การศึกษาสมรรถนะของเครื่องขยายตัวแบบ 3 ลูกสูบโดยใช้ลมอัดเป็นสารทำงาน

Performance Study of a Three Cylinder Reciprocal Piston Expender Driven by Compressed Air as Working Fluid

นพพร เทนอิสสระ[1], ศิริชัย เทพา[1], วีระพล โมนยะกุล[2]
Nopporn Tenissara[1], Sirichai Thepa[1], Veerapol Monyakul[2]

(Received: October 10, 2017; Revised: November 1, 2017; Accepted; November 16, 2017)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอสมรรถนะของเครื่องขยายตัวแบบลูกสูบขนาด 831 cc โดยใช้ลมอัดเป็นสารทำงาน สร้างขึ้นจากการดัดแปลงแก้ไขเครื่องยนต์ดีเซล 3 สูบ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสมรรถนะเบื้องต้น และเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาเครื่องขยายตัวแบบลูกสูบเพื่อประยุกต์ใช้กับวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์แบบความดัน และอุณหภูมิต่ำ เครื่องขยายตัวแบบลูกสูบได้ถูกติดตั้ง และทดสอบโดยไดนาโมมิเตอร์ภายใต้ความดันทางเข้าคงที่ 3, 5 และ 7 บาร์ เพื่อทำการวัดค่าแรงบิด กำลัง อัตราการใช้ลมที่ความเร็วรอบต่างๆ ผลการทดสอบพบว่า เครื่องขยายตัวแบบลูกสูบสามารถผลิตกำลังสูงสุด 166 วัตต์ 410 วัตต์ และ 600 วัตต์ ที่ความเร็วรอบเฉลี่ย 200 รอบต่อนาที ซึ่งคือช่วงการทำงานที่เหมาะสมที่สุด มีค่าประสิทธิภาพไอเซนทรอปิค 31% 49% และ 51% ตามลำดับ สามารถนำเครื่องขยายตัวไปประยุกต์ใช้กับลมอัด หรือไอของสารอินทรีย์ที่ได้จากความร้อนเหลือทิ้งในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

คำสำคัญ: เครื่องขยายตัว ลมอัด วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิค สมรรถนะ

Abstract

This research presents performance of a 831 cc. reciprocal pistol expander engine, using compressed air as working fluid. This engine was modified from 3-pistol diesel engine, in order to evaluate its basic performance. Generally, the result of this work will be used in the future for developing a better Organic Rankine cycle engine. The engine was setup for evaluation with a dynamo driven platform under constant charge pressure at 3 bars, 5 bars and 7 bars, in order to find toque, power and air-flow rate. This was done by varying engine speed, whereas the power was 166 W., 410 W. and 600 W., with 200 rpm. for average speed and an isentropic efficiency of 31%, 49% and 51%, respectively. Under optimal conditions, engine can be used with compressed air to produce electrical energy.

Keywords: Expander, Compressed Air, Organic Rankin, Isentropic Efficiency, Performance

[1] คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
[1] School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi
[2] สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
[2] Pilot Plant Development and Training Institute, King Mongkut's University of Technology Thonburi (Bang Khun Thian)

บทนำ

ในปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มสูงขึ้น โรงไฟฟ้าส่วนใหญ่ใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงประเภทฟอสซิล ซึ่งมีแนวโน้มสูงขึ้น และหมดไป นอกจากนั้นยังส่งผลต่อสภาพสิ่งแวดล้อม เช่น ภาวะโลกร้อน มลพิษต่างๆ และฝนกรด เป็นต้น เพื่อจะลดปัญหาดังกล่าวนักวิจัยได้พัฒนาระบบการผลิตไฟฟ้าที่สามารถใช้พลังงานทดแทนหรือความร้อนเหลือทิ้งจากโรงงาน และนำมาใช้ผลิตไฟฟ้าร่วมกับโรงไฟฟ้าประเภทฟอสซิล ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า และลดการใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิลลงได้ เรียกว่า ระบบผลิตพลังงานความร้อนร่วม (Combined Heat and Power. CHP)

ในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมมีความร้อนเหลือทิ้งอย่างมากมาย หากสามารถนำพลังงานเหล่านั้นมาใช้ในระบบผลิตพลังงานความร้อนร่วม หรือผลิตกระแสไฟฟ้าใช้เองในโรงงานจะทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตได้ ด้วยเหตุที่ความร้อนเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมบางประเภทมีอุณหภูมิต่ำประมาณ 90°C-100°C องศาเซลเซียส จึงไม่สามารถนำไปใช้กับวัฏจักรไอน้ำ หรือวัฏจักรแรงคิน (Rankine circle) ทั่วไปได้ หากแต่สามารถนำไปใช้กับวัฏจักรแรงคินที่ใช้สารทำงานอย่างอื่นๆ ได้เรียกว่า วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (Organic Rankine circle) หรือเรียกย่อๆ ว่า ORC จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ คือ เครื่องขยายตัว (Expander) ซึ่งเป็นอุปกรณ์เพื่อรองรับการขยายตัวของสารทำงาน (Working fluid) แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานกลใช้เป็นต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Guoquan, Hao & Saffa, 2011) ได้แบ่งเครื่องขยายตัวออกเป็น 2 ประเภท คือ เครื่องขยายตัวแบบความเร็ว เช่น กังหันแบบต่างๆ และเครื่องขยายตัวแบบปริมาตร เช่น สกรู (Screw Expander) ก้นหอย (Scroll Expander) แผ่นเวน (Vane Expander) และลูกสูบไปกลับ (Reciprocal Piston Expander) เครื่องขยายตัวแบบความเร็วหรือกังหันจะเปลี่ยนพลังงานจลน์ของสารทำงานให้เป็นพลังงานกล สารทำงานก่อนเข้ากังหันจึงต้องมีความเร็วสูงและมีสภาพเป็นไอ 100% เพื่อป้องกันการเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับกังหันได้ ดังนั้นสารทำงานจะต้องมีความดัน และอุณหภูมิสูงพอสมควรจึงทำให้สารทำงานอยู่ในสภาวะดังกล่าวได้ กังหันส่วนใหญ่จะใช้กับวัฏจักรแรงคินที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน ซึ่งมีใช้ทั่วไปนิยมเรียกว่าวัฏจักรไอน้ำ ส่วนเครื่องขยายตัวแบบปริมาตรจะนิยมใช้กับวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ เนื่องจากการใช้กังหันในวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ กังหันจะมีประสิทธิภาพต่ำ และมีราคาแพงไม่คุ้มกับการลงทุน เครื่องขยายตัวแบบปริมาตรสารทำงานจะขยายตัวในปริมาตรที่จำกัด ดังนั้นสารทำงานจึงไม่จำเป็นต้องมีความเร็วสูง สามารถทำงานได้แม้ว่าสารทำงานจะมีสภาวะความดัน และอุณหภูมิต่ำ หรือมีสถานะเป็นของผสม เช่น ในกรณีการใช้ลมอัดเป็นสารทำงานในเครื่องขยายแบบก้นหอย (Liu, Zhao &Li, 2010) พบว่าค่าประสิทธิภาพเชิงปริมาตรสูงสุด 69% ที่ระยะห่างของช่องขด 0.04 mm นอกจากนั้น (Wei, Yu-Ting, Chong-fang, Lin-ding & Jian, 2011) ใช้ลมอัดความดัน 5 บาร์ ในเครื่องขยายตัวแบบสกรูพบว่าได้ค่ากำลังสูงสุด 5 kW ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิค 0.59 ที่ความเร็วรอบ 2850 รอบต่อนาที ในทำนองเดียวกัน (Aleksandra, Borsukiewicz & Gozdur, 2013) ใช้เครื่องขยายแบบปริมาตรชนิดก้นหอย ผลปรากฏว่าประสิทธิภาพไอเซนทรอปิคสูงสุดมีค่า 0.68-0.7 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรมีค่า 0.08 และกำลังที่ได้มีค่าอยู่ระหว่าง 1100 -1500 W ที่ขณะความเร็วรอบ 4500-3000 รอบต่อนาที

งานวิจัยนี้จึงนำเครื่องยนต์แบบลูกสูบ มาใช้เป็นเครื่องขยายตัว แทนกังหันซึ่งมีราคาสูง และมีประสิทธิภาพต่ำประกอบกับเครื่องยนต์แบบลูกสูบหาได้ง่าย และมีราคาถูก โดยใช้ลมอัดเป็นสารทำงานแทนสารอินทรีย์เพื่อศึกษาการทำงานของเครื่องขยายตัว เพราะมีความสะดวกกว่าและเตรียมได้ง่าย ประกอบกับจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ (Wei, Yu-Ting, Chong-fang, Lin-ding & Jian, 2011) พบว่าการใช้ลมอัดเป็นสารทำงานในเครื่องขยายตัวแบบสกรูจะให้ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิคสูงสุด 0.59 และ (Biao, Wei, Yu, Chong, Jing & Lei et al, 2016) ใช้สารอินทรีย์ในเครื่องขยายตัวแบบสกรูเช่นเดียวกันให้ค่าประสิทธิภาพไอเซนทรอปิคสูงสุด 0.73 นอกจากนั้นจากการรายงานของ (Xia, Zhang, Wu, Ma, Ji, Liu & Guo et al, 2015) พบว่าการใช้ไอที่มีสภาวะแห้งกว่าในเครื่องขยายตัวแบบปริมาตรจะส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลง 7% ถึง 8% เพราะฉะนั้นการใช้ลมอัดแทนสารอินทรีย์จะส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลงเล็กน้อย ฉะนั้นหากสามารถออกแบบเครื่องขยายให้สามารถใช้กับลมอัดที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าได้ก็สามารถใช้สารอินทรีย์ที่ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าได้เช่นเดียวกัน

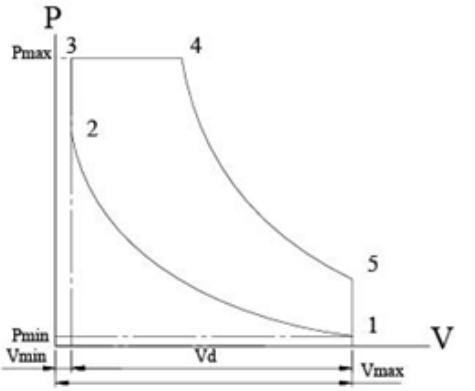
วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเครื่องยนต์แบบลูกสูบมาใช้เป็นเครื่องขยายตัว และทดสอบหาสมรรถนะ เช่น กำลังแรงบิด อัตราการไหลของสารทำงานที่ความเร็วรอบต่างๆ

ระเบียบวิธีวิจัย

1. หลักการทำงานและการวิเคราะห์

เครื่องขยายตัวแบบลูกสูบเป็นอุปกรณ์ที่ผลิตงาน และทำงานเป็นวัฏจักรเช่นเดียวกับเครื่องยนต์ทั่วๆ ไป กระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์จึงเป็นวัฏจักรเหมือนกับเครื่องยนต์ทั่วไป ภาพที่ 1 แสดงวัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกส์ของเครื่องขยายตัวแบบลูกสูบ ซึ่งถูกนำเสนอโดย (Badami & Mura, 2009) วัฏจักรการทำงานประกอบด้วย กระบวนการอัดตัวแบบไอเซนทรอปิค (1-2) เป็นการอัดสารทำงานที่ตกค้างในกระบอกสูบ หลังจากนั้นกระบวนการ (2-3-4) จะเป็นการประจุสารทำงานเข้าไปในกระบอกสูบจนกระทั่งสิ้นสุดที่กระบวนการ (4) กระบวนการที่ (4-5) จะเป็นการขยายตัวแบบไอเซนทรอปิคโดยที่วาล์วปิดทั้งคู่ และสุดท้ายกระบวนการที่ (5-1) คือ กระบวนการระบายออก ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 วัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกส์ของเครื่องขยายตัวแบบลูกสูบ ที่มา (Badami & Mura, 2009)

พารามิเตอร์ที่ใช้กำหนดสมบัติทางเรขาคณิตของเครื่องขยายตัวแบบลูกสูบจะถูกนิยามไว้ดังนี้

1) ปริมาตรกวาด (V_d) ปริมาตรของกระบอกสูบที่ลูกสูบเคลื่อนที่ระหว่างศูนย์ตายล่างจนถึงศูนย์ตายบนหาได้จาก $V_d = V_{max} - V_{min}$ เมื่อ V_{max} คือ ปริมาตรกระบอกสูบสูงสุดขณะที่ลูกสูบอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ตายล่าง และ V_{min} คือ ปริมาตรช่องว่างระหว่างหัวลูกสูบกับฝาสูบขณะที่ลูกสูบอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ตายบน

2) อัตราส่วนการอัด หรือ อัตราส่วนปริมาตร (ε) คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรสูงสุดกับปริมาตรต่ำสุดหาได้จาก $\varepsilon = \frac{V_{max}}{V_{min}}$ ในกรณีที่ใช้กับเครื่องขยายตัวควรเรียกว่าอัตราส่วนปริมาตร

3) ปริมาตรการประจุ V_{charge} คือ ปริมาตรระหว่างที่ลูกสูบเคลื่อนที่จากศูนย์ตายบนลงสู่ศูนย์ตายล่างขณะที่วาล์วประจุเปิดให้สารทำงานไหลเข้ากระบอกสูบหาได้จาก $V_{charge} = V_4 - V_{min}$

4) อัตราส่วนปริมาตรการจ่าย (φ) คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรการปะจุต่อปริมาตรกวาดของเครื่องขยายตัวหาได้จาก $\varphi = \frac{V_{charge}}{V_d}$

ค่าของงานต่อวัฏจักรหาได้โดยการอินทิเกรตรอบวัฏจักรนำเสนอโดย (Badami & Mura, 2009) คือ

$$W_{cycle} = P_{max} V_d \left\{ \varphi + \frac{1+\varphi.(r-1)}{(k-1).(\varepsilon-1)} \left(1 - \left(\frac{1+\varphi.(\varepsilon-1)}{\varepsilon} \right)^{k-1} \right) \right\} - P_{min} V_d \left\{ \frac{\varepsilon.(\varepsilon^{k-1}-1)}{(k-1)(\varepsilon-1)} \right\} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{V_{max}}{V_{min}}, \quad \varphi = \frac{V_{charge}}{V_d}, \quad V_d = V_{max} - V_{min} \text{ and } V_{charge} = V_4 - V_{min}$$

P_{max} คือ ความดันประจุ, [N/m^2]

P_{min} คือ ความดันทางออก, [N/m^2]

V_d คือ ปริมาตรกวาดของลูกสูบ, [m^2]

ε คือ อัตราส่วนปริมาตร

φ คือ อัตราส่วนปริมาตรการจ่าย

V_{min} คือ ปริมาตรช่องว่างเหนือลูกสูบ เมื่อลูกสูบอยู่ TDC, [m^2]

V_{max} คือ ปริมาตรทั้งหมด, [m^2]

V_4 คือ ปริมาตรสุดท้ายที่ปะจุสารทำงานเข้ากระบอกสูบ, [m^2]

ค่ากำลังม้าเบรกของเครื่องขยายตัวแบบลูกสูบตามสมการ (Wang, Wu, Ma, Liu & Yu, 2011) คือ

$$T = F.r \quad (2)$$

$$P_b = \frac{Tn}{9550} \quad (3)$$

เมื่อ F คือ แรงกดที่วัดได้, [N]

r คือ ความยาวของแขนกด, [m]

P_b คือ กำลังม้าเบรก, [kW]

T คือ ทอร์กที่วัดได้, [N.m]

n คือ ความเร็วรอบของเครื่องขยายตัว, [rpm]

ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิคหาได้จาก ค่างานจริงของวัฏจักรตามสมการที่ (1) เทียบกับค่างานไอเซนทรอปิคที่สมมุติให้อากาศขยายตัวด้วยขบวนการไอเซนทรอปิคจากสภาวะทางเข้ากับทางออกของเครื่องขยายตัวตามสมการ (Wang, Wu, Ma, Liu & Yu, 2011) ดังนี้

$$W_{is} = \frac{k}{k-1} m_{circle} RT_{in} \left(1 - \left(\frac{P_{min}}{P_{max}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right) \quad (4)$$

$$m_{circle} = \frac{\dot{m}}{n} \quad (5)$$

$$\eta_{is} = \frac{W_a}{W_{is}} \times 100 \ \% \quad (6)$$

เมื่อ W_a คือ ค่าของงานต่อวัฏจักร [kJ]

η_{is} คือ ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิค

W_{is} คือ งานไอเซนทรอปิคต่อวัฏจักร, [kJ]

W_a คือ งานต่อวัฏจักรของเครื่องขยายตัวแบบลูกสูบ, [kJ]

T_{in} คือ อุณหภูมิทางเข้าของอากาศ, [k]

m_{circle} คือ มวลของอากาศที่ไหลเข้าต่อวัฏจักร, [kg]

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์การทดลองมีลักษณะเป็นเครื่องขยายตัวแบบลูกสูบถูกสร้างขึ้นโดยการใช้โครงสร้าง และกลไกการเคลื่อนที่ของเครื่องยนต์ดีเซล 3 สูบ ประกอบด้วย ลูกสูบต่อกับก้านสูบและเพลาข้อเหวี่ยง เคลื่อนที่แบบไปกลับในกระบอกสูบ โดยมีลำดับการทำงานของลูกสูบแต่ละสูบ 120 องศามุมเพลาข้อเหวี่ยง ปรับแต่งแก้ไขลูกสูบที่ใช้แหวนลูกสูบ แทนด้วยซีลไวตัน (Seal viton) แบบตัวยูเพื่อป้องกันการรั่วของสารทำงานลงสู่ห้องข้อเหวี่ยง (Crankcase) และถอดระบบกลไกที่ไม่จำเป็นออก เช่น ฝาสูบ ปั๊มเชื้อเพลิง เพลาลูกเบี้ยว วาล์วไอดีไอเสีย แทนด้วยกระบอกสูบลมแบบสแตนเลสเพราะมีผิวที่ละเอียดกว่ากระบอกสูบทั่วไป มีวาล์วนำเข้า และวาล์วนำออกแบบโซลินินอยล์วาล์วควบคุมด้วยไฟฟ้า ปรับตั้งให้มีปริมาตรการจ่าย (V_4) หรือจุดตัดจ่าย (Cut off) ที่ 50% เนื่องจากเป็นค่าเฉลี่ยในการจ่ายสารทำงานเข้ากระบอบสูบของเครื่องขยายตัว มีพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 1 และภาพที่ 2 แสดงโครงสร้างของเครื่องขยายตัวแบบลูกสูบ ประกอบด้วย 1) ถังพักลม 2) โซลินินอยล์วาล์วทางเข้า 3) โซลินินอยล์วาล์วทางออก และ 4) ชุดควบคุมการปิดเปิดวาล์ว

ภาพที่ 2 เครื่องขยายตัวแบบลูกสูบ

ตารางที่ 1 แสดงพารามิเตอร์ของเครื่องขยายตัว

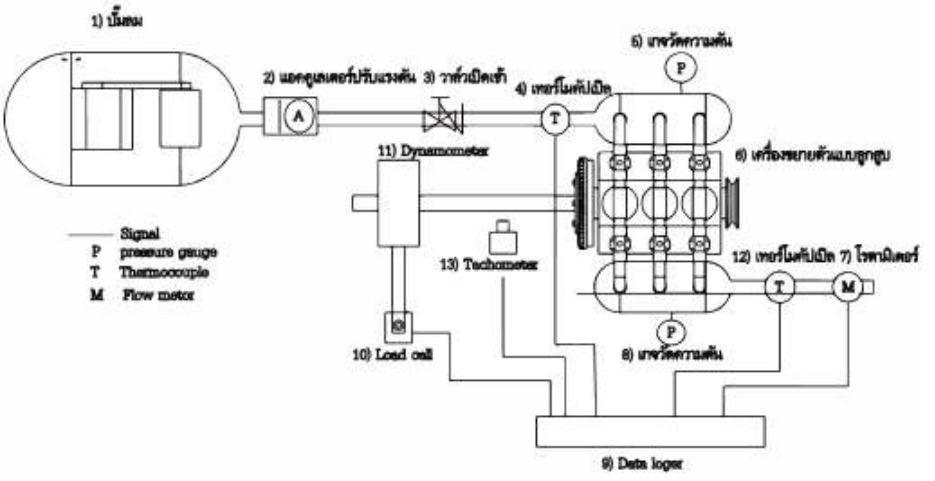
รายละเอียด	ข้อมูลจำเพาะ
เส้นผ่านศูนย์กลาง × ระยะชัก	70 × 72 mm
อัตราส่วนปริมาตร (ε)	3:1
อัตราส่วนปริมาตรการจ่าย (φ)	50%
มุมเพลาข้อเหวี่ยง	120 องศา
ปริมาตรกวาด (Vd)	831 cc

2.2 วิธีการทดลอง

การทดสอบเพื่อหาสมรรถนะของเครื่องขยายตัวจะดำเนินการ วัดค่าแรงบิด วัดอุณหภูมิอากาศขาเข้าและอุณหภูมิอากาศขาออก อัตราการไหลของอากาศ และความเร็วรอบของเครื่องขยายตัว โดยมีแผนผังการทดสอบดังภาพที่ 3 ซึ่งจะแสดงการติดตั้งอุปกรณ์การวัดค่าต่างๆ คือ

(1) ปั๊มลม Puma Model PX-415
(2) แอคคูเลเตอร์ปรับแรงดันและกรองอากาศ
(3) วาล์วเปิดเข้า
(4) เทอร์โมคับเปิลทางเข้า
(5) เกจวัดความดันทางเข้า
(6) เครื่องขยายตัวแบบลูกสูบ

(7) โรตามิเตอร์วัดอัตราการไหล (8) เกจวัดความดันทางออก
(9) Data logger (10) Load cell วัดแรงกด
(11) ไดนาโมมิเตอร์ (12) เทอร์โมคัปเปิลทางเข้า
(13) Tachormeter วัดความเร็วรอบ

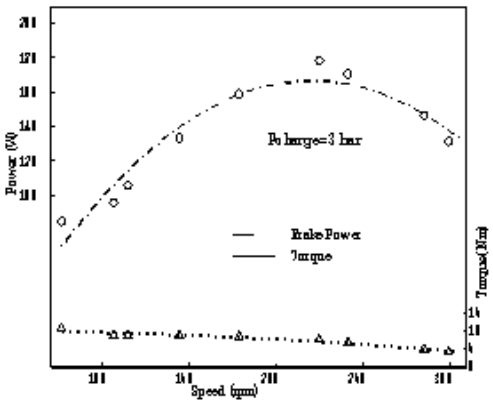


ภาพที่ 3 แผนผังการทดสอบ

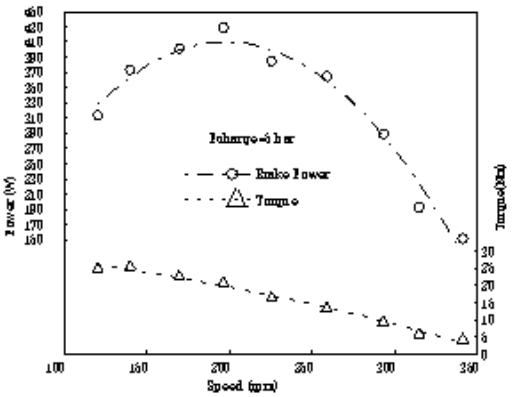
จากภาพที่ 3 อากาศหรือลมอัดจากปั๊มลมได้ถูกนำมาเป็นสารทำงานในเครื่องขยายตัว โดยมีขั้นตอนการทดสอบ คือ ทำการเปิดวาล์วทางเข้าเต็มที่ พร้อมกับปรับแรงดันที่แอคคูเลเตอร์ที่ 3 บาร์ เมื่อเครื่องขยายตัวมีความเร็วรอบสูงสุดทำการเบรกที่ความเร็วรอบสูงสุด บันทึกค่าแรงกดที่ Load cell อัตราการไหล อุณหภูมิของอากาศทางเข้า และทางออก หลังจากนั้นเพิ่มแรงเบรกจนกระทั่งความเร็วรอบลดลงประมาณ 50 รอบต่อนาที บันทึกค่าต่างๆ ที่รอบนั้น ทำการวัดที่รอบต่อไปโดยลดลงครั้งละ 50 รอบต่อนาทีจนกระทั่งเครื่องขยายตัวหมุนด้วยความเร็วรอบต่ำสุดหรือหยุดการทำงาน ปรับแรงดันที่แอคคูเลเตอร์ เพิ่มขึ้นเป็น 5 บาร์ และ 7 บาร์ และทำการทดลองซ้ำ เช่นเดียวกับที่ 3 บาร์

ผลการทดลอง

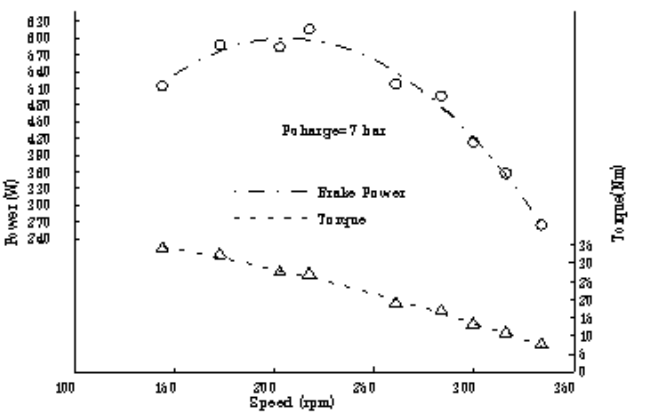
ในการศึกษาได้นำข้อมูลที่ได้มาหาความสัมพันธ์ของกำลังม้าเบรก แรงบิด ที่ความเร็วรอบต่างๆ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเครื่องยนต์เก่ามาประยุกต์ใช้ในวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ กราฟภาพที่ 5 แสดงค่ากำลังม้าเบรก และแรงบิด ที่ความเร็วรอบต่างๆ จากกราฟค่ากำลังม้าเบรกจะมีค่าเพิ่มตามความเร็วรอบจนกระทั่งความเร็วรอบประมาณ 200 รอบต่อนาที และหลังจากนั้นจะมีค่าลดลง เนื่องจากมีการสูญเสียทางกลเกิดขึ้น และระบบ buffer ในระบบจ่ายอากาศ เช่น ความฝืด การสูญเสียในกระบอกสูบซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นที่รอบสูงๆ การเพิ่มความดันประจุจะส่งผลให้ค่ากำลังเพิ่มขึ้น เช่น ความดัน 3 บาร์ กำลังม้าเบรกสูงสุดมีค่า 166 W ที่ความเร็วรอบ 205 รอบต่อนาที ขณะที่ความดัน 5 บาร์ กำลังม้าเบรกสูงสุดมีค่า 410 W ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที และ ความดัน 7 บาร์ มีค่า 600 W ที่ 210 รอบต่อนาที ส่วนค่าแรงบิดสูงสุดจะเกิดขึ้นที่รอบต่ำๆ และมีค่าลดลงตามความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น ที่ความดัน 3 บาร์ จะมีค่าสูงสุด 9.7 N.m ที่ 76 รอบต่อนาที ในขณะที่ความดัน 5 บาร์ มีค่าสูงสุด 25 N.m ที่ 120 รอบต่อนาที และความดัน 7 บาร์ มีค่าสูงสุด 35 N.m ที่ 144 รอบต่อนาที เมื่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทุกๆ ค่าการวัดมีค่าต่ำกว่า 1.8



(a)



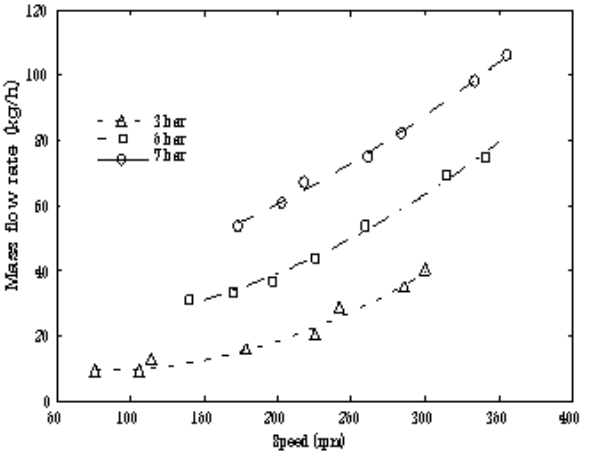
(b)



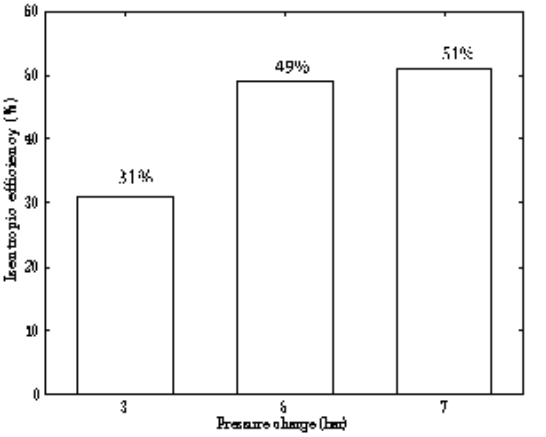
(c)

ภาพที่ 4 ค่ากำลัง แรงบิดที่ความเร็วรอบต่างๆ (a) 3 บาร์ (b) 5 บาร์ และ (c) 7 บาร์

ผลการศึกษาเพื่อหาปริมาณของอากาศอัดที่ต้องการใช้ ที่ความดันอากาศอัด 3 5 และ 7 บาร์ ดังภาพที่ 5 จากภาพค่าอัตราการไหลของอากาศ จะเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบ โดยเฉพาะที่ความเร็วรอบสูงๆ จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว การเพิ่มความดันประจุจะทำให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้น เช่น ที่ความเร็วรอบการทำงานที่ให้กำลังสูงสุด ค่าอัตราการไหลของลม 3 บาร์ มีค่า 20 kg/h 5 บาร์มีค่า 40 kg/h และ 7 บาร์ มีค่า 65 kg/h โดยใช้เครื่องมือวัดที่มีค่าผิดพลาด ±2.5%



ภาพที่ 5 ค่าอัตราการไหลของอากาศที่ความเร็วรอบต่างๆ 3 บาร์ 5 บาร์ และ 7 บาร์



ภาพที่ 6 ค่าประสิทธิภาพไอเซนทรอปิคที่ความดันต่างๆ

ผลการศึกษาเพื่อหาประสิทธิภาพไอเซนทรอปิดังภาพที่ 6 จากภาพแสดงค่าประสิทธิภาพไอเซนทรอปิค ซึ่งที่ความดันต่ำจะมีประสิทธิภาพน้อย และเพิ่มขึ้นตามความดันประจุ เช่นที่ความดัน 3 จะมีค่า 31% 5 บาร์ มีค่า 49% และ 7 บาร์ มีค่า 51% ตามลำดับ

อภิปรายผล

การนำเครื่องขยายตัวแบบ 3 ลูกสูบ มาใช้แทนกังหันพบว่า เครื่องขยายตัวทำงานได้ดี สามารถผลิตกำลังได้สูงสุดที่ความเร็วรอบเฉลี่ย 205 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นความเร็วรอบที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน การเพิ่มความดันประจุจะส่งผลให้กำลังมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นยังส่งผลให้ประสิทธิภาพมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จะเห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพของเครื่องขยายตัวที่ความดันต่ำ (3 บาร์) จะมีค่าน้อยมาก การเพิ่มความดันขึ้น 5 บาร์ และ 7 บาร์ ประสิทธิภาพจะมีค่าเพิ่มขึ้น ในระหว่าง 5 บาร์ ถึง 7 บาร์

ประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นไม่มาก เพราะฉะนั้นหากพิจารณาการออกแบบเครื่องขยายตัวช่วงความดันดังกล่าว ความดันที่เหมาะสมคือ 5 บาร์ เมื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพกับเครื่องขยายตัวแบบอื่นเช่น เครื่องขยายตัวแบบสกรูตามที่ (Wang, Wu, Ma, Liu & Yu, 2011) มีค่าใกล้เคียงกัน เพราะฉะนั้นหากนำเครื่องขยายตัวแบบลูกสูบไปใช้กับ ORC โดยใช้สารอินทรีย์เป็นสารทำงานจะสามารถทำงานได้ดี และมีประสิทธิภาพสูงกว่าลมอัดเล็กน้อย เช่น เดียวกับเครื่องขยายตัวแบบปริมาตรอื่นๆ

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเครื่องยนต์แบบลูกสูบ ขนาด 831 cc มาใช้เป็นเครื่องขยายตัว เพื่อประยุกต์ใช้กับวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ โดยใช้อากาศอัดแทน ไอของสารอินทรีย์เนื่องจากมีความสะดวกกว่า จากผลการศึกษา พบว่า ค่ากำลัง และอัตราการใช้อากาศมีค่า 166 W 20 kg/h ที่ 3 บาร์ 410 W 40 kg/h ที่ 5 บาร์ และ700 W 65 kg/h ที่ 7 บาร์ ขณะที่ความเร็วรอบเฉลี่ย 205 รอบต่อนาที ค่าแรงบิดสูงสุดมีค่า 9.7 N.m 25 N.m 35 N.m ตามลำดับ และจะเกิดขึ้นที่รอบต่ำสุดซึ่งเป็นข้อดี เพราะฉะนั้นหากนำเครื่องขยายตัวไปใช้ความเร็วรอบไม่ควรเกิน 205 รอบต่อนาที หากความเร็วรอบเกินนั้นจะมีอัตราการใช้อากาศสูงแต่มีสมรรถนะต่ำ ด้านประสิทธิภาพไอเซนทรอปิคที่ความดัน 3 บาร์จะมีค่า 31% ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำ และจะเพิ่มขึ้นตามความดัน ที่ 5 บาร์ มีค่า 49% ที่ 7 บาร์ มีค่า 51% มีค่าต่างกันไม่มากเพราะฉะนั้นควรนำเครื่องขยายตัวไปใช้ที่ความดันสูงกว่า 5 บาร์ จากการศึกษาพบว่าเครื่องขยายตัวแบบลูกสูบสามารถนำไปใช้งานกับวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ได้ตั้งแต่ความดันเริ่มต้นที่ 5 บาร์ ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพไอเซนทรอปิคใกล้เคียงกับเครื่องขยายตัวแบบอื่นๆ ซึ่งหายากกว่า เครื่องขยายตัวแบบลูกสูบนอกจากนั้นยังมีราคาถูกเพราะสามารถสร้างจากเครื่องยนต์เก่า หรือเครื่องยนต์ในการเกษตรซึ่งมีอยู่มากมายในประเทศ

ข้อเสนอแนะ

การนำเครื่องขยายตัวแบบลูกสูบไปใช้ หากประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบเก็บลมอัดควรตั้งความดันลมอัดที่ 5 บาร์ และใช้ร่วมกับ ORC ควรเลือกสารทำงานที่มีช่วงการทำงานที่ความดันสูงสุดประมาณ 5 บาร์ ด้วยเหตุที่เครื่องขยายตัวผลิตกำลังได้ที่ความเร็วรอบต่ำ ควรต่อร่วมกับเกียร์เพื่อให้สามารถทำงานที่ความเร็วรอบอื่นๆ ได้

การสูญเสียที่ระบบ buffer ของระบบจ่ายอากาศ ควรจะเลือกเครื่องอัดอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงและมีถังเก็บลมขนาดใหญ่ และเพิ่มขนาดถังพักลมก่อนเข้าเครื่องขยายตัวให้มีขนาดใหญ่ขึ้นจะได้จ่ายลมให้ทันเมื่อรอบสูงๆ

การวิจัยครั้งต่อไปควรใช้สารทำงานที่เป็นสารอินทรีย์จริงๆ และศึกษาวาล์วควบคุมแบบอื่น เช่น วาล์วกลไกแล้วเปรียบเทียบกับโซลินินอยล์วาล์ว

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณคณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สถาบันฝึกอบรมและพัฒนาโรงงานต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระเจ้าเกล้าธนบุรี วิทยาเขตบางขุนเทียน และขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

รายการอ้างอิง (References)

Aleksandra, Borsukiewicz, & Gozdur. (2013). Experimental investigation of R227ea applied as working fluid in the ORC power plant with hermetic turbogenerator. *Applied Thermal Engineering, 56*(1-2), 126-133.

Badami, M., & M. Mura. (2009). Preliminary design and controlling strategies of a small-scale wood waste Rankine Cycle (RC) with a reciprocating steam engine (SE). *Energy, 34*(9), 1315-1324.

Guoquan Qiu, Hao Liu & Saffa Riffat. (2011). Expanders for micro-CHP systems with organic Rankine cycle. *Applied Thermal Engineering, 31*(16), 3301-3307.

Liu Guangbin, Zhao Yuanyang & Li Liansheng. (2010). Simulation and experiment research on wide ranging working process of scroll expander driven by compressed air. *Applied Thermal Engineering, 30*(14), 2073-2079.

Wei Wang, Yu-ting Wu, Chong-fang Ma, Lin-ding Liu & Jian Yu. (2011). Preliminary experimental study of single screw expander prototype. *Applied Thermal Engineering, 31*(17-18), 3684-3688.

Biao Lei, Wei Wang*, Yu-Ting Wu, Chong-Fang Ma, Jing-Fu Wang, Lei Zhang, Chuang Li,Ying-Kun Zhao, & Rui-Ping Zhi. (2016). Development and experimental study on a single screw expander integrated into an Organic Rankine Cycle. *Energy, 116*(Part 1), 43-52.

Xia, G.-D., Zhang, Y.-Q., Wu, Y.-T., Ma, C.-F., Ji, W.-N., Liu, S.-W., & Guo, H. (2015). Experimental study on the performance of single-screw expander with different inlet vapor dryness. *Applied Thermal Engineering, 87*(Supplement C), 34-40.