

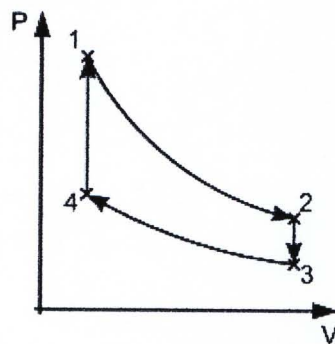
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงอาจแบ่งตามลักษณะทางกายภาพได้เป็น 4 รูปแบบด้วยกัน คือ การสูญเสียทางความร้อน, การสูญเสียทางความดัน, การสูญเสียทางกล และการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานการไหล การสูญเสียในแต่ละรูปแบบข้างต้นจะมีลักษณะการเกิดขึ้นในส่วนต่างๆ ของเครื่องยนต์ได้หลายแบบด้วยกันเช่น การสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อน, การสูญเสียเนื่องจากความดันภายในปริมาตรห้องเครื่อง, การสูญเสียความร้อนภายใน regenerator เป็นต้น ค่ากำลังบ่งชี้ถือเป็นส่วนสำคัญสำหรับใช้ประเมินการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเนื่องจาก ค่ากำลังบ่งชี้เป็นกำลังสุทธิที่ได้ออกมาจากการทำงานของเครื่องยนต์ตามวัฏจักรสเตอร์ลิงจึงเปรียบเสมือนเป็นต้นทุนของกำลังของเครื่องยนต์ที่จะถูกใช้ไปกับการสูญเสียต่างๆ

2.1 ความสำคัญของค่ากำลังบ่งชี้

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์ที่ใช้หลักการอัดตัวและขยายตัวของสารทำงาน เพื่อเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานทางกล โดยมีแหล่งให้พลังงานความร้อน(Heat source) ในการให้พลังงานความร้อนแก่เครื่องยนต์สเตอร์ลิงและแหล่งรับพลังงานความร้อน (Heat sink) เพื่อระบายความร้อนจากเครื่องยนต์สเตอร์ลิง เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีหลักการทำงานตามวัฏจักรสเตอร์ลิงทางทฤษฎี แสดงด้วย P-V diagram ดังรูปที่ 2

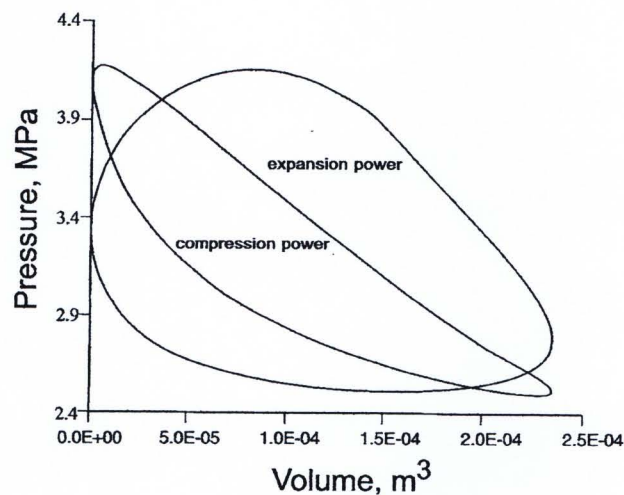


รูปที่ 2-1 วัฏจักรสเตอร์ลิงทางทฤษฎี [11]

กำลังสุทธิที่ได้จากเครื่องยนต์ในทางทฤษฎีควรมีค่าเท่ากับกำลังสุทธิที่ได้จากวัฏจักรการทำงานในทางทฤษฎี แต่ในความเป็นจริงเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีการสูญเสียเกิดขึ้นทั้งก่อนเข้าวัฏจักรการทำงาน เช่น การสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนที่ระบายออกไปกับน้ำหล่อเย็น, การสูญเสียภายในความร้อนภายใน regenerator และหลังจากออกจากวัฏจักร เช่น การสูญเสียทางกล, การสูญเสียเนื่องจากความดันภายในปริมาตรห้องเครื่อง การประเมินการสูญเสียเหล่านี้ให้ได้

ถูกต้องจึงมีความจำเป็นต้องวัดค่ากำลังบ่งชี้ เพื่อใช้ในการประเมินการสูญเสียของเครื่องยนต์ให้มีความถูกต้องมากที่สุด

จากที่กล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่า ค่ากำลังบ่งชี้เป็นปัจจัยสำคัญในการประเมินการสูญเสียให้ได้อย่างถูกต้อง ซึ่งการวัดค่ากำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์สามารถทำได้ โดยการวัดความดันและปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงภายในกระบอกสูบทั้งทางฝั่ง expansion space และ compression space เพื่อนำมาคำนวณ expansion power และ compression power จากพื้นที่ใต้กราฟของแผนภาพ P-V แสดงดังรูปที่ 2-2 [12] นอกจากนี้ ค่ากำลังบ่งชี้ยังสามารถประเมินได้จากการใช้แนวคิดของ Hirata, K. [7] ซึ่งจะกล่าวถึงวิธีการประเมินค่ากำลังบ่งชี้ดังกล่าวในบทที่ 3 นอกจากนี้ยังมีวิธีการประเมินค่ากำลังบ่งชี้อีกวิธีหนึ่งคือ การประเมินค่ากำลังบ่งชี้จากการคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลข โดยมีรูปแบบการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 3 แบบ [14] คือ การวิเคราะห์แบบ isothermal ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบอุณหภูมิภายใน expansion space และ compression space คงที่, การวิเคราะห์แบบ adiabatic ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบการถ่ายเทความร้อนภายใน expansion space และ compression space คงที่ และ การวิเคราะห์แบบ simple ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบ adiabatic ที่มีการประเมินการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานการไหลร่วมด้วย ในการคำนวณค่ากำลังบ่งชี้ด้วยวิธีเชิงตัวเลขเป็นรูปแบบการวิเคราะห์ที่ให้ค่ากำลังบ่งชี้ใกล้เคียงกับค่ากำลังบ่งชี้ที่ได้จากการวัดมากที่สุด

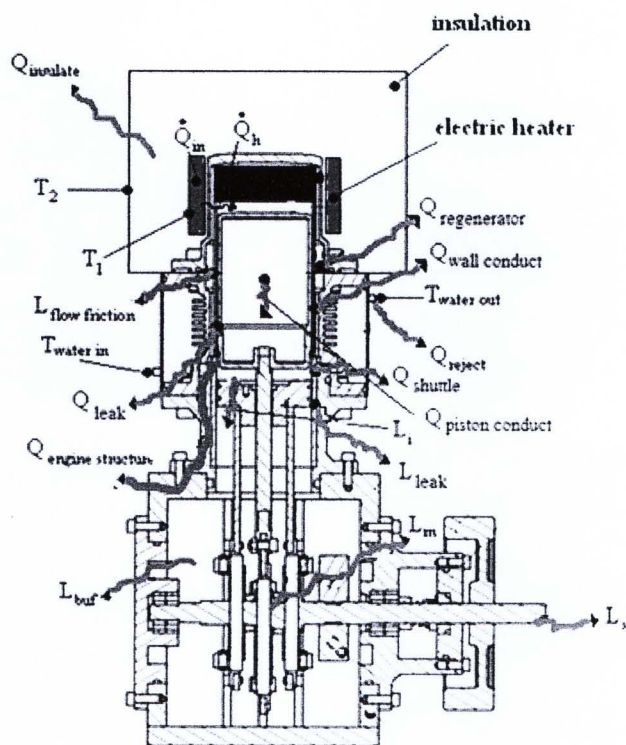


รูปที่ 2-2 แผนภาพ P-V ของ expansion space และ compression space

2.2 กลไกการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

การสูญเสียที่เกิดขึ้นของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงอาจแบ่งตามลักษณะทางกายภาพได้เป็น 4 รูปแบบดังที่กล่าวข้างต้น นอกจากนี้การสูญเสียในแต่ละรูปแบบของลักษณะทางกายภาพสามารถ

แบ่งเป็นการสูญเสียต่างๆได้อีกหลายรูปแบบด้วยกัน ซึ่งสามารถแสดงเป็นแผนภาพรวมการสูญเสียที่เกิดขึ้นของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้ดังรูปที่ 2-3 จากรูปแสดงให้เห็นว่า เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีการสูญเสียเกิดขึ้นในระหว่างการทำงานด้วยกันหลายรูปแบบ ซึ่งมีผลทำให้กำลังบ่งชี้และกำลังขาออกมีค่าลดลง



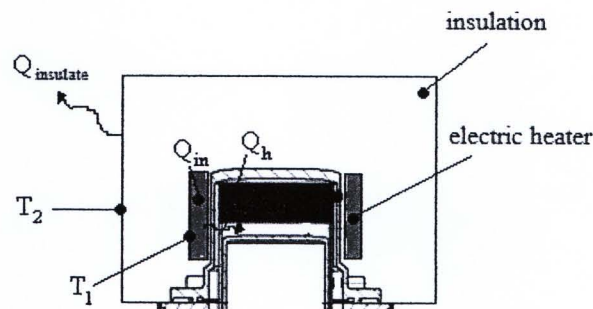
รูปที่ 2-3 กลไกการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง [14]

2.3 การสูญเสียทางความร้อน

2.3.1 การสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์

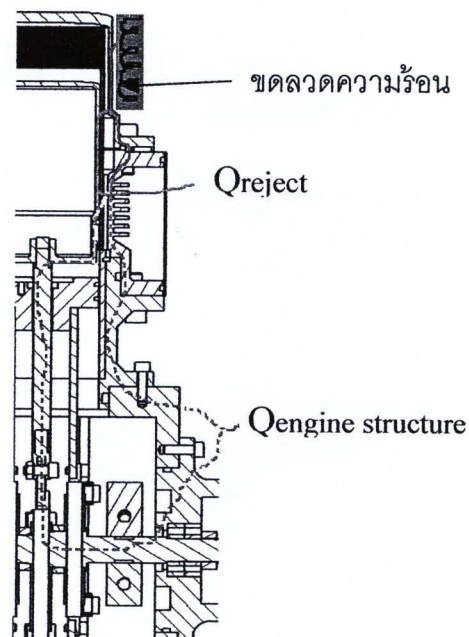
เครื่องยนต์สเตอร์ลิงจำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายพลังงานความร้อนเพื่อให้พลังงานความร้อนแก่เครื่องยนต์ ซึ่งแหล่งพลังงานความร้อนนี้อาจเป็น พลังงานแสงอาทิตย์, ก๊าซไอเสียจากโรงงาน และอื่นๆ แต่ในงานวิจัยส่วนใหญ่ [1,2,8,11] จะใช้ขดลวดความร้อนเป็นแหล่งพลังงานแทน เพื่อความสะดวกในการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ ความร้อนจากขดลวดความร้อน (Q_{in}) เป็นความร้อนทั้งหมดที่ให้แก่เครื่องยนต์ แต่ไม่ใช่ความร้อนทั้งหมดที่ไหลเข้าสู่เครื่องยนต์เนื่องจากมีการสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ (Q_b) ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ การสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านฉนวน ($Q_{insulate}$) และการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านโครงสร้างของเครื่องยนต์ ($Q_{engine structure}$) สำหรับการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่าน

ฉนวนเกิดจากการนำความร้อนจากอุณหภูมิ T_1 ที่บริเวณผิวของชุดลดความร้อนไปยังอุณหภูมิ T_2 ที่บริเวณผิวของฉนวน แสดงดังรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-4 การสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านฉนวน [14]

ในส่วนของการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านโครงสร้างเครื่องยนต์แสดงดังรูปที่ 2-5 การสูญเสียดังกล่าวเกิดจากการนำความร้อนผ่านผนังกระบอกสูบจากฝั่ง heater มายังลูกสูบ displacer และผนังกระบอกสูบฝั่ง cooler ความร้อนบางส่วนจะถูกระบายออกไปกับน้ำหล่อเย็น ในรูปของความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์ (Q_{reject}) ซึ่งแสดงในรูปเป็นเส้นทึบ ความร้อนในส่วนที่เหลือจากการระบายออกไปกับน้ำหล่อเย็นจะไหลตามผนังกระบอกสูบและก้านลูกสูบ displacer มายังผนังปริมาตรห้องเครื่องที่อยู่ด้านล่างของเครื่องยนต์ ซึ่งแสดงเป็นเส้นปะ ความร้อนในส่วนนี้เรียกว่า การสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านโครงสร้างเครื่องยนต์ ($Q_{engine\ structure}$)



รูปที่ 2-5 การสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านโครงสร้างเครื่องยนต์ [14]

การสูญเสียความร้อนทั้ง 2 รูปแบบนี้เป็นการสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ (Q_b) ซึ่งทำให้ความร้อนจากขดลวดความร้อน (Q_{in}) ไม่สามารถไหลเข้าสู่เครื่องยนต์ได้ทั้งหมด วิธีการประเมินการสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ (Q_b) Hirata, K. [1] เสนอแนวทางการประเมินการสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ (Q_b) โดยประเมินความร้อนที่เข้าสู่เครื่องยนต์จริง (Q_h) ซึ่งเป็นความร้อนที่เหลือจากการสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์ (Q_b) จากสมการ

$$Q_h = Q_{reject} + L_i \quad (2.1)$$

เพื่อที่จะนำความร้อนที่เข้าสู่เครื่องยนต์จริง (Q_h) มาประเมินความร้อนที่สูญเสียออกจากระบบได้จากสมการ

$$Q_b = Q_{in} - Q_h \quad (2.2)$$

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่า การสูญเสียความร้อนภายนอกเครื่องยนต์เป็นการสูญเสียที่มีความสำคัญมาก เนื่องจาก การสูญเสียนี้เป็นตัวกำหนดปริมาณความร้อนที่เข้าสู่เครื่องยนต์จริงที่จะถูกนำไปใช้ในการผลิตกำลังของเครื่องยนต์

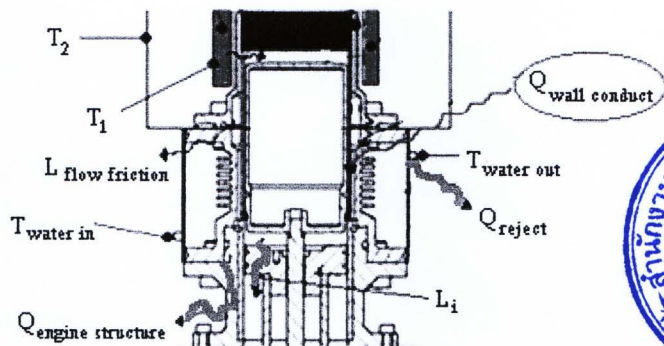
2.3.2 การสูญเสียจากการนำความร้อน

การสูญเสียจากการนำความร้อน คือ การสูญเสียความร้อนเนื่องจากการนำความร้อนระหว่าง 2 ตำแหน่งของเครื่องยนต์ซึ่งมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการสูญเสียจากการนำความร้อน 4 รูปแบบคือ การสูญเสียจากการนำความร้อนในผนังกระบอกสูบ, shuttle loss, การนำความร้อนเนื่องจากการรั่วของก๊าซทำงาน และ การสูญเสียจากการนำความร้อนผ่านตัวลูกสูบ

2.3.2.1 การสูญเสียจากการนำความร้อนในผนังกระบอกสูบ

การถ่ายเทความร้อนจากขดลวดความร้อนให้แก่สารทำงานเกิดจากการนำความร้อนผ่านกระบอกสูบจากผิวด้านนอกที่ติดกับขดลวดความร้อนมายังผิวด้านใน เพื่อให้สารทำงานสามารถรับความร้อนที่ได้จากขดลวดความร้อนไปผลิตกำลังภายใน expansion space ซึ่งในระหว่างการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังกระบอกสูบจะมีการสูญเสียจากการนำความร้อนเกิดขึ้น เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิผนังด้านบนฝั่ง heater และอุณหภูมิผนังด้านล่างฝั่ง cooler ทำให้เกิดการนำความร้อนขึ้น เป็นสาเหตุให้ความร้อนบางส่วนจากผนัง heater ถ่ายเทลงไปสู่ผนัง cooler ความร้อนที่ถ่ายเทลงมานี้บางส่วนจะระบายออกจากเครื่องยนต์ในรูปของความร้อนที่ระบายออกจาก

เครื่องยนต์ ซึ่งความร้อนส่วนที่เหลือจะถูกถ่ายเทลงไปตามโครงสร้างของเครื่องยนต์หรือที่เรียกว่า การสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผ่านโครงสร้างเครื่องยนต์ [13] แสดงดังรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-6 การสูญเสียจากการนำความร้อนในผนังกระบอกสูบ [14]

Hargreave, C.M. [13] ประเมินการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนในผนังกระบอกสูบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาด 14 kW ที่ความเร็ว 600 rpm เครื่องยนต์มีความหนาของผนังกระบอกสูบประมาณ 1.6 cm ซึ่งใช้เหล็ก 18-8 เป็นวัสดุที่ใช้ในการทำกระบอกสูบ และมีค่าคงที่การนำความร้อนเท่ากับ $0.18 \text{ W/cm}^2\text{C}$ ที่อุณหภูมิ 300°C โดยติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ผนังกระบอกสูบ เพื่อวัดผลต่างอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างด้าน heater และ cooler ที่ความเร็วรอบ 300 rpm และ 600 rpm จากนั้นนำผลต่างอุณหภูมิที่ได้ในแต่ละความเร็วรอบมาคำนวณหาการสูญเสียจากการนำความร้อนในผนังกระบอกสูบจากสมการ

$$Q_{\text{wall conduct}} = -kA \frac{\Delta T_i}{\Delta x} \quad (2.3)$$

เมื่อ ΔT_i คือ ผลต่างของอุณหภูมิผิวด้านบน และ ผิวด้านล่างของผนังกระบอกสูบ ($^\circ\text{K}$), k คือ ค่าคงที่การนำความร้อน ($\text{W/m}^2\text{k}$), A คือ พื้นที่หน้าตัดของการนำความร้อน (m^2) และ Δx คือ ระยะทางในการนำความร้อน (m) ผลการประเมินพบว่า การสูญเสียจากการนำความร้อนในผนังกระบอกสูบมีค่าประมาณ 600 W คิดเป็น 2% ของความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์ ซึ่งถือว่ามิติน้อยเมื่อเทียบกับความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์ นอกจากนี้ยังพบว่า เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีขนาดใหญ่ การสูญเสียจากการนำความร้อนในผนังกระบอกสูบจะมีค่าน้อยกว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีขนาดเล็ก ดังนั้น เครื่องยนต์ขนาดใหญ่ที่มีระดับความหนาของผนังกระบอกสูบมากกว่า 1 ซม. สามารถไม่พิจารณาการสูญเสียความร้อนในส่วนนี้ได้

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 8 ส.ย. 2555
เลขทะเบียน 246296

Otaka,T. [9] สร้างเครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิงขนาด 100 W ซึ่งสามารถเปลี่ยนการทำงานให้เป็นเครื่องยนต์โดยใช้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องในฝั่ง heater และใช้ไนโตรเจนเหลวเป็นสารหล่อเย็นในฝั่ง cooler เพื่อสร้างผลต่างอุณหภูมิ การประเมินการสูญเสียจากการนำความร้อนในผนังกระบอกสูบมีวิธีดังนี้ คือ เดินเครื่องทำความเย็นให้อุณหภูมิฝั่งเย็นต่ำกว่า 173 °K จากนั้นหยุดการทำงานของเครื่องทำความเย็นแล้ววัดผลต่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงบนผนังกระบอกสูบเทียบกับเวลา ผลที่ได้นำมาเขียนกราฟเพื่อหาค่าคงที่สำหรับการใช้ในการประเมินการสูญเสียจากการนำความร้อนผ่านผนังกระบอกสูบ จากสมการ

$$Q_{wall\ conduct} = const(T_c - T_e) = mc_p \left(\frac{\Delta T}{\Delta t} \right) \quad (2.4)$$

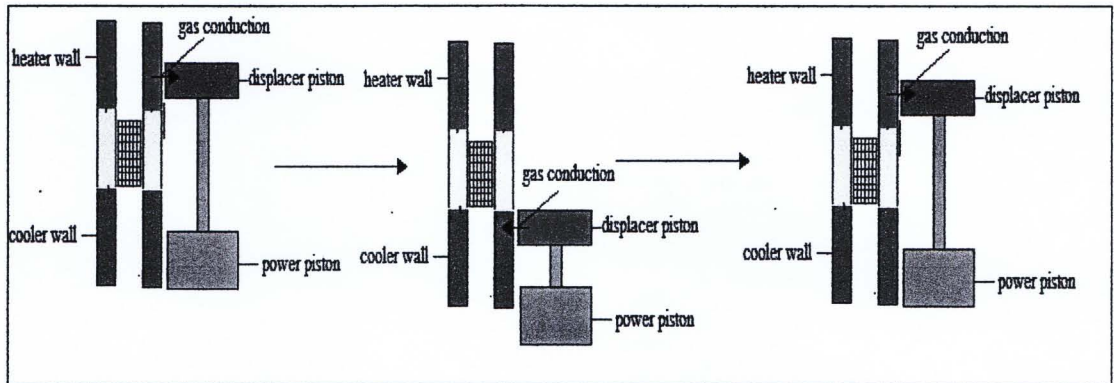
เมื่อ T_e คือ อุณหภูมิผนังกระบอกสูบฝั่งร้อน(°K), T_c คือ อุณหภูมิผนังกระบอกสูบฝั่งเย็น (°K), m คือ มวลของผนังกระบอกสูบที่เกิดการนำความร้อน (kg), c_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของผนังกระบอกสูบ (J/kg °K), ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิผนังกระบอกสูบฝั่งร้อนและอุณหภูมิผนังกระบอกสูบฝั่งเย็น (°K) และ Δt คือ ระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป (s) ผลการทดสอบของ Otaka,T. [10] พบว่า ค่าคงที่ที่ได้จากสมการข้างต้นมีค่า 0.079 ซึ่งค่าคงที่นี้ไม่สามารถนำมาใช้ได้เครื่องยนต์ทุกผลต่างอุณหภูมิ เนื่องจากมีผลของการแผ่รังสีความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ค่าคงที่นี้เปลี่ยนแปลงไปเมื่อผลต่างอุณหภูมิสูงขึ้นถึงระดับหนึ่ง ดังนั้น สมการข้างต้นจึงเหมาะสมสำหรับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิต่ำ

การสูญเสียจากการนำความร้อนภายในผนังกระบอกสูบเป็นอีกการสูญเสียหนึ่งที่มีความสำคัญในเครื่องยนต์ขนาดเล็ก เนื่องจากการสูญเสียจากการนำความร้อนภายในผนังกระบอกสูบเป็นการสูญเสียที่มีผลต่อปริมาณความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์และปริมาณความร้อนที่เกิดการนำความร้อนผ่านโครงสร้างเครื่องยนต์ ซึ่งความร้อนในส่วนนี้มีปริมาณค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับการสูญเสียอื่นๆ

2.3.2.2 Shuttle loss

shuttle loss คือ การสูญเสียจากการนำความร้อนเนื่องจากการเคลื่อนที่ขึ้นลงของลูกสูบ displacer ผ่านผนังกระบอกสูบด้านบนที่มีอุณหภูมิสูงลงมายังผนังด้านล่างที่มีอุณหภูมิต่ำแสดงดังรูปที่ 2-7 จากรูปแสดงให้เห็นว่า shuttle loss มีลักษณะการเกิดดังนี้คือ จังหวะที่ลูกสูบ displacer เคลื่อนที่มาอยู่ด้านบน ความร้อนที่หลงเหลืออยู่ในผนังกระบอกสูบจะถ่ายเทจากผนังกระบอกสูบมายังลูกสูบ displacer ในรูปแบบการนำความร้อนและ จังหวะที่ลูกสูบ displacer

เคลื่อนที่ลงมาด้านล่างความร้อนที่อยู่ในลูกสูบ displacer จะเกิดการถ่ายเทความร้อนให้กับผนังที่อุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนกลับไปที่ด้านบน [6]



รูปที่ 2-7 การสูญเสียความร้อนแบบ shuttle loss

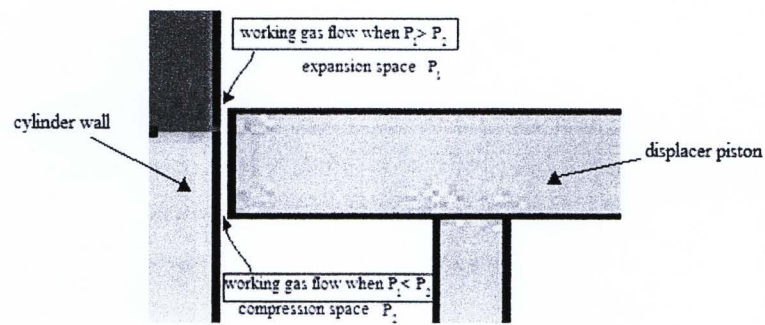
Martini, S. [15] ได้เสนอความสัมพันธ์ที่ได้จากผลการทดสอบสำหรับการใช้ในการคำนวณ shuttle loss โดยสามารถคำนวณ shuttle loss ได้จากสมการ

$$Q_{sh} = \pi k D S^2 \frac{T_E - T_C}{8 \delta L} \quad (2.5)$$

เมื่อ k คือ ค่าการนำความร้อนของก๊าซทำงาน ($W/m^2 \cdot ^\circ K$), D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ displacer (cm), S คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกสูบ displacer (cm), T_E คือ อุณหภูมิฝั่งร้อน ($^\circ K$), T_C คือ อุณหภูมิฝั่งเย็น ($^\circ K$), δ คือ ระยะช่องว่างระหว่างกระบอกสูบและลูกสูบ displacer (cm) และ L คือ ความยาวลูกสูบ displacer (cm)

2.3.4 การนำความร้อนเนื่องจากการรั่วของก๊าซทำงาน

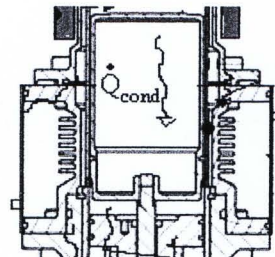
การนำความร้อนเนื่องจากการรั่วของก๊าซทำงาน (Q_{leak}) [14] คือ การสูญเสียความร้อนเนื่องจากการไหลของก๊าซทำงานกลับไปที่ด้านบนระหว่าง expansion space และ compression space โดยผ่านช่องว่างระหว่างผนังกระบอกสูบกับลูกสูบ displacer ซึ่งเป็นลูกสูบที่มีผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านบนและด้านล่างสูง ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นโดยใช้สารทำงานเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน แสดงดังรูปที่ 2-8



รูปที่ 2-8 การนำความร้อนเนื่องจากการรั่วของก๊าซทำงาน

2.3.2.3 การสูญเสียจากการนำความร้อนผ่านตัวลูกสูบ

การสูญเสียจากการนำความร้อนผ่านตัวลูกสูบ คือ การสูญเสียความร้อนเนื่องจากผลต่างอุณหภูมิด้านบนและด้านล่างของลูกสูบ displacer ทำให้เกิดการนำความร้อนผ่านตัวลูกสูบจาก expansion space ลงมายัง compression space มีผลทำให้อุณหภูมิภายใน compression space สูงขึ้น การสูญเสียในส่วนนี้จะถูกระบายออกจากเครื่องยนต์ในรูปของความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์ (Q_{reject}) แสดงดังรูปที่ 2-9



รูปที่ 2-9 การสูญเสียจากการนำความร้อนผ่านตัวลูกสูบ [14]

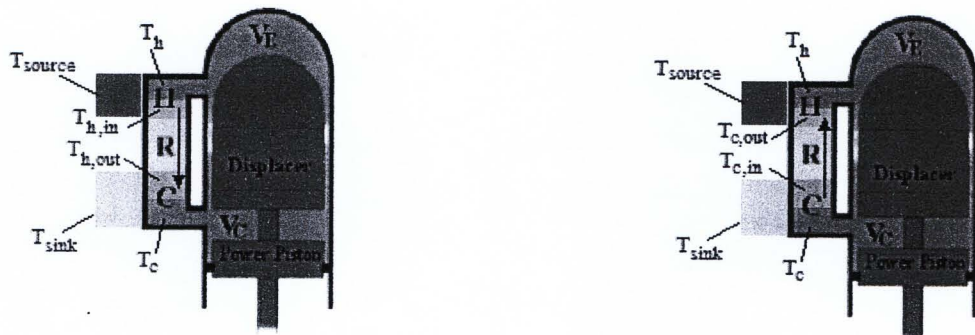
2.3.2.4 สรุป

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า การสูญเสียจากการนำความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเกิดขึ้นได้หลากหลายรูปแบบ แต่ในความเป็นจริง การทดสอบการสูญเสียจากการนำความร้อนไม่สามารถแยกเป็นแต่ละประเภทได้ เนื่องจากการประเมินการสูญเสียดังกล่าวมีความจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์การวัดที่มีความซับซ้อนสูง ดังนั้นการประเมินการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนจะพิจารณาการนำความร้อนผ่านผนังกระบอกสูบเพียงอย่างเดียวหรือประเมินการสูญเสียจากการนำความร้อนรวมของเครื่องยนต์ผ่านความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องยนต์ (Q_{reject}) ดังที่ Hirata, K. [7] ได้ประเมินการสูญเสียจากการนำความร้อนรวมของเครื่องยนต์จากสมการ

$$Q_{cond} = Q_{reject} - L_C - Q_{regen} \quad (2.6)$$

2.3.3 การสูญเสียความร้อนภายใน regenerator

การสูญเสียความร้อนภายใน regenerator เป็นการสูญเสียทางความร้อนที่เกิดจาก regenerator ไม่สามารถกักเก็บความร้อนที่ได้รับจากสารทำงานที่ไหลเข้า regenerator ที่อุณหภูมิ ($T_{h,in}$) ในวัฏจักรครั้งแรกได้ทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 2-10 ก ทำให้อุณหภูมิสารทำงานที่ไหลออกจาก regenerator มีอุณหภูมิสูงกว่าแหล่งระบายความร้อน ($T_{h,out} > T_c$) ในวัฏจักรครั้งหลังแสดงดังรูปที่ 2-10 ข สารทำงานจะไหลผ่าน regenerator ที่อุณหภูมิ ($T_{c,in}$) และไหลออกจาก regenerator ด้วยอุณหภูมิที่ต่ำกว่าแหล่งให้ความร้อน ($T_{c,out} < T_h$) ซึ่งทำให้ผลต่างอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนกับสารทำงานในฝั่ง heater และ สารทำงานกับแหล่งระบายพลังงานความร้อนในฝั่ง cooler ต่ำกว่าที่ควรจะเป็นเรียกว่า temperature deficit



ก. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในวัฏจักรครั้งแรก ข. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในวัฏจักรครั้งหลัง

รูปที่ 2-10 กลไกการสูญเสียความร้อนภายใน regenerator[15]

Minassian, A.D. [6] ประเมินการสูญเสียความร้อนภายใน regenerator จากสมการ

$$Q_{regenerator} = (1 - \epsilon) c_p \dot{m}_{ave} \Delta T_{r,ave} \quad (2.7)$$

เมื่อ ϵ คือ ประสิทธิภาพของ regenerator, c_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของผนังกระบอกสูบ ($J/kg \cdot ^\circ K$), $\dot{m}_{ave}$ คือ อัตราการไหลของมวลก๊าซทำงานเฉลี่ย (kg/s) และ $\Delta T_{r,ave}$ คือ ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยภายใน regenerator ($^\circ K$) นอกจากนี้ S. Iwamoto [11] เสนอวิธีการประเมินการสูญเสียความร้อนภายใน regenerator ผ่านการวัดความร้อนที่ระบายออกจาก

เครื่องยนต์ (Q_{reject}) ในรูปของการสูญเสียรวม ซึ่งเป็นผลรวมระหว่างการสูญเสียการสูญเสียความร้อนภายใน regenerator และการสูญเสียจากการนำความร้อน (Q_{other}) จากสมการ

$$Q_{other} = Q_{reject} - L_c \quad (2.8)$$

และ
$$Q_{reject} = \dot{m}_{water} c_p (T_{water,out} - T_{water,in}) \quad (2.9)$$

เมื่อ $\dot{m}_{water}$ คือ อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น (kg/s), c_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของน้ำ (J/kg K), $T_{water,out}$ คือ อุณหภูมิน้ำขาออกจาก cooler (°K) และ $T_{water,in}$ คือ อุณหภูมิน้ำขาเข้า cooler (°K)

2.4 การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานการไหล

การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานการไหล ($L_{flow friction}$) คือ การสูญเสียเนื่องจากการไหลของสารทำงาน ซึ่งเป็นผลมาจากความหนืดของสารทำงาน และ ความขรุขระของผิวสัมผัส การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานการไหลส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในส่วนของ regenerator เป็นผลทำให้ได้ expansion power ลดลง และ compression power เพิ่มขึ้น เนื่องจากการสูญเสียความดัน [7]

Minassian, A.D. [6] ได้เสนอสมการเพื่อใช้ในการคำนวณหาการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานการไหล โดยแบ่งเป็น 2 กรณี คือ Unidirectional flow และ Oscillating flow สำหรับ Unidirectional flow เป็นแนวทางในการประเมิน ซึ่งกล่าวถึงกำลังที่สูญเสียจากแรงเสียดทานการไหลภายใต้การไหลของสารทำงานในทิศทางเดียว ซึ่งสามารถคำนวณการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานการไหลได้จากสมการ

$$L_{flow friction} = \Delta p \dot{V} \quad (2.10)$$

เมื่อ Δp คือ ค่าการสูญเสียความดัน (Pa) และ $\dot{V}$ คือ อัตราการไหลของปริมาตร (m³/s) สำหรับค่าการสูญเสียความดันสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\Delta p = \frac{\rho}{2A_o^2} f \frac{L}{D_h} \dot{V}^2 \quad (2.11)$$

เมื่อ f คือ friction factor, ρ คือ ความหนาแน่นของก๊าซทำงาน (kg/m³), L คือ ความยาวของ heat exchanger, D_h คือ hydraulic diameter (m) และ A_o คือ พื้นที่ที่ก๊าซทำงานไหลผ่าน (m²) สำหรับค่า friction factor สามารถหาค่าได้จากกราฟ หรือ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$f = \frac{C_{sf}}{Re} + C_{fd} \quad (2.12)$$

เมื่อ C_{sf} คือ skin friction, C_{fd} คือ form drag และ Re คือ Reynolds number สำหรับ Oscillating flow เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่สมจริงมากกว่าในการประเมินการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานการไหล เนื่องจาก ในความเป็นจริงจะมีการเคลื่อนที่แบบไปกลับของลูกสูบ displacer ทำให้สารทำงานไหลกลับไปกลับมาระหว่าง expansion space และ compression space ซึ่งวิธีการก่อนหน้านี้ไม่ได้คำนึงถึง สำหรับวิธีคำนวณการการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานการไหล จะเริ่มจาก การคำนวณปริมาตรกวาด (V_{sw}) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาจากสมการ

$$V(t) = \frac{V_{sw}}{2} \sin(\omega t) + V_o \quad (2.13)$$

เมื่อ V_o คือ ปริมาตรตาย (m^3), ω คือ ความเร็วเชิงมุม (rad/s) และ t คือ เวลา (s) และคำนวณความดันสูญเสียในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากสมการ

$$\Delta p(t) = \Delta p_{max} \cos(\omega t) \quad (2.14)$$

โดยที่ Δp_{max} คือ ความดันสูญเสียสูงสุด (Pa) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\Delta p_{max} = \frac{\rho}{2} f_{max} \frac{L}{D_{hh}} u_{max}^2 = \frac{\rho}{2A_o^2} f_{max} \frac{L}{D_{hh}} \dot{V}_{max}^2 \quad (2.15)$$

เมื่อ

$$f_{max} = \frac{C_{sf}}{Re_{max}} + C_{fd} \quad (2.16)$$

$$Re_{max} = \frac{\rho}{\mu} D_h u_{max} \quad (2.17)$$

ผลการคำนวณข้างต้นจะนำมาใช้ในการคำนวณการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานการไหลจากสมการ

$$\bar{L}_{flow\ friction} = \frac{1}{T} \int_T \Delta p(t) dV(t) = \frac{A_o}{2} \Delta p_{max} u_{max} \quad (2.18)$$

เมื่อ u_{max} คือความเร็วสูงสุดของสารทำงาน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$u_{max} = \frac{1}{A_o} \frac{V_{sw} \omega}{2} \quad (2.19)$$

นอกจากการประเมินการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานการไหลด้วยวิธีข้างต้นแล้ว ยังมีนักวิจัยอีกท่านหนึ่งที่ศึกษาการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานการไหล คือ Hirata, K. [1] ได้ประเมินการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานการไหล โดยการวัดการความดันที่เปลี่ยนแปลงภายใน expansion space และ compression space แล้วนำผลที่ได้มาคำนวณการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานการไหล จากสมการ

$$L_{flow\ friction} = \int (P_E - P_C) dV_E * n \quad (2.20)$$

2.5 การสูญเสียทางกล

การสูญเสียทางกล(L_m) คือ การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานของกลไกในส่วนต่างๆ ของเครื่องยนต์ได้แก่ แรงเสียดทานระหว่างกระบอกสูบกับลูกสูบ, แรงเสียดทานภายใน bearing และแรงเสียดทานระหว่างก้านสูบกับลูกสูบกำลัง ซึ่งมีผลทำให้กำลังขาออกมีค่าลดลง

Hirata, K. [1] สร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิสูงขนาด 100 W ขึ้นหลังจากทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ขั้นต้นแล้ว พบว่ามีปริมาณการสูญเสียทางกลสูงถึง 40 W ที่ 1200 rpm จึงได้พัฒนาเครื่องยนต์ต่อโดยเปลี่ยนกลไกขับเคลื่อนใหม่เป็นแบบ hermetic และเคลือบผิวของผนังกระบอกสูบด้วย Molybdenum-disulfuride compound จากการทดสอบพบว่าสามารถลดการสูญเสียทางกลได้ 20 W [8]

Hargreave, C.M. [13] ประเมินการสูญเสียทางกล โดยถอดฝาสูบออกเพื่อตัดผลกระทบจาก pumping loss และเปิด crank case เพื่อตัดผลกระทบจากการสูญเสียเนื่องจากความดันภายใน buffer space จากนั้นใช้มอเตอร์หมุนเครื่องยนต์ แล้วนำกำลังไฟฟ้าขาออกที่วัดได้จากมอเตอร์ ($L_{electric}$) มาหักลบกับกำลังจากการสูญเสียภายในมอเตอร์ ($L_{motor\ loss}$) ผลลัพธ์ที่ได้คือการสูญเสียทางกลดังสมการ

$$L_m = L_{electric} - L_{motor\ loss} \quad (2.21)$$

2.6 การสูญเสียความดัน

การสูญเสียความดันภายในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจะมีด้วยกัน 2 ส่วน คือ การสูญเสียเนื่องจากการรั่วของสารทำงานที่ลูกสูบกำลังและการสูญเสียเนื่องจากความดันภายในปริมาตรห้องเครื่อง

2.6.1 การสูญเสียเนื่องจากการรั่วของสารทำงานที่ลูกสูบกำลัง

การสูญเสียเนื่องจากการรั่วของสารทำงานที่ลูกสูบกำลัง (L_{leak}) คือ การสูญเสียเนื่องจากการรั่วของสารทำงานจาก compression space ผ่านทางช่องว่างระหว่างลูกสูบกำลังและผนังกระบอกสูบลงสู่ปริมาตรห้องเครื่อง ซึ่งมีผลทำให้ค่ากำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์ลดลง

2.6.2 การสูญเสียเนื่องจากความดันภายในปริมาตรห้องเครื่อง

การสูญเสียเนื่องจากความดันภายในปริมาตรห้องเครื่อง (L_{buf}) คือ การสูญเสียจากการอัดและขยายตัวของสารทำงานภายในปริมาตรห้องเครื่อง ซึ่งทำให้มีการสูญเสียเนื่องจากการคายความร้อนของสารทำงานเกิดขึ้น (gas spring hysteresis loss)

Hirata, K. [1] เสนอวิธีการคำนวณการสูญเสียเนื่องจากความดันภายในปริมาตรห้องเครื่องโดยใช้การวิเคราะห์ 3 แบบ คือ การวิเคราะห์แบบ Isothermal, การวิเคราะห์แบบ Adiabatic และการวิเคราะห์แบบ Heat transfer ผลการคำนวณความดันภายในปริมาตรห้องเครื่องที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ข้างต้นจะนำมาใช้ในการคำนวณการสูญเสียเนื่องจากความดันภายในปริมาตรห้องเครื่องจากการสมการ

$$L_{buf} = - \oint P_{buf} dV_{buf} \cdot (n_s/60) \quad (2.22)$$

การสูญเสียเนื่องจากความดันภายในปริมาตรห้องเครื่องเป็นอีกการสูญเสียหนึ่งที่มีความสำคัญ เนื่องจาก การสูญเสียนี้จะขึ้นกับปริมาตรห้องเครื่องเป็นหลัก ดังนั้นการลดการสูญเสียดังกล่าวสามารถทำได้ง่ายโดยการเพิ่มขนาดปริมาตรห้องเครื่องให้มากขึ้น แต่การเพิ่มขนาด ปริมาตรห้องเครื่องก็ทำให้เครื่องยนต์มีขนาดใหญ่ขึ้นด้วยเช่นกัน

2.7 สรุป

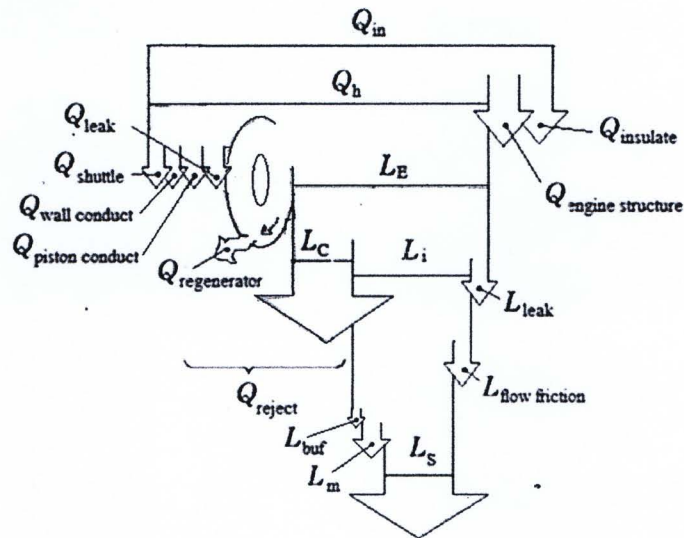
การศึกษากลไกการสูญเสียของเครื่องยนต์แสดงให้เห็นได้ว่า การสูญเสียต่างๆของเครื่องยนต์เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้สมรรถนะและประสิทธิภาพเครื่องยนต์ลดลง ซึ่งกลไกการสูญเสียทั้งหมดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถแสดงเป็นแผนภาพ sankey ได้ดังรูปที่ 2-11 แต่เพื่อให้แผนภาพ sankey มีความซับซ้อนน้อยลง การสูญเสียบางส่วนจะรวมเข้าด้วยกันจากความสัมพันธ์ดังสมการ

$$Q_{cond} = Q_{piston\ conduct} + Q_{shuttle} + Q_{leak} + Q_{wall\ conduct} \quad (2.27)$$

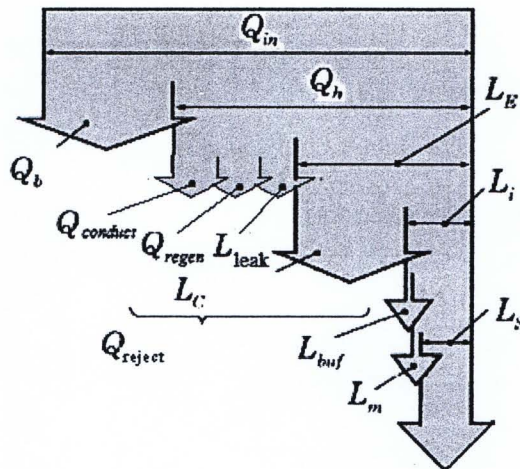
$$Q_{regen} = Q_{regenerator} + L_{flow\ friction} \quad (2.28)$$

$$Q_b = Q_{insulate} + Q_{engine\ structure} \quad (2.29)$$

แผนภาพ sankey ที่ได้จากการรวมการสูญเสียข้างต้นแสดงดังรูปที่ 2-12 ซึ่งแผนภาพนี้จะถูกใช้ในการพิจารณากลไกการสูญเสียหลักในบทที่ 3 ต่อไป



รูปที่ 2-11 กลไกการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง



รูปที่ 2-12 กลไกการสูญเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเมื่อรวมการสูญเสียเข้าด้วยกัน [7]