

บทที่ 2

ทฤษฎีและการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์

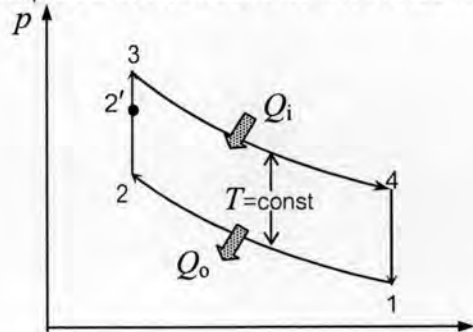
ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์เพื่อหาค่า หรือตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดการทำงานของเครื่องยนต์ การวิเคราะห์เบื้องต้นในบทนี้เป็นการพยายามหาสมรรถนะของเครื่องยนต์โดยใช้ทฤษฎีต่างๆ โดยจะระบุถึงตัวแปรที่จำเป็น จากเงื่อนไขการออกแบบตั้งต้น. เพื่อการทำงานได้ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง เช่น ความดันก๊าซ, ระดับความร้อนที่ฮีทเตอร์ หรือปริมาตรของส่วนประกอบต่างๆ

แบบจำลองที่ใช้อธิบายวัฏจักรของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง มีหลายรูปแบบ โดยจะเริ่มต้นด้วยแบบจำลองที่ง่ายที่สุดก่อน เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ได้โดยง่าย จากนั้นจึงปรับเปลี่ยนกระบวนการที่เกิดในวัฏจักร ให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น โดยประกอบด้วยการทำนายกำลังป้อนที่ด้วยแบบจำลองวัฏจักรสเตอร์ลิงแบบ Isothermal แบบ Adiabatic (Pseudo Stirling cycle) แบบ Schmidt และแบบ Adiabatic นอกจากนี้ ยังมีการทำนายกำลังขาออกด้วยสมการที่ได้มาจากการประมวลผลจากการทดลอง (Empirical formula) อันได้แก่ สมการของ Beale [11] สมการของ West และวิธีการของ Iwamoto [10] โดยในการนี้ จะได้ทำการทดสอบความสามารถในการทำนายสมรรถนะของแบบจำลองต่างๆกับเครื่องยนต์ต้นแบบเครื่องหนึ่ง ซึ่งมีข้อมูลมากเพียงพอที่จะทำการคำนวณได้ ในที่นี้จะใช้ ผลการทดลองของ Kagawa[6] เมื่อได้ทำการทดสอบจนทราบความสามารถในการทำนายสมรรถนะของการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์แล้ว จึงนำแบบจำลองนั้นไปใช้ร่วมกับเครื่องยนต์ในงานวิจัยนี้

2.1 แบบจำลองวัฏจักรสเตอร์ลิงอุดมคติแบบ Isothermal (Ideal Isothermal Stirling cycle)

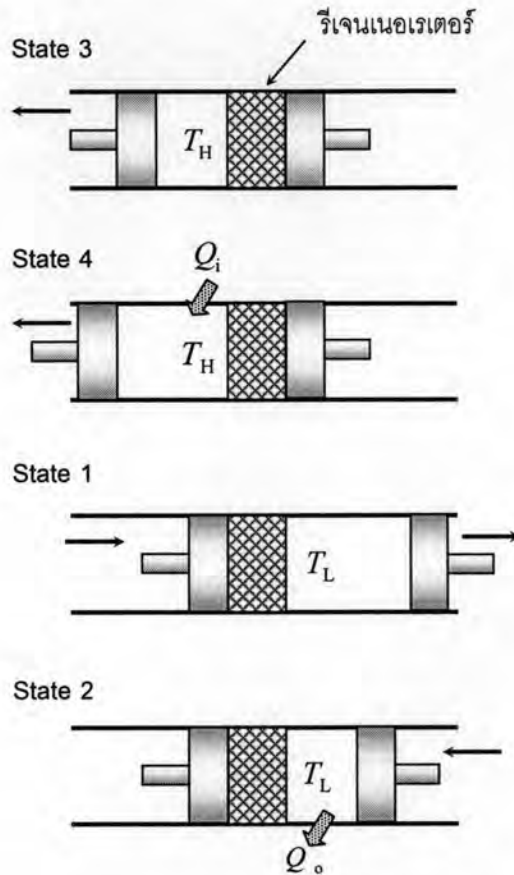
แบบจำลองนี้เป็นวิธีวิเคราะห์วัฏจักรแบบง่ายที่สุด โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความดันและการเปลี่ยนแปลงปริมาตรดังแสดงในรูปที่ 2-1 ซึ่งมีข้อสมมติฐานเพื่อการคำนวณดังนี้

1. เป็นกระบวนการย้อนกลับได้
2. สารทำงานคือก๊าซอุดมคติ
3. พิจารณาแก๊ซมีมวลเป็นกลุ่มเดียวเคลื่อนที่กลับไปกลับมา
4. ระบบอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady State)
5. ไม่มีการรั่วไหลของสารทำงาน
6. อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทุกชิ้น ยกเว้นรีเจนเนอเรเตอร์ ทำงานได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2-1 การเปลี่ยนแปลงความดันต่อปริมาตร ($p - V$ diagram) ของวัฏจักรสเตอร์ลิงแบบ Isothermal[1]

- 1-2 เป็นกระบวนการอัดตัวแบบอุณหภูมิคงที่ (คายความร้อนไปยังแหล่งภายนอก)
 2-3 เป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน ที่รีเจนเนอเรเตอร์ แบบปริมาตรคงที่
 3-4 เป็นกระบวนการขยายตัวแบบอุณหภูมิคงที่ (ได้รับความร้อนจากแหล่งภายนอก)



รูปที่ 2-2 การทำงานของวัฏจักรสเตอร์ลิง

กับการวางตัวของลูกสูบแบบอัลฟา [5]

ให้อุณหภูมิของก๊าซลดลงจาก T_H เหลือ T_L เมื่อเข้าสู่สภาวะ 1 อุณหภูมิของรีเจนเนอเรเตอร์ที่ด้านซ้ายสุดจะมีค่า T_H และที่ด้านขวาสุดจะมีค่า T_L คงอยู่อย่างนั้นไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

ระหว่างกระบวนการ 1-2 งานจากภายนอกกระทำกับลูกสูบทางด้านขวามือ เคลื่อนที่เข้าอัดก๊าซ ความร้อนจากการอัดตัวของก๊าซจะถ่ายเทไปยังแหล่งพลังงานที่มีอุณหภูมิต่ำ (T_L) ระหว่างกระบวนการนี้ก๊าซมีอุณหภูมิคงที่ T_L ในขณะที่ความดันเพิ่มขึ้น

ในช่วงสุดท้ายคือกระบวนการ 2-3 ลูกสูบทั้งสองเคลื่อนที่ไปทางซ้าย ด้วยอัตราการเคลื่อนที่เท่ากัน (ทำให้ปริมาตรคงที่) จนกระทั่งก๊าซทั้งหมดถูกผลักดันมายังด้านซ้ายของกระบอกสูบ โดยไหลผ่านรีเจนเนอเรเตอร์ ทำให้อุณหภูมิของก๊าซเพิ่มขึ้นจาก T_L เป็น T_H เป็นการทำงานครบวัฏจักร

ข้อสังเกตคือ ปริมาณความร้อนจากก๊าซถ่ายเทให้รีเจนเนอเรเตอร์ระหว่างกระบวนการ 4-1 เท่ากับปริมาณความร้อนจากรีเจนเนอเรเตอร์ที่ถ่ายเทให้ก๊าซระหว่างกระบวนการ 2-3 ซึ่งเป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ เพราะ

- 4-1 เป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน ที่รีเจนเนอเรเตอร์ แบบปริมาตรคงที่

วัฏจักรนี้สามารถอธิบายได้ด้วยระบบที่ประกอบด้วยกระบอกสูบ โดยมีลูกสูบอยู่ทั้ง 2 ข้าง และมีรีเจนเนอเรเตอร์อยู่ตรงกลาง ตัวรีเจนเนอเรเตอร์ใช้เป็นแหล่งเก็บความร้อนชั่วคราว ในสภาวะเริ่มต้น มวลของแก๊สทั้งหมดจะอยู่ทางซ้ายมือของกระบอกสูบ ที่อุณหภูมิสูงและความดันสูง

ระหว่างกระบวนการ 3-4 ความร้อนถูกป้อนให้กับแก๊สที่มีอุณหภูมิ T_H ทำให้แก๊สขยายตัวโดยอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง ลูกสูบขยายตัวทำให้เกิดงานความดันของแก๊สค่อยๆ ลดลง

ระหว่างกระบวนการ 4-1 ลูกสูบทั้งสองเคลื่อนที่ไปทางขวา ด้วยอัตราการเคลื่อนที่เท่ากัน (ทำให้ปริมาตรคงที่) จนกระทั่งก๊าซทั้งหมดถูกผลักดันมายังด้านขวาของกระบอกสูบ ขณะที่ก๊าซเคลื่อนที่ผ่านรีเจนเนอเรเตอร์ ความร้อนจากก๊าซจะถ่ายเทไปยังรีเจนเนอเรเตอร์ ทำ

ประสิทธิภาพของรีเจนเนอเรเตอร์ไม่เท่ากับ 100% ดังนั้นความร้อนที่รีเจนเนอเรเตอร์ ถ่ายเทให้กับก๊าซ จะทำให้ก๊าซมีอุณหภูมิเพิ่มได้ถึงตำแหน่ง 2' เท่านั้น กระบวนการ 2'-3 คือการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งความร้อนภายนอกให้กับก๊าซ ($Q_{2-3} = Q_{2-2'} + Q_{2'-3}$) เพื่อชดเชยความไม่สมบูรณ์ของรีเจนเนอเรเตอร์

ประสิทธิภาพของรีเจนเนอเรเตอร์ กำหนดโดยสมการ
$$\varepsilon = \frac{T_{2'} - T_2}{T_3 - T_2} \quad (1)$$

เมื่อพิจารณาพื้นที่ใต้กราฟของรูปที่ 2-1 พบว่า งานบ่งชี้สุทธิตลอดวัฏจักรสามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} W_{\text{tot}} &= W_{1-2} + W_{3-4} \\ &= \int_1^2 p dV + \int_3^4 p dV \\ &= mRT_1 \int_1^2 \frac{dV}{V} + mRT_3 \int_3^4 \frac{dV}{V} \\ &= mRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} + mRT_3 \ln \frac{V_4}{V_3} \end{aligned} \quad (2)$$

กำหนดให้ อัตราส่วนของอุณหภูมิคือ
$$\tau = \frac{T_H}{T_L}$$

และกำหนดให้ อัตราส่วนการอัดตัวเชิงปริมาตรคือ
$$\gamma_v = \frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} W_{\text{tot}} &= -mRT_1 \ln \gamma_v + mRT_3 \ln \gamma_v \\ &= mR \ln(\gamma_v)(T_H - T_L) \\ &= mRT_H \ln(\gamma_v) \left(\frac{\tau - 1}{\tau} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

กำหนดตัวแปรไร้หน่วย

$$W_n = \frac{\text{Indicated mean effective pressure}}{p_1} \quad (4)$$

โดย Indicated mean effective pressure =
$$\frac{\text{indicated work per cycle}}{\text{Volume}} = \frac{W_{\text{tot}}}{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}} \quad (5)$$

ดังนั้นเมื่อแทนสมการ (5) ลงใน สมการ(4) จะได้งานแบบไร้หน่วย
$$W_n = \frac{W_{\text{tot}}}{p_1(V_{\text{max}} - V_{\text{min}})} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{mRT_H \ln(\gamma_v) \left(\frac{\tau - 1}{\tau} \right)}{p_1(V_{\text{max}} - V_{\text{min}})} \\ &= \frac{mRT_H \ln(\gamma_v) \left(\frac{\tau - 1}{\tau} \right)}{\frac{mRT_L}{V_{\text{max}}}(V_{\text{max}} - V_{\text{min}})} \end{aligned}$$

ดังนั้น W_n สำหรับวัฏจักรแบบ Isothermal สามารถหาได้จาก
$$W_n = \frac{\gamma_v(\tau - 1) \ln(\gamma_v)}{\gamma_v - 1} \quad (7)$$

สำหรับประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency, η_{th}) $\eta_{th} = \frac{W_{tot}}{Q_{in}}$

จากรูปที่ 2-1 แสดงให้เห็นว่าความร้อนที่ใส่ให้กับระบบคือ กระบวนการ 2'-3-4 ดังนั้น

$$Q_{in} = Q_{2'-3} + Q_{3-4}$$

$$Q_{2'-3} \text{ คือกระบวนการปริมาตรคงที่ } Q_{2'-3} = mC_v(T_3 - T_{2'})$$

$$Q_{3-4} \text{ คือกระบวนการอุณหภูมิคงที่ } Q_{3-4} = mRT_H(\ln \gamma_v)$$

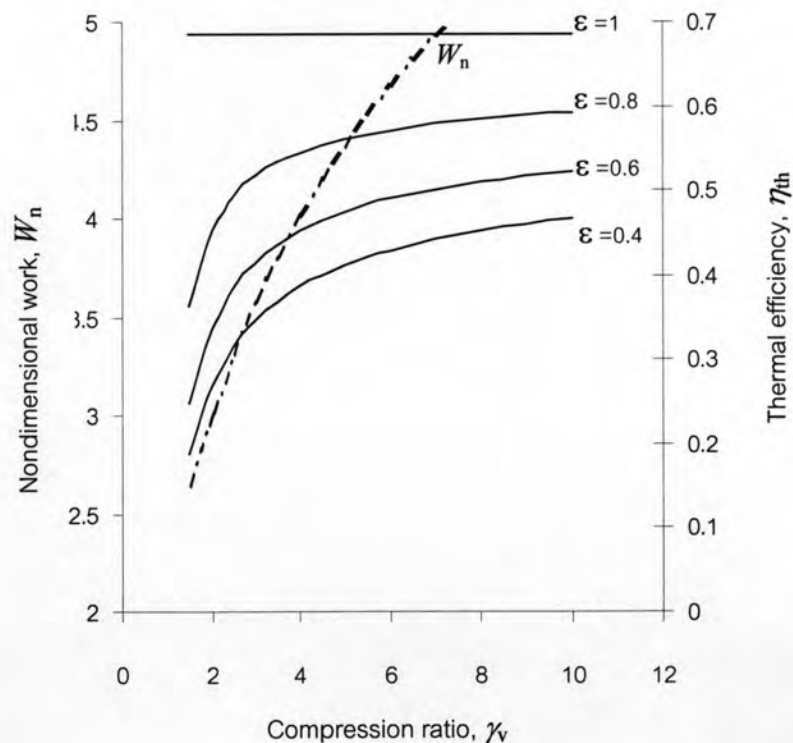
$$\text{ดังนั้นปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ระบบคือ } Q_{in} = mC_v(T_3 - T_{2'}) + mRT_H(\ln \gamma_v) \quad (8)$$

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสำหรับวัฏจักรแบบ Isothermal สามารถหาได้จาก

$$\eta_{th} = \frac{mRT_H \ln(\gamma_v) \left(\frac{\tau-1}{\tau}\right)}{mC_v(T_3 - T_{2'}) + mRT_H \ln(\gamma_v)}$$

$$= \frac{R \ln(\gamma_v) \left(\frac{\tau-1}{\tau}\right)}{C_v \left(\frac{\tau-1}{\tau}\right) (1-\varepsilon) + R \ln(\gamma_v)} \quad (9)$$

เมื่อนำประสิทธิภาพเชิงความร้อนจากสมการ (9) และงานแบบไร้หน่วยจากสมการ (7) มาพล็อตกับอัตราส่วนการอัดเชิงปริมาตรจะได้ผลดังรูปที่ 2-3



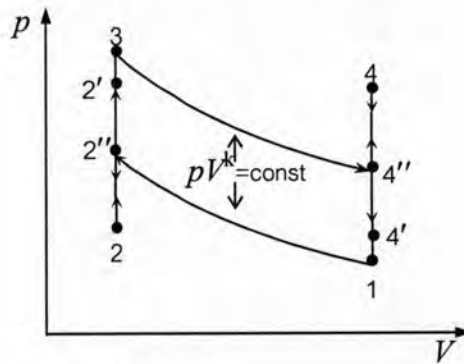
หมายเหตุ จากคุณสมบัติของอากาศ $C_v=0.749$ kJ/kg·K, $C_p = 0.163$ kJ/kg K, $R=0.3147$ kJ/kg·K และกำหนด $\tau=3.17$

รูปที่ 2-3 แนวโน้มของประสิทธิภาพเชิงความร้อนและงานแบบไร้หน่วย เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนการอัดเชิงปริมาตรสำหรับวัฏจักรแบบ Isothermal [1]

จากรูปที่ 2-3 ซึ่งแสดงการจำลองวัฏจักรสเตอร์ลิงแบบ Isothermal พบว่าแนวโน้มของ W_n และ η_{th} จะเพิ่มขึ้น โดยแปรผันตามค่า γ_v แต่เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์จริงพบว่า ประสิทธิภาพสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ $\gamma_v = 2 - 3$ แล้วจะมีค่าลดลง [3] ดังนั้นวัฏจักรแบบ Isothermal จึงไม่สามารถนำมาอธิบายถึงแนวโน้มพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงได้

ในสภาพจริง ลูกสูบของเครื่องยนต์มีการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นการยากที่จะบังคับให้กระบวนการอัด-ขยายตัว ทำงานที่อุณหภูมิคงที่ตลอดเวลา จึงได้มีการนำเสนอรูปแบบวัฏจักร ที่ใช้กระบวนการ Adiabatic เข้ามาแทนที่

2.2 แบบจำลองวัฏจักรสเตอร์ลิงแบบ Adiabatic (Pseudo Stirling cycle)



รูปที่ 2-4 การเปลี่ยนแปลงความดันต่อปริมาตร ($p - V$ diagram) ของวัฏจักรสเตอร์ลิงแบบ Adiabatic [1]

สำหรับวัฏจักรนี้ (รูปที่ 2-4) เมื่อเปรียบเทียบกับวัฏจักรข้างต้น กระบวนการ Isothermal ถูกแทนที่ด้วยกระบวนการ Reversible adiabatic โดยมีรายละเอียดดังนี้

- | | |
|---|---|
| 1 - 2'' การอัดตัวแบบ adiabatic | 3 - 4'' การขยายตัวแบบ adiabatic |
| 2'' - 2 การคายความร้อนออกผ่านคูเลเลอร์ | 4'' - 4 การดูดความร้อนผ่านฮีตเตอร์ |
| 2 - 2' การดูดความร้อนจากรีเจนเนอเรเตอร์ | 4 - 4' การคายความร้อนจากรีเจนเนอเรเตอร์ |
| 2' - 3 การดูดความร้อนผ่านฮีตเตอร์ | 4' - 1 การคายความร้อนออกผ่านคูเลเลอร์ |

สำหรับวัฏจักรแบบ Adiabatic การอัดตัวจะเกิดขึ้นพร้อมกับการเพิ่มอุณหภูมิของก๊าซ เช่นเดียวกับการขยายตัว ก็สามารถเกิดขึ้นพร้อมกับการลดลงของอุณหภูมิได้เช่นกัน

เมื่อพิจารณาพื้นที่ใต้กราฟของรูปที่ 2-4 พบว่า งานสุทธิตลอดวัฏจักร สามารถหาได้จาก

$$W_{tot} = W_{1-2''} + W_{3-4''} \quad (10)$$

กระบวนการ 1 - 2'' คือกระบวนการ Reversible adiabatic ดังนั้น

$$\begin{aligned} W_{1-2''} &= \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{1 - k} \\ &= \frac{mR(T_2 - T_1)}{1 - k} \end{aligned}$$

ใช้ความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของก๊าซอุดมคติ ภายใต้เงื่อนไข Reversible adiabatic $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1}$

$$W_{1-2^*} = \frac{mRT_1(\gamma_v^{k-1} - 1)}{1 - k} \quad (11)$$

ในทำนองเดียวกัน กระบวนการ 3 - 4''

$$\begin{aligned} W_{3-4^*} &= \frac{P_4^* V_4^* - P_3 V_3}{1 - k} \\ &= \frac{mRT_3(\gamma_v^{1-k} - 1)}{1 - k} \end{aligned} \quad (12)$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} W_{\text{tot}} &= \frac{mRT_1(\gamma_v^{k-1} - 1)}{1 - k} + \frac{mRT_3(\gamma_v^{1-k} - 1)}{1 - k} \\ &= \frac{mRT_3}{1 - k} \left[\frac{(\gamma_v^{k-1} - 1)}{\tau} + (\gamma_v^{1-k} - 1) \right] \end{aligned} \quad (13)$$

เมื่อพิจารณางานที่ได้ ในรูปแบบตัวแปรไร้หน่วย

จากสมการ (6)

$$\begin{aligned} W_n &= \frac{W_{\text{tot}}}{P_1(V_{\text{max}} - V_{\text{min}})} \\ &= \frac{mRT_3}{1 - k} \left[\frac{(\gamma_v^{1-k} - 1)}{\tau} + (\gamma_v^{k-1} - 1) \right] \\ &= \frac{mRT_1}{V_{\text{max}}} (V_{\text{max}} - V_{\text{min}}) \\ &= \frac{\gamma_v \tau}{(1 - k)(\gamma_v - 1)} \left[\frac{(\gamma_v^{k-1} - 1)}{\tau} + (\gamma_v^{1-k} - 1) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

สำหรับประสิทธิภาพเชิงความร้อน

$$\eta_{\text{th}} = \frac{W_{\text{tot}}}{Q_{\text{in}}}$$

จากรูปที่ 2-4 แสดงให้เห็นว่าความร้อนจาก ฮีตเตอร์ ที่ใส่ให้กับระบบคือ กระบวนการ 2' - 3 และ 4'' - 4 ดังนั้น

$$Q_{2'-3} = mC_v(T_3 - T_{2'})$$

สมมติว่าคูลเลอร์และฮีตเตอร์ ทำงานได้อย่างสมบูรณ์จะได้ว่า $T_L = T_2$ และ $T_H = T_3$ ตามลำดับ

และประสิทธิภาพของรีเจนเนอเรเตอร์ กำหนดโดยสมการ $\varepsilon = \frac{T_{2'} - T_2}{T_3 - T_2}$

ดังนั้น

$$Q_{2'-3} = mC_v T_H (1 - \varepsilon) \left(1 - \frac{1}{\tau}\right)$$

กระบวนการ 4'' - 4

$$Q_{4-4^*} = mC_v(T_4 - T_{4^*})$$

ใช้ความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของก๊าซอุดมคติ ภายใต้เงื่อนไข Reversible adiabatic $\frac{T_{4^*}}{T_3} = \left(\frac{V_3}{V_{4^*}}\right)^{k-1}$

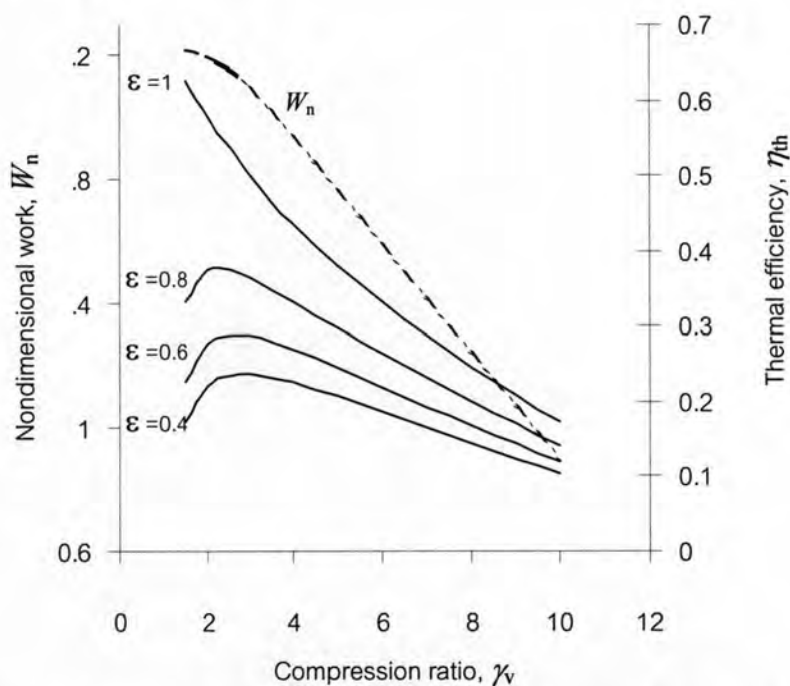
$$\begin{aligned} Q_{4-4^*} &= mC_v(T_4 - T_{4^*}) \\ &= mC_v T_H (1 - \gamma_v^{1-k}) \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสำหรับวัฏจักรแบบ Adiabatic สามารถหาได้จาก

$$\eta_{th} = \frac{\frac{mRT_3}{1-k} \left[\frac{(\gamma_v^{k-1} - 1)}{\tau} + (\gamma_v^{1-k} - 1) \right]}{mC_v T_H (1-\varepsilon) \left(1 - \frac{1}{\tau}\right) + mC_v T_H (1 - \gamma_v^{1-k})}$$

$$= \frac{\frac{R}{1-k} \left[\frac{(\gamma_v^{k-1} - 1)}{\tau} + (\gamma_v^{1-k} - 1) \right]}{C_v \left[(1-\varepsilon) \left(1 - \frac{1}{\tau}\right) + (1 - \gamma_v^{1-k}) \right]} \quad (15)$$

เมื่อนำประสิทธิภาพเชิงความร้อนจากสมการ (15) และงานแบบไร้หน่วยจากสมการ (14) มาพล็อตกับอัตราส่วนการอัดเชิงปริมาตรจะได้ผลดังรูปที่ 2-5



หมายเหตุ จากคุณสมบัติของอากาศ $C_v=0.749$ kJ/kg·K, $C_p = 0.163$ kJ/kg K, $R=0.3147$ kJ/kg·K และกำหนด $\tau=3.17$

รูปที่ 2-5 แนวโน้มของประสิทธิภาพเชิงความร้อนและงานแบบไร้หน่วย เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนการอัดเชิงปริมาตรสำหรับวัฏจักร แบบ Adiabatic[1]

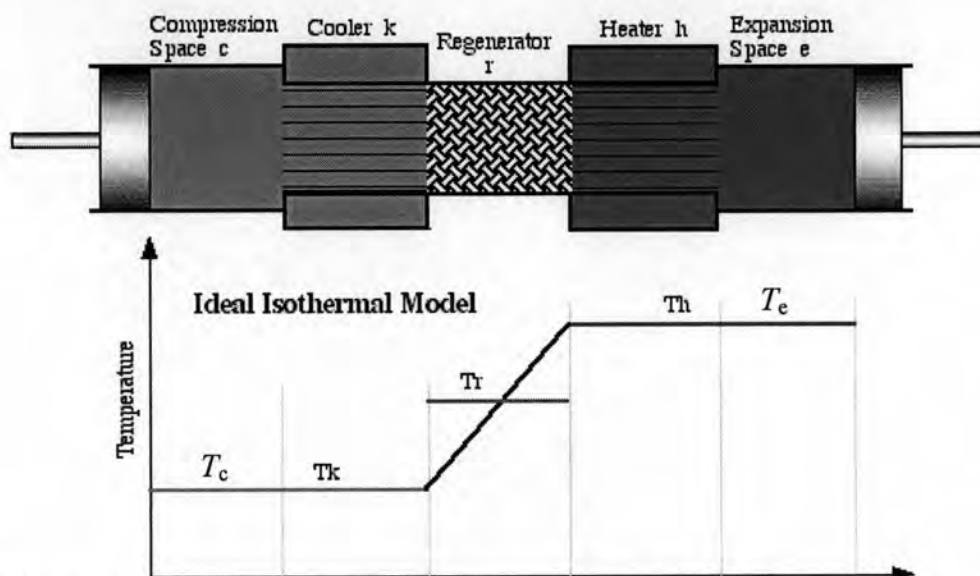
จากรูปที่ 2-5 สรุปได้ว่า การอธิบายกระบวนการอัด-ขยาย ตัวของลูกสูบด้วยกระบวนการ Adiabatic สามารถทำนายแนวโน้มของ η_{th} ได้ว่า มีค่าสูงสุดเมื่อ γ_v มีค่าประมาณ = 2-3 จากนั้นมีค่าลดลง และสำหรับ W_n มีแนวโน้มลดลงซึ่งค่อนข้างสอดคล้องกับพฤติกรรมของเครื่องยนต์จริง

อย่างไรก็ตามสิ่งที่เกิดขึ้นจริงนั้นต่างจากวัฏจักรทางอุดมคติตรงที่กลไกของเครื่องยนต์มักจะมีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาอย่างต่อเนื่องคล้ายกับการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิก ในหัวข้อถัดไปจะได้นำผลของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกมาอธิบายวัฏจักรสเตอร์ลิง

2.3 แบบจำลองวัฏจักรสเตอร์ลิงแบบ Isothermal – Harmonic motion (Schmidt analysis)

แบบจำลองนี้เสนอโดย Gustav Schmidt (หรือเรียกว่า Schmidt Analysis) เมื่อวิเคราะห์วัฏจักร โดยคำนึงถึงผลของการเคลื่อนที่ของลูกสูบในการทำงานจริงซึ่งเป็นการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิก จะพบว่าสมมติฐานต่างไปจากวัฏจักรแบบ Ideal Isothermal 2 ข้อ คือ

1. การเคลื่อนที่ของลูกสูบ เป็นแบบฮาร์มอนิก
2. รีเจนเนอเรเตอร์ทำงานได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2-6 การแบ่งปริมาตรของระบบ และการกระจายตัวของอุณหภูมิ สำหรับการวิเคราะห์แบบ Schmidt analysis[4]

จากรูปที่ 2-6 มีการแบ่งปริมาตรของระบบ ออกเป็น 5 ส่วน ประกอบไปด้วย

ปริมาตรอัดตัว (Compression space), c

ปริมาตรคูลเลอร์, k

ปริมาตรรีเจนเนอเรเตอร์, r

ปริมาตรฮีตเตอร์, h

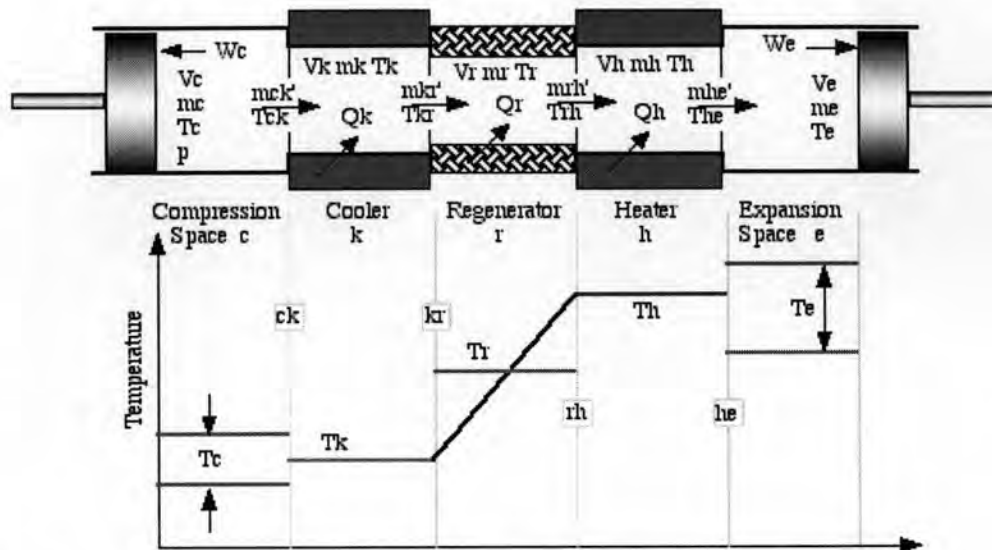
ปริมาตรขยายตัว (Expansion space), e

ตัวอักษร c k r h e ใช้อ้างอิงแทนปริมาตรต่างๆ

โดยที่ $T_c = T_k, T_e = T_h$

รายละเอียดการวิเคราะห์สามารถดูได้จากภาคผนวก ข. โดยสรุปคือ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในกระบอกสูบให้เป็นแบบฮาร์มอนิกแล้ว วิธี Schmidt analysis จะนำมาสู่ผลเฉลยในรูปแบบปิด (Closed form solution) สำหรับงานที่เกิดจากลูกสูบทั้งด้านร้อนและด้านเย็น (สมการ ข-25 ในภาคผนวก ข.) นั้น จะได้นำมาใช้เพื่อประเมินสมรรถนะของเครื่องยนต์ต่อไป

2.4 แบบจำลองวัฏจักรสเตอร์ลิงแบบ Adiabatic – Harmonic motion(Adiabatic analysis)



รูปที่ 2-7 การแบ่งปริมาตรของระบบ และการกระจายตัวของอุณหภูมิ สำหรับการวิเคราะห์แบบ Adiabatic analysis[4]

แบบจำลองนี้เป็นความพยายามที่จะอธิบายกระบวนการที่เกิดขึ้นให้ใกล้เคียงความเป็นจริงขึ้นอีก จากรูปที่ 2-7 มีการแบ่งปริมาตรออกเป็น 5 ส่วนเช่นกัน ประกอบไปด้วย c k r h e และมีจุดต่อ (interface) คือ ck, kr, rh, he แต่จะพิจารณาให้อุณหภูมิในปริมาตรอัดตัว และปริมาตรขยายตัว สามารถมีค่าขึ้นลงได้ตามกระบวนการ Adiabatic ดังนั้น T_c และ T_e มีค่าไม่คงที่ และต่อไปจะเรียกว่าวิธีนี้ Adiabatic analysis

รายละเอียดการวิเคราะห์ได้จากภาคผนวก ค. โดยสรุปก็คือวิธีการนี้จะให้ชุดของสมการ ที่ไม่สามารถหาผลเฉลยแบบในรูปแบบปิดได้ ดังนั้นจะใช้วิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาคำตอบของชุดสมการเหล่านี้ โดย Israel Urieli ได้ประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อแก้ระบบสมการดังกล่าว ในภาษา MATLAB ซึ่งสามารถ download ได้จาก www.ent.ohiou.edu/~urieli/stirling/me422.html และรายละเอียดของการใช้โปรแกรม ได้อธิบายไว้ในภาคผนวก ง.

2.5 กำลังที่ใช้อธิบายการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

จากการวิเคราะห์แบบจำลองต่างๆได้อธิบายเฉพาะการหากำลังบ่งชี้เท่านั้น แต่การหาสมรรถนะเครื่องยนต์ควรจะใช้กำลังขาออกมาเป็นตัวกำหนดด้วย ซึ่งความสัมพันธ์ของกำลังบ่งชี้และกำลังขาออกมีรายละเอียดดังนี้

2.5.1 กำลังบ่งชี้

กำลังบ่งชี้ (indicated power, P) เป็นกำลังที่ก๊าซในระบบสูบถ่ายทอดไปยังลูกสูบ กำลังบ่งชี้หาได้จากงานบ่งชี้สุทธิต่อหนึ่งวัฏจักรการทำงาน (indicated work per cycle, W_{tot}) ที่ได้จากการหาพื้นที่ใต้กราฟระหว่างความดันกับปริมาตรระบบสูบ ($p-V$ diagram) ตามความสัมพันธ์

$$P = nW_{\text{tot}} \quad (16)$$

เมื่อ n คือความเร็วรอบ มีหน่วยเป็น รอบต่อวินาที

2.5.2 กำลังขาออก

กำลังขาออก (brake power, P_B) เป็นกำลังที่วัดได้ที่เพลาช้อเหวี่ยง หรือที่ล้อช่วยแรง (fly wheel) ซึ่งเป็นกำลังที่นำไปใช้งานนั่นเอง ที่จริงแล้วกำลังขาออกไม่ได้วัดค่าออกมาโดยตรง แต่จะวัดออกมาในรูปของแรงบิด (torque, W_S) และความเร็วรอบ แล้วจึงนำมาคำนวณหา กำลังขาออกโดยใช้ความสัมพันธ์

$$P_B = 2\pi nW_S \quad (17)$$

และอัตราส่วนของกำลังขาออกกับกำลังบ่งชี้คือ ประสิทธิภาพเชิงกล (mechanical efficiency, η_m)

$$\eta_m = \frac{P_B}{P} \quad (18)$$

2.5.3 กำลังเสียดทาน

กำลังเสียดทาน (friction power, P_f) เป็นกำลังซึ่งเอาชนะแรงเสียดทานในชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องยนต์ เพื่อให้เครื่องยนต์ขับเคลื่อนได้ ดังนั้นจากนิยามของกำลังบ่งชี้และกำลังขาออกแล้วจะได้

$$P = P_B + P_f \quad (19)$$

2.6 การหากำลังของเครื่องยนต์โดยใช้สมการเชิงประจักษ์

จากหัวข้อที่ 2.1 – 2.4 เป็นการหากำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์ โดยการวิเคราะห์วัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งยังมีอีกวิธีการหากำลังของเครื่องยนต์อีกแบบหนึ่ง ทำได้โดยการแทนค่าลงในสมการ ที่ได้มาจากการประมวลผลจากการทดลอง (Empirical formula) ได้โดยตรง สำหรับสมการที่จะได้กล่าวต่อไปนี้เป็นผลจากการวิเคราะห์กำลังขาออก ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีความต่างอุณหภูมิสูงจำนวนมาก ซึ่งสมการเหล่านี้ถูกแนะนำให้ใช้ เป็นแนวทางในการประมาณกำลังขาออกสูงสุดในเชิงปฏิบัติ ของเครื่องยนต์หนึ่งๆ หากได้ทำการออกแบบมาแล้วอย่างเหมาะสม โดยในที่นี้จะพิจารณาสามรูปแบบคือ วิธีของ Beale วิธีของ West และวิธีของ Iwamoto

2.6.1 การหำลังเครื่องยนต์โดยใช้วิธีของ Beale

William Beale[11] ได้นำเสนอสมการ ที่ใช้ประมาณค่ากำลังที่ได้จากเครื่องยนต์ ซึ่งได้มาจากการทดสอบเครื่องยนต์ที่มีการใช้งานในช่วงอุณหภูมิด้านร้อนประมาณ 650 °C และ อุณหภูมิด้านเย็นประมาณ 50 °C และใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{power output} = \text{empirical} \times \text{piston swept} \times \text{engine} \times \text{mean cycle} \\ \text{constant} \quad \text{volume} \quad \text{speed} \quad \text{pressure}$$

หรือเขียนเป็นสมการได้

$$P_B = \beta_E \cdot V_{sc} \cdot p_m \cdot n \quad (20)$$

เมื่อ β_E คือค่าคงที่เรียกว่า Beale number มีค่าเท่ากับ 0.15 และรายละเอียดของของตัวแปรอื่นๆในสมการ(20) อธิบายไว้ในตารางที่ 2-1

2.6.2 การหาค่ากำลังเครื่องยนต์โดยใช้วิธีของ West

วิธีของ West เป็นสมการที่ใช้ประมาณกำลังที่ได้จากเครื่องยนต์อีกวิธีหนึ่ง ซึ่งสมการนี้มีเทอมของอุณหภูมิรวมอยู่ด้วย (ทำให้ไม่มีข้อจำกัดเรื่องอุณหภูมิใช้งาน) สามารถหาได้จาก

$$P_B = F \cdot p_m \cdot V_{se} \cdot n \cdot \frac{T_H - T_L}{T_H + T_L} \quad (21)$$

เมื่อ F คือค่าคงที่เรียกว่า West number มีค่าเท่ากับ 0.35 ถ้าเครื่องยนต์มีขนาดเล็กกว่า 5 kW และเท่ากับ 0.25 ถ้าเครื่องยนต์ให้กำลังในช่วง 5 – 150 kW สำหรับรายละเอียดของของตัวแปรอื่นๆในสมการ(21) อธิบายไว้ในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ตัวแปรและหน่วยที่ใช้ [12]

Parameter	Symbol	Unit
Shaft power output	P_B	W
Power piston swept volume	V_{se}	m^3
Engine speed	n	(rev/sec)
Mean cycle pressure	p_m	Pa
Beale number	β_E	
West number	F	

2.6.3 การหาค่ากำลังเครื่องยนต์และความเร็วรอบโดยใช้วิธีของ Iwamoto

การหาค่ากำลังด้วยวิธีของ Beale และ West มีจุดด้อยตรงที่ จำเป็นต้องทราบความเร็วรอบการทำงานเสียก่อน จึงจะนำไปคำนวณหาค่ากำลังขาออกได้ ซึ่งในการออกแบบจริง การไม่มีความเร็วรอบเพื่อตั้งต้นในการคำนวณนับเป็นปัญหาสำคัญของการใช้วิธีของ Beale และ West ให้ได้ค่าทำนายกำลังขาออกที่แม่นยำ สำหรับวิธีของ Iwamoto[10] เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์เพื่อหาค่ากำลังและความเร็วรอบไปพร้อมๆกัน โดยใช้ตัวแปรพื้นฐานในการออกแบบต่างๆ p_m , V_{se} , T_H , T_L , n นำมาจัดเป็นกลุ่มให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ แล้วหาสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านี้

แต่จากการทดสอบวิธีการของ Iwamoto ในภาคผนวก จ. ตารางที่ จ.3 พบว่าการคำนวณหาค่ากำลังขาออกให้ความคลาดเคลื่อนที่สูง แต่ให้ค่าประมาณความเร็วรอบที่ดี ดังนั้นจะนำวิธีการนี้มาใช้คำนวณหาความเร็วรอบเท่านั้น

2.7 การเปรียบเทียบผลการคำนวณทางทฤษฎีกับผลการทดลอง

การวิเคราะห์ทางทฤษฎีด้วยแบบจำลองที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น มีการตั้งข้อสมมติฐานต่างๆไว้มากมาย ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเอาผลการคำนวณทางทฤษฎี มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากตัวอย่างเครื่องยนต์จริงซึ่งจะได้ข้อสรุปว่า แบบจำลองใด ที่ให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด

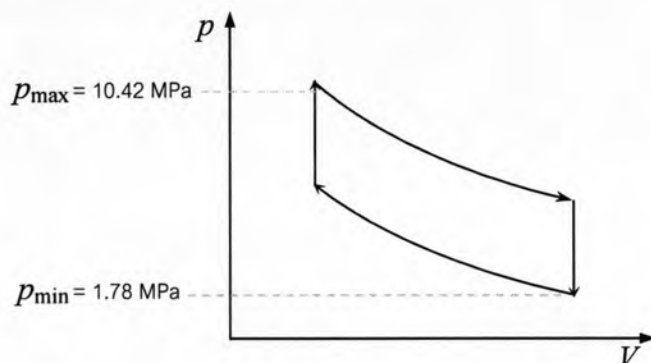
2.7.2 ผลการคำนวณด้วยวัฏจักร Isothermal

จากกฎของก๊าซอุดมคติ สำหรับวัฏจักรแบบ Isothermal $p_{\max} = \frac{mRT_H}{V_{\min}}$ และ $p_{\min} = \frac{mRT_L}{V_{\max}}$ ทำให้

$$\frac{p_{\max}}{p_{\min}} = \frac{T_H}{T_L} \cdot \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \tau \cdot \gamma_v \quad \text{และประมาณความดันเฉลี่ยด้วยสมการ} \quad p_m = \frac{(p_{\max} + p_{\min})}{2}$$

ดังนั้น $p_m = \frac{p_{\min}(\tau \cdot \gamma_v + 1)}{2}$ แทนค่า $\gamma_v = 1.63$, $\tau = 3.6$ และ $p_m = 6.1$ MPa

ได้ $p_{\min} = 1.78$ MPa และ $p_{\max} = 10.42$ MPa



จากสมการ (7)

$$W_n = \frac{\gamma_v(\tau - 1) \ln(\gamma_v)}{\gamma_v - 1} = \frac{W_{\text{tot}}}{p_{\min}(V_{\max} - V_{\min})}$$

$$\frac{1.63(3.6 - 1) \ln 1.63}{1.63 - 1} = \frac{W_{\text{tot}}}{1.78 \times 10^6 (235 \times 10^{-6})}$$

$$W_{\text{tot}} = 1372 \text{ J}$$

กำลังบ่งชี้หาได้จากสมการ(16)

$$\begin{aligned} P &= n W_{\text{tot}} \\ &= (20.8) \cdot (1372) \\ &= 28.54 \text{ kW} \end{aligned}$$

ดังนั้นผลจากการคำนวณโดยวัฏจักรแบบ Isothermal ให้กำลังบ่งชี้ 20.54 kW

2.7.3 ผลการคำนวณด้วยวัฏจักร Adiabatic

จากสมการ (14) $W_n = \frac{\gamma_v \tau}{(1 - k)(\gamma_v - 1)} \left[\frac{(\gamma_v^{k-1} - 1)}{\tau} + (\gamma_v^{1-k} - 1) \right] = \frac{W_{\text{tot}}}{p_{\min}(V_{\max} - V_{\min})}$

และ $k = 1.67$ เมื่อใช้ Helium เป็นสารทำงาน

$$\frac{1.63(3.6)}{(1 - 1.67)(1.63 - 1)} \left[\frac{(1.63^{0.67} - 1)}{3.6} + (1.63^{0.67} - 1) \right] = \frac{W_{\text{tot}}}{1.78 \times 10^6 (235 \times 10^{-6})}$$

$$W_{\text{tot}} = 947 \text{ J}$$

จากสมการ(16)

$$\begin{aligned} P &= n W_{\text{tot}} \\ &= (20.8)(947) \\ &= 19.7 \text{ kW} \end{aligned}$$

ดังนั้นผลจากการคำนวณโดยวัฏจักรแบบ Adiabatic ได้กำลัง 19.7 kW

2.7.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Schmidt analysis และ วิธี Adiabatic analysis และการแก้สมการด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี Schmidt analysis และด้วยวิธี Adiabatic analysis นั้น ต้องใช้วิธีการแก้ระบบสมการอนุพันธ์และมีขั้นตอนที่ซับซ้อน ดังนั้นเพื่อความสะดวกจึงได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ของ Urieli ในการทดสอบนี้ มีขั้นตอนการทำงานดังภาคผนวก ง.ค่าต่างๆ ที่ป้อนเข้าไปในโปรแกรม จะกำหนดให้สอดคล้องกับตารางที่ 2-2 เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลจากการคำนวณกับผลการทดลองของ Kagawa ส่วนผลลัพธ์ ได้สรุปไว้ในตารางที่ 2-3

ผลการคำนวณโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหากำลังขับเคลื่อนที่ความเร็ว 1250 rpm โดยวิธี Schmidt analysis เท่ากับ 8.29 kW และโดยวิธี Adiabatic analysis เท่ากับ 8.66 kW

2.7.5 ผลการคำนวณด้วยวิธีของ Beale

จากข้อมูลในตารางที่ 2 $V_{\text{se}} = 192 \text{ cc}$, $n = 20.8 \text{ rps}$, $p_m = 6.1 \text{ MPa}$ แทนค่าลงในสมการ(20) ได้ $P_B = 0.15 \times 192 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \times 20.8 \text{ rps} \times 6.1 \times 10^6 \text{ Pa} = 3654$

ดังนั้นผลจากการคำนวณโดยใช้วิธีของ Beale ได้กำลัง 3.65 kW แต่วิธีการนี้มีเงื่อนไขการใช้งานในคือ ช่วงอุณหภูมิด้านร้อนประมาณ 650 °C และ อุณหภูมิด้านเย็นประมาณ 50 °C เท่านั้น ซึ่งในกรณีนี้อยู่นอกเงื่อนไขการใช้งาน เนื่องจากอุณหภูมิใช้งานของ Kagawa มีค่า 789°C และ 25 °C ตามลำดับ

2.7.6 ผลการคำนวณด้วยวิธีของ West

จากข้อมูลในตารางที่ 2 $V_{\text{se}} = 192 \text{ cc}$, $n = 20.8 \text{ rps}$, $p_m = 6.1 \text{ MPa}$ แทนค่าลงในสมการ(21) $P_B = (0.35 \times 192 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \times 20.8 \text{ rps} \times 6.1 \times 10^6 \text{ Pa} \times (298/1062)) = 2392$

ดังนั้นผลจากการคำนวณโดยใช้วิธีของ West ได้กำลัง 2.39 kW

2.7.7 ผลการคำนวณด้วยวิธีของ Iwamoto

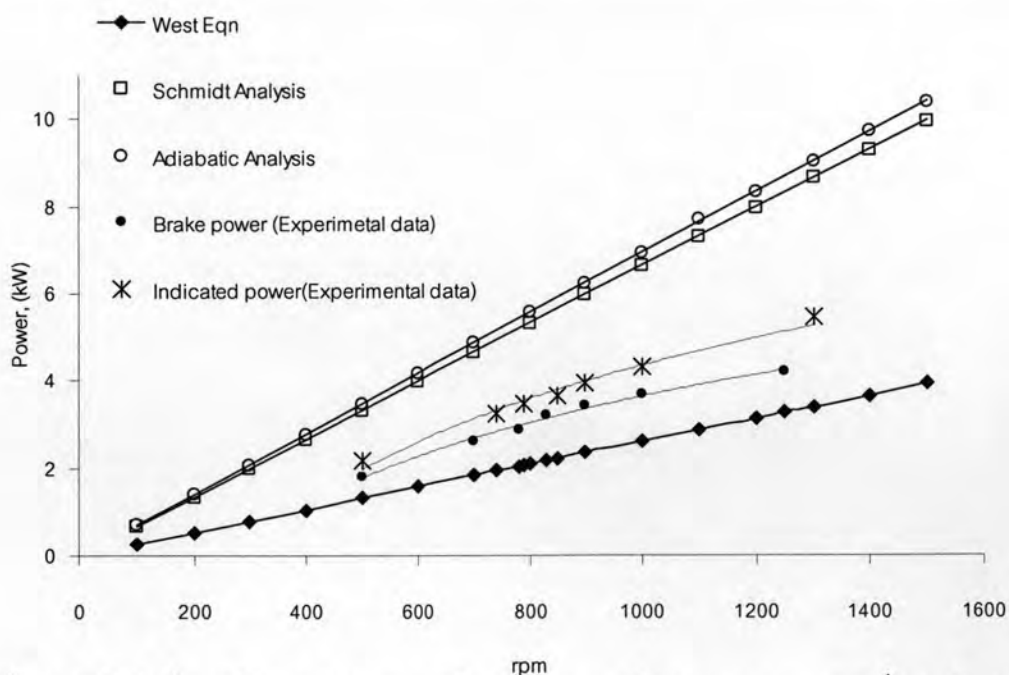
เมื่อนำวิธีการมาปรับใช้กับเครื่องยนต์ของ Kagawa ได้ผลการทำนายความเร็วรอบ 2307 rpm คิดเป็น และได้ผลการทำนายกำลังของเครื่องยนต์ 36.9 kW ซึ่งจะไม่นำกำลังที่ได้มาใช้เปรียบเทียบกับวิธีของ Beale และวิธีของ West

2.8 สรุปความสามารถในการประเมินสมรรถนะด้วยวิธีต่างๆ

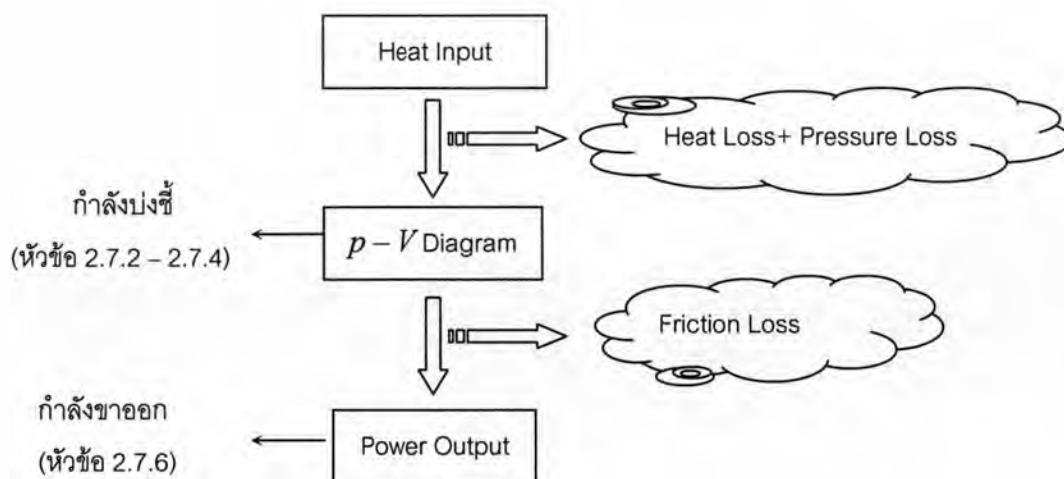
ในบทนี้เป็นการรวบรวมทฤษฎีที่ใช้ประเมินสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยจะแบ่งเป็นการหาค่ากำลังที่จากแบบจำลองโดยวิธีการทางเทอร์โมไดนามิกส์ (หัวข้อ 2.7.2 - 2.7.4) และการหาค่ากำลังขาออกจากการทดลอง (หัวข้อ 2.7.5-2.7.6) แล้วนำผลจากทฤษฎีมาเปรียบเทียบกับผลการที่ได้จากการทดลองจริง(2.7.1) โดยได้สรุปไว้ในตารางที่ 2-3 จะเห็นได้ว่ากำลังที่ที่ได้จากวิธีการ Isothermal จะมีค่ามากที่สุด ตามมาด้วยวิธีการ Adiabatic แต่ต่างก็มีค่าที่ห่างค่าจากการทดลองอยู่มาก ต่อเมื่อพิจารณาผลการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกกับวิธีการทั้งสอง ในแบบของ Schmidt และ Adiabatic จึงให้กำลังลดลงไปใกล้เคียงค่าทดลองมากขึ้น ในขณะที่ผลจากการสมการจากการทดลองของ West จะให้กำลังขาออกซึ่งจะมีค่าต่ำลงมาใกล้เคียงกับผลการทดลอง เพื่อให้เข้าใจถึงแนวโน้มดังกล่าวให้ดูรูปที่ 2-8 และรูปที่ 2-9

ตารางที่ 2-3 การประเมินเครื่องยนต์สเตอร์ลิงของ Kagawa ด้วยวิธีต่างๆที่ความเร็ว 1250 rpm

วิธีการคำนวณ	ค่ากำลัง	
2.7.2 โดยวิธีการ Isothermal	กำลังบ่งชี้	28.54 kW
2.7.3 โดยวิธีการ Adiabatic		19.70 kW
2.7.4 Schmidt analysis		8.29 kW
2.7.4 Adiabatic analysis	กำลังขาออก	8.66 kW
2.7.6 วิธีของ West		2.39 kW
2.7.1 ผลการทดลอง		3.46 kW



รูปที่ 2-8 ค่ากำลัง ที่ความเร็วรอบต่างๆ จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีและจากการทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงของ Kagawa[6]



รูปที่ 2-9 ลำดับการส่งผ่านพลังงานในระดับการคำนวณต่างๆ

จากแผนภาพรูปที่ 2-9 แสดงให้เห็นว่าพลังงานความร้อนทั้งหมดที่ให้กับระบบ บางส่วนจะสูญเสียไปกับสิ่งแวดล้อม พลังงานส่วนที่เหลือ ก่อให้เกิดแรงดันที่ลูกสูบ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ ผลของความดันที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดช่วงการทำงาน สามารถนำมาพล็อตให้อยู่ในรูปแผนภาพการเปลี่ยนแปลงความดันต่อปริมาตร ซึ่งสามารถหากำลังบ่งชี้ได้จากแผนภาพนี้ พลังงานจากการเคลื่อนที่ของลูกสูบ จะส่งผ่านต่อไปยังเพลาช้อเหวี่ยง ซึ่งในระหว่างกระบวนการนี้ยังมีการสูญเสียออกไปเนื่องจากแรงเสียดทาน กำลังสุทธิที่วัดได้จากเพลาช้อเหวี่ยงก็คือกำลังขาออกนั่นเอง

หากกลับไปพิจารณาในกราฟรูปที่ 2-8 จะสังเกตได้ว่าการคำนวณหากำลังบ่งชี้ในทางทฤษฎี จะมีค่ามากกว่ากำลังบ่งชี้ที่วัดได้จากการทดลองประมาณ 2 เท่า เนื่องจากทั้งสองวิธีนี้มีข้อกำหนดในการคำนวณว่า มวลของก๊าซคงที่ไม่มีที่รั่วซึม และไม่มีการสูญเสียความดันในช่องทางเดินของก๊าซ แต่อย่างไรจะนำวิธีดังกล่าวนี้มาใช้ประมาณกำลังบ่งชี้ของเครื่องยนต์แบบคร่าวๆก่อน โดยจะประเมินกำลังบ่งชี้ที่แท้จริง จะมีค่าลดลงไปอีก 50 เปอร์เซ็นต์ของวิธี Adiabatic analysis ส่วนกำลังขาออกจะประเมินโดยนำกำลังบ่งชี้มาหักลบกับกำลังเสียดทานที่ทดลองได้ โดยมีรายละเอียดการหากำลังเสียดทานในภาคผนวก ฉ.

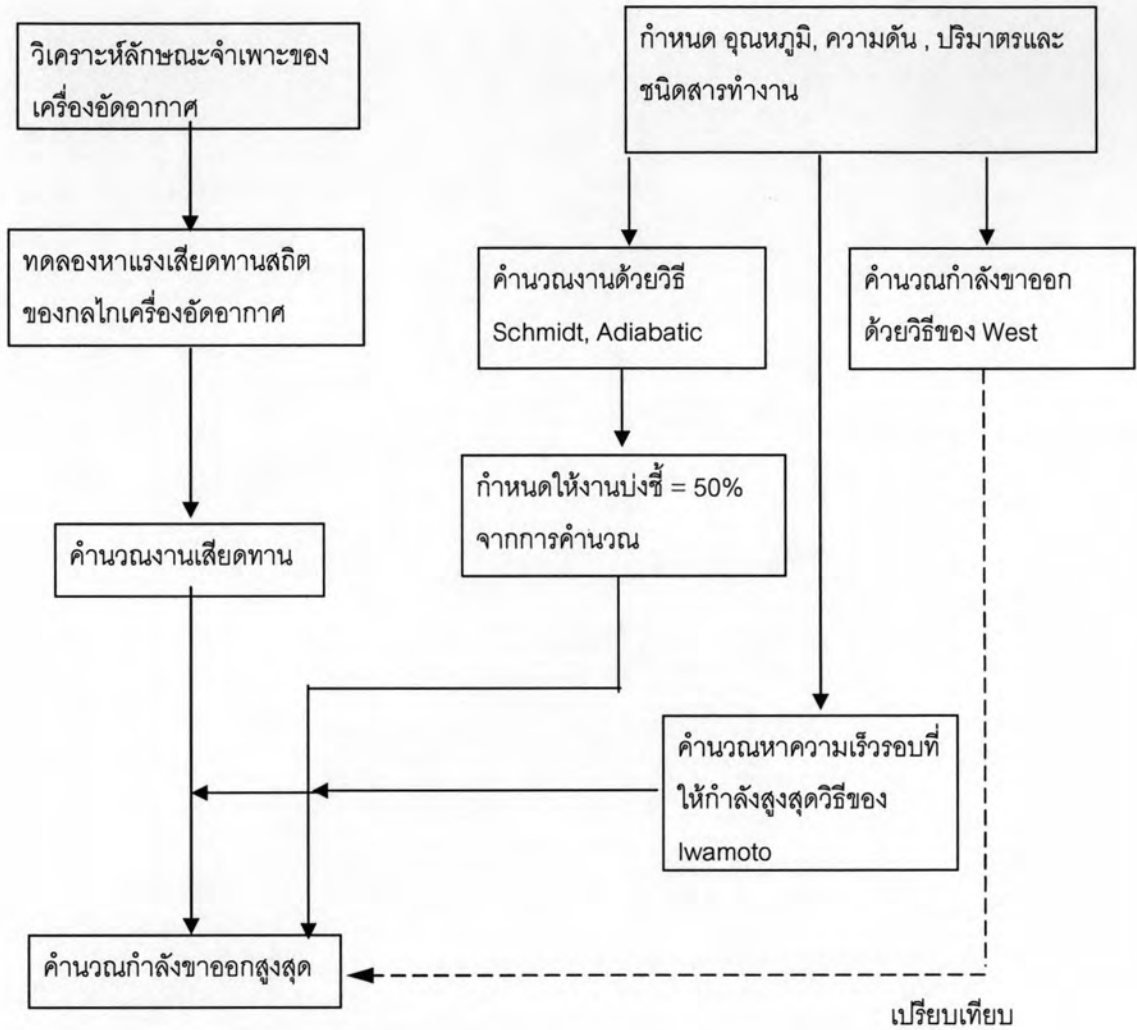
ส่วนวิธีของ iwamoto ให้ค่าประมาณความเร็วรอบที่ดี แต่ในส่วนของ การประมาณกำลังขาออก จะไม่นำมาใช้งาน เนื่องจากให้ความคลาดเคลื่อนสูง

จากนี้ก็จะได้นำวิธีการดังกล่าวไปประเมินพารามิเตอร์ ในการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ที่จะได้นำมาปรับใช้จากเครื่องอัดอากาศต่อไป



2.9 ขั้นตอนการออกแบบทางเทอร์โมไดนามิกส์

สำหรับขั้นตอนการออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงซึ่งดัดแปลงจากเครื่องอัดอากาศแสดงเป็น flowchart ในรูปที่ 2-10 ต่อไปนี้



รูปที่ 2-10 ขั้นตอนการออกแบบทางเทอร์โมไดนามิกส์

ลักษณะจำเพาะของเครื่องอัดอากาศ

เป็นเครื่องสองสูบรูปตัววี(V) มีเส้นผ่าศูนย์กลางกระบอกสูบ 65 mm, ระยะชัก 50 mm, มุมต่างเฟสของเพลลาข้อเหวี่ยง 90° ดังนั้นปริมาตรกวาดของปริมาตรด้านร้อนและด้านเย็นจะเป็น $V_{se} = V_{sc} = (\pi \times 6.5^2 \times 5) / 4 = 166 \text{ cc}$

การทดลองหาแรงเสียดทาน

ในภาคผนวก ฉ. แสดงรายละเอียดการทดลองหาแรงเสียดทาน โดยการใช้น้ำหนักถ่วงที่เพลลาข้อเหวี่ยง แล้วสังเกตการเคลื่อนที่ของลูกสูบ โดยยึดหลักที่ว่าแรงเสียดทานขณะหยุดนิ่งจะมีความมากกว่าแรงเสียดทานขณะหมุน ซึ่งกำลังบั๊มป์ที่คำนวณได้จะต้องมีความมากกว่าแรงเสียดทานที่ได้จากการทดลองนี้

กำหนด ความดัน, อุณหภูมิ, ปริมาตร และชนิดของสารทำงาน

สำหรับการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มากกว่า 1 บรรยากาศนั้นต้องการระบบซีลที่ดี ลักษณะการซีลของเครื่องอัดอากาศที่นำมาใช้งานมีรายละเอียดในบทถัดไป โดยเบื้องต้นคาดว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงในการทดลองนี้จะใช้ความดัน 2 บรรยากาศ

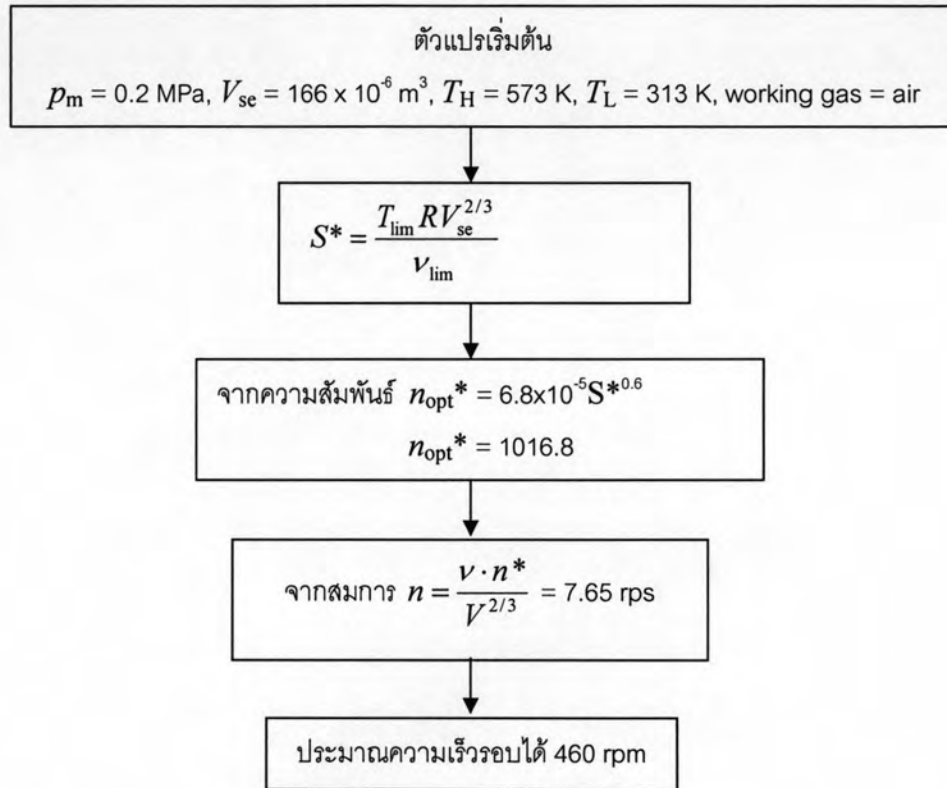
อุณหภูมิการใช้งานด้านร้อนคาดว่าฮีทเตอร์ที่ใช้จะให้ความร้อนกับสารทำงานได้ประมาณ 300°C และอุณหภูมิการใช้งานด้านเย็นมีค่าประมาณ 40°C

ปริมาตรของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราส่วนการอัดตัวเชิงปริมาตร γ_v ในตอนต้นของบทที่ 2 ได้ข้อสรุปว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ $\gamma_v = 2 - 3$ สำหรับเครื่องอัดอากาศเครื่องนี้ ถ้าหากต้องการให้ระบบมีอัตราการอัดเท่ากับ 3 จะต้องออกแบบให้ระบบมีปริมาตรคงที่ (Dead volume) เท่ากับ 50 cc ซึ่งเป็นเรื่องที่ทำได้ยากในทางปฏิบัติ จึงพยายามออกแบบให้ระบบมีอัตราการอัดลดลงคือเท่ากับ 2 นั่นคือต้องทำให้ปริมาตรคงที่ของระบบมีค่าเท่ากับ 170 cc โดยในขั้นต้นลองกำหนดให้ ฮีทเตอร์มีปริมาตร 80 cc คูลเลอร์มีปริมาตร 45 cc รีเจนเนอเรเตอร์มีปริมาตร 16 cc และมีความพรุนเท่ากับ 0.5 (ซึ่งเป็นค่าที่แนะนำให้ใช้ ตามเอกสารอ้างอิงหมายเลข [12]) สำหรับการคำนวณหาอัตราส่วนการอัดตัวเชิงปริมาตรมีรายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ก.

สารทำงานที่ใช้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่นิยมใช้ คือ He, H₂ หรือ CO₂ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารนั้นๆ (เช่น การนำความร้อน, ความหนืด, ความหนาแน่น) แต่ในการทดลองนี้จะใช้อากาศเป็นสารทำงาน เพื่อความง่ายและประหยัด

ประเมินหาความเร็วรอบสูงสุดโดยวิธีของ Iwamoto

จากวิธีการหาความเร็วรอบของ Iwamoto ทำให้ประมาณความเร็วรอบที่กำลังขาออกสูงสุดได้ 460 rpm และมีรายละเอียดการคำนวณโดยย่อดังนี้



คำนวณหากำลังบ่งชี้

ความเร็วรอบที่หามาได้ จะนำไปใช้คำนวณต่อเพื่อหากำลังบ่งชี้สูงสุด จากการคำนวณแบบ Schmidt และ Adiabatic ให้ผล 69.55 Watt และ 55.09 Watt ตามลำดับดังนี้

คำนวณหากำลังขาออกโดยวิธีของ West

จากสมการ (21) $P_B = F \cdot p_m \cdot V_{se} \cdot n \cdot \frac{T_H - T_L}{T_H + T_L}$

โดยที่ $F = 0.35, V_{se} = 166 \text{ cc}, n = 7.6 \text{ rps}, p_m = 0.2 \text{ MPa}, T_H = 573 \text{ K}, T_L = 303 \text{ K}$

$$P_B = (0.35 \times 166 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \times 7.6 \text{ rps} \times 0.2 \times 10^6 \text{ Pa} \times (270/876)) = 27.22 \text{ watt}$$

ทดลองหาแรงเสียดทาน

โดยปกติแล้วแรงเสียดทานในขณะหยุดนิ่งย่อมมีค่ามากกว่าแรงเสียดทานในขณะเคลื่อนที่เสมอ ในภาคผนวก ข. เป็นการทดลองหาแรงเสียดทานของเครื่องอัดอากาศในขณะหยุดนิ่ง พบว่าลูกสูบจะเริ่มเคลื่อนที่เมื่อต้องใช้น้ำหนักถ่วง 0.186 kg หรือมีค่า 0.12 Nm ดังนั้นที่ความเร็วรอบ 460 rpm เครื่องอัดอากาศจะมีกำลังต้านทาน, $P_f = 2\pi nW_s = 2 \times \pi \times 7.6 \times 0.12 = 5.7 \text{ Watt}$

เปรียบเทียบผลของกำลังบ่งชี้กับแรงเสียดทาน

ตารางที่ 2-4 การคำนวณหา กำลังบ่งชี้จากวิธีต่างๆและกำลังแรงเสียดทานของเครื่องอัดอากาศที่ 460 rpm

วิธีการคำนวณ	กำลัง (วัตต์)
Schmidt analysis	69.6
Adiabatic analysis	55.1
วิธีของ West	27.2
ผลการทดลองหาแรงเสียดทาน	5.7

จากผลที่ได้จึงประมาณกำลังบ่งชี้ที่แท้จริงโดยให้มีค่าลดลงไปอีก 50 เปอร์เซ็นต์จากค่าวิธี Adiabatic analysis $55.09/2 = 27.5 \text{ Watt}$ และจากการทดลองในภาคผนวก ข1. พบว่าที่ความเร็วรอบ 460 rpm ให้กำลังเสียดทาน 5.7 Watt

ดังนั้นด้วยสภาวะที่กำหนดในขั้นต้นกล่าวคือ ความดันใช้งาน = 0.2 MPa, ปริมาตรขยายตัว = 166 cc, อุณหภูมิด้านร้อน = 573 K, อุณหภูมิด้านเย็น = 313 K, ปริมาตรฮีทเตอร์ = 80 cc, ปริมาตรคูลเลอร์ = 45 cc, ปริมาตรรีเจนเนอเรเตอร์ = 16 cc มีความพรุน = 0.5 และใช้อากาศเป็นสารทำงาน เครื่องยนต์ควรจะให้กำลังขาออกสูงสุด 21.8 Watt

และจะนำผลการออกแบบขั้นต้นนี้ ไปออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ซึ่งมีรายละเอียดในบทถัดไป