

บทที่ 3

การประเมินการสูญเสียหลักและเปรียบเทียบการสูญเสียของเครื่องยนต์ผลต่าง อุณหภูมิแตกต่างกัน

การประเมินการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเพื่อระบุการสูญเสียหลักของเครื่องยนต์ จะต้องทำการวัดสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีอยู่ก่อน เพื่อประเมินระดับความสามารถของเครื่องยนต์ จากนั้นจะกล่าวถึงการเลือกแนวทางในการประเมินการสูญเสียและข้อจำกัดในการประเมินของแต่ละแนวทาง เพื่อเลือกวิธีการประเมินที่เหมาะสม ผลการประเมินที่ได้จะนำไปใช้ในการระบุการสูญเสียหลักของเครื่องยนต์ เพื่อหาแนวทางการปรับปรุงเครื่องยนต์ต่อไป นอกจากนี้งานวิจัยของ Iwamoto, S. [10] แสดงให้เห็นว่า กลไกการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิสูงและต่ำมีความแตกต่างกัน ดังนั้นผลการประเมินการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลางที่มีอยู่ จะถูกนำมาใช้ในการเปรียบเทียบการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิสูงและต่ำที่ได้จากงานวิจัยของ Iwamoto, S. ว่ามีความเหมือนกันหรือแตกต่างกันอย่างไร เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องยนต์ในแต่ละระดับผลต่างอุณหภูมิต่อไป

3.1 การประเมินระดับความสามารถของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

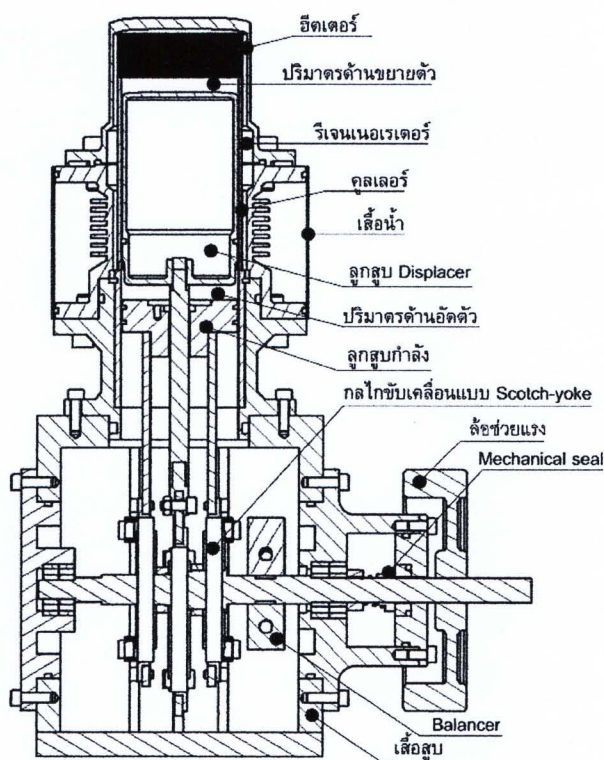
การศึกษาการกลไกการสูญเสียของเครื่องยนต์จำเป็นต้องประเมินระดับความสามารถในการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลางก่อนว่าเพียงพอต่อการศึกษการสูญเสียหรือไม่ จากนั้นผู้วิจัยจะศึกษาแนวทางการประเมินการสูญเสียที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์ต่อไป

3.1.1 ข้อมูลจำเพาะเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

ชนะ ศรีคำ [14] ได้ออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงพิกัด 100 W (SEB-100) เพื่อนำมาใช้ร่วมกับระบบ concentrated solar power (CSP) แบบรางพาราโบลาขนาดเล็ก ระบบดังกล่าวสามารถทำความร้อนได้ในช่วง 300-500 °C ดังนั้น ชนะ ศรีคำ จึงออกแบบเครื่องยนต์ให้ทำงานที่ระดับอุณหภูมิ 400 °C เครื่องยนต์มีข้อมูลจำเพาะดังตารางที่ 3-1 และภาพตัดขวางของเครื่องยนต์ดังรูปที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์(SEB-100)

ปริมาตรกวาดด้านขยายตัว	165 cc	รูปแบบฮีตเตอร์	Slot/ ขดลวดไฟฟ้า
มุมต่างปริมาตร	120	ปริมาตรตายคูลเลอร์	16.5 cc
ความเร็วรอบเครื่องยนต์	630 rpm	รูปแบบคูลเลอร์	Slot/ น้ำหล่อเย็น
เส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบ × ระยะชัก	74 × 37 mm	ปริมาตรตายรีเจนเนอเรเตอร์	47 cc
ปริมาตรด้านอัดตัว : ปริมาตรด้านขยายตัว	1:1	ความพรุนของรีเจนเนอเรเตอร์	75%
อัตราส่วนการอัด	1.61	รูปแบบเครื่องยนต์	เบตา
ปริมาตรตายฮีตเตอร์	20 cc		

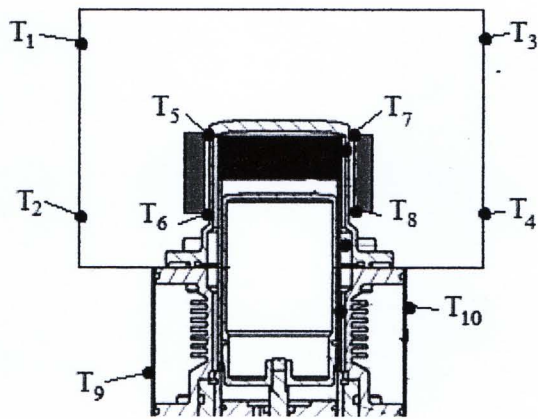


รูปที่ 3-1 ภาพตัดขวางของเครื่องยนต์ [14]

3.1.2 วิธีการและผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลางขนาดพิกัด 100 W กระทำโดยใช้ขดลวดความร้อนเป็นแหล่งให้พลังงานความร้อนแก่เครื่องยนต์แทนการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อความสะดวกและแม่นยำในการทดสอบ การวัดอุณหภูมิใช้การติดตั้ง

thermo couple ไว้ในตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 3-2 นอกจากนี้กำลังขาออกคำนวณจากค่าแรงบิดที่วัดได้จากการให้ภาระแก่เครื่องยนต์ด้วยแผ่นเบรคแบบจาน โดยมีเงื่อนไขในการทดสอบดังตารางที่ 3-2

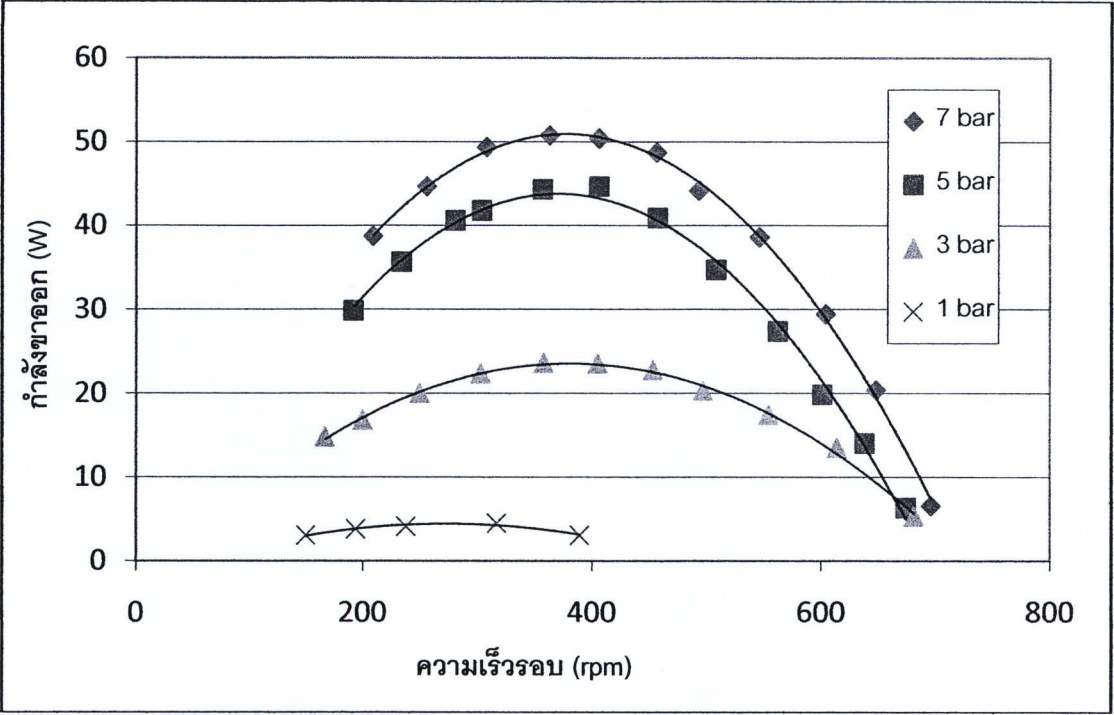


รูปที่ 3-2 ตำแหน่งการติดตั้ง thermo couple [13]

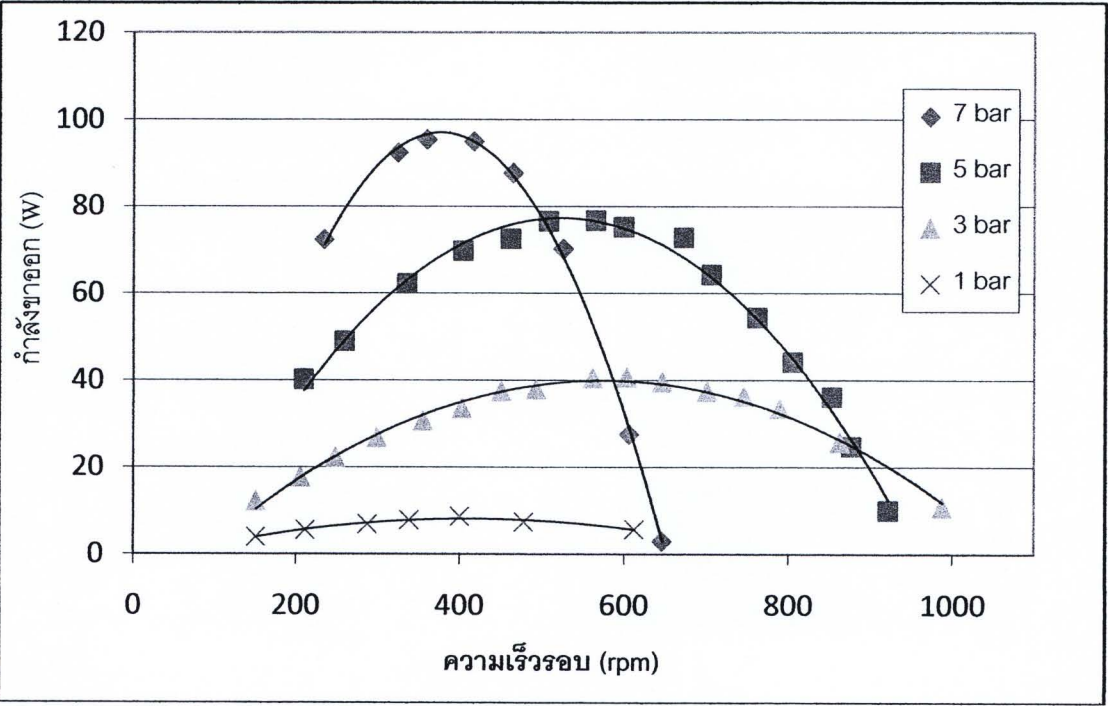
ตารางที่ 3-2 เงื่อนไขในการทดสอบ

อุณหภูมิผิวของดลวดความร้อน(°C)	350,400,450,500
ระดับความดันของเครื่องยนต์(bar)	1,3,5,7
อุณหภูมิขาออกน้ำหล่อเย็น(°C)	33.6

ผลการวัดสมรรถนะเครื่องยนต์ ดังรูปที่ 3-3 และ 3-4 แสดงให้เห็นว่า ที่ระดับความดัน 7 bar และอุณหภูมิผิวของดลวดความร้อน 400 °C เครื่องยนต์ให้กำลังขาออกสูงสุด 50.74 W ที่ความเร็วรอบ 363 rpm สำหรับที่ระดับความดัน 7 bar และอุณหภูมิผิวของดลวดความร้อน 500 °C เครื่องยนต์ให้กำลังขาออกสูงสุด 95 W ที่ความเร็วรอบ 360 rpm ผลการวัดสมรรถนะเครื่องยนต์ข้างต้นแสดงให้เห็นว่า เครื่องยนต์ที่ ชนะ ศรีคำ สร้างขึ้นสามารถทำงานได้ แต่กำลังขาออกสูงสุดที่ได้จากการทดสอบที่อุณหภูมิ 400 °C ต่ำกว่าพิกัดที่ออกแบบไว้ ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการสูญเสียต่างๆของเครื่องยนต์ ดังนั้น การประเมินกลไกการสูญเสียที่เกิดขึ้นของเครื่องยนต์จึงเป็นสิ่งจำเป็นในการประเมินการสูญเสียหลักที่เกิดขึ้นของเครื่องยนต์ เพื่อที่จะนำผลการประเมินที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุง เพื่อเพิ่มสมรรถนะเครื่องยนต์ต่อไป



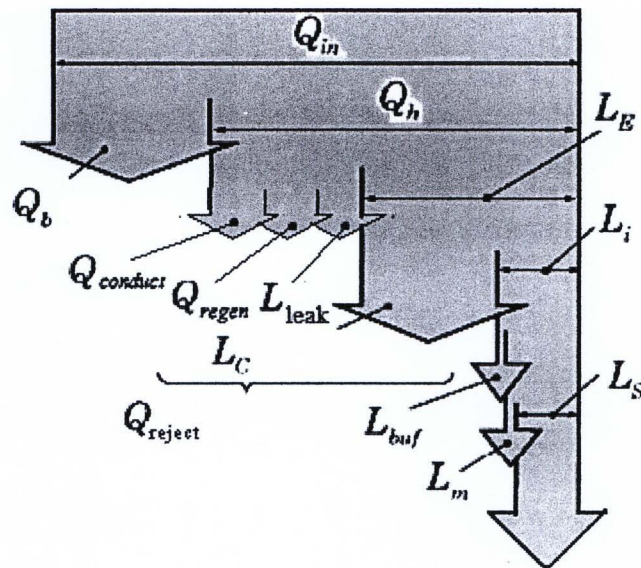
รูปที่ 3-3 กำลังขาออกเทียบกับความเร็วรอบที่อุณหภูมิผิวของขดลวดความร้อนคงที่ 400 °C ที่ระดับความดันต่างๆ



รูปที่ 3-4 กำลังขาออกเทียบกับความเร็วรอบที่อุณหภูมิผิวของขดลวดความร้อนคงที่ 500 °C ที่ระดับความดันต่างๆ

3.2 การเลือกแนวทางการประเมินการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลาง

การศึกษากลไกการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงในบทที่ 2 แสดงให้เห็นถึงวิธีการประเมินการสูญเสียในแต่ละส่วนและภาพรวมของกลไกการสูญเสียของเครื่องยนต์ ซึ่งสามารถแสดงเป็นแผนภาพ sankey ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้ดังรูปที่ 3-5



รูปที่ 3-5 แผนภาพ sankey ของเครื่องยนต์

จากการวิเคราะห์แผนภาพ sankey ของเครื่องยนต์ข้างต้น ทำให้ได้แนวทางการประเมินกลไกการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงในงานวิจัยนี้ 4 แนวทาง แนวทางที่ 1 คือ การประเมินกลไกการสูญเสียโดยใช้ค่ากำลังบ่งชี้ที่ได้จากการวัด [1,12,13,15-18] ซึ่งเป็นแนวทางที่สมบูรณ์ที่สุดในการประเมินกลไกการสูญเสียของเครื่องยนต์ เนื่องจาก ค่ากำลังและการสูญเสียต่างๆของเครื่องยนต์ที่นำมาใช้ในการประเมินการสูญเสียเป็นค่าที่มาจาก การวัดเกือบทั้งหมด ยกเว้น ค่าการสูญเสียอื่นๆ (Q_{other}) ,การสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ (Q_b) และความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์จริง (Q_h) ดังนั้นแนวทางดังกล่าวจึงทำให้แผนภาพ sankey ของเครื่องยนต์มีความสมบูรณ์และถูกต้องมากที่สุด แนวทางที่ 2 เป็นการประเมินกลไกการสูญเสียจากการประเมินค่ากำลังบ่งชี้โดยใช้การวิเคราะห์แบบ adiabatic ที่มีการสูญเสียจากแรงเสียดทานการไหลร่วมด้วย [19,20] แนวทางที่ 3 เป็นการประเมินการสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ (Q_b) จากการวัดโดยตรงหรือใช้โปรแกรม finite element จากนั้นนำมาใช้ในการประเมินค่ากำลังบ่งชี้ ในขณะที่แนวทางที่ 4 เป็นการประเมินกลไกการสูญเสียแบบย้อนกลับเพื่อนำไปหาการสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์

(Q_b) [1,7,10] สำหรับแนวทางที่ 2 ถึง 4 จะเป็นแนวทางการประเมินสูญเสียในกรณีที่ไม่สามารถวัดกำลังบ่งชี้เพื่อใช้ในการประเมินการสูญเสียได้ ซึ่งแนวทางดังกล่าวจะไม่สามารถประเมินค่าความร้อนผ่านผนังลงมาถึงน้ำหล่อเย็น ($Q_{conduct}$), การสูญเสียภายใน regenerator (Q_{regen}), การสูญเสียเนื่องจากการรั่วของก๊าซทำงานผ่านลูกสูบกำลัง (L_{leak}), expansion power (L_E), compression power (L_C) ได้ ก่อนการเลือกแนวทางที่ดีที่สุดได้อธิบายแนวทางการประเมินการสูญเสียในแต่ละแนวทางข้างต้น ดังนี้

แนวทางที่ 1 คือ การประเมินกลไกการสูญเสียโดยใช้ค่ากำลังบ่งชี้ที่ได้จากการวัด การประเมินการสูญเสียด้วยแนวทางนี้ใช้การวัดกำลังขาออก (L_s), การสูญเสียทางกล (L_m), การสูญเสียเนื่องจากความดันภายในปริมาตรห้องเครื่อง (L_{buf}), ความร้อนทิ้งออกจากเครื่องยนต์ (Q_{reject}), expansion power (L_E), compression power (L_C), กำลังบ่งชี้ (L_i) และความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์ (Q_{in}) เพื่อที่จะนำมาใช้คำนวณการสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ (Q_b), ความที่ให้แก่เครื่องยนต์จริง (Q_h) และการสูญเสียอื่นๆ (Q_{other}) ซึ่งเป็นผลรวมของการสูญเสียจากการนำความร้อนผ่านผนังลงมาถึงน้ำหล่อเย็น ($Q_{conduct}$), การสูญเสียภายใน regenerator (Q_{regen}) และการสูญเสียเนื่องจากการรั่วของก๊าซทำงานผ่านลูกสูบกำลัง (L_{leak}) ค่ากำลังและสูญเสียที่ได้จากการวัดข้างต้นจะนำไปใส่ในแผนภาพ sankey ในรูปที่ 3-5 เพื่อนำไปประเมินความที่ให้แก่เครื่องยนต์จริง (Q_h) จากสมการ

$$Q_h = L_i + Q_{reject} \quad (3.1)$$

ค่าความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์จริง (Q_h) ที่ได้จะนำมาใช้คำนวณการสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ (Q_b) จากสมการ

$$Q_b = Q_{in} - Q_h \quad (3.2)$$

สำหรับการสูญเสียการสูญเสียอื่นๆ (Q_{other}) สามารถคำนวณได้จากสมการ

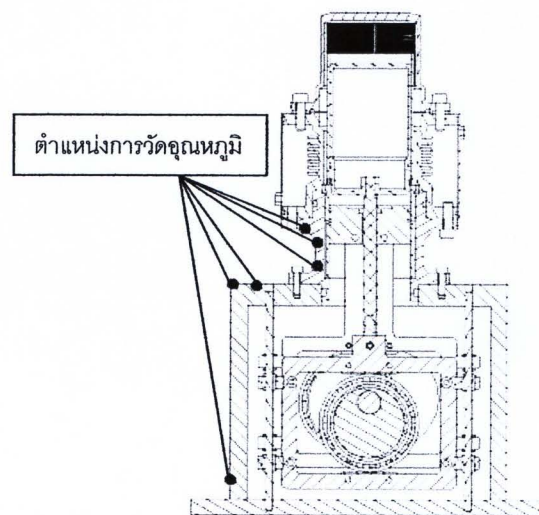
$$Q_{other} = Q_{reject} - L_C \quad (3.3)$$

แนวทางที่ 2 คือ การประเมินกลไกการสูญเสียจากการประเมินค่ากำลังบ่งชี้โดยใช้การวิเคราะห์แบบ adiabatic ที่มีการสูญเสียจากแรงเสียดทานการไหลร่วมด้วย การประเมินการสูญเสียด้วยแนวทางนี้จะมีการวัดกำลังขาออก (L_s), การสูญเสียทางกล (L_m), การสูญเสียเนื่องจากความดันภายในปริมาตรห้องเครื่อง (L_{buf}), ความร้อนทิ้งออกจากเครื่องยนต์ (Q_{reject}) และความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์ (Q_{in}) แต่ค่ากำลังบ่งชี้ (L_i) จะใช้การคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลข

โดยการวิเคราะห์แบบ adiabatic ซึ่งมีการประเมินการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานการไหลร่วมด้วย ค่ากำลังและสูญเสียที่ได้จากการประเมินและการวัดข้างต้นจะนำไปใส่ภายในแผนภาพ sankey ในรูปที่ 3-5 เพื่อนำไปประเมินการสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ (Q_b) จากสมการ

$$Q_b = Q_{in} - (L_i + Q_{reject}) \quad (3.4)$$

แนวทางที่ 3 คือ การประเมินการสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ (Q_b) จากการวัดโดยตรงหรือใช้โปรแกรม finite element จากนั้นนำมาใช้ในการประเมินค่ากำลังบ่งชี้ การประเมินการสูญเสียด้วยแนวทางนี้จะมีการวัดกำลังขาออก (L_s), การสูญเสียทางกล (L_m), การสูญเสียเนื่องจากความดันภายในปริมาตรห้องเครื่อง (L_{buf}), ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์ (Q_{reject}), การสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ (Q_b) และความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์ (Q_{in}) โดยที่การประเมินการสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ (Q_b) จะแยกการประเมินออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ การสูญเสียจากการนำความร้อนผ่านฉนวน ($Q_{insulate}$) และการสูญเสียจากการนำความร้อนผ่านโครงสร้างของเครื่องยนต์ ($Q_{engine\ structure}$) ค่ากำลังและสูญเสียที่ได้จากการวัดข้างต้นจะนำไปใส่ภายในแผนภาพ sankey ในรูปที่ 3-5 สำหรับการสูญเสียจากการนำความร้อนผ่านฉนวน ($Q_{insulate}$) สามารถประเมินได้จากการวัดอุณหภูมิผิวในและผิวนอกของฉนวนแล้วนำมาคำนวณหาการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านฉนวนหรือใช้โปรแกรม finite element ในการสร้างแบบจำลองขึ้นมาเพื่อประเมินการสูญเสียดังกล่าว สำหรับการสูญเสียจากการนำความร้อนผ่านโครงสร้างของเครื่องยนต์ ($Q_{engine\ structure}$) สามารถประเมินได้จากการวัดอุณหภูมิของผนังด้านนอกเครื่องยนต์แสดงดังรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-6 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ

จากนั้นนำอุณหภูมิที่ได้มาคำนวณหาการสูญเสียจากการนำความร้อนผ่านโครงสร้างของเครื่องยนต์ ($Q_{engine\ structure}$) จากสมการพาความร้อน ผลการประเมินการประเมินการสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ (Q_b) จะนำไปใส่ภายในแผนภาพ sankey เพื่อคำนวณค่ากำลังบ่งชี้จากสมการที่ 3.4

แนวทางที่ 4 การประเมินย้อนกลับเพื่อนำไปหาการสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ (Q_b) การประเมินการสูญเสียด้วยวิธีนี้เป็นการวัดกำลังขาออก (L_s), การสูญเสียทางกล (L_m), การสูญเสียเนื่องจากความดันภายในปริมาตรห้องเครื่อง (L_{buf}), ความร้อนที่ออกจากเครื่องยนต์ (Q_{reject}) และความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์ (Q_{in}) ค่ากำลังและสูญเสียที่ได้จากการประเมินและการวัดข้างต้นจะนำไปใส่ภายในแผนภาพ sankey ในรูปที่ 3-5 เพื่อนำไปประเมินค่ากำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์จากสมการ

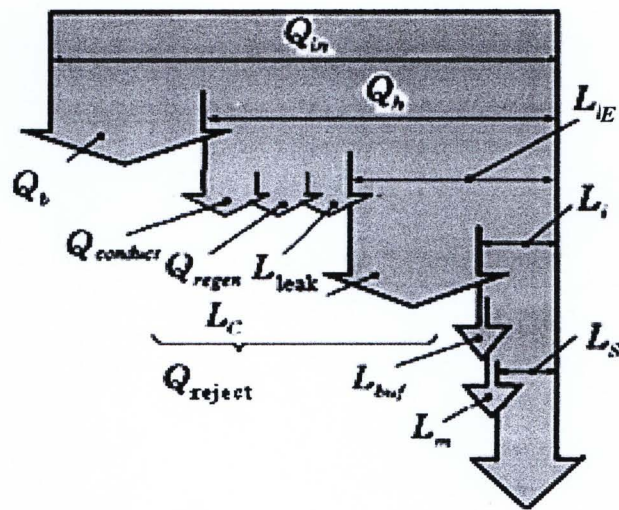
$$L_i = L_m + L_{buf} + L_s \quad (3.5)$$

ค่ากำลังบ่งชี้ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการข้างต้นจะนำมาใช้ประเมินค่าความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์จริง (Q_h) จากสมการที่ 3.1 ค่าความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์จริง (Q_h) ที่ได้จะนำมาใช้คำนวณการสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ (Q_b) จากสมการที่ 3.2

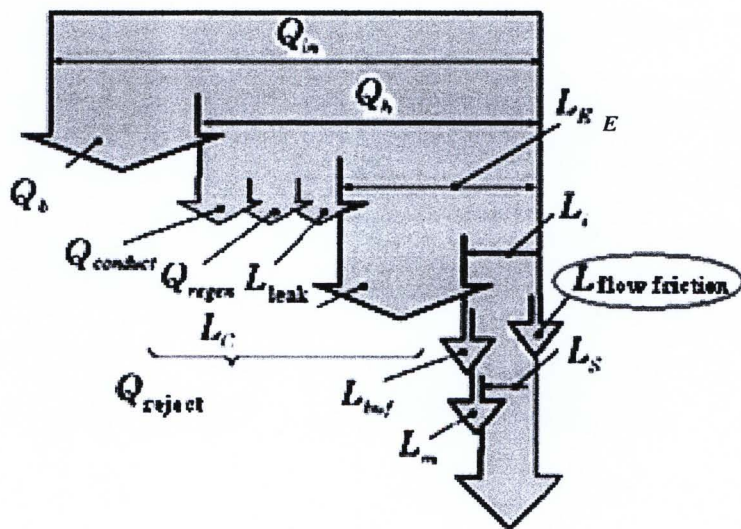
3.2.1 ข้อจำกัดในแต่ละแนวทางการประเมินการสูญเสีย

จากที่กล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่า แนวทางการประเมินการสูญเสียมี 4 แนวทาง แต่จากการศึกษาพบว่า แนวทางที่ 1, 2 และ 3 มีข้อจำกัดในการใช้ประเมินการสูญเสีย สำหรับแนวทางที่ 1 การประเมินกลไกการสูญเสียโดยใช้ค่ากำลังบ่งชี้ที่ได้จากการวัด มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถวัดค่ากำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบส่วนประกอบหลักในแนวทางการประเมินการสูญเสียนี้ได้ เนื่องจากโครงสร้างเครื่องยนต์ไม่เหมาะสมต่อการติดตั้ง pressure transducer ทำให้การประเมินกลไกการสูญเสียโดยใช้ค่ากำลังบ่งชี้ที่ได้จากการวัดไม่สามารถทำได้ ซึ่งวิธีการและขั้นตอนในการวัดค่ากำลังบ่งชี้สามารถดูได้จากภาคผนวก ค. สำหรับแนวทางที่ 2 การประเมินกลไกการสูญเสียจากการประเมินค่ากำลังบ่งชี้โดยใช้การวิเคราะห์แบบ adiabatic ที่มีการสูญเสียจากแรงเสียดทานการไหลร่วมด้วยมีข้อจำกัด คือ ค่ากำลังบ่งชี้ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ adiabatic เป็นการคำนวณ expansion power และ compression power แล้วนำมาหักลบกัน เพื่อคำนวณค่ากำลังบ่งชี้โดยไม่มีผลของการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานการไหล ซึ่งการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานการไหลจะถูกประเมินแยกจากการประเมินค่ากำลังบ่งชี้ข้างต้นแสดงดังรูปที่ 3-7 ก. แต่ในความเป็นจริงการวัดค่ากำลังบ่งชี้จะวัดจากการเปลี่ยนแปลงความดัน

และปริมาตรภายใน expansion space และ compression space ซึ่งมีผลของการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานการไหลเข้ามาเกี่ยวข้องอยู่แล้ว แสดงในรูปที่ 3-7 ข. จากรูปจะเห็นได้ว่าการประเมิน expansion power และ compression power ของการประเมินแบบ adiabatic และการวัดมีความแตกต่างกัน สำหรับการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ในงานวิจัยนี้ ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์ (Q_{reject}) ซึ่งมี compression power อยู่เป็นค่าที่ได้จากการวัด ดังนั้น compression power นี้เปรียบเสมือนเป็น compression power ที่ได้จากการวัด ถึงแม้ว่าจะไม่สามารถประเมินค่าได้ ดังนั้นการใช้การประเมินแบบ adiabatic ซึ่งมีการประเมินการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานการไหลร่วมด้วยจึงไม่สามารถทำได้



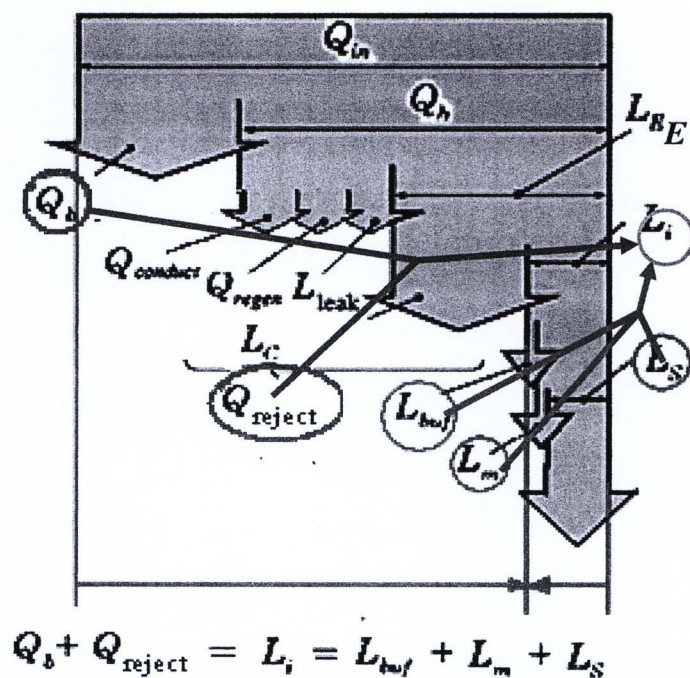
ก.



ข.

รูปที่ 3-7 การประเมินการสูญเสียด้วยแนวทางที่ 2

สำหรับแนวทางที่ 3 การประเมินการสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ (Q_b) จากการวัดโดยตรงหรือใช้โปรแกรม finite element เพื่อที่จะนำมาใช้ในการประเมินค่ากำลังบังชี้ (L_i) มีข้อจำกัด คือ ค่ากำลังบังชี้ที่ได้จากผลรวมของค่า Q_b และ Q_{reject} อาจมีค่าไม่เท่ากับค่ากำลังบังชี้ที่ได้จากผลรวมของค่า L_m, L_{buf} และ L_s แสดงรูปที่ 3-8 นอกจากนี้ การนำผลรวมของค่า Q_b และ Q_h รวมเข้าด้วยกัน ค่าที่ได้คือ ค่าความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์ (Q_{in}) ซึ่งค่าความร้อนจากขดลวดความร้อน ที่ได้จากผลรวมดังกล่าวข้างต้น อาจมีค่าไม่เท่ากับค่าความร้อนจากขดลวดความร้อน ที่ได้จากการวัด ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แนวทางการประเมินนี้ไม่สามารถทำให้ค่าการสูญเสียต่างๆภายในแผนภาพ sankey มีความสอดคล้องกันได้



รูปที่ 3-8 การประเมินการสูญเสียด้วยแนวทางที่ 3

จากข้อจำกัดของแนวทางการประเมินการสูญเสียทั้ง 3 แนวทางข้างต้น ทำให้ผู้วิจัยเลือกใช้แนวทางที่ 4 การประเมินย้อนกลับเพื่อนำไปหาการสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ (Q_b) ในการประเมินการสูญเสียของเครื่องยนต์ ซึ่งค่อนข้างมีความถูกต้องมากกว่าวิธีที่ 2 และ 3 เพราะการประเมินด้วยแนวทางที่ 4 เป็นการประเมินการสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ (Q_b) ด้วยการวัดความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์ (Q_{reject}), การสูญเสียทางกล (L_m), การสูญเสียเนื่องจากความดันภายในปริมาตรห้องเครื่อง (L_{buf}) และกำลังขาออก (L_s) ทำให้แนวทางการประเมินดังกล่าวมีความถูกต้องค่อนข้างสูง

3.3 วิธีการประเมินการสูญเสียแบบย้อนกลับและการประเมินการสูญเสียหลัก

การประเมินย้อนกลับเพื่อนำไปหาการสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ (Q_b) มีวิธีการในการประเมินกลไกการสูญเสีย ดังนี้ คือ การทดสอบการสูญเสียทางกล (L_m) ซึ่งทดสอบที่ระดับความดัน 1 bar สามารถทำได้โดยถอดฝาสูบออก เพื่อตัดผลกระทบจากแรงต้านเนื่องจากความดันที่ด้านบน displacer piston และเปิดฝาปริมาตรห้องเครื่องเพื่อตัดผลกระทบจากการสูญเสียเนื่องจากความดันภายในปริมาตรห้องเครื่อง จากนั้นใช้มอเตอร์หมุนเครื่องยนต์ เพื่อวัดแรงบิดที่ได้ แล้วนำมาใช้คำนวณหาการสูญเสียทางกลจากสมการ

$$L_m = 2\pi(n_s/60)T \quad (3.6)$$

สำหรับการสูญเสียเนื่องจากความดันภายในปริมาตรห้องเครื่อง (L_{buf}) สามารถทดสอบโดยใช้วิธีเดียวกันกับการสูญเสียทางกล แต่ปิดฝาปริมาตรห้องเครื่องแทน เพื่อที่จะนำผลที่ได้มาคำนวณหาการสูญเสียเนื่องจากความดันภายในปริมาตรห้องเครื่องจากสมการ

$$L_{buf} = L_{motor@ closed crankcase} - L_{motor@ open crankcase} \quad (3.7)$$

หลังจากที่ได้การสูญเสียที่เกิดขึ้นในส่วนล่าง(การสูญเสียทางกลและการสูญเสียเนื่องจากความดันภายในปริมาตรห้องเครื่อง) และกำลังขาออกแล้ว ค่ากำลังบ่งชี้ที่คิดผลของการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานการไหลร่วมด้วยสามารถประเมินได้จากสมการ [8]

$$L_i = L_e - L_c - L_{flow friction} = L_s + L_m + L_{buf} \quad (3.8)$$

ในส่วนของการประเมินค่าความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์จริง(Q_h) สามารถประเมินได้จากสมการ

$$Q_h = Q_{reject} + L_i \quad (3.9)$$

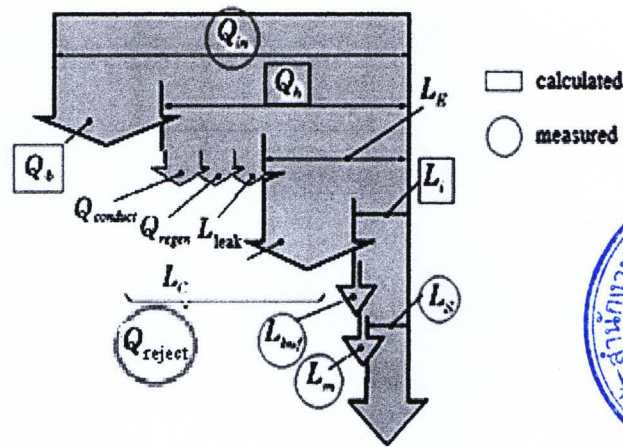
ซึ่งค่ากำลังบ่งชี้เป็นค่าที่ได้จากการประเมินด้วยสมการ 3.8 และความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์ (Q_{reject}) เป็นค่าที่ได้จากการวัดอัตราการไหลของน้ำที่ใช้หล่อเย็น, อุณหภูมิน้ำเข้าและอุณหภูมิน้ำออกเพื่อนำมาใช้คำนวณจากสมการ

$$Q_{reject} = \dot{m}_{water}c_p(T_{water,out} - T_{water,in}) \quad (3.10)$$

เพื่อที่จะนำความร้อนที่เข้าสู่เครื่องยนต์จริงมาประเมินการสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์จากสมการ

$$Q_b = Q_{in} - Q_h \quad (3.11)$$

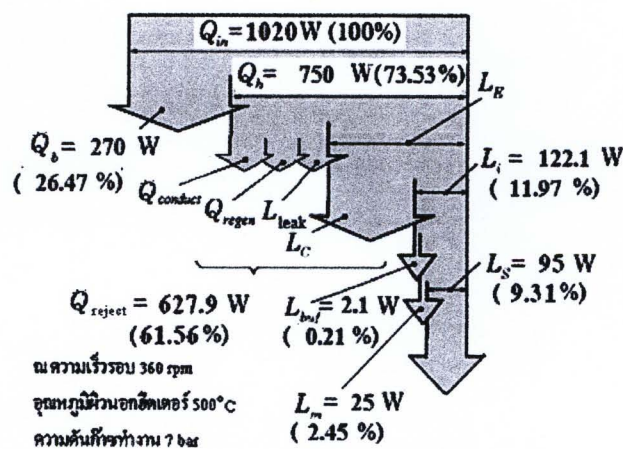
การสูญเสียที่วัดและประเมินได้จากวิธีดังกล่าวข้างต้นนี้แสดงดังรูปที่ 3-9 ผลลัพธ์ที่ได้จะนำไปใช้เพื่อระบุการสูญเสียหลักของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงต่อไป



รูปที่ 3-9 การประเมินการสูญเสียแบบย้อนกลับ

3.3.1 ผลการประเมินการสูญเสีย

การประเมินการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงใช้ผลที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ที่ระดับความดัน 7 bar ,อุณหภูมิที่ผิวนอกฮีตเตอร์ที่ 500 °C และอุณหภูมิน้ำขาออกจาก cooler ที่ 33.6 °C ซึ่งเป็นเงื่อนไขการทดสอบที่ทำให้กำลังขาออกสูงสุด โดยประเมินการสูญเสียที่ตำแหน่งกำลังขาออกสูงสุด เนื่องจากตำแหน่งดังกล่าวเป็นตำแหน่งที่มีต้นทุนในการประเมินการสูญเสียมากที่สุด นอกจากนี้ที่ตำแหน่งดังกล่าว ประสิทธิภาพทางความร้อนยังมีค่าใกล้เคียงกับประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุด ซึ่งทำให้เห็นถึงการสูญเสียหลักที่จำกัดประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์ ผลการประเมินการสูญเสียของเครื่องยนต์ที่กำลังขาออกสูงสุด ซึ่งมีค่า 95 W แสดงดังรูปที่ 3-10



รูปที่ 3-10 ผลการประเมินการสูญเสียที่เกิดขึ้นของเครื่องยนต์ที่กำลังขาออกสูงสุด

จากรูปแสดงให้เห็นว่าการสูญเสียทางกลมีค่า 25 W, การสูญเสียเนื่องจากความดันภายในปริมาตรห้องเครื่องมีค่า 2.1 W, ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์มีค่า 627.9 W และการสูญเสียภายนอกเครื่องยนต์มีค่า 270 W สำหรับการสูญเสียภายนอกเครื่องยนต์เป็นค่าที่ได้จากการประเมินประกอบไปด้วยการสูญเสีย 2 รูปแบบ คือ การสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านฉนวน ($Q_{insulate}$) และการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านโครงสร้างของเครื่องยนต์ ($Q_{engine\ structure}$) ซึ่งผลการวัดการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านฉนวน ($Q_{insulate}$) พบว่ามีค่า 82.36 W ดังนั้นการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านโครงสร้างเครื่องยนต์สามารถประเมินได้จากการนำค่าการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านฉนวนมาหักลบกับการสูญเสียภายนอกเครื่องยนต์พบว่ามีค่า 187.64 W แต่ค่าการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านโครงสร้างเครื่องยนต์เป็นค่าที่ได้จากการประเมิน ซึ่งไม่ทราบว่ามีค่าถูกต้องมากน้อยเพียงใด จึงนำผลการประเมินที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่องยนต์ดังรูปที่ 3-6 แล้วนำมาคำนวณค่าประมาณของการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านโครงสร้างเครื่องยนต์โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) 25 W/m²K จากสมการ

$$Q_{engine\ structure} = hA_{buffer\ wall}(T_{engine\ structure} - T_{surround}) \quad (3.12)$$

เมื่อ $A_{buffer\ wall}$ คือ พื้นที่ผนังด้านนอกของปริมาตรห้องเครื่อง, $T_{engine\ structure}$ คือ อุณหภูมิของผนังด้านนอกของปริมาตรห้องเครื่อง และ $T_{surround}$ คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ผลการคำนวณพบว่าการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านโครงสร้างเครื่องยนต์มีค่าอยู่ในระดับประมาณ 150 W แสดงให้เห็นว่า ค่าการสูญเสียภายนอกเครื่องยนต์ที่ได้จากวิธีการประเมินการสูญเสียแบบย้อนกลับสอดคล้องกับผลที่ได้จากการประเมินด้วยการวัดค่าการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านฉนวนและการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านโครงสร้างของเครื่องยนต์

3.3.2 การสูญเสียหลักของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

จากรูปที่ 3-10 แสดงให้เห็นว่าการสูญเสียหลักของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมี 2 รูปแบบ คือ การสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ (Q_b) และความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์ (Q_{reject}) สำหรับการสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ (Q_b) จะประกอบไปด้วยการสูญเสียจากการนำความร้อนผ่านฉนวน ($Q_{insulate}$) และการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านโครงสร้างของเครื่องยนต์ ($Q_{engine\ structure}$) สำหรับความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์ (Q_{reject}) จะประกอบไปด้วย การสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านผนังลงมาที่น้ำหล่อเย็น

($Q_{conduct}$), การสูญเสียภายใน regenerator (Q_{regen}), การสูญเสียเนื่องจากการรั่วของสารทำงานผ่านลูกสูบกำลัง (L_{leak}) และ compression power (L_c)

การประเมินการสูญเสียหลักข้างต้น แสดงให้เห็นถึงแนวทางในการปรับปรุงเครื่องยนต์เพื่อเพิ่มสมรรถนะของเครื่องยนต์ให้สูงขึ้นดังนี้ คือ สำหรับการสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ (Q_b) การศึกษาจะไม่ปรับปรุงเครื่องยนต์เพื่อลดการสูญเสียดังกล่าว เนื่องจากการสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ (Q_b) เป็นการสูญเสียที่ไม่มีผลกระทบต่อวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ ในส่วนของความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์ (Q_{reject}) จะมีการปรับปรุงใน 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 การปรับปรุงโดยการเลือกลักษณะจำเพาะของ regenerator ให้เหมาะสมที่สุดเพื่อลดการสูญเสียภายใน regenerator (Q_{regen}) ซึ่ง Tanaka.M [20] ได้กล่าวว่า การใช้ลักษณะจำเพาะที่เหมาะสมของ regenerator มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์อย่างมาก ซึ่งเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีอยู่ยังไม่ได้เลือกใช้ regenerator ที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นการเลือกใช้ regenerator ให้เหมาะสมที่สุดจึงเป็นสิ่งที่น่าให้ความสนใจเพื่อลดการสูญเสียดังกล่าว ส่วนที่ 2 การปรับปรุงโดยการเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ผลิตแหวนลูกสูบลูกสูบกำลัง เพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากการรั่วของก๊าซทำงานผ่านลูกสูบกำลัง (L_{leak}) สำหรับการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านผนังลงมาที่น้ำหล่อเย็น ($Q_{conduct}$) จะไม่มีการปรับปรุงการสูญเสียดังกล่าว เนื่องจากการปรับปรุงเครื่องยนต์จำเป็นต้องมีการลดความหนาของผนังในส่วนต่างๆของเครื่องยนต์ลง เพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านผนังลงมาที่น้ำหล่อเย็น แต่การลดความหนาของผนังเครื่องยนต์จำเป็นต้องลดระดับความดันที่ใช้งานลงเพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน ทำให้กำลังขาออกของเครื่องยนต์มีค่าลดลง จึงไม่ทำการปรับปรุงเพื่อลดการสูญเสียดังกล่าว

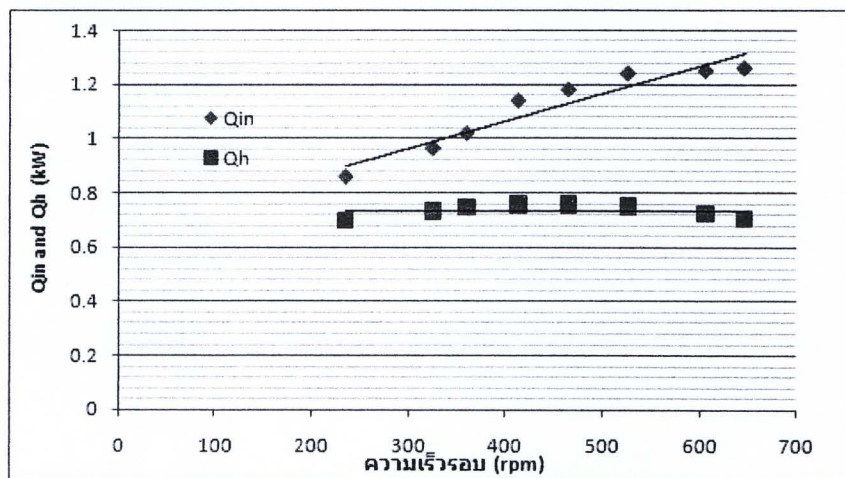
3.4 การเปรียบเทียบการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลางกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิสูงและต่ำ

นักวิจัยหลายคนศึกษากลไกการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีอยู่ เพื่อใช้เป็นแนวทางปรับปรุงเครื่องยนต์ให้มีสมรรถนะที่ดีขึ้น แต่การศึกษากการสูญเสียดังกล่าวเป็นเพียงการศึกษากลไกการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงในแต่ละผลต่างอุณหภูมิของเครื่องยนต์ที่มีอยู่เท่านั้น จนกระทั่ง Iwamoto, S. [11] ได้ศึกษาความแตกต่างกันของกลไกการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลต่างอุณหภูมิสูง (HDSE) และต่ำ (LDSE) เพื่อประเมินแนวโน้มการสูญเสียและสมรรถนะของ HDSE และ LDSE ไว้ใช้ในการพัฒนาเครื่องยนต์ในแต่ละผลต่างอุณหภูมิ ผลการวิจัยพบว่า การสูญเสียของ HDSE และ LDSE มีค่าการสูญเสียและลักษณะการเปลี่ยนแปลงของการสูญเสียตามความเร็วรอบที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่า กลไกการสูญเสียของ

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีผลต่างอุณหภูมิแตกต่างกัน มีค่าการสูญเสียและลักษณะการเปลี่ยนแปลงของการสูญเสียตามความเร็วรอบที่ต่างกัน ซึ่ง Iwamoto, S. ไม่ได้เปรียบเทียบการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลาง(MDSE) ไว้ ดังนั้น จึงนำผลการประเมินการสูญเสียของ MDSE ที่มีอยู่มาเปรียบเทียบกับผลการประเมินการสูญเสียของ HDSE และ LDSE ที่ได้จากงานวิจัยของ Iwamoto, S. [10] ว่าค่าการสูญเสียของ MDSE มีความเหมือนกันหรือแตกต่างกันกับ HDSE และ LDSE อย่างไร

3.4.1 วิธีการเปรียบเทียบการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลางกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิสูงและต่ำ

การเปรียบเทียบการสูญเสียของ MDSE กับ HDSE และ LDSE จะใช้ตัวแปรไร้มิติของการสูญเสียและความเร็วรอบในการเปรียบเทียบ โดยที่การสูญเสียทางกล, ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์ และค่ากำลังบ่งชี้จะใช้ความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์จริง (Q_h) ที่เปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบแสดงดังรูปที่ 3-11 เป็นตัวหาร สำหรับความเร็วรอบจะทำให้เป็นตัวแปรไร้มิติโดยใช้ความเร็วรอบที่กำลังขาออกสูงสุดเป็นตัวหาร คือ 360 rpm

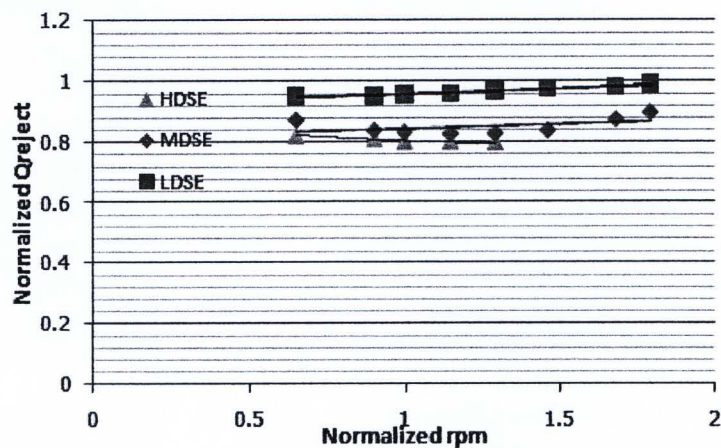


รูปที่ 3-11 ความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์และความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์จริงเทียบกับความเร็วรอบ

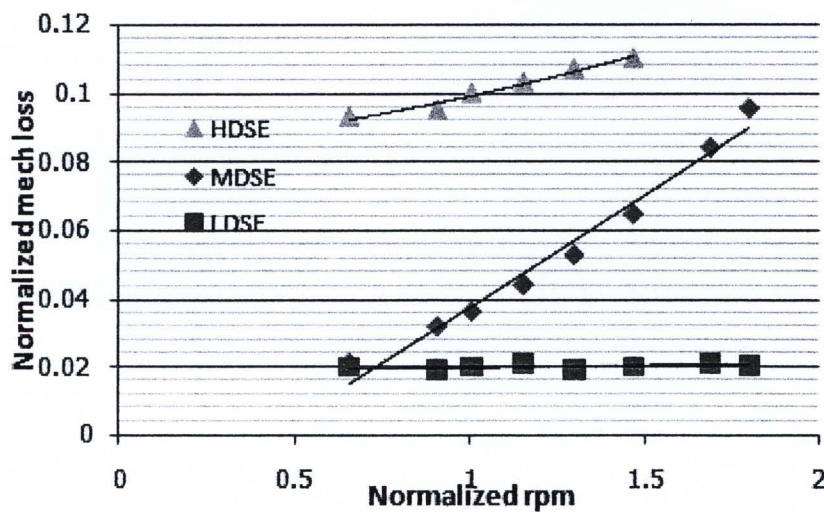
3.4.2 ผลการเปรียบเทียบการสูญเสีย

ผลการเปรียบเทียบการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลางกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำพบว่า ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์แบบไร้มิติของ MDSE มีค่าใกล้เคียงกับ HDSE และมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบแบบไร้มิติเหมือนกับ LDSE คือ ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์แบบไร้มิติมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 3-12 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วรอบ

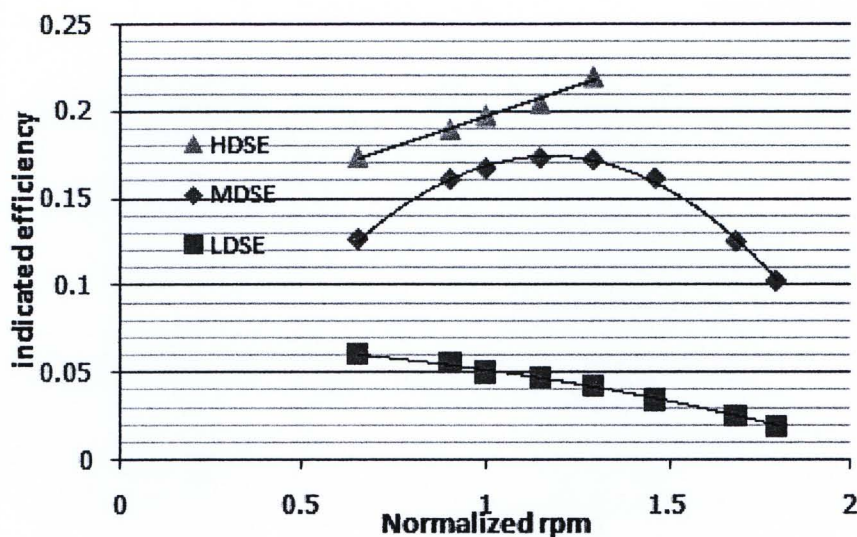
เพิ่มขึ้น MDSE นำความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์จริง (Q_h) มาใช้ได้ลดลง สำหรับการสูญเสียทางกลแบบโร้มนิตของ MDSE มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบแบบโร้มนิตแบบเดียวกันกับ HDSE คือ การสูญเสียทางกลแบบโร้มนิตมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบอย่างเป็นเส้นตรงแสดงดังรูปที่ 3-13 ซึ่งมีผลทำให้การสูญเสียทางกลของ HDSE และ MDSE มีค่ามากกว่าการสูญเสียทางกลของ LDSE อย่างมากที่ความเร็วรอบสูง สำหรับผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพบ่งชี้แสดงดังรูปที่ 3-14 จากรูปแสดงให้เห็นได้ว่า ค่าประสิทธิภาพบ่งชี้ของ MDSE จะอยู่กึ่งกลางระหว่าง HDSE และ LDSE ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพทางทฤษฎี (Carnot efficiency) ที่ได้จากการประเมินด้วยสัดส่วนของอุณหภูมิการทำงาน นอกจากนี้ ค่าประสิทธิภาพบ่งชี้ของ MDSE ยังมีค่าใกล้เคียงกับค่าประสิทธิภาพบ่งชี้ของ HDSE อีกด้วย แสดงให้เห็นว่า MDSE ซึ่งใช้วัสดุที่มีราคาถูกลงและหาได้ง่ายในท้องตลาด มีความคุ้มค่าในการผลิตและใช้งาน เนื่องจาก MDSE ใช้ต้นทุนในการผลิตที่ต่ำกว่า HDSE มากแต่มีประสิทธิภาพการทำงานใกล้เคียงกัน



รูปที่ 3-12 ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์แบบโร้มนิตเปรียบเทียบกับความเร็วรอบ



รูปที่ 3-13 การสูญเสียทางกลแบบโร้มนิตเทียบกับความเร็วรอบแบบโร้มนิต



รูปที่ 3-14 ประสิทธิภาพ indicated แบบไร้มิติเปรียบเทียบกับความเร็วรอบ

ผลของการเปรียบเทียบการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ระดับผลต่างอุณหภูมิต่างๆกันข้างต้น แสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดในวิธีการเปรียบเทียบของ Iwamoto, S. คือ วิธีการเปรียบเทียบดังกล่าวไม่ได้คำนึงถึงผลของระดับความดันที่แตกต่างกันในแต่ละเครื่องยนต์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบ ซึ่งจะกล่าวถึงข้อจำกัดดังกล่าวและแนวทางการปรับปรุงวิธีการเปรียบเทียบการสูญเสียของเครื่องยนต์ที่มีผลต่างอุณหภูมิแตกต่างกันโดยละเอียดในหัวข้อถัดไป

3.5 แนวการปรับปรุงวิธีการเปรียบเทียบการสูญเสียโดยใช้แนวคิดของ Prieto J.L

3.5.1 ปัญหาที่พบสำหรับวิธีการของ Iwamoto, S.

ผลของการเปรียบเทียบการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ระดับผลต่างอุณหภูมิต่างๆด้วยวิธีการของ Iwamoto, S. แสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดในวิธีการเปรียบเทียบดังกล่าว คือ วิธีการของ Iwamoto, S. ไม่ได้คำนึงถึงผลของระดับความดันภายในเครื่องยนต์แต่ละผลต่างอุณหภูมิที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบการสูญเสีย ซึ่งสามารถเห็นได้จากค่าการสูญเสียทางกลแบบไร้มิติของแต่ละเครื่องยนต์ที่ใช้เปรียบเทียบ จากผลการเปรียบเทียบพบว่าการสูญเสียทางกลแบบไร้มิติของ MDSE จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นเหมือนกับ HDSE แต่จะมีค่าตัวเลขการสูญเสียทางกลแบบไร้มิติใกล้เคียงกับ LDSE ซึ่งเป็นผลจากค่าการสูญเสียทางกลของ MDSE และ LDSE ถูกประเมินที่ระดับความดัน 1 bar ในขณะที่ค่าการสูญเสียทางกลของ HDSE ถูกประเมินที่ระดับความดัน 8 bar จากสมการ

$$L_m = L_i - L_s \quad (3.13)$$

ทำให้ค่าตัวเลขการสูญเสียทางกลของ MDSE และ LDSE มีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับสมการข้างต้น ได้ละทิ้งผลของการสูญเสียเนื่องจากความดันภายในปริมาตรห้องเครื่อง เนื่องจากการสูญเสียดังกล่าวมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์ นอกจากนี้ Hirata, K. [21] ยังแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของการสูญเสียทางกลเมื่อระดับความดันของเครื่องยนต์มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นวิธีการเปรียบเทียบตามแนวคิดของ Iwamoto จึงมีข้อจำกัดในเรื่องของระดับความดันของแต่ละเครื่องยนต์ที่นำมาเปรียบเทียบควรมีค่าเท่ากัน จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นทำให้เล็งเห็นถึงแนวคิดการทำให้กำลังและการสูญเสียเป็นตัวแปรไร้มิติของ Prieto, J.L. [22] ที่ได้ตัดผลของระดับความดันภายในเครื่องยนต์ที่แตกต่างกันออกไป เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีผลต่างอุณหภูมิแตกต่างกัน

3.5.2 วิธีการแปรค่ากำลังและการสูญเสียเป็นตัวแปรไร้มิติ

Prieto, J.L. ได้เสนอวิธีการแปรค่ากำลังและการสูญเสียเป็นตัวแปรไร้มิติโดยคำนวณจากสมการ

$$L^* = \frac{L}{P_m V_E (n_s/60)} \quad (3.14)$$

และ

$$M = \frac{(n_s/60) V_{sw}^{(\frac{1}{3})}}{\sqrt{RT_c}} \quad (3.15)$$

เมื่อ L^* คือ ค่ากำลังและการสูญเสียแบบไร้มิติ, L คือ ค่ากำลังและการสูญเสีย, M คือ Mach number, P_m คือ ความดันของสารทำงานของเครื่องยนต์ (Pa), V_E คือ ปริมาตรด้านขยายตัว (cm^3) และ n_s คือ ความเร็วรอบ (rpm) R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ และ T_c คือ อุณหภูมิฝั่งเย็น ($^{\circ}\text{K}$) ซึ่ง Prieto J.L. นำเสนอรูปแบบสมการเพื่อทำนายค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติจากสมการ

$$\zeta_{pred} = \zeta_{o,numr} - \Phi_{numr} M_{numr} \quad (3.16)$$

เมื่อ ζ_{pred} คือ ค่าทำนายกำลังบ่งชี้แบบไร้มิติ, $\zeta_{o,numr}$ คือ ค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติจากการคำนวณแบบ isothermal, Φ_{numr} คือ ค่าคงที่การสูญเสียจากการคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลข และ M_{numr} คือ Mach number จากการคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลข สมการที่ใช้ทำนายค่ากำลังบ่งชี้ข้างต้นถูกใช้ในการทำนายค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีโครงสร้างเครื่องยนต์, สารทำงาน, ผลต่างของอุณหภูมิ และระดับความดันที่แตกต่างกัน ซึ่งผลการทำนายที่ได้นั้นสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์

ในงานวิจัยของ Prieto, J.L. [24] ค่า $\zeta_{o,numr}$ และ Φ_{numr} เป็นค่าได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองเฉพาะที่ถูกพัฒนาขึ้น แต่ผลการทำนายค่า ζ_{pred} ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีลักษณะโครงสร้างและเงื่อนไขในการทำงานที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของค่ากำลังบ่งชี้สูงสุดแบบไร้มิติจริงที่ได้จากการทำนาย ($\zeta_{max,pred}$) กับ ค่า $\zeta_{o,numr}$ และความสัมพันธ์ของ Mach number ที่ค่ากำลังบ่งชี้สูงสุดที่ได้จากการทำนาย ($M_{max@pred}$) กับ $\zeta_{o,numr}$ และ Φ_{numr} ดังสมการความสัมพันธ์

$$\zeta_{max,pred} = \frac{\zeta_{o,numr}}{2} \quad (3.17)$$

และ

$$M_{max@pred} = \frac{\zeta_{o,numr}}{2\Phi_{numr}} \quad (3.18)$$

นอกจากนี้ Prieto, J.L. ยังแสดงให้เห็นค่ากำลังบ่งชี้สูงสุดแบบไร้มิติจริงที่ได้จากผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ ($\zeta_{max,expr}$), Φ_{numr} และ Mach number ที่ค่ากำลังบ่งชี้สูงสุดที่ได้จากผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ ($M_{max,expr}$) ของเครื่องยนต์ที่มีลักษณะโครงสร้างและเงื่อนไขในการทำงานที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 ค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติในอุดมคติ, ค่ากำลังบ่งชี้สูงสุดแบบไร้มิติจริง, โครงสร้างและเงื่อนไขการทำงานของเครื่องยนต์แต่ละชนิด [23]

	GPU3	Parafin candle	Ecoboy	P-40
ชนิด	เบต้า	แกมมา	แกมมา	แอลฟา
สารทำงาน	ฮีเลียม	อากาศ	ไนโตรเจน	ฮีเลียม
อุณหภูมิผนังร้อน (°C)	704	160	430	750
ปริมาตรกวาด (cm ³)	120.8	13.8	81.4	95X4
$\zeta_{max,expr}$	0.156	0.066	0.057	0.092
$\zeta_{o,numr}$	0.314	0.131	0.114	0.183
$M_{max,expr}$	0.0034	0.0007	0.0044	0.0037

ค่า $\zeta_{max,expr}$ และ $\zeta_{o,numr}$ ในตารางข้างต้น แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันกับความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.17 และ 3.18 โดยที่ HDSE คือ GPU-3 และ P-40, MDSE คือ Ecoboy และ LDSE คือ Parafin candle เนื่องจาก $\zeta_{max,expr}$ และ $\zeta_{max,pred}$ มีค่าใกล้เคียงกัน

แต่การนำสมการและความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นมาใช้เปรียบเทียบการสูญเสียของเครื่องยนต์ที่มีผลต่างอุณหภูมิแตกต่างกันไม่สามารถทำได้โดยตรง เนื่องจากข้อมูลที่จะนำมาใช้เปรียบเทียบเป็นข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ไม่ใช่ข้อมูลที่ได้จากการทำนาย จึงไม่สามารถใช้ $\zeta_{o,numr}$ ได้ นอกจากนี้ไม่สามารถหาค่า Φ_{numr} ซึ่งใช้วิธีเชิงตัวเลขในการคำนวณได้ ดังนั้นค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติในอุดมคติและค่าคงที่การสูญเสียของค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติสำหรับใช้เปรียบเทียบการสูญเสียจะคำนวณได้จากสมการ

$$\zeta_{o,estm} = 2 \zeta_{max,expr} \quad (3.19)$$

และ

$$\Phi_{estm} = \frac{\zeta_{o,estm}}{2M_{max,expr}} \quad (3.20)$$

เมื่อ $\zeta_{o,estm}$ คือ ค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติในอุดมคติที่ได้จากการประเมิน, Φ_{estm} คือค่าคงที่การสูญเสียของค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติที่ได้จากการประเมิน

จากที่กล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่าวิธีการทำให้เป็นตัวแปรไร้มิติและสมการดังกล่าวข้างต้นสามารถนำมาใช้ในการเปรียบเทียบการสูญเสียของเครื่องยนต์สแตนด์ลิ่งแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลางกับเครื่องยนต์สแตนด์ลิ่งแบบผลต่างอุณหภูมิสูงและต่ำได้ นอกจากนี้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่า $\zeta_{o,numr}$ ที่ได้จากวิธีเชิงตัวเลขจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์มาคำนวณค่า $\zeta_{o,estm}$ มาเปรียบเทียบกับมีความใกล้เคียงกันมากน้อยเพียงใดอีกด้วย

3.6 การเปรียบเทียบการสูญเสียของเครื่องยนต์สแตนด์ลิ่งแบบผลต่างอุณหภูมิแตกต่างกัน

การเปรียบเทียบการสูญเสียของเครื่องยนต์สแตนด์ลิ่งแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลางกับเครื่องยนต์สแตนด์ลิ่งแบบผลต่างอุณหภูมิสูงและต่ำโดยใช้แนวคิดของ Prieto, J.L. [24] จะทำโดยใช้ค่าการสูญเสียของค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติที่ได้จากการประเมิน ($\Phi_{estm}M_{expr}$) เทียบกับ Mach number ที่ได้จากผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ (M_{expr}) หาดด้วย Mach number ที่ค่ากำลังบ่งชี้สูงที่สุดที่ได้จากผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ ($M_{max,expr}$) ในการเปรียบเทียบการสูญเสีย สำหรับค่า $\Phi_{estm}M_{expr}$ เป็นค่าที่ได้จากผลคูณของค่าคงที่การสูญเสีย ซึ่งคำนวณจากสมการ 3.20 กับ ค่า Mach number ซึ่งคำนวณจากสมการ 3.15 ด้วยความเร็วรอบที่ได้จากผลการทดสอบ แต่ก่อนที่จะเปรียบเทียบการสูญเสียข้างต้น ผู้วิจัยจะทดสอบวิธีการประเมินการ

สูญเสียว่าเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการเปรียบเทียบการสูญเสียหรือไม่ โดยการนำค่า $\zeta_{o,estm}$ ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการ 3.17 หาค่า $\Phi_{estm} M_{expr}$ จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่า $\Phi_{estm} M_{expr} / \zeta_{o,estm}$ ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีผลต่างอุณหภูมิแตกต่างกันเทียบกับ $M_{expr}/M_{max,expr}$ ซึ่งผลการเปรียบเทียบค่า $\Phi_{estm} M_{expr} / \zeta_{o,estm}$ ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีผลต่างอุณหภูมิแตกต่างกันควรมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการนำ $\zeta_{o,estm}$ มาหาค่า $\Phi_{estm} M_{expr}$ เป็นการตัดผลของโครงสร้างเครื่องยนต์และผลต่างอุณหภูมิที่แตกต่างกันออกไป

3.6.1 วิธีการเปรียบเทียบการสูญเสีย

วิธีการเปรียบเทียบการสูญเสียจะทำโดยนำค่ากำลังบ่งชี้สูงสุดและความเร็วรอบที่ค่ากำลังบ่งชี้สูงสุดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิสูง, กลางและต่ำมาทำให้เป็นตัวแปรไร้มิติด้วยสมการที่ 3.14 และ 3.15 ผลที่ได้จะเป็นค่า $\zeta_{max,expr}$ และ $M_{max,expr}$ เพื่อที่จะนำผลที่ได้มาหาค่า $\zeta_{o,estm}$ และ Φ_{estm} จากสมการที่ 3.19 และ 3.20 แต่การคำนวณค่า $\Phi_{estm} M_{expr}$ จากค่า Mach number ที่ได้จากผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ (M_{expr}) ไม่สามารถทำได้ เนื่องจาก M_{expr} จะทำให้ $\Phi_{estm} M_{expr}$ เปรียบเสมือนเป็นค่าที่ได้จากการทำนาย ดังนั้นค่า $\Phi_{estm} M_{expr}$ จะคำนวณได้จากสมการ

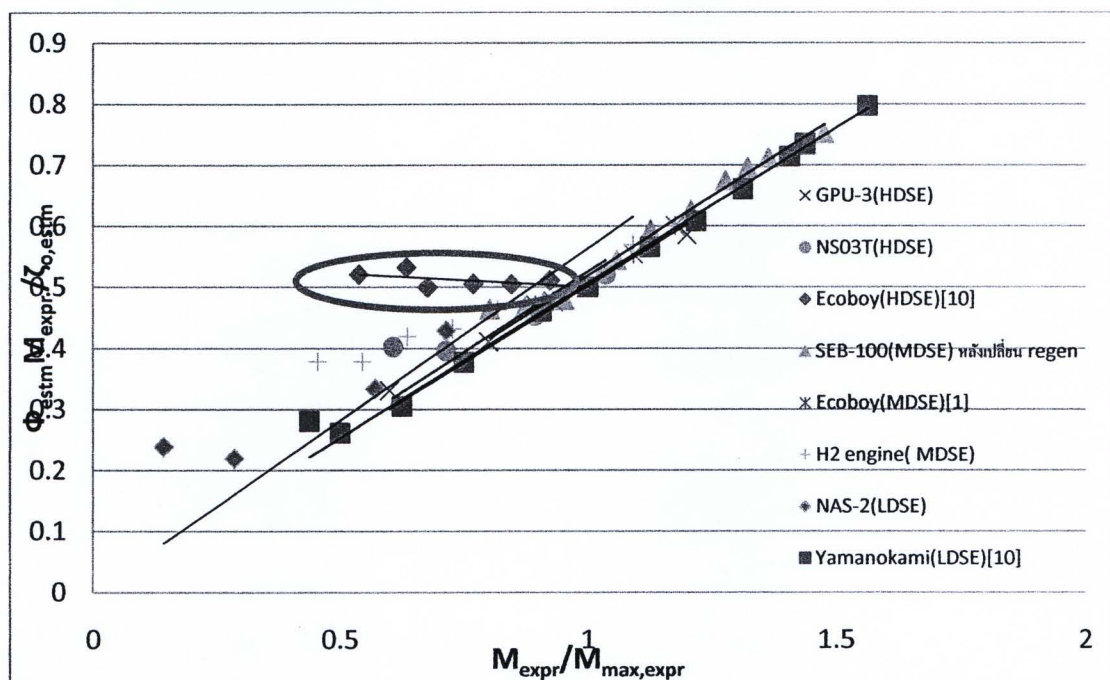
$$\Phi_{estm} M_{expr} = \zeta_{o,estm} - \zeta_{expr} \quad (3.21)$$

เมื่อ ζ_{expr} คือ ค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ ในส่วนของความเร็วรอบที่จุดต่างๆ ของการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์จะถูกทำให้เป็นค่า

3.6.2. ผลการเปรียบเทียบการสูญเสีย

ผลการเปรียบเทียบการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลางกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิสูงและต่ำ แสดงดังรูปที่ 3-15 จากรูปแสดงให้เห็นว่า ค่าสัดส่วนของค่าการสูญเสียของกำลังบ่งชี้แบบไร้มิติที่ได้จากการประเมินกับค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติในอุดมคติที่ได้จากการประเมินเทียบกับกำลังบ่งชี้ในอุดมคติ ($\Phi_{estm} M_{expr} / \zeta_{o,estm}$) ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลางและเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิสูงและต่ำมีค่าไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่า วิธีการเปรียบเทียบการสูญเสียข้างต้นเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่จะใช้ในการเปรียบเทียบ เนื่องจากการนำค่า $\zeta_{o,estm}$ หาค่า $\Phi_{estm} M_{expr}$ และการนำค่า $M_{max,expr}$ หาค่า M_{expr} เป็นการตัดผลของโครงสร้างเครื่องยนต์, ผลต่างอุณหภูมิและสาร

ทำงานที่แตกต่างกันออกไป ทำให้ค่า $\Phi_{estm} M_{expr} / \zeta_{o,estm}$ เทียบกับ $M_{expr}/M_{max,expr}$ ของเครื่องยนต์ที่มีลักษณะแตกต่างกันมีค่าเท่ากัน

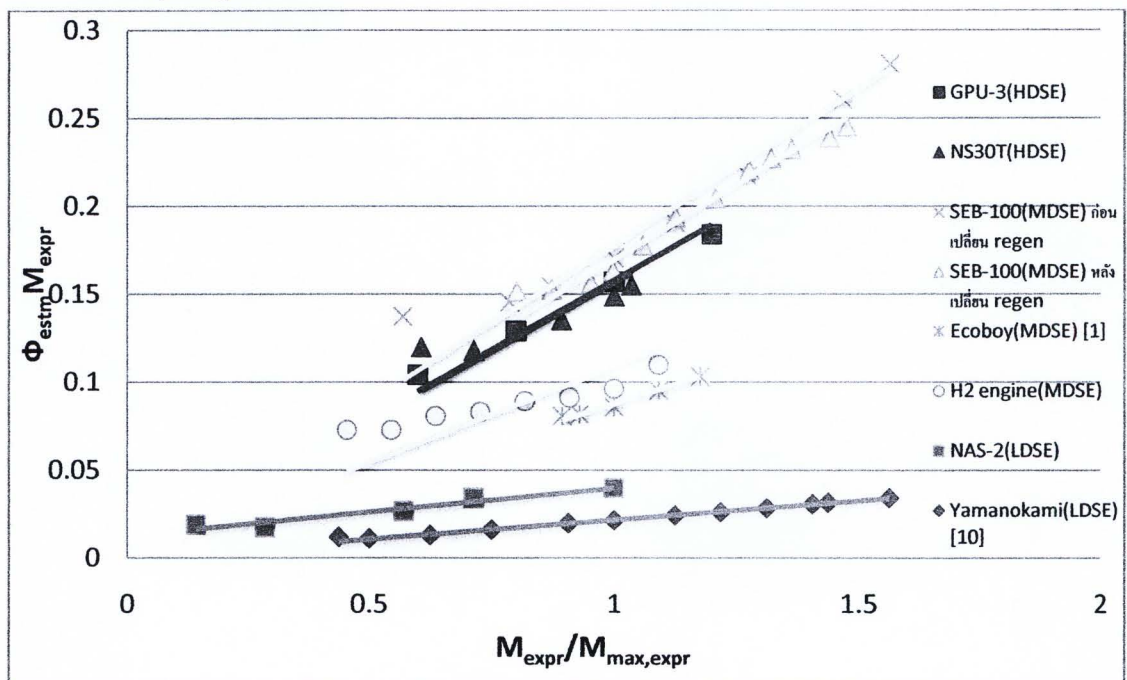


รูปที่ 3-15 ผลการเปรียบเทียบการสูญเสียแบบไร้มิติเทียบกับค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติในอุดมคติของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลางกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิสูงและต่ำ

ผลการเปรียบเทียบข้างต้น พบว่า ค่า $\Phi_{estm} M_{expr} / \zeta_{o,estm}$ ของเครื่องยนต์ผลต่างอุณหภูมิสูงที่ได้จากงานวิจัยของ Iwamoto, S. ซึ่งแสดงด้วยวงกลมสีแดงในรูปที่ 3.15 จะแตกต่างจากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลาง, กลางและต่ำ เนื่องจากค่ากำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิสูงที่ได้จากงานวิจัยของ Iwamoto, S. [10] มีเพียงส่วนหนึ่งของค่ากำลังบ่งชี้ที่ระดับความเร็วรอบต่างๆ ของเครื่องยนต์ซึ่งยังไม่ใช่ค่ากำลังบ่งชี้สูงสุด ทำให้การนำค่ากำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิสูงที่ได้จากงานวิจัยของ Iwamoto, S. [11] มาใช้ในการเปรียบเทียบค่า $\Phi_{estm} M_{expr} / \zeta_{o,estm}$ ไม่สามารถทำได้ ดังนั้นการนำผลการทดสอบของเครื่องยนต์ต่างๆ มาใช้ในการเปรียบเทียบจึงจำเป็นต้องทราบค่ากำลังบ่งชี้สูงสุดของเครื่องยนต์และความเร็วรอบที่กำลังบ่งชี้สูงสุดเพื่อให้สามารถนำผลที่ได้มาใช้นำคำนวณได้อย่างถูกต้อง

ผลการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียของค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติที่ได้จากการประเมิน ($\Phi_{estm} M_{expr}$) ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิสูงซึ่งแสดงเป็นเส้นสีแดง, ผลต่าง

อุณหภูมิปานกลางซึ่งแสดงเป็นเส้นสีเหลือง และผลต่างอุณหภูมิต่ำซึ่งแสดงเป็นเส้นสีฟ้า แสดงดังรูปที่ 3-16 จากรูปแสดงให้เห็นว่า ค่า $\Phi_{estm} M_{expr}$ ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลางที่มีอยู่ มีค่าใกล้เคียงกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิสูง [8,22] ซึ่งถ้ามองในด้านผลต่างอุณหภูมิเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลางที่มีอยู่ควรมีค่า $\Phi_{estm} M_{expr}$ ใกล้เคียงกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลต่างอุณหภูมิปานกลาง [1,2] ที่มีผลต่างอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนของปริมาตรตายทั้งหมดเทียบกับปริมาตรกวาดด้านขยายตัว (V_{dead}/V_{sw}) ของแต่ละเครื่องยนต์พบว่า อัตราส่วนดังกล่าวของเครื่องยนต์อื่นๆที่นำมาเปรียบเทียบ [1,2,8,10,22] จะมีค่ามากกว่า 1 ในขณะที่เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีอยู่มีค่า 0.633 ทั้งนี้เพราะ ขณะ ศรีคำ ออกแบบเครื่องยนต์ขึ้นต้นให้อัตราส่วนดังกล่าวมีค่า 1.345 แต่เครื่องยนต์ที่สร้างขึ้นไม่สามารถทำงานได้ ขณะ ศรีคำ จึงตั้งสมมติฐานว่าอาจเป็นผลจากปริมาตรตายของเครื่องยนต์มากเกินไปจึงลดอัตราส่วนดังกล่าวลง แต่ ขณะ ศรีคำ ไม่ได้คำนึงถึงผลของการปรับปรุงครีปของ heater และ cooler ให้สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น ดังนั้นการลดอัตราส่วนดังกล่าวอาจทำให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีอยู่มีพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนให้แก่สารทำงานไม่เพียงพอทำให้ไม่สามารถนำความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์ไปใช้ในการผลิตกำลังได้อย่างเต็มที่เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีอยู่จึงมีการสูญเสียเกิดขึ้นภายในเครื่องยนต์มากกว่าเครื่องยนต์อื่นๆที่ระดับผลต่างอุณหภูมิเดียวกัน



รูปที่ 3-16 การเปลี่ยนแปลงของค่าการสูญเสียของค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติ ($\Phi_{estm} M_{expr}$) เทียบกับ ค่า $M_{expr}/M_{max,expr}$

3.7 การเปรียบเทียบค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติในอุดมคติที่ได้จากการประเมินกับค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติจากการคำนวณแบบ isothermal

ค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติในอุดมคติในงานวิจัยของ Prieto, J.L. เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลขโดยใช้การวิเคราะห์แบบ Isothermal แต่งานวิจัยดังกล่าวยังไม่ได้เปรียบเทียบกับค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติในอุดมคติที่ได้จากการประเมินด้วยผลการทดสอบเพื่อสอบเทียบความถูกต้อง จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงเปรียบเทียบค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติในอุดมคติที่ได้จากการประเมิน ($\zeta_{o,estm}$) กับค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติจากการคำนวณแบบ isothermal ($\zeta_{o,numr}$) เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลขว่ามีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการประเมินด้วยผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์มากน้อยเพียงใด

3.7.1 วิธีการเปรียบเทียบค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติในอุดมคติที่ได้จากการประเมินกับค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติจากการคำนวณแบบ isothermal

วิธีการเปรียบเทียบค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติในอุดมคติที่ได้จากการประเมิน ($\zeta_{o,estm}$) กับค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติจากการคำนวณแบบ isothermal ($\zeta_{o,numr}$) กระทำโดยนำค่ากำลังบ่งชี้สูงสุดซึ่งได้จากวิธีการประเมินย้อนกลับเพื่อนำไปหาการสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ (Q_b) ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลางที่มีอยู่มาทำให้เป็นตัวแปรไร้มิติด้วยสมการที่ 3.14 ผลที่ได้จะเป็นค่า $\zeta_{max,expr}$ เพื่อที่จะนำผลที่ได้มาคำนวณค่า $\zeta_{o,estm}$ จากสมการที่ 3.19 สำหรับการคำนวณค่า $\zeta_{o,numr}$ จะทำโดยใช้โปรแกรมของ Urieli.I [25] ในการคำนวณค่ากำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์ โดยใช้การวิเคราะห์แบบ Isothermal ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบเดียวกันกับที่ใช้ในการคำนวณค่า $\zeta_{o,numr}$ ของ Prieto, J.L. เพื่อที่จะนำค่ากำลังบ่งชี้มาทำให้เป็นตัวแปรไร้มิติด้วยสมการ 3.14 ค่า $\zeta_{o,numr}$ ที่ได้จากวิธีการดังกล่าวข้างต้น จะนำมาเปรียบเทียบกับค่า $\zeta_{o,estm}$ ว่ามีความใกล้เคียงกันมากน้อยเพียงใด โดยทำการเปรียบเทียบที่ 2 ระดับความดันด้วยกัน คือ 5 และ 7 bar สำหรับสาเหตุที่ไม่สามารถเปรียบเทียบที่ระดับความดัน 1 และ 3 bar เนื่องจากที่ระดับความดัน 1 และ 3 bar พบว่าผลการประเมินค่ากำลังบ่งชี้ที่ระดับความดันดังกล่าวไม่สามารถหาค่ากำลังบ่งชี้สูงสุดได้ ทำให้ไม่สามารถนำค่ามาเปรียบเทียบได้เหมือนดังกล่าวนในหัวข้อ

3.6.2

3.7.2 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติในอุดมคติที่ได้จากการประเมินกับค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติจากการคำนวณแบบ isothermal

ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติในอุดมคติที่ได้จากการประเมิน ($\zeta_{o,estm}$) กับค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติจากการคำนวณแบบ isothermal ($\zeta_{o,numr}$) ที่ระดับความดัน 5 และ 7 bar แสดงดังตารางที่ 3-4 จากตารางแสดงให้เห็นว่า ค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติในอุดมคติที่ได้จากการประเมิน $\zeta_{o,estm}$ กับค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติจากการคำนวณแบบ isothermal ($\zeta_{o,numr}$) มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น วิธีการคำนวณค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติจากการคำนวณแบบ isothermal ($\zeta_{o,numr}$) จึงเป็นวิธีการที่มีความถูกต้องค่อนข้างสูง เนื่องจากค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติจากการคำนวณแบบ isothermal มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติในอุดมคติที่ได้จากการประเมินด้วยผลการทดสอบ

ตารางที่ 3-4 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติในอุดมคติที่ได้จากการประเมิน ($\zeta_{o,estm}$) กับค่ากำลังบ่งชี้แบบไร้มิติจากการคำนวณแบบ isothermal ($\zeta_{o,numr}$)

	ความดัน 5 bar	ความดัน 7 bar
$\zeta_{o,estm}$	0.325	0.326
$\zeta_{o,numr}$	0.377	0.377