

การออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดอัลฟาจากเครื่องอัดอากาศ
The Design and Construction of an Alpha-type Stirling Engine from
an Air Compressor Unit

ไพบูลย์ ศรีภาคกร* และ จิตกร ศรีสายชล
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท วังใหม่ ปทุมวัน กท 10330
อีเมลล์ Paiboon.S@Chula.ac.th

Paiboon Sripakagorn* and Jitakorn Srisaichol
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
Phaya Thai Road, Wang Mai, Pathum Wan, Bangkok, Thailand 10330
Tel: +66 (0)-2218-6610 Fax: +66 (0)-2252-2889
Corresponding author: Paiboon.S@Chula.ac.th

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้เป็นความพยายามในการสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดอัลฟาจากชิ้นส่วนมาตรฐานของเครื่องอัดอากาศ โดยในการออกแบบใช้สมการเชิงทอโลจี้พร้อมด้วยการวิเคราะห์แบบ Schmidt และแบบ Adiabatic เพื่อการประเมินสมรรถนะการทำงานเบื้องต้นพร้อมด้วยการพิจารณาถึงปัญหาหลักในการปรับใช้เครื่องอัดอากาศได้แก่การออกแบบและสร้างฮีตเออร์ คูเลออร์และรีเจนเนอเรเตอร์ การซีลระบบเพื่อการทำงานที่ความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศ และการปรับแก้ลูกสูบด้านร้อนเพื่อทนต่อความร้อนของเครื่องยนต์ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ได้ถูกดัดแปลงขึ้นจากเครื่องอัดอากาศได้ถูกทำการทดสอบเบื้องต้นที่ความดันบรรยากาศ โดยพบว่าเครื่องยนต์ยังไม่สามารถทำงานได้ด้วยตัวเอง อย่างไรก็ตาม การทดสอบก็ได้พบว่าการทำนายแบบ Schmidt และแบบ Adiabatic ให้แนวโน้มที่ดีในการประเมินค่ากำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์

คำหลัก: เครื่องยนต์สเตอร์ลิง การออกแบบและสร้าง รีเจนเนอเรเตอร์

Abstract: The present work attempts to construct a Stirling engine from standard parts of an air compressor unit. Empirical formula coupled with the Schmidt and Adiabatic analysis have been employed for the initial performance estimation. Outstanding problems regarding the adoption of the air compressor include the design of heat exchangers, sealing of the pressurized system, and modifications of the piston to withstand high temperature. The engine still can not overcome the flow friction. Tests on the engine indicate that combination of the Schmidt and Adiabatic analysis and methods of Iwamoto could lead to a decent assessment of the indicated power and the running speed of a Stirling engine.

Keywords: Stirling engine, Design and construction, Regenerator.

1. บทนำ

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงประดิษฐ์โดย โรเบิร์ต สเตอร์ลิง ชาวสกอตแลนด์ เมื่อปี ค.ศ.1816 เป็นเครื่องยนต์ระบบปิดที่มีการเผาไหม้ภายนอก ในยุคนั้นใช้อากาศร้อนเป็นสารทำงาน จึงเรียกกันว่าเครื่องยนต์อากาศร้อน (Hot air engine) มีจุดเด่นตรงที่ทำงานได้เงียบและมีความปลอดภัยกว่าเครื่องจักรไอน้ำ ซึ่งมักจะเกิดระเบิดขึ้นบ่อยครั้ง ในขณะนั้นนิยมนำมาใช้เพื่อขับเครื่องสูบน้ำ แต่เครื่องยนต์สเตอร์ลิงก็มีข้อเสียตรงที่ให้ออกกำลังงานต่ำ เมื่อเทียบกับขนาดของตัวมันเอง และหากให้ความร้อนสูงเกินไปจะทำให้ชุดของ Heater เสียหายเนื่องจากข้อจำกัดเรื่องวัสดุในขณะนั้น เมื่อเทคโนโลยีด้านต่างๆได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ผู้คนส่วนใหญ่จึงหันมานิยมใช้เครื่องยนต์เผาไหม้ภายในและมอเตอร์ไฟฟ้ากันมากขึ้น เพราะมีความสะดวกในการใช้งานมากกว่า เครื่องยนต์สเตอร์ลิงจึงเสื่อมความนิยมลงไป

เมื่อเกิดภาวะราคาน้ำมันแพง ทำให้มีผู้สนใจเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมาพัฒนาให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ราวๆปี ค.ศ.1940 เมื่อบริษัทฟิลลิปส์ ได้พัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงออกจำหน่ายเพื่อใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก จากนั้นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจึงเริ่มเป็นที่สนใจอีกทั้งทั่วยุโรปและอเมริกา เครื่องยนต์สเตอร์ลิงในปัจจุบัน มีประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้น และมีการเผาไหม้ที่สะอาด เนื่องจากกระบวนการเผาไหม้เกิดขึ้นภายนอกกระบอกสูบ ทำให้ควบคุมคุณภาพอากาศเสียได้ง่ายกว่า และสามารถใส่เชื้อเพลิงได้หลายชนิด รวมทั้งมีชิ้นส่วนในการทำงานไม่มาก จึงทำให้การบำรุงรักษาทำได้ง่าย

ตามทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์ วัฏจักรสเตอร์ลิงเป็นกระบวนการที่ย้อนกลับได้ ดังนั้นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถนำมาปรับใช้ เพื่อทำงานในลักษณะเป็นปั๊มความร้อนได้อีกด้วย แม้ว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจะมีข้อดีอยู่หลายประการ แต่ในประเทศไทยมีการศึกษาเกี่ยวกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงกันอยู่น้อยมาก จึงเป็นแนวทางให้เกิดงานวิจัยเรื่องนี้ขึ้น โดยเพื่อสร้างเครื่องยนต์ต้นแบบเพื่อ

การศึกษาได้อย่างมีราคาถูก งานวิจัยนี้จะใช้ชิ้นส่วนเท่าที่สามารถหาได้ในท้องตลาดให้ได้มากที่สุด เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาจากข้อผิดพลาดของการผลิต และข้อจำกัดของวัสดุ รวมทั้งเพื่อความสะดวกและลดต้นทุนในการสร้างเครื่องยนต์ โดยเสนอว่ากลไกของเครื่องอัดอากาศแบบสองลูกสูบ สามารถนำมาดัดแปลงเพื่อสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบอัลฟาได้ เนื่องจากมีความเหมาะสมในแง่ของการจัดวางลูกสูบ โดยจะต้องสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเป็นช่องทางเชื่อมต่อสำหรับสารทำงานระหว่างลูกสูบ พร้อมส่วนประกอบเพิ่มเติมอื่นๆที่จำเป็นเพื่อการทำงานได้ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยจะได้กำหนดการออกแบบส่วนประกอบต่างๆด้วยทฤษฎีการวิเคราะห์เบื้องต้นทางเทอร์โมไดนามิกส์ และท้ายที่สุด จะได้ทำการวัดสมรรถนะเบื้องต้นของเครื่องยนต์ที่ได้ต่อไป

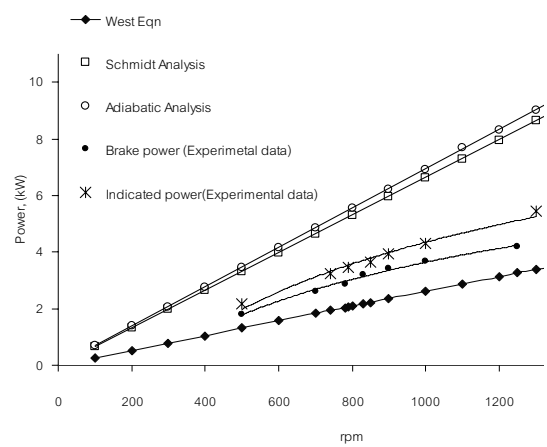
2. ทฤษฎีและการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะหาค่าของตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดการทำงานของเครื่องยนต์ แบบจำลองที่ใช้อธิบายวัฏจักรของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีหลายรูปแบบ โดยจะเริ่มต้นด้วยแบบจำลองที่ง่ายที่สุดก่อน เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ได้โดยง่าย จากนั้นจึงปรับเปลี่ยนกระบวนการที่เกิดขึ้นในวัฏจักร ให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น โดยประกอบด้วยการทำนายกำลังบ่งชี้ด้วยแบบจำลองวัฏจักรสเตอร์ลิงแบบ Isothermal แบบ Adiabatic แบบ Schmidt และแบบ Adiabatic [1] นอกจากนี้ ยังมีการทำนายกำลังขาออกด้วยสมการที่ได้มาจากการประมวลผลจากการทดลอง (Empirical formula) อันได้แก่ สมการของ West [2] และวิธีการของ Iwamoto [3] โดยในการนี้ จะได้ทำการทดสอบความสามารถในการทำนายสมรรถนะของแบบจำลองต่างๆกับเครื่องยนต์ต้นแบบเครื่องหนึ่ง ซึ่งมีข้อมูลมากเพียงพอที่จะทำการคำนวณได้ ในที่นี้จะใช้ ผลการทดลองของ Kagawa [4] เมื่อได้ทำการทดสอบ จนทราบความสามารถในการทำนายสมรรถนะของการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์แล้ว จึงนำแบบจำลองนั้นไปใช้กับเครื่องยนต์ในงานวิจัยนี้

จากการคำนวณ ได้ผลสรุปดังรูปที่ 1 โดยพบว่ากำลังบ่งชี้ที่ได้จากวัฏจักรแบบ Schmidt และ Adiabatic ให้ค่ากำลังที่ใกล้เคียงกัน และมีค่ามากกว่าผลการทดลองอยู่มาก ในขณะที่ผลจากการทดลองของ West จะให้กำลังขาออกซึ่งจะมีค่าต่ำกว่าผลการทดลอง หากกลับไปพิจารณาในรูปที่ 1 จะสังเกตเห็นว่าการคำนวณหาค่ากำลังบ่งชี้ในทางทฤษฎี จะมีค่ามากกว่ากำลังบ่งชี้ที่วัดได้จากการทดลองประมาณ 2 เท่า เนื่องจากทั้งสองวิธีนี้มีข้อกำหนดในการคำนวณว่า มวลของแก๊สคงที่ไม่มีรั่วซึม และไม่มีการสูญเสียความดันในช่องทางเดินของแก๊ส แต่อย่างไรก็ดีจะนำวิธีดังกล่าวนี้มาใช้ประมาณกำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์ในเบื้องต้นก่อน ด้วยแนวโน้มดังกล่าว ในงานนี้จะได้ประเมินกำลังบ่งชี้ด้วยค่ากำลังที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของวิธี Adiabatic analysis ส่วนกำลังขาออกจะประเมินโดยนำกำลังบ่งชี้มาหักลบกับกำลังเสียดทานที่ทดลองได้

การหาค่ากำลังด้วยวิธีต่างๆข้างต้นนั้น มีจุดที่ต้องระวังที่จำเป็นต้องทราบความเร็วรอบการทำงานเสียก่อน จึงจะนำไปคำนวณหาค่ากำลังขา

ออกได้ ซึ่งในการออกแบบจริง การไม่มีความเร็วรอบเพื่อตั้งต้นในการคำนวณนับเป็นปัญหาสำคัญโดยเฉพาะกับการใช้สมการของ West เพื่อให้ได้ค่าทำนายกำลังขาออกที่แม่นยำ สำหรับปัญหานี้ พบว่าวิธีของ Iwamoto [3] เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์เพื่อหาค่ากำลังและความเร็วรอบไปพร้อมๆกัน โดยใช้ตัวแปรพื้นฐานในการออกแบบต่างๆนำมาจัดเป็นกลุ่มให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ แล้วหาสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านี้ โดยจากการทดสอบวิธีการของ Iwamoto [5] พบว่า การคำนวณหาค่ากำลังขาออกมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่สูง แต่ให้ค่าประมาณความเร็วรอบที่ดี ดังนั้นจะนำวิธีการนี้มาใช้คำนวณหาความเร็วรอบเท่านั้น



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ของกำลังและความเร็วรอบ เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของ Kagawa [4]

จากนี้ก็จะได้นำวิธีการดังกล่าวไปประเมินพารามิเตอร์ ในการออกแบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ที่จะได้นำมาปรับใช้จากเครื่องอัดอากาศต่อไป โดยในขั้นแรกนั้น ลักษณะจำเพาะของเครื่องอัดอากาศเป็นเครื่องสองสูบรูปตัววี (V) มีเส้นผ่าศูนย์กลางกระบอกสูบ 65 มม ระยะชัก 50 มม มุมต่างเฟสของเพลลาข้อเหวี่ยง 90 องศา ดังนั้นปริมาตรกวาดของเครื่องยนต์จะเป็น 235 ซีซี โดยในเบื้องต้นกำหนดให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงในการทดลองนี้ทำงานที่ความดัน 2 บรรยากาศ อุณหภูมิการใช้งานด้านร้อนคาดว่าฮีทเตอร์ที่ใช้จะให้ความร้อนกับสารทำงานได้ประมาณ 300°C และอุณหภูมิการใช้งานด้านเย็นมีค่าประมาณ 30°C ปริมาตรของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราส่วนการอัดตัวเชิงปริมาตร γ_v ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ $\gamma_v = 2 - 3$ ถ้าหากต้องการให้ระบบมีอัตราการอัดเท่ากับ 3 จะต้องออกแบบให้ระบบมีปริมาตรคงที่ (Dead volume) เท่ากับ 50 ซีซี ซึ่งเป็นเรื่องที่ทำได้ยากในทางปฏิบัติ จึงพยายามออกแบบให้ระบบมีอัตราการอัดลดลงคือเท่ากับ 2 นั่นคือต้องทำให้ปริมาตรคงที่ของระบบมีค่าเท่ากับ 170 ซีซี โดยในขั้นต้นกำหนดให้ ฮีทเตอร์มีปริมาตร 80 ซีซี คูลเลอร์มีปริมาตร 45 ซีซี และรีเจนเนอเรเตอร์มีปริมาตร 16 ซีซี ที่ความพรุน(คือสัดส่วนของปริมาตรกระบอกรีเจนเนอเรเตอร์กับปริมาตรของเส้นลวด)เท่ากับ

0.5 สารทำงานที่ใช้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่นิยมใช้ คือ ฮีเลียม ไฮโดรเจน หรือคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ในการทดลองนี้จะใช้อากาศเป็น สารทำงาน เพื่อความง่ายและประหยัด จากข้อมูลตั้งต้นข้างต้น จาก วิธีการหาความเร็วรอบของ Iwamoto [3] ทำให้ประมาณความเร็วรอบที่ กำลังขาออกสูงสุดได้ 460 รอบต่อนาที ความเร็วรอบที่หามาได้ จะ นำไปใช้คำนวณต่อเพื่อหากำลังบ่งชี้สูงสุด จากการคำนวณแบบ Schmidt และ Adiabatic ให้ผล 69.55 วัตต์และ 55.09 วัตต์ตามลำดับ จากผลที่ได้จึงประมาณกำลังบ่งชี้ที่เครื่องยนต์ควรจะทำได้ โดยให้มีค่า ลดลงไปอีก 50 เปอร์เซ็นต์จากค่าทำนายจากวิธี Adiabatic คือ 27.5 วัตต์ จากนั้น จากการทดสอบเบื้องต้น พบว่ากำลังเสียดทานสถิตของ เครื่องอัดอากาศอยู่ที่ 5.7 วัตต์ ด้วยสภาวะที่กำหนดในขั้นต้นกล่าวคือ ความดันใช้งาน = 2 บาร์ ปริมาตรขยายตัว = 166 ซีซี อุณหภูมิด้าน ร้อน = 573 เคลวิน อุณหภูมิด้านเย็น = 313 เคลวิน ปริมาตรฮีเตอร์ = 80 ซีซี ปริมาตรคูลเลอร์ = 45 ซีซี ปริมาตรรีเจนเนอเรเตอร์ = 16 ซีซี มีความพรุน = 0.5 และใช้อากาศเป็นสารทำงาน เครื่องยนต์ควรจะให้ กำลังขาออกสูงสุด 21.8 วัตต์

3. การออกแบบส่วนประกอบ

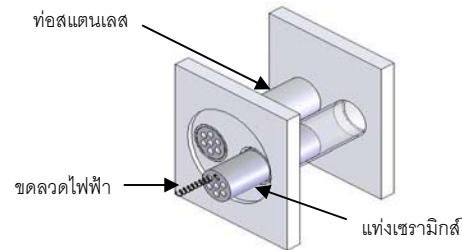
ในส่วนนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดการสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ซึ่ง อาจแบ่งเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อนได้แก่ ฮีเตอร์ คูลเลอร์ และรีเจนเนอเรเตอร์ และ อีกส่วนก็คือการแก้ไขตัดแปลงเครื่องอัดอากาศ ให้มีลักษณะที่เหมาะสมที่ จะนำมาตัดแปลงเป็นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้

3.1 การออกแบบฮีเตอร์

การให้ความร้อนกับเครื่องยนต์เป็นไปได้อีกสองแบบคือ ใช้ขดลวด ไฟฟ้าหรือใช้เปลวไฟให้ความร้อนโดยตรง ในที่นี้ได้ทำการทดสอบ เบื้องต้นกับฮีเตอร์แบบใช้เปลวไฟให้ความร้อน โดยจากการทดลอง ใช้เปลวไฟให้ความร้อนกับฮีเตอร์ที่ทำด้วยท่อสเตนเลสโดยใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิง พบว่า ในขณะที่อุณหภูมิที่ผิวท่อมี่ค่าประมาณ 900°C ความร้อนจากเปลวไฟทำให้อุณหภูมิของแก๊สเหนือลูกสูบมี ค่าประมาณ 200°C แต่ฮีเตอร์แบบใช้เปลวไฟให้ความร้อนนี้มีข้อเสีย คือ ไม่สามารถควบคุมปริมาณความร้อนและอุณหภูมิของอากาศได้ และถ้าหากให้เปลวไฟสัมผัสกับผิวท่อนานเกินไปจะทำให้ท่อเกิดจุดร้อน แดง ซึ่งทำให้เกิดรอยร้าวที่ผนังท่อ และในขณะที่ให้ความร้อนยังมีพลังงาน ความร้อนบางส่วนสูญเสียไปกับบรรยากาศ ทำให้ไม่ทราบปริมาณ ความร้อนขาเข้าที่แน่นอนได้ ดังนั้นวิธีการนี้จะไม่เหมาะสมในการ นำมาใช้งาน จึงเปลี่ยนมาใช้ฮีเตอร์แบบใช้ขดลวดไฟฟ้าให้ความร้อน

การใช้ฮีเตอร์แบบขดลวดไฟฟ้า มีข้อดีตรงที่สามารถควบคุม อุณหภูมิได้ง่าย และถูกต้องแม่นยำกว่า การควบคุมการสูญเสียความ ร้อนนอกจากระบบก็สามารถทำได้ดีกว่า รวมทั้งสามารถทำงานได้อย่าง สะอาด หลีกเลี่ยงการมีเปลวไฟและเขม่า ลักษณะของฮีเตอร์มี ลักษณะดังรูปที่ 2 โดยใช้ขดลวดไฟฟ้าร้อยเข้าไปในแท่งเซรามิกส์ แล้ว นำชุดแท่งเซรามิกส์พร้อมขดลวดสวมลงไปในปลอกสเตนเลสขนาด 1 นิ้ว จำนวน 2 ท่อ โดยชุดฮีเตอร์นี้มีขนาดกำลังไฟฟ้า 660 วัตต์ โดย เปรียบเทียบกับฮีเตอร์แบบใช้เปลวไฟให้ความร้อน วิธีการนี้สามารถ ลดปริมาณรวมของฮีเตอร์ลงได้อย่างมาก และสามารถควบคุม

พลังงานความร้อนได้โดยสะดวกโดยการใส่ชุดควบคุมอุณหภูมิ เมื่อ ทดลองนำมาใช้งานโดยนำฮีเตอร์มาติดตั้งเหนือลูกสูบ แล้วจ่ายไฟ ให้กับฮีเตอร์ พบว่าชนิดนี้สามารถอุ่นอากาศให้มีอุณหภูมิสูงสุดได้ ประมาณ 250°C - 260°C ในช่วงความเร็วรอบที่ทำการทดสอบ



รูปที่ 2 ลักษณะของฮีเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2 การออกแบบคูลเลอร์

คูลเลอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากสารทำงานสู่ บรรยากาศภายนอก การถ่ายเทความร้อนทำได้สองวิธีคือ วิธีแรกใช้ ระบายความร้อนด้วยน้ำ วิธีที่สองคือใช้ระบายความร้อนด้วยอากาศ ใน งานนี้เลือกใช้วิธีระบายความร้อนด้วยอากาศเพื่อให้การผลิตและ ประกอบทำได้ง่าย

3.3 การออกแบบรีเจนเนอเรเตอร์

รีเจนเนอเรเตอร์เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ช่วยเพิ่ม ประสิทธิภาพการทำงานให้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยทำหน้าที่เก็บ ความร้อนเมื่อแก๊สร้อนไหลผ่านไปยังคูลเลอร์ และคายความร้อนให้กับ แก๊สเย็นก่อนไหลกลับเข้าสู่ฮีเตอร์ รีเจนเนอเรเตอร์มีได้หลายลักษณะ เช่น นำแผ่นโลหะมาเจาะรูมาเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ หรืออาจใช้เป็น แผ่นตาข่ายที่ทำจากลวดโลหะ ที่มีจำนวนรูต่อพื้นที่สูง นำมาเรียงซ้อนๆ กัน หรือนำขดลวดในลักษณะเป็นฝอยมากอัดในปริมาตรที่กำหนด ใน งานนี้ ได้นำเส้นลวดที่มีลักษณะเป็นฝอยสเตนเลสมาใช้ โดยมีขนาด เส้นลวด 0.13 มม. ซึ่งได้ถูกใส่ในกัลทกรกระบอก และมีความพรุนคือ สัดส่วนของปริมาตรกระบอกรีเจนเนอเรเตอร์กับปริมาตรของเส้น ลวดสเตนเลสต่ำสุดที่ 0.9

3.4 การตัดแปลงเครื่องอัดอากาศ

3.4.1 แหวนลูกสูบ

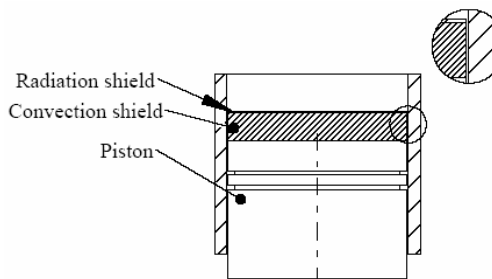
เครื่องอัดอากาศที่นำมาใช้งานประกอบด้วยแหวนลูกสูบที่ทำจาก โลหะจำนวน 2 วง ทำหน้าที่ในการซีลอากาศและช่วยกวาด น้ำมันหล่อลื่นที่ผนังกระบอกสูบ แต่การศึกษาเครื่องยนต์สเตอร์ลิง พบว่า แหวนลูกสูบที่ทำจากโลหะมีความผิดสูงไม่เหมาะสำหรับการ นำมาใช้งานเป็นเครื่องยนต์สเตอร์ลิง นอกจากนั้นแล้ว สำหรับ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้น มีข้อจำกัดเรื่องการใช้ น้ำมันหล่อลื่น เนื่องจาก ความร้อนจากฮีเตอร์จะทำให้ น้ำมันหล่อลื่นระเหยเป็นไอแล้วไปเกาะที่ รีเจนเนอเรเตอร์ ส่งผลให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของรีเจน เนอเรเตอร์ลดลง การซีลลูกสูบจึงได้เปลี่ยนมาใช้แหวนลูกสูบที่ทำจาก เทฟลอน (PTFE, polytetrafluoroethylene) ซึ่งมีคุณสมบัติที่เหมาะสม

กว่ากล่าวคือ มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำโดยไม่ต้อง การ
น้ำมันหล่อลื่น และสามารถทนอุณหภูมิได้ประมาณ 300 °C

3.4.2 การป้องกันความร้อนลูกสูบ

ปัญหาที่พบอีกอย่างหนึ่งในการนำเครื่องอัดอากาศมาใช้งานเป็น
เครื่องยนต์สเตอร์ลิง ก็คือความร้อนจากฮีตเตอร์ที่ส่งผ่านมายังลูกสูบ
อลูมิเนียม ทำให้อุณหภูมิบนผิวหน้าของลูกสูบมีค่าสูงกว่าการทำงาน
ปกติของเครื่องอัดอากาศมาก ทำให้ลูกสูบเกิดการขยายตัวและติดขัด
ในสภาวะนี้ พบว่า Karabulut [6] ซึ่งได้ศึกษาการออกแบบและสร้าง
เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีอุณหภูมิสูง แก้ปัญหานี้โดยการใช้ลูกสูบที่ผลิต
จากวัสดุที่มีคุณสมบัติการขยายตัวจากความร้อนต่ำ แล้วใช้โดมครอบที่
หัวลูกสูบอีกชั้นหนึ่ง พร้อมกับมีการหล่อเย็นด้วยน้ำที่ปลอกลูกสูบด้าน
นอก เพื่อแก้ปัญหาลูกสูบติดขัด สำหรับงานนี้ ได้พิจารณาการถ่ายเท
ความร้อนมาสู่ลูกสูบอลูมิเนียมเป็นสองส่วนคือ การแผ่รังสีความร้อน
จากขดลวดไฟฟ้าและการพาความร้อนของแก๊สในกระบอกสูบ สำหรับการ
ระบายความร้อนนั้น เนื่องจากลักษณะของเครื่องอัดอากาศมีศรี
ระบายความร้อนอยู่ที่บริเวณปลอกสูบ จึงไม่สามารถเพิ่มเติมระบบน้ำ
หล่อเย็นได้ จากนั้นในการแผ่รังสีความร้อนแก้ไขโดยใช้แผ่นกันรังสี
ความร้อนติดไว้เหนือลูกสูบ โดยสำหรับแผ่นกันความร้อนเลือกใช้แผ่น
อลูมิเนียมเพราะมีน้ำหนักเบา และสามารถสะท้อนความร้อนได้ดี
ท้ายที่สุดคือการปกป้องลูกสูบจากความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อน
มากับแก๊ส ในส่วนนี้แก้ปัญหาโดยนำแผ่นเทพลอนขนาดความหนา 10
มม มายึดติดกับลูกสูบในตำแหน่งด้านหลังของแผ่นกันรังสีความร้อน
ด้วยการกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นเทพลอนนี้ให้มีขนาด
ใกล้เคียงปลอกลูกสูบมาก ก็จะเป็นไปได้ยากที่แก๊สร้อนจะไหลผ่าน
ช่องว่างระหว่างแผ่นเทพลอนและปลอกลูกสูบเป็นจำนวนมากและเกิด
เป็นปัญหาด้านความร้อนแก่ลูกสูบ

จากการทดสอบได้พบว่าการติดตั้งแหวนลูกสูบเทพลอนพร้อมกับ
การใช้แผ่นสะท้อนรังสีความร้อนและแผ่นกันความร้อนทำงานได้อย่าง
เหมาะสม โดยที่ลูกสูบสามารถทำงานอัดแก๊สทำงานได้เป็นอย่างดีที่
ระดับแรงเสียดทานลดต่ำกว่าเดิม และเมื่อทำการให้ความร้อนแก่
เครื่องยนต์ ลูกสูบไม่มีการติดขัดดังที่เคยเกิดขึ้นก่อนจะมีการติดตั้ง
อุปกรณ์ป้องกันความร้อน



รูปที่ 3 การป้องกันความร้อนแก่ลูกสูบ

3.4.3 การซีลอากาศและท่อจ่ายลม

ความดันเฉลี่ยใช้งานเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีผลโดยตรงต่อกำลัง
ของเครื่องยนต์ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ให้กำลังสูงมักจะมีการเพิ่มความ

ดันเฉลี่ยใช้งานให้มากกว่าความดันบรรยากาศ ในการทดลองนี้
พยายามเพิ่มความดันให้กับระบบ โดยการอัดอากาศเข้าไปในพื้นที่ว่าง
ตรงชุดเพลลาข้อเหวี่ยง และต่อท่อทองแดงขนาดเล็กเข้ามายังคูลเลอร์
เพื่อให้อากาศสามารถกระจายไปได้ทั่วถึงในทุกๆปริมาตร สำหรับ
ชิ้นส่วนที่ไม่มีเคลื่อนไหวได้ใช้ปะเก็นหนังทนความร้อนเป็นวัสดุกัน
รั่วและใช้กาวยซิลิโคนเป็นตัวยึดติดที่รอยต่อของชิ้นส่วน

ส่วนบริเวณที่มีการหมุน คือรอยต่อของตลับลูกปืนกับเพลลาข้อ
เหวี่ยง ได้ใช้รูปแบบของการซีลด้วยช่องว่างขนาดเล็ก (Clearance
seal) ทั้งนี้ก็ด้วยโดยธรรมชาติของงานนี้ที่คาดหวังถึงการรับการอัด
ความดันได้ในระดับต่ำของชุดเครื่องอัดอากาศเดิม รวมทั้งต้องการ
จำกัดงบประมาณที่อาจมีได้สูง หากต้องใช้ซีลในลักษณะของ
mechanical seal จึงพิจารณาว่าการรั่วไหลได้บ้างของแก๊สจากรูปแบบ
ของซีลแบบนี้เป็นที่ยอมรับได้ แต่อย่างไรก็ดี หลังจากที่ได้ทดลอง
อัดอากาศเข้าไปในระบบแล้วพบว่า มีอากาศรั่วออกมาจากที่บริเวณ
หน้าแปลนของฝาประกบเพลลาข้อเหวี่ยง เนื่องจากสกรูที่ใช้ยึดฝา
ประกบมีจำนวนน้อยเกินไป เพราะในการใช้งานของเครื่องอัดอากาศ
ออกแบบให้การซีลที่ฝาประกบนี้ทำหน้าที่เพียงกั้นน้ำมันหล่อลื่นไม่ให้
รั่วออกมาเท่านั้น ไม่ได้ออกแบบมาเพื่อรับแรงดันอากาศ ในขณะที่
ระยะว่างในแฉกรมีที่หน้าแปลนก็มีอยู่น้อยเกินไปที่จะทำการเจาะรู
เพิ่มจำนวนเกลียวได้ นอกจากนั้นแล้ว เมื่อได้ทดลองใช้งานการซีลด้วย
ช่องว่างขนาดเล็ก พบว่าชิ้นงานเสียดสีกันจนเกิดความเสียหายที่ผิว
ของปลอกโลหะเนื่องจากการติดตั้งที่เอียงศูนย์กลาง หลังจากที่ได้
พยายามติดตั้งใหม่พบปัญหาว่า การที่ปลอกโลหะ 2 ชิ้นสวมเข้าด้วยกัน
โดยมีระยะช่องว่างเพียง 0.05 mm ทำได้ยากมาก ดังนั้นด้วยสาเหตุทั้ง
สองนี้จึงจำเป็นต้องปรับลดความดันใช้งานลงให้เท่ากับความดัน
บรรยากาศ

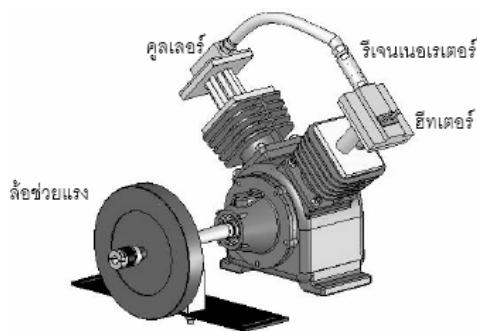
3.4.4 การติดตั้งล้อช่วยแรง

ในระหว่างการทำงานของเครื่องยนต์นั้น กำลังขับที่ลูกสูบส่งให้กับ
เพลลาข้อเหวี่ยงนั้นมีค่าไม่สม่ำเสมอ รวมทั้งมีค่าได้ทั้งทางบวกและลบ
ขึ้นกับมุมการหมุนของเพลลาข้อเหวี่ยง จึงเป็นเหตุให้เครื่องยนต์หมุนช้า
บ้างเร็วบ้าง ล้อช่วยแรงบนเพลลาข้อเหวี่ยง มีหน้าที่ช่วยสะสมพลังงาน
เพื่อเฉลี่ยการส่งกำลังกำลังขับจากลูกสูบสู่เพลลาข้อเหวี่ยง ทำให้การหมุน
ของเพลลามีความเร็วรอบที่สม่ำเสมอขึ้น และเครื่องยนต์สามารถหมุน
ทำงานได้ด้วยตัวเองไปได้อย่างต่อเนื่อง การติดตั้งล้อช่วยแรงมีผลอย่าง
สำคัญต่อเครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยเฉพาะในเครื่องยนต์ที่ทำงานที่ระดับ
ความดันบรรยากาศ ซึ่งมักมีระดับกำลังขับต่ำอยู่แล้ว หากไม่มีการ
ติดตั้งล้อช่วยแรงที่ขนาดเหมาะสม เครื่องยนต์จะไม่สามารถขับเคลื่อน
ไปอย่างต่อเนื่องด้วยตัวเอง ในงานนี้ได้ทำการต่อเวลาให้ยาวขึ้นพร้อม
ติดตั้งล้อช่วยแรงโดยมีขนาดของโมเมนต์ความเฉื่อยที่ 0.0523 กก/ม²

3.5 การประกอบเครื่องยนต์และการทดสอบเบื้องต้น

เมื่อนำชิ้นส่วนมาประกอบเข้าด้วยกันเป็นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจะมี
ลักษณะดังรูปที่ 4 และมีรายละเอียดในตารางที่ 1 เมื่อประกอบ
เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงนำมาทดลองใช้งาน โดยจ่าย
กระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อนและกำหนดให้อุณหภูมิอากาศด้าน
ร้อนให้มีค่าประมาณ 250 °C จากนั้นหมุนล้อช่วยแรงด้วยความเร็ว
ประมาณ 1 รอบต่อวินาที อย่างต่อเนื่องเป็นเวลาประมาณ 10 นาที

หลังจากนั้นพบว่าเครื่องยนต์ไม่สามารถหมุนต่อไปได้ด้วยตัวเองได้จากการวิเคราะห์ได้พบว่าการประเมินกำลังขาออกเบื้องต้น เป็นการใช้กำลังเสียดทานของเครื่องอัดอากาศซึ่งได้ถูกประเมินก่อนจะได้ประกอบและติดตั้งเครื่องยนต์ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับกำลังบ่งชี้ แต่เมื่อได้ติดตั้งและทดลองใช้งานจริงได้พบว่ากำลังเสียดทานในขณะหมุนมีค่ามากกว่ากำลังเสียดทานขณะหยุดนิ่ง ทั้งนี้เป็นผลมาจากความเยื้องศูนย์ของเพลาส่วนต่อ นอกจากนี้แล้วแรงต้านการไหล ก็มีผลทำให้กำลังเสียดทานของระบบเพิ่มขึ้นอย่างมาก นอกจากนี้แล้ว การลดความดันใช้งานจาก 2 บาร์เหลือ 0.1 บาร์ก็ส่งผลให้กำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์ลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของที่ได้ประเมินไว้ในครั้งแรก



รูปที่ 4 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ดัดแปลงจากเครื่องอัดอากาศ

ตารางที่ 1 รายละเอียดของเครื่องยนต์

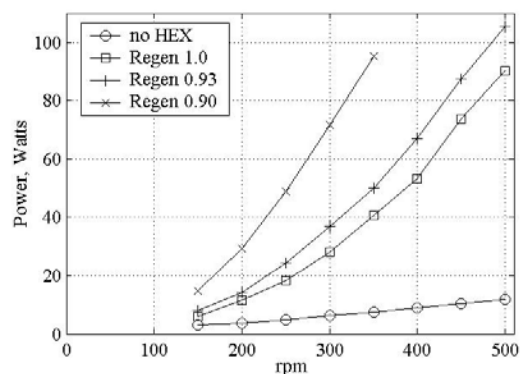
รูปแบบของเครื่องยนต์	แบบอัลฟา สองสูบ
ขนาดลูกสูบ x ช่วงชัก	65 x 50 มม
ปริมาตรกวาดของเครื่องยนต์	235 ซีซี
มุมเฟสระหว่างลูกสูบ	90 องศา
อุณหภูมิด้านฮีทเตอร์	523 เคลวิน
อุณหภูมิด้านคูลเลอร์	303 เคลวิน
ปริมาตรนึ่งด้านฮีทเตอร์	90 ซีซี
ปริมาตรนึ่งด้านคูลเลอร์	60 ซีซี
ปริมาตรนึ่งส่วนรีเจนเนอเรเตอร์	16 ซีซี
ขนาดเส้นลวดรีเจนเนอเรเตอร์	0.13 มม
ความพรุนของรีเจนเนอเรเตอร์	0.9 / 0.93 / 1.0
สารทำงาน	อากาศ
ความดันของสารทำงาน	1 บาร์
อัตราส่วนการอัดเชิงปริมาตร	1.8

4. การทดสอบเครื่องยนต์

แม้ว่าเครื่องยนต์ที่นำมาทดลองใช้งานไม่สามารถทำงานได้ แต่อย่างไรก็ดี เพื่อที่จะทราบถึงสมรรถนะในเบื้องต้นของเครื่องยนต์ในบางส่วนได้ จึงได้มีแนวคิดที่จะทดลองเครื่องยนต์ดังนี้

4.1 การประเมินกำลังเสียดทานเชิงกลและกำลังสูญเสียจากการไหล

ในส่วนแรก จะได้ทำการประมาณกำลังเสียดทานเชิงกลพร้อมกำลังสูญเสียจากการไหล โดยจะทำการวัดกำลังเสียดทานเชิงกลโดยตรงโดยทำการจับชุดทดลองด้วยมอเตอร์โดยยังไม่ติดตั้งชุดถ่ายเทความร้อนทั้งสาม (คือฮีทเตอร์ คูลเลอร์ และรีเจนเนอเรเตอร์) ดังนั้นที่ความเร็วต่างๆ กำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ต้องการในขณะนั้น ก็จะบ่งชี้ถึงกำลังเสียดทานเชิงกล จากนั้น โดยการติดตั้งชุดถ่ายเทความร้อนทั้งสาม แต่เปิดระบบออกสู่บรรยากาศที่ระหว่างจุดเชื่อมต่อระหว่างฮีทเตอร์และรีเจนเนอเรเตอร์ ทำให้ไม่มีการอัดหรือขยายของอากาศได้ ก็จะสามารถวัดความสูญเสียจากกำลังเสียดทานเชิงกล พร้อมความสูญเสียจากการไหลผ่านอุปกรณ์ ในลักษณะการประมาณได้ผ่านค่ากำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ต้องการที่การหมุนที่ความเร็วต่างๆ ในส่วนนี้ ทำการทดสอบในสามกรณีด้วยกัน คือในกรณีที่ใส่เส้นลวดรีเจนเนอเรเตอร์ (Regen 1.0) นั่นคือชุดรีเจนเนอเรเตอร์ที่มีค่าความพรุน 1.0 และกรณีที่ใส่เส้นลวดรีเจนเนอเรเตอร์ที่ค่าความพรุน 0.93 และ 0.90 (Regen 0.93 และ Regen 0.90)



รูปที่ 5 การประเมินแรงเสียดทานเชิงกลและการสูญเสียจากการไหล

ผลการทดลองถูกรวบรวมอยู่ในรูปที่ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งชุดถ่ายเทความร้อนมีผลอย่างมากต่อกำลังเสียดทานของระบบ โดยระบบท่อของชุดถ่ายเทความร้อนทั้งสามมีผลทำให้กำลังเสียดทานเพิ่มสูงขึ้นจากกำลังเสียดทานเชิงกล (no HEX ในรูปที่ 5) ในระดับ 10 วัตต์ เป็นระดับ 100 วัตต์เมื่อรวมแรงต้านการไหล ในขณะที่รีเจนเนอเรเตอร์ที่มีความแน่นมากขึ้น (จาก Regen 1.0 Regen 0.93 และ Regen 0.90 ในรูปที่ 5 ตามลำดับ) ก็มีผลให้กำลังเสียดทานรวมเพิ่มสูงขึ้นได้อีกกว่าเท่าตัว ในส่วนของการประเมินแรงเสียดทานนี้ เป็นที่สังเกตได้ว่าเนื่องจากการเปิดท่อมีผลทำให้ปริมาณการไหลเข้า-ออกผ่านชุดถ่ายเทความร้อนทั้งสามมีได้มากกว่าการปิดท่อ ค่าการประเมินแรงเสียดทานที่ได้ในรูปที่ 5 จึงเป็นการแสดงค่ากำลังเสียดทานจากการไหลของแก๊สที่ควรจะมีค่ามากกว่าการทำงานจริง

4.2 การประเมินกำลังบ่งชี้

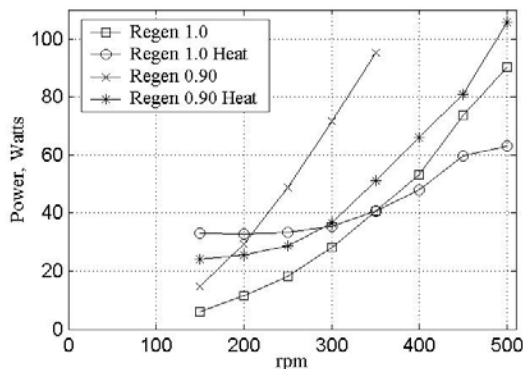
ถึงแม้ว่าเครื่องยนต์จะยังไม่สามารถทำงานได้ด้วยตัวเอง แต่หากได้ทำการขับเคลื่อนเครื่องยนต์ด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าเช่นเดียวกับการทดลองในรูปที่ 5 หากแต่มีการให้ความร้อนด้วย ก็จะเป็นการบังคับให้เครื่องยนต์มีการทำงานทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยที่ด้านฮีทเตอร์มีการให้ความ

ร้อนกับแก๊สและด้านคูลเลอร์มีการระบายความร้อนออกมา เมื่อระบบทำงานเป็นเครื่องยนต์ กำลังขาออกที่เป็นบวก P_{engine} จะประกอบด้วย

$$P_{engine} = P_{indicated} - P_{thermal} - P_{windage} - P_{mech\ friction} \quad (1)$$

โดยกำลังบ่งชี้ที่ได้ ($P_{indicated}$) จะมีค่าเป็นบวก ในขณะที่การสูญเสียต่างๆมีค่าเป็นลบ อันประกอบด้วย การสูญเสียจากการเสียดทานเชิงกล ($P_{mech\ friction}$) การสูญเสียจากการไหลผ่านอุปกรณ์ต่างๆ ($P_{windage}$) และสุดท้ายคือการสูญเสียความร้อนในส่วนต่างๆ ($P_{thermal}$) อันประกอบด้วย การสูญเสียในรีเจเนอเรเตอร์ การสูญเสียจากการที่แก๊สวิ่งกลับไปกลับมาในช่องแคบต่างๆ (shuttle heat transfer loss) รวมถึงการสูญเสียจากการนำความร้อนและการแผ่รังสี

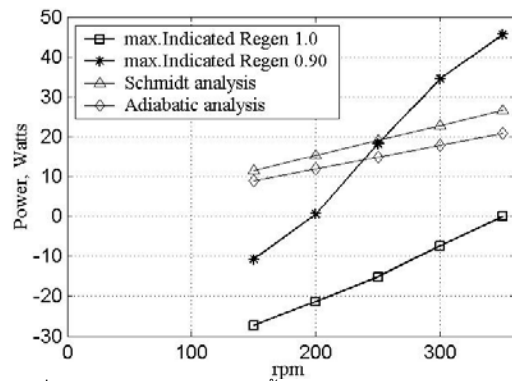
ถึงแม้ว่างานนี้ได้พิจารณากำลังเสียดทานเชิงกล พร้อมความสูญเสียจากการไหลในลักษณะการประมาณได้ดังรูปที่ 5 ข้างต้น แต่ในส่วนของการสูญเสียความร้อนในส่วนต่าง $P_{thermal}$ นั้นไม่สามารถถูกวัดหรือประเมินได้ในที่นี้ แม้แต่ในงานวิจัยระดับสูงโดยทั่วไปก็ยังไม่สามารถวัดได้ แต่อย่างไรก็ดี เนื่องจาก $P_{thermal}$ เป็นลบเสมอ ดังนั้นความแตกต่างระหว่างผลรวมของกำลังเสียดทานเชิงกลและการสูญเสียจากการไหล (ในส่วน 4.1) กับกำลังที่วัดได้ในขณะให้ความร้อน (ในส่วน 4.2 นี้) ก็จะสามารถบอกได้ถึงกำลังบ่งชี้ที่ลดลงด้วยการสูญเสียความร้อน หรือสามารถถูกมองได้ว่าเป็นค่าประมาณด้านต่ำสำหรับกำลังบ่งชี้ เพื่อประเมินว่ากำลังบ่งชี้ $P_{indicated}$ ตรงตามแบบจำลองที่ถูกนำมาใช้ข้างต้นหรือไม่ อย่างไร



รูปที่ 6 กำลังในกรณีการให้ความร้อน (Heat) เทียบกับกรณีที่ไม่ให้ความร้อน ในกรณีที่ไม่ใส่ลวดรีเจเนอเรเตอร์ (Regen 1.0) และกรณีที่มีรีเจเนอเรเตอร์ที่มีความพรุน 0.9 (Regen 0.9)

รูปที่ 6 แสดงถึงผลรวมของกำลังเสียดทานเชิงกลและการสูญเสียจากการไหล แสดงคู่กับกำลังที่วัดได้ในขณะให้ความร้อน ในกรณีที่ไม่มีเส้นลวดในกลีรีเจเนอเรเตอร์ ความแตกต่างของเส้นทั้งสองคือค่าประมาณด้านต่ำของกำลังบ่งชี้ที่มีค่าหรือแม้กระทั่งเป็นค่าลบ ในขณะที่กรณีรีเจเนอเรเตอร์ที่มีความพรุน 0.9 ค่าประมาณด้านต่ำของกำลังบ่งชี้มีค่าเป็นบวกโดยส่วนมาก และมีค่าสูงกว่ากรณีไม่มีเส้นลวดอย่างเห็นได้ชัด อันบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของรีเจเนอเรเตอร์ที่มีผลต่อกำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เมื่อพิจารณาเฉพาะค่าประมาณด้านต่ำของกำลังบ่งชี้ (คือความแตกต่างของเส้นสองเส้นในสองกรณีในรูปที่ 6) โดยเปรียบเทียบกับค่าประมาณของ Schmidt และแบบ Adiabatic ในรูปที่ 7 พบว่าการทดลองมีค่าสูงกว่าค่าประมาณเชิงทฤษฎีทั้งสอง ซึ่งอาจอธิบายได้ว่าข้อมูลกำลังสูญเสียจากการไหลข้างต้น เป็นค่าประมาณด้านสูง ดังนั้นกำลังสูญเสียในระหว่างการทำงานเป็นเครื่องยนต์จริง อาจมีค่าต่ำกว่าที่แสดงไว้ได้ ดังนั้น ผลของค่าประมาณด้านต่ำของกำลังบ่งชี้ก็จะมีค่าน้อยกว่าที่ได้ถูกแสดงไว้ในภาพ แต่อย่างไรก็ดี ข้อมูลบ่งชี้ว่าการเปลี่ยนแปลงของกำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์เทียบกับค่าความเร็วรอบมีแนวโน้มตามการประมาณของ Schmidt และแบบ Adiabatic มากกว่าที่จะเปลี่ยนตามแบบสมการของ West



รูปที่ 7 การประเมินกำลังบ่งชี้เทียบกับค่าจากการวิเคราะห์แบบ Schmidt และแบบ Adiabatic

5. สรุป

จากแนวคิดที่จะสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยนำชิ้นส่วนและกลไกของเครื่องอัดอากาศแบบ 2 ลูกสูบรูปตัววีมาดัดแปลงและประกอบเพื่อใช้งาน พบว่าการสร้างอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนทั้งสาม คือฮีตเตอร์คูลเลอร์และรีเจเนอเรเตอร์ขึ้นมาใหม่ โดยเฉพาะในส่วนฮีตเตอร์สามารถทำงานได้อย่างเหมาะสม แต่ในการปรับใช้ชิ้นส่วนของเครื่องอัดอากาศมีรายละเอียดที่ต้องพิจารณาหลายประการ เช่นการเปลี่ยนแหวนลูกสูบ การป้องกันความร้อนที่จะส่งมายังลูกสูบ รวมทั้งการซีลอากาศเพื่ออัดความดันให้แก่เครื่องยนต์ โดยถึงแม้การปรับใช้ลูกสูบจะทำได้เหมาะสม แต่ปัญหาของการประกอบซีลทำให้การอัดความดันเป็นไปได้ไม่ดี ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานด้วยตัวเองไม่ได้ของเครื่องยนต์ที่ได้สร้างขึ้น แต่อย่างไรก็ดี การปรับเครื่องอัดอากาศให้ทำงานด้วยการขับด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าทำให้ทราบว่าการสูญเสียจากการไหลมีผลสำคัญต่อแรงเสียดทานรวมของระบบ และยังพบว่าการทำงานแบบ Schmidt และแบบ Adiabatic ให้แนวโน้มที่ดีในการประเมินกำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์ ดังนั้นพร้อมด้วยการทำนายความเร็วรอบตามวิธีของ Iwamoto ผลจากการศึกษาที่สามารถนำไปสู่การออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงในรุ่นต่อไปที่มีความแม่นยำมากขึ้นได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Urieli, U., Berchowitz, D. M., "Stirling Cycle Machine Analysis", Adam Hilger Ltd., Bristol, 1984
- [2] West, Colin D., Principles and applications of Stirling engines. Van Nostrand Reinhold, 1986
- [3] Iwamoto, S., "Performance of Stirling Engines (Arranging Method of Experimental Results and Performance Prediction)", Trans JSME No.65, Vol.635, B, 2001 p.361-368
- [4] Kagawa, N., "An experimental study of a 3-kW Stirling engine", J of Propulsion and Power, Vol.18, No.3, May-June 2002, p.696
- [5] จิตรกร ศรีสายชล. การศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจากเครื่องอัดอากาศ วิทยานิพนธ์บัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ.2549
- [6] Karabulut, H, *et.al.* Manufacturing and Testing of a V-Type Stirling Engine. Turk J Engin Environ Sci 24 (2000) , 71-80.