

บทที่ 3

ทฤษฎี

3.1 วิธีการวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์มีประสิทธิภาพทางความร้อนในทางทฤษฎีเทียบเท่ากับประสิทธิภาพของคาร์โนต์ดังสมการ

$$\eta = 1 - (T_{\min} / T_{\max}) \dots\dots\dots (3.1)$$

เมื่อ T_{\max} และ T_{\min} คืออุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในระบบ

ในทางปฏิบัติ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ที่มีประสิทธิภาพที่สุด จะมีประสิทธิภาพทางความร้อนประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ของประสิทธิภาพคาร์โนต์ ส่วนใหญ่จะมีค่าประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ของประสิทธิภาพคาร์โนต์ (Walker , 1980) โดยเฉพาะในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา มีการพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์โดยมีวัตถุประสงค์คือเพื่อให้ได้เครื่องยนต์ที่มีค่าประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องให้มีความแตกต่างของอุณหภูมิ T_{\max} และ T_{\min} มาก ๆ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ที่พัฒนาขึ้นในช่วงที่ผ่านมาจึงมีการใช้อุณหภูมิของแหล่งกำเนิดความร้อนสูง เช่น $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ไซซีเลียม หรือ ไฮโดรเจน เป็นสารทำงาน และมีความดันอยู่ระหว่าง 50 ถึง 190 บาร์ มีความถี่ในการทำงานระหว่าง 30-50 Hz หากคำนวณประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์นี้ในทางทฤษฎีซึ่งเทียบเท่ากับประสิทธิภาพของคาร์โนต์จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \eta &= 1 - \{ (30+273) / (800+273) \} \\ &= 72 \% \end{aligned}$$

แต่จากการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องยนต์พบว่ามีประสิทธิภาพทางความร้อนอยู่ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของประสิทธิภาพคาร์โนต์หรือ 36 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์มีค่าน้อยกว่าประสิทธิภาพคาร์โนต์มากเนื่องจาก

1. ที่อุณหภูมิการทำงานสูง ๆ การสูญเสียความร้อนจากเครื่องยนต์จะยิ่งมากขึ้น
2. เมื่อความดันในระบบมีค่าสูง การรั่วไหลของสารทำงานจะมากขึ้น
3. การเคลื่อนที่ของสารทำงานด้วยความเร็วสูงในเครื่องยนต์ ทำให้การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานมีค่าสูงขึ้น
4. ประสิทธิภาพของ regenerator จะลดลงเมื่อความถี่ของเครื่องยนต์มีค่าสูงขึ้น

ดังนั้นหากเราสามารถคำนวณการสูญเสียความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ ได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง ย่อมจะทำให้เราทราบกำลังที่ได้จากเครื่องยนต์ ได้ถูกต้องมากขึ้นเท่านั้น รวมทั้งทราบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับการสูญเสียในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งจะทำให้สามารถพัฒนาและออกแบบเครื่องยนต์ให้มีค่ากำลังและประสิทธิภาพที่สูงขึ้นได้

สำหรับวิธีการวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์สามารถแบ่งออกได้เป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 3 วิธี กล่าวคือ

1. 1st order method เป็นการประเมินค่ากำลังที่ได้จากเครื่องยนต์ในเบื้องต้น (BP) โดยยังไม่มีการคิดค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์อย่างละเอียด โดยวิธีที่ใช้ในการประเมินกำลังจากเครื่องยนต์ในเบื้องต้น เช่น สมการของ Beale หรือ Beale number , สมการของ Schmidt
2. 2nd order method คือวิธีการคำนวณกำลังจากเครื่องยนต์ และความร้อนที่เครื่องยนต์ต้องการ โดยการนำค่ากำลังและความร้อนที่ประเมินได้ในขั้นต้น เช่น จากวิธีของ Schmidt มาคิดค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์อย่างละเอียด ทำให้ได้ค่ากำลังที่ได้จากเพลลาหรือ Brake power และความร้อนที่เครื่องยนต์ต้องการ (Net heat input หรือ NH)
3. 3rd order method เป็นวิธีวิเคราะห์โดยการใส่สมการ homogeneous equation เพื่อใช้ในการคำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิง , อุณหภูมิของสารทำงาน หรือ การสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ ที่ไม่สามารถวัดได้โดยง่าย ซึ่งเกิดขึ้นในระบบที่ขณะใดขณะหนึ่งและที่บริเวณใดบริเวณหนึ่ง

จากวิธีที่ได้กล่าวมาข้างต้น วิธีการวิเคราะห์แบบ 2nd order method เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากสามารถประเมินค่ากำลังได้ถูกต้องกว่าวิธี 1st order method แต่ไม่ยุ่งยากหรือซับซ้อนเหมือนกับในวิธี 3rd order method และดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้นว่า วิธี 2nd order method จะมีการประเมินค่ากำลังและความร้อนที่ได้ในเบื้องต้นก่อนที่จะมีการนำค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นไปคำนวณประกอบอีกครั้ง ดังนั้น ขั้นตอนในการคำนวณด้วยวิธี 2nd order method (Collie , 1979) จะเป็นดังนี้

1. การคำนวณค่ากำลังที่วัดได้ที่เพลลาของเครื่องยนต์ หรือ Brake power

1.1 ประเมินกำลังจากเครื่องยนต์ในเบื้องต้นก่อนคิดค่าการสูญเสีย (BP) ซึ่งวิธีที่นิยมใช้คือ Schmidt analysis

1.2 คิดค่าการสูญเสียกำลังที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์ โดยการสูญเสียกำลังที่เกิดขึ้นสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 วิธีกล่าวคือ

1.2.1 การสูญเสียกำลังเนื่องจากแรงเสียดทาน หรือ fluid friction loss ซึ่งเป็นการสูญเสียกำลังที่เกิดขึ้นเมื่อสารทำงานเคลื่อนตัวผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องยนต์ คือ heater , cooler และ regenerator

1.2.2 การสูญเสียกำลังเพื่อเอาชนะแรงเสียดทานทางกล หรือ mechanical friction loss เช่น การสูญเสียกำลังในระบบ seal , ชุดขับเคลื่อน

1.3 คำนวณกำลังที่ได้จากเครื่องยนต์เมื่อคิดค่าการสูญเสีย หรือ Brake power โดยการนำค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์มาหักออกจากกำลังที่ได้ในเบื้องต้น

2. การคำนวณค่าความร้อนที่เครื่องยนต์ต้องการหรือ QN

2.1 คำนวณค่าความร้อนเบื้องต้นที่เครื่องยนต์ต้องการ หรือ Basic heat input (BHI) โดยคำนวณได้จากสมการ

$$BHI = BP / \{ 1 - (T_{min} / T_{max}) \} \dots\dots\dots (3.2)$$

2.2 คำนวณค่าความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้น เช่น การสูญเสียความร้อนผ่านผนังกระบอกสูบในเครื่องยนต์ และคำนวณค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์ เช่น ความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทานเมื่อสารทำงานเคลื่อนตัวผ่าน heater หรือ regenerator

2.3 คำนวณค่าความร้อนที่เครื่องยนต์ต้องมีการจ่ายจริงให้กับเครื่องยนต์ หรือ Net heat input (QN) ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าความร้อนเบื้องต้น (BHI) บวกด้วยค่าความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์และลบด้วยค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์

3.2 การคำนวณกำลังที่ได้จากเครื่องยนต์ในเบื้องต้น

การคำนวณกำลังจากเครื่องยนต์ในเบื้องต้นมีหลายวิธี ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะบางวิธีพอเป็นสังเขปดังนี้

3.2.1 Beale number

William Beale ได้สังเกตความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ได้จากเครื่องยนต์ตลอดถึงความสัมพันธ์กับ ความดันของสารทำงาน , ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ และ ปริมาตรที่ piston สามารถกวาดได้ ดังนี้ (Walker , 1980)

$$BP = 0.015 * P_{MEAN} * N * V_T \dots\dots\dots(3.3)$$

โดยค่าอัตราส่วน $BP / (P_{MEAN} * N * V_T) = \text{constant}$ เรียกว่า Beale number

3.2.2 Schmidt analysis

วิธี Schmidt analysis เป็นวิธีที่ใช้ในการคำนวณกำลังที่ได้จากเครื่องยนต์ในเบื้องต้นที่ได้รับความนิยมกันมากวิธีหนึ่ง เป็นวิธีของ Gustaf Schmidt ซึ่งมีสมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณดังนี้

1. กระบวนการในระบบเป็นกระบวนการย้อนกลับได้
2. สารทำงานมีคุณสมบัติเป็นไปตามสมการ $pV = MRT$ ซึ่งเป็นสมการสำหรับก๊าซอุดมคติ
3. การเปลี่ยนแปลงปริมาตรภายในเครื่องยนต์มีลักษณะเป็น sinusoidal
4. การเปลี่ยนแปลงใด ๆ ในระบบเป็นสภาวะคงที่ (steady state)
5. ความดันภายในเครื่องยนต์มีค่าคงที่และเท่ากันทั่วทั้งระบบ
6. ไม่มีการรั่วไหลของสารทำงาน

7. กระบวนการให้และรับความร้อนของ regenerator เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์
8. อุณหภูมิในพื้นที่ทำงานขยายตัว และ heater มีค่าคงที่เท่ากับ TH
9. อุณหภูมิในพื้นที่ทำงานอัดตัว และ cooler มีค่าคงที่เท่ากับ TC
10. อุณหภูมิในพื้นที่ที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อระบบ และ regenerator มีค่าคงที่เท่ากับ TR
11. ความเร็วรอบของเครื่องยนต์มีค่าคงที่
12. ช่องว่างที่มีอยู่ในเครื่องยนต์จะต่อเชื่อมเข้ากับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อยู่ใกล้เคียง
13. อุณหภูมิผนังของทรงกระบอกและ piston หรือ displacer มีค่าคงที่

โดยสมการสำหรับคำนวณกำลังของ Schmidt แบ่งออกเป็น 3 ประเภทตามชนิดของเครื่องยนต์ คือ ชนิด ALPHA BETA และ GAMMA ซึ่งก่อนการคำนวณจะต้องมีการกำหนด ค่าพารามิเตอร์ก่อนดังนี้

1. ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (NU)
2. ความดันของสารทำงานภายในเครื่องยนต์ (P_{MAX})
3. เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ และ ระยะ stroke ของชิ้นส่วนเคลื่อนที่ เพื่อใช้ในการคำนวณหาปริมาตรในพื้นที่ทำงานขยายตัว (V_HL) และพื้นที่ทำงานอัดตัว (V_CL)
4. ปริมาตรที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อระบบ หรือ VD
5. อุณหภูมิสูงสุด (T_{max}) และต่ำสุด (T_{min}) ของเครื่องยนต์
6. มุมที่ปริมาตรในพื้นที่ทำงานขยายตัวนำหรือ lead พื้นที่ทำงานอัดตัว ที่เรียกว่า phase angle (ALPH)

หลังจากการกำหนดพารามิเตอร์ข้างต้นแล้ว จึงมีการคำนวณค่าพารามิเตอร์อื่นจากพารามิเตอร์ที่ได้มีการกำหนดไว้แล้วในข้างต้นดังนี้

1. $TAU = T_{min} / T_{max}$

$$2. K = VCL / VHL$$

$$3. \chi = VD / VHL$$

ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวนำมาใช้ในการคำนวณสมการพื้นฐานของ Schmidt ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงแต่เฉพาะชนิด GAMMA ซึ่งเป็นชนิดของเครื่องชนิดที่ได้มีการจัดสร้างในการทำวิจัย ดังนี้

$$1. BP = \frac{(NU)(1 - \tau)(P_{MAX})(VHL)(K) \sin(\alpha)(Z - X)^{1/2}}{Z + (Z^2 - X^2)^{1/2}} \frac{1}{(Z + X)^{1/2}} \quad (3.4)$$

$$2. P_{MAX} / P_{MIN} = (1 + \Delta) / (1 - \Delta) \quad (3.5)$$

$$3. P = P_{MAX} (1 - \Delta) / [1 + \Delta \cos(\phi - \theta)] \quad (3.6)$$

$$4. P_{MEAN} = P_{MAX} [(1 - \Delta) / (1 + \Delta)]^{1/2} \quad (3.7)$$

$$5. M'_E = \frac{VHL * P_{MAX} * (1 - \Delta) * \tau \{ \tau [\sin(\phi - \theta) - \sin \theta] - \sin \phi \} * \omega}{2 R * TC [1 + \Delta \cos(\phi - \theta)]^2} \quad (3.8)$$

$$6. M'_C = \frac{P_{MAX} * VHL * (1 - \Delta) * \omega * \{ \Delta [K \sin(\alpha - \theta) + \sin \theta + (K + 1) \cdot \sin(\phi - \theta)] K + \sin(\alpha - \theta) + \sin \phi \}}{2 R * TC [1 + \Delta \cos(\phi - \theta)]^2} \quad (3.9)$$

$$7. \sin \theta = K * \sin(\alpha) / [\tau^2 + 2K * \tau \cos(\alpha) + K^2]^{1/2}$$

$$\cos \theta = \tau + K \cos(\alpha) / [\tau^2 + 2K * \tau \cos(\alpha) + K^2]^{1/2}$$

$$\tan \theta = K \cdot \sin(\text{ALPH}) / \text{TAU} + K \cdot \cos(\text{ALPH})$$

..... (3.10)

จากสมการข้างต้น จะเห็นว่า การเลือกพารามิเตอร์ มีผลต่อค่ากำลังที่ได้จากเครื่องชนิด ดังแสดงในรูปที่ 3.1 , 3.2 , 3.3 และ 3.4 (Walker , 1980) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ TAU , K , χ และ ALPHA กับค่าอัตราส่วนงาน (work parameter) หรือ $W / (P_{MAX} \cdot V_T)$ ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนที่ไม่มีหน่วย จากกราฟดังกล่าวข้างต้น จะเห็นว่าค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์เหล่านี้เพื่อให้ได้กำลังที่สูงที่สุดนั้น ไม่มีค่าที่แน่นอนเนื่องจากต้องขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ด้วย การกำหนดค่าของพารามิเตอร์เหล่านี้ จึงต้องอาศัยประสบการณ์ในการออกแบบเป็นสิ่งสำคัญ แต่มีข้อสังเกตบางประการที่ช่วยในการกำหนดค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ได้บ้าง โดยการศึกษากราฟข้างต้นซึ่งจะพบข้อที่น่าสนใจดังนี้

1. เมื่อทำงานเป็นต้นกำลังยิ่งค่าอุณหภูมิในบริเวณ expansion space (Tmax) มากขึ้นเท่าใดกำลังที่ได้จากเครื่องชนิดจะมากขึ้นเท่านั้น

2. ค่าของพารามิเตอร์ K ที่เหมาะสมจะเปลี่ยนไป เมื่อค่าพารามิเตอร์อื่นมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจากกราฟที่ 3.2 จะเห็นว่าเมื่อ TAU มีค่าเปลี่ยนจาก 0.25 เป็น 0.5 ค่าที่เหมาะสมของ K จะเปลี่ยนจากประมาณ 0.75 เป็น 1.0 นอกจากนี้หากมีการเปลี่ยนแปลงค่า χ หรือ ALPH ค่าของ K ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงตามไปอีกด้วย

3. เมื่อค่าพารามิเตอร์ χ น้อยลงเท่าใดกำลังที่ได้จะมากขึ้นเท่านั้น

4. ค่ากำลังที่ได้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อค่าพารามิเตอร์ ALPHA มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 60 - 120 องศา โดยค่าที่นิยมใช้งานจะอยู่ในระหว่าง 90 - 115 องศา

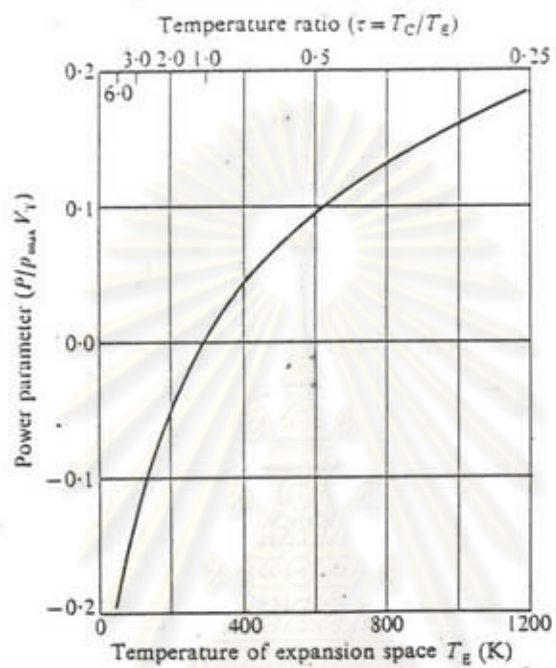
จากความยุ่งยากในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้ จึงมีความพยายามในการสร้างแผนภาพ เพื่อช่วยในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งเป็นแผนภาพสำหรับเครื่องชนิดสเตอร์ลิงที่มีการใช้งานเป็นต้นกำลัง โดยมีข้อกำหนดว่า ค่าอุณหภูมิของสารทำงานในพื้นที่ทำงานอัดตัว เท่ากับ 300 K สำหรับการใช้งานแผนภาพ เริ่มต้นจากการกำหนดค่าอุณหภูมิของสารทำงานในพื้นที่ทำงานขยายตัว และ ค่าพารามิเตอร์ χ ที่ต้องการ จากนั้นลากเส้นในแนวตั้งจากแกนบนซึ่งเป็นแกนของค่าอุณหภูมิของสารทำงานในพื้นที่ทำงานขยายตัว ณ จุดที่

ต้องการ เมื่อเส้นในแนวตั้งไปตัดเส้นกราฟของค่าพารามิเตอร์ χ ที่จุดใด จึงลากเส้นในแนวนอนจากจุดนั้นไปตัดแกนตั้งซึ่งเป็นแกนของ ALPH และ ค่าอัตราส่วนงาน หรือ work parameter ซึ่งโดยทั่วไปค่ากำลังที่ได้จริงจากเครื่องยนต์จะมีค่าอยู่ระหว่าง 30-40 เปอร์เซ็นต์ของค่าที่อ่านได้จากแผนภาพนี้

3.3 ระบบขับเคลื่อน

ระบบขับเคลื่อนที่ใช้ถ่ายทอดกำลังจากชิ้นส่วนเคลื่อนที่ไปยังเพลานับว่าเป็นสิ่งสำคัญอีกสิ่งหนึ่งนอกจากตัวเครื่องยนต์ ระบบขับเคลื่อนสามารถออกแบบได้หลายวิธีดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยในรูปที่ 3.6 a) เป็นชนิดที่พบเห็นกันมากที่สุดคือ slider crank mechanism แต่ชุดขับเคลื่อนชนิดนี้จะทำให้เกิดแรงกระทำด้านข้าง (side force) ในทรงกระบอก (H) ซึ่งทำให้เกิด drag force ซึ่งเป็นแรงที่ต้านทานการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนเคลื่อนที่มีขนาดเท่ากับ μH เมื่อ μ เป็นสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดแรงกระทำด้านข้างจึงมีการออกแบบชุดขับเคลื่อน ดังแสดงในรูปที่ 3.6 b) ที่เรียกว่าเป็นชนิด cross head และในรูปที่ 3.6 c) ชนิด rhombic drive ซึ่งเหมาะกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิด beta ที่มี piston และ displacer อยู่บนก้านสูบเดียวกัน

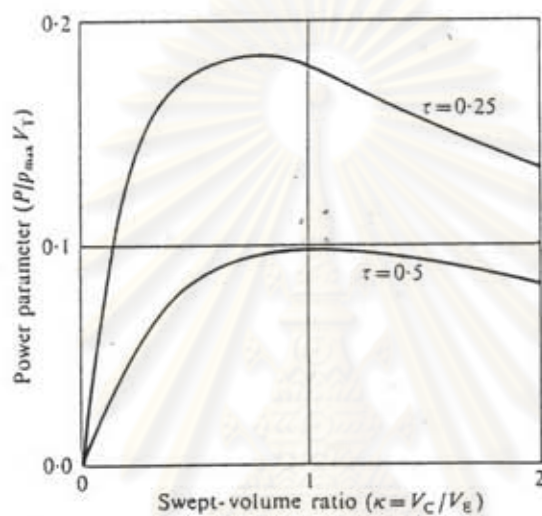
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1

ผลของอุณหภูมิในพื้นที่ทำงานขยายตัวที่มีต่อกำลังที่ได้จากเครื่องยนต์ ที่อุณหภูมิในพื้นที่ทำงานอัดตัว 300 K , มุม $ALPH = 90^\circ$, อัตราส่วนปริมาตร $(K) = 0.8$ และ $\chi = 1.0$

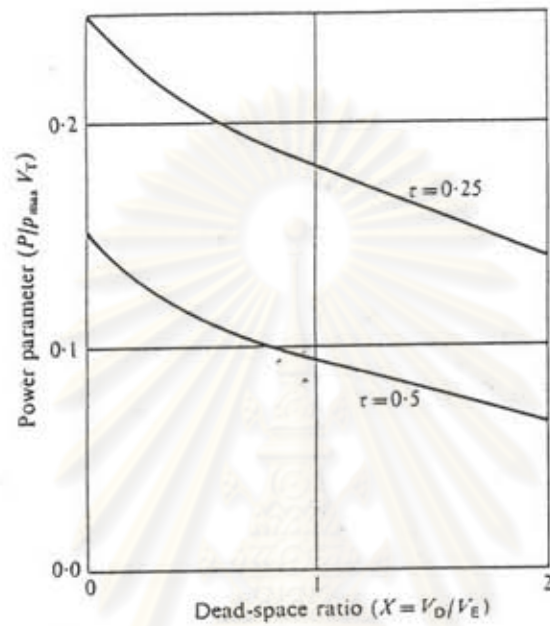
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2

ผลของค่าอัตราส่วนปริมาตรที่มีค่ากำลังที่ได้จากเครื่องชนิด ที่ค่า TAU = 0.25 และ 0.5 , ค่ามุม ALPH = 90° และ $\chi = 1.0$

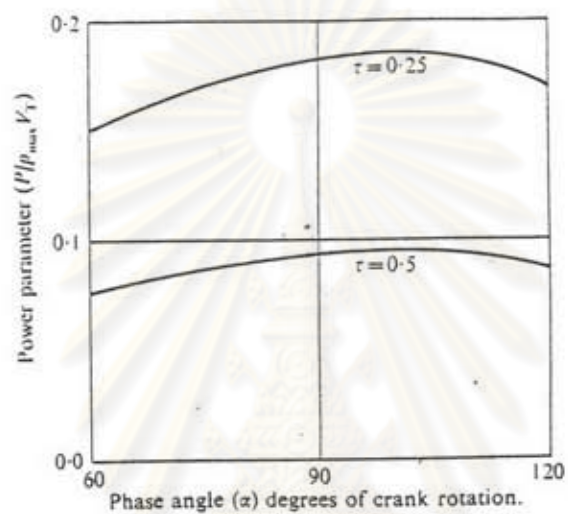
ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3

ผลของค่าพารามิเตอร์ χ ที่มีต่อกำลังที่ได้จากเครื่องยนต์ ที่ค่า TAU = 0.25 และ 0.5

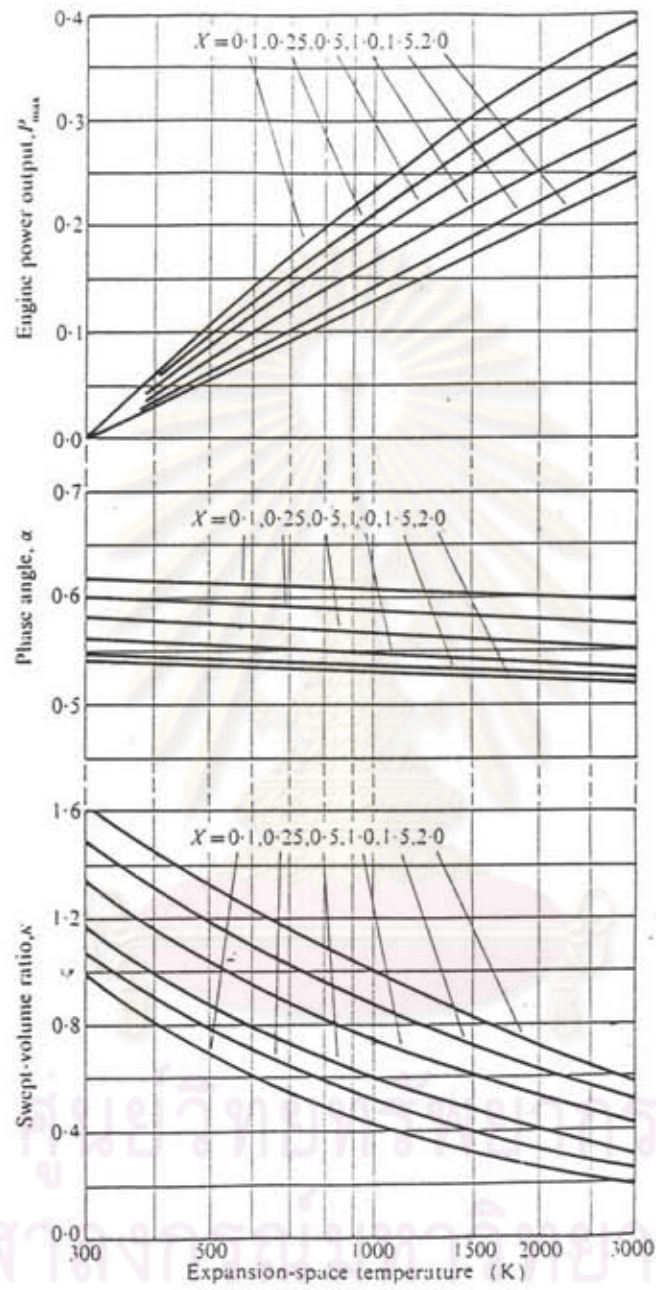
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.4

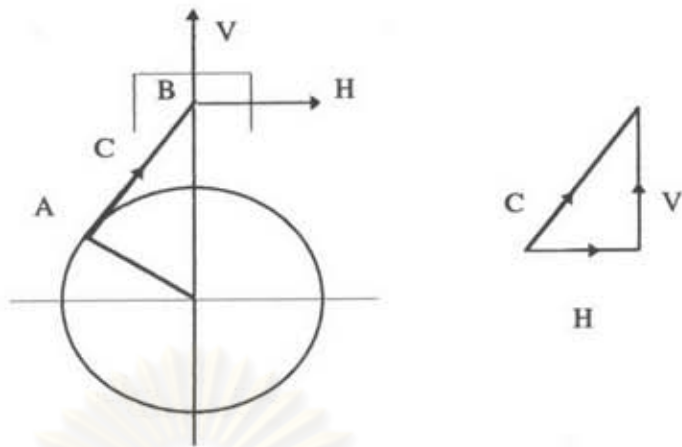
ผลของค่ามุม ALPH ที่มีต่อค่ากำลังที่ได้จากเครื่องยนต์ที่ค่าพารามิเตอร์ TAU = 0.25 และ 0.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.5

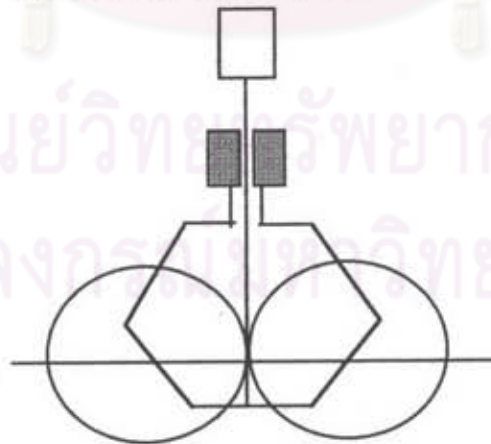
แผนภาพที่ช่วยในการออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์เมื่อใช้เป็นต้นกำลัง



a) Simple crank slider mechanism



b) Crosshead crank slider crank mechanism



c) Rhombic drive

รูปที่ 3.6

ชนิดของระบบขับเคลื่อน