

การหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์กับเงื่อนไขการทำงานและ รูปร่างของอีเจ็คเตอร์โดยใช้วิธีแบบโครงสร้างพื้นผิว

Determining the Corresponding Equations between Ejector Performance and Operating Conditions and Ejector Geometries by Using Response Surface Methodology

วิระพันธ์ สีหนาม¹ กุลเชษฐ์ เพียรทอง² ชญาณนท์ แสงมณี^{3*}

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

85 ต. เมืองศรีโค อ. วารินชำราบ จ. อุบลราชธานี 34190

²รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

85 ต. เมืองศรีโค อ. วารินชำราบ จ. อุบลราชธานี 34190

³อาจารย์ สาขาวิศวกรรมการทำความเย็นและการปรับอากาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถ.สุรนารายณ์ ต. ในเมือง อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

Wirapan Seehanam¹ Kulachate Pianthong² Chayarnon Saengmanee^{3*}

¹Assistant Professor, Department of mechanical engineering, Faculty of engineering,
Ubon Ratchathani University, 85 Sathonlamark Road, Warin Chamrap, Ubon Ratchathani, 34190

²Associate Professor, Department of mechanical engineering, Faculty of engineering,
Ubon Ratchathani University, 85 Sathonlamark Road, Warin Chamrap, Ubon Ratchathani, 34190

³Teacher, Department of Refrigeration and Air Conditioning Engineering,
Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan,

744 Suranarai Road, Naimuang, Muang, Nakhon Ratchasima, 30000

*Corresponding author: Email: chayarnon.sa@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ในระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ ซึ่งได้แก่ อิทธิพลจากเงื่อนไขการทำงานได้ ได้แก่ อุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ อุณหภูมิเครื่องระเหย และ อิทธิพลของรูปร่างอีเจ็คเตอร์ ได้แก่ อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของคอคอดหัวฉีดกับห้องผสม (Area ratio, AR) และอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดปากทางออกกับคอคอดของหัวฉีด (Area of throat ratio, ATR) โดยศึกษาด้วยระเบียบวิธีพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) วางแผนการศึกษาด้วยวิธี Central Composite Design (CCD) และทำการวิเคราะห์ผลของปัจจัยต่างๆเหล่านั้น ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (Entrainment ratio, Rm) และความดันทางออกวิกฤต (Critical back pressure, CBP) ของอีเจ็คเตอร์ ด้วยวิธีแบบโครงสร้างพื้นผิว (Response Surface Methodology, RSM) เพื่อหาสมการถดถอย (Regression equation) จากผลการศึกษา พบว่า สภาวะการทำงานและรูปร่างของอีเจ็คเตอร์มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ การสร้างความสัมพันธ์ในรูปแบบเชิงเส้นโค้ง (Quadratic

model) มีความเหมาะสม โดยมีระดับความเชื่อมั่นที่ 95% แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความดันทางออกวิกฤตที่ได้ยังมีค่าเบี่ยงเบนจากการทดลองอยู่เล็กน้อยเพราะมีหลายปัจจัยที่ไม่ได้พิจารณาในการศึกษานี้

คำสำคัญ: อีเจ็คเตอร์ วิธีโครงร่างพื้นผิว ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ที่ใช้ไอน้ำ ระบบทำความเย็น

ABSTRACT

This study is to investigate the effect of variously important parameters on an ejector performance in steam ejector refrigeration system. The parameters are the operating conditions which are boiler and evaporator temperature and ejector geometries which are area ratio (AR) and area of throat ratio (ATR). Computational fluid dynamics (CFD) is employed to examine such effects with statistical research matrix design called Central Composite Design (CCD). The regression equation of relationships between parameter and ejector performance being entrainment ratio (R_m) and critical back pressure (CBP) are determined by using the response surface methodology (RSM). From simulation results, RSM analysis indicates that the operating conditions and ejector geometries have the significant effect on ejector performances. Furthermore, the quadratic model being properly with reliability above 95%. However, critical back pressure values given from the regression is slightly deviated because some parameters are not considered in this study.

Keyword: Ejector, Response surface methodology, Steam ejector refrigeration system, Refrigeration system.

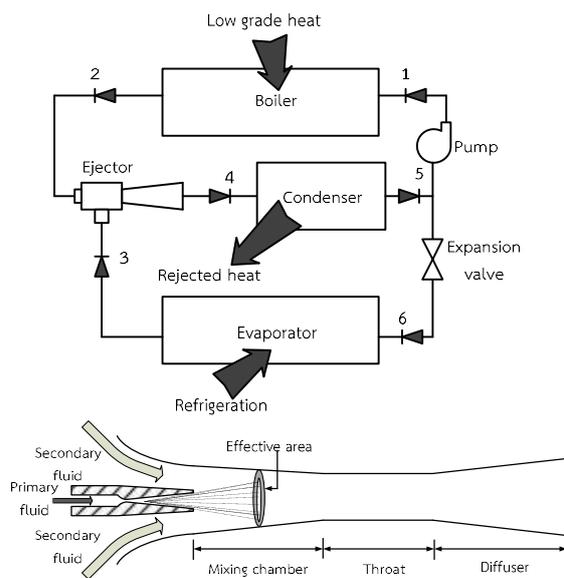
1. บทนำ

ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์เป็นระบบทำความเย็นทางเลือกเพื่อการนำพลังงานความร้อนทิ้งหรือความร้อนราคาถูกมาใช้ในการขับเคลื่อนระบบทำความเย็น โดยเครื่องอัดไอ (compressor) ในระบบทำความเย็นทั่วไปจะถูกแทนที่ด้วยระบบให้กำเนิดไอสารทำงานแรงดันสูงจากความร้อน หลักการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์แสดงดังรูปที่ 1 ความร้อนจะถูกป้อนเข้าเครื่องกำเนิดไอ (boiler) เพื่อต้มสารทำความเย็นให้เดือดแล้วกลายเป็นไอแรงดันสูง ไอสารทำความเย็นนี้จะถูกป้อนเข้าอีเจ็คเตอร์เป็นสารปฐมภูมิ และไหลผ่านหัวฉีด (nozzle) ก่อให้เกิดบริเวณความดันต่ำภายในอีเจ็คเตอร์ ทำให้สารทุติยภูมิจากเครื่องระเหย (evaporator) จะถูกเหวี่ยงเข้าผสมกับสารปฐมภูมิ ทำให้ความดันของเครื่องระเหยลดลงและสารทำความเย็น

พร้อมที่ระเหิดที่อุณหภูมิต่ำและรับความร้อนจากพื้นที่ทำความเย็น ทั้งนี้ของผสมที่ออกจากอีเจ็คเตอร์จะถูกส่งไปยังเครื่องควบแน่น (condenser) เพื่อคายความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม ที่เครื่องควบแน่นนี้สารทำความเย็นจะควบแน่นกลายเป็นของเหลว หลังจากนั้น สารทำความเย็นบางส่วนจะถูกปั๊มกลับไปยังเครื่องกำเนิดไอ ในขณะที่สารทำความเย็นส่วนที่เหลือนั้นจะไหลผ่านลิ้นลดความดัน (expansion valve) เข้าสู่เครื่องระเหยต่อไป

จากหลักการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ ดังที่กล่าวในย่อหน้าผ่านมา จะเห็นได้ว่า อีเจ็คเตอร์เป็นเสมือนหัวใจของระบบ สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบโดยตรง ทั้งนี้สมรรถนะหรือความสามารถในการทำงานของอีเจ็คเตอร์ในระบบทำความเย็นนั้นระบุด้วยสองพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ อัตราส่วนการเหวี่ยงนำ (Entrainment ratio, R_m) ซึ่ง

เป็นอัตราส่วนอัตราการไหลของสารทุติยภูมิต่อสารปฐมภูมิ ดังสมการที่ (1) และความดันทางออกวิกฤต (Critical back pressure, CBP) ซึ่งเป็นความดันทางออกของอีเจ็คเตอร์สูงสุดที่อัตราส่วนการเหนี่ยวนำของอีเจ็คเตอร์จะคงที่ พารามิเตอร์เหล่านี้จะขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานและขนาดรูปร่างของอีเจ็คเตอร์



รูปที่ 1 ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์และ
คุณลักษณะการไหลผ่านในอีเจ็คเตอร์

$$Rm = \frac{\text{mass flow rate of secondary fluid}}{\text{mass flow rate of primary fluid}} \quad (1)$$

ผ่านมามีการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆกับการทำงานของอีเจ็คเตอร์อย่างแพร่หลาย ซึ่งผลการศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขการทำงานในระบบทำความเย็นพบว่าความดันเครื่องกำเนิดไอที่สูงขึ้นจะทำให้ความดันทางออกวิกฤตของอีเจ็คเตอร์เพิ่มขึ้น แต่ส่งผลให้อัตราการเหนี่ยวนำลดลง ขณะที่หากเครื่องระเหยมีความดันสูง อัตราการเหนี่ยวนำและความดันทางออกวิกฤตของอีเจ็คเตอร์จะสูงตามไปด้วย [1] จะเห็นได้ว่าสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์นั้นจะแปรเปลี่ยนตามสภาวะการทำงานของระบบไม่ได้มีค่าคงที่ ดังนั้นการออกแบบรูปร่างอีเจ็คเตอร์

ให้เหมาะสมกับสภาวะต่างๆของระบบจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาพฤติกรรมการไหลและคุณลักษณะของอีเจ็คเตอร์ในเชิงลึกและพัฒนาเครื่องมือช่วยศึกษาซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบอีเจ็คเตอร์ให้ได้รูปร่างที่เหมาะสมหรือช่วยตรวจสอบคุณสมบัติของอีเจ็คเตอร์ก่อนนำไปใช้งานจริง

ในปี ค.ศ. 1942 และ ค.ศ. 1950 Keenan และคณะ [2-3] ได้เสนอแบบจำลองทางทฤษฎีการไหลแบบหนึ่งมิติที่เกิดขึ้นของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้อากาศเป็นสารทำงาน ซึ่งแบบจำลองนี้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบอีเจ็คเตอร์อย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากแบบจำลองไม่ซับซ้อนและง่ายต่อความเข้าใจ แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองของ Keenan ยังมีข้อบกพร่องอยู่หลายประการ โดยเฉพาะการไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ของอีเจ็คเตอร์ กรณีที่อีเจ็คเตอร์จะเหนี่ยวนำสารทุติยภูมิได้อัตราคงที่ แม้ความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์จะลดลงต่ำมากก็ตาม เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ ในปี ค.ศ. 1997 Munday และ Bagster [4] ได้นำเสนอแบบจำลองทางทฤษฎีใหม่ที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ โดยอธิบายถึงการเกิด Chocking ของสารทุติยภูมิ (ที่เสมือนการไหลผ่านคอขวด) ก่อนผสมกับสารปฐมภูมิที่มาจากหัวฉีด พร้อมกันนั้น Munday และ Bagster ได้นิยามพื้นที่หน้าตัดของคอขวดสมมติ นั้นขึ้นมาเรียกว่า “effective area” (แสดงดังรูปที่ 1) ซึ่งจะมีขนาดขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการทำงานของระบบอีเจ็คเตอร์ ถึงแม้แบบจำลองของ Munday และ Bagster จะมีความถูกต้องและครอบคลุมปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในอีเจ็คเตอร์ทั้งหมดก็ตาม แต่ด้วยความซับซ้อนของแบบจำลองทำให้มีความยุ่งยากในการใช้งานทำให้ไม่เป็นที่นิยมที่จะนำมาใช้ในการศึกษาหรือออกแบบอีเจ็คเตอร์เท่าที่ควร

นอกจากการใช้ทฤษฎีของไหลเพื่อการศึกษาการไหลในอีเจ็คเตอร์ แล้วเมื่อเกือบ 20 ปีที่ผ่านมาได้เริ่มมีการนำเอาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมาใช้ในการจำลองการไหลและศึกษาพฤติกรรมต่างๆของอีเจ็คเตอร์ โดยในปี 2001 Riffat และ Omer [5] ได้ตีพิมพ์ผลงานวิจัยที่เป็นครั้งแรกที่มีการนำเอาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่เรียกว่าพลศาสตร์

การไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamic, CFD) ในการจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์ในระบบทำความเย็น โดยใช้คอมพิวเตอร์สมรรถนะสูง (super computer) ซึ่งถือเป็นจุดเริ่มต้นของการนำเอา CFD มาเป็นเครื่องมือช่วยคำนวณและออกแบบอีเจ็คเตอร์ในระบบทำความเย็น แต่อย่างไรก็ตามงานศึกษาของ Riffat และ Omer ไม่ได้รายงานผลกระทบของอิทธิพลหรือปัจจัยต่างๆที่มีผลกับอีเจ็คเตอร์อย่างครบถ้วนเท่าที่ควร อาจจะเนื่องจากช่วงเวลานั้นแบบจำลองของระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและคอมพิวเตอร์ยังมีประสิทธิผลและประสิทธิภาพในการคำนวณต่ำและอาจใช้เวลาในการคำนวณแต่ละกรณีศึกษา ดังนั้น ในเวลาต่อมา เมื่อแบบจำลองและคอมพิวเตอร์ถูกพัฒนาขึ้น การใช้ CFD เพื่อศึกษา อีเจ็คเตอร์ในเชิงลึกจึงมีมากยิ่งขึ้นตามไปด้วย โดยการศึกษาที่ใช้ CFD ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ อย่างจริงจังนั้นถูกนำเสนอพร้อมๆกันในปี ค.ศ. 2007 ได้แก่การศึกษาของ Pianthong และคณะ [6] และ Sriveerakul และคณะ [7-8] ซึ่งนักวิจัยเหล่านี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลการจำลอง CFD กับผลการทดลอง รวมทั้งได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหยรูปร่างของอีเจ็คเตอร์ พบว่า ผลของ CFD ให้ผลเป็นที่ยอมรับเมื่อเทียบกับการทดลอง อีกทั้งยังทำให้เห็นปรากฏการณ์การไหลและการทำงานของอีเจ็คเตอร์ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ซึ่งถือเป็นการเปิดแนวทางใหม่ในการศึกษาและออกแบบอีเจ็คเตอร์สมัยใหม่ที่จะต้องทำการจำลองการไหลด้วย CFD เสมอ

แต่อย่างไรก็ตาม ถึงแม้จะมีการนำเอา CFD มาใช้ในการศึกษาหรือออกแบบอีเจ็คเตอร์กันอย่างแพร่หลาย แต่การศึกษาเหล่านั้นเจาะจงเฉพาะบางปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของอีเจ็คเตอร์เท่านั้น และเป็นไปอย่างกระจัดกระจาย ไม่มีการนำผลมาเรียบเรียงหรือประมวลข้อมูลให้เป็นเชิงตัวเลข ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จะได้ทำการจำลองการไหลในอีเจ็คเตอร์ด้วย CFD เพื่อหาอิทธิพลปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ในระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ อุณหภูมิเครื่องระเหย อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของคอคอดหัวฉีดกับ

ห้องผสม และอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดปากทางออกกับคอคอดของหัวฉีด แล้วทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่างๆ เหล่านี้ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (R_m) และความดันทางออกวิกฤต (CBP) ด้วยวิธีตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว (Response Surface Methodology, RSM) เพื่อหาสมการถดถอย (Regression equation) ของความสัมพันธ์เพื่อประโยชน์ในการนำไปใช้ออกแบบอีเจ็คเตอร์ในระบบทำความเย็นต่อไป

2. เงื่อนไขและแบบจำลอง CFD ของอีเจ็คเตอร์

ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ในการศึกษานี้จะมุ่งที่การใช้น้ำเป็นสารทำงานแทนการใช้สารทำความเย็นในท้องตลาดมีข้อดีกว่าสารทำความเย็นชนิดอื่นหลายประการ อันได้แก่ ราคาถูก เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ มีจุดเดือดและความร้อนแฝงสูงซึ่งทำให้ระบบสามารถถ่ายเทพลังงานได้ในปริมาณที่มาก อีกทั้งอุปกรณ์ที่ใช้รองรับระบบจัดหาและซ่อมบำรุงง่าย [9] รูปร่างอีเจ็คเตอร์และหัวฉีดที่ใช้ในการศึกษานี้แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งเป็นอีเจ็คเตอร์ชนิดห้องผสมความดันคงที่ (Constant pressure mixing, CPM) โดยจะทำการจำลองการไหลด้วย CFD ในโปรแกรม Fluent 6.3 ทั้งนี้เงื่อนไขของแบบจำลองทาง CFD ใช้เป็นแบบเดียวกับการศึกษาของ Pianthong และคณะ [6] ซึ่งเป็นที่ยอมรับถึงความถูกต้องเมื่อทำการเทียบกับการทดลองและแบบจำลองทางทฤษฎี อีกทั้งเป็นแบบจำลองที่ไม่ซับซ้อนทำให้การคำนวณมีโอกาสให้ผลเฉลยที่ลู่เข้าและใช้เวลาคำนวณไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองตัวอื่น ๆ แบบจำลอง CFD ของการไหลในอีเจ็คเตอร์สรุปไว้ในตารางที่ 1 ดังรายละเอียด สารทำงานเป็นไอน้ำอัดตัวที่ความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงตามสมการแก๊สจินตภาพ (Idea gas model) สร้างรูปร่างของแบบจำลองอีเจ็คเตอร์ลักษณะแบบสมมาตรในแนวแกน (axis-symmetry) ที่มีกริดรูปร่างสี่เหลี่ยม และจำลองความปั่นป่วนด้วยแบบจำลอง k-ε model

ในการทำการจำลองการไหลในอีเจ็คเตอร์ด้วย CFD เพื่อให้ทราบอัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (Entrainment

ratio, Rm) และความดันทางออกวิกฤต (Critical back pressure, CBP) ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานและรูปร่างของอีเจ็คเตอร์ ซึ่งขนาดของท่อหัวฉีดและอีเจ็คเตอร์เป็นปัจจัยด้านรูปร่างที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของอีเจ็คเตอร์โดยตรง ในการศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดอัตราส่วนที่สำคัญสองค่าคือ อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของคอคอดหัวฉีดต่อห้องผสม (AR) และอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดปากทางออกต่อคอคอดของหัวฉีด (ATR) ซึ่งนิยามดังสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ เพื่อการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนทั้งสอง จะกำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางที่คอคอด (D_n) มีค่าคงที่เท่ากับ 2 mm และขนาดรูปร่างในแนวยาวมีค่าคงที่ (ดังรูปที่ 2) เช่นเดียวกันทุกกรณี เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอีเจ็คเตอร์ในการศึกษาอยู่ในขอบเขตที่ทำงานได้

$$AR = \frac{A_t}{A_n} \quad (2)$$

$$ATR = \frac{A_{exp}}{A_n} \quad (3)$$

โดยที่

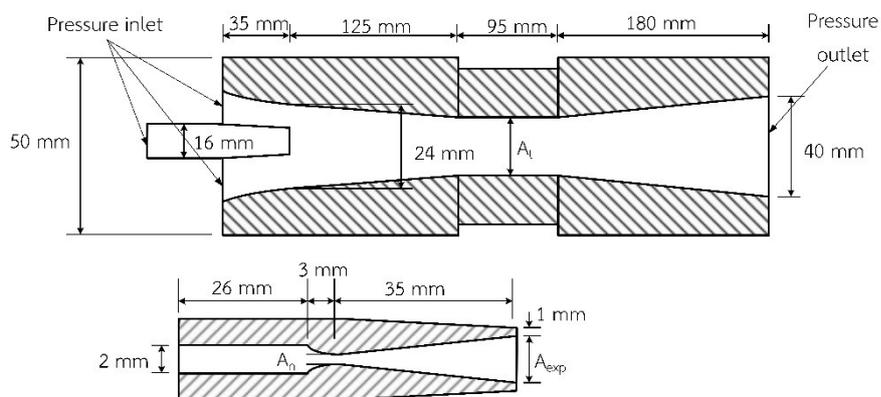
A_t คือ พื้นที่หน้าตัดคอคอดอีเจ็คเตอร์

A_n คือ พื้นที่หน้าตัดคอคอดหัวฉีด

A_{exp} คือ พื้นที่หน้าตัดปากทางออกของหัวฉีด

3. การออกแบบการทดลอง

การศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของอีเจ็คเตอร์ในระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ โดยใช้การวางแผนการศึกษาแบบ Central Composite Design (CCD) ซึ่งมีตัวแปร 4 ตัวในการศึกษา คือ อุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ (T_g) อุณหภูมิเครื่องระเหย (T_e) อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของคอคอดหัวฉีดกับห้องผสม (AR) และอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดปากทางออกกับคอคอดของหัวฉีด (ATR) กำหนดระดับของปัจจัยในการศึกษาออกเป็น 3 ระดับ คือ ต่ำ กลางและสูง ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งได้เงื่อนไขการคำนวณทั้งหมด 30 กรณี ทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่างๆเหล่านั้นต่ออัตราส่วนการเหนียวน้ำ (Rm) และความดันทางออกวิกฤต (CBP) และวิเคราะห์ผลที่ได้ด้วยระเบียบวิธีทางสถิติแบบตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว (Response surface methodology, RSM) วิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) และความแปรปรวน (ANOVA) ใช้สำหรับทดสอบความมีนัยสำคัญของความสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิวและปัจจัยในระดับความ



รูปที่ 2 รูปร่างอีเจ็คเตอร์และหัวที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 1 แบบจำลอง CFD ของการไหลในอีเจ็คเตอร์

รูปร่าง	แบบสมมาตรในแนวแกน (axis-symmetry)
สารทำงาน	ไอน้ำอิ่มตัว
แบบจำลองความหนาแน่น	แก๊สจินตภาพ (Ideal gas model)
แบบจำลองความปั่นป่วน	k- ϵ model
ชนิดขอบเขตทางเข้าหัวฉีดและอีเจ็คเตอร์	Pressure inlet
ชนิดขอบเขตทางออกอีเจ็คเตอร์	Pressure outlet
Near wall function	Standard near wall function

ตารางที่ 2 ระดับของปัจจัย

ตัวแปรอิสระ	ระดับ			รหัส		
	ต่ำ	กลาง	สูง	ต่ำ	กลาง	สูง
T_e (°C)	5	10	15	-1	0	1
T_g (°C)	110	130	150	-1	0	1
AR	70	95	120	-1	0	1
ATR	10	17.5	25	-1	0	1

เชื่อมั่น 95% โดยทั้งหมดประมวลผลในโปรแกรมสำเร็จรูป Design-Expert® version 7

4. ผลการศึกษาและสมการถดถอย

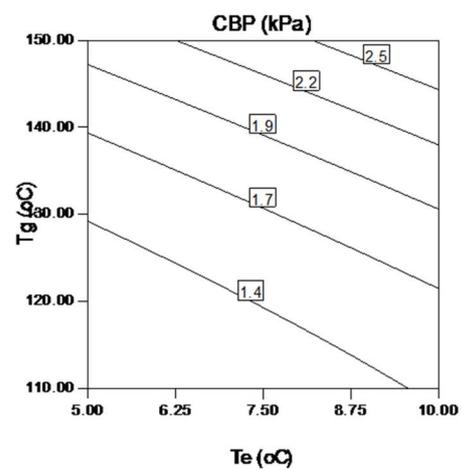
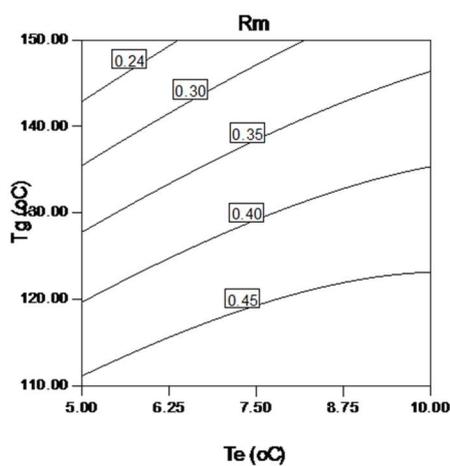
4.1 รูปแบบทางสถิติและสมการถดถอย

จากผลการศึกษาจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์ในระบบทำความเย็นด้วย CFD ผลกระทบของปัจจัยทั้ง 4 อย่างได้แก่ อุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ (T_g) อุณหภูมิเครื่องระเหย (T_e) อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของคอคอดหัวฉีดกับห้องผสม (AR) และอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดปากทางออกกับคอคอดของหัวฉีด (ATR) ที่มีต่ออัตราการเหนียวนำ (Rm) และความดันทางออกวิกฤต (CBP)

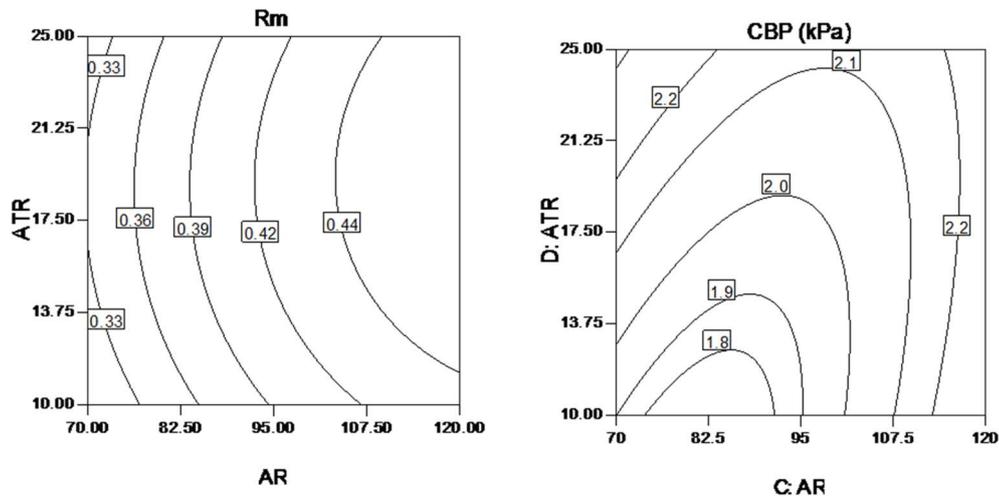
พบว่ามีความเหมาะสมในการสร้างความสัมพันธ์ในรูปแบบเชิงเส้นโค้ง (Quadratic model) ดังแสดงในตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาจากค่า p-value ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าค่า p-value ของแต่ละรูปแบบมีค่าน้อยกว่า 0.05 (เท่ากับ 0.0001 และ 0.002) และค่า p-value ของการทดสอบ lack of fit มีค่ามากกว่า 0.05 (มีค่าเท่ากับ 0.1135 และ 0.1731) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูปแบบจำลองการถดถอยหรือความสัมพันธ์ที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลและสามารถยอมรับได้ นอกจากนี้แล้วจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R^2) ของแต่ละรูปแบบมีค่าสูงใกล้เคียง 1 ซึ่งเป็นการยืนยันให้เห็นว่ารูปแบบการถดถอยที่ได้เป็นรูปแบบที่เหมาะสม

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์รูปแบบทางสถิติและสมการถดถอย

Model	Response	Regression	R ²	P-value model	P-value lack of fit
Quadratic	Rm	$= - 0.63181 - 0.0184 \times T_e + 0.00397 \times T_g$ $+ 0.019705 \times AR$ $+ 0.006458 \times ATR + 0.00047 \times T_e \times T_g$ $+ 0.000126 \times T_e \times AR$ $+ 0.00022 \times T_e \times ATR - 0.000091 \times T_g \times AR$ $+ 0.0000465 \times T_g \times ATR$ $+ 0.0000172 \times AR \times ATR$ $- 0.00271 \times T_e^2 - 0.000019 \times T_g^2$ $- 0.000034 \times AR^2 - 0.00043 \times ATR^2$	0.90	0.0001	0.1135
Quadratic	CBP	$= +5.84999 - 0.14106 \times T_e - 0.07403 \times T_g$ $- 0.00516 \times AR - 0.12105 \times ATR$ $+ 0.001869 \times T_e \times T_g - 0.00127 \times T_e \times AR$ $+ 0.004035 \times T_e \times ATR - 0.00042 \times T_g \times AR$ $+ 0.001226 \times T_g \times ATR - 0.0011 \times AR \times ATR$ $+ 0.00281 \times T_e^2 + 0.000401 \times T_g^2$ $+ 0.000501 \times AR^2 + 0.001258 \times ATR^2$	0.87	0.0002	0.1731



รูปที่ 3 อิทธิพลของอุณหภูมิที่ทางเข้าที่มีต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์



รูปที่ 4 อิทธิพลของอัตราส่วนรูปร่างที่มีต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์

4.2 อิทธิพลของเงื่อนไขการทำงานที่มีต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์

4.2.1 อุณหภูมิที่ทางเข้าทั้งสองของอีเจ็คเตอร์

อิทธิพลของอุณหภูมิที่ทางเข้าที่มีต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์แสดงดังรูปที่ 3 โดยศึกษาที่รูปร่างอีเจ็คเตอร์คงที่ AR เท่ากับ 95 และ ATR เท่ากับ 17.5 พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องระเหยสูงขึ้น (T_e) ค่า Rm และความดัน CBP มีแนวโน้มที่จะสูงขึ้น ขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ (T_g) ส่งผลให้ CBP มีค่าสูงขึ้น แต่ Rm จะลดลง พฤติกรรมของอีเจ็คเตอร์ที่เกิดขึ้นนี้ สอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านมา ซึ่งมีสาเหตุจากการลดลงของพื้นที่ประสิทธิภาพเมื่อความดันหรืออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอสูงขึ้น [1,4,6,11]

4.2.2 อัตราส่วนพื้นที่ของรูปร่างอีเจ็คเตอร์

อิทธิพลของ AR และ ATR ของหัวฉีดที่มีผลต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์แสดงดังรูปที่ 4 โดยแสดงผลกรณี ที่ T_e เท่ากับ $10^{\circ}C$ และ T_g เท่ากับ $130^{\circ}C$ พบว่าการเพิ่มขนาด AR ของอีเจ็คเตอร์ จะทำให้ Rm มีแนวโน้มของค่าสูงขึ้นเนื่องจากขนาดคอคอดของอีเจ็คเตอร์ที่ใหญ่ขึ้น ทำให้สามารถดูดสารทฤษฎีของอีเจ็คเตอร์ได้มากขึ้น แต่ค่า CBP จะลดลงในช่วงบางค่าก่อนที่จะกลับมาสูงขึ้นตาม

ขนาด ATR ขณะที่การเพิ่มขนาด ATR จะทำให้ค่า CBP มีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจาก การขยายปากทางออกหัวฉีดให้โตขึ้นทำให้การขยายตัวของสารปฐมภูมิมีค่ามากขึ้นและเกิดการผสมกับสารทุติยภูมิของอีเจ็คเตอร์ได้ดี โมเมนตัมของของผสมจึงมีค่ามาก แต่ค่า Rm จะลดลงในช่วงบางค่าก่อนที่จะกลับมาสูงขึ้นตามขนาดของ ATR มีข้อสังเกตว่าความสัมพันธ์ของ AR และ ATR ที่มีต่อสมรรถนะ อีเจ็คเตอร์นั้นไม่เป็นลักษณะเชิงเส้นแต่จะมีค่าที่ทำให้ อีเจ็คเตอร์มีสมรรถนะสูงอยู่เป็นช่วง ตัวอย่างเช่น (ในกรณีของผลศึกษานี้) ค่า Rm จะมีค่าสูงประมาณ 0.44 เมื่อ AR มีค่าอยู่ระหว่าง 110-120 และ ATR มีค่าอยู่ระหว่าง 13 – 25 ขณะที่ CBP ค่าจะสูงประมาณ 2.2 kPa เมื่อ AR มีค่าอยู่ระหว่าง 110-120 และ ATR มีค่าอยู่ระหว่าง 21 – 25 ซึ่งหาก AR และ ATR มีค่าน้อยกว่าช่วงที่กำหนดนี้ อีเจ็คเตอร์จะสมรรถนะลดลง แต่อย่างไรก็ตามค่าช่วงที่แสดงนี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขอุณหภูมิทางเข้าของอีเจ็คเตอร์ด้วย

ทั้งนี้ยังมีปัจจัยด้านรูปร่างลักษณะของอีเจ็คเตอร์ที่ไม่ได้พิจารณาในการศึกษานี้ แต่เป็นที่ทราบกันดีว่ามีผลต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ (มีผลน้อยกว่า AR และ ATR ที่นำมาศึกษา) เช่น ความยาวของอีเจ็คเตอร์แต่ละช่วง มุม

ลู่ออกและลู่ออกของอีเจ็คเตอร์ เป็นต้น ซึ่งหากปัจจัยเหล่านี้มีค่าคงที่จะให้สมรรถนะที่เหมาะสมของอีเจ็คเตอร์ค่าใดค่าหนึ่งตามสภาวะการทำงานของอีเจ็คเตอร์เท่านั้น

ดังนั้นผลปัจจัยด้านรูปร่างที่ได้ในการศึกษานี้จึงมีลักษณะไม่เชิงเส้น

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบผลของความสัมพันธ์ในรูปแบบเชิงเส้นโค้งกับการทดลองและแบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์ในหนึ่งมิติ

T_e (°C)	T_s (°C)	AR	ATR	EX		1-D		RSM	
				Rm	CBP (kPa)	Rm	CBP (kPa)	Rm	CBP (kPa)
7.5	130	90.25	4.517	0.29 ^A	4.5 ^A	0.19	5.1	0.3	1.7
7.5	130	124.9	9.391	0.42 ^A	3.5 ^A	0.57	3.9	0.53	2.8
7.5	140	124.9	9.391	0.29 ^A	4.5 ^A	0.32	4.9	0.31	2.9
7.5	150	124.9	9.391	0.19 ^A	5.8 ^A	0.21	6.2	0.22	3.1
10	130	90.25	5.641	0.35 ^B	5.2 ^B	0.32	5.3	0.33	1.8
10	120	90.25	5.641	0.49 ^B	3.7 ^B	0.36	4.0	0.37	1.7
10	140	90.25	5.641	0.27 ^B	6.5 ^B	0.29	6.8	0.27	2.1
5	130	90.25	5.641	0.28 ^B	4.8 ^B	0.27	5.1	0.32	1.5

^ARuangtrakoon et al. [10]

^BChunnanond et al. [11]

5. การทดสอบสมการวิธีตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว

ความสัมพันธ์ในรูปแบบเชิงเส้นโค้ง (Quadratic model) เป็นความสัมพันธ์ที่ได้จากการจำลองการไหลใน CFD ของอีเจ็คเตอร์เพื่อหาสมรรถนะที่เงื่อนไขต่างๆ ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาเครื่องมือที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อ Rm และ CBP ของอีเจ็คเตอร์ 2 ประเภท ได้แก่ การทำการทดลองและวิเคราะห์ทฤษฎีกับสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบผลของความสัมพันธ์ในรูปแบบเชิงเส้นโค้งจากการศึกษานี้กับผลการทดลองของ Ruangtrakoon และคณะ [10] และ Chunnanond และคณะ [11] และผลจากแบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์ในหนึ่งมิติของ Keenan และคณะ [2-3] พบว่า ค่า Rm ที่ได้จากความสัมพันธ์มีค่าใกล้เคียงกับทั้งการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ขณะที่ผลของ CBP นั้นมีค่า

ต่างจากผลของการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ค่อนข้างมาก เนื่องจากการจำลอง CFD ไม่ได้พิจารณาการสูญเสียจากแรงเสียดทานที่ผนังของการไหลในอีเจ็คเตอร์ นอกจากนี้ที่สำคัญ มีปัจจัยด้านรูปร่างลักษณะของอีเจ็คเตอร์ที่ไม่ได้พิจารณาในการศึกษานี้ แต่เป็นที่ทราบกันดีว่ามีผลต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ เช่น ความยาวของอีเจ็คเตอร์แต่ละช่วง มุมลู่ออกและลู่ออกของอีเจ็คเตอร์ เป็นต้น ซึ่งทำให้ได้ความสัมพันธ์ที่ไม่ครอบคลุมปัจจัยเหล่านั้น ดังนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่มีค่าปัจจัยเหล่านั้นนอกช่วงการศึกษานี้ ผลที่ได้จึงแตกต่างกันอยู่มาก ซึ่งในการศึกษาในระดับต่อไปจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยเหล่านี้

6. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการจำลองการไหลในอีเจ็คเตอร์ด้วย CFD เพื่อหาอิทธิพลปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์

ในระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ ทั้งสภาวะเงื่อนไขที่ทางเข้าอีเจ็คเตอร์และอัตราส่วนรูปร่างของอีเจ็คเตอร์ พร้อมทำการวิเคราะห์ผลของปัจจัยเหล่านั้น ด้วยวิธีตอบสนองแบบโครงร่าง เพื่อหาสมการของความสัมพันธ์ ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ และทำการเปรียบเทียบกับการทดลองและแบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์ในหนึ่งมิติ ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะได้ดังต่อไปนี้

1) การศึกษานี้ได้สมการความสัมพันธ์ในรูปแบบเชิงเส้นโค้งเป็นรูปแบบที่เหมาะสม ของอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ (T_g) อุณหภูมิเครื่องระเหย (T_e) อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของคอคอดหัวฉีดกับห้องผสม (AR) และอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดปากทางออกกับคอคอดของหัวฉีด (ATR) กับอัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (Rm) และความดันทางออกวิกฤต (CBP) ของอีเจ็คเตอร์

2) สมการความสัมพันธ์ในรูปแบบเชิงเส้นโค้งที่ได้จากการศึกษา เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองและแบบจำลองการไหลในหนึ่งมิติ ให้ค่า Rm ที่ใกล้เคียง ขณะที่ค่า CBP มีผลค่อนข้างต่ำ เนื่องจากมีหลายปัจจัยที่ไม่ได้พิจารณาในการศึกษา

3) สมการความสัมพันธ์ในรูปแบบเชิงเส้นโค้งที่ได้จากการศึกษาจะมีประโยชน์ในเรื่องของการลดเวลาในการประเมินสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์เบื้องต้นโดยเฉพาะการหาค่า Rm

4) การศึกษาในระดับต่อไปจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยด้านรูปร่างอื่นๆ ของอีเจ็คเตอร์ เช่น ความยาวของอีเจ็คเตอร์แต่ละช่วง มุมลู่ออกและลู่ออกของอีเจ็คเตอร์ เป็นต้น เพื่อการปรับปรุงสมการความสัมพันธ์ที่ได้จาก RSM ของ CFD ให้ถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

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] 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.
- [3] 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.
- [4] J. T. Munday and D. F. Bagster, "A new theory applied to steam jet refrigeration," Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, vol. 16(4), pp. 442-449, 1997.
- [5] S. B. Riffat and S. A. Omer, "CFD modeling and experimental investigation of an ejector refrigeration system using methanol as the working fluid," International Journal of Energy Research, vol. 25, 115-128, 2001.
- [6] 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.
- [7] 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, 2007.
- [8] T. Sriveerakul, S. Aphornratana and K. Chunnanond, "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, 2007.
- [9] G. Besagni, R. Mereu and F. Inzoli, “Ejector refrigeration: A comprehensive review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 53, pp. 373-407, 2016.
- [10] N. Ruangtrakoon, S. Aphornratana, and T. Sriveerakul, “ Experimental studies of a steam jet refrigeration cycle: Effect of the primary nozzle geometries to system performance,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 35, pp. 676–683, 2011.
- [11] K. Chunnanond. and S. Aphornratana “An experimental investigation of a steam ejector refrigerator: the analysis of the pressure profile along the ejector,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 24,pp.311-322, 2004.