

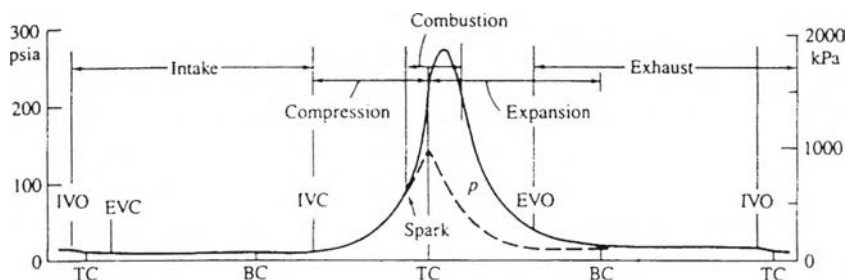
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการสันดาปในเครื่องยนต์ SI

จุดเริ่มต้นของกระบวนการสันดาปในเครื่องยนต์ SI เริ่มจากประกายไฟที่เกิดขึ้นระหว่างหัวของหัวเทียนในช่วงท้ายของกระบวนการอัด เกิดเป็นพลาสมาที่มีอุณหภูมิสูง (kernel) แล้วพัฒนาไปเป็นแนวเปลว (บริเวณที่เกิดปฏิกิริยา) ที่สามารถขยายตัวออกไปเองโดยไม่สลายตัว การขยายตัวของเปลวเกิดขึ้นจากขบวนการลุกไหม้ เกิดจากการที่แก๊สที่ยังไม่สันดาปได้รับความร้อนและการถ่ายเทมวลจากบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา แล้วเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์ของการสันดาป ทำให้เปลวขยายตัวออกไป จนกระทั่งครอบคลุมปริมาตรภายในกระบอกสูบ โดยอัตราเร็วของการขยายตัวขึ้นอยู่กับ พื้นที่ผิวของแผ่นเปลวที่สัมผัสกับแก๊สที่ยังไม่สันดาป , turbulence intensity , สภาวะและองค์ประกอบของส่วนผสมอากาศ-เชื้อเพลิง

2.2 การวัดและการวิเคราะห์ข้อมูลแรงดันภายในกระบอกสูบ

การเปลี่ยนแปลงของแรงดันภายในกระบอกสูบเทียบกับองศาเพลลาข้อเหวี่ยง เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของกระบอกสูบ , การสันดาปของอากาศและเชื้อเพลิง , ความร้อนสูญเสียในปฏิกิริยาเคมี อาทิ dissociation, การถ่ายเทความร้อนให้กับผนังห้องเผาไหม้ , การไหลเข้าออกจาก crevice และการรั่วอื่นๆ ซึ่งสองประการแรกจะมีผลมากที่สุด ดังนั้นข้อมูลของแรงดันภายในกระบอกสูบ จึงได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์การสันดาปได้



รูปที่ 2.1 แสดงความดันในกระบอกสูบในวัฏจักรที่มีการสันดาป (เส้นทึบ) และในวัฏจักรที่ไม่มีการสันดาปหรือ motoring (เส้นประ) [4]

การวัดความดันในระบบสูบในปัจจุบันนิยมทำการวัดด้วย piezoelectric pressure transducer ซึ่ง transducer ชนิดนี้ประกอบไปด้วยผลึกควอทซ์ ปลายหนึ่งของผลึกจะเปิดผ่านไดอะแฟรมสู่ความดันในระบบสูบ เมื่อความดันในระบบสูบเพิ่มขึ้น ผลึกจะถูกอัดและกำเนิดประจุไฟฟ้าขึ้น เป็นปริมาณขึ้นกับความดัน และจะมีตัวขยายประจุ (charge amplifier) แปลงและขยายสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าขาออก ให้แปรตามปริมาณประจุนี้ สัญญาณความดันจะถูก synchronize ด้วยสัญญาณ pulse ที่แต่ละองศาเพลลาข้อเหวี่ยง จึงได้ข้อมูลอยู่ในรูปของความดันในระบบสูบกับองศาเพลลาข้อเหวี่ยง ตัวอย่างผลการวัดความดันภายในห้องเผาไหม้แสดงไว้ในรูปที่ 2.1

ก่อนที่จะนำผลการวัดความดันภายในระบบสูบไปวิเคราะห์จะต้องมีการปรับแก้ข้อมูลก่อนเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้อง เนื่องจากความดันที่วัดได้จาก piezoelectric pressure transducer นั้นเป็นความดันสัมพัทธ์ เพื่อให้ได้ความดันสัมบูรณ์จะต้องมีการปรับแก้ข้อมูล โดยจะต้องทราบความดันสัมบูรณ์ ณ จุดใดจุดหนึ่งในวัฏจักร แล้วจึงปรับแก้ข้อมูลทั้งวัฏจักรให้เป็นความดันสัมบูรณ์โดยเทียบกับจุดที่อ้างอิง จุดที่มักใช้เป็นจุดอ้างอิง ได้แก่ ที่ BDC ในช่วงจังหวะดูด โดยให้ความดันสัมบูรณ์ในระบบสูบเท่ากับความดันเฉลี่ยในท่อร่วมไอดีซึ่งวัดได้ในระหว่างการทดสอบ จุดนี้มีความเหมาะสมเนื่องจากการไหลอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ ลูกสูบหยุด, วาล์วไอเสียปิด และวาล์วไอดีเปิด ทำให้มีการไหลหรือความดันลดเนื่องจากการไหลเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

เพื่อให้ได้ค่าข้อมูลแรงดันในระบบสูบ เทียบกับองศาเพลลาข้อเหวี่ยงที่ถูกต้องนั้น มีข้อที่ควรคำนึงถึงดังนี้

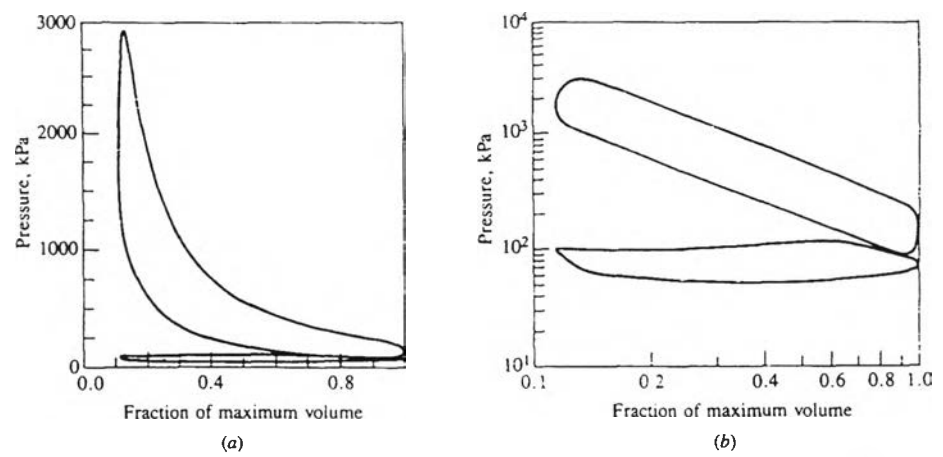
- ต้องมีความดันอ้างอิงที่ถูกต้อง เพื่อแปลงสัญญาณของความดันที่วัดได้เป็นความดันสัมบูรณ์
- เฟสของความดันเทียบกับองศาเพลลาต้องมีความถูกต้องเพียงพอ
- การประมาณปริมาตร clearance ต้องมีความละเอียดและถูกต้องเพียงพอ
- ต้องทำให้ความแปรปรวนของอุณหภูมิ transducer (ซึ่งจะมีผลให้ ตัวประกอบปรับแก้ transducer เปลี่ยนแปลง) ในระหว่างวัฏจักรน้อยที่สุด

อย่างไรก็ดี เราสามารถตรวจสอบคุณภาพข้อมูลความดันในระบบสูบได้โดยพลอตกราฟ $\log P$ เทียบกับ $\log V$ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงข้อมูลความดัน-ปริมาตร ของเครื่องยนต์ SI ที่จุดระเบิด ทั้งในแบบไดอะแกรมเชิงเส้น P-V และ $\log P - \log V$ บนไดอะแกรม กระบวนการอัดจะเป็นเส้นตรงความชัน 1.3 [5] จุดเริ่มต้นของการสันดาป จะเริ่มจากบริเวณจุดต่อระหว่างเส้นตรงกับเส้นโค้ง เช่นเดียวกันกับตำแหน่งที่จบการสันดาป และจังหวะการขยายหลังจากการสันดาปจะเป็นเส้นตรงความชัน 1.33 [5] การที่กราฟในช่วงอัดและขยายตัวมีลักษณะใกล้เคียงกับเส้นตรงก็เนื่องจากการอัดส่วนผสมยังไม่สันดาป และการขยายตัวของแก๊สสันดาปแล้วหลังจากจบการ

สันดาป ต่างเข้าใกล้กระบวนการ adiabatic isentropic (เมื่อ $pV^\gamma = \text{ค่าคงที่}$, $\gamma = c_p/c_v$) นอกจากนั้นยังมีการศึกษาอื่นๆ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการอัดและขยายสอดคล้องกับความสัมพันธ์แบบ polytropic

$$pV^n = \text{ค่าคงที่} \quad (2.1)$$

เลขชี้กำลัง n (polytropic exponent) ของกระบวนการอัดและขยายตัว จะมีค่าประมาณ 1.3 (± 0.05) สำหรับเชื้อเพลิงธรรมดา ซึ่งใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ย γ_{air} ของส่วนผสมยังไม่สันดาปตลอดกระบวนการอัด แต่มากกว่า γ_{air} ของส่วนผสมแก๊สสันดาปแล้วในระหว่างการขยายตัว เนื่องจากความร้อนที่สูญเสียให้กับผนังห้องเผาไหม้



รูปที่ 2.2 (a) Pressure-Volume diagram ; (b) กราฟ logP-log(V/Vmax) ที่ 1500 รอบต่อนาที , MBT timing , imep = 513 kPa , $\phi = 0.8$, $r_c = 8.72$, ใช้โพรเพนเป็นเชื้อเพลิง [4]

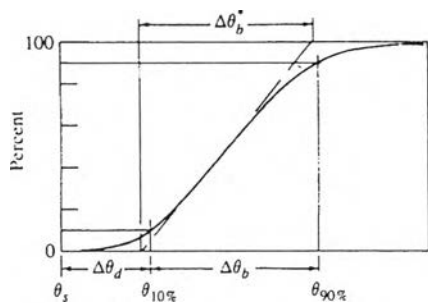
2.3 อัตราการสันดาป

อัตราการสันดาปส่วนผสมอากาศเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นจากค่าน้อยๆ เมื่อหัวเทียนจุดประกาย แล้วเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนสูงสุดที่ประมาณช่วงกลางของกระบวนการ และลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ในตอนท้ายของกระบวนการ เราสามารถใช้เส้นโค้งส่วนประกอบมวลสันดาปแล้วเทียบกับองศาเพลลาข้อเหวี่ยง แสดงลักษณะของกระบวนการสันดาป จากช่วงองศาเพลลาข้อเหวี่ยงที่เกิดการสันดาป ในช่วงแรกของกระบวนการสันดาปจะเป็นกระบวนการ flame development process จะเริ่มต้นจากหัวเทียนจุดประกาย จนกระทั่งถึงจุดหนึ่งที่ส่วนผสมเริ่มต้นสันดาป ซึ่งอัตราส่วนมวลที่ถูกสันดาปแม้จะมีปริมาณเล็กน้อยมาก แต่ก็สามารถวัดได้ ในกระบวนการช่วงนี้

ปัจจัยที่มีผลได้แก่ สถานะของส่วนผสม , ส่วนประกอบของเชื้อเพลิง , ลักษณะการเคลื่อนที่และความเร็วของส่วนผสมบริเวณหัวเทียน

กระบวนการในช่วงต่อมาเป็นกระบวนการที่ส่วนผสมส่วนใหญ่ถูกสันดาปจนกระทั่งเปลวลามไปถึงผนังของห้องเผาไหม้ ซึ่งอัตราการสันดาปในช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับสถานะของส่วนผสมในกระบอกสูบ

โพรไฟล์ของตัวประกอบมวลที่ถูกสันดาปแล้ว (mass fraction burned) ในรูปฟังก์ชันขององศาเพลลาข้อเหวี่ยงในแต่ละวัฏจักร จะมีกราฟเป็นรูปตัวเอส (S-shape) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เส้นโค้งแสดงเปอร์เซ็นต์มวลที่ถูกสันดาปแล้วเทียบกับองศาเพลลา (MFB curve) [4]

$\Delta\theta_d$ Flame development angle หรือ ignition delay คือ ช่วงมุมเพลลาข้อเหวี่ยงเริ่มตั้งแต่หัวเทียนจุดประกาย จนกระทั่ง มีอัตราส่วนมวลที่ถูกสันดาปแล้วในกระบอกสูบ หรือ อัตราส่วนพลังงานเคมีที่ถูกปลดปล่อยออกมาจำนวนหนึ่ง ซึ่งแม้จะมีค่าน้อย แต่มีนัยสำคัญ ซึ่งปริมาณดังกล่าวนิยมใช้ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ (บางครั้งอาจใช้ 1 หรือ 5 เปอร์เซ็นต์)

$\Delta\theta_b$ Rapid burning angle คือ ช่วงมุมองศาเพลลาข้อเหวี่ยงที่ต้องใช้ในการสันดาปส่วนผสมจำนวนหนึ่ง นิยามไว้ตั้งแต่ จบกระบวนการ flame development (อัตราส่วนมวลที่ถูกสันดาป 10 เปอร์เซ็นต์) จนจบกระบวนการลามของเปลว ซึ่งโดยปกติจะกำหนดที่อัตราส่วนมวลที่ถูกสันดาปแล้ว 90 เปอร์เซ็นต์

Wiebe Function เป็นรูปแบบของฟังก์ชันที่นิยมนำมาใช้เป็นตัวแทนของเส้นโค้งระหว่างตัวประกอบมวลที่สันดาปแล้วเทียบกับองศาเพลลา ซึ่งมีรูปแบบของฟังก์ชันดังนี้

$$x_b = 1 - \exp \left[-a \left(\frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta_b} \right)^{m-1} \right] \quad (2.2)$$

โดยที่ a และ m เป็นตัวแปรที่ใช้ปรับรูปร่างของฟังก์ชัน (adjustable parameters)

ค่า a และ m ที่แนะนำโดย Heywood [4] ให้ a= 5 และ m=2

สำหรับงานวิจัยนี้จะหา MFB (mass burned fraction) ด้วยวิธีของ Rassweiler and Withrow ซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยเรื่อง Motion Pictures of Engine Flames Correlated with Pressure Cards [6] ซึ่งทำการศึกษาภาพถ่ายต่อเนื่องของเปลวไฟที่ลามในกระบอกสูบทุก 2.4° CA กับผลการบันทึกค่าความดันในกระบอกสูบเทียบกับเวลาในวัฏจักรเดียวกัน

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดันในกระบอกสูบของวัฏจักรที่มีการจุดระเบิดเป็นผลมาจากปัจจัยต่อไปนี้

- การสันดาปของอากาศและเชื้อเพลิง
- การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากการเคลื่อนที่ของลูกสูบ
- ความร้อนสูญเสีย
- การรั่วของแก๊ส

อาศัยข้อเท็จจริงดังกล่าว การหา MFB ด้วยวิธีของ Rassweiler and Withrow มีสมมติฐานดังต่อไปนี้

- ก. MFB ที่แต่ละองศาเพลวข้อเหวี่ยงมีค่าคงที่
- ข. ส่วนผสมในกระบอกสูบเป็นเนื้อเดียว อุณหภูมิและความหนาแน่นสม่ำเสมอทั่วทั้งปริมาตรกระบอกสูบ
- ค. ในช่วงระหว่างกระบวนการอัดและขยาย ความสัมพันธ์ของความดันกับปริมาตรเป็นไปตามกระบวนการ isentropic process โดยมี polytropic exponent คงที่ตลอดกระบวนการ
- ง. ไม่คิดผลของความร้อนสูญเสียและการรั่วของแก๊ส
- จ. ดังนั้นจากข้อ ง. การเปลี่ยนแปลงความดันในกระบอกสูบจึงเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงความดันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและการสันดาปเท่านั้น
- ฉ. เฟอร์เซนต์ของมวลที่ถูกสันดาป ณ เวลาใดๆ มีค่าโดยประมาณเท่ากับเฟอร์เซนต์ความดันในกระบอกสูบที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการสันดาป

จากสมมติฐานดังกล่าว จะสามารถหา MFB ได้ โดยให้การเปลี่ยนแปลงความดันในกระบอกสูบขณะใดๆ เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงความดันเนื่องจากการสันดาป (ΔP_c) และการเปลี่ยนแปลงความดันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (ΔP_v) ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_v \quad (2.3)$$

โดยให้ ΔP_v หาได้จาก

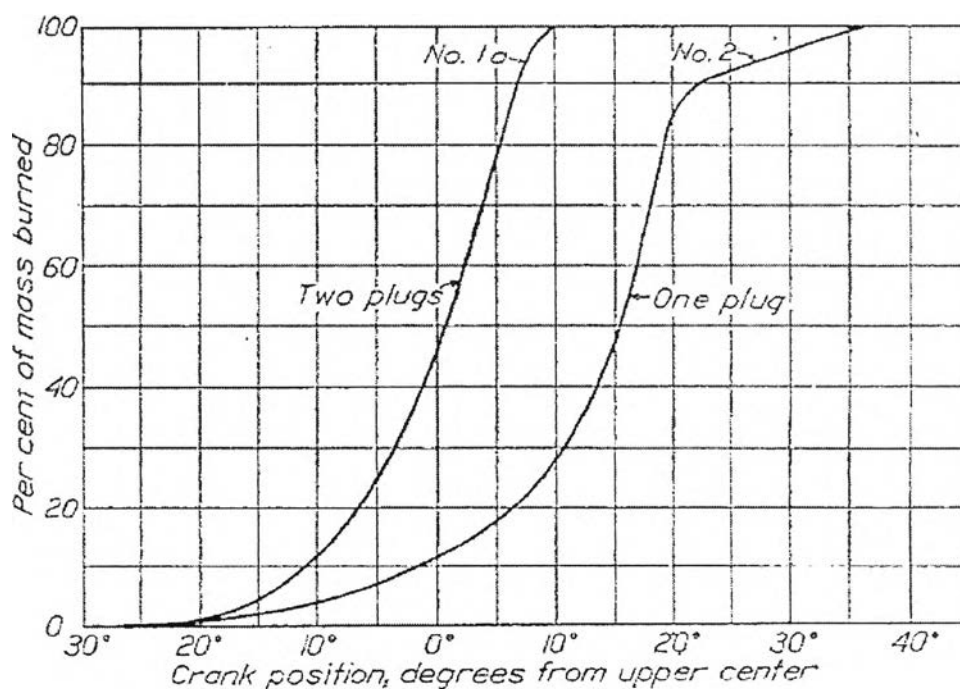
$$\Delta P_v = P_i - P_i = P_i \left(\frac{V_i}{V_i} \right)^n - P_i \quad (2.4)$$

ดังนั้น MFB ที่เวลาหรือตำแหน่ง i ใดๆ จะหาได้จาก

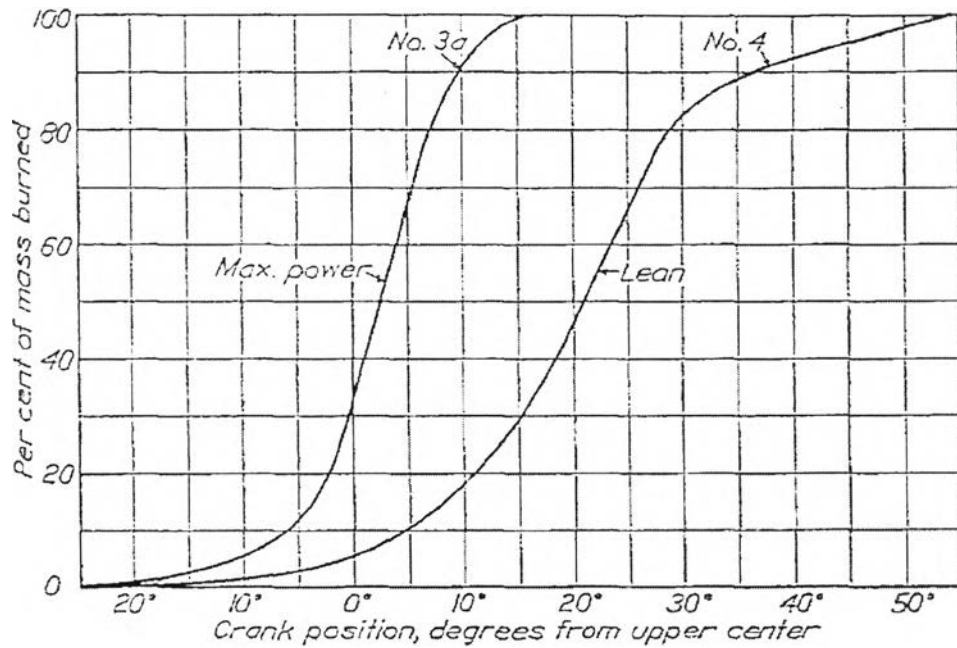
$$\text{MFB} = \frac{\sum_0^i \Delta P_c}{\sum_0^{\text{end}} \Delta P_c} \quad (2.5)$$

2.4 ความสัมพันธ์ของตัวแปรการทำงานกับอัตราการสันดาป

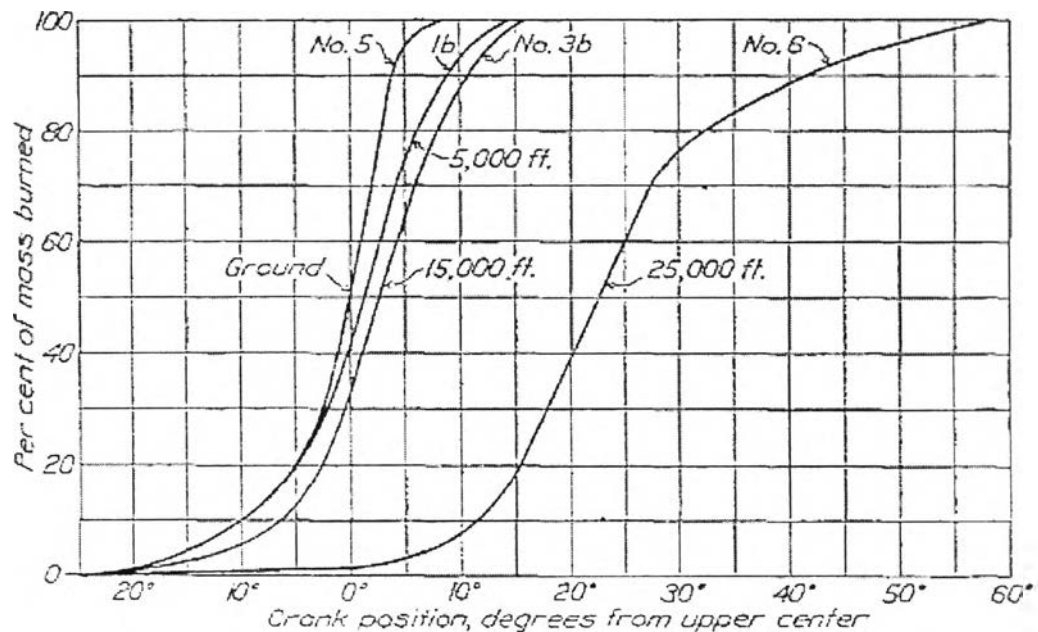
จากงานวิจัยของ Charles F. Marvin, Jr. ในเรื่อง Combustion time in the engine cylinder and its effect on engine performance [7] โดยการทดสอบทั้งในเครื่องยนต์จริงและใน bombs ได้แสดงให้เห็นถึงอัตราการสันดาปที่เปลี่ยนไปอันเนื่องมาจาก จำนวนหัวเทียน อัตราส่วนผสมอากาศ-เชื้อเพลิง และความสูง (ซึ่งมีผลต่อความหนาแน่นของบรรยากาศ) ดังแสดงในรูป 2.4 , 2.5 และ 2.6



รูปที่ 2.4 แสดงกราฟเปอร์เซ็นต์มวลที่ถูกสันดาปที่แต่ละองศาเพลลาข้อเหวี่ยงเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ใช้หัวเทียน 1 หัวเทียนกับกรณีที่ใช้ 2 หัวเทียน [7]

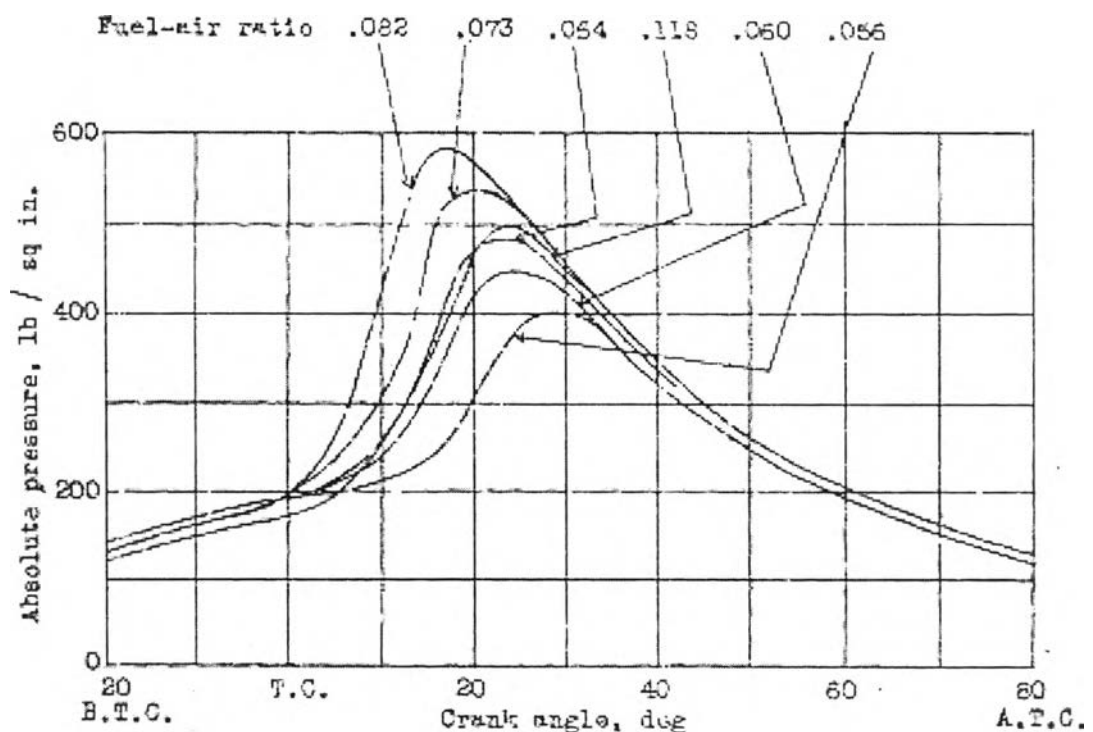


รูปที่ 2.5 แสดงกราฟเปอร์เซ็นต์มวลที่ถูกสันดาปที่แต่ละองศาเพลลาข้อเหวี่ยงเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่มีอัตราส่วนอากาศเชื้อเพลิงเป็น 12.9 (ได้กำลังสูงสุด) กับกรณีที่ Lean กว่าคือมีอัตราส่วนอากาศเชื้อเพลิงเป็น 14.7 [7]



รูปที่ 2.6 แสดงกราฟเปอร์เซ็นต์มวลที่ถูกสันดาปที่แต่ละองศาเพลลาข้อเหวี่ยงเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่มีความสูงระดับต่างๆ ได้แก่ ระดับพื้นดิน และที่ความสูง 5,000 , 15,000, 25,000 ฟุตจากระดับพื้นดิน [7]

จากงานวิจัยของ Harold G. Gerrish and Fred Voss เรื่อง Analysis of Cylinder Pressure Indicator Diagrams Showing Effects of Mixture Strength and Spark Timing [8] ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนอากาศเชื้อเพลิง และ องศาการจุดระเบิดที่มีต่อลักษณะความดันในกระบอกสูบ โดยศึกษาด้วยการทดสอบเครื่องยนต์สูบเดียว จ่ายเชื้อเพลิงด้วยคาร์บิวเรเตอร์ ความจุกระบอกสูบ 206 ล.บ.นิ้ว ที่อัตราส่วนการอัด 7.4 และวัดความดันในกระบอกสูบด้วย indicator diagram ได้ให้ข้อสรุปว่า ที่อัตราส่วนผสมเชื้อเพลิงอากาศเท่ากับ 0.082 (equivalence ratio ประมาณ 1.2) เป็นจุดที่อัตราการสันดาปสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 2.7

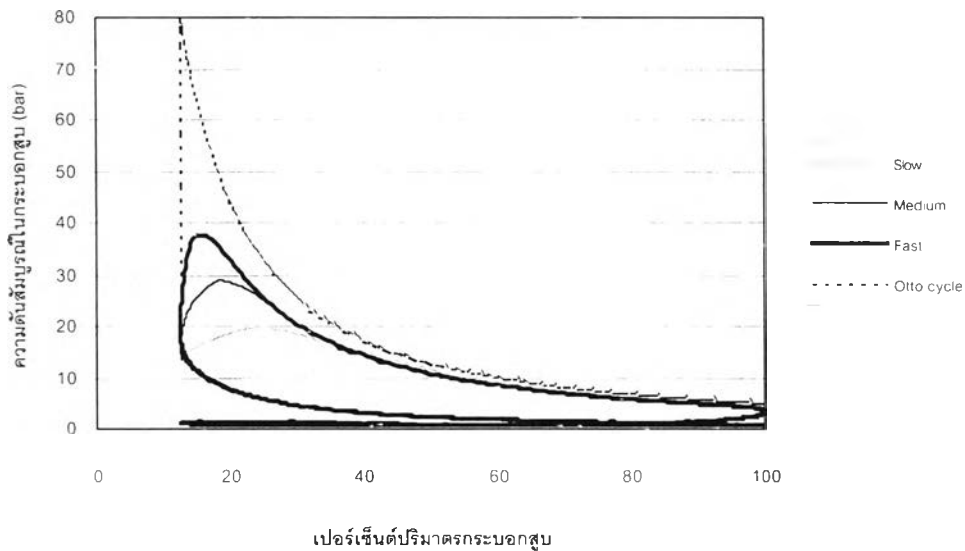


รูปที่ 2.7 แสดงกราฟความดันกับองศาเพลลาข้อเหวี่ยงที่ส่วนผสมเชื้อเพลิงอากาศ 0.054 - 0.118 (equivalence ratio 0.79 - 1.73) องศาการจุดระเบิด 16° CA btdc [8]

ซึ่งที่จุดนี้เป็นจุดที่ให้กำลังสูงสุดด้วย สอดคล้องกับงานวิจัยอ้างอิงก่อนหน้าที่ซึ่งอัตราส่วนผสมที่มีอัตราการสันดาปสูงสุดเป็นจุดที่ให้กำลังสูงสุด เมื่ออัตราส่วนผสมเชื้อเพลิงอากาศมากหรือน้อยกว่านี้ อัตราการสันดาปจะช้าลงและความแปรปรวนของวัฏจักรจะมากขึ้นด้วย

2.5 ความสำคัญของอัตราการสันดาปต่อสมรรถนะและการควบคุมมลพิษ

หากพิจารณาเปรียบเทียบระหว่าง วัฏจักรทางทฤษฎีกับวัฏจักรที่เกิดขึ้นจริง จะเห็นว่าใน วัฏจักรจริง จะมีการจุดระเบิดล่วงหน้าก่อนลูกสูบถึงตำแหน่งศูนย์ตายบน และการสันดาปจะเสร็จสิ้นหลังจากลูกสูบเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งศูนย์ตายบนไปแล้วช่วงหนึ่ง ดังนั้นความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นในวัฏจักรจริง จะน้อยกว่าวัฏจักรทางทฤษฎี ซึ่งสมมติให้การสันดาปเกิดขึ้นและเสร็จสิ้น ณ จุดที่ ปริมาตรน้อยสุด (clearance volume) หากพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างวัฏจักรทางทฤษฎี กับวัฏจักรจริงที่มีอัตราการสันดาปต่างๆ ในรูป 2.8 ประกอบกับตาราง 2.1 ก็ จะเห็นว่า หากลดช่วงเวลาการสันดาปให้น้อยลง คือเข้าใกล้วัฏจักร constant volume heat addition มากขึ้น ประสิทธิภาพก็จะสูงขึ้นด้วย

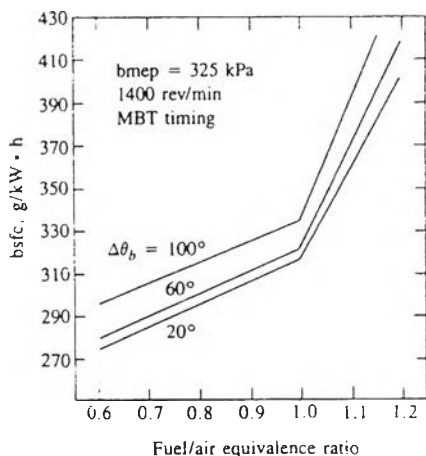


รูปที่ 2.8 ไดอะแกรมความสัมพันธ์ความดันกับความดันกับปริมาตร

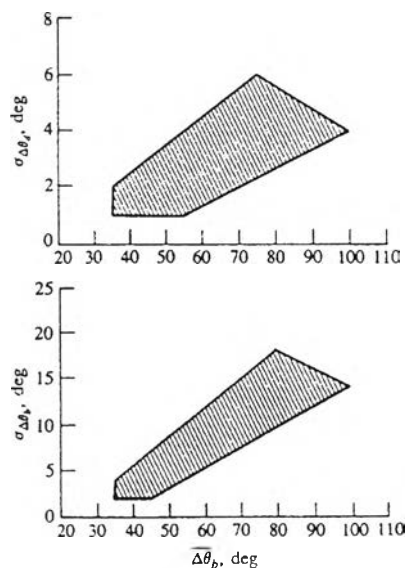
ตารางที่ 2.1 แสดงค่า imep และ η_{ii} ของ Otto cycle. Fast, Medium และ Slow burn cycle

	Otto cycle	Fast	Medium	Slow
imep (bar)	14.25	9.50	8.83	7.83
η_{ii}	0.49	0.33	0.30	0.27

ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Heywood ซึ่งศึกษาโดยการจำลองวัฏจักร ด้วยแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิก (กราฟในรูปที่ 2.9) พบว่า หากช่วงองศา flame development น้อย คือ อัตราการสันดาปรวดเร็วขึ้น จะส่งผลให้ประหยัดเชื้อเพลิงขึ้น

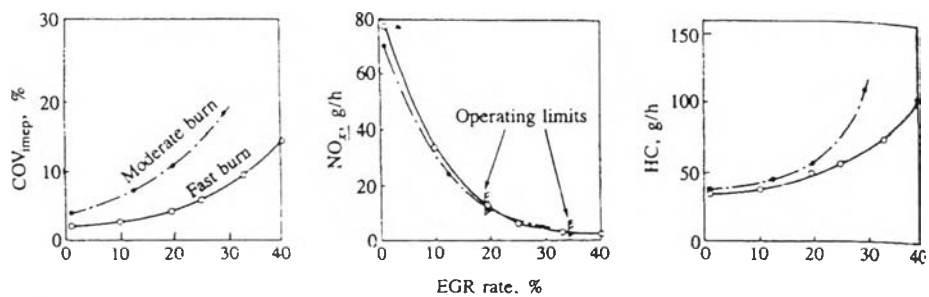


รูปที่ 2.9 ผลการทำนายการประหยัดเชื้อเพลิงจากแบบจำลองวัฏจักรซึ่งอาศัยหลักเทอร์โมไดนามิก [1]



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความแปรปรวนของ $\Delta\theta_d$ และ ความแปรปรวนของช่วง $\Delta\theta_b$ กับ $\Delta\theta_b$ จากข้อมูลของเครื่องยนต์ที่มีห้องเผาไหม้และสภาวะการทำงานต่างๆกัน [2]

จากงานของ Young [2] โดยใช้ข้อมูลจากเครื่องยนต์ที่มีห้องเผาไหม้รูปร่างต่างๆ และสภาวะการทำงานต่างๆกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 พบว่าโดยรวมแล้ว เมื่ออัตราการสันดาปเร็วขึ้น ความแปรปรวนของวัฏจักรลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Karodo [3] ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.11 นอกจากนั้น จากกราฟระหว่าง NO_x และ HC ที่เกิดขึ้นเมื่อเจือจางส่วนผสมด้วย EGR สัดส่วนต่างๆ จะเห็นว่าอัตราการสันดาปที่รวดเร็วจะช่วยขยายขีดจำกัดของ EGR และสามารถลด NO_x ได้มากขึ้น ในขณะที่เดียวกัน ก็ลด HC ลงด้วย นั่นก็คือ หากออกแบบเครื่องยนต์เพื่อให้มีอัตราการสันดาปที่รวดเร็ว จะทำให้สามารถเพิ่ม EGR หรือ ใช้ส่วนผสมอากาศเชื้อเพลิงที่บางลงได้ ซึ่งเป็นการทำให้เราสามารถควบคุมมลพิษได้ โดยที่เครื่องยนต์ยังเดินเรียบ และมีการตอบสนองที่เป็นปกติอยู่ได้



รูปที่ 2.11 แสดงผลกระทบของอัตราการสันดาปต่อความสัมพันธ์ของ EGR ต่อ NO_x , HC และความแปรปรวนของวัฏจักร ของเครื่องยนต์ Si ที่ทำงานที่ 1400 รอบต่อนาที , imep 324 kPa , equivalent ratio = 1.0 , MBT timing [3]

2.6 แบบจำลองการสันดาป

การศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองการสันดาปในเครื่องยนต์สันดาปภายในมีเป็นจำนวนมาก ซึ่งก็มีความซับซ้อนและสมมุติฐานแตกต่างกันไป แล้วแต่การนำไปประยุกต์ แบบจำลองการสันดาปที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้อ้างอิงตามหนังสือ Internal Combustion Engines : Applied Thermosciences ของ Colin R. Ferguson [9]

ตามกฎของแก๊สอุดมคติ

$$PV = mRT \quad (2.6)$$

เมื่อ Take logarithm ทั้งสองข้างของสมการ แล้วหาอนุพันธ์เทียบกับองศาเซลเซียสจะหาได้

$$\frac{1}{P} \frac{dP}{dt} + \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} = \frac{1}{T} \frac{dT}{dt} \quad (2.7)$$

จากกฎข้อหนึ่งของเทอร์โมไดนามิค ทำการหาอนุพันธ์เทียบกับองศาเฟลาข้อเหวี่ยงเมื่อสารทำงานเป็นแก๊สอุดมคติ ซึ่งมี specific heat คงที่ จะได้

$$mc_v \frac{dT}{dt} = \frac{dQ}{dt} - p \frac{dV}{dt} \quad (2.8)$$

หารข้างซ้ายของสมการด้วย mRT และข้างขวาของสมการด้วย PV แล้วจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\frac{1}{T} \frac{dT}{dt} = (\gamma - 1) \left(\frac{1}{PV} \frac{dQ}{dt} - \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \right) \quad (2.9)$$

รวมสมการ 2.6 กับ 2.7 และแทน dQ ด้วย $Q_m dx$ จะได้

$$\frac{dP}{dt} = -\gamma \frac{P}{V} \frac{dV}{dt} + (\gamma - 1) \frac{Q_m}{V} \frac{dx}{dt} \quad (2.10)$$

normalize สมการโดยให้

$$\tilde{P} = P / P_1 \quad \tilde{V} = V / V_1 \quad \tilde{Q} = Q_m / P_1 V_1$$

เมื่อ P_1 และ V_1 เป็นความดันและปริมาตรอ้างอิงจุดใดจุดหนึ่งในวัฏจักร ในที่นี้จะให้เป็นทีจุด ศูนย์ตายกลาง (BDC) ในจังหวะดูด จะทำให้สมการ 2.10 อยู่ในรูปดังนี้

$$\frac{d\tilde{P}}{dt} = -\gamma \frac{\tilde{P}}{\tilde{V}} \frac{d\tilde{V}}{dt} + (\gamma - 1) \frac{\tilde{Q}}{\tilde{V}} \frac{dx}{dt} \quad (2.11)$$

โดยที่ปริมาตร \tilde{V} และอนุพันธ์ $\frac{d\tilde{V}}{dt}$ เป็นฟังก์ชันของ θ ดังสมการต่อไปนี้

$$\tilde{V} = \frac{1}{r_c} \left[1 + \frac{1}{2} (r_c - 1) \left(R + 1 - \cos \theta - (R^2 - \sin^2 \theta)^{1/2} \right) \right] \quad (2.12)$$

$$\frac{d\tilde{V}}{d\theta} = \frac{1}{2} \left(\frac{r_c - 1}{r_c} \right) \left[\sin \theta + \frac{\sin \theta \cos \theta}{(R^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}} \right] \quad (2.13)$$

สำหรับอนุพันธ์ $\frac{dx}{d\theta}$ หาได้จากการหาอนุพันธ์สมการ wiebe function (สมการ 2.2) ได้ดังนี้

$$\frac{dx_b}{d\theta} = \frac{a(m+1)}{\Delta\theta_b} \left(\frac{\theta - \theta_s}{\Delta\theta_b} \right)^m \text{EXP} \left[-a \left(\frac{\theta - \theta_s}{\Delta\theta_b} \right)^{m-1} \right] \quad (2.14)$$

ดังนั้นเมื่อทราบ γ และค่าความร้อนที่ได้รับต่อวัฏจักร (Q.) แล้ว สมการ 2.10 ก็จะจัดให้อยู่ในรูปดังต่อไปนี้ได้

$$\frac{dP}{d\theta} = f(\theta, \tilde{P}) \quad (2.15)$$

ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์เชิงเส้นอันดับหนึ่ง สามารถอินทิกรัลหาคำตอบได้โดยวิธีการเชิงเลข