



การถ่ายเท พลังงานความร้อนและมวล

ในอุปกรณ์ต้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 13

วันที่ 13-14 มีนาคม 2557

ณ เจ้าหลาว คาบนา รีสอร์ท จังหวัดจันทบุรี



| | |
|---|-----|
| 49. การกลั่นน้ำมันหอมระเหยจากตะไคร้ด้วยเครื่องกลั่นน้ำมันหอมระเหยแบบเทอร์โมไซฟอน DISTILLED ESSENTIAL OIL FROM LEMON GRASS WITH THERMOSYPHON ESSENTIAL OIL DISTILLER | 273 |
| 50. การออกแบบและทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระ ขนาด 40 cc DESIGN AND TEST OF A 40 CC FREE PISTON STIRLING ENGINE | 278 |
| 51. การใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อเพิ่มสมรรถนะการทำความเย็นแบบสุญญากาศของกะหล่ำปลี USING THERMOELECTRIC FOR ENHANCING PERFORMANCE OF VACUUM COOLING OF CABBAGE | 286 |
| 52. ผลของการสอดท่อเจ็ทผ่านผนังจำกัดการไหลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน EFFECT OF NOZZLE PIPE INSERTED THROUGH CONFINED WALL ON HEAT TRANSFER ON SURFACE WITH MULTIPLE IMPINGING JETS | 291 |
| 53. การประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อนชนิดสั่นวงรอบที่ติดตั้งวาล์วกัน กลับสำหรับอบข้าวเปลือกแบบถังทรงกระบอกหมุนที่ใช้น้ำมันเครื่องเก่าเป็นเชื้อเพลิง APPLICATION OF A CLOSED-LOOP OSCILLATING HEAT-PIPE WITH CHECK VALVES (CLOHP/CV) HEAT EXCHANGER FOR ROTARY DRYING OF PADDY USING LUBRICATING OIL AS FUEL | 295 |
| 54. สมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตัดขวางสำหรับกระบวนการอบแห้งน้ำตาล กรวดที่ใช้น้ำมันเครื่องเก่าเป็นเชื้อเพลิง PERFORMANCE OF CROSS FLOW HEAT EXCHANGER FOR CRYSTALLINE SUGAR DRYING WITH USED LUBRICATING OIL AS FUEL | 301 |
| 55. ผลของมุมบิดแผ่นเกลียวที่มีต่อการผลิตอากาศร้อนจากปล่องไอเสียในรีคูเพอเรเตอร์ที่มีอากาศ ไหลวนเป็นเกลียว EFFECT OF HELIX ANGLE ON HOT AIR PRODUCTION FROM EXHAUST GAS STACK IN RECUPERATOR HAVING HELICAL AIRFLOW | 307 |
| 56. การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะและการปลดปล่อยมลพิษของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด ขนาดเล็กระหว่างการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์และเชื้อเพลิงดีเซล A COMPARATIVE STUDY OF ENGINE PERFORMANCE AND EMISSIONS OF A SMALL CI ENGINE FUELED BETWEEN SYNTHETIC DIESEL AND STANDARD DIESEL | 314 |
| 57. อิทธิพลของการวางตำแหน่งฮีตเตอร์ครีปเส้นตรงที่ส่งผลต่อการกระจายอุณหภูมิในท่อสี่เหลี่ยม THE EFFECT OF STRAIGHT LINE FINNED HEATER ON TEMPERATURE DISTRIBUTION WITHIN RECTANGULAR DUCT | 320 |
| 58. การผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้างโดยใช้เทคโนโลยีบ่อหมักแบบโดมคงที่ BIOGAS PRODUCTION FROM ELEPHANT DUNG BY FIXED DOME TECHNOLOGY | 326 |

การออกแบบและทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระ

ขนาด 40 cc

DESIGN AND TEST OF A 40 CC FREE PISTON STIRLING ENGINE

สุตาภัทร แคว้นเขาเม้ง

พงษ์นรินทร์ สว่างวงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง

กรุงเทพมหานคร 10520

โทร 085-4442299

โทรสาร 02-329-8352

E-mail: kksudara@kmitl.ac.th

E-mail: p.savangvong@hotmail.com

บรรเทิง ศิลป์สกุลสุข

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยสยาม

ถนนเพชรเกษม แขวงบางหว้า

เขตภาษีเจริญ กรุงเทพมหานคร 10160

โทร 087-3440585

โทรสาร 02-867-8026

E-mail: banterngs@yahoo.com

บทคัดย่อ

การออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระจำเป็นต้องออกแบบให้มีความเหมาะสมทั้งขนาดของเครื่องยนต์ การถ่ายเทความร้อน และการเคลื่อนที่ของลูกสูบ บทความนี้นำเสนอการออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระขนาด 40 cc ด้วยการวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์ของสารทำงานภายในเครื่องยนต์รวมกับการวิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ของลูกสูบเครื่องยนต์ถูกสร้างขึ้นเพื่อทำการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลองเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี เครื่องยนต์ทำงานที่ความดันบรรยากาศ ได้รับความร้อนจากตะเกียงแอลกอฮอล์ และหล่อเย็นด้วยน้ำ กำลังของเครื่องยนต์วัดจากกำลังทางไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงเส้น ผลการทดลองพบว่าระยะการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมของลูกสูบกำลังคือ 5 เซนติเมตร ที่อุณหภูมิตัวร้อน 80-200 องศาเซลเซียส ทำให้เครื่องยนต์มีความถี่ 7.5 เฮิรตซ์

คำสำคัญ : เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระ, การวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์, การวิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่

Abstract

Free piston Stirling engine (FPSE) design must be appropriately both size of the engine, amount of heat transfer and movement of the piston. This paper present design of a 40 cc FPSE by thermodynamic analysis of working fluid together with analysis of the equation of motion of the piston. The engine was built and test. The comparison of simulation and experimental result are provided. The engine operates at atmospheric pressure, heated by alcohol burner and cooled by water. Engine power was measured from electrical power from linear alternator. The result showed that the suitable stroke of the piston is 5 cm at temperature rang 80 – 200 °C and frequency 7.5 Hz.

Keyword : Free piston Stirling engine, Thermodynamic analysis, Equation of motion analysis

1. บทนำ

ปัจจุบันหลายประเทศมีนโยบายที่เข้มงวดเกี่ยวกับปัญหามลพิษและการใช้พลังงาน เนื่องจากปัญหาโลกร้อนส่งผลกระทบต่อทั่วโลก เป็นผลมาจากปรากฏการณ์เรือนกระจกซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น โดยแหล่งที่มาหลักของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์คือการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น จากรถยนต์ โรงไฟฟ้า และโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น แม้ว่าเชื้อเพลิงจากฟอสซิลจะให้พลังงานสูงและตรงตามความต้องการในปัจจุบัน แต่มันก็เป็นบ่อเกิดของปัญหาโลกร้อนและมลพิษ นอกจากนี้เชื้อเพลิงจากฟอสซิลในโลกก็จะมีปริมาณลดน้อยลงอีกด้วย สาเหตุดังกล่าว

ทำให้พลังงานทดแทนยกตัวอย่างเช่น พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานจากแสงอาทิตย์ เชื้อเพลิงชีวมวล เป็นต้น ถูกนำมาใช้ในการผลิตพลังงานแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อเป็นการลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และมลพิษ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องมือหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนจากภายนอกเครื่องยนต์เป็นกำลังทางกลได้ คิดค้นขึ้นครั้งแรกโดยโรเบิร์ต สเตอร์ลิง บาทหลวงชาว สกอตแลนด์ ในปี ค.ศ.1816 [1]

ปัจจุบันมีความสนใจที่จะใช้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงในการผลิตไฟฟ้าในระบบผลิตพลังงานร่วมสำหรับที่อยู่อาศัยและเชิงพาณิชย์มากขึ้น เนื่องจากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีประสิทธิภาพสูง มีสมรรถนะที่ดี ใช้พลังงานได้หลากหลาย ก่อให้เกิดมลพิษน้อย ระดับเสียงและการสั่นสะเทือนต่ำ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์แก๊สร้อนชนิดหนึ่ง ซึ่งได้รับความร้อนจากภายนอกเครื่องยนต์จากแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานกล แล้วระบายความร้อนบางส่วนสู่แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ วัฏจักรสเตอร์ลิงมีความคล้ายคลึงกับวัฏจักรคาร์โนต์เมื่ออุปกรณ์ต่าง ๆ มีประสิทธิภาพสมบูรณ์[2] เนื่องจากเครื่องยนต์ชนิดนี้รับความร้อนจากภายนอกเครื่องยนต์ โดยไม่มีการสันดาปภายในจึงทำให้สามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลายโดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนเครื่องยนต์[3]

2. หลักการทั่วไป

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์แก๊สร้อน ซึ่งรูปแบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบ่งตามการจัดเรียงตัวของกระบอกสูบ แบ่งได้ 3 แบบ คือ แบบแอลฟามีสองกระบอกสูบ กระบอกสูบเชื่อมต่อกันด้วยรีเจนเนอเรเตอร์ซึ่งทำหน้าที่ดูดและคายความร้อน แบบเบต้ามีลูกสูบสองลูกอยู่ในกระบอกสูบเดียวกัน และแบบแกมมาจะคล้ายกับแบบเบต้าแต่แยกกระบอกสูบออกมาเป็นสองส่วน ข้อดีของการจัดกระบอกสูบแบบเบต้าคือง่ายต่อการออกแบบและสร้างเครื่องยนต์ เพราะมีกระบอกสูบเดียว[4]

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบต้าประกอบด้วยชิ้นส่วนเคลื่อนที่สองชิ้น คือลูกสูบดิสเพลซเซอร์และลูกสูบกำลัง ลูกสูบดิสเพลซเซอร์ถูกวางไว้ระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของเครื่องยนต์ ทำหน้าที่ไล่อากาศให้ถ่ายเทไปสู่ด้านร้อนและด้านเย็น ทำให้อากาศได้รับความร้อนแล้วขยายตัวที่ด้านร้อนของเครื่องยนต์ และระบายความร้อนแล้วหดตัวที่ด้านเย็นของเครื่องยนต์ ส่วนลูกสูบกำลังถูกวางไว้บริเวณด้านเย็นของเครื่องยนต์ ทำหน้าที่ผลิตกำลัง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีความน่าสนใจอีกครั้งเมื่อมีการพัฒนาเครื่องยนต์ลูกสูบอิสระ เครื่องยนต์ชนิดนี้ถูกคิดค้นโดยวิลเลียม เบลล์ (William T. Beale) ในปีค.ศ. 1964 [1] เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระมีพื้นฐานมาจากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบต้า ไม่มีกลไกระหว่างลูกสูบทั้งสอง แต่ใช้แก๊สสปริงในการผลักดันลูกสูบดิสเพลซเซอร์และลูกสูบกำลังเคลื่อนที่ได้ ทำให้เครื่องยนต์นี้มีข้อดีคือไม่มีความผิดและการรั่วไหลของสารทำงานที่เกิดขึ้นระหว่างกลไกของลูกสูบทั้งสอง ทำให้ลดความผิดและการสึกหรองได้ด้วย ส่งผลให้เครื่องยนต์มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

ภายในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระ แก๊สถูกอัดและขยายตัวระบบการสั่นของมวลและแก๊สสปริงภายในเครื่องยนต์ มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ได้ 2 ชิ้น คือ ลูกสูบกำลัง และลูกสูบดิสเพลซเซอร์ ที่ด้านร้อนของเครื่องยนต์ แก๊สจะได้รับความร้อนและขยายตัว และสารทำงาน (อากาศ) จะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น แก๊สที่อยู่ระหว่างลูกสูบดิสเพลซเซอร์และลูกสูบกำลัง จะถูกหล่อเย็นด้วยน้ำ ความ

แตกต่างของความดันของด้านร้อนและเย็นมีอิทธิพลอย่างมากต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนในเครื่องยนต์[5] กำลังของเครื่องยนต์เกิดจากการที่แก๊สขยายตัวไปดันลูกสูบดิสเพลซเซอร์ซึ่งต่อยุกับลูกสูบกำลังด้วยแก๊สสปริง ไฟฟ้าถูกสร้างขึ้นเมื่อลูกสูบกำลังเคลื่อนที่ผ่านตัวกำเนิดไฟฟ้าเชิงเส้น การที่ลูกสูบกำลังเคลื่อนที่ผ่านตัวกำเนิดไฟฟ้าเชิงเส้นนั้น จะทำให้เกิดการหน่วงเนื่องจากแรงของแม่เหล็กไฟฟ้าและการหน่วงนี้จะขึ้นกับความเร็วของลูกสูบกำลังด้วย[6] ในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระไม่มีกลไกเชื่อมระหว่างลูกสูบดิสเพลซเซอร์และลูกสูบกำลัง การเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนทั้งสองจึงขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงความดันของแก๊ส

ข้อดีหลักของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระคือเสียงเงียบ การสึกหรอน้อย อายุการใช้งานยาวนาน ได้กำลังต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพสูง ส่วนข้อเสียหลักคือการทำให้อากาศที่ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพนั้นทำได้ยาก[7] เป้าหมายของงานวิจัยนี้คือการหาตัวแปรทั้งทางกลและทางความร้อน ที่จะทำให้อากาศที่ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2 วัฏจักรสเตอร์ลิง

วัฏจักรสเตอร์ลิงประกอบด้วย 4 กระบวนการ ดังนี้

กระบวนการ 1-2 : การอัดที่อุณหภูมิคงที่

วัฏจักรสเตอร์ลิงเริ่มจากการที่ลูกสูบดิสเพลซเซอร์อยู่ที่ศูนย์ตายล่างเนื่องจากน้ำหนักของมันเอง ในขณะที่เดียวกันลูกสูบกำลังเคลื่อนที่ลงมาถึงศูนย์ตายล่าง พร้อมกับอัดอากาศเข้าสู่กระบอกสูบของดิสเพลซเซอร์ ทำให้ความดันเพิ่มขึ้น จากจุด 1 ไปที่จุด 2 และปริมาตรของสารทำงานลดลงที่อุณหภูมิคงที่ ดังที่แสดงในรูปที่ 1 งานที่ทำต่อสารทำงานมีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟของกระบวนการ 1-2

กระบวนการ 2-3 : ให้ความร้อนที่ปริมาตรคงที่

เมื่อความดันที่สูงขึ้นจากกระบวนการ 1-2 มีค่ามากพอ ก็จะดันลูกสูบดิสเพลซเซอร์ให้เคลื่อนที่ขึ้นไปได้ แล้วไล่อากาศผ่านรีเจนเนอเรเตอร์ที่ทำหน้าที่เก็บความร้อน ดังนั้นสารทำงานจะได้รับความร้อนจากรีเจนเนอเรเตอร์ก่อนที่จะผ่านไปสู่อากาศด้านร้อนของเครื่องยนต์ จนกระทั่งลูกสูบดิสเพลซเซอร์เคลื่อนที่ขึ้นไปถึงศูนย์ตายบน สารทำงานส่วนใหญ่ก็จะอยู่ที่ด้านร้อนของเครื่องยนต์ เมื่อสารทำงานได้รับความร้อนจะทำให้ความดันและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จากจุด 2 ไปที่จุด 3 ในขณะที่ลูกสูบกำลังยังหยุดนิ่งอยู่ที่ศูนย์ตายล่าง

กระบวนการ 3-4 : การขยายตัวที่อุณหภูมิคงที่

เมื่อลูกสูบดิสเพลซเซอร์อยู่ที่ศูนย์ตายบน สารทำงานทั้งหมดถูกไล่ไปรับความร้อนที่ด้านร้อนของเครื่องยนต์ จนทำให้ความดันเพิ่มขึ้นจนสูงสุด เมื่อสารทำงานขยายตัว ลูกสูบกำลังจะถูกผลักจากศูนย์ตายล่างไปที่ศูนย์ตายบนทำให้ความดันลดลงและได้งานออกมา โดยที่งานที่ทำโดยสารทำงานมีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟของกระบวนการ 3-4

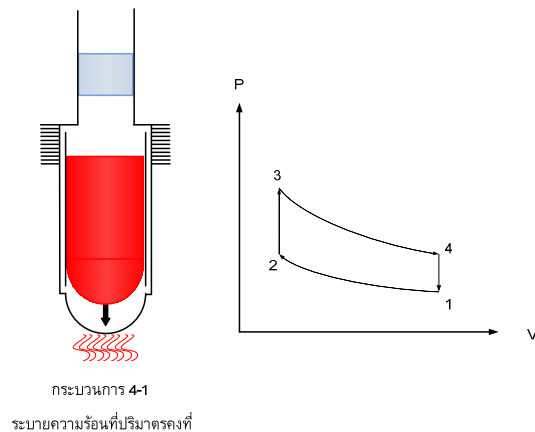
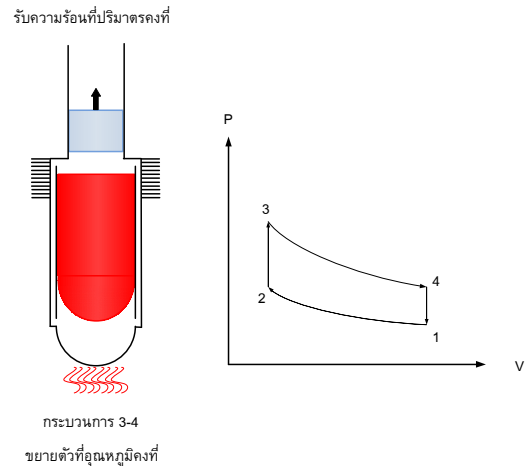
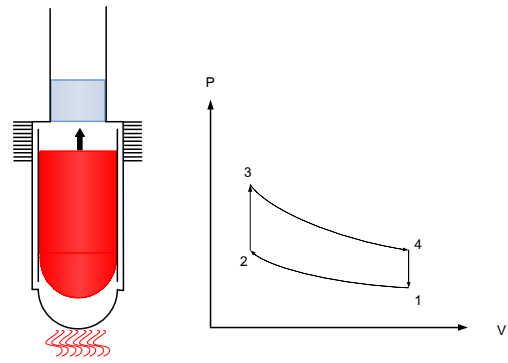
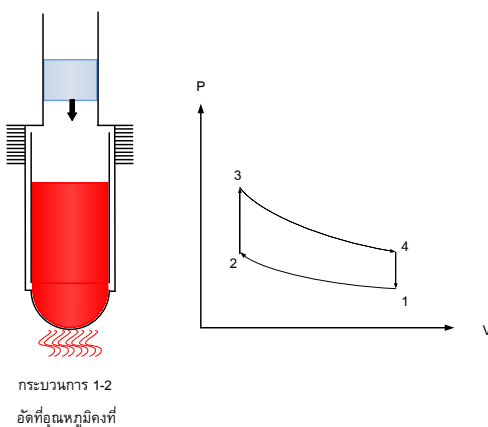
กระบวนการ 4-1 : ระบายความร้อนที่ปริมาตรคงที่
หลังจากที่ลูกสูบกำลังเคลื่อนที่ขึ้นไปถึงศูนย์ตายบนและความดันลดลง ทำให้สลดเคลื่อนที่ลงสู่ศูนย์ตายล่างด้วยน้ำหนักของมันเอง พร้อมกับไล่สารทำงานผ่านรีเจนเนอเรเตอร์กลับไปสู่ด้านเย็นของเครื่องยนต์ โดยความร้อนบางส่วนของการทำงานจะถูกเก็บไว้ที่รีเจนเนอเรเตอร์ ก่อนที่สารทำงานจะถูกทำให้เย็นลงที่ด้านเย็นของเครื่องยนต์ ทำให้ความดันและอุณหภูมิลดลงจากจุด 4 ไปที่จุด 1

2.3 ทฤษฎีของซมิตท์

การวิเคราะห์การทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่แพร่หลายแบบหนึ่งคือ การวิเคราะห์ของซมิตท์ โดยการสมมติการเคลื่อนที่ของลูกสูบเป็นแบบฮาร์โมนิกส์ แต่ยังคงมีสมมติฐานหลักคือ มีกระบวนการอัดและขยายตัวของสารทำงานที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal compression and expansion) และรีเจนเนอเรเตอร์เป็นแบบอุดมคติ จึงจะเห็นว่าการวิเคราะห์แบบนี้ยังมีความเป็นอุดมคติอยู่ แต่จะใกล้เคียงความเป็นจริงมากกว่าการวิเคราะห์วัฏจักรสเตอร์ลิงในอุดมคติ[1] ทำให้ทฤษฎีของซมิตท์นี้มีประโยชน์ต่อการออกแบบเครื่องยนต์

สมมติฐานในวัฏจักรของซมิตท์มีดังนี้

1. รีเจนเนอเรเตอร์เป็นแบบอุดมคติ
2. ความดันขณะใดๆ มีค่าเท่ากันทั้งระบบ
3. สารทำงานเป็นแก๊สอุดมคติตามสมการของแก๊ส
4. ไม่มีการรั่วไหลของสารทำงาน
5. การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของระบบเป็นกราฟไซน์
6. ไม่มีความแตกต่างของอุณหภูมิในส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน
7. อุณหภูมิของกระบอกสูบและลูกสูบคงที่
8. อุณหภูมิของแต่ละส่วนของเครื่องยนต์มีค่าคงที่
9. ความเร็วของเครื่องยนต์คงที่
10. แต่ละส่วนของเครื่องยนต์เป็นสภาวะคงที่



รูปที่ 1 แสดงวัฏจักรสเตอร์ลิง

3. การวิเคราะห์และการออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

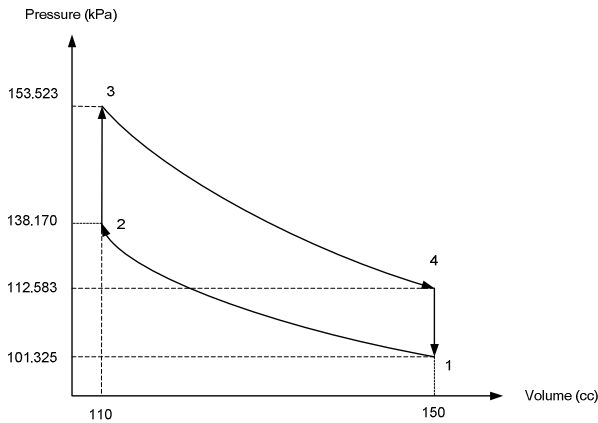
3.1 การวิเคราะห์วัฏจักรสเตอร์ลิง

ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์

$$T_{\max} = 350 \text{ K} \quad V_{\max} = 150 \text{ cc}$$

$$T_{\min} = 315 \text{ K} \quad V_{\min} = 110 \text{ cc}$$

$$P_1 = 101.325 \text{ kPa}$$



รูปที่ 2 แผนภาพความดัน-ปริมาตรของวัฏจักรสเตอร์ลิง

a) กระบวนการอัดที่อุณหภูมิคงที่ (1-2)

ในกระบวนการนี้ ความร้อนจะถูกระบายจากสารทำงานออกนอก ระบบที่ค่าอุณหภูมิต่ำสุด (T_{min}) งานที่ทำต่อสารทำงานมีค่าเท่ากับ ความร้อนที่ถูกระบายออก ทำให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงาน ภายใน และเอนโทรปีลดลง

ความดัน

$$P_2 = P_1 \frac{V_1}{V_2}$$

$$= 101.325 \text{ kPa} \left(\frac{150 \text{ cm}^3}{110 \text{ cm}^3} \right)$$

$$= 138.170 \text{ kPa}$$

ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเท (Q) = งาน (W)

$$(Q) = (W) = P_1 V_1 \ln(V_{min} / V_{max})$$

$$= (101325 \text{ Pa})(150 \times 10^{-6} \text{ m}^3) \ln\left(\frac{110}{150}\right)$$

$$= -4.71 \text{ J / cycle}$$

b) การถ่ายเทความร้อนจากรีเจนเนอเรเตอร์ที่ปริมาตรคงที่ (2-3)

ในกระบวนการนี้ ความร้อนถ่ายเทจากรีเจนเนอเรเตอร์สู่สารทำงาน ทำให้ของไหลมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก T_{min} เป็น T_{max} ไม่มีงาน เกิดขึ้นในกระบวนการนี้เนื่องจากปริมาตรคงที่ แต่เอนโทรปีและ พลังงานภายในของของไหลจะเพิ่มขึ้น

ความดัน

$$P_3 = P_2 \frac{T_3}{T_2}$$

$$= 138.170 \text{ kPa} \left(\frac{350 \text{ K}}{315 \text{ K}} \right)$$

$$= 153.523 \text{ kPa}$$

ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทสู่สารทำงาน

$$(Q) = C_v (T_3 - T_2)$$

$$= 0.718 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} (350 - 315) \text{ K}$$

$$= 25.13 \text{ kJ / kg}$$

c) กระบวนการขยายที่อุณหภูมิคงที่ (3-4)

ในกระบวนการนี้ สารทำงานจะได้รับความร้อนจากแหล่งพลังงาน ภายนอกในขณะที่มันขยายตัวที่อุณหภูมิคงที่ งานที่ได้จาก กระบวนการนี้มีค่าเท่ากับปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ระบบ ดังนั้นจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของสารทำงาน แต่เอนโทรปีจะเพิ่มขึ้น

ความดัน

$$P_4 = P_3 \frac{V_3}{V_4}$$

$$= 153.523 \text{ kPa} \left(\frac{110 \text{ m}^3}{150 \text{ m}^3} \right)$$

$$= 112.583 \text{ kPa}$$

ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเท (Q) = งาน (W)

$$(Q) = (W) = P_3 V_3 \ln\left(\frac{V_3}{V_4}\right)$$

$$= (140729 \text{ Pa})(150 \times 10^{-6} \text{ m}^3) \ln\left(\frac{150}{110}\right)$$

$$= 5.24 \text{ J / cycle}$$

d) การถ่ายเทความร้อนสู่รีเจนเนอเรเตอร์ที่ปริมาตรคงที่ (4-1)

ในกระบวนการนี้ ความร้อนจะถูกถ่ายเทจากสารทำงานสู่รีเจนเนอเรเตอร์ ทำให้ของไหลมีอุณหภูมิลดลงจาก T_{max} เป็น T_{min} กระบวนการนี้จะไม่เกิดงานเนื่องจากปริมาตรคงที่ แต่พลังงาน ภายในและเอนโทรปีของของไหลจะลดลง

ความดัน

$$P_1 = P_4 \frac{T_1}{T_4}$$

$$= 112.583 \text{ kPa} \left(\frac{315 \text{ K}}{350 \text{ K}} \right)$$

$$= 101.325 \text{ kPa}$$

ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจากสารทำงาน

$$(Q) = C_v (T_3 - T_2)$$

$$= 0.718 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} (315 - 350) \text{ K}$$

$$= -25.13 \text{ kJ / kg}$$

ในกระบวนการถ่ายเทความร้อนระหว่างสารทำงานกับรีเจนเนอเรเตอร์ จะเห็นว่าความร้อนที่ถ่ายเทจากรีเจนเนอเรเตอร์ในกระบวนการที่ 2-3 มีปริมาณเท่ากับความร้อนที่ถ่ายเทไปเก็บไว้ที่รีเจนเนอเรเตอร์ใน กระบวนการที่ 4-1

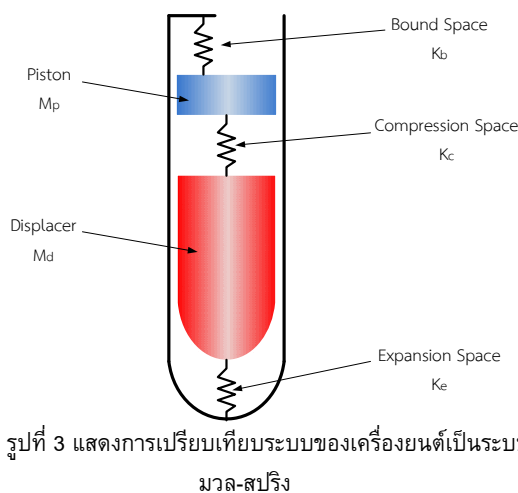
3.2 การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน

จากการวิเคราะห์วัฏจักรสเตอร์ลิงในหัวข้อ 3.1 พบว่าเครื่องยนต์ต้อง รับและระบายความร้อน 5.24 และ 4.71 จูลต่อรอบ ตามลำดับ และ เมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่ความถี่ประมาณ 10 เฮิรตซ์ ดังนั้นฮีตเตอร์ และคูลเลอร์ต้องรับและระบายความร้อนด้วยอัตราประมาณ 52.4 และ 47.1 วัตต์ ตามลำดับ [8] แต่การออกแบบระบบระบายความ

ร้อนควรเพื่อให้สามารถระบายความร้อนได้มากกว่าที่คำนวณได้จากวัฏจักรสเตอร์ลิง เนื่องจากลูกสูบดิสเพลซเซอร์มีการนำความร้อนด้วย[1]

3.3 การวิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่

ในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระ แก๊สภายในเครื่องยนต์จะมีพฤติกรรมเหมือนสปริง ทำให้มีแรงกระทำบนลูกสูบดิสเพลซเซอร์และลูกสูบกำลัง และแรงดังกล่าวถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยสมการสมดุลแรง รูปที่ 3 แสดงลักษณะของระบบมวล-สปริง ที่มีค่าคงที่สปริง K มวลของลูกสูบกำลัง, m_p มวลของลูกสูบดิสเพลซเซอร์, m_d มวลของเครื่องยนต์, m_c ซึ่งมวลของเครื่องยนต์มีค่ามากกว่ามวลของลูกสูบดิสเพลซเซอร์และลูกสูบกำลังมากจึงมักจะไม่นำมาคิดในการคำนวณ[7]



ระบบมวล-สปริง ในรูปที่ 3 สามารถเขียนได้ในรูปของสมการดิฟเฟอเรนเชียลเพื่อคำนวณหาการเคลื่อนที่ของลูกสูบดิสเพลซเซอร์และลูกสูบกำลังได้ ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนภายในเครื่องยนต์จะถูกเขียนแทนด้วย y_i ที่เวลา t ใดๆ ที่อ้างอิงจากจุดสมดุล ขณะที่ความแตกต่างของความดันระหว่างลูกสูบดิสเพลซเซอร์และลูกสูบกำลังจะมีผลอย่างมากต่อพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนดังกล่าว แรงเนื่องจากความดันจะกระทำตั้งฉากกับพื้นผิวของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรด้านร้อนจะมีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของลูกสูบดิสเพลซเซอร์ ในขณะที่ปริมาตรด้านเย็นจะสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของลูกสูบกำลัง

การเคลื่อนที่ชิ้นส่วนในระบบมวล-สปริง ในรูปที่ 3 เขียนแทนด้วยสมการดิฟเฟอเรนเชียลได้ดังนี้

ลูกสูบกำลัง

$$m_p \ddot{y}_p = A_p(P_c - P_b) + A_{rp}P_b \quad (1)$$

ลูกสูบดิสเพลซเซอร์

$$m_d \ddot{y}_d = A_d(P_e - P_c) + A_{rd}P_c \quad (2)$$

3.4 การวิเคราะห์ความดันภายในเครื่องยนต์

การวิเคราะห์แบบอุณหภูมิคงที่ของชมิทท์ (Schmidt) เมื่อรู้ค่ามวลทั้งหมดภายในเครื่องยนต์ ดังนั้นจะใช้กฎทรงมวลในการวิเคราะห์หา

ค่าความดันเฉลี่ยภายในเครื่องยนต์ได้[6] และสมการปริมาตรและความดันในรูปทั่วไปคือ

$$V_e = \frac{V_{se}}{2} (1 - \cos(\omega t - \phi)) + V_{de} \quad (3)$$

ปริมาตรด้านอัด

$$V_c = \left[\frac{V_{se}}{2} (1 - \cos(\omega t - \phi)) + V_{de} \right] + \frac{V_{sc}}{2} (1 + \cos(\omega t)) + V_{dc} \quad (4)$$

ความดันขณะใดๆ

$$p = MR / \left(\frac{V_e}{T_h} + \frac{V_r \ln(T_h / T_c)}{T_h - T_c} + \frac{V_c}{T_c} \right) \quad (5)$$

เมื่อ

V_e คือ ปริมาตรขณะใดๆของด้านขยาย

V_{se} คือ ปริมาตรกวาดของลูกสูบดิสเพลซเซอร์

V_{de} คือ ปริมาตรตายของด้านขยาย

V_c คือ ปริมาตรขณะใดๆของด้านอัด

V_{sc} คือ ปริมาตรกวาดของลูกสูบกำลัง

V_{dc} คือ ปริมาตรตายของด้านอัด

V_r คือ ปริมาตรของรีเจนเนอเรเตอร์

ω คือ ความเร็วเชิงมุมของเครื่องยนต์

ϕ คือ ความต่างเฟสของลูกสูบ

M คือ มวลของสารทำงาน

R คือ ค่าคงที่ของสารทำงาน

T_c คือ อุณหภูมิด้านเย็นของเครื่องยนต์

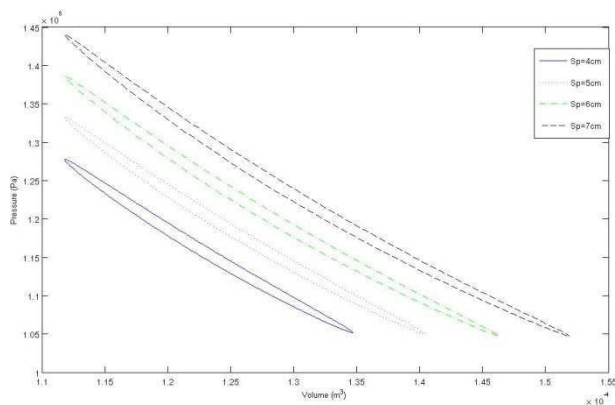
T_h คือ อุณหภูมิด้านร้อนของเครื่องยนต์

การวิเคราะห์ความดันนี้จะทำการหาระยะสโตคของลูกสูบกำลังที่ทำให้เครื่องยนต์มีกำลังสูงสุด โดยเริ่มจากการวิเคราะห์ด้วยสมการของชมิทท์ เมื่อระยะสโตคของลูกสูบเปลี่ยนแปลงจะทำให้ปริมาตรกวาดของลูกสูบกำลังและงานต่อรอบของเครื่องยนต์เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังที่แสดงในตารางที่ 1

เมื่อนำค่าปริมาตรกวาดจากตารางที่ 1 มาวิเคราะห์ความดันด้วยทฤษฎีของชมิทท์จะได้แผนภาพความดันและปริมาตรของสารทำงาน ดังรูปที่ 4 และหาค่างานต่อรอบของเครื่องยนต์จากกราฟดังกล่าวได้ดังข้อมูลในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าเมื่อลูกสูบมีระยะสโตคมากขึ้นจะส่งผลให้งานต่อรอบของเครื่องยนต์มีค่ามากขึ้นตามไปด้วย แต่จะทำให้ความถี่ลดลง เนื่องจากกำลังของเครื่องยนต์จะขึ้นอยู่กับตัวแปรสองตัวคือ งานต่อรอบ และความถี่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรทั้งสอง เพื่อให้ได้กำลังสูงสุด

ตารางที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะสโตคของลูกสูบกำลังกับ ปริมาตรกวาดและงานต่อรอบ

| ระยะสโตค ของลูกสูบ กำลัง(cm) | ปริมาตรกวาด ของลูกสูบกำลัง (cc) | งานที่คำนวณได้ จากวัฏจักรของซมิตท์ (J/cycle) |
|------------------------------------|---------------------------------------|--|
| 4.0 | 22.92 | 0.030 |
| 4.5 | 25.79 | 0.034 |
| 5.0 | 28.65 | 0.037 |
| 5.5 | 31.52 | 0.042 |
| 6.0 | 34.38 | 0.045 |
| 6.5 | 37.25 | 0.049 |
| 7.0 | 40.11 | 0.053 |
| 7.5 | 42.98 | 0.056 |
| 8.0 | 45.84 | 0.060 |

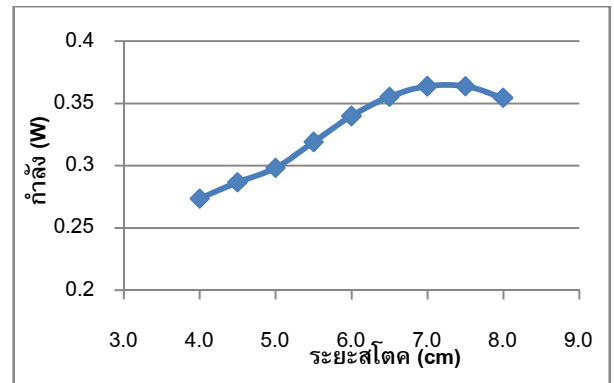


รูปที่ 4 แสดงแผนภาพความดัน-ปริมาตร ที่ระยะสโตคต่างๆ

รูปที่ 5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังระยะสโตคของ เครื่องยนต์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีของซมิตท์ จะเห็นว่า กำลังของเครื่องยนต์มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะสโตคในช่วงแรกและมี ค่าสูงสุดประมาณ 0.36 วัตต์ ที่ระยะสโตค 7-7.5 เซนติเมตร หลังจากนั้นกำลังจะมีค่าลดลงเมื่อระยะสโตคเพิ่มขึ้น ดังนั้นจะเห็นได้ ว่าระยะสโตคที่เหมาะสมที่ทำให้เครื่องยนต์มีกำลังสูง สุดคือ 7-7.5 เซนติเมตร

4. การทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เนื่องจากการทดสอบนี้ ต้องการหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระ ไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิของทั้ง ด้านร้อนของเครื่องยนต์ ระยะสโตคและความถี่ของลูกสูบ และกำลัง ทางไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงเส้น ดังนั้นในการทดสอบ จึงต้องวัดค่าดังกล่าวพร้อมกันทุกค่า



รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและระยะสโตคของ เครื่องยนต์ที่ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎี

ในการทดสอบจะกำหนดระยะสโตคของลูกสูบทั้งหมด 9 ค่า คือ 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5 และ 8 เซนติเมตร การกำหนด ระยะสโตคทำได้โดยการปรับระยะการวางสปริงทางกลให้มีระยะตาม ต้องการ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระจะได้รับความร้อนจาก ตะเกียงแอลกอฮอล์และระบายความร้อนด้วยน้ำ วัตถุประสงค์ของ ด้านร้อนของเครื่องยนต์ด้วยอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ โดยการยิง แสงอินฟราเรดไปที่โลหะด้านร้อนที่ทำหน้าที่รับความร้อนจาก ตะเกียงแอลกอฮอล์ ความถี่ของเครื่องยนต์วัดจากความถี่ของไฟฟ้า ที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงเส้น วัดโดยมัลติมิเตอร์ และกำลังของ เครื่องยนต์วัดจากศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเชิงเส้น ดังรูปที่ 6



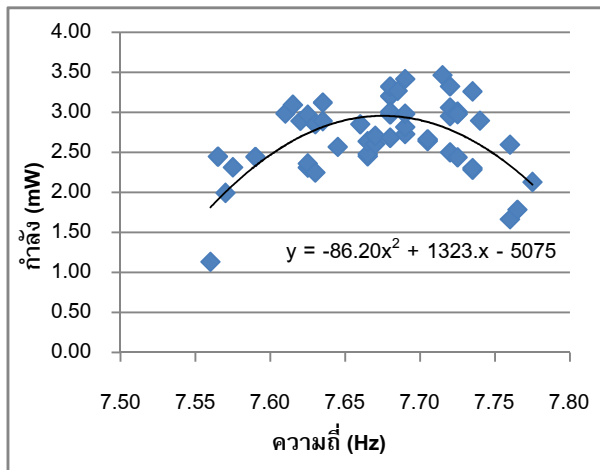
รูปที่ 6 แสดงอุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ขณะทำการทดสอบ

การทดสอบเครื่องยนต์เริ่มจากการจัดอุปกรณ์ดังรูป กำหนดระยะ ของสปริงให้ลูกสูบมีระยะสโตคตามที่ต้องการทดสอบ เริ่มจับเวลา เมื่อเริ่มให้ความร้อนแก่เครื่องยนต์ บันทึกผลจากอินฟราเรด เทอร์โมมิเตอร์ทุกๆ 30 วินาที สตาร์ทเครื่องยนต์เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที เมื่อเครื่องยนต์เริ่มทำงานจึงบันทึกค่ากระแสไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า และความถี่ ทุกๆ 15 วินาที ก่อนทำการทดสอบครั้งต่อไปต้องรอให้ เครื่องยนต์เย็นลงเท่าอุณหภูมิห้องทุกครั้ง

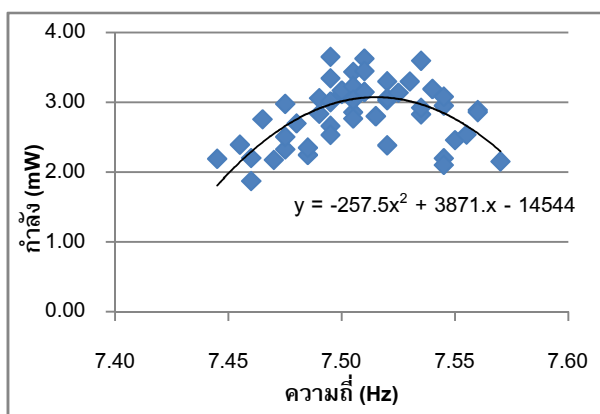
5. ผลการทดลอง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระที่นำมาทดสอบ เริ่มทำงานได้เมื่อให้ความร้อนด้วยตะเกียงแอลกอฮอล์ด้วยอัตราประมาณ 245 วัตต์ เป็นเวลาประมาณ 5 นาที และมีอุณหภูมิด้านร้อนประมาณ 70 องศาเซลเซียส ทำงานได้เมื่อมีระยะสโตค 4.5 – 6.0 เซนติเมตร

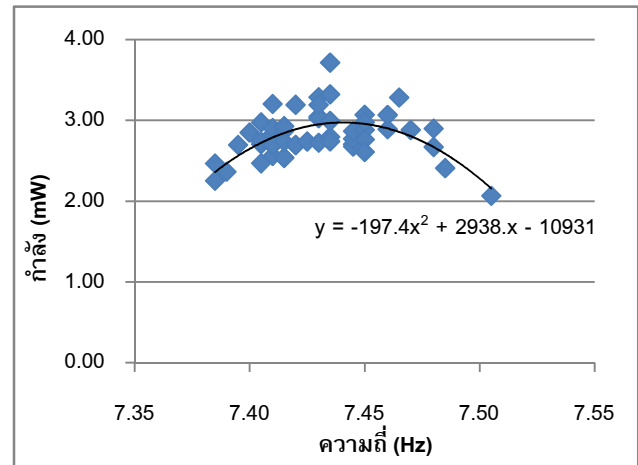
รูปที่ 7-10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและความถี่ของเครื่องยนต์สำหรับระยะสโตค 4.5-6.0 เซนติเมตร ตามลำดับ จะเห็นว่าทุกๆค่าระยะ สโตคที่ทำการทดสอบ แนวโน้มกำลังของเครื่องยนต์มีทิศทางเดียวกันคือ กำลังจะเพิ่มขึ้นตามความถี่จนกระทั่งถึงค่าความถี่ค่าหนึ่งจะทำให้เครื่องยนต์ได้กำลังสูงสุด และเมื่อความถี่มีค่ามากกว่าความถี่ดังกล่าวกำลังของเครื่องยนต์จะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น



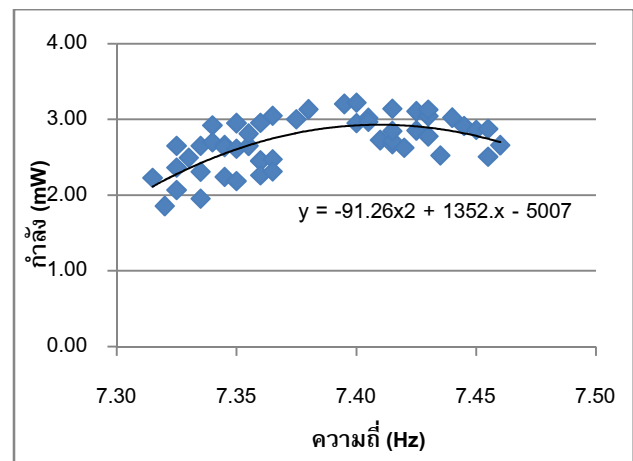
รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและความถี่ของเครื่องยนต์ที่ระยะสโตค 4.5 เซนติเมตร



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและความถี่ของเครื่องยนต์ที่ระยะสโตค 5.0 เซนติเมตร



รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและความถี่ของเครื่องยนต์ที่ระยะสโตค 5.5 เซนติเมตร

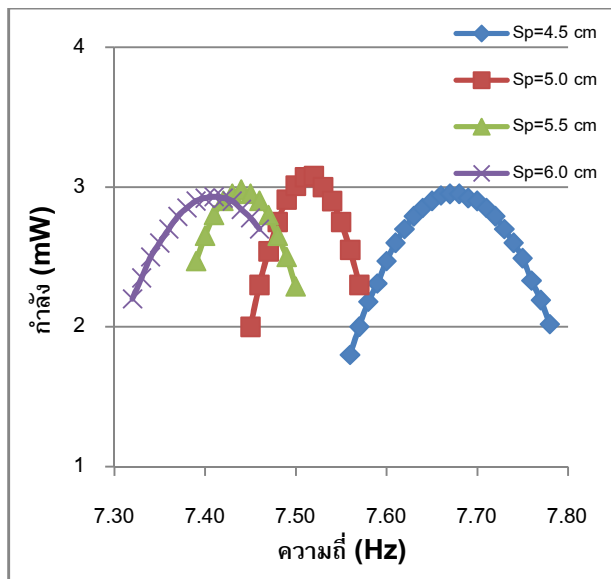


รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและความถี่ของเครื่องยนต์ที่ระยะสโตค 6.0 เซนติเมตร

ที่ระยะสโตค 4.5 และ 5.0 เซนติเมตร เครื่องยนต์มีช่วงความถี่ 7.5-7.8 เฮิรตซ์ และ 7.4-7.6 เฮิรตซ์ ตามลำดับ ได้กำลังสูงสุด 3.46 และ 3.65 มิลลิวัตต์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 7-8

ที่ระยะสโตค 5.5 และ 6.0 เซนติเมตร เครื่องยนต์มีช่วงความถี่ 7.3-7.5 เฮิรตซ์ และ 7.3-7.5 เฮิรตซ์ ตามลำดับ ได้กำลังสูงสุด 3.72 และ 3.22 มิลลิวัตต์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 9-10

รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและความถี่ของเครื่องยนต์ที่ระยะสโตคต่างๆ จะพบว่าระยะสโตคที่เครื่องยนต์มีกำลังสูงสุดคือ 5.0 เซนติเมตร โดยมีกำลังสูงสุดที่ 3.10 มิลลิวัตต์ และที่ระยะสโตคอื่นๆ เครื่องยนต์มีกำลังสูงสุดใกล้เคียงกัน คือประมาณ 2.95 มิลลิวัตต์



รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและความถี่ของเครื่องยนต์ที่ระยะสโตรคต่างๆ

6. สรุป

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบคู่อิสระจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น ค่าของตัวแปรต่างๆทั้งทางด้านรูปร่างทางกล และทางความร้อนต้องมีค่าที่เหมาะสม จากการศึกษาเครื่องยนต์ต้นแบบที่มีปริมาตรกวาดประมาณ 20-40 ซีซี ทำการทดสอบที่ความดันบรรยากาศ ให้ความร้อนด้วยตะเกียงแอลกอฮอล์ และระบายความร้อนด้วยน้ำพบว่าที่ช่วงอุณหภูมิมีดำนร้อน 70-200 องศาเซลเซียส ทำงานได้เมื่อมีระยะสโตรค 4.5 – 6.0 เซนติเมตร และระยะสโตรคที่เหมาะสมคือ 5 เซนติเมตร ทำให้เครื่องยนต์มีช่วงความถี่ 7.4-7.6 เฮิรตซ์ จะได้กำลังสูงสุด 3.10 มิลลิวัตต์ ที่ความถี่ 7.5 เฮิรตซ์ ซึ่งมีความแตกต่างจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎี คือ ระยะสโตรคที่เหมาะสมที่ทำให้เครื่องยนต์มีกำลังสูงสุดจากทางทฤษฎีคือ 7-7.5 เซนติเมตร ได้กำลัง 0.36 วัตต์ กำลังของเครื่องยนต์ที่วัดได้จริงมีประสิทธิภาพประมาณ 0.86 เปอร์เซนต์เมื่อเทียบกับกำลังที่ได้จากทฤษฎี ความแตกต่างของการวิเคราะห์ทางทฤษฎีกับการทดลองจริงเป็นผลมาจากสมมติฐานในทฤษฎีของสมิต์ที่ยังคงเป็นอุดมคติอยู่บ้าง และตัวแปรบางตัวที่ไม่ได้คำนึงถึงในการคำนวณ เช่น ความหน่วงของระบบกำเนิดไฟฟ้า ความหน่วงของสปริงอากาศ และประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เอกสารอ้างอิง

- [1] Walker G., "Stirling Engine", Oxford University Press, New York, 1980.
- [2] Rayner Joel., "Engineering Thermodynamics", Longman, fifth edition, 1996.
- [3] Willard W Pulkrabek., "Engineering Fundamental of the Internal Combustion Engine", Pearson Education Indochina Ltd., 1997.
- [4] Kongtragool B., Wongwises S., "A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential

Stirling engines", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2003,131–154.

- [5] Boucher J., Lanzetta, F., Nika, P., "Optimization of a dual free piston Stirling engine", Applied Thermal Engineering, 27, 2007, 802–811.
- [6] E.D. Rogdakis., N.A. Bormpilas, I.K. Koniakos, "A thermodynamic study for the optimization of stable operation of free piston Stirling engines", Energy Conversion Manage. 45 (4) (2004) 575–593.
- [7] C. West., "Principals and applications of Stirling engines", Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1986.
- [8] Jack P. Holman., "Heat Transfer", McGraw-Hill International Enterprises, ninth edition, 2002.