

ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์วัฏจักรมิลเลอร์สี่จังหวะ

Efficiency of a Four-Stroke Miller-Cycle Engine

เชษฐวุฒิ ภูมิพัฒน์พงศ์¹ และ สิทธิโชค สิทธิธำ

1. บทนำ

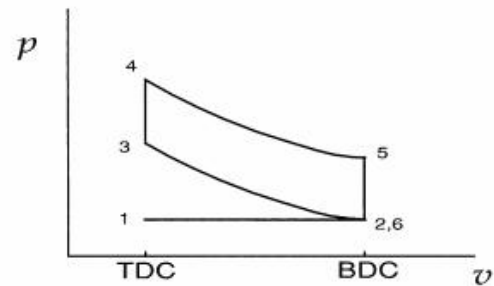
อัตราส่วนการอัด (Compression Ratio) ของเครื่องยนต์วัฏจักรออตโต (Otto-Cycle Engine) ถูกจำกัดโดยการน็อก (Knocking) และคุณสมบัติของเชื้อเพลิง ด้วยเหตุนี้เครื่องยนต์วัฏจักรออตโตจึงมีอัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์โดยทั่วไปอยู่ที่ประมาณ 8:1 ถึง 11:1

วัฏจักรมิลเลอร์ถูกเรียกตามชื่อของผู้คิดค้น (R.H.Miller) ซึ่งเป็นการนำวัฏจักรออตโตและแอทกินสันมาปรับปรุงให้อัตราส่วนการขยายตัว (Expansion Ratio) มีค่ามากกว่าอัตราส่วนการอัด โดยการเปลี่ยนแปลงจังหวะการทำงานของลิ้นไอดี จึงเป็นผลให้อัตราส่วนการอัดประสิทธิภาพ (Effective Compression Ratio) ลดลงและนำไปสู่การหลีกเลี่ยงการน็อกได้เป็นอย่างดี [1]

2. เปรียบเทียบวัฏจักรออตโตและวัฏจักรมิลเลอร์

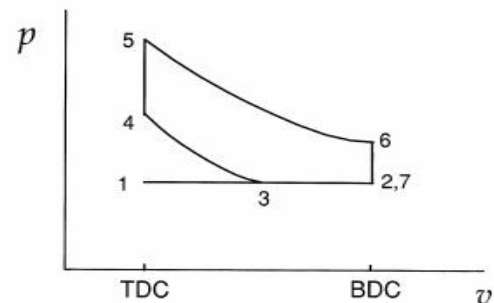
เครื่องยนต์วัฏจักรออตโตสี่จังหวะเริ่มต้นจากจังหวะดูดไอดีแบบความดันคงที่ (Isobaric Process 1-2) ลูกสูบเคลื่อนที่จากศูนย์ตายบน (Top Dead Center; TDC) ลงสู่ศูนย์ตายล่าง (Bottom Dead Center; BDC) จากนั้นลิ้นไอดีปิดและเข้าสู่จังหวะการอัด ลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้นสู่ศูนย์ตายบน (กระบวนการ Isentropic 2-3) หัวเทียนเกิดประกายไฟทำให้ส่วนผสมอากาศและเชื้อเพลิงเกิดการสันดาปให้ความร้อน (กระบวนการ Isochoric 3-4) พร้อมกับขยายตัวดันลูกสูบลงสู่ศูนย์ตายล่าง (กระบวนการ Isentropic 4-5) เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ถึงศูนย์ตายล่าง ลิ้นไอดีจะเปิดและทำให้ความดันภายในกระบอกสูบลดลงอย่างรวดเร็ว (กระบวนการ Isochoric 5-6) ลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้นสู่ศูนย์ตายบนดันไอดีออกผ่านทางลิ้นไอดี (กระบวนการ Isobaric 6-1) ดังแสดงในรูปที่ 1 [2]

จากรูปที่ 1 เครื่องยนต์วัฏจักรออตโตสามารถสร้างงานออกมาเพียงช่วงกระบวนการ Isentropic 4-5 เท่านั้น แต่ต้องสูญเสียงานจำนวนไม่น้อยในช่วงอื่นๆ โดยเฉพาะช่วงจังหวะการอัด (กระบวนการ Isentropic 2-3) ดังนั้น หากทำให้จังหวะอัด (กระบวนการ Isentropic 2-3) ของเครื่องยนต์วัฏจักรออตโตสั้นลง จะมีความเป็นไปได้ในการเพิ่มประสิทธิภาพ



รูปที่ 1 วัฏจักรออตโตสี่จังหวะ

วัฏจักรมิลเลอร์มีพื้นฐานเดียวกับวัฏจักรออตโตเพียงแต่ใช้การควบคุมจังหวะลิ้นไอดีให้แตกต่างออกไปในจังหวะดูดหรือจังหวะอัดวัฏจักรการทำงานที่ได้จึงมีรูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2 [2]



รูปที่ 2 เครื่องยนต์วัฏจักรมิลเลอร์สี่จังหวะ

¹ อาจารย์, ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

จังหวะการปิดลิ้นไอดีที่ทำให้วัฏจักรออตโตเปลี่ยนเป็นวัฏจักรมิลเลอร์ได้นั้น มีด้วยกันสองวิธีดังนี้ (1) Early Intake Valve Closure (EIVC) หรือการปิดลิ้นไอดีเร็วกว่าปกติ ขณะลูกสูบเคลื่อนที่ลงในจังหวะดูด กลไกจะทำการปิดลิ้นไอดีก่อนลูกสูบจะเคลื่อนที่ถึงศูนย์ตายล่าง (ตำแหน่ง 3) ดังนั้น การเคลื่อนที่ของลูกสูบจากตำแหน่งที่ 3 ไปตำแหน่งที่ 2 ของจังหวะดูดนั้น เครื่องยนต์ไม่ได้ทำการดูดอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้เลย ในจังหวะอัด ลูกสูบจึงทำการอัดอากาศในปริมาณที่น้อยกว่าปกติ และเป็นที่แน่นอนว่าความดันภายในกระบอกสูบย่อมต่ำกว่าวัฏจักรออตโต กล่าวคือ วัฏจักรมิลเลอร์มีข้อคืออยู่ตรงพลังงานที่สูญเสียไปในจังหวะอัดนั้นน้อยกว่าวัฏจักรออตโต ส่วนวิธีที่ (2) คือ Late Intake Valve Closure (LIVC) หรือการปิดลิ้นไอดีช้ากว่าปกติ คือ การปล่อยให้เครื่องยนต์ได้ดูดอากาศเช่นเดียวกับวัฏจักรออตโตทุกประการ แต่เมื่อเครื่องยนต์เข้าสู่จังหวะอัด ลิ้นไอดียังคงเปิดให้ไอดีภายในห้องเผาไหม้ส่วนหนึ่งถูกผลักออกสู่ท่อร่วมไอดี จากนั้นลิ้นไอดีจึงปิดที่ตำแหน่ง 3 ของจังหวะอัด ดังนั้น ในขั้นตอนที่ 2 ไปสู่ขั้นตอนที่ 3 จึงไม่ได้เกิดการอัดอย่างแท้จริง การอัดอากาศจริงจึงอยู่ในขั้นตอนที่ 3-4 เท่านั้น [3]

ประสิทธิภาพทางทฤษฎีของเครื่องยนต์สันดาปภายในสามารถคำนวณได้จากสมการพื้นฐาน ดังนี้

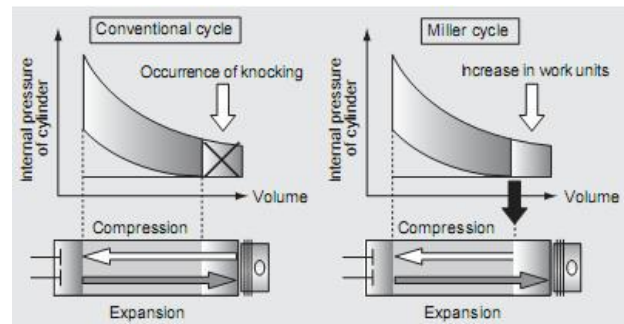
$$\eta_{theory} = 1 - \varepsilon^{1-K} \quad (1)$$

โดย ε คือ อัตราส่วนการอัด หรืออัตราส่วนการขยายตัว

K คือ อัตราส่วนความร้อนจำเพาะของสารทำงาน

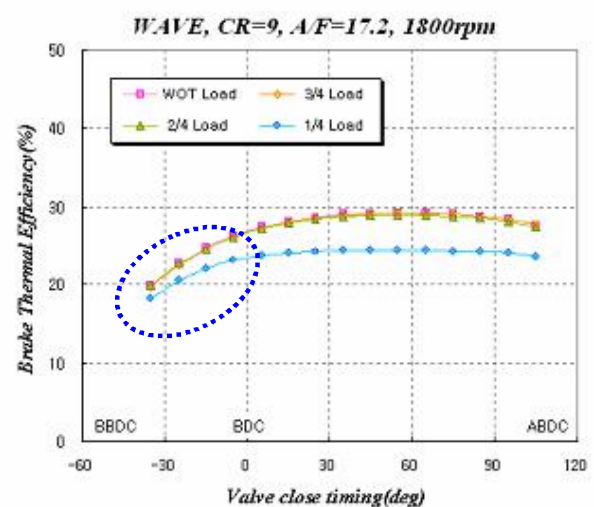
สมการ (1) แสดงให้เห็นว่าหากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักร ต้องทำการเพิ่มอัตราส่วนการอัด แต่ทว่าการเพิ่มอัตราส่วนการอัดเป็นการเพิ่มอุณหภูมิภายในกระบอกสูบและจะทำให้ส่วนผสมเกิดการเผาไหม้ด้วยตัวเอง ความดันและอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้จึงสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนนำมาซึ่งความเสียหายของเครื่องยนต์ได้ แต่วัฏจักรมิลเลอร์ทำการเพิ่มค่า ε โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาการน็อกดังที่กล่าวมาข้างต้น หรือกล่าวโดยสรุปได้ว่าวัฏจักรมิลเลอร์ทำงานกับอัตราส่วนการอัด

ที่สูงได้โดยไม่เกิดการน็อกและมีอัตราส่วนการขยายตัวมากพอที่จะเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงกว่าวัฏจักรออตโตได้ ดังแสดงในรูปที่ 3 [4]



รูปที่ 3 เปรียบเทียบวัฏจักรออตโตและวัฏจักรมิลเลอร์

วัฏจักรมิลเลอร์ที่นิยมใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพมักเป็นวิธี LIVC เนื่องจากงานวิจัยหลายๆ ชิ้นได้พิสูจน์แล้วว่า EIVC ไม่มีศักยภาพในการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้ ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Prof.Dr.Choi Gyeong Ho ที่ทำการจำลองด้วยโปรแกรม WAVE Build 5.1 และการทดสอบด้วยเครื่องยนต์จริง ก็ได้พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์จะลดลงอย่างมากหากทำงานด้วย EIVC ดังแสดงในรูปที่ 4 (ภายในวงเส้นประ)

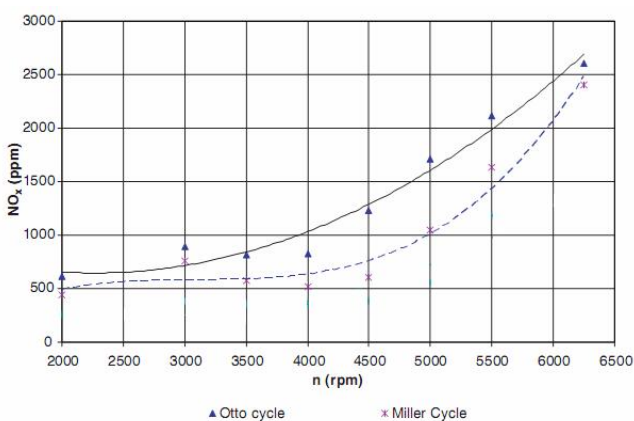


รูปที่ 4 ผลของจังหวะการปิดลิ้นไอดีต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน [1]

3. ผลกระทบของวัฏจักรมิลเลอร์ต่อมลพิษในไอเสีย

มลพิษจากเครื่องยนต์ประกอบด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) สารประกอบไฮโดรคาร์บอนต่างๆ (HC) และเขม่าควัน (Particulate Matter) โดยออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) จัดว่าเป็นก๊าซที่อันตรายต่อสุขภาพมากที่สุด ปริมาณการเกิด NO_x (NO และ NO₂) ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการดังนี้ (1) อุณหภูมิการเผาไหม้ (2) ระยะเวลาที่เกิดการเผาไหม้ (3) ปริมาณออกซิเจนในเปลวเผาไหม้ [5]

วิธีการลดปริมาณ NO_x จากไอเสียสามารถทำได้สองวิธีคือ (1) ใช้กระบวนการทางเคมีเข้าทำปฏิกิริยากับไอเสียหรือเรียกว่า แคตาลิสต์ (Catalyst) แต่วิธีการนี้เป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์ Catalytic Converter และวิธีที่ (2) คือ การลดอุณหภูมิการเผาไหม้ ซึ่งวิธีการนี้จะเกิดขึ้นโดยอัตโนมัติเมื่อเปลี่ยนการทำงานจากวัฏจักรออตโตมาเป็นวัฏจักรมิลเลอร์ รูปที่ 5 แสดงความแตกต่างของปริมาณ NO_x จากเครื่องยนต์วัฏจักรออตโต และวัฏจักรมิลเลอร์ที่ความเร็วรอบต่างๆ [5]



รูปที่ 5 ปริมาณ NO_x จากวัฏจักรออตโตและวัฏจักรมิลเลอร์

4. การประยุกต์ใช้งานวัฏจักรมิลเลอร์

การเปลี่ยนแปลงวัฏจักรออตโตให้กลายเป็นวัฏจักรมิลเลอร์สามารถทำได้โดยการควบคุมจังหวะการปิดลิ้นไอดี หรือกล่าวคือ ต้องทำการเปลี่ยนเพลาลูกเบี้ยว (Camschaft) ของเครื่องยนต์

เครื่องยนต์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงคือ เครื่องยนต์ดีเซล เพราะโครงสร้างของเครื่องยนต์ดีเซลมีความทนทานและประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูงกว่าเครื่องยนต์แก๊สโซลีนอยู่แล้ว โดยเฉพาะเครื่องยนต์ดีเซลที่มีอายุใช้งานเกิน 5 ปี หรือ 100,000 กิโลเมตร นั้นเป็นเครื่องยนต์ที่เริ่มสร้างปัญหามลพิษให้แก่สิ่งแวดล้อมในปริมาณสูง [1]

หากนำเครื่องยนต์วัฏจักรออตโต (เครื่องยนต์แก๊สโซลีน) มาพัฒนาเป็นเครื่องยนต์วัฏจักรมิลเลอร์ ผลก็คือ อัตราส่วนการขยายตัวก็ยังเท่าเดิมแต่อัตราส่วนการอัดเชิงประสิทธิผลจะลดลง ประสิทธิภาพก็สูงขึ้นได้ แต่ทว่าวิธีการนี้ไม่ได้เป็นการใช้สมบัติของเชื้อเพลิงได้อย่างถูกวิธี ยกตัวอย่างเช่น เครื่องยนต์วัฏจักรออตโตมีอัตราส่วนการอัดและอัตราส่วนการขยายตัวเท่ากับ 11:1 เมื่อทำการเปลี่ยนกลไกควบคุมจังหวะลิ้นไอดีให้กลายเป็นเครื่องยนต์วัฏจักรมิลเลอร์ ก็ทำให้เครื่องยนต์นี้มีอัตราส่วนการอัดประสิทธิผลเป็น 8:1 และอัตราส่วนการขยายตัวยังคงเท่ากับ 11:1 ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ก็อาจจะสูงขึ้นได้ แต่ทว่าสมบัติของเชื้อเพลิงสามารถทนต่ออัตราส่วนการอัดได้ถึง 11:1 ซึ่งเครื่องยนต์ที่กล่าวมามีอัตราส่วนการอัดเชิงประสิทธิผลเพียง 8:1 เท่านั้น

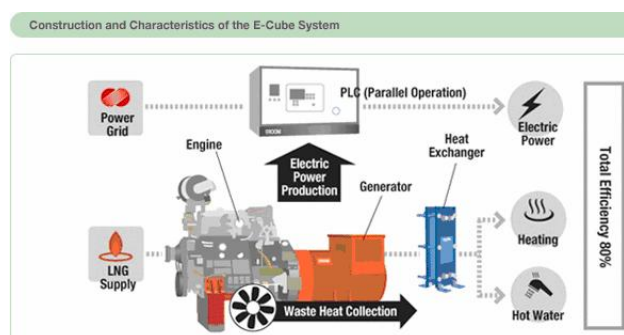
จากตัวอย่างที่ผ่านมามาดูจะเห็นว่า วิธีการที่ดีที่สุดน่าจะเป็นการคงอัตราส่วนการอัดประสิทธิผลให้เป็น 11:1 เท่าเดิม แต่ทำการเพิ่มอัตราส่วนการขยายตัวให้สูงกว่าเดิม ซึ่งวิธีการนี้ไม่สามารถทำได้โดยเครื่องยนต์แก๊สโซลีน

การนำเครื่องยนต์ดีเซลมาพัฒนาให้กลายเป็นเครื่องยนต์วัฏจักรมิลเลอร์ทำได้โดยการคว้านลูกสูบเพื่อลดอัตราส่วนการอัด หากเชื้อเพลิงสามารถทนต่ออัตราส่วนการอัดได้ 11:1 การคว้านลูกสูบอาจทำให้อยู่ที่ประมาณ 14:1 แล้วทำการออกแบบเพลาลูกเบี้ยวเพื่อเปลี่ยนจังหวะลิ้นไอดีจนอัตราส่วนการอัดประสิทธิผลไม่เกิน 11:1 ดังนั้นเครื่องยนต์นี้จะไม่เกิดการน็อกอย่างแน่นอน โดยเครื่องยนต์วัฏจักรมิลเลอร์ที่ได้นี้จะมีอัตราส่วนการอัดประสิทธิผลเป็น 11:1 และอัตราส่วนการขยายตัวเป็น 14:1

ขอเน้นย้ำว่าตัวเลขต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นเพียงการยกตัวอย่างเท่านั้น การนำไปประยุกต์ใช้งานจริงต้อง

ทำการศึกษาหาค่าที่เหมาะสมที่สุดระหว่างอัตราส่วนการอัดและองศาการเปิดลิ้นไอดี เป็นกรณีๆ ไป

ในหลายๆ ประเทศได้นำเครื่องยนต์วัฏจักรมิลเลอร์มาใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงซึ่งประสบความสำเร็จเป็นอย่างมากเพราะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้สูงถึง 41.5% [4] งานวิจัยหลายชิ้นได้แสดงอีกว่าหากนำเครื่องยนต์วัฏจักรมิลเลอร์มาประยุกต์ให้เป็นระบบ Cogeneration โดยการต่อเติมระบบแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) เพื่อนำความร้อนจากเครื่องยนต์ เช่น ความร้อนจากการหล่อเย็นและจากไอเสียมาใช้ประโยชน์ในการอุ่นหรือผลิตน้ำร้อน ระบบเครื่องยนต์ Miller Cycle Cogeneration นี้สามารถมีประสิทธิภาพโดยรวมได้สูงถึง 80-90% [6-7] ดังแสดงในรูปที่ 6 [6]



รูปที่ 6 ระบบ Cogeneration

เอกสารอ้างอิง

- 1 G. H. Choi, et al., "An Experimental and Numerical Study of a Miller Cycle for Gas Engine Converted from a Diesel Engine", In Proceeding of ASME/IEEE Joint Rail Conference & Internal Combustion Engine Spring Technical Conference, Pueblo, 13-16 March 2007, pp. 1-6.
- 2 W. Chih, P. V. Puzinauskas and S.T. Jung, "Performance analysis and optimization of a supercharged Miller cycle Otto engine" Applied Thermal Engineering 2003, Vol. 23, pp. 511-521.
- 3 C.Poompipatpong, "Effects of Intake Valve Timing and Injection Timing in a Natural Gas Dedicated Diesel Engine." Master Thesis, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, 2007.
- 4 T. Noguchi, et al., "The Further Progressed Gas Engine Co-generation System with World's Highest Efficiency of 41.5%", Mitsubishi Heavy Industries Technical Review 2005, Vol. 42, No 3, pp. 1-5.
- 5 Y. Wang, et al., "Experimental investigation of applying Miller cycle to reduce NO_x emission from diesel engine." Proc.IMEchE2005, Vol. 219, pp.631-638.
- 6 EROOM Public Company Limited. New Renewable Energy. [Online] 2008. [Cited 2008 June 17]. Available from:URL:<http://www.erookmcorea.com/eng/business/bub.html>
- 7 Tsukida et al., "Production Miller-Cycle Natural Gas Engine." In Alternative Fuels and Engines, Inter-Tech Energy Progress, Inc, 1999, pp. 1-9.