัติของสาร	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

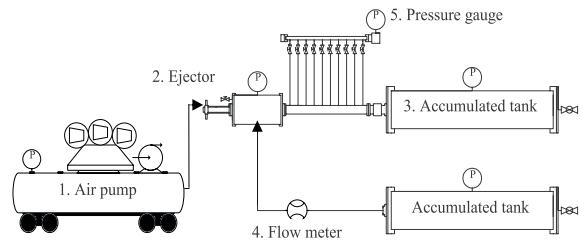
ตารางที่ 2 เงื่อนไขการคำนวณของ CFD

เงื่อนไข	รูปแบบที่เลือกใช้
ขอบเขตของทางเข้า (Inlet Boundary Condition)	Pressure Inlet
ขอบเขตของทางออก (Outlet Boundary Condition)	Pressure Outlet
ระเบียบขั้นตอนในการแก้ไข ปัญหา (Solver)	Density Base
ระเบียบวิธีการคำนวณ (Linearization)	Implicit
แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Model)	Realizable $k-\epsilon$ Model
ระเบียบวิธีการแก้ปัญหาคานาไหล บริเวณใกล้ผนัง (Near-wall Treatment Method)	Standard Near Wall Function

2.3 ชุดอุปกรณ์ทดลองของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด

จากการศึกษาและออกแบบอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด ซึ่งได้นำวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) เป็นเครื่องมือช่วยในการออกแบบอีเจ็คเตอร์สำหรับการจัดสร้างชุดอุปกรณ์ทดลองเพื่อทำการทดลอง โดยระบบของชุดอุปกรณ์ทดลองดังรูปที่ 6 ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 5 อย่าง คือ 1. เครื่องกำเนิดลม (Air Pump) 2. อีเจ็คเตอร์ (Ejector) 3. ถังพัก (Accumulated Tank) 4. อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ (Flow Meter) และ 5. อุปกรณ์วัดความดัน (Pressure Gauge)

การทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของสภาวะการทำงานที่มีต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้



รูปที่ 6 ระบบของชุดอุปกรณ์ทดลองของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด

1) กำหนดความดันทางเข้าปฐมภูมิ (Primary Inlet Pressure, P_p) เท่ากับ 5 bar โดยใช้วาล์วเปิด-ปิดควบคุมความดันที่ทางเข้าปฐมภูมิ

2) กำหนดความดันทางเข้าทุติยภูมิ (Secondary Inlet Pressure, P_s) เท่ากับ 0.8 และ 0.9 bar โดยการใช้วาล์วเปิด-ปิดควบคุมความดันที่ทางเข้าทุติยภูมิ

3) กำหนดตำแหน่งของลิ้น (NTP) ที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดของหัวฉีด ที่ระยะ 0.5 และ 10 มิลลิเมตร (วัดจากระยะห่างระหว่างตำแหน่งคอคอดของหัวฉีดกับตำแหน่งของปลายลิ้น)

4) ความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ (P_b) จะควบคุมความดันโดยการใช้วาล์วเปิด-ปิด

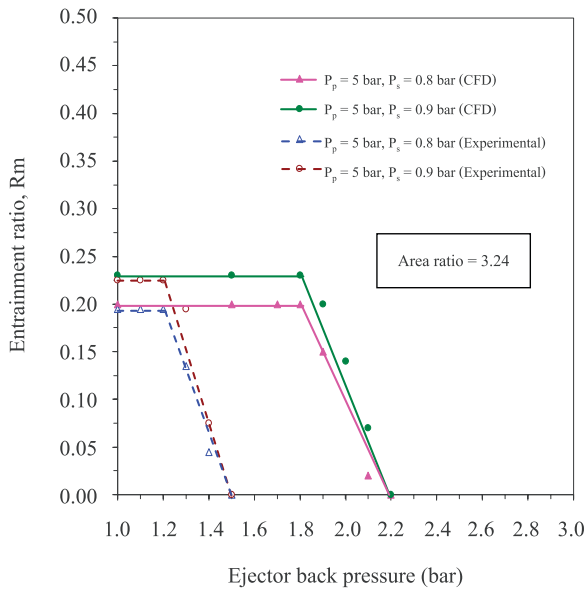
เมื่อควบคุมสภาวะการทำงานของอีเจ็คเตอร์ให้คงที่ในสภาวะการทำงานใดๆ แล้ว จากนั้นอ่านค่าการไหลของอากาศจากอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ เพื่อหาอัตราการไหลของอากาศจากทางเข้าทุติยภูมิ โดยที่อัตราการไหลจากทางเข้าปฐมภูมินั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2 เพื่อหาอัตราส่วนการเหนียวน้ำ (R_m) ของอีเจ็คเตอร์ที่สภาวะการทำงานนั้นๆ

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

โดย

$\dot{m}_p$ คืออัตราการไหลทางเข้าปฐมภูมิ

A_i คือพื้นที่ของคอคอดของหัวฉีด



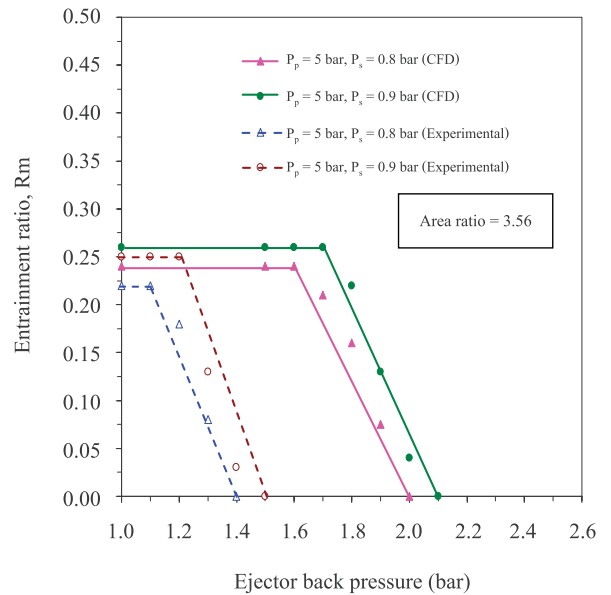
รูปที่ 7 Rm ของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด (NTP = 0 mm) ที่ได้จาก CFD กับชุดอุปกรณ์ทดลอง

- P_p คือความดันที่ทางเข้าปฐมภูมิ
 P_s คือความดันที่ทางเข้าทุติยภูมิ
 R คือค่าคงที่ของแก๊ส
 k คือดัชนีไอเซนโทรปิก

การทดลองเพื่อศึกษาหาความดันที่ผนังของอีเจ็คเตอร์ ทำได้โดยการควบคุมสภาวะการทำงานของอีเจ็คเตอร์ให้คงที่ในสภาวะการทำงานใดๆ จากนั้นอ่านค่าความดันที่ผนังของอีเจ็คเตอร์จากอุปกรณ์วัดความดัน โดยอีเจ็คเตอร์ที่ได้จากการออกแบบมีความยาวรวม 145 มิลลิเมตร ซึ่งได้เจาะรูเพื่อทำการวัดค่าความดันสถิตที่ผนังของอีเจ็คเตอร์รวมทั้งหมด 11 ตำแหน่ง ที่ระยะ 15, 30, 40, 50, 60, 75, 85, 100, 110, 120 และ 135 มิลลิเมตร

2.4 การเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลกับชุดอุปกรณ์ทดลองของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด

ในการศึกษาอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลง

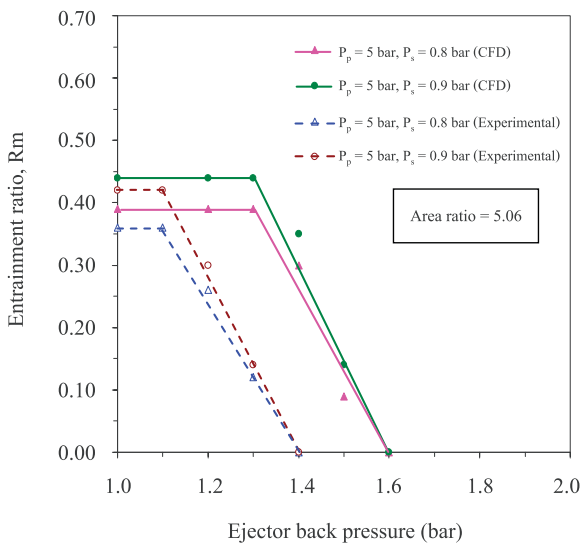


รูปที่ 8 Rm ของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด (NTP = 5 mm) ที่ได้จาก CFD กับชุดอุปกรณ์ทดลอง

พื้นที่หน้าตัดที่คอคอด จะศึกษาโดยนำผลของการจำลองการไหลมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากชุดอุปกรณ์ทดลอง ซึ่งจะเปรียบเทียบอัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (R_m) ค่าความดันวิกฤต (CBP) และค่าความดันสถิตที่ผนังของอีเจ็คเตอร์ (Wall Static Pressure)

3. ผลการวิจัย

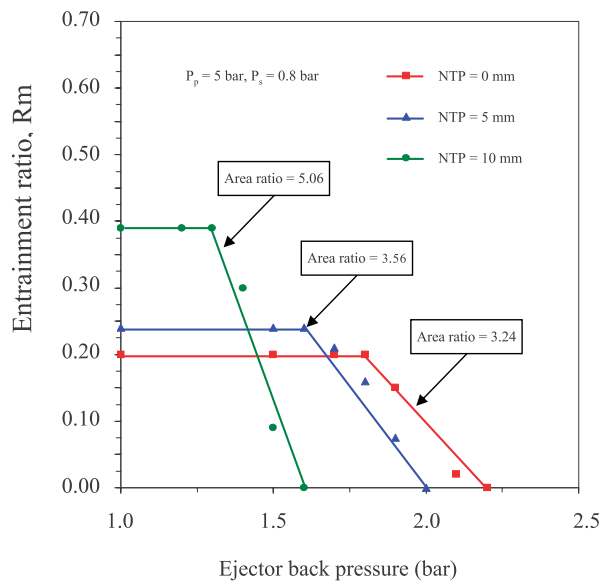
จากรูปที่ 7 พบว่าเมื่ออีเจ็คเตอร์ทำงานภายใต้เงื่อนไขซึ่งมีความดันทางเข้าปฐมภูมิ (P_p) เท่ากับ 5 bar ความดันทางเข้าทุติยภูมิ (P_s) เท่ากับ 0.8 และ 0.9 bar อัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (R_m) ที่ได้จาก CFD จะมีค่าเท่ากับ 0.20 และ 0.23 ตามลำดับ และมีค่าความดันวิกฤต (CBP) ที่เท่ากันคือ 1.8 bar โดยค่าที่ได้จากชุดอุปกรณ์ทดลอง จะมีค่า R_m เท่ากับ 0.195 และ 0.225 ตามลำดับ และมีค่า CBP ที่เท่ากันคือ 1.2 bar ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนของ R_m เท่ากับ 2.5 และ 2.2 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และค่าความคลาดเคลื่อนของ CBP เท่ากับ 33.3 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 9 R_m ของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด (NTP = 10 mm) ที่ได้จาก CFD กับชุดอุปกรณ์ทดลอง

จากรูปที่ 8 พบว่าเมื่ออีเจ็คเตอร์ทำงานภายใต้เงื่อนไขซึ่งมีความดันทางเข้าปฐมภูมิ (P_p) เท่ากับ 5 bar ความดันทางเข้าทุติยภูมิ (P_s) เท่ากับ 0.8 และ 0.9 bar อัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (R_m) ที่ได้จาก CFD จะมีค่าเท่ากับ 0.24 และ 0.26 ตามลำดับ และมีค่าความดันวิกฤต (CBP) ที่ 1.6 และ 1.7 bar ตามลำดับ โดยค่าที่ได้จากชุดอุปกรณ์ทดลอง จะมีค่า R_m เท่ากับ 0.22 และ 0.25 ตามลำดับ และมีค่า CBP ที่ 1.1 และ 1.2 bar ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนของ R_m เท่ากับ 8.3 และ 3.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และค่าความคลาดเคลื่อนของ CBP เท่ากับ 31.3 และ 29.4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากรูปที่ 9 พบว่าเมื่ออีเจ็คเตอร์ทำงานภายใต้เงื่อนไขซึ่งมีความดันทางเข้าปฐมภูมิ (P_p) เท่ากับ 5 bar ความดันทางเข้าทุติยภูมิ (P_s) เท่ากับ 0.8 และ 0.9 bar อัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (R_m) ที่ได้จาก CFD จะมีค่าเท่ากับ 0.39 และ 0.44 ตามลำดับ และมีค่าความดันวิกฤต

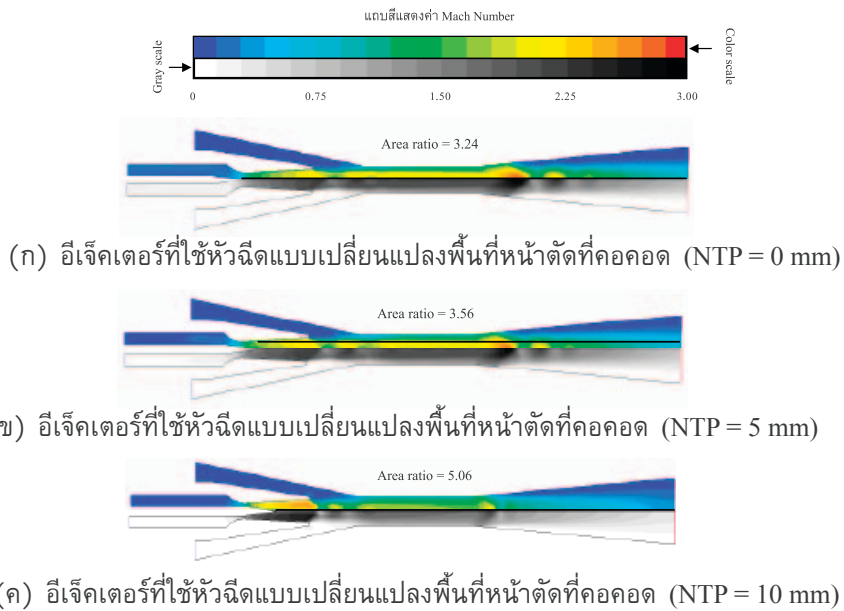


รูปที่ 10 R_m ของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของลิ้ม (NTP) ที่ได้จาวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD)

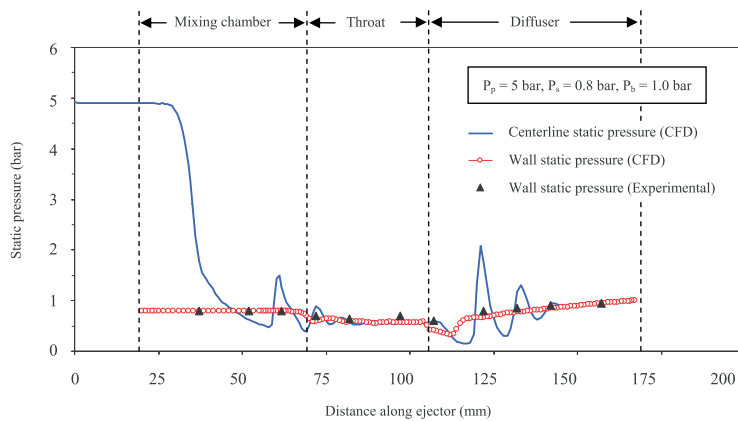
(CBP) ที่เท่ากันคือ 1.3 bar โดยค่าที่ได้จากชุดอุปกรณ์ทดลองจะมีค่า R_m เท่ากับ 0.36 และ 0.42 ตามลำดับ และมีค่า CBP ที่เท่ากันคือ 1.1 bar ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนของ R_m เท่ากับ 7.7 และ 4.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และค่าความคลาดเคลื่อนของ CBP เท่ากับ 15.4 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 10 การศึกษาอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด ด้วยวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) พบว่าเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของลิ้ม (NTP) เท่ากับ 0, 5 และ 10 มิลลิเมตร จะทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (R_m) ของอีเจ็คเตอร์เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยเป็นความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการเปลี่ยนตำแหน่งของลิ้มที่มีต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (R_m) และค่าความดันวิกฤต (CBP)

จากรูปที่ 11 เมื่อเปรียบเทียบค่า Mach Number ของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด ที่ตำแหน่งของลิ้ม (NTP) เท่ากับ 0, 5 และ 10 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่า A_r เท่ากับ 3.24, 3.56 และ 5.06



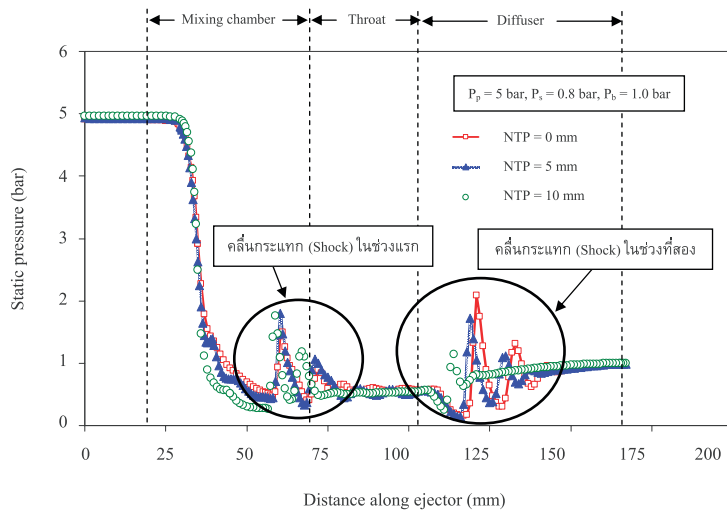
รูปที่ 11 แถบสีแสดงค่า Mach Number ของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของลิ้ม (NTP) ที่ได้จากการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD)



รูปที่ 12 ค่าความดันสถิตของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด (NTP = 0 mm) ที่ได้จากการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) กับชุดอุปกรณ์ทดลอง

ตามลำดับ โดยใช้แถบสีแสดงค่า Mach Number ซึ่งเป็นค่าความเร็วของของไหลในอีเจ็คเตอร์เทียบกับความเร็วของเสียง พบว่าลักษณะลำพุ่ง (Jet-core) หรือลักษณะการไหลที่ผ่านออกมาจากหัวฉีดของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด ที่ตำแหน่งของลิ้ม (NTP) เท่ากับ 0 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่า A_r เท่ากับ 3.24 จะ

มีลำพุ่งที่มีขนาดกว้างและยาวที่สุดผ่านออกมาจากหัวฉีดเนื่องจากมีขนาดพื้นที่ของหัวฉีดมากที่สุด ซึ่งจะขัดขวางการไหลของของไหลจากทางเข้าทุติยภูมิให้อัตราส่วนการเหนียวน้ำ (Rm) ของอีเจ็คเตอร์ลดลง แต่ในทางตรงกันข้ามจะส่งผลต่อค่าความดันวิกฤต (CBP) โดยจะทำให้อีเจ็คเตอร์มีค่าความดันวิกฤตเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 13 ความดันสถิต (Static Pressure) ของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคออดที่แกนกลางของการไหล เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของลิ้ม (NTP) ที่ได้จากวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD)

จากรูปที่ 12 เปรียบเทียบค่าความดันสถิต (Static Pressure) ของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคออด ที่ตำแหน่งของลิ้ม (NTP) เท่ากับ 0 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่า A_r เท่ากับ 3.24 ในระบบอากาศอัด โดยอีเจ็คเตอร์ทำงานภายใต้เงื่อนไขซึ่งมีความดันทางเข้าปฐมภูมิ (P_p) เท่ากับ 5 bar ความดันทางเข้าทุติยภูมิ (P_s) เท่ากับ 0.8 bar และความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ (P_b) เท่ากับ 1.0 bar ค่าความดันสถิตที่ผนังของอีเจ็คเตอร์ (Wall Static Pressure) ที่ได้จาก CFD กับชุดอุปกรณ์ทดลองจะมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 10.3 เปอร์เซ็นต์ และที่ตำแหน่งของลิ้ม (NTP) เท่ากับ 5 และ 10 มิลลิเมตร จะมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 12.3 และ 9.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากรูปที่ 13 หากเปรียบเทียบค่าความดันสถิต (Static Pressure) ที่แกนกลางของการไหล (Centerline) ของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคออด ที่ตำแหน่งของลิ้ม (NTP) เท่ากับ 0, 5 และ 10 มิลลิเมตร พบว่าขนาดของคลื่นกระแทก (Shock) ที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคออดนั้นจะมีความรุนแรงใกล้เคียงกัน โดยสังเกต

ได้จากความสูงของคลื่นกระแทก (Shock) ที่เกิดขึ้นตลอดความยาวของอีเจ็คเตอร์ ซึ่งการเกิดคลื่นกระแทก (Shock) ภายในอีเจ็คเตอร์นั้น จะเกิดขึ้นโดยแบ่งออกเป็นสองช่วงคือ ช่วงแรกเกิดขึ้นที่บริเวณปากทางออกของหัวฉีดจากการไหลของของไหลที่มีการไหลแบบอัดตัวได้ โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความดันของลำพุ่งที่ออกจากหัวฉีดและความดันรอบข้างของลำพุ่ง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเร็วของการไหล การเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดในระหว่างการไหล ขนาดของหัวฉีด ความดันของของไหลจากทางเข้าปฐมภูมิ รวมไปถึงความดันของของไหลจากทางเข้าทุติยภูมิด้วย และช่วงที่สองเกิดขึ้นที่บริเวณปากทางเข้าของท่อกระจายตัว ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความดันของของไหลผสมในอีเจ็คเตอร์ และความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ โดยสามารถสังเกตการเกิดคลื่นกระแทกทั้งสองช่วงได้จากลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความดันสถิตที่แกนกลางของการไหล ซึ่งหากการไหลในอีเจ็คเตอร์นั้นเกิดคลื่นกระแทกที่รุนแรงจะส่งผลทำให้อัตราส่วนการเหนียวนา (R_m) ลดลง แต่ค่าความดันวิกฤต (CBP) จะเพิ่มสูงขึ้น

4. อภิปรายผลและสรุป

จากการศึกษาการไหลของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด ที่ทำงานโดยใช้อากาศอัดได้นำวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) มาประกอบเป็นเครื่องมือช่วยในการศึกษาคุณลักษณะต่างๆ รวมถึงลักษณะการไหลในอีเจ็คเตอร์ โดยผลที่ได้จากการจำลองการไหลในอีเจ็คเตอร์จะนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากชุดอุปกรณ์ทดลอง พบว่าเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของลิ้ม (NTP) จะทำให้อัตราส่วนการเหนียวน้ำ (R_m) ของอีเจ็คเตอร์เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งของลิ้มนั้น เปรียบเสมือนการเปลี่ยนแปลงค่า $Area\ Ratio\ (A_r)$ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์เป็นอย่างมาก เช่นที่ตำแหน่งของลิ้ม (NTP) เท่ากับ 0, 5 และ 10 มิลลิเมตร จะมีค่า A_r เท่ากับ 3.24, 3.56 และ 5.06 ตามลำดับ โดยหากอีเจ็คเตอร์มีค่า A_r ที่สูง จะทำให้อีเจ็คเตอร์มีอัตราส่วนการเหนียวน้ำ (R_m) สูง แต่ค่าความดันวิกฤต (CBP) นั้น จะมีค่าลดลง

ดังนั้นจึงทำให้ทราบว่าสามารถนำอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดมาใช้ในงานจริงได้ เพื่อช่วยในการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการเหนียวน้ำ (R_m) ของอีเจ็คเตอร์แม้ระบบจะทำงานอยู่ก็ตาม ซึ่งจะทำให้อีเจ็คเตอร์นั้นมีความยืดหยุ่นต่อสภาวะการทำงานเพิ่มมากขึ้น แต่ทั้งนี้หากจะนำอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดไปประยุกต์ใช้กับงานในด้านต่างๆ ก็ควรจะต้องคำนึงถึงผลกระทบของลิ้มที่มีต่อค่าความดันวิกฤต (CBP) ของ อีเจ็คเตอร์ด้วย

แม้ว่าอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอด ที่ทำงานโดยใช้อากาศอัดนั้น จะสามารถเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการเหนียวน้ำ (R_m) ของอีเจ็คเตอร์ได้ ด้วยการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของลิ้ม (NTP) โดยอัตราส่วนการเหนียวน้ำ (R_m) ที่ได้จากวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) กับชุดอุปกรณ์ทดลองจะมีความแตกต่างไม่มากนัก แต่ค่าความดันวิกฤต (CBP) นั้น จะมีค่าที่แตกต่างกันมาก ซึ่งอาจเป็นผลกระทบของลิ้มที่มีต่อการไหลของของไหลในอีเจ็คเตอร์ โดยอาจเกิดจากการวางตำแหน่งของลิ้มในชุดอุปกรณ์ทดลองที่ไม่มีความ

แม่นยำพอ รวมไปถึงวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) อาจจะไม่ครอบคลุมผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการไหลได้ไม่เพียงพอ ดังนั้นจึงควรศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการใช้ลิ้มในการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดของหัวฉีดเพิ่มมากยิ่งขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการนำอีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่คอคอดไปประยุกต์ใช้ร่วมกับงานในด้านต่างๆ ต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ให้การสนับสนุนงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Chunnanond and S. Aphornratana, "Ejectors: application in refrigeration technology," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 8, pp. 129-155, 2004.
- [2] K. Pianthong, W. Seehanam, M. Behnia, T. Sriveerakul, and S. Aphornratana, "Investigation and improvement of ejector refrigeration system using computational fluid dynamics technique," *Energy Conversion and Management*, vol. 48, pp. 2556-2564, 2007.
- [3] Z. Aidoun and M. Ouzzane, "The effect of operation conditions on the performance of a supersonic ejector for refrigeration," *International Journal of Refrigeration*, vol. 27, pp. 974-984, 2004.
- [4] S. Aphornratana, S. Chungpaibulpatana, and P. Srikgirin, "Experimental investigation of an ejector refrigerator: Effect of mixing chamber geometry on system performance," *International Journal of Energy Research*, vol. 25, pp. 397-411, 2001.
- [5] T. Sriveerakul, S. Aphornratana and K.

- Chunnanond, "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, 2007a.
- [6] T. Sriveerakul, S. Aphornratana, and K. Chun-nanond, "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, 2007b.
- [7] Y. Zhu, W. Cai, C. Wen, and Y. Li, "Numerical investigation of geometry parameters for design of high performance ejectors," *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, pp. 898-905, 2009.
- [8] R. Yapici, H.K. Ersoy, A. Aktoprakoglu, H.S. Halkaci, and O. Yigit, "Experimental determination of the optimum performance of ejector refrigeration system depending on ejector area ratio," *International Journal of Refrigeration*, vol. 31, pp. 1183-1189, 2008.
- [9] S. Varga, A.C. Oliveira, and B. Diaconu, "Influence of geometrical factors on steam ejector performance - A numerical assessment," *International Journal Of Refrigeration*, pp.1-8, 2009.
- [10] S. Varga, A.C. Oliveira, X. Ma, S.A. Omer, W. Zhang, and S.B. Riffat, "Experimental and numerical analysis of a variable area ratio steam ejector," *International Journal of Refrigeration*, pp. 2-5, 2010.
- [11] N. Suvarnakuta, K. Uthai Korn, T. Sriveerakul, and S. Aphornratana, "A study of flow in a ejector eqector equipped with variable throat area of the primary nozzle using CFD simulation," *KKU Engineering Journal*, vol. 37, no. 3 pp. 181-190, 2010 (in Thai).
- [12] J.H. Keenan and E.P. Neumann, "A simple air ejector," *Transactions of the ASME Journal of Applied Mechanics*, vol. 64, pp. 75-81, 1942.
- [13] J.H. Keenan, E.P. Neumann and F. Lustwerk, "An investigation of ejector design by analysis and experiment," *Transactions of the ASME Journal of Applied Mechanics*, vol. 72, pp. 299-309, 1950.
- [14] S. Aphornratana, "Theoretical Study of a Steam-Ejector Refrigerator," *RERIC International Energy Journal*, vol. 18, no.1, pp. 61-74, 1996.
- [15] S. He, Y. Li, and R.Z. Wang, "Progress of mathematical modeling on ejectors," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 1760-1780, 2009.
- [16] ESDU International Ltd. "Design for steam driven flow," *Ejector and jet pump*, Data item 86030, UK, 1985.