



การทำนายสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ร่วมกับวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอสำหรับการปรับอากาศในรถยนต์

COP Prediction of an ejector refrigeration cycle combined with a vapour compression cycle for automotive air conditioning

ณัฐ สุวรรณภูมิ¹⁾ ณัฐนันท์ กิรติญาดาธนาภ²⁾ และ ธนารัฐ ศรีวีระกุล^{*2)}

Nat Suvarnakuta¹⁾ Nutthanun Keerlatiyadatanapat²⁾ and Thanarath Sriveerakul^{*2)}

¹⁾สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์ 32000

Department of Mechanical Technology, Faculty of Industrial Technology, Surindra Rajabhat University, Surindra, Thailand, 32000

²⁾ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี 34190

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, Thailand, 34190

Received February 2013

Accepted May 2013

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอ การทำนายสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ร่วมกับวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอสำหรับการปรับอากาศในรถยนต์ โดยใช้วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) หาค่าสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์อันได้แก่อัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (Rm) และความดันวิกฤต (CBP) โดยผลที่ได้จากการศึกษาจะนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยต้นแบบ [1] ซึ่งงานวิจัยต้นแบบจะหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (Rm) ของอีเจ็คเตอร์จากสมการวิเคราะห์การไหล 1 มิติ (1-D) จากนั้นจะนำผลสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ (Rm และ CBP) ที่ได้จากทั้งสองวิธีมาใช้เป็นฐานข้อมูลให้กับโปรแกรมสำเร็จรูป EES เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ร่วมกับวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอสำหรับการปรับอากาศในรถยนต์ เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอินเตอร์คูเลเตอร์ (T_{int}) ระหว่าง 15°C ถึง 25°C อุณหภูมิของส่วนควบแน่น (T_c) เท่ากับ 35°C และอุณหภูมิของส่วนระเหย (T_e) เท่ากับ 5°C พบว่าหากอีเจ็คเตอร์ทำงานภายใต้เงื่อนไขซึ่งมีอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ (T_g) เท่ากับ 80°C 85°C และ 90°C จะมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ (COP_{ej}) ที่ได้จากสมการ 1-D ของงานวิจัยต้นแบบ (1-D) เท่ากับ 44.64% 50.47% และ 59.68% ตามลำดับ และการปรับผลลัพธ์ใหม่จากสมการ 1-D ของงานวิจัยต้นแบบ (1-D, NEW) เท่ากับ 1.54% 0.08% และ 6.49% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD)

คำสำคัญ : อีเจ็คเตอร์ ระบบการทำความเย็นร่วมของอีเจ็คเตอร์ การปรับอากาศในรถยนต์

*Corresponding author. Tel.: +66-4535-3309; fax: +66-4535-3308

Email address: tsriveerakul@yahoo.com

Abstract

This paper presents the COP prediction of an ejector refrigeration cycle combined with a vapour compression cycle for automotive air conditioning. Using computational fluid dynamics (CFD) technique, the performance of an ejector was analyzed in term of the entrainment ratio (R_m) and critical back pressure (CBP). The results from this study were compared with a previous study of combined ejector refrigeration system for automotive air conditioning application [1] which the entrainment ratio (R_m) were predicted from one-dimensional (1-D) equation. The performance of an ejector (R_m and CBP) from CFD and one-dimensional method were analyzed and used as database for a mathematical modeling. In order to predict the COP of the combined system, a set of mathematical equations was developed using EES. The operating conditions are chosen accordingly as, intercooler temperature between 15 °C and 25 °C, condenser temperature equal to 35 °C and evaporator temperature equal to 5 °C. However, when generator temperatures are 80 °C, 85 °C and 90 °C, the results showed average relative errors of the COP of an ejector refrigeration cycle (COP_{ej}), between CFD and 1-D are 44.64%, 50.47% and 59.68% respectively, and between CFD and 1-D NEW are 1.54%, 0.08% and 6.49% respectively.

Keywords : Ejector, Combined ejector-vapour refrigeration system, Automotive air conditioning

1. บทนำ

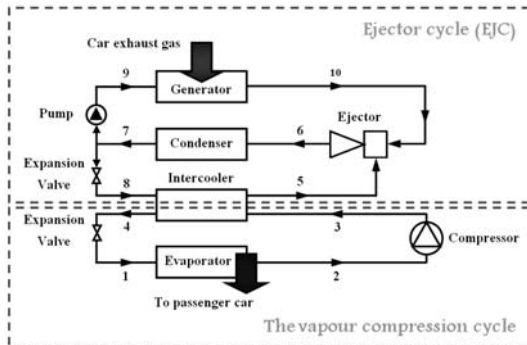
ปัจจุบันเรื่องของพลังงานเป็นปัญหาใหญ่ที่ส่งผลกระทบต่อการพัฒนาประเทศ โดยแหล่งพลังงานสิ้นเปลือง เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน นับวันจะมีปริมาณที่น้อยลงทุกที เนื่องจากการนำไปใช้เป็นจำนวนมาก ทำให้แหล่งพลังงานเหล่านี้มีราคาที่สูง ดังนั้น การศึกษาและพัฒนาการนำพลังงานทดแทนซึ่งเป็นพลังงานที่สามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยการนำพลังแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ รวมไปถึงแหล่งพลังงานความร้อนทิ้ง (Waste heat) จากโรงงานอุตสาหกรรมหรือรถยนต์ มาประยุกต์ใช้ร่วมกับงานต่างๆ จึงเป็นสิ่งที่สำคัญ เช่น การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ร่วมกับระบบการทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ [2-4] และการนำพลังงานความร้อนทิ้งจากเครื่องยนต์หรือไอเสียรถยนต์มาใช้ร่วมกับระบบการทำความเย็นแบบ อีเจ็คเตอร์ [5] เป็นต้น พลังงานความร้อนทิ้งที่ได้จากไอเสียรถยนต์มีอุณหภูมิระหว่าง 240 °C ถึง 480 °C [6] ซึ่งเพียงพอที่จะนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับระบบการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์

ร่วมกับวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอสำหรับการปรับอากาศในรถยนต์

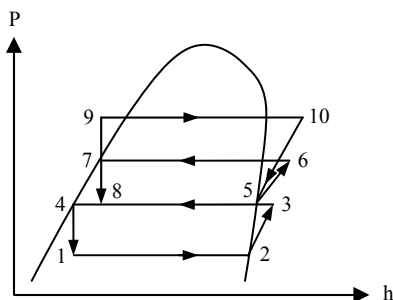
ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการทำนายสัมประสิทธิ์สมรรถนะทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ร่วมกับวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอสำหรับการปรับอากาศในรถยนต์ โดยอาศัยแหล่งพลังงานความร้อนทิ้งจากท่อไอเสียรถยนต์ ซึ่งนำวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational fluid dynamics, CFD) มาหาค่าสมรรถนะของ อีเจ็คเตอร์ [7] แล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป EES (Engineering Equation Solver) เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นร่วมของอีเจ็คเตอร์ โดยผลจากการศึกษาจะนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยต้นแบบ [1] ซึ่งในงานวิจัยต้นแบบนั้นจะคำนวณหาสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์โดยใช้สมการวิเคราะห์การไหล 1 มิติ (1-D) [8, 9] และสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นร่วมของอีเจ็คเตอร์ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป EES

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบการทำความเย็นร่วมของอีเจ็คเตอร์สำหรับการปรับอากาศในรถยนต์



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงการทำงานของวัฏจักรการทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ร่วมกับวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอสำหรับการปรับอากาศในรถยนต์



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงค่า P-h การทำงานของวัฏจักรการทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ร่วมกับวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอสำหรับการปรับอากาศในรถยนต์

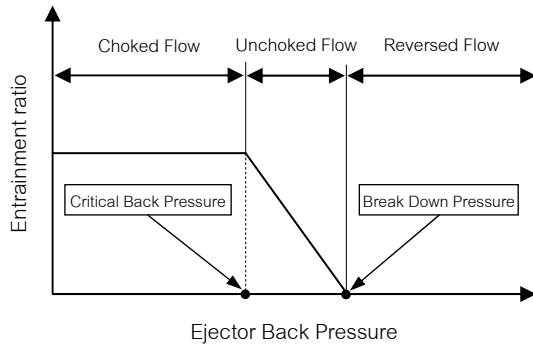
จากรูปที่ 1 และ 2 แสดงแผนภาพการทำงานของวัฏจักรการทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ร่วมกับวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอสำหรับการปรับอากาศในรถยนต์ โดยวัฏจักรการทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ (Ejector refrigeration cycle, EJC) ในระบบส่วนบนและวัฏจักร

การทำความเย็นแบบอัดไอ (The vapour compression cycle) ในระบบส่วนล่าง จะมีสารทำความเย็นเบอร์ R-134a เป็นสารทำงาน งานวิจัยนี้จะศึกษาการทำความเย็นของวัฏจักรการทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ร่วมกับวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอสำหรับการปรับอากาศในรถยนต์ ซึ่งสามารถทำความเย็นได้ 3.5 kW ภายใต้เงื่อนไขซึ่งมีอุณหภูมิทางเข้าปฐมนุญหรืออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ (T_g) ระหว่าง 80°C ถึง 90°C อุณหภูมิทางเข้าทุติยภูมิหรืออุณหภูมิของอินเตอร์คูลเลอร์ (T_{int}) ระหว่าง 15°C ถึง 25°C และอุณหภูมิของส่วนระเหย (T_e) เท่ากับ 5°C

2.2 สมรรถนะและคุณลักษณะการทำงานของอีเจ็คเตอร์

คุณลักษณะที่บ่งบอกสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์คือ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (Entrainment ratio, R_m) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลที่ทางเข้าทุติยภูมิต่ออัตราการไหลเชิงมวลที่ทางเข้าปฐมนุญ และอัตราส่วนความดัน (Pressure Lift Ratio, PLR) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความดันสถิตที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ต่อความดันสถิตที่ทางเข้าทุติยภูมิ โดยอัตราส่วนความดันสำหรับการทำงานของวัฏจักรการทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์มักนิยมใช้ตัวแปรที่อยู่ในรูปของความดันวิกฤต (Critical Back Pressure, CBP)

คุณลักษณะการทำงานของอีเจ็คเตอร์ ดังรูปที่ 3 สามารถแบ่งคุณลักษณะการไหลตามความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์เป็น 3 ช่วง คือ 1) กรณีที่อัตราส่วนการเหนี่ยวนำคงที่ โดยความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ต่ำกว่าความดันวิกฤต เรียกช่วงนี้ว่า “Choked flow” 2) กรณีที่อัตราส่วนการเหนี่ยวนำลดลง โดยความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์มีค่าระหว่างความดันวิกฤตและค่าความดันย้อนกลับ (Break Down Pressure) เรียกช่วงนี้ว่า “Unchoked flow” และ 3) กรณีที่ความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์สูงกว่าความดันย้อนกลับ ส่งผลทำให้อีเจ็คเตอร์ไม่สามารถทำงานได้ เรียกช่วงนี้ว่า “Reversed flow” [10, 11]



รูปที่ 3 คุณลักษณะการทำงานของอีเจ็คเตอร์

3. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้จะนำวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) มาหาค่าสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์อันได้แก่ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (R_m) และความดันวิกฤต (CBP) โดยผลที่ได้จากการศึกษาจะนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยต้นแบบ [1] ซึ่งในงานวิจัยต้นแบบจะหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (R_m) ของอีเจ็คเตอร์จากสมการวิเคราะห์การไหล 1 มิติ (one-dimensional, 1-D) จากนั้นจะนำผลสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ (R_m และ CBP) ที่ได้จากทั้งสองวิธีมาใช้เป็นฐานข้อมูลในการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป EES เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ร่วมกับวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอสำหรับการปรับอากาศในรถยนต์ ซึ่งมีดัชนีชี้วัดคือสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ (COP_{ej}) และสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นรวมของระบบ (COP_{system})

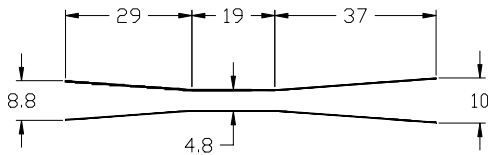
งานวิจัยนี้จะใช้ฐานข้อมูลผลสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ (R_m และ CBP) จาก 3 ฐานข้อมูลคือ

- 1) สมการ 1-D ของงานวิจัยต้นแบบ (1-D)
- 2) การปรับ

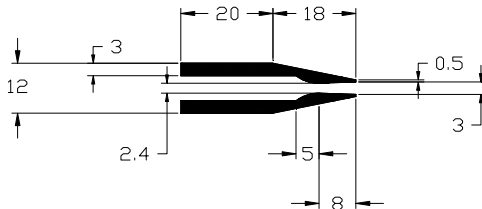
ผลลัพธ์ใหม่จากสมการ 1-D ของงานวิจัยต้นแบบ (1-D, NEW) และ 3) วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) โดยสมการ 1-D ของงานวิจัยต้นแบบ (1-D) กับวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) นั้นจะมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (R_m) ที่แตกต่างกันมาก อันเนื่องมาจากการกำหนดค่าสมมติฐานของตัวแปรไม่ทราบค่าในสมการ 1-D ของงานวิจัยต้นแบบ (1-D) เช่น ค่าประสิทธิภาพของหัวฉีด (Nozzle efficiency, η_n) ค่าประสิทธิภาพของปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ (Diffuser efficiency, η_d) และค่าประสิทธิภาพของการผสม (Mixing efficiency, η_m) เป็นต้น ดังนั้นจึงได้กำหนดค่าสมมติฐานของตัวแปรไม่ทราบค่าใหม่หรือก็คือการปรับผลลัพธ์ใหม่จากสมการ 1-D ของงานวิจัยต้นแบบ (1-D, NEW) เพื่อให้ได้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (R_m) ที่สอดคล้องกับวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) มากที่สุด โดยที่ค่าของ η_n , η_d และ η_m ในสมการ 1-D ของงานวิจัยต้นแบบ (1-D) เท่ากับ 1.00 1.00 และ 0.98 ตามลำดับ และในการปรับผลลัพธ์ใหม่จากสมการ 1-D ของงานวิจัยต้นแบบ (1-D, NEW) เท่ากับ 0.98 0.98 และ 0.81 ตามลำดับ

3.1 การสร้างแบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์

การสร้างแบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์ในระบบการทำความเย็นร่วมของอีเจ็คเตอร์สำหรับการปรับอากาศในรถยนต์ ได้นำขนาดและรูปร่างมาจากการงานวิจัยต้นแบบ [1] ดังรูปที่ 4 โดยที่อีเจ็คเตอร์นั้นจะมีค่า Area ratio (A_r) เท่ากับ 4 ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดที่เล็กที่สุดของห้องผสมหรือบริเวณพื้นที่หน้าตัดคงที่ต่อพื้นที่หน้าตัดที่เล็กที่สุดของหัวฉีด

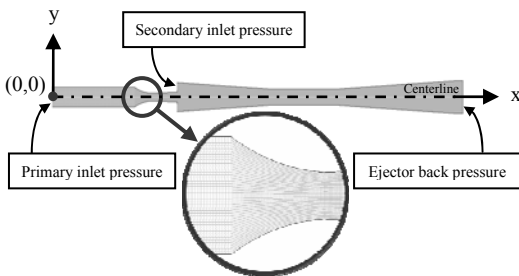


(ก) อีเจ็คเตอร์ (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)



(ข) หัวฉีด (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

รูปที่ 4 ขนาดและรูปร่างของอีเจ็คเตอร์ในระบบการทำความเย็นร่วมของอีเจ็คเตอร์สำหรับการปรับอากาศในรถยนต์



รูปที่ 5 แบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์ในระบบการทำความเย็นร่วมของอีเจ็คเตอร์สำหรับการปรับอากาศในรถยนต์

สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์สามารถหาได้จากวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) โดยการสร้างแบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์ในระบบการทำความเย็นร่วมของอีเจ็คเตอร์สำหรับการปรับอากาศในรถยนต์จากโปรแกรมสำเร็จรูป GAMBIT 2.3 ซึ่งรูปร่างของแบบจำลอง 2 มิติ เป็นแบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric) และขอบเขตของปัญหาถูกแบ่งด้วยโครงข่ายสี่เหลี่ยม (Quad Grid) เท่ากับ 51,900 ดังรูปที่ 5 โดยจำนวน

โครงข่ายสี่เหลี่ยมของอีเจ็คเตอร์นี้ได้ผ่านการปรับและทดสอบในความละเอียดที่แตกต่างกันเพื่อความถูกต้องของการจำลองการไหล โดยการเพิ่มจำนวนโครงข่ายสี่เหลี่ยมเป็นสองเท่า พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (R_m) มีค่าน้อยกว่า 1%

ตารางที่ 1 สมบัติของสารทำความเย็นเบอร์ R-134a

สมบัติของสาร	ค่า
ความร้อนจำเพาะ, C_p (J/kg-K)	851
ค่านำความร้อน, k (W/m-K)	0.0138
ความหนืด, μ (kg/m-s)	1.18×10^{-5}
น้ำหนักโมเลกุล, M (kg/kgmol)	102.03

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการคำนวณของ CFD

เงื่อนไข	รูปแบบที่เลือกใช้
ขอบเขตของทางเข้า (inlet boundary condition)	Pressure inlet
ขอบเขตของทางออก (outlet boundary condition)	Pressure outlet
ระเบียบขั้นตอนในการแก้ไขปัญหา (Solver)	Density base
ระเบียบวิธีการคำนวณ (Linearization)	Implicit
แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence model)	Realizable
	$k - \epsilon$ model
ระเบียบวิธีการแก้ปัญหาคำนวณการไหลบริเวณใกล้ผนัง (Near-wall treatment method)	Standard near wall function

3.2 การตั้งค่าตัวแปรที่จำเป็นสำหรับแบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์

การจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์จะกำหนดเงื่อนไข ขอบเขตและค่าตัวแปรต่างๆ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป FLUENT 6.3 ซึ่งมีสารทำความเย็นเบอร์ R-134a เป็นสารทำงาน คุณสมบัติที่ใช้เป็นก๊าซอุดมคติ (Ideal Gas) และเป็นการไหลแบบอัดตัวได้ โดยสมบัติของสารทำความเย็นแสดงดังตารางที่ 1 และเงื่อนไขการคำนวณของวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) แสดงดังตารางที่ 2

3.3 การวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ในการทำงานของวัฏจักรการทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ร่วมกับวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอสำหรับการปรับอากาศในรถยนต์

สมมติฐานสำหรับการวิเคราะห์การทำงานของวัฏจักรการทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ร่วมกับวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอสำหรับการปรับอากาศในรถยนต์ คือ

- 1) การไหลผ่านวาล์วลดความดัน (Expansion valve) เป็นการไหลแบบไอเซนโทรปิก
- 2) กระบวนการที่คอมเพรสเซอร์และปั๊มเป็นแบบอะเดียบาติก (Adiabatic)
- 3) ส่วนควบแน่น (Condenser) สารทำความเย็นจะมีสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัว (saturated liquid) และส่วนระเหย (Evaporator) สารทำความเย็นจะมีสถานะเป็นไออิ่มตัว (Saturated vapor)
- 4) ไม่นำปริมาณพลังงานที่ถูกใช้ไปสำหรับพัดลมในส่วนควบแน่นและส่วนระเหยมารวมวิเคราะห์
- 5) การทำงานของระบบจะอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state)

การวิเคราะห์การทำงานของวัฏจักรการทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ร่วมกับวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอสำหรับการปรับอากาศในรถยนต์ จากแผนภาพแสดงค่า P-h ดังรูปที่ 2 สามารถหาอัตราความร้อนของส่วนควบแน่นและส่วนก้ำนืดไอ ได้จากสมการที่ (1) (2) และ (3) ตามลำดับ ดังต่อไปนี้

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_1(h_2 - h_1) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_6(h_6 - h_7) \quad (2)$$

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_9(h_{10} - h_9) \quad (3)$$

งานที่ได้จากปั๊มและคอมเพรสเซอร์หาได้จากสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ

$$W_p = \dot{m}_9(h_9 - h_7) \quad (4)$$

$$W_{com} = \dot{m}_1(h_3 - h_2) \quad (5)$$

สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอ ดังสมการที่ (6)

$$COP_{me} = \frac{\dot{Q}_e}{W_{com}} \quad (6)$$

จากหลักการของการหาอัตราความร้อนของอินเตอร์คูลเลอร์ [12] สามารถหาได้จากสมการที่ (7) (8) และ (9) โดย ε คือค่าประสิทธิภาพแลกเปลี่ยนความร้อนของอินเตอร์คูลเลอร์

$$\dot{Q}_{int} = \dot{m}_5(h_5 - h_8) = \varepsilon \dot{m}_3(h_3 - h_4) \quad (7)$$

$$\dot{Q}_{int} = \varepsilon (\dot{Q}_c + W_{com}) \quad (8)$$

$$P_{int} = \sqrt{P_c \times P_e} \quad (9)$$

สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์สามารถหาได้จากสมการที่ (10) หรือ (11)

$$COP_{ej} = \frac{\dot{Q}_{int}}{W_p + \dot{Q}_g} \quad (10)$$

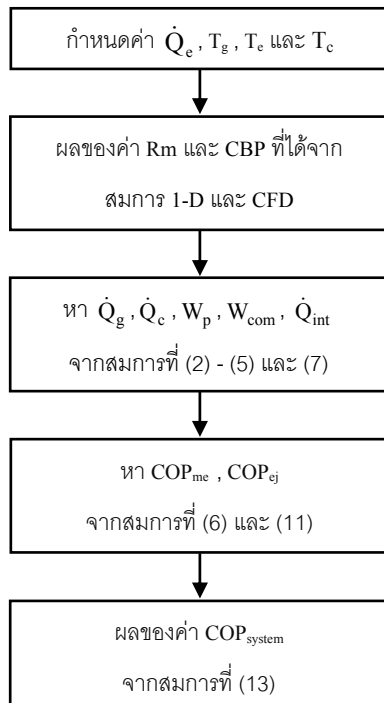
หรือ

$$COP_{ej} = Rm \left(\frac{h_5 - h_8}{h_{10} - h_7} \right) \quad (11)$$

สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นร่วมของระบบ สามารถหาได้จากสมการที่ (12) หรือ (13)

$$COP_{system} = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g + W_{com} + W_p} \quad (12)$$

$$COP_{system} = \frac{COP_{ej} \cdot COP_{me}}{COP_{ej} + \varepsilon \cdot COP_{me} + \varepsilon} \quad (13)$$



รูปที่ 6 ขั้นตอนการคำนวณหาสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นรวมของอีเจ็คเตอร์ของโปรแกรมสำเร็จรูป EES

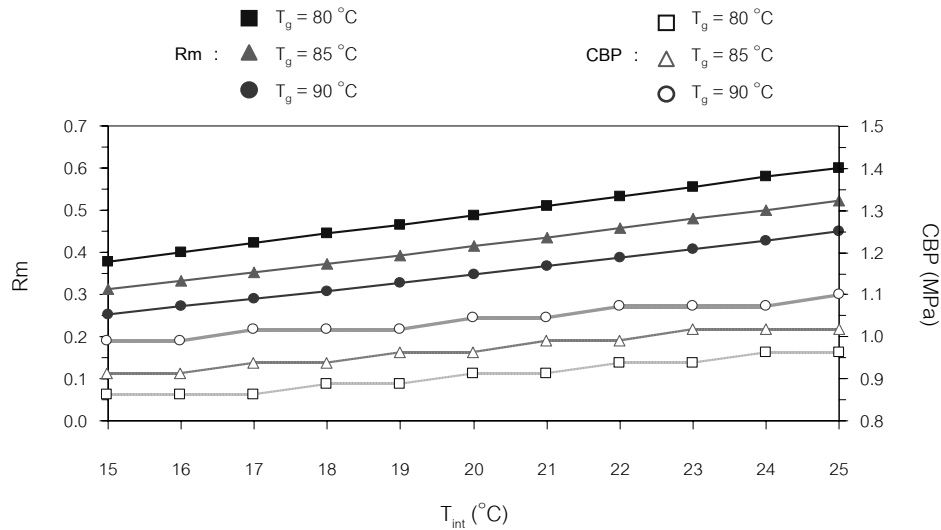
ขั้นตอนการคำนวณหาสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ร่วมกับวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอสำหรับการปรับอากาศในรถยนต์ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป EES ดังรูปที่ 6 จะกำหนดค่าตัวแปรสภาวะการทำงานของอีเจ็คเตอร์เป็นขั้นตอนแรก ซึ่งจะให้ได้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (Rm) และความดันวิกฤต (CBP) ของอีเจ็คเตอร์ในสภาวะการทำงานนั้นๆ จากฐานข้อมูลของการจำลองการไหลด้วยวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) และจากสมการ one-dimensional (1-D) ขั้นตอนที่สองจะนำอัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (Rm) ที่ได้มาหา

สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ร่วมกับวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอสำหรับการปรับอากาศในรถยนต์ ซึ่งมีดัชนีชี้วัดคือสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ (COP_{ej}) และสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นรวมของระบบ (COP_{system})

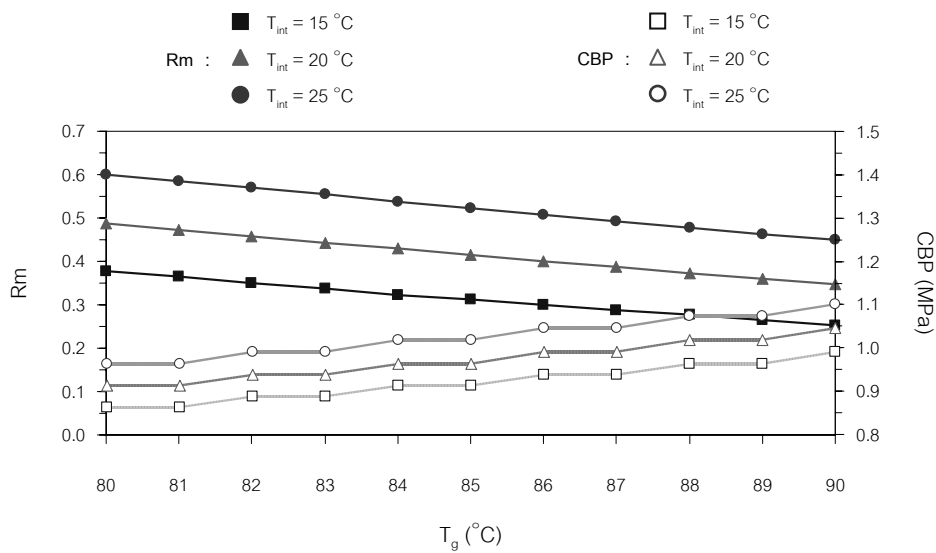
4. ผลการวิจัยและอภิปราย

จากรูปที่ 7 แสดงอัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (Rm) ละค่าความดันวิกฤต (CBP) ของอีเจ็คเตอร์ ที่ได้จากวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) เมื่ออีเจ็คเตอร์ทำงานภายใต้เงื่อนไขซึ่งมีอุณหภูมิทางเข้าปฐุมภูมิหรืออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ (T_g) เท่ากับ 80 °C 85 °C และ 90 °C และอุณหภูมิทางเข้าทุติยภูมิหรืออุณหภูมิของอินเตอร์คูลเลอร์ (T_{int}) ระหว่าง 15 °C ถึง 25 °C พบว่าหากอุณหภูมิของอินเตอร์คูลเลอร์ (T_{int}) เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (Rm) และความดันวิกฤต (CBP) เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

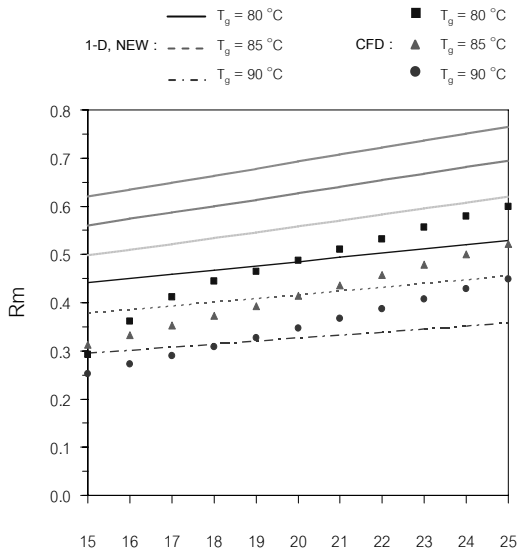
จากรูปที่ 8 แสดงอัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (Rm) และค่าความดันวิกฤต (CBP) ของอีเจ็คเตอร์ ที่ได้จากวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) เมื่ออีเจ็คเตอร์ทำงานภายใต้เงื่อนไขซึ่งมีอุณหภูมิทางเข้าทุติยภูมิหรืออุณหภูมิของอินเตอร์คูลเลอร์ (T_{int}) เท่ากับ 15 °C 20 °C และ 25 °C และอุณหภูมิทางเข้าปฐุมภูมิหรืออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ (T_g) ระหว่าง 80 °C ถึง 90 °C พบว่าหากอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ (T_g) เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (Rm) ลดลง แต่ความดันวิกฤต (CBP) จะเพิ่มสูงขึ้น



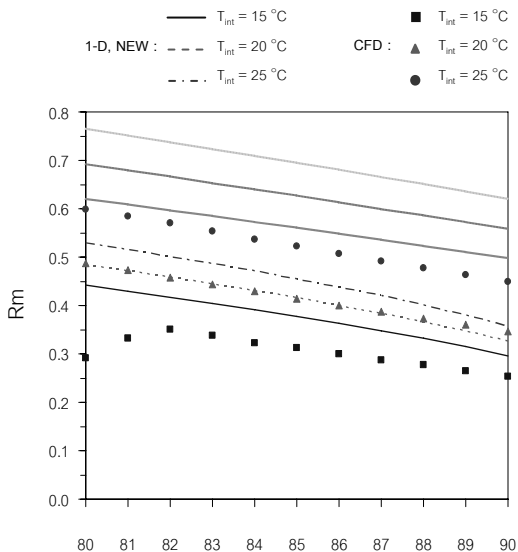
รูปที่ 7 อัตราส่วนการเหนียวน้ำ (R_m) และความดันวิกฤติ (CBP) ของอีเจ็คเตอร์เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอินเตอร์คูเลเตอร์ (T_{int}) ที่ได้จากวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD)



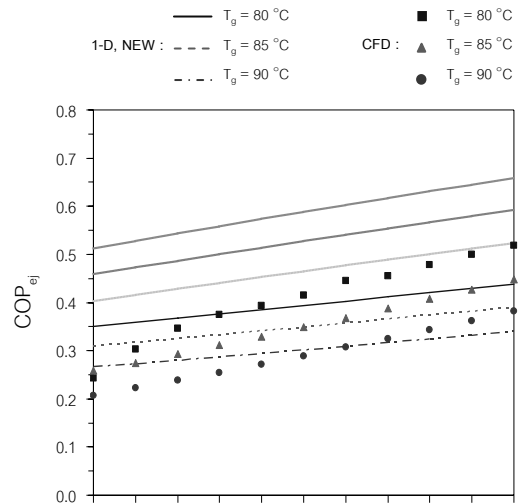
รูปที่ 8 อัตราส่วนการเหนียวน้ำ (R_m) และความดันวิกฤติ (CBP) ของอีเจ็คเตอร์เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ (T_g) ที่ได้จากวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD)



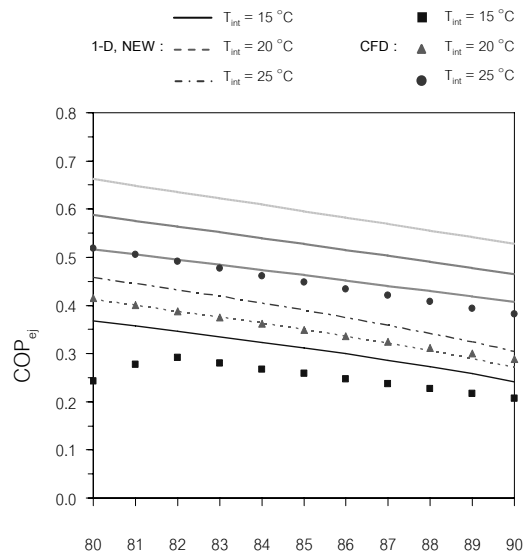
รูปที่ 9 เปรียบเทียบอัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (R_m) ของอีเจ็คเตอร์ เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอินเตอร์คูลเลอร์ (T_{int})



รูปที่ 10 เปรียบเทียบอัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (R_m) ของอีเจ็คเตอร์ เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ (T_g)



รูปที่ 11 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอินเตอร์คูลเลอร์ (T_{int})



รูปที่ 12 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ (T_g)

จากรูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนการเหนียวน้ำ (R_m) ที่ได้จากสมการ 1-D ของงานวิจัยต้นแบบ (1-D) การปรับผลลัพธ์ใหม่จากสมการ 1-D ของงานวิจัยต้นแบบ (1-D, NEW) และวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางเข้าทุติยภูมิหรืออุณหภูมิของอินเตอร์คูลเลอร์ (T_{in}) ระหว่าง 15°C ถึง 25°C และอุณหภูมิที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์หรืออุณหภูมิของส่วนควบแน่น (T_c) เท่ากับ 35°C พบว่าหากอีเจ็คเตอร์ทำงานภายใต้เงื่อนไขซึ่งมีอุณหภูมิทางเข้าปฐมภูมิหรืออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ (T_g) เท่ากับ 80°C 85°C และ 90°C จะมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของอัตราส่วนการเหนียวน้ำ (R_m) ที่ได้จากสมการ 1-D ของงานวิจัยต้นแบบ (1-D) เท่ากับ 45.59% 51.11% และ 60.43% ตามลำดับ และการปรับผลลัพธ์ใหม่จากสมการ 1-D ของงานวิจัยต้นแบบ (1-D, NEW) เท่ากับ 1.92% 0.21% และ 6.36% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD)

จากรูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนการเหนียวน้ำ (R_m) ที่ได้จากสมการ 1-D ของงานวิจัยต้นแบบ (1-D) การปรับผลลัพธ์ใหม่จากสมการ 1-D ของงานวิจัยต้นแบบ (1-D, NEW) และวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางเข้าปฐมภูมิหรืออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ (T_g) ระหว่าง 80°C ถึง 90°C และอุณหภูมิที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์หรืออุณหภูมิของส่วนควบแน่น (T_c) เท่ากับ 35°C พบว่าหากอีเจ็คเตอร์ทำงานภายใต้เงื่อนไขซึ่งมีอุณหภูมิทางเข้าทุติยภูมิหรืออุณหภูมิของอินเตอร์คูลเลอร์ (T_{in}) เท่ากับ 15°C 20°C และ 25°C จะมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของอัตราส่วนการเหนียวน้ำ (R_m) ที่ได้จากสมการ 1-D ของงานวิจัยต้นแบบ (1-D) เท่ากับ 85.08% 50.84% และ

32.83% ตามลำดับ และการปรับผลลัพธ์ใหม่จากสมการ 1-D ของงานวิจัยต้นแบบ (1-D, NEW) เท่ากับ 23.57% 0.84% และ 13.81% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD)

จากรูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ (COP_{ej}) ที่ได้จากการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยการใช้ฐานข้อมูลผลสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ (R_m และ CBP) จาก 3 ฐานข้อมูลคือ 1) สมการ 1-D ของงานวิจัยต้นแบบ (1-D) 2) การปรับผลลัพธ์ใหม่จากสมการ 1-D ของงานวิจัยต้นแบบ (1-D, NEW) และ 3) วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางเข้าทุติยภูมิหรืออุณหภูมิของอินเตอร์คูลเลอร์ (T_{in}) ระหว่าง 15°C ถึง 25°C อุณหภูมิที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์หรืออุณหภูมิของส่วนควบแน่น (T_c) เท่ากับ 35°C และอุณหภูมิของส่วนระเหย (T_g) เท่ากับ 5°C พบว่าหากอีเจ็คเตอร์ทำงานภายใต้เงื่อนไขซึ่งมีอุณหภูมิทางเข้าปฐมภูมิหรืออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ (T_g) เท่ากับ 80°C 85°C และ 90°C จะมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ (COP_{ej}) ที่ได้จากสมการ 1-D ของงานวิจัยต้นแบบ (1-D) เท่ากับ 44.64% 50.47% และ 59.68% ตามลำดับ และการปรับผลลัพธ์ใหม่จากสมการ 1-D ของงานวิจัยต้นแบบ (1-D, NEW) เท่ากับ 1.54% 0.08% และ 6.49% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) นอกจากนี้ยังพบว่าหากอุณหภูมิของอินเตอร์คูลเลอร์เพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ (COP_{ej}) เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ร่วมกับวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอสำหรับการปรับอากาศในรถยนต์ โดยการใช้ฐานข้อมูลผลสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์จากวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD)

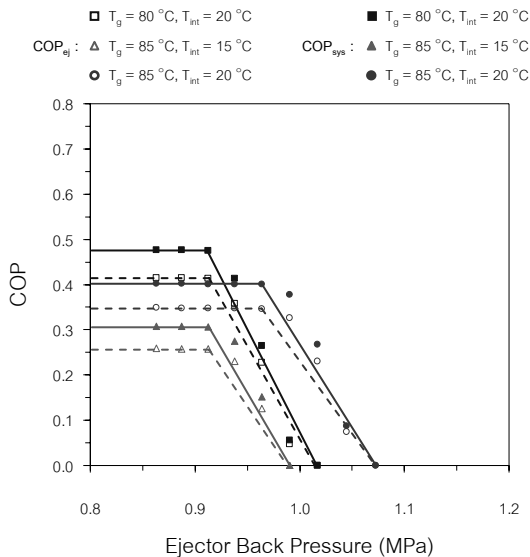
T_g (°C)	T_{int} (°C)	Rm	COP_{ej}	COP_{sys}	CBP (kPa)	P_c (kPa)	Rm	COP_{ej}	COP_{sys}
80	15	0.38	0.31	0.37	863.11	887.47	0.29	0.24	0.29
	20	0.49	0.41	0.48	912.35	887.47	0.49	0.41	0.48
	25	0.60	0.52	0.57	963.68	887.47	0.60	0.52	0.57
85	15	0.31	0.26	0.31	912.35	887.47	0.31	0.26	0.31
	20	0.41	0.35	0.40	963.68	887.47	0.41	0.35	0.40
	25	0.52	0.45	0.50	1,017.14	887.47	0.52	0.45	0.50
90	15	0.25	0.21	0.25	990.14	887.47	0.25	0.21	0.25
	20	0.35	0.29	0.34	1,044.69	887.47	0.35	0.29	0.34
	25	0.45	0.38	0.43	1,101.47	887.47	0.45	0.38	0.43

จากรูปที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ (COP_{ej}) ที่ได้จากการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยการใช้ฐานข้อมูลผลสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ (Rm และ CBP) จาก 3 ฐานข้อมูลคือ 1) สมการ 1-D ของงานวิจัยต้นแบบ (1-D) 2) การปรับผลลัพธ์ใหม่จากสมการ 1-D ของงานวิจัยต้นแบบ (1-D, NEW) และ 3) วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางเข้าทุติยภูมิหรืออุณหภูมิของอินเตอร์คูลเลอร์ (T_{int}) เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางเข้าปฐมภูมิหรืออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ (T_g) ระหว่าง 80 °C ถึง 90 °C อุณหภูมิที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์หรืออุณหภูมิของส่วนควบแน่น (T_c) เท่ากับ 35 °C และอุณหภูมิของส่วนระเหย (T_e) เท่ากับ 5 °C พบว่าหากอีเจ็คเตอร์ทำงานภายใต้เงื่อนไขซึ่งมีอุณหภูมิทางเข้าทุติยภูมิหรืออุณหภูมิของอินเตอร์คูลเลอร์ (T_{int}) เท่ากับ 15 °C 20 °C และ 25 °C จะมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ (COP_{ej}) ที่ได้จากสมการ 1-D ของงานวิจัยต้นแบบ (1-D) เท่ากับ 85.14% 50.78% และ 32.84% ตามลำดับ และการปรับผลลัพธ์ใหม่จากสมการ 1-D ของงานวิจัยต้นแบบ (1-D, NEW) เท่ากับ 23.61% 0.84% และ 13.80% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ

วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) นอกจากนี้ยังพบว่าหากอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ (COP_{ej}) นั้นมีค่าลดลง

จากตารางที่ 3 แสดงสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ร่วมกับวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอสำหรับการปรับอากาศในรถยนต์ โดยการใช้ฐานข้อมูลผลสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ (Rm และ CBP) จากวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) และจากรูปที่ 11 และ 12 พบว่าที่อุณหภูมิทางเข้าทุติยภูมิหรืออุณหภูมิของอินเตอร์คูลเลอร์ (T_{int}) เท่ากับ 15 °C อุณหภูมิทางเข้าปฐมภูมิหรืออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ (T_g) เท่ากับ 80 °C และ 81 °C อัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (Rm) และสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ (COP_{ej}) จะมีค่าลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์หรืออุณหภูมิของส่วนควบแน่น (T_c) เท่ากับ 35 °C อีเจ็คเตอร์จะมีความดันที่ปากทางออกหรือความดันของส่วนควบแน่น (P_c) เท่ากับ 887.47 kPa ซึ่งจะมีค่าเกินความดันวิกฤต (CBP) แต่ไม่เกินความดันย้อนกลับ (Break Down Pressure) ทำให้คุณลักษณะการทำงานของอีเจ็คเตอร์นั้นอยู่ในช่วงที่เรียกว่า “Unchoked flow”

จึงส่งผลให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (R_m) และสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอີเจ็คเตอร์ (COP_{ej}) มีค่าลดลง



รูปที่ 13 สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอີเจ็คเตอร์ร่วมกับวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอสำหรับการปรับอากาศในรถยนต์

จากรูปที่ 13 แสดงสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอີเจ็คเตอร์ร่วมกับวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอสำหรับการปรับอากาศในรถยนต์ โดยการนำข้อมูลผลสมรรถนะของอີเจ็คเตอร์ (R_m และ CBP) จากวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) พบว่าเมื่ออີเจ็คเตอร์ทำงานภายใต้เงื่อนไขสภาวะการทำงานใดๆ สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอີเจ็คเตอร์ (COP_{ej}) และสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นร่วมของระบบ (COP_{system}) จะถูกจำกัดด้วยความดันที่ปากทางออกของอີเจ็คเตอร์หรือความดันของส่วนควบแน่น (P_c) เนื่องจากสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นร่วมของอີเจ็คเตอร์นั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (R_m) ที่อີเจ็คเตอร์สามารถทำได้

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากศึกษาการทำนายสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอີเจ็คเตอร์ร่วมกับวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอสำหรับการปรับอากาศในรถยนต์ โดยใช้วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) มาหาค่าสมรรถนะของอີเจ็คเตอร์อื่นได้แก่ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (R_m) และความดันวิกฤต (CBP) จากนั้นจะนำผลสมรรถนะของอີเจ็คเตอร์ (R_m และ CBP) ใช้เป็นฐานข้อมูลวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป EES เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นร่วมของอີเจ็คเตอร์ พบว่าการปรับผลลัพธ์ใหม่จากสมการ 1-D ของงานวิจัยต้นแบบ (1-D, NEW) ให้ผลของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (R_m) และสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นร่วมของ อี้เจ็คเตอร์ใกล้เคียงกับวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) มากกว่าสมการ 1-D ของงานวิจัยต้นแบบ (1-D) เนื่องจากสมการ 1-D นั้น มีการกำหนดค่าสมมติฐานของตัวแปรไม่ทราบค่าในสมการ ได้แก่ ค่าประสิทธิภาพของหัวฉีด (η_n) ค่าประสิทธิภาพของปากทางออกของอີเจ็คเตอร์ (η_d) และค่าประสิทธิภาพของการผสม (η_m) ซึ่งค่าเหล่านี้มีผลอย่างยิ่งต่อสมรรถนะของอີเจ็คเตอร์ (R_m และ CBP) จึงอาจส่งผลให้สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น (COP) ที่ได้เกิดความคลาดเคลื่อน อย่างไรก็ตามในการศึกษาสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอີเจ็คเตอร์ร่วมกับวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอสำหรับการปรับอากาศในรถยนต์ ควรจะศึกษาถึงการนำอີเจ็คเตอร์มาประยุกต์ใช้ในระบบทำความเย็นของรถยนต์จริง โดยสร้างชุดอุปกรณ์ทดลองขึ้นเพื่อเปรียบเทียบผลของสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นร่วมของอີเจ็คเตอร์ที่ได้จากวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) สมการ 1-D และชุดอุปกรณ์ทดลองของอີเจ็คเตอร์ในระบบทำความเย็นสำหรับการปรับอากาศในรถยนต์ต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ที่ได้ให้การสนับสนุนงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Keerlatiyadatanapat N, Sriveerakul T, Suvarnakuta N, Seehanam W, Pianthong K. Performance analysis of a combined ejector-vapour compression refrigeration system for automotive air conditioning application. Proceedings of the 10th Eco - Energy and Materials Science and Engineering Symposium (EMSES) Conference; 2012 December 5-8; Ubonratchathani, Thailand.
- [2] Abdulateef JM, Sopian K, Alghoul MA, Sulaiman MY. Review on solar - driven ejector refrigeration technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009; 13: 1338-1349.
- [3] Meyer AJ, Harms TM, Dobson RT. Steam jet ejector cooling powered by waste or solar heat. Renewable Energy. 2009; 34: 297-306.
- [4] Zheng B, Weng YW. A combined power and ejector refrigeration cycle for low temperature heat sources. Solar Energy. 2010; 84: 784-791.
- [5] Gould D. Theoretical analysis of the steam pressure exchange ejector for an automotive air conditioning application [dissertation]. Washington DC: The George Washington University; 2009. 212p.
- [6] LaGrandeur J, Crane D. Vehicle fuel economy improvement through thermoelectric waste heat recovery. Proceedings of the 11th Diesel Engine Emissions Reduction (DEER) Conference. 2005 August; Chicago, Illinois, United States.
- [7] Rusly E, Aye Lu, Charters WWS, Ooi A. CFD analysis of ejector in a combined ejector cooling system. International Journal of Refrigeration. 2005; 28: 1092-1101.
- [8] Keenan JH, Neumann EP, Lustwerk F. An investigation of ejector design by analysis and experiment. Transactions of the ASME Journal of Applied Mechanics. 1950; 72: 299-309.
- [9] Aphornratana S. Theoretical Study of a Steam - Ejector Refrigerator. RERIC International Energy Journal. 1996; 18(1): 61-74.
- [10] Sriveerakul T, Aphornratana S, Chunnanond K. Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics: Part 1. Validation of the CFD results, International Journal of Thermal Sciences. 2007; 46(8): 812-822.
- [11] Suvarnakuta N, Uthakorn K, Sriveerakul T, Aphornratana S. A study of flow in an ejector equipped with variable throat area of the primary nozzle using CFD simulation. KKU Engineering Journal. 2010; 37(3): 181-190. (In Thai).
- [12] Stoecker WF, Jones RW. Refrigeration and Air Conditioning. 2nd ed. McGraw Hill; 1998.