

บทที่ 4

วิธีการปรับปรุงเครื่องยนต์

ผลการประเมินการสูญเสียหลักของเครื่องยนต์ในบทที่ 3 แสดงให้เห็นว่า การสูญเสียหลักของเครื่องยนต์คือ ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์ และการสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ แต่การสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ไม่มีผลต่อวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์โดยตรงจึงไม่มีการปรับปรุงเครื่องยนต์เพื่อลดการสูญเสียดังกล่าว สำหรับความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์ซึ่งประกอบไปด้วย การสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อน, การสูญเสียภายใน regenerator และการสูญเสียเนื่องจากการรั่วของก๊าซทำงานที่ลูกสูบกำลัง จะปรับปรุงเพียงการสูญเสียภายใน regenerator และการสูญเสียเนื่องจากการรั่วของก๊าซทำงานที่ลูกสูบกำลัง เท่านั้น เนื่องจากการปรับปรุงเครื่องยนต์ เพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนจำเป็นต้องมีการปรับปรุงโครงสร้างของเครื่องยนต์ โดยการลดความหนาของผนังในส่วนต่างๆของเครื่องยนต์ แต่การลดความหนาของผนังเครื่องยนต์จำเป็นต้องลดระดับความดันที่ใช้งานลงเพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน ซึ่งกลับยังผลให้กำลังขาออกของเครื่องยนต์ลดลง จากเหตุผลข้างต้น ทำให้ผู้วิจัยไม่ปรับปรุงเครื่องยนต์เพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อน

การสูญเสียภายใน regenerator เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์ลดลง เนื่องจากการสูญเสียภายใน regenerator ทำให้ผลต่างอุณหภูมิของสารทำงานระหว่าง heater และ cooler ลดลง นอกจากนี้การสูญเสียภายใน regenerator ยังทำให้ค่าความร้อนที่ให้แก่อุปกรณ์และความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์มีค่าเพิ่มขึ้น [20] การลดการสูญเสียภายใน regenerator สามารถทำได้โดย การเลือกลักษณะจำเพาะของ regenerator ให้เหมาะสมที่สุด ผลการศึกษา [20,25,26] พบว่า ขนาดของตาข่าย และ ค่าความพรุน ของ regenerator เป็นตัวแปรสำคัญในการเลือกลักษณะจำเพาะของ regenerator ที่สุด แต่ยังมีตัวแปรสำคัญอีกตัวหนึ่งคือ ปริมาตรตายสำหรับใส่ regenerator เนื่องจาก ปริมาตรตายของเครื่องยนต์มีผลต่อค่า compression ratio ของเครื่องยนต์ ซึ่งมีผลต่อค่ากำลังบ่งชี้ที่ได้ และมีผลต่อปริมาตรของ regenerator ที่สามารถใส่ไว้ในปริมาตรตายขนาดนั้นๆอีกด้วย ดังนั้นการลดการสูญเสียภายใน regenerator ในงานวิจัยนี้จะใช้การทดสอบหาลักษณะจำเพาะของ regenerator ที่เหมาะสมที่สุด จากลักษณะจำเพาะ 3 ชนิด คือ ค่าความพรุน, ขนาดตาข่าย และปริมาตรตาย โดยใช้วิธีการเลือกลักษณะจำเพาะที่เหมาะสมที่สุดของ Taguchi [27] ซึ่งจะกล่าวถึงวิธีการดังกล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อถัดไป นอกจากนี้ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์เมื่อเลือกลักษณะเฉพาะของ regenerator ที่เหมาะสมที่สุดแล้ว จะนำมาใช้ในการคำนวณค่ากำลังบ่งชี้

แบบไร้มิติในอุดมคติที่ได้จากการประเมิน ($Z_{o,estm}$) และค่าการสูญเสียของค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติที่ได้จากการประเมิน ($\Phi_{estm} M_{expr}$) เทียบกับ Mach number ที่ค่ากำลังบ่งชี้สูงที่สุดที่ได้จากผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ ($M_{max,expr}$) ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงก่อนและหลังเลือก regenerator ให้เหมาะสมที่สุด เพื่อใช้วิเคราะห์สาเหตุของสมรรถนะที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์เบื้องต้นในบทที่ 3 แสดงให้เห็นว่า กำลังขาออกสูงสุดของเครื่องยนต์ลดลงทุกครั้งที่ทำการทดสอบ ณ เงื่อนไขในการทดสอบเดียวกัน ซึ่งอาจเป็นผลจากการสึกหรอของแหวนลูกสูบกำลังทำให้เกิดการรั่วของสารทำงานจาก compression space มายังปริมาตรห้องเครื่อง การลดการสูญเสียเนื่องจากการรั่วของสารทำงานที่ลูกสูบกำลังสามารถทำได้โดยเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำแหวนลูกสูบกำลัง เนื่องจากแหวนลูกสูบกำลังที่ผลิตจาก Teflon มีการสึกหรอสูง ดังนั้นการลดการสูญเสียดังกล่าวจึงมุ่งเน้นไปในส่วนของการหาวัสดุที่จะนำมาใช้แทน Teflon เพื่อลดการสึกหรอดังกล่าว

การปรับปรุงเครื่องยนต์ข้างต้นน่าจะทำให้สมรรถนะของเครื่องยนต์สูงขึ้นในระดับหนึ่ง อีกวิธีหนึ่งที่สามารถเพิ่มสมรรถนะเครื่องยนต์ได้ คือ การเปลี่ยนชนิดของสารทำงานที่ใช้ในเครื่องยนต์ [1,15,17,26] งานวิจัยของ Koichi Hirata [1] ได้ทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์โดยใช้ไนโตรเจน และ ฮีเลียม เป็นสารทำงาน ผลการทดสอบพบว่า เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ใช้ฮีเลียมเป็นสารทำงานมีสมรรถนะสูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ไนโตรเจนเป็นสารทำงาน 32% นอกจากนี้ Eldesouki Eid [26] ได้ทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์โดยเปลี่ยนสารทำงานด้วยกันทั้งหมด 4 ชนิดคือ อากาศ, ไนโตรเจน, ฮีเลียม และไฮโดรเจน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ไฮโดรเจนสามารถผลิตกำลังขาออกได้สูงสุด รองลงมาคือ ฮีเลียม อากาศ และไนโตรเจนตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกำลังขาออกของแต่ละสารทำงานแล้วพบว่า ไฮโดรเจนและฮีเลียมสามารถให้กำลังขาออกสูงสุดได้มากกว่าอากาศ และ ไนโตรเจน ถึง 20 เท่า และ 10 เท่าตามลำดับ ผลการวิจัยดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มสมรรถนะของเครื่องยนต์ให้สูงขึ้นสามารถทำได้ โดยการเปลี่ยนสารทำงาน เนื่องจากเครื่องยนต์ที่มีอยู่ใช้อากาศเป็นสารทำงาน ซึ่งเป็นสารทำงานที่มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด สำหรับใช้ภายในเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ดังนั้นการปรับปรุงเครื่องยนต์เพิ่มเติมหลังจากเลือกลักษณะจำเพาะของ regenerator ให้เหมาะสมที่สุดและเปลี่ยนแหวนลูกสูบกำลังแล้ว จะเปลี่ยนสารทำงานของเครื่องยนต์ ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดต่อไป

4.1 วิธีการเลือก regenerator ให้เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีของ Taguchi

regenerator เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ค่ากำลังบ่งชี้มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก regenerator เปรียบเสมือนเป็นตัวรับความร้อนจากสารทำงาน ในช่วงที่สารทำงานไหลจาก heater ไปยัง cooler เพื่อลดอุณหภูมิของสารทำงานก่อนที่สารทำงานจะไหลผ่าน cooler ไปยัง compression space ทำให้ compression power มีค่าลดลง และเป็นตัวคายความร้อนให้สารทำงาน ในช่วงที่สารทำงานไหลจาก cooler ไปยัง heater เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารทำงานก่อนที่สารทำงานจะไหลจาก heater ไปยัง expansion space ทำให้ expansion power มีค่าเพิ่มขึ้น จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า regenerator เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถใช้ความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ถึงแม้ว่าการใช้ regenerator จะมีข้อดีดังที่กล่าวข้างต้น แต่ regenerator ก็มีข้อเสียเช่นกันคือ ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากความดันภายในเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องยนต์มากขึ้น ดังนั้นการเลือกลักษณะจำเพาะของ regenerator ให้เหมาะสมที่สุดจึงเป็นสิ่งจำเป็น ซึ่งในงานวิจัยนี้ regenerator ที่ใช้ในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีอยู่ยังไม่ได้ผ่านการเลือกลักษณะจำเพาะของ regenerator ให้เหมาะสมที่สุด ดังนั้นการเลือก regenerator ให้เหมาะสมที่สุดจะทำโดยใช้วิธีการทำให้เหมาะสมที่สุดของ taguchi ซึ่งเป็นวิธีที่ช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการจัดชุดทดสอบ

วิธีการเลือกลักษณะจำเพาะให้เหมาะสมที่สุดของ Taguchi เป็นวิธีที่ใช้แพร่หลายในงานอุตสาหกรรมเพื่อใช้ในการทำให้ตัวแปรต่างๆ มีลักษณะจำเพาะเหมาะสมที่สุด โดยใช้จำนวนการทดสอบน้อยที่สุด วิธีการทำให้เหมาะสมที่สุดของ Taguchi จะใช้ตาราง orthogonal arrays ช่วยจัดความสัมพันธ์ของลักษณะจำเพาะของตัวแปรแต่ละตัวที่ควรเปลี่ยนไปในแต่ละการทดสอบให้เหมาะสม ซึ่งถือว่าเป็นข้อดี เนื่องจากช่วยลดจำนวนการทดสอบและเวลาที่ต้องใช้ทดสอบไปได้มาก เมื่อเทียบกับการทำให้เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีดั้งเดิม ยกตัวอย่างเช่น การทดสอบหนึ่งมีตัวแปรสำคัญ 4 ตัวแปร โดยแต่ละตัวแปรจะมีลักษณะจำเพาะ 3 ระดับ ถ้าต้องการหาลักษณะจำเพาะของตัวแปรซึ่งให้ output สูงสุด จะต้องทำการทดสอบทั้งหมด 3^4 การทดสอบเพื่อให้ได้ลักษณะจำเพาะของแต่ละตัวแปรที่เหมาะสมที่สุด แต่วิธีการเลือกลักษณะจำเพาะให้เหมาะสมที่สุดของ taguchi นั้นจะช่วยลดจำนวนการทดสอบข้างต้นลง โดยการเปิดตาราง array selector ซึ่ง taguchi ได้ทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร, ลักษณะจำเพาะของตัวแปร และจำนวนการทดสอบที่จำเป็นใช้ในการทำให้เหมาะสมที่สุด ซึ่งในกรณีข้างต้นเมื่อเปิดตาราง array selector แล้วจะพบว่า ได้ตาราง Othogonal array L9 แสดงดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ตาราง Othogonal array L9

การทดสอบ ที่	ตัวแปร 1 (P1)	ตัวแปร 2 (P2)	ตัวแปร 3 (P3)	ตัวแปร 4 (P4)
1	L1	L1	L1	L1
2	L1	L2	L2	L2
3	L1	L3	L3	L3
4	L2	L1	L2	3
5	L2	L2	3	L1
6	L2	L3	L1	L2
7	L3	L1	L3	L2
8	L3	L2	L1	L3
9	L3	L3	L2	L1

เมื่อ ค่า L1,L2 และ L3 ในตารางข้างต้น หมายถึงระดับลักษณะจำเพาะของตัวแปรที่ทดสอบ หลังจากได้จำนวนการทดสอบและความสัมพันธ์ของลักษณะจำเพาะของตัวแปรแล้ว ผลการทดสอบที่ได้จะนำไปหาลักษณะจำเพาะที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรแต่ละตัว จากสมการ ideal function ที่ใช้วิธีการ least square ในการหาค่า β ที่ให้ค่า output สูงสุด [27] โดยมีวิธีการดังนี้คือ เขียนความสัมพันธ์ระหว่าง input(m) และ output(y) ให้อยู่ในรูปสมการ

$$y_{ij} = \beta x_i \quad (4.1)$$

โดยที่ y คือ output ของสมการ ideal function, β คือ ค่าคงที่ของสมการ ideal function และ x คือ input ของสมการ ideal function $i = 1, \dots, k$ เมื่อ $k =$ จำนวนข้อมูล และ $j = 1, \dots, r_o$ เมื่อ $r_o =$ จำนวนการทดสอบซ้ำ จากนั้นวิเคราะห์สมการ ideal function ข้างต้นด้วยวิธีการ least square ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการผลรวมยกกำลัง 2 ได้ดังสมการ

$$SS_v = \sum_i \sum_j (y_{i,j} - \beta x_i)^2 \quad (4.2)$$

ซึ่งค่า β ที่มีค่ามากที่สุดสามารถหาได้จากการหาอนุพันธ์ของสมการผลรวมยกกำลัง 2 แสดงดังสมการ

$$dSS_v/d\beta = -2 \sum_i \sum_j x_i (y_{i,j} - \beta x_i) = 0 \quad (4.3)$$

สมการอนุพันธ์ผลรวมยกกำลัง 2 ข้างต้นสามารถเขียนสมการในรูปของ β ได้ดังสมการ

$$\beta = (\sum_i \sum_j x_i y_{i,j}) / r_o \sum_i x_i^2 \quad (4.4)$$

นำค่า β ที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย และเปรียบเทียบกันในแต่ละลักษณะจำเพาะของตัวแปรโดยมีวิธีการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 วิธีการเปรียบเทียบลักษณะจำเพาะของตัวแปร

C/F			control factor setting									
P 1	P 2	P 3	β	P1,L1	P1,L2	P1,L3	P2,L1	P2,L2	P2,L3	P3,L1	P3,L2	P3,L3
L 1	L 1	L 1	B_1	B_1	0	0	B_1	0	0	B_1	0	0
L 1	L 2	L 2	B_2	B_2	0	0	0	B_2	0	0	B_2	0
L 1	L 3	L 3	B_3	B_3	0	0	0	0	B_3	0	0	B_3
L 2	L 1	L 2	B_4	0	B_4	0	B_4	0	0	0	B_4	0
L 2	L 2	L 3	B_5	0	B_5	0	0	B_5	0	0	0	B_5
L 2	L 3	L 1	B_6	0	B_6	0	0	0	B_6	B_6	0	0
L 3	L 1	L 3	B_7	0	0	B_7	B_7	0	0	0	0	B_7
L 3	L 2	L 1	B_8	0	0	B_8	0	B_8	0	B_8	0	0
L 3	L 3	L 2	B_9	0	0	B_9	0	0	B_9	0	B_9	0
			avg	$B_{P1,L1}$	$B_{P1,L2}$	$B_{P1,L3}$	$B_{P2,L1}$	$B_{P2,L2}$	$B_{P2,L3}$	$B_{P3,L1}$	$B_{P3,L2}$	$B_{P3,L3}$

ลักษณะจำเพาะของตัวแปรที่มีค่าเฉลี่ยของ β มากที่สุดจะเป็นลักษณะจำเพาะที่เหมาะสมที่สุดในการใช้ regenerator นอกจากนี้ตัวแปรที่มีผลต่อการทดสอบมากที่สุดสามารถหาได้จาก ค่าผลต่างสูงสุดและต่ำสุดของ S/N ratio ซึ่งค่า S/N ratio สามารถคำนวณได้จากสมการ [28]

$$SN_i = 10 \log \frac{\bar{y}_i^2}{s_i^2} \quad (4.5)$$

เมื่อ $\bar{y}_i^2 = \frac{1}{N_i} \sum_{u=1}^{N_i} y_{i,u}$, $s_i^2 = \frac{1}{N_i-1} \sum_{u=1}^{N_i} (y_{i,u} - \bar{y}_i)^2$, i คือ การทดสอบที่เท่าไร , u คือ จำนวนนับครั้งแรก และ N_i คือ ครั้งที่ทำการทดสอบซ้ำ

4.1.1 วิธีการทดสอบ

การเลือก regenerator ให้เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้จะใช้ตัวแปรด้วยกันทั้งหมด 3 ชนิด และ มีการแบ่งลักษณะจำเพาะของตัวแปรเป็น 3 ระดับ แสดงดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ตารางลักษณะจำเพาะของ regenerator ที่ใช้ในการทดสอบ

ลักษณะจำเพาะ ตัวแปร	1	2	3
ขนาดตาข่าย	40(D= 0.213 mm)	80(D= 0.152 mm)	120(D= 0.091 mm)
ปริมาตรตายของ regenerator, V_o (cm ³)	17.902	39.147	55.238
ค่าความพรุน, ϕ	0.7	0.8	0.9

จำนวนชนิดของตัวแปรและระดับของลักษณะจำเพาะในตารางข้างต้น จะถูกนำไปใช้ในการเลือก orthogonal array จากตาราง array selector ซึ่งได้ผลเป็นตาราง orthogonal array L9 ที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 ตาราง outhogonal array สำหรับใช้ในการทดสอบ

จำนวนการ ทดสอบ	ขนาดตาข่าย	V_o (cm ³)	ϕ	V_{regen}^* (cm ³)
1	40(D= 0.213 mm)	17.901	0.7	(5.371)
2	40(D= 0.213 mm)	39.147	0.8	(7.829)
3	40(D= 0.213 mm)	55.238	0.9	(5.524๗)
4	80(D= 0.152 mm)	17.901	0.8	(3.581)
5	80(D= 0.152 mm)	39.147	0.9	(3.915)
6	80(D= 0.152 mm)	55.238	0.7	(16.572)
7	120(D= 0.091 mm)	17.9017	0.9	(1.790)
8	120(D= 0.091 mm)	39.1474	0.7	(11.744)
9	120(D= 0.091 mm)	55.238	0.8	(11.047)

* ค่าปริมาตรวัสดุ regenerator (V_{regen}) ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการ 4.6 ซึ่งจะนำไปใช้คำนวณน้ำหนักของ regenerator ต่อไป

โดยที่ค่าปริมาตรวัสดุ regenerator (V_{regen}) ที่ลักษณะจำเพาะของค่าความพรุน (ϕ) และปริมาตรตายของ regenerator (V_o) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$V_{regen} = V_o - \phi V_o \quad (4.6)$$

เมื่อ V_o คือ ปริมาตรตายของ regenerator, V_{regen} คือ ปริมาตรวัสดุ regenerator และ ϕ คือ ค่าความพรุน จากนั้นค่าปริมาตรวัสดุ regenerator (V_{regen}) จะใช้ในการคำนวณน้ำหนักของ regenerator (m_{regen}) จากสมการ

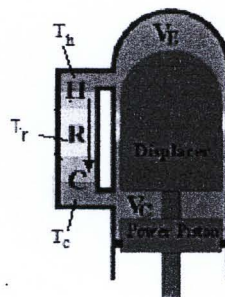
$$m_{regen} = \rho_{regen} V_{regen} \quad (4.7)$$

เมื่อ ρ_{regen} คือ ความหนาแน่นของสแตนเลส 304 ซึ่งมีค่า 8.03 g/cm^3 น้ำหนักของ regenerator (m_{regen}) ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการข้างต้น จะนำไปใช้ในการชั่งน้ำหนักของตาข่ายสแตนเลสที่ใช้ทำ regenerator เพื่อให้ได้ค่าความพรุนที่สอดคล้องกับปริมาตรตายนั้นๆ ซึ่งผลการคำนวณปริมาตรและน้ำหนักของ regenerator แสดงดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ผลการคำนวณปริมาตรและน้ำหนักของ regenerator

$V_o \text{ (cm}^3\text{)}$	$V_{regen} \text{ (cm}^3\text{)}$			$m_{regen} \text{ (g)}$		
	$\phi = 0.7$	$\phi = 0.8$	$\phi = 0.9$	$\phi = 0.7$	$\phi = 0.8$	$\phi = 0.90$
17.902	5.371	3.581	1.790	43.125	28.750	14.375
39.147	11.744	7.829	3.915	94.306	62.871	31.435
55.238	16.572	11.047	5.524	133.070	88.714	44.356

สมการ ideal function ที่จะใช้ในการเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะแต่ละแบบของตัวแปรนั้น ideal function ที่เหมาะสมควรจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง input และ output ที่ได้รับผลกระทบของการเปลี่ยนขนาดตาข่าย regenerator, ค่าความพรุน และ ปริมาตรตาย เพียงเท่านั้น ดังนั้น ideal function ที่ควรจะเป็นคือ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศที่ heater (T_h) และอุณหภูมิอากาศที่ cooler (T_c) กับอุณหภูมิของ regenerator (T_r) ซึ่งอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งแสดงดังรูปที่ 4-1



รูปที่ 4-1 ตำแหน่งอุณหภูมิภายใน Heater, cooler และ regenerator

และมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$T_r - T_c = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_h} (T_h - T_r) \quad (4.8)$$

เมื่อ T_h คือ อุณหภูมิอากาศด้าน heater, T_r คือ อุณหภูมิ regenerator, T_c คือ อุณหภูมิอากาศด้าน cooler, $\dot{m}_h$ คือ อัตราการไหลของอากาศด้าน heater และ $\dot{m}_c$ คือ อัตราการไหลของอากาศด้าน cooler แต่ในความเป็นจริงการวัดค่าอุณหภูมิ regenerator นั้นกระทำได้ยาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้สมการ ideal function เป็นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาออกที่ได้จากเครื่องยนต์กับกำลังไฟฟ้าที่ให้แก่อัดลดความร้อนแสดงดังสมการ

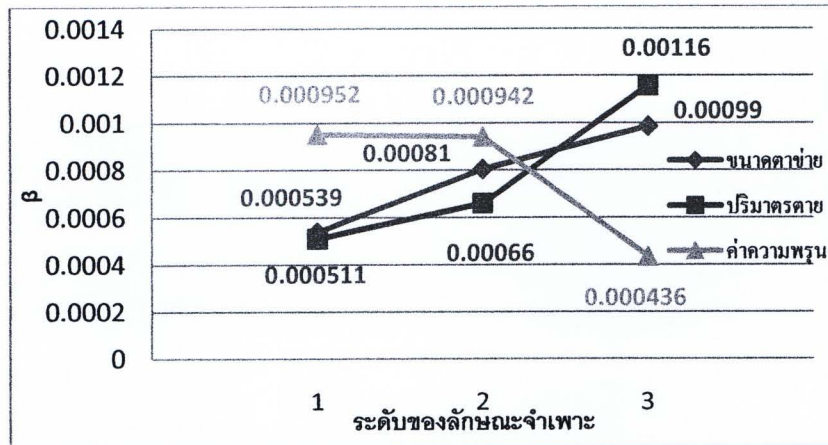
$$I_{rms}V(P.F.) = 2\pi \left(\frac{n_s}{60}\right) T \quad (4.9)$$

เมื่อ I_{rms} คือ กระแส rms, V คือ แรงดันไฟฟ้า, $P.F.$ คือ power factor, n_s คือ ความเร็วรอบ และ T คือ แรงบิด สมการ ideal function ข้างต้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสำหรับการหาค่า β ได้ดังสมการ

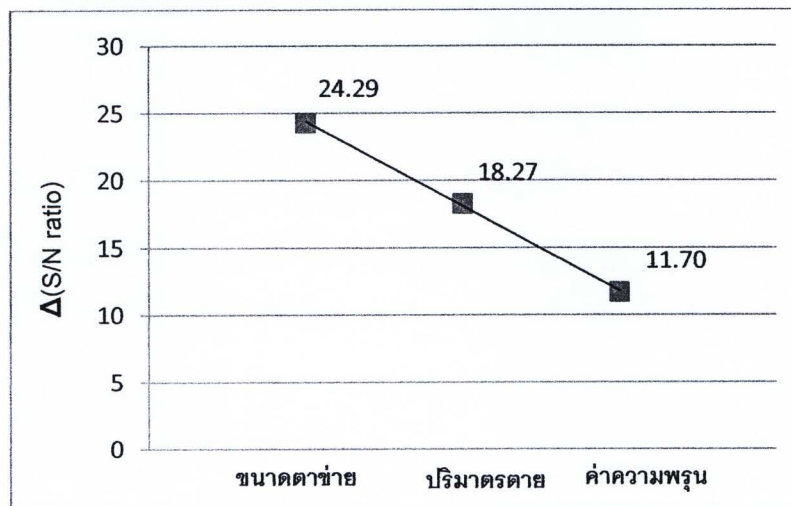
$$\beta = \left(\sum_i \sum_j T_i(I_{rms}V(P.F.))_{i,j} \right) / r_o \sum_i (I_{rms}V(P.F.))_i^2 \quad (4.10)$$

4.1.2 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบพบว่า ค่า β ในแต่ละลักษณะจำเพาะของตัวแปร แสดงดังรูปที่ 4-2 ซึ่งลักษณะจำเพาะที่มีค่า β มากที่สุดของแต่ละตัวแปรจะเป็นลักษณะจำเพาะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับค่า β ที่ได้จากการคำนวณในแต่ละระดับของขนาดตาข่าย คือ 0.000987, สำหรับปริมาตรตาย ค่า β มากที่สุด คือ 0.001159 สำหรับค่าความพรุน ค่า β มากที่สุด คือ 0.000952 ซึ่งค่า β มากที่สุดในแต่ละตัวแปรดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ลักษณะจำเพาะของ regenerator ที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องยนต์ คือ ตาข่ายขนาด 120, ปริมาตรตายของ regenerator ขนาด 55 cm³ และ ค่าความพรุน 0.7 นอกจากนี้ยังพบว่า ผลการคำนวณค่าผลต่างของ S/N ratio โดยตัวแปรที่มีค่าผลต่างของ S/N ratio มากที่สุดจะเป็นตัวแปรที่มีผลต่อกำลังขาออกมากที่สุด แสดงดังรูปที่ 4-3 จากรูปแสดงให้เห็นว่าขนาดตาข่ายมีผลต่อกำลังขาออกมากที่สุด



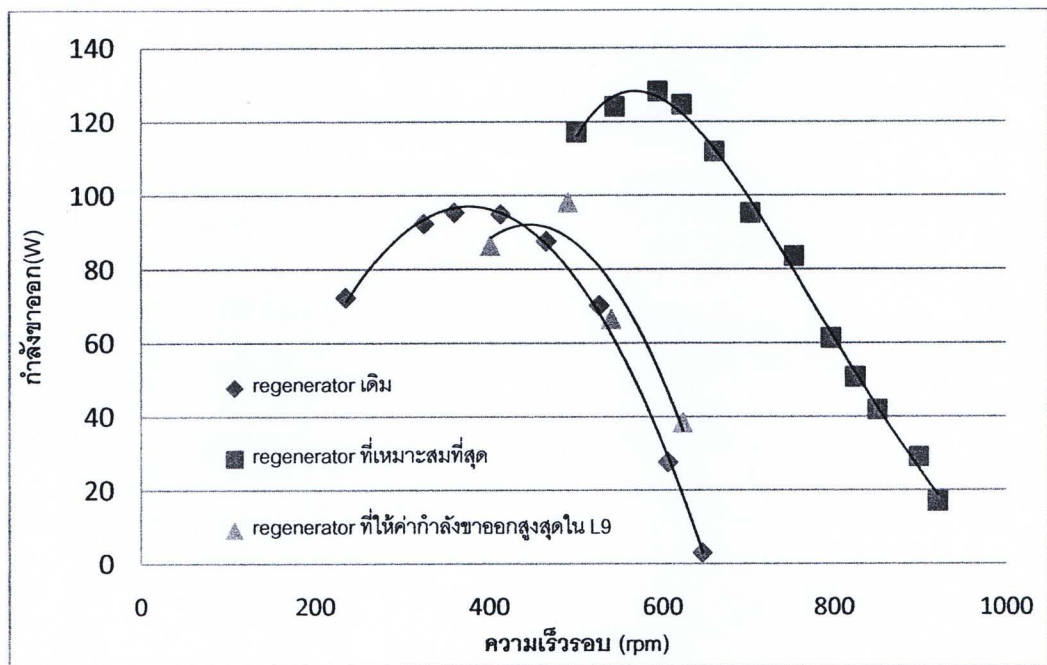
รูปที่ 4-2 ค่า β ในแต่ละระดับของตัวแปร



รูปที่ 4-3 ค่า $\Delta(S/N \text{ ratio})$ ของแต่ละตัวแปร

ผลการทดสอบกำลังขาออกที่ลักษณะจำเพาะของ regenerator ที่เหมาะสมที่สุด คือ ตาข่ายขนาด 120, ปริมาตรตายของ regenerator ขนาด 55 cm³ และ ความพรุน 0.7 แต่ในการทดสอบจริงพบว่า สามารถใส่ regenerator ได้ความพรุนเพียง 0.75 เท่านั้น เนื่องจากตาข่ายขนาด 120 มีน้ำหนักเบาจึงจำเป็นต้องใส่จำนวนแผ่นของ wire mesh มาก เพื่อให้ได้น้ำหนักสำหรับที่ใช้ในการทดสอบ จากเหตุผลดังกล่าว ทำให้ในทางปฏิบัติไม่สามารถใส่ regenerator เข้าไปในช่องใส่ regenerator เพื่อให้ความพรุนมีค่า 0.7 ได้ เนื่องจาก regenerator มีความหนาต่อหนึ่งแผ่นมากเกินไป จากปัญหาดังกล่าว การทดสอบจริงจะใช้ความพรุนที่ 0.75 ซึ่งผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์แสดงดังรูปที่ 4-4 จากรูปแสดงให้เห็นว่ากำลังขาออกสูงสุดที่ลักษณะจำเพาะของ regenerator ที่เหมาะสมที่สุดมีค่า 128 W ที่ความเร็วรอบ 603 rpm ในขณะที่กำลังขาออกที่ลักษณะจำเพาะของ regenerator เดิม มีค่า 95 W ที่ความเร็วรอบ 360 rpm และลักษณะจำเพาะของ regenerator ที่ได้ให้กำลังขาออกสูงสุดในตาราง orthogonal array L9 มีค่า 98 W ที่

ความเร็วรอบ 490 rpm แสดงให้เห็นว่าการใช้ regenerator ที่เลือกให้เหมาะสมที่สุดทำให้ลักษณะจำเพาะของเครื่องยนต์เปลี่ยนแปลงไปโดยมีความเร็วรอบเพิ่มขึ้น และทำให้กำลังขาออกสูงสุดของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น 35% และประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจาก 9.4 % เป็น 10.5 %



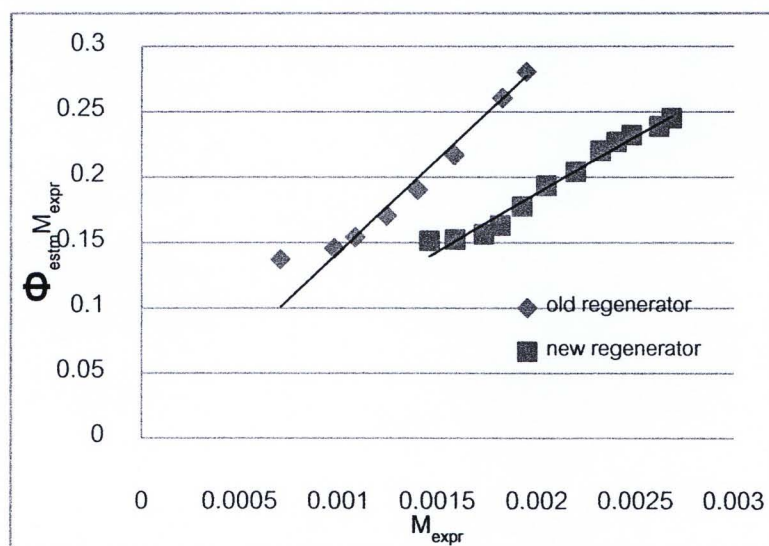
รูปที่ 4-4 กำลังขาออกที่ลักษณะจำเพาะของ regenerator ที่เหมาะสมที่สุด

ผลการประเมินค่า β และ $\Delta S/N$ ratio ข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ขนาดตาข่ายและปริมาตรตายมีค่าเพิ่มขึ้นค่า β จะเพิ่มขึ้น แต่ค่า β จะลดลงเมื่อค่าความพรุนเพิ่มขึ้น และค่า $\Delta S/N$ ratio แสดงให้เห็นว่าตัวแปรที่มีผลต่อกำลังขาออกมากที่สุดเรียงลำดับจากมากที่สุดไปอย่างน้อยที่สุดคือ ขนาดตาข่าย, ปริมาตรตายและค่าความพรุน ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้ เห็นว่าการเพิ่มขนาดตาข่าย, ปริมาตรตาย และการลดความพรุนลงจากที่ใช้ในการเลือกลักษณะจำเพาะของ regenerator ให้เหมาะสมที่สุดน่าจะทำให้ค่ากำลังขาออกเพิ่มขึ้น แต่ค่า $\Delta S/N$ ratio แสดงให้เห็นว่าขนาดตาข่ายมีผลต่อกำลังขาออกมากที่สุด เมื่อเทียบกับการเพิ่มปริมาตรตายและลดค่าความพรุน ดังนั้นจึงทดสอบสมรรถนะเพิ่มเติมโดยการเพิ่มขนาดตาข่ายจากขนาด 120 เป็นขนาด 150 เพื่อวัดกำลังขาออกว่า มีค่ามากกว่าที่ได้จากผลการเลือก regenerator ที่เหมาะสมที่สุดหรือไม่ ในส่วนของค่าปริมาตรและค่าความพรุนใช้ที่ลักษณะจำเพาะเดียวกันกับที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์เมื่อลักษณะจำเพาะของ regenerator ที่เหมาะสมที่สุด ผลการทดสอบพบว่ากำลังขาออกสูงสุด wire mesh ขนาด 150, ปริมาตรตายของ regenerator ขนาด 55 cm³ และ ค่าความพรุน 0.75 มีค่า 40 W ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่ากำลังขาออกสูงสุดที่ได้จากลักษณะจำเพาะของ regenerator ที่

เหมาะสมที่สุดถึง 220% แสดงให้เห็นว่าผลการเลือกลักษณะจำเพาะของ regenerator ที่ได้จากการเลือกลักษณะจำเพาะของ regenerator ให้เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการของ Taguchi เป็นลักษณะจำเพาะที่เหมาะสมที่สุดแล้ว

การเลือกลักษณะจำเพาะของ regenerator ให้เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการของ Taguchi ข้างต้นแสดงให้เห็นถึง ระดับที่เหมาะสมในแต่ละลักษณะจำเพาะ และตัวแปรที่มีผลต่อกำลังขาออกมากที่สุด แต่วิธีการดังกล่าวไม่สามารถบอกได้ถึงสาเหตุของการเพิ่มขึ้นของสมรรถนะเครื่องยนต์ จากที่กล่าวมาข้างต้นทำให้เล็งเห็นถึงการนำค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติในอุดมคติที่ได้จากการประเมิน ($\zeta_{o,estm}$) และ ค่าการสูญเสียของค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติที่ได้จากการประเมิน ($\Phi_{estm} M_{expr}$) มาใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังเลือกลักษณะจำเพาะของ regenerator ให้เหมาะสมที่สุด เพื่อหาสาเหตุของสมรรถนะที่เพิ่มขึ้นของเครื่องยนต์

ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติในอุดมคติที่ได้จากการประเมิน ($\zeta_{o,estm}$) ก่อนและหลังเลือกลักษณะจำเพาะของ regenerator ให้เหมาะสมที่สุดพบว่า ค่า $\zeta_{o,estm}$ ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงก่อนและหลังการเลือกลักษณะจำเพาะของ regenerator ให้เหมาะสมที่สุดมีค่า 0.333 และ 0.326 ซึ่งมีค่าค่อนข้างคงที่ สำหรับผลการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียของค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติที่ได้จากการประเมิน ($\Phi_{estm} M_{expr}$) เทียบกับ Mach number ที่ค่ากำลังบ่งชี้สูงที่สุดที่ได้จากผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ ($M_{max,expr}$) ก่อนและหลังเลือก regenerator ให้เหมาะสมที่สุด แสดงดังรูปที่ 4-5



รูปที่ 4-5 ผลการเปรียบเทียบค่า $\Phi_{estm} M_{expr}$ เทียบกับ $M_{max,expr}$ ก่อนและหลังเลือก regenerator ให้เหมาะสมที่สุด

จากรูปแสดงให้เห็นว่าค่าความชื้นของ $\Phi_{estm} M_{expr}$ เทียบกับ $M_{max,expr}$ ของเครื่องยนต์หลังเลือกลักษณะจำเพาะของ regenerator ให้เหมาะสมที่สุดมีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่ากำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์เมื่อเลือก regenerator ให้เหมาะสมที่สุดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าคงที่การสูญเสียภายในวัฏจักรการทำงานมีค่าลดลง 34%

4.2 การเปลี่ยนแหวนลูกสูบกำลัง

แหวนลูกสูบเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยป้องกันการรั่วของสารทำงานผ่านช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ ซึ่งแหวนลูกสูบของเครื่องยนต์สันดาปภายในยังทำหน้าที่เป็นตัวกวาดน้ำมันเครื่องเพื่อช่วยลดอุณหภูมิภายในห้องเครื่องยนต์ เนื่องจากการเสียดสีของผนังกระบอกสูบและลูกสูบอีกด้วย วัสดุที่ใช้ทำแหวนลูกสูบของเครื่องยนต์สันดาปภายในโดยส่วนใหญ่จะเป็น cast iron และ steel เนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีอัตราการสึกหรอต่ำ ทำให้มีระยะเวลาการใช้งานที่ยาวนาน แต่วัสดุดังกล่าวมีแรงเสียดทานสูง ดังนั้นการใช้งานจำเป็นต้องใช้สารหล่อลื่นเพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์ที่ไม่มีระบบหล่อลื่นของเครื่องยนต์ ทำให้การใช้ cast iron และ steel ในการผลิตแหวนลูกสูบเป็นสิ่งที่ไม่เหมาะสม ในอดีตแหวนลูกสูบสำหรับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงใช้วัสดุที่หลากหลายในการผลิต เช่น graphite, Teflon, molybdenum sulphide และอื่นๆ เพื่อหาวัสดุที่มีแรงเสียดทานต่ำและมีการสึกหรอต่ำ จนกระทั่งในปี 1962 ได้มีการนำเสนอสถูภัณฑ์หนึ่งเรียกว่า Rulon ซึ่งเป็นวัสดุที่สร้างขึ้นจาก Teflon ผสมกับ glass fibre ซึ่งผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุพบว่า Rulon มีการสึกหรอที่ต่ำกว่า Teflon แต่มีคุณสมบัติด้านแรงเสียดทานใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงนำวัสดุดังกล่าวมาใช้เป็นวัสดุในการทำแหวนลูกสูบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแทนวัสดุอื่นๆ

ผลการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านแรงเสียดทานและการสึกหรอของ Teflon กับ Rulon LD ซึ่งเป็น Rulon ชนิดหนึ่งของบริษัทผู้ผลิต Dixon Corporation, USA และ Beldam Crossley Ltd, England โดยการทดสอบค่า dynamic coefficient of friction และ PV factor ผลการทดสอบวัสดุทั้ง 2 ชนิดแสดงดังตารางที่ 4.6 เมื่อ PV factor คือ อัตราการสึกหรอของผิวที่เคลื่อนที่แบบสัมผัสกัน ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีแรงกดให้หน้าสัมผัสกันมากขึ้นและความเร็วสัมผัสของพื้นผิวทั้ง 2 เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4-6 ผลการทดสอบแรงเสียดทานและการสึกหรอของ virgin PTFE และ Rulon LD ซึ่งทดสอบบน steel [13]

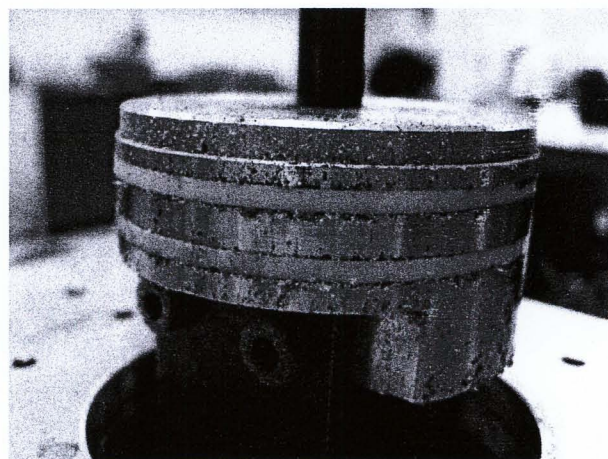
Material	Dynamic coefficient of friction	PV values ^a for continuous dry running
Teflon	0.09-0.21	<1,000
Rulon LD	0.12-0.19	15,000-20,000

^aเมื่อเกิดการสึกหรอของวัสดุไป 0.13 mm ภายในเวลา 1000 ชั่วโมง

จากตารางข้างต้นแสดงให้เห็นว่าค่า Dynamic coefficient of friction ของ Rulon LD มีค่าใกล้เคียงกันกับ Teflon แสดงให้เห็นว่า Rulon LD ยังคงสามารถรักษาคุณสมบัติทางด้านแรงเสียดทานให้เหมือนกับ Teflon ซึ่งถือว่ามีแรงเสียดทานต่ำได้อยู่ สำหรับทางด้านการสึกหรอพบว่าค่า PV ของ Rulon LD มีค่ามากกว่าค่า PV Teflon ถึง 15 -20 เท่า แสดงให้เห็นว่า Rulon LD มีอัตราการสึกหรอน้อยกว่า Teflon มาก

4.2.1 การเปลี่ยนวัสดุของแหวนลูกสูบกำลังของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีอยู่

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลางที่มีอยู่ใช้แหวนลูกสูบกำลังที่ทำจาก Teflon เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีแรงเสียดทานต่ำ และสามารถหาได้ง่ายตามท้องตลาด แต่จากการทดสอบสมรรถนะพบว่า กำลังขาออกสูงสุดของเครื่องยนต์จะมีค่าลดลงทุกๆครั้งที่ทำการทดสอบโดยใช้เงื่อนไขในการทดสอบเดียวกัน ซึ่งมีระยะเวลาในการใช้งานเฉลี่ย 10 ชั่วโมง แหวนลูกสูบกำลังที่ใช้งานไป 10 ชั่วโมงแสดงดังรูปที่ 4-6



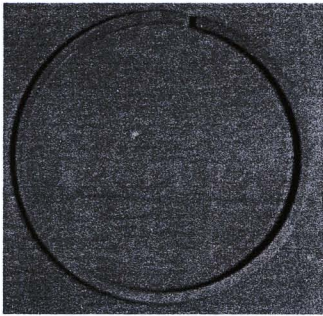
รูปที่ 4-6 ภาพแหวนลูกสูบกำลังที่ใช้งานไป 10 ชั่วโมง (Teflon)

จากรูปแสดงให้เห็นว่า แหวนลูกสูบกำลังมีการสึกหรอของเกิดขึ้นเนื่องจาก Teflon ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ผลิตแหวนลูกสูบกำลังติดอยู่ตามลูกสูบกำลังและกลไกการขับเคลื่อนของเครื่องยนต์ ดังนั้นเพื่อลดการสึกหรอดังกล่าวจึงเปลี่ยนวัสดุของแหวนลูกสูบกำลังจาก Teflon ไปเป็น Rulon ชนิดของ Rulon ที่เหมาะสมในการผลิตแหวนลูกสูบกำลังจะมีด้วยกัน 2 ชนิด คือ Rulon AR และ Rulon LR ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติ Rulon ทั้ง 2 ชนิด พบว่าคุณสมบัติ Rulon ทั้ง 2 ชนิดมีความใกล้เคียงกัน แต่ Rulon AR จะสามารถป้องกันการรั่วได้ดีกว่า ในขณะที่ Rulon LR มีการสึกหรอต่ำกว่า [29] ดังนั้นการผลิตแหวนลูกสูบกำลังจะเลือกใช้ Rulon LR เนื่องจากเป็นวัสดุที่สามารถหาได้ และยังสามารถตอบสนองต่อความต้องการดังกล่าวข้างต้น ซึ่งคุณสมบัติของ Rulon LR แสดงไว้ดังตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 คุณสมบัติของ Rulon LR

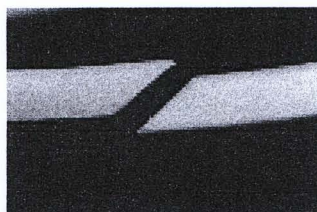
Property	Rulon LR
Density (lb/in ³), (g/cm ³)	0.082, 2.27
Tensile Strength (psi)	1,500
Tensile Elongation at Yield (%)	150
Thermal Conductivity(BTU-in/ft ² -hr-°F) (x 10 ⁻⁴ cal/cm-sec-°C)	2.30, 7.92
dynamic coefficient of friction	0.15-0.25
Maximum PV Rating (psi x ft/min)	10,000
Minimum Operating Temp (°F / °C)	450 / 240

จากตารางแสดงให้เห็นว่า Rulon LR มีค่า PV มากกว่า Teflon 10 เท่า แสดงให้ว่า Rulon LR ควรให้อัตราการสึกหรอน้อยกว่า และมีค่า dynamic coefficient of friction ใกล้เคียงกับ Teflon ทำให้ Rulon LR เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทำแหวนลูกสูบกำลัง แหวนลูกสูบกำลังที่ผลิตจากวัสดุ Rulon LR แสดงดังรูปที่ 4-7



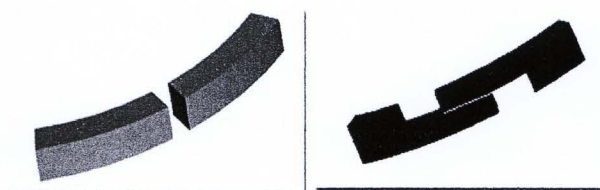
รูปที่ 4-7 แหวนลูกสูบกำลังที่ทำจาก LR

การเปลี่ยนวัสดุดังกล่าวข้างต้นจะทำให้สามารถลดอัตราการสึกหรอของแหวนลูกสูบกำลังได้ในระดับหนึ่ง นอกจากนี้เพื่อปรับปรุงแหวนลูกสูบให้สามารถป้องกันการรั่วของก๊าซทำงานได้ดีขึ้นจะทำการเปลี่ยนรูปแบบของรอยตัดเดิมแสดงดังรูปที่ 4-8 ไปเป็นรูปแบบที่สามารถลดการรั่วของก๊าซทำงานได้ดีขึ้น โดยจะทำการศึกษารูปแบบรอยตัดของแหวนลูกสูบที่เหมาะสมต่อไป



รูปที่ 4-8 รูปแบบรอยตัดของแหวนลูกสูบเดิม

การออกแบบรอยตัดแหวนเพื่อลดการรั่วของก๊าซทำงานโดยเปลี่ยนรูปแบบรอยตัดของแหวนลูกสูบจากการตัดแบบ Butt cut แสดงดังรูปที่ 4-9 ก. มาเป็นแบบ step cut แสดงดังรูปที่ 4-8 ข. ซึ่งมีประสิทธิภาพในการป้องกันการรั่วได้ดีกว่าแบบ Butt cut ถึงแม้ว่าจะมีวิธีการตัดแบบอื่นที่สามารถป้องกันการรั่วได้ดีกว่านี้เช่น แบบ Quad cut แสดงดังรูปที่ 4-9 ค.[29] แต่ถ้ามองในแง่ของการผลิตนั้นจะพบว่าแบบ step cut จะผลิตได้ง่ายกว่า ดังนั้นจึงเลือกใช้รอยตัดแบบ step cut ในการทำรอยตัดแหวนลูกสูบกำลัง ซึ่งภาพรอยตัดแหวนลูกสูบกำลังที่ผลิตจาก Rulon LR แสดงดังรูปที่ 4-10



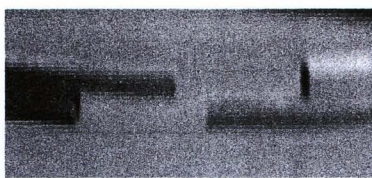
ก. Butt cut

ข. Step cut



ค. Quad cut

รูปที่ 4-9 รูปแบบรอยตัดแบบต่างๆ

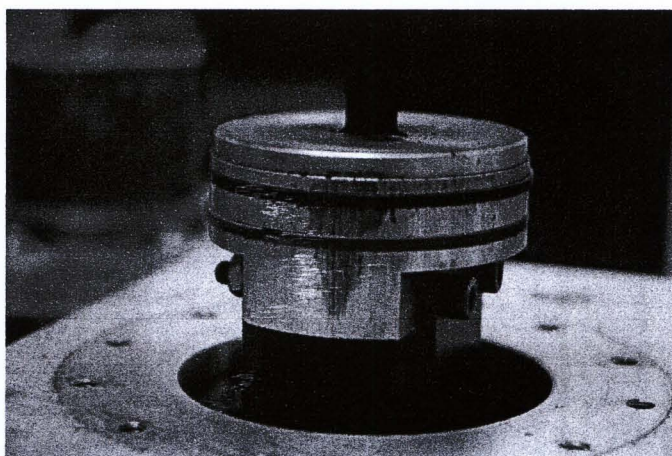


รูปที่ 4-10 รอยตัดของแหวนลูกสูบกำลังที่ผลิตจาก Rulon LR

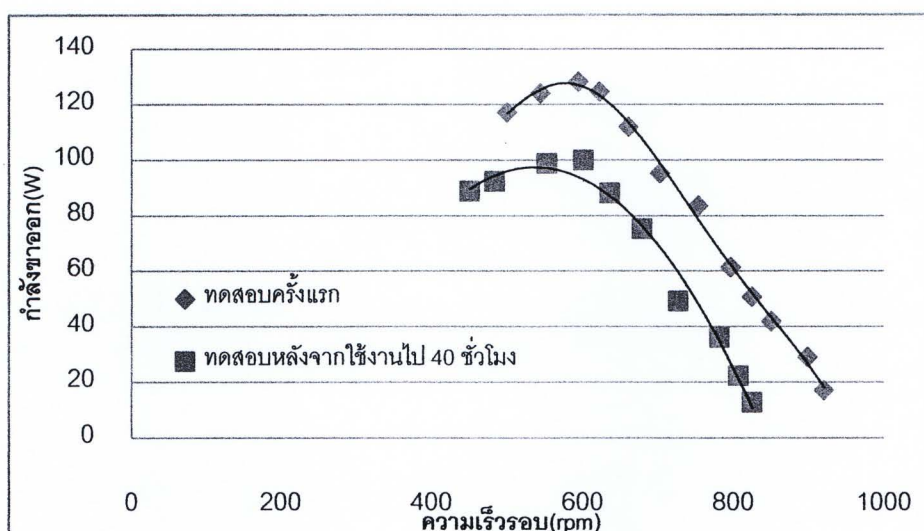
4.2.2 วิธีการทดสอบและผลการทดสอบ

แหวนลูกสูบกำลังที่ผลิตด้วยวัสดุ Rulon ข้างต้นจะถูกนำมาใช้ในการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ของอากาศ และ ฮีเลียม ซึ่งกินเวลานานกว่า 40 ชั่วโมง แล้วทำการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ของอากาศอีกครั้งหนึ่ง เพื่อเปรียบเทียบกำลังขาออกสูงสุดที่ได้ว่ามีค่าลดลงหรือไม่

ภาพของแหวนลูกสูบกำลังที่ผลิตจาก Teflon หลังจากใช้งานไป 40 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4-11 จากรูปแสดงให้เห็นว่า ลูกสูบกำลังและกลไกการขับเคลื่อนมีเศษแหวนลูกสูบที่ทำจาก Rulon LR น้อย แต่ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ดังรูปที่ 4-12 แสดงให้เห็นว่า กำลังขาออกสูงสุดของเครื่องยนต์มีค่าลดลงจาก 128 W เหลือเพียง 99 W คิดเป็น 28 % ของกำลังขาออกสูงสุดที่ได้เมื่อเริ่มใช้แหวนลูกสูบที่ทำจาก Rulon LR แสดงให้เห็นว่าแหวนลูกสูบมีระยะเวลาการใช้งานที่ยาวนานขึ้น แต่ยังไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ทำงานได้จริง



รูปที่ 4-11 ภาพของแหวนลูกสูบกำลังเมื่อใช้งานไป 40 ชั่วโมง



รูปที่ 4-12 ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์เมื่อใช้แหวนลูกสูบ

4.3 การเปลี่ยนสารทำงานจากอากาศเป็นอีเลียม

จากผลการทดสอบสมรรถนะหลักจากปรับปรุงเครื่องยนต์ แสดงให้เห็นว่า กำลังขาออกของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น 35 % การเพิ่มสมรรถนะของเครื่องยนต์ให้สูงขึ้นสามารถทำได้ โดยการเปลี่ยนชนิดสารทำงานจากอากาศไปเป็นอีเลียมหรือไฮโดรเจน

การหาสาเหตุของสมรรถนะเครื่องยนต์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปลี่ยนสารทำงานจากอากาศไปเป็นอีเลียมหรือไฮโดรเจนสามารถทำได้ โดยการพิจารณาค่า Stanton number (St) ที่ average Reynold number และ average Reynold number (Re) ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งได้จากการวิเคราะห์แบบ simple [24] ดังตารางที่ 4-8 แสดงให้เห็นว่าอีเลียมและไฮโดรเจนมีค่า Stanton number สูงกว่าอากาศ ซึ่งมีผลทำให้อีเลียมและไฮโดรเจนสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าอากาศเมื่อเทียบกับค่าความจุความร้อนของในแต่ละสารทำงาน นอกจากนี้ไฮโดรเจนและอีเลียมยังมีค่า Reynold number น้อยกว่าอากาศ ซึ่งมีผลทำให้การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานการไหลลดลง [17]

ตารางที่ 4-8 ค่า Stanton number และค่า Average Reynold number

ชนิดของสารทำงาน	Stanton number (600-1800 rpm)	Average Reynold number (600-1800 rpm)
อากาศ	0.094-0.064	108.3-325.5
ไฮโดรเจน	0.215-0.139	15.7-47.2
อีเลียม	0.225-0.145	14-42.1

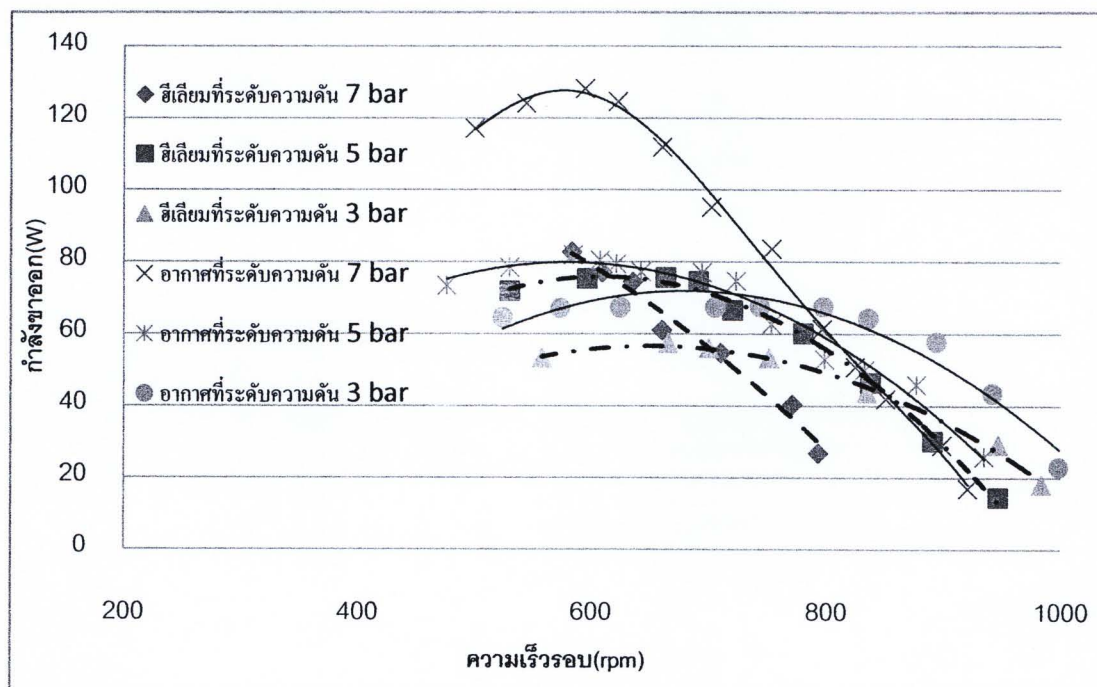
จากที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่า การใช้ไฮโดรเจนและฮีเลียมเป็นสารทำงานควรให้สมรรถนะเครื่องยนต์ที่มากกว่าอากาศ แต่การใช้ไฮโดรเจนเป็นสารทำงานจำเป็นต้องมีระบบตรวจจับความหนาแน่นของก๊าซ และระบบระบายอากาศที่ดี เนื่องจากไฮโดรเจนเป็นก๊าซที่สามารถติดไฟได้, เปลวไฟไม่มีสีและไม่มิกกลิ่น ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยในการศึกษาจะใช้ฮีเลียมทดสอบแทน เนื่องจากเป็นก๊าซเฉื่อยและให้สมรรถนะใกล้เคียงกับไฮโดรเจนมากที่สุด

4.3.1 เงื่อนไขในการทดสอบ

การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์หลังจากเปลี่ยนสารทำงานจากอากาศเป็นฮีเลียมจะทดสอบที่อุณหภูมิผิวขดลวดความร้อน $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ และระดับความดันของเครื่องยนต์ 3, 5 และ 7 bar ตามลำดับ

4.3.2 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีอยู่เมื่อเปลี่ยนสารทำงานจากอากาศเป็นฮีเลียมแสดงดังรูปที่ 4-13 จากรูปแสดงให้เห็นว่า กำลังขาออกสูงสุดที่ความดัน 7 bar มีค่า 82 W ที่ความเร็วรอบ 583 rpm กำลังขาออกสูงสุดที่ความดัน 5 bar มีค่า 75 W ที่ความเร็วรอบ 596 rpm และกำลังขาออกสูงสุดที่ความดัน 3 bar มีค่า 57 W ที่ความเร็วรอบ 665 rpm



รูปที่ 4-13 ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์

ผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่า กำลังขาออกมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกำลังขาออกเมื่อใช้อากาศเป็นสารทำงาน ซึ่งขัดแย้งกับงานวิจัยต่างๆ [1,15,16 และ 26] ที่สมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้ฮีเลียมเป็นสารทำงานจะมีค่ามากกว่าอากาศ การหาสาเหตุที่ทำให้สมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้ฮีเลียมเป็นสารทำงานมีค่าน้อยกว่าการใช้อากาศเป็นสารทำงานได้ตั้งข้อสังเกตจากผลงานวิจัยของ Eldesouki.E [26] ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความเร็วรอบที่กำลังขาออกสูงสุดเมื่อใช้ฮีเลียมเป็นสารทำงานจะมากกว่าความเร็วรอบเมื่อใช้อากาศเป็นสารทำงานประมาณ 3 เท่า เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของสมรรถนะที่ความเร็วต่างกันเมื่อใช้อากาศและฮีเลียมเป็นสารทำงาน การศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองแบบ simple ซึ่งเป็นการคำนวณหา กำลังบ่งชี้ด้วยวิธี adiabatic แล้วนำกำลังสูญเสียเนื่องจากความดันตกคร่อมและความไม่สมบูรณ์แบบในการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมาคำนวณกำลังบ่งชี้ด้วย การคำนวณกำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์เมื่อใช้อากาศและฮีเลียมจะคำนวณที่ความเร็วรอบ 2 ความเร็วรอบด้วยกัน คือ ความเร็วรอบ 600 rpm ซึ่งเป็นความเร็วรอบที่เครื่องยนต์ที่มีอยู่ให้กำลังขาออกสูงสุดเมื่อใช้อากาศเป็นสารทำงาน และ ที่ความเร็วรอบสูงขึ้น 3 เท่าคือ ความเร็วรอบ 1800 rpm ผลการคำนวณค่ากำลังบ่งชี้ด้วยวิธี simple ที่เงื่อนไขเดียวกันกับการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ (ดูผลการคำนวณทั้งหมดได้จาก ภาคผนวก ข.) พบว่าที่ความเร็วรอบ 600 rpm กำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์เมื่อใช้อากาศและฮีเลียมเป็นสารทำงานมีค่า 340 และ 322 W ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่ากำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์เมื่อใช้อากาศเป็นสารทำงานมีค่ามากกว่าค่ากำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์เมื่อใช้ฮีเลียมเป็นสารทำงาน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบที่ได้ แต่ที่ความเร็วรอบ 1800 rpm กำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์เมื่อใช้อากาศและฮีเลียมเป็นสารทำงานมีค่า 665 และ 813 W ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ากำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์เมื่อใช้อากาศเป็นสารทำงานมีค่าน้อยกว่ากำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์เมื่อใช้ฮีเลียมเป็นสารทำงาน เนื่องจากที่ความเร็วรอบสูงการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานการไหลของอากาศมีค่ามากกว่าฮีเลียมถึง 3 เท่า ในขณะที่กำลังบ่งชี้ซึ่งได้จากการคำนวณด้วยการวิเคราะห์แบบ simple ก่อนหักลบการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานการไหลมีค่าใกล้เคียงกัน จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นทำให้สมรรถนะเครื่องยนต์เมื่อใช้ฮีเลียมเป็นสารทำงานจะดีกว่าอากาศที่ความเร็วรอบสูง ในขณะที่ความเร็วรอบต่ำอากาศจะให้สมรรถนะเครื่องยนต์ที่ดีกว่าฮีเลียม

ผลการวิเคราะห์ข้างต้นสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Koichi harita [1] ที่ทำการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์โดยใช้สารทำงาน 2 ชนิดคือ ฮีเลียมและไนโตรเจน ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์พบว่า กำลังบ่งชี้และกำลังขาออกของเครื่องยนต์เมื่อใช้ฮีเลียมเป็นสารทำงานจะเริ่มมีค่ามากกว่ากำลังบ่งชี้และกำลังขาออกของเครื่องยนต์เมื่อใช้ไนโตรเจนเป็นสารทำงานที่ความเร็ว

รอบมากกว่า 1200 rpm แต่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีอยู่มีความรอบเร็วสูงสุดอยู่ที่ 1000 rpm ทำให้ไม่เหมาะสมต่อการใช้อีเลียมเป็นสารทำงาน