



KKU Engineering Journal

<http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/>

การศึกษาสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ไอน้ำที่ใช้ในการอบแห้งสุญญากาศ

Performance study of a steam ejector in vacuum drying application

วรเชษฐ์ แสงสีดา ธนารัฐ ศรีวีระกุล* ชญานนท์ แสงมณี และ กุลเชษฐ์ เพียรทอง

Worachate Sangsida, Thanarath Sriveerakul*, Chayamon Saengmanee and Kulachate Pianthong

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี 34190

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

Received March 2012

Accepted July 2012

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ไอน้ำที่ประยุกต์ใช้ในการอบแห้งสุญญากาศ เพื่อศึกษาตัวแปรสภาวะเงื่อนไขการทำงานที่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ จากชุดทดลองที่สร้างขึ้น ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความดันปฐมภูมิ อัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านห้องอบแห้ง ความดันปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ และอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง เกณฑ์ในการศึกษาสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ไอน้ำที่ใช้ในการอบแห้งระบบสุญญากาศ ได้แก่ ค่าความดันสุญญากาศ (R_s) อัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (R_m) และอัตราส่วนความดันยก (PLR) จากผลการศึกษา พบว่า (1) เมื่อความดันปฐมภูมิเพิ่มขึ้นจาก 1-6 bar (ความดันเกจ) ความดันสุญญากาศภายในห้องอบแห้งจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าความดันสุญญากาศในห้อง อบแห้งมีค่าสูงสุดเท่ากับ -0.79 bar (ความดันเกจ) ที่ความดันปฐมภูมิเท่ากับ 5 bar (2) เมื่ออัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านห้องอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2,500 L/min จะทำให้ความดันสุญญากาศมีแนวโน้มลดลง ซึ่งมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 6-12 เมื่อเทียบกับการที่ไม่ปล่อยอากาศให้ไหลผ่านห้องอบแห้ง (3) เมื่อความดันปากทางออกของอีเจ็คเตอร์เพิ่มขึ้นจาก 0-0.6 bar (ความดันเกจ) ความดันสัมบูรณ์ภายในห้องอบแห้งจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่อัตราส่วนความดันยกจะมีแนวโน้มลดลง และ (4) เมื่ออุณหภูมิภายในห้องอบแห้งมีค่าสูงขึ้น โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส 50 องศาเซลเซียส และ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำจะมีค่าสูงขึ้นด้วย โดยที่อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส มีค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำสูงที่สุด ประมาณ 0.24 ที่ความดันปฐมภูมิเท่ากับ 4 bar

คำสำคัญ : อีเจ็คเตอร์ ไอน้ำ อบแห้งสุญญากาศ

Abstract

This paper presents performance study of a steam ejector in vacuum drying application. With an experimental set up, the effects of operating conditions to the ejector's performance; primary pressure, flow rate of ventilated air through the vacuum's chamber, ejector's back pressure, and the chamber's temperature, were investigated. Importance parameters used to describe the ejector's performance are the vacuum chamber's pressure (R_s), the entrainment ratio (R_m), and the pressure lift ratio (PLR). From the study, it was shown that (1) Increasing the primary pressure from 1-6 bar (gauge), the vacuum pressure was increased. The maximum obtained vacuum pressure was at -0.79 bar (gauge) at the primary pressure of 5 bar (gauge). (2) Increasing the flow rate of

*Corresponding author.

Email address: tsriveerakul@yahoo.com

ventilated air from 0-2,500 l/min, the vacuum pressure tended to drop around 6-12%. (3) Increasing the ejector's back pressure from 0-0.6 bar (gauge), the absolute pressure in vacuum chamber was increased with the decrease of pressure lift ratio. (4) Increasing the chamber's temperature from 30 °C to 50 °C and 70 °C, the entrainment ratio was raised. The maximum entrainment ratio of 0.24 was obtained at the chamber's temperature of 70 °C and at the primary pressure of 4 bar (gauge).

Keywords : Ejector, Steam, Vacuum drying

1. บทนำ

เนื่องจากประเทศไทยจัดเป็นประเทศเกษตรกรรมซึ่งจะมีผลผลิตทางการเกษตรจำพวกพืชผักผลไม้เป็นจำนวนมากตลอดทั้งปี ซึ่งเป็นรายได้หลักของเกษตรกรซึ่งเป็นคนส่วนใหญ่ในประเทศ และทำรายได้เข้าประเทศต่อปีจำนวนมหาศาล แต่เนื่องจากผลผลิตที่ออกมามากในแต่ละฤดูกาล ทำให้มีข้อจำกัดสำหรับระยะเวลาในการจำหน่ายและการเก็บรักษา ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่ผลผลิตและส่งผลกระทบต่อราคาที่สูงต่ำลง จึงได้มีการศึกษาเพื่อยืดระยะเวลาการเก็บรักษาผลผลิต เช่น การแปรรูปผลผลิตเพื่อการจำหน่าย เพื่อลดการสูญเสียและยังเพิ่มราคาให้ผลผลิตอีกด้วย

การแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรนั้น สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ความร้อน การใช้ความเย็น การใช้รังสี การหมัก การดอง และการอบแห้ง การอบแห้งเป็นการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจาก มีความเหมาะสมกับสภาพอากาศในเมืองไทย และมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรแบบอื่น

การอบแห้ง คือ การให้ความร้อนแก่วัสดุที่ต้องการอบแห้ง เพื่อให้ น้ำที่อยู่ในวัสดุนั้นระเหยกลายเป็นไอออกไป ในรูปของความร้อนแฝงของน้ำ โดยปริมาณความร้อนที่ใช้ขึ้นอยู่กับความชื้นในผลผลิต ความดันและอุณหภูมิที่ทำให้ น้ำระเหยกลายเป็นไอในขณะนั้น

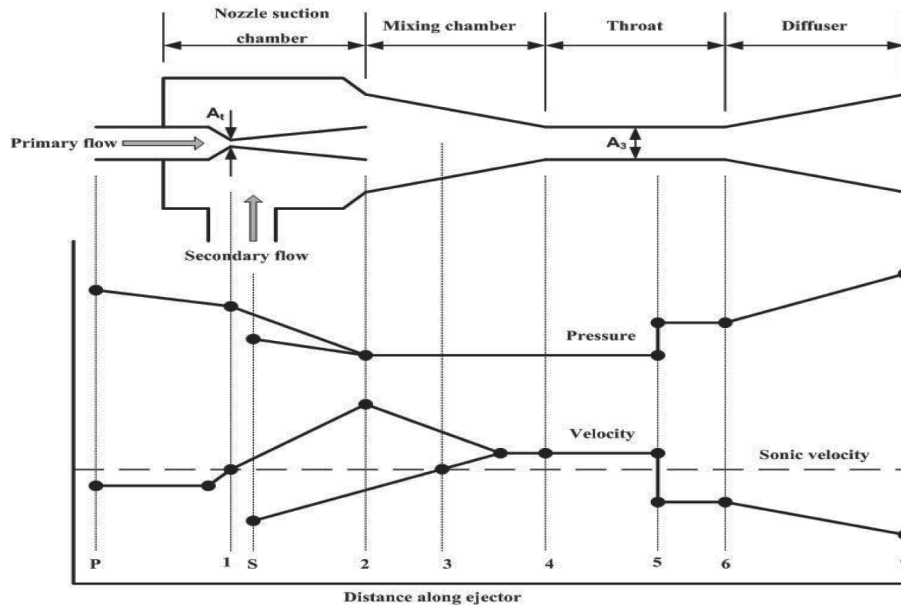
จากหลักการของเทอร์โมไดนามิกส์ พบว่า ที่อุณหภูมิหนึ่งของเหลวจะมีค่าความดันไออิ่มตัวคงที่ค่าหนึ่ง เช่น ที่ความดันบรรยากาศ น้ำจะกลายเป็นไอที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และที่ความดันไออิ่มตัว 0.42 kPa น้ำจะกลายเป็นไอที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งจุดที่ความดันไออิ่มตัวกับอุณหภูมิดังกล่าวนี้เรียกว่าจุด Flash Point จะพบว่า เมื่อความดันลดลงจะทำให้จุดเดือดของของเหลวลดต่ำลงด้วยวิธีการลดความดันให้ต่ำลงในการอบแห้งจึงเป็นวิธีการหนึ่งที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของการระเหยน้ำในกระบวนการอบแห้ง

[1] วิธีการอบแห้งด้วยความดันที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศ หรือเรียกว่าการอบแห้งระบบสุญญากาศ

การอบแห้งระบบสุญญากาศมีข้อดี คือ จะช่วยลดเวลาและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งและผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวจะมีคุณภาพสูงขึ้น เมื่อเทียบกับการอบแห้งที่สภาวะความดันปกติ [2] แต่ในความเป็นจริงการอบแห้งระบบสุญญากาศไม่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายนัก เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีค่าใช้จ่ายสูงทั้งทางด้านการลงทุนและการดูแลรักษา อุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการสร้างสุญญากาศในกระบวนการอบแห้งระบบสุญญากาศ คือ ปั๊มสุญญากาศ โดยทั่วไปแล้วในการทำงานของปั๊มสุญญากาศนั้นมีส่วนกลไกที่เคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องตลอดเวลา เมื่อมีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ได้ จึงเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดการเสียหายได้ง่าย ซึ่งส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงเพิ่มขึ้น จึงทำให้ต้นทุนในการผลิตเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการนำเอาอีเจ็คเตอร์มาใช้สร้างความดันสุญญากาศให้กับการอบแห้งระบบสุญญากาศแทนปั๊มสุญญากาศ เพราะอีเจ็คเตอร์ไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ในการทำงานจึงไม่เกิดการเสียหายและมีค่าซ่อมบำรุงน้อยกว่าปั๊มสุญญากาศมาก

อีเจ็คเตอร์ คือ อุปกรณ์ที่อาศัยหลักการเคลื่อนที่ของของไหลผ่านคอขวด ซึ่งเปลี่ยนความดันของของไหลที่ผ่านคอขวดให้เป็นความเร็ว เพื่อเหนี่ยวนำของไหลอีกชนิดหนึ่งกล่าวคือ เมื่อ ของไหลปฐมภูมิ (Primary fluid) ที่มีอุณหภูมิและความดันสูงพุ่งผ่านหัวฉีดหลักที่อยู่ภายในอีเจ็คเตอร์ และมีความเร็วสูงจะเกิดการเหนี่ยวนำของไหลทุติยภูมิ (Secondary fluid) เข้ามาผสมกันภายในอีเจ็คเตอร์ และไหลออกจากอีเจ็คเตอร์ผ่านปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ เป็นอันสิ้นสุดการทำงานของอีเจ็คเตอร์

จากหลักการทำงานของอีเจ็คเตอร์ ถ้าของไหลทุติยภูมิของอีเจ็คเตอร์ คือ อากาศภายในห้องอบแห้ง อากาศภายในห้องอบแห้งจะถูกเหนี่ยวนำออกจากห้องอบแห้งเข้าไปยัง



รูปที่ 1 คุณลักษณะการไหลภายในอีเจ็คเตอร์

อีเจ็คเตอร์โดยของไหลปฐมภูมิ และจะทำให้ห้องอบแห้งเกิดสภาวะสุญญากาศ [3]

ข้อดีของอีเจ็คเตอร์อีกประการหนึ่งก็คือ สามารถใช้พลังงานรังสีจากดวงอาทิตย์ (Solar energy) พลังงานคุณภาพต่ำ (Low grade heat) หรือความร้อนทิ้ง (Waste heat) มาขับเคลื่อนระบบได้ ซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตลดลงเป็นอย่างมาก

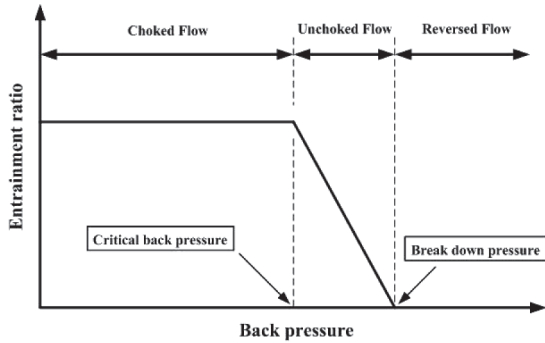
จากหลักการและเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น คณะผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ ใช้น้ำที่ใช้ในการอบแห้งระบบสุญญากาศ เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของอีเจ็คเตอร์ ซึ่งได้แก่ ความดันสุญญากาศภายในห้องอบแห้ง อัตราส่วนการเหนียวน้ำ และอัตราส่วนความดันยกไว้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาและพัฒนาการอบแห้งระบบสุญญากาศต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณลักษณะของการไหลภายในอีเจ็คเตอร์

รูปที่ 1 แสดงคุณลักษณะการไหลภายใน อีเจ็คเตอร์เมื่อของไหลปฐมภูมิที่มีอุณหภูมิและความดันสูง ในตำแหน่ง P ได้ขยายตัวและพุ่งผ่านคอคอของหัวฉีดที่ตำแหน่งที่ 1 ความดันสถิต (Static pressure) ของของไหลปฐมภูมิจะแปรเปลี่ยนเป็นความดันพลวัต (Dynamic pressure) กล่าวคือ ความดันของของไหลปฐมภูมิจะลดต่ำลง แต่ความเร็ว

จะเพิ่มขึ้นจนมีความเร็วเท่ากับความเร็วเสียง (Sonic velocity) ที่ตำแหน่งที่ 1 และความเร็วจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนมีความเร็วสูงที่สุดที่ปากทางออกของหัวฉีด (ตำแหน่งที่ 2) ซึ่งมีความเร็วอยู่ในช่วงความเร็วเหนือเสียง (Supersonic velocity) ที่ตำแหน่งที่ 2 ความดันของของไหลปฐมภูมิลดลงจนมีค่าต่ำกว่าความดันของของไหลทุติยภูมิ (ตำแหน่ง S) จึงเกิดการเหนียวน้ำของไหลในตำแหน่ง S เข้ามายังอีเจ็คเตอร์ แต่ของไหลทั้งสองจะยังไม่ผสมกันในทันที ของไหลทั้งสองจะเริ่มผสมกันก็ต่อเมื่อความเร็วของของไหลทุติยภูมิมีความเร็วเท่ากับความเร็วเสียง (ตำแหน่งที่ 3) และจะผสมกันโดยสมบูรณ์บริเวณปากทางเข้าช่วงคอคอของอีเจ็คเตอร์ (ตำแหน่งที่ 4) ในระหว่างที่เกิดการเหนียวน้ำและผสมกันของของไหลทั้งสองชนิด ความดันภายในอีเจ็คเตอร์จะมีค่าคงที่ และจากอิทธิพลของความดันด้านปากทางออกของอีเจ็คเตอร์จึงทำให้เกิดปรากฏการณ์คลื่นกระแทก (Shock) ในตำแหน่งที่ 5 ซึ่งทำให้เกิดการอัดตัวของของไหลส่งผลให้ความดันของของไหลเพิ่มขึ้นและความเร็วลดลงจนมีค่าต่ำกว่าความเร็วเสียง (Subsonic velocity) อย่างรวดเร็ว เนื่องจากความดันทางปากทางออกของอีเจ็คเตอร์มีค่าสูงจึงทำให้ความดันของของไหลภายในอีเจ็คเตอร์ในช่วงผู้ออกของอีเจ็คเตอร์ (Diffuser) มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ (6 ถึง 7) [4-5]



รูปที่ 2 แผนภาพสมรรถนะการทำงานของอีเจ็คเตอร์

รูปที่ 2 แสดงแผนภาพสมรรถนะการทำงานของอีเจ็คเตอร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนการเหนี่ยวนำ และค่าความดันปากทางออกอีเจ็คเตอร์ จากรูปจะสามารถแบ่งช่วงการทำงานของอีเจ็คเตอร์ ออกเป็น 3 ช่วง ตามลักษณะการไหลภายในอีเจ็คเตอร์ ได้แก่ choked flow, unchoked flow และ reversed flow ซึ่งถูกแบ่งโดยค่าความดันวิกฤต (Critical back pressure) และค่าความดันย้อนกลับ (Break down pressure) ในช่วง choked flow คือ การไหลภายใต้ความดันปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ที่ต่ำกว่าความดันวิกฤต อีเจ็คเตอร์จะเหนี่ยวนำของไหลทุติยภูมิในอัตราส่วนคงที่ ซึ่งเป็นสาเหตุให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำคงที่ ในช่วง unchoked flow คือ การไหลในช่วงค่าความดันปากทางออกอีเจ็คเตอร์ มีค่าระหว่างค่าความดันวิกฤตและค่าความดันย้อนกลับ อีเจ็คเตอร์จะเหนี่ยวนำของไหลทุติยภูมิได้น้อยลง เป็นสาเหตุให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำลดลงอย่างรวดเร็ว ในช่วง reversed flow คือการไหลในช่วงที่ค่าความดันปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ มีค่าสูงกว่าค่าความดันย้อนกลับ การไหลจะไหลย้อนกลับเข้าไปยังปากทางเข้าของของไหลทุติยภูมิ อีเจ็คเตอร์จึงไม่สามารถทำงานต่อได้ [6-7]

2.2 สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์

ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้เป็นตัววัดค่าสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้ในการอบแห้งระบบสุญญากาศ คือ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (Entrainment ratio, R_m) และอัตราส่วน

ตารางที่ 1 ค่าตัวแปรเริ่มต้นที่ใช้ในการออกแบบอีเจ็คเตอร์

P_p (bar)	P_s (bar)	P_{exit} (bar)	$\dot{m}_1$ (kg/s)	R_m
5	0.3	1	0.25	0.5

ความดันยก (Pressure lift ratio, PLR) อัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (R_m) คือ อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิต่ออัตราการไหลเชิงมวลของของไหลปฐมภูมิ ดังแสดงในสมการที่ 1

(1)

โดยที่ $\dot{m}_s$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิ และ $\dot{m}_p$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลปฐมภูมิ

อัตราส่วนความดันยก (PLR) คือ อัตราส่วนระหว่างความดันสถิตยับริเวณทางออกของอีเจ็คเตอร์ต่อความดันสถิตยของสารทุติยภูมิ

$$PLR = \frac{P_{exit}}{P_s} \quad (2)$$

โดยที่ P_{exit} คือ ความดันสถิตยับริเวณทางออกของอีเจ็คเตอร์ และ P_s คือ ความดันสถิตยของสารทุติยภูมิ

2.3 การออกแบบอีเจ็คเตอร์

ในการออกแบบระบบสุญญากาศ อีเจ็คเตอร์ถือได้ว่าเป็นหัวใจของระบบ ดังนั้นการออกแบบอีเจ็คเตอร์จะต้องออกแบบให้เหมาะสมกับสภาวะในการอบแห้ง เช่น ความดันของของไหลปฐมภูมิ (R_p) อุณหภูมิและความดันของของไหลทุติยภูมิ (R_s) และความดันที่ปากทางออกอีเจ็คเตอร์ (P_{exit}) ในการศึกษาี้เลือกใช้อีเจ็คเตอร์ ชนิด Constant Pressure Mixing (CPM) และใช้หลักการออกแบบของ [8] ในการหาขนาดและรูปร่างของอีเจ็คเตอร์ที่เหมาะสมกับสภาวะการอบแห้ง ไอน้ำที่ได้จากเครื่องกำเนิดไอจะถูกใช้เป็นของไหลปฐมภูมิเพื่อเหนี่ยวนำเอาอากาศภายในห้องอบแห้ง (ของไหลทุติยภูมิ) ออกจากห้องอบแห้งเข้ามายังอีเจ็คเตอร์และทำให้ห้องอบแห้งเกิดสุญญากาศขึ้น ในการออกแบบอีเจ็คเตอร์ได้กำหนดค่าตัวแปรเริ่มต้นดังแสดงในตารางที่ 1 หาขนาดพื้นที่ของคอคอดของหัวฉีดจากสมการที่ 3

$$A_{th} = \frac{\dot{m}_p \sqrt{T_p R}}{0.67 P_p} \quad (3)$$

โดยที่ A_{th} พื้นที่ของคอขวดหัวฉีด $\dot{m}_p$ คือ อัตราการไหลของของไหลปฐมภูมิ P_p คือ ความดันของของไหลปฐมภูมิ T_p คือ อุณหภูมิของของไหลปฐมภูมิ และ R คือ ค่าคงที่ของก๊าซหาขนาดพื้นที่ของปากทางออกหัวฉีดจากสมการที่ 4

$$A_e = A_T A_{th} \quad (4)$$

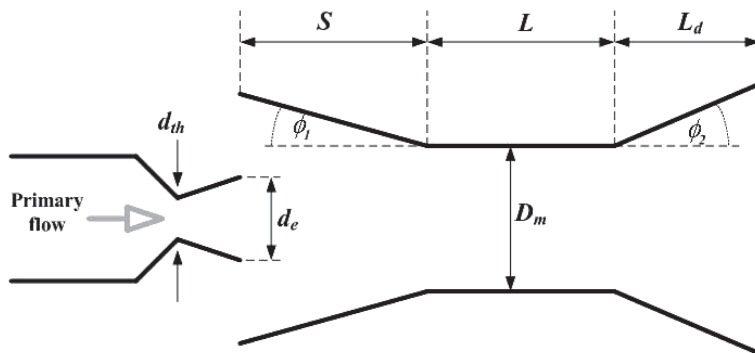
โดยที่ A_e คือ พื้นที่ของปากทางออกหัวฉีด A_{th} และ A_T คือ อัตราส่วนพื้นที่ของหัวฉีด หาขนาดของพื้นที่คอขวดอีเจ็คเตอร์จากสมการที่ 5

$$A_m = A_R A_{th} \quad (5)$$

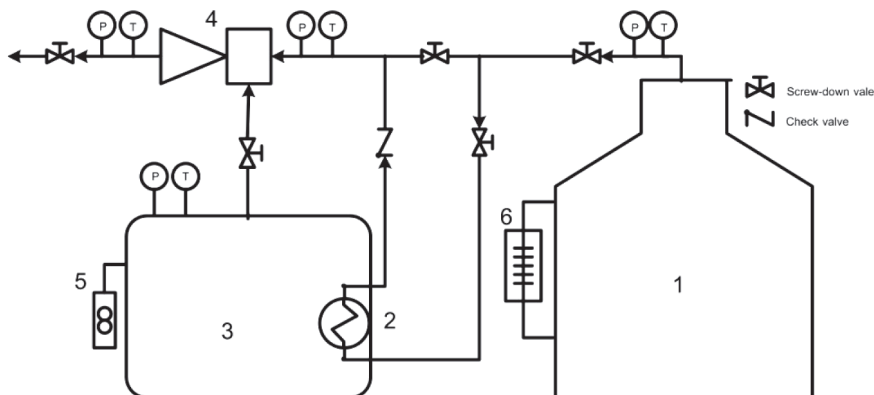
โดยที่ A_m คือ พื้นที่คอขวดอีเจ็คเตอร์ และ A_R คือ อัตราส่วนพื้นที่ของอีเจ็คเตอร์ รูปร่างของอีเจ็คเตอร์สามารถหาได้จากสมการที่ 6 – 7

ตารางที่ 2 ขนาดของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

d_{th} (mm)	d_e (mm)	D_m (mm)	S (mm)	L (mm)	L_d (mm)	ϕ_1	ϕ_2
10	15	23	140	70	190	3°	4°



รูปที่ 3 รูปร่างพื้นฐานภายในของอีเจ็คเตอร์



รูปที่ 4 ระบบอบแห้งสุญญากาศแบบอีเจ็คเตอร์ไอน้ำ

(1) เครื่องกำเนิดไอน้ำ (2) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (3) ห้องอบแห้งสุญญากาศ (4) อีเจ็คเตอร์ (5) มาตรวัดอัตราการไหลอากาศ (6) แถบวัดระดับน้ำ (T) มาตรวัดอุณหภูมิ (P) มาตรวัดความดัน

$$4D_m \leq L \leq 4D_m \quad (6)$$

โดยที่ L คือ ความยาวของคอขวดอีเจ็คเตอร์ และ D_m คือ เส้นผ่านศูนย์กลางคอขวดอีเจ็คเตอร์

$$S = 9D_m - L \quad (7)$$

โดยที่ S คือ ความยาวของช่วงลู่เข้าอีเจ็คเตอร์

$$2^\circ \leq \phi_1 \leq 10^\circ \quad (8)$$

โดยที่ ϕ_1 คือ มุมลู่เข้าอีเจ็คเตอร์

$$3^\circ \leq \phi_2 \leq 8^\circ \quad (9)$$

โดยที่ ϕ_2 คือ มุมลู่ออกจากอีเจ็คเตอร์

รูปร่างพื้นฐานภายในของอีเจ็คเตอร์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3 และขนาดของอีเจ็คเตอร์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2

3. ชุดทดลองการอบแห้งระบบสุญญากาศ

แผนผังชุดทดลองการอบแห้งระบบสุญญากาศที่ใช้ฮีเจ็คเตอร์เป็นตัวสร้างสุญญากาศ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4 ซึ่งมีหลักการทำงาน ดังนี้ ไอน้ำ ที่ได้จากเครื่องกำเนิดไอน้ำ (1) จะถูกใช้เป็น ของไหลป้อนของฮีเจ็คเตอร์ อัตราการไหลของไอน้ำวัดจากระดับน้ำภายในเครื่องกำเนิดไอน้ำ ที่หายไปถึงสังเกตเห็นได้จากหลอดแก้ว (sight glass) ที่ติดตั้งไว้ที่ด้านข้างของตัวเครื่องกำเนิดไอน้ำ (6) ไอน้ำ ที่ได้จากเครื่องกำเนิดไอน้ำ นอกจากจะใช้เป็นของไหลป้อนของฮีเจ็คเตอร์แล้ว ส่วนหนึ่งจะถูกใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศภายในห้องอบแห้ง เพื่อควบคุมอุณหภูมิของห้องอบแห้งสุญญากาศ (3) โดยผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (2) แล้วจึงเข้าสู่ฮีเจ็คเตอร์ (4) เมื่อของไหลป้อนผ่านหัวฉีดภายในฮีเจ็คเตอร์ จะเกิดการเหนี่ยวนำอากาศ (ของไหลทุติยภูมิ) ภายในห้องอบแห้งเข้าสู่ฮีเจ็คเตอร์และทำให้เกิดความดันสุญญากาศขึ้นภายในห้องอบแห้ง โดยอัตราการไหลของอากาศภายในห้องอบแห้งสามารถวัดได้จากมาตรวัดอัตราการไหลของอากาศ (5) การไหลของไอน้ำในส่วนของชุดทดลองจะถูกควบคุมด้วยวาล์วทองเหลือง วัดค่าความดันและอุณหภูมิด้วยเกจวัดความดัน (Pressure gauge) และเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ตามลำดับ

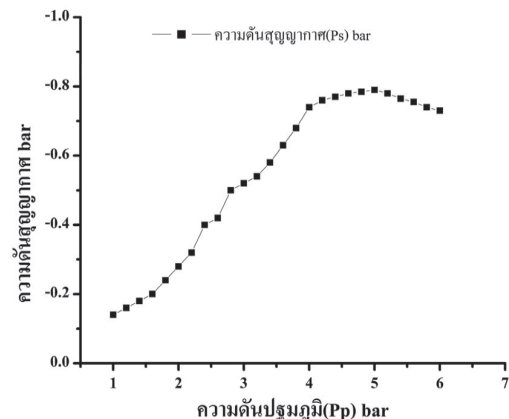
4 ผลการทดลอง

4.1 อิทธิพลของความดันป้อน (P_p) ต่อค่าความดันสุญญากาศ (P_s)

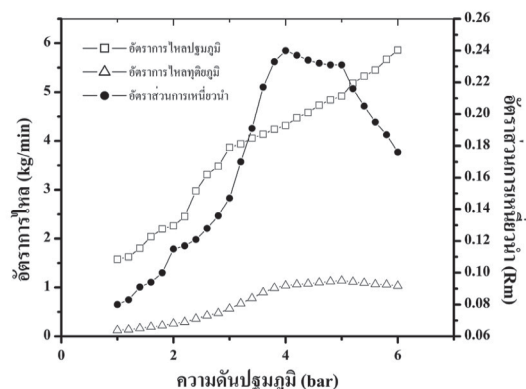
ศึกษาอิทธิพลของความดันป้อน (P_p) ที่มีต่อค่าความดันสุญญากาศ (P_s) โดยทำการปรับค่าความดันป้อน เพื่อศึกษาค่าความดันสุญญากาศในห้องอบแห้งที่เปลี่ยนไป โดยช่วงความดันป้อน ที่ศึกษา คือ 1-6 bar (ความดันเกจ) จากรูปที่ 5 พบว่า เมื่อเพิ่มความดันป้อน จาก 1-5 bar ความดันสุญญากาศจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความดันป้อนขึ้นจาก 5-6 bar ความดันสุญญากาศจะมีแนวโน้มลดลง และค่าความดันสุญญากาศในห้องอบแห้งมีค่าต่ำสุดเท่ากับ -0.79 bar ที่ความดันป้อนเท่ากับ 5 bar

ทั้งนี้เนื่องจากว่า เมื่อความเร็วลำพุ่งของของไหลป้อนที่พุ่งผ่านหัวฉีดเพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันที่ปากทางออกของฮีเจ็คเตอร์ลดลง และเหนี่ยวนำอากาศใน

ห้องอบแห้งได้มากขึ้น ทำให้ ความดันภายในห้องอบแห้งมีค่าลดลง และในขณะที่ความเร็วของลำพุ่งเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากความดันที่เพิ่มขึ้น ขนาดของลำพุ่ง (Jet core) ของของไหลป้อนก็จะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามไปด้วย เมื่อถึงจุดๆ หนึ่ง จึงทำให้มีพื้นที่ในการเหนี่ยวนำอากาศภายในห้องอบแห้งเข้ามายังฮีเจ็คเตอร์ลดลง เป็นผลให้อัตราการไหลของ ของไหลทุติยภูมิลดลง ดังจะเห็นได้จากรูป 6 เมื่อความดันป้อนมีค่ามากกว่า 5 bar อัตราการไหลของของไหลทุติยภูมิจะมีค่าต่ำลง



รูปที่ 5 แสดงผลของความดันป้อนที่มีผลต่อความดันสุญญากาศ



รูปที่ 6 อัตราการไหลป้อน ($\dot{m}_p$) และอัตราการไหลทุติยภูมิ ($\dot{m}_s$)

4.2 อิทธิพลของการไหลของอากาศเข้าสู่ห้องอบแห้งสุญญากาศ (Q_a) ต่อค่าความดันสุญญากาศ (P_s)

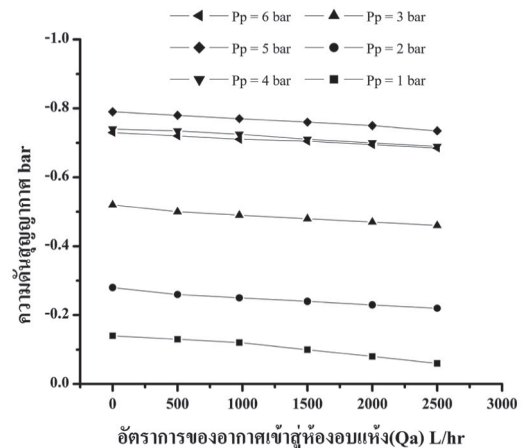
โดยทั่วไปกระบวนการอบแห้งระบบสุญญากาศจะนำความชื้นที่มีอยู่ในตัวผลิตภัณฑ์และห้องอบแห้งออก

จากห้องอบแห้งสุญญากาศ โดยการนำเอาอากาศจากภายนอกไหลผ่านห้องอบแห้งสุญญากาศ เพื่อเพิ่มความชื้นที่มีอยู่ภายในห้องอบแห้งออกไป ในการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ห้องอบแห้งสุญญากาศ (Q_a) ต่อค่าความดันสุญญากาศ (P_s) ทำได้โดยการนำอากาศจากภายนอกไหลผ่านห้องอบแห้งสุญญากาศด้วยอัตราการไหล 0 – 2,500 L/hr และศึกษาค่าความดันสุญญากาศที่เปลี่ยนแปลงไป โดยใช้ความดันป้อนใน ช่วง 1–6 bar (ความดันเกจ) ในการสร้างความดันสุญญากาศให้กับห้องอบแห้ง จากรูปที่ 7 พบว่า เมื่ออัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านห้องอบแห้งเพิ่มขึ้น ความดันในห้องอบแห้งจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย และทำให้ความดันสุญญากาศมีแนวโน้มลดลง ซึ่งมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 6–12 ทั้งนี้เนื่องจาก อัตราการไหลเข้าห้องอบแห้งของอากาศจากภายนอกมีค่ามากกว่าอัตราการเหนี่ยวนำอากาศออกจากอบแห้งโดยอีเจ็คเตอร์ จึงทำให้ความดันในห้องอบแห้งเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของความดันภายในห้องอบแห้งยังมีค่าความดันอยู่ในช่วงความดันสุญญากาศ

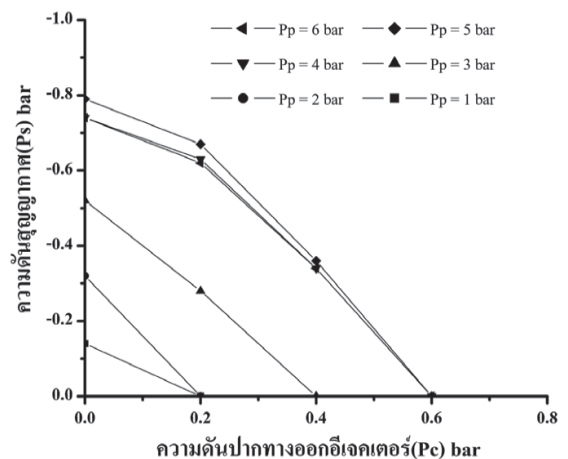
4.3 อิทธิพลของความดันปากทางออกอีเจ็คเตอร์ (P_{exit}) ต่อค่าความดันสุญญากาศ (P_s)

ความดันปากทางออกอีเจ็คเตอร์ (P_{exit}) เป็นอีกหนึ่งเงื่อนไขสำคัญที่มีผลต่อการทำงานของอีเจ็คเตอร์ เนื่องจากถ้าค่าความดันบริเวณปากทางออกของอีเจ็คเตอร์มีค่าสูงเกินค่าความดันวิกฤต (Critical back pressure) ของอีเจ็คเตอร์ไป จะทำให้การไหลภายในอีเจ็คเตอร์มีการไหลในช่วง unchoke flow ซึ่งจะทำให้อีเจ็คเตอร์เหนี่ยวนำของไหลทุติยภูมิได้น้อยลง ส่งผลให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (R_m) ลดลง หรือถ้าความดันปากทางออกของอีเจ็คเตอร์มีค่ามากกว่าค่าความดันย้อนกลับ (Breakdown pressure) จะทำให้การไหลภายในอีเจ็คเตอร์เกิดการไหลย้อนกลับ และอีเจ็คเตอร์จะไม่สามารถทำงานต่อไปได้ การทดลองนี้จะทำการทดลองโดยการกำหนดความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์เท่ากับ 0, 0.2, 0.4 และ 0.6 bar (ความดันเกจ) เพื่อทำการศึกษาความดันปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ที่มีผลต่อค่าความดันสุญญากาศ โดยใช้ ความดันป้อนใน ช่วง 1–6 bar (ความดันเกจ) ในการสร้างความดันสุญญากาศให้กับห้องอบแห้ง จากรูปที่ 8 พบว่า เมื่อความดันปากทางออกของอีเจ็คเตอร์เพิ่มขึ้น ความดันสุญญากาศภายในห้องอบแห้งจะมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก อีเจ็คเตอร์เหนี่ยวนำอากาศจากห้องอบแห้ง

ได้น้อยลง และเมื่อความดันป้อนเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความดันย้อนกลับ (Breakdown pressure) ของอีเจ็คเตอร์มีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้อีเจ็คเตอร์ มีช่วงการทำงานที่กว้างขึ้น



รูปที่ 7 แสดงผลของไหลของอากาศเข้าสู่ห้องอบแห้งสุญญากาศต่อค่าความดันสุญญากาศ



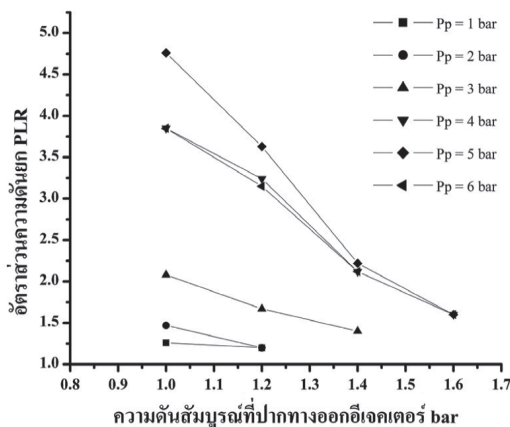
รูปที่ 8 แสดงผลของความดันปากทางออกอีเจ็คเตอร์ต่อค่าความดันสุญญากาศ

4.4 อิทธิพลของความดันปากทางออกอีเจ็คเตอร์ (P_{exit}) ที่มีต่ออัตราส่วนความดันยก (PLR)

ทำการศึกษาอิทธิพลของความดันปากทางออกอีเจ็คเตอร์ที่มีต่ออัตราส่วนความดันยก โดยกำหนดให้ความดันปากทางออกอีเจ็คเตอร์ มีค่าเท่ากับ 1, 1.2, 1.4 และ 1.6 bar (ความดันสมบูรณ์) ตามลำดับ โดยใช้ค่าความดันป้อนเท่ากับ 1, 2, 3, 4, 5, และ 6 bar (ความดันเกจ) ตามลำดับ จากรูปที่ 9 พบว่า เมื่อค่าความดันปากทางออก

อีเจ็คเตอร์เพิ่มขึ้นค่าความดันยกจะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อความดันปากทางออกของอีเจ็คเตอร์เพิ่มขึ้น อีเจ็คเตอร์จะเหี่ยวนำเอาอากาศจากห้องอบแห้งได้ลดลง ทำให้ความดันภายในห้องอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น เมื่อความดันภายในห้องอบแห้งสูงขึ้นจึงทำให้อัตราส่วนความดันยกมีค่าลดลง

เมื่อความดันปฐมนุญมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความดันยกจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจาก เมื่อความดันปฐมนุญเพิ่มขึ้นจะสามารถเหี่ยวนำอากาศในห้องอบแห้งเพิ่มขึ้น จะทำให้ความดันภายในห้องอบแห้งลดลง เมื่อความดันในห้องอบแห้งลดลง จึงทำให้อัตราส่วนความดันยกมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 9 แสดงผลความดันปากทางออกที่มีผลต่ออัตราส่วนความดันยก

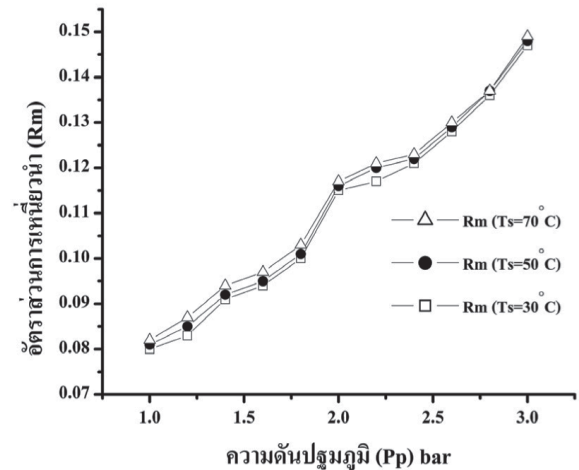
4.5 อิทธิพลของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง (T_s) ที่มีผลต่ออัตราส่วนการเหี่ยวนำ (R_m)

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งที่มีผลต่ออัตราส่วนการเหี่ยวนำของอีเจ็คเตอร์ โดยอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส, 50 องศาเซลเซียส และ 70 องศาเซลเซียส และค่าความดันปฐมนุญมีค่าอยู่ในช่วง 1-6 bar จากรูปที่ 10.1 และ 10.2 พบว่า เมื่ออุณหภูมิภายในห้องอบแห้งมีค่าสูงขึ้นค่าอัตราส่วนการเหี่ยวนำจะมีค่าสูงขึ้นด้วย โดยที่อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส มีค่าอัตราส่วนการเหี่ยวนำสูงที่สุด โดยมีค่าอัตราส่วนการเหี่ยวนำสูงกว่าที่อุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส และ 50 องศาเซลเซียส โดยเฉลี่ยร้อยละ 10.3 และ 3.9 ตามลำดับ

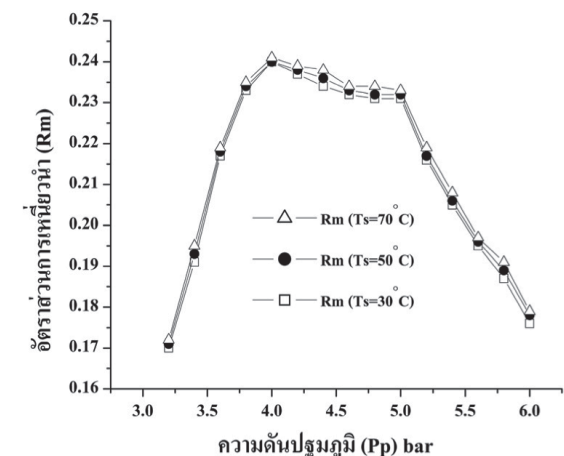
เมื่อค่าความดันปฐมนุญมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1-4 bar ค่าอัตราส่วนการเหี่ยวนำจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าอัตรา

ส่วนการเหี่ยวนำสูงที่สุดประมาณ 0.24 ที่ความดันปฐมนุญเท่ากับ 4 bar และเมื่อค่าความดันปฐมนุญมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 4-6 bar อัตราส่วนการเหี่ยวนำจะมีแนวโน้มลดลง

ทั้งนี้เนื่องจากว่าที่ความดันปฐมนุญในช่วง 4-5 bar อัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลปฐมนุญมีค่ามากกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของของไหลทุติยภูมิ และที่ความดันปฐมนุญในช่วง 5-6 bar อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลทุติยภูมิมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 6 จึงทำให้อัตราส่วนการเหี่ยวนำมีค่าลดลง



รูปที่ 10.1 แสดงผลของอุณหภูมิทุติยภูมิต่ออัตราส่วนการเหี่ยวนำ (R_m) ที่ช่วงความดันปฐมนุญ 1-3 bar



รูปที่ 10.2 แสดงผลของอุณหภูมิทุติยภูมิต่ออัตราส่วนการเหี่ยวนำ (R_m) ที่ช่วงความดันปฐมนุญ 3-6 bar

5. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาตัวแปรของการอบแห้งสุญญากาศที่มีผลต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ ไอน้ำร้อนที่ใช้ในการอบแห้งระบบสุญญากาศ ซึ่งตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ความดันปฐมภูมิ อัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านห้องอบแห้ง ความดันปากทางออกของอีเจ็คเตอร์ และอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ที่ทำการศึกษได้แก่ อัตราส่วนความดันยก อัตราส่วนการเหนียวน้ำ จากการศึกษา พบว่า เมื่อความดันปฐมภูมิเพิ่มขึ้น ความดันสุญญากาศภายในห้องอบแห้งจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าความดันสุญญากาศในห้องอบแห้ง มีค่าสูงสุดเท่ากับ -0.79 bar (ความดันเกจ) ที่ความดันปฐมภูมิเท่ากับ 5 bar (ความดันเกจ)

เมื่ออัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านห้องอบแห้งเพิ่มขึ้นเป็น $2,500$ L/hr ความดันในห้องอบแห้งจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย และทำให้ความดันสุญญากาศมีแนวโน้มลดลง ซึ่งมีค่าลดลงประมาณร้อยละ $6-12$ เมื่อเทียบกับการที่ไม่ปล่อยอากาศไหลผ่านห้องอบแห้ง

เมื่อความดันปากทางออกของอีเจ็คเตอร์เพิ่มขึ้น ความดันสุญญากาศภายในห้องอบแห้ง จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่อัตราส่วนความดันยกจะมีแนวโน้มลดลง และเมื่อความดันปฐมภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนความดันยกจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

เมื่ออุณหภูมิภายในห้องอบแห้งมีค่าสูงขึ้นค่าอัตราส่วนการเหนียวน้ำจะมีค่าสูงขึ้นด้วย โดยที่อุณหภูมิในห้องอบแห้งเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส มีค่าอัตราส่วนการเหนียวน้ำสูงที่สุด โดยมีค่าอัตราส่วนการเหนียวน้ำสูงกว่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และ 50 องศาเซลเซียส โดยเฉลี่ยร้อยละ 10.3 และ 3.9 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าอัตราส่วนการเหนียวน้ำสูงสุดประมาณ 0.24 ที่ความดันปฐมภูมิเท่ากับ 4 bar

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sumpun Chaitep."Design and Performance Evaluation of a Water Ejection Type Vacuum Drying System", The complete research report Chiang Mai University; 2002. (In Thai).
- [2] Montgomery S.W., Goldschmidt V.W. and Franchek M.A. "Vacuum Assisted Drying of Hydrophilic Plates: Static Drying Experiments". *Journal of Heat Mass Transfer*, 1998; 414: 735-744.
- [3] Kyu Yong Seo, Anyang-Shi. Delta Medical Co., Ltd., Kyonggi-Do (KR); 2002.
- [4] Keenan J.H. and Neumann E. P. "A simple air ejector", *Transacation of the ASME Journal of Applied Mechanics*, 1942.
- [5] Keenan J.H., Neumann E. P. and Lustwerk F. "A investigation of ejector design by analysis and experiment", *Transacation of the ASME Journal of Applied Mechanics*, 1950.
- [6] Sriveerakul T, Aphornratana S and 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.
- [7] Suvamakuta N, Uthakorn K, Sriveerakul T. and 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.
- [8] ESDU – Engineering Sciences Data Unit, Ejectors and jet pumps, Design for steam driven flow, Engineering Sciences Data Unit, 251-259 Regent Street, London. 1986. Item No. 86030.