TJ755
.U53
.B52

351799
บริจาค
ของสำนักวิทยบริการฯ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
5 ส.ค. 52

อุณหพลศาสตร์ของ
เครื่องยนต์สันดาปภายใน

บัญชา ค้งตระกูล, Ph. D

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์

10 ส.ค. 2552

อุณหพลศาสตร์ของเครื่องยนต์สันดาปภายใน

โดย บัญชา ค้งตระกูล

ISBN : 978-611-7019-20-3

สงวนลิขสิทธิ์ตาม พ.ร.บ. ลิขสิทธิ์
ห้ามลอกเลียนไม่ว่าส่วนหนึ่งส่วนใดของหนังสือเล่มนี้
นอกจากจะได้รับอนุญาต

พิมพ์ที่ บริษัท จรัลสนิทวงศ์การพิมพ์ จำกัด
285-292 ม.4 ซ.เพชรเกษม102/3
แขวงหลักสอง เขตบางแค กทม. 10160
โทรศัพท์ 02-809-2281-3 , 02-809-2285 แฟกซ์ 02-809-2284
www.fast-books.com E-mail : info@fast-books.com

คำนำ

หนังสือเล่มนี้มีจุดประสงค์เพื่อใช้ประกอบการศึกษาวิชาเครื่องยนต์สันดาปภายในตามหลักสูตรระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ โดยเรียบเรียงขึ้นจากเอกสารประกอบการเรียนวิชาเครื่องยนต์สันดาปภายในและวิศวกรรมยานยนต์ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตและอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต เนื้อหาในหนังสือเล่มนี้ยังสามารถนำไปใช้ประกอบการศึกษาในหลักสูตรระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูงสาขาวิชาช่างยนต์ได้อีกด้วย

หนังสือเล่มนี้ใช้วิชาพื้นฐานทางวิศวกรรมมาประยุกต์หลายวิชา เช่น อุณหพลศาสตร์ กลศาสตร์ของไหล เคมี เชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น การเผาไหม้ ผู้อ่านจึงควรมีพื้นฐานของวิชาเหล่านี้อยู่บ้าง เพื่อให้เข้าใจเนื้อหาได้ง่าย ผู้เขียนจึงยกตัวอย่างประกอบไว้เป็นจำนวนมาก และจัดเตรียมโจทย์แบบฝึกหัดไว้ให้ผู้อ่านตรวจสอบความเข้าใจในเนื้อหาด้วยตนเอง

ผู้เขียนหวังว่าหนังสือเล่มนี้คงจะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิชาดังกล่าวตามสมควร และยินดีน้อมรับคำติชม ข้อเสนอแนะต่างๆจากผู้อ่าน เพื่อนำไปปรับปรุงแก้ไขให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นต่อไป

บัญชา ค้งตระกูล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์

พฤษภาคม 2552

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 หลักการพื้นฐานของเครื่องยนต์สันดาปภายใน	
1-1 เครื่องยนต์สันดาปภายใน	1
1-2 การจำแนกชนิดของเครื่องยนต์	5
1-3 ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์	7
1-3.1 ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ที่ไม่เคลื่อนที่	7
1-3.2 ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ที่เคลื่อนที่	8
1-4 ระบบช่วยของเครื่องยนต์	11
1-5 การหล่อลื่น	16
1-5.1 การหล่อลื่นในรถยนต์	17
1-5.2 ความหนืด	18
1-5.3 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น	22
1-5.4 สารหล่อลื่นเครื่องยนต์	23
1-5.5 สารหล่อลื่นระบบส่งกำลัง	23
1-6 การคำนวณพื้นฐานของเครื่องยนต์	25
แบบฝึกหัด	29
เอกสารอ้างอิง	32
เอกสารที่แนะนำให้ศึกษาเพิ่มเติม	32
บทที่ 2 วัฏจักรทางทฤษฎีของเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบลูกสูบ	
2-1 บทนำ	34
2-2 วัฏจักรอุดมคติ	37
2-3 การวิเคราะห์วัฏจักรทางทฤษฎี	41
2-3.1 วัฏจักรผสม	45
2-3.2 วัฏจักรความดันคงที่	47
2-3.3 วัฏจักรปริมาตรคงที่	48
2-4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพความร้อนและงานสุทธิของวัฏจักร	49
2-5 ตัวอย่างการวิเคราะห์วัฏจักรอากาศมาตรฐาน	52
แบบฝึกหัด	58
เอกสารอ้างอิง	63
เอกสารที่แนะนำให้ศึกษาเพิ่มเติม	64

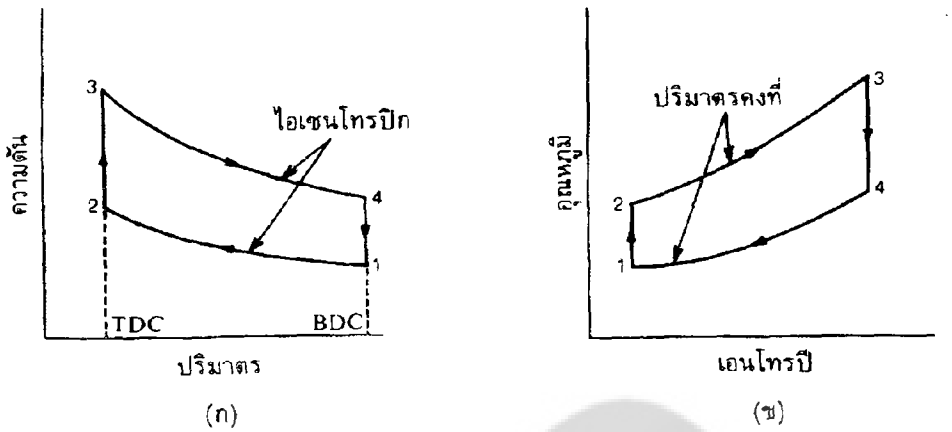
บทที่ 3 สมรรถนะของเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบลูกสูบ
3-1 กำลังและความดันเฉลี่ยประสิทธิผล 65
3-2 ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์และ
ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 68
3-3 การทดสอบเครื่องยนต์แบบ Morse test 80
3-4 พิกัดความสามารถของเครื่องยนต์ 84
3-5 เส้นกราฟสมรรถนะของเครื่องยนต์ 86
3-6 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ 88
3-7 การสมดุลความร้อน 93
แบบฝึกหัด 97
เอกสารอ้างอิง 101
เอกสารที่แนะนำให้ศึกษาเพิ่มเติม 101
บทที่ 4 ระบบเชื้อเพลิง
4-1 เชื้อเพลิง 102
4-1.1 สัญลักษณ์และสูตรทางเคมี 103
4-1.2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิง 105
4-1.3 คุณสมบัติของธาตุและสารประกอบ 109
4-1.4 การคำนวณการเผาไหม้ 111
4-2 ระบบเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน 116
4-2.1 ส่วนผสมไอดีของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน 116
4-2.2 คาร์บูเรเตอร์ 118
4-2.3 การไหลของอากาศ 122
4-2.4 การไหลของเชื้อเพลิง 128
4-2.5 ความเร็ววิกฤติของอากาศ 133
4-3 ระบบเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซล 135
4-3.1 การฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซล 135
4-3.2 ความเร็วและงานของการฉีดเชื้อเพลิง 136
4-4 การอัดบรรจุของเครื่องยนต์ 140
4-4.1 การอัดบรรจุของเครื่องยนต์ดีเซล 140
4-4.2 ผลของการใช้เครื่องอัดบรรจุ 141
แบบฝึกหัด 146
เอกสารอ้างอิง 151

เอกสารที่แนะนำให้ศึกษาเพิ่มเติม 151
บทที่ 5 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิง
5-1 บทนำ 152
5-2 หลักการพื้นฐานของการเผาไหม้ 154
5-2.1 ส่วนผสมที่เผาไหม้ได้และ
ผลผลิตจากการเผาไหม้ 155
5-2.2 ค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของ
เชื้อเพลิงและส่วนผสม 158
5-2.3 ความจุความร้อนของไอดีและ
ผลผลิตจากการเผาไหม้ 159
5-3 ปฏิกิริยาเคมีในการเผาไหม้เชื้อเพลิง 160
5-3.1 การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของเชื้อเพลิง
ของเหลวที่ส่วนผสมมีความถูกต้อง
ทางเคมี 160
5-3.2 การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของเชื้อเพลิง
ก๊าซที่ส่วนผสมเชื้อเพลิงกับอากาศมี
ความถูกต้องทางเคมี 162
5-3.3 ปฏิกิริยาเคมีในกรณีที่มีอากาศมากกว่า
หรือน้อยกว่าปริมาณที่ต้องการทางทฤษฎี 162
5-3.4 ปฏิกิริยาเคมีในกรณีที่เป็นส่วนผสมบาง 163
5-3.5 ปฏิกิริยาเคมีในกรณีที่เป็นส่วนผสมหนา 163
5-3.6 ส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศที่กำหนด
ด้วยอัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศ 164
5-4 การวิเคราะห์ผลผลิตจากการเผาไหม้ 178
5-4.1 อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศและ
สัมประสิทธิ์อากาศ 180
5-4.2 น้ำในสภาพไอที่อยู่ในผลผลิตจากการเผาไหม้ 183
5-4.3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 184
5-4.4 ปริมาณก๊าซไอเสียแห้งที่เกิดขึ้นต่อ
เชื้อเพลิง 1 kg 185
5-5 อิทธิพลของเชื้อเพลิงต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ 191
แบบฝึกหัด 193

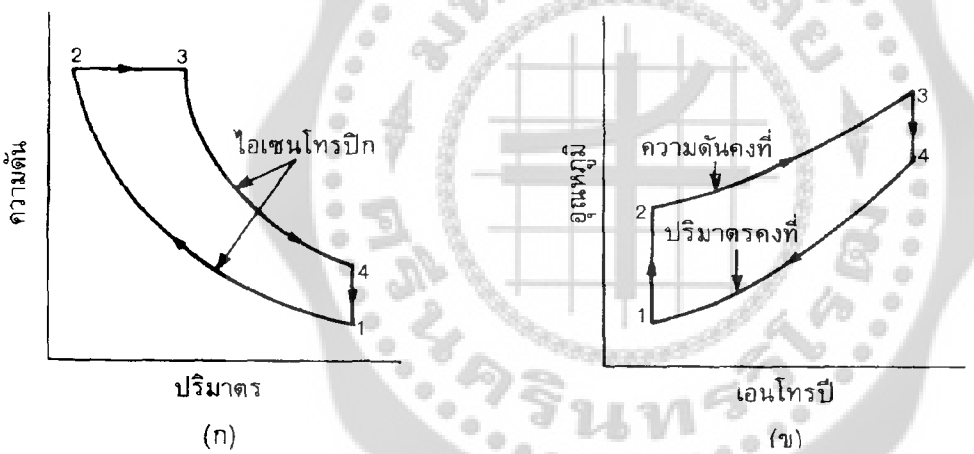
ภาคผนวก 194
เอกสารอ้างอิง 198
เอกสารที่แนะนำให้ศึกษาเพิ่มเติม 198
บทที่ 6 การวิเคราะห์วัฏจักรก๊าซมาตรฐาน
6-1 บทนำ 199
6-2 การวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์ 199
6-3 การวิเคราะห์วัฏจักรก๊าซมาตรฐาน 205
6-3.1 วัฏจักรปริมาตรคงที่ 205
6-3.2 วัฏจักรจำกัดความดันและวัฏจักรความดันคงที่ 210
6-3.3 การเปรียบเทียบวัฏจักร 211
6-4 ตัวอย่างการวิเคราะห์วัฏจักรก๊าซมาตรฐาน 214
แบบฝึกหัด 219
เอกสารอ้างอิง 220
เอกสารที่แนะนำให้ศึกษาเพิ่มเติม 220
บทที่ 7 การวิเคราะห์วัฏจักรเชื้อเพลิงกับอากาศ
7-1 บทนำ 221
7-2 วัฏจักรเชื้อเพลิงกับอากาศแบบปริมาตรคงที่ 222
7-3 วัฏจักรเชื้อเพลิงกับอากาศแบบจำกัดความดัน 224
7-4 วิธีประมาณในการคำนวณวัฏจักรเชื้อเพลิงกับอากาศ 225
7-4.1 วัฏจักรที่มีการเผาไหม้แบบปริมาตรคงที่ 225
7-4.2 วัฏจักรที่มีการเผาไหม้แบบจำกัดความดัน 228
7-5 ตัวอย่างการวิเคราะห์วัฏจักรเชื้อเพลิงกับอากาศ 228
แบบฝึกหัด 239
ภาคผนวก 240
เอกสารอ้างอิง 241
เอกสารที่แนะนำให้ศึกษาเพิ่มเติม 241
บทที่ 8 การวิเคราะห์วัฏจักรจริง
8-1 บทนำ 242
8-2 กระบวนการดูด 243
8-2.1 ความดันระหว่างการดูด 243
8-2.2 อุณหภูมิของก๊าซในการดูด 245
8-2.3 ประสิทธิภาพการดูดไอดี 247

8-3 กระบวนการอัด 250
8-4 กระบวนการเผาไหม้ 253
8-4.1 การเผาไหม้ในเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน 253
8-4.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการเผาไหม้ 257
8-4.3 การเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซล 260
8-4.4 อุณหภูมิและความดันตรงปลาย
กระบวนการเผาไหม้ 264
8-5 กระบวนการขยายตัว 269
8-6 กระบวนการคายไอเสีย 272
8-7 การหาค่าความดันเฉลี่ยหัวสูบด้วยวิธีของ
Mazing และ Sineutsky 275
แบบฝึกหัด 282
ภาคผนวก 283
เอกสารอ้างอิง 283
เอกสารที่แนะนำให้ศึกษาเพิ่มเติม 284

จักรดีเซลมีอัตราส่วนการอัดสูงจึงทำให้เครื่องยนต์สามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานจากเชื้อเพลิงได้มากกว่าเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน



รูปที่ 1-1.1 วัฏจักรออตโตบน (ก) แผนภาพความดันกับปริมาตร และ (ข) อุณหภูมิกับเอนโทรปี



รูปที่ 1-1.2 วัฏจักรดีเซลบน (ก) แผนภาพความดันกับปริมาตร และ (ข) อุณหภูมิกับเอนโทรปี

ตามปกติแล้วเครื่องยนต์ดีเซลความเร็วสูงจะไม่ทำงานตามวัฏจักรดีเซลแต่จะทำงานตามวัฏจักรผสม ซึ่งพลังงานที่จ่ายเข้าสู่ระบบเกิดขึ้นที่ปริมาตรคงที่ส่วนหนึ่งและอีกส่วนหนึ่งเกิดขึ้นที่ความดันคงที่ (ดูรูปที่ 1-1.3) แต่กระบวนการอื่นๆ ยังคงเหมือนกับวัฏจักรดีเซล

วัฏจักรต่างๆที่กล่าวมาเหล่านี้เป็นวัฏจักรอุดมคติ (Ideal cycle) ที่ใช้ในการพิจารณาทางทฤษฎี วัฏจักรที่แท้จริงจะเปลี่ยนแปลงไปจากวัฏจักรอุดมคติเพราะจะมีการย้อนกลับไม่ได้ (Irreversibility) เกิดขึ้นหลายประการ คือ พลังงาน

บทที่ 1

หลักการพื้นฐานของเครื่องยนต์สันดาปภายใน

1-1 เครื่องยนต์สันดาปภายใน

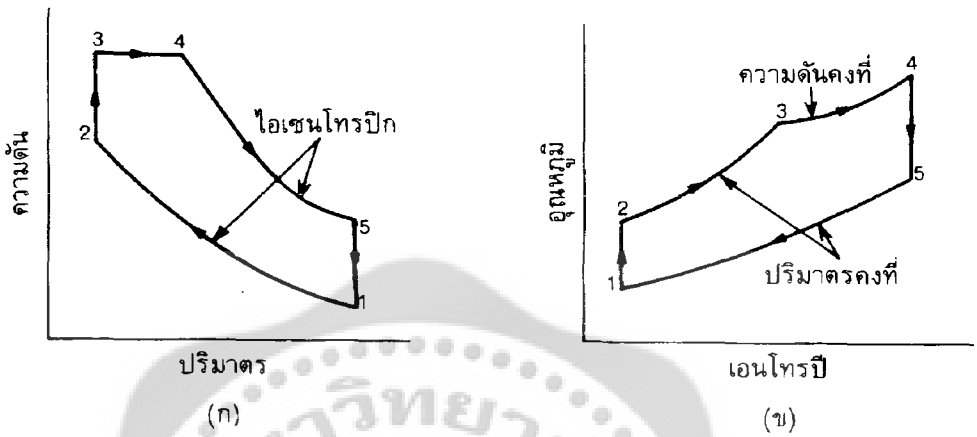
เครื่องยนต์สันดาปภายในคือเครื่องจักรความร้อนชนิดหนึ่ง วัฏจักรทางอุณหพลศาสตร์ที่ใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้ลูกสูบคือ วัฏจักรออตโต (Otto cycle), วัฏจักรดีเซล (Diesel cycle), และวัฏจักรผสม (Dual cycle) วัฏจักรเหล่านี้เป็นวัฏจักรที่ ไม่มีการเปลี่ยนสถานะ (Phase)

สำหรับวัฏจักรออตโต การให้และการรับพลังงานเกิดขึ้นที่กระบวนการปริมาตรคงที่ การอัดและการขยายตัวเกิดขึ้นแบบไอเซนโทรปิก (Isentropic) (ดูรูปที่ 1-1.1) เครื่องยนต์ที่ทำงานตามวัฏจักรออตโต อาจใช้น้ำมันก๊าซโซลีนเป็นเชื้อเพลิงโดยใช้คาร์บูเรเตอร์ในการเตรียมส่วนผสมของอากาศกับไอน้ำมันเชื้อเพลิงให้ได้สัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการสันดาปที่รวดเร็ว และใช้หัวเทียนสำหรับการจุดส่วนผสมให้เกิดการเผาไหม้ในตอนปลายของจังหวะอัด เครื่องยนต์แบบนี้เรียกว่าเป็นเครื่องยนต์ที่เกิดการจุดระเบิดด้วยประกายไฟ (Spark ignition engine หรือ SI engine)

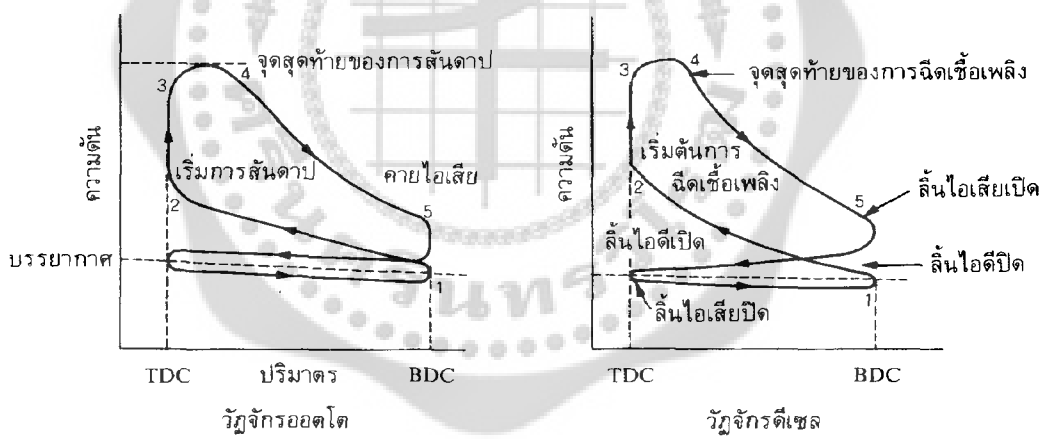
สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล พลังงานที่เข้าสู่ระบบเกิดขึ้นที่ความดันคงที่ แต่พลังงานที่ถ่ายเทออกจากระบบเกิดขึ้นที่ปริมาตรคงที่ การอัดและการขยายตัวเกิดขึ้นแบบไอเซนโทรปิก เครื่องยนต์ที่ทำงานตามวัฏจักรนี้จะใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง โดยไม่ใช้คาร์บูเรเตอร์แต่จะใช้หัวฉีดน้ำมันแทน เครื่องยนต์ดีเซลจะใช้การจุดระเบิดด้วยความร้อนของอากาศที่ถูกอัดอยู่ในห้องเผาไหม้ ดังนั้นจึงเรียกเครื่องยนต์ดีเซลว่าเป็นเครื่องยนต์ที่เกิดการจุดระเบิดด้วยการอัด (Compression ignition engine หรือ CI engine)

อัตราส่วนการอัด (Compression ratio) ของเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยการอัดจะมากกว่าเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟเนื่องจากมีเฉพาะอากาศเท่านั้นที่ถูกอัดในวัฏจักรดีเซล จึงไม่มีขีดจำกัดว่าอัตราส่วนการอัดจะมีค่าสูงสุดได้ไม่เกินเท่าใด สิ่งที่เป็นข้อจำกัดก็คือความสามารถของวัสดุที่นำมาใช้ทำเป็นชิ้นส่วนของเครื่องยนต์จะต้องสามารถทนความดันสูงขนาดนั้นได้ ประสิทธิภาพของวัฏจักรดีเซลจะสูงขึ้นถ้าอัตราส่วนการอัดเพิ่มมากขึ้น การที่วัฏ

ที่เข้าสู่ระบบในกระบวนการจริงๆจะไม่เป็นทั้งความดันคงที่และปริมาตรคงที่ กระบวนการในการอัดและขยายตัวจะไม่เป็นแบบไอเซนโทรปิก เพราะว่ามีการถ่ายเทความร้อนเข้าและออกจากระบบ นอกจากนี้ยังต้องมีการใช้กำลังอีกจำนวนหนึ่งในการดูดอากาศหรือไอดีเข้าและระบายไอเสียออก แผนภาพความดันกับปริมาตรที่แท้จริงของเครื่องยนต์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1-1.4



รูปที่ 1-1.3 วัฏจักรผสมบน (ก) แผนภาพความดันกับปริมาตร และ (ข) อุณหภูมิกับเอนโทรปี

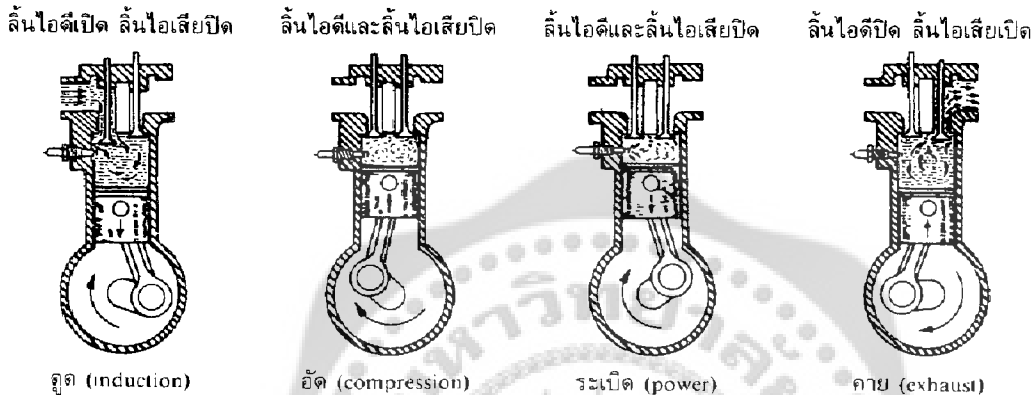


รูปที่ 1-1.4 แผนภาพความดันกับปริมาตรที่แท้จริง

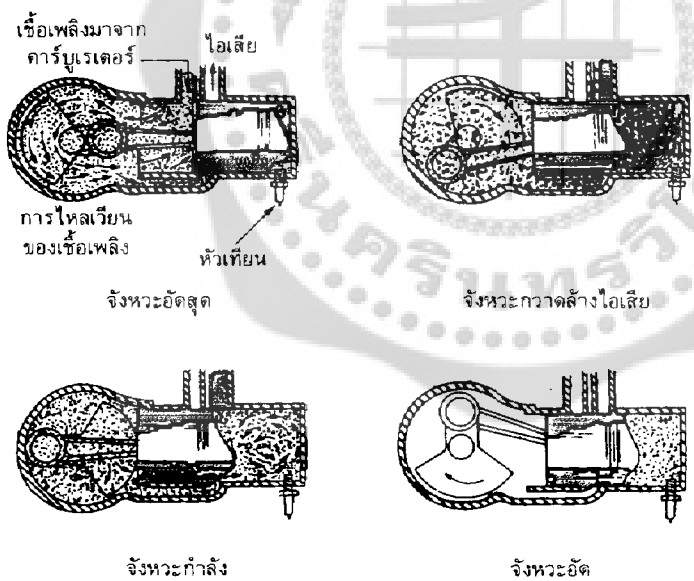
เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟและเครื่องยนต์อัดระเบิดอาจจะทำงานแบบ 4 จังหวะหรือ 2 จังหวะก็ได้ เครื่องยนต์ 4 จังหวะจะทำงานครบทั้ง 4 จังหวะ คือ ดูด, อัด, ขยายตัว (กำลัง), และคายไอเสียเมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ไป 4 ช่วงชัก (Stroke) หรือเพลาข้อเหวี่ยงหมุนครบ 2 รอบ การทำงานของเครื่องยนต์ 4 จังหวะได้แสดงไว้ในรูปที่ 1-1.5

สำหรับเครื่องยนต์ 2 จังหวะ เครื่องยนต์จะดูด, อัด, ขยายตัว, และคายไอเสียครบภายในการเคลื่อนที่ของลูกสูบ 2 ช่วงชัก หรือเพลาข้อเหวี่ยงหมุนไป

1 รอบ โครงสร้างของเครื่องยนต์ 2 จังหวะก็คล้ายคลึงกับเครื่องยนต์ 4 จังหวะ แต่ไม่มีการใช้ลิ้น (Valve) ช่องทางด้านล่างของกระบอกสูบจะถูกปิด-เปิดด้วยลูกสูบเมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้น–ลงภายในกระบอกสูบ คาร์บูเรเตอร์จะต่อเข้ากับช่องที่ห้องเครื่อง (Crankcase) โดยตรง แทนที่จะต่อเข้ากับกระบอกสูบเหมือนเครื่องยนต์ 4 จังหวะ ช่องทางที่ต่อระหว่างห้องเครื่องกับกระบอกสูบเรียกว่าช่องถ่ายเท (Transfer port) การทำงานของเครื่องยนต์ 2 จังหวะแสดงไว้ในรูปที่ 1-1.6



รูปที่ 1-1.5 การทำงานของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน 4 จังหวะ

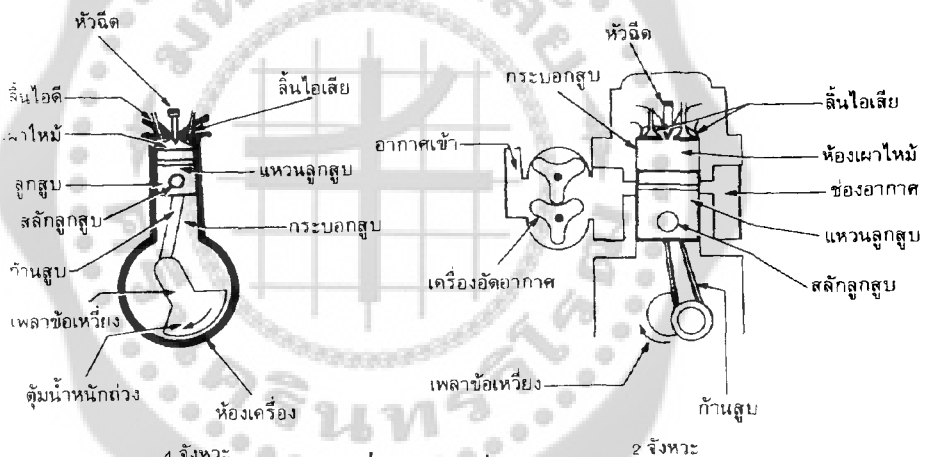


รูปที่ 1-1.6 การทำงานของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน 2 จังหวะ

จะเห็นได้ว่าในทางทฤษฎีแล้วเครื่องยนต์ 2 จังหวะควรจะให้กำลังเป็น 2 เท่าของเครื่องยนต์ 4 จังหวะที่มีพารามิเตอร์ในการทำงานเหมือนกัน แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะมีก๊าซที่เผาไหม้แล้วตกค้างอยู่ในกระบอกสูบผสมกับไอดีอยู่บ้าง และไอดีที่เข้ามาในกระบอกสูบจะหนีออกไปจากกระบอกสูบพร้อมกับ

ไอเสียได้บ้างเล็กน้อย เพราะช่องไอดีและช่องไอเสียเปิดพร้อมๆกัน ทำให้ประสิทธิภาพลดน้อยลงและไม่สามารถผลิตกำลังได้เป็น 2 เท่าของเครื่องยนต์ 4 จังหวะที่มีขนาดความโตของกระบอกสูบ, ช่วงชัก, และความเร็วรอบเท่ากัน แต่เครื่องยนต์ 2 จังหวะสามารถผลิตได้ง่ายกว่าเครื่องยนต์ 4 จังหวะเพราะไม่มีลิ้น (Valve) และเพลาลูกเบี้ยว เนื่องจากเครื่องยนต์ 2 จังหวะให้กำลังทุกรอบการหมุนของเพลาข้อเหวี่ยงดังนั้นแรงบิดของเพลาข้อเหวี่ยงจึงสม่ำเสมอกว่าเครื่องยนต์ 4 จังหวะมากและสามารถใช้ล้อตุนกำลัง (Flywheel) ขนาดเล็กกว่าได้ รูปที่ 1-1.7 แสดงส่วนประกอบของเครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะและ 2 จังหวะแบบใช้ลิ้นไอเสียไว้

จะเห็นได้ว่าในระหว่างการทำงานทั้ง 4 จังหวะ มีเพียงจังหวะเดียวเท่านั้นที่ได้กำลังอีก 3 จังหวะ เป็นจังหวะการทำงานที่ช่วยทำให้เกิดการเผาไหม้ สำหรับเครื่องยนต์หลายสูบจะต้องมีการจัดให้จังหวะกำลังของสูบต่างๆ เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้แรงบิดที่สม่ำเสมอ



รูปที่ 1-1.7 เครื่องยนต์ดีเซล

1-2 การจำแนกชนิดของเครื่องยนต์

เครื่องยนต์สันดาปภายในสามารถจำแนกชนิดของเครื่องยนต์ออกได้หลายวิธี ดังนี้

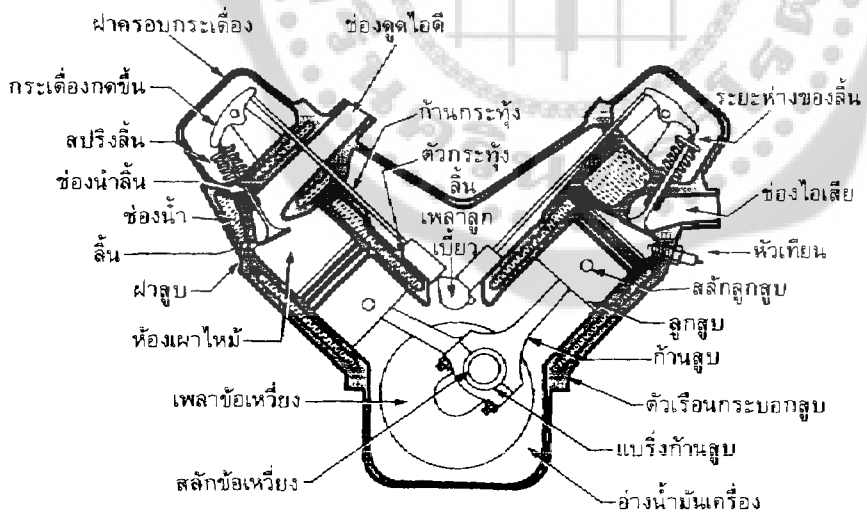
1. ตามหลักการทำงาน: จำแนกเป็น 2 จังหวะ และ 4 จังหวะ
2. ตามชนิดของเชื้อเพลิง: จำแนกออกเป็นก๊าซโซลีนและดีเซลหรือแบบจุดระเบิดด้วยประกายไฟ และแบบจุดระเบิดด้วยการอัด
3. ตามจำนวนกระบอกสูบ: เช่น แบบ 4 สูบ, 6 สูบ, และ 8 สูบ

4. ตามการจัดตำแหน่งของกระบอกสูบ: เช่น แบบกระบอกสูบเรียง, แบบกระบอกสูบทำมุมเป็นรูปตัว V, แบบกระบอกสูบนอน, แบบกระบอกสูบตั้ง, แบบรัศมี (Radial engine)

5. ตามการจัดตำแหน่งของลิ้น: เช่น แบบ L–head, แบบ T–head, แบบ I–head, แบบ F–head

6. ตามลักษณะการระบายความร้อน: เช่น แบบระบายความร้อนด้วยอากาศกับแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ

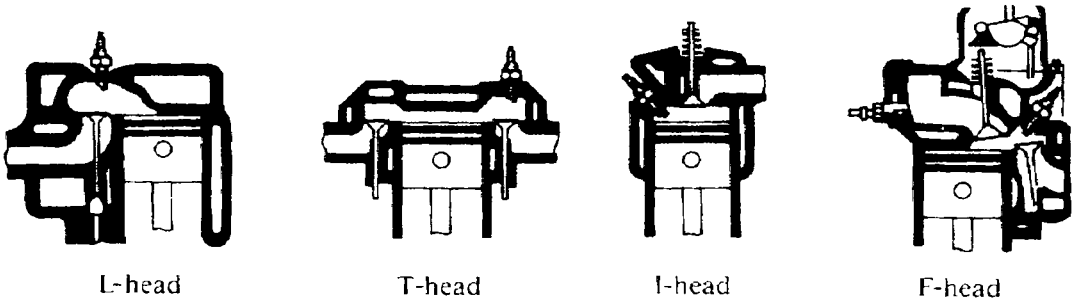
เครื่องยนต์ของรถยนต์มีการจัดตำแหน่งของกระบอกสูบอยู่หลายแบบ โดยทั่วไปแล้วเครื่องยนต์ที่มีจำนวนกระบอกสูบน้อยกว่า 8 สูบจะเป็นแบบกระบอกสูบเรียง (In-line) คือกระบอกสูบทั้งหมดเรียงกันอยู่ในเสื้อสูบอันเดียว เสื้อสูบอาจจะอยู่ในตำแหน่งที่ทำให้แนวศูนย์กลาง (Center line) ของกระบอกสูบอยู่ในแนวดิ่งหรือเอียงทำมุมกับแนวดิ่งก็ได้ เครื่องยนต์ที่มีจำนวนกระบอกสูบตั้งแต่ 8 สูบขึ้นไป มักจะเป็นแบบกระบอกสูบทำมุมกันเป็นรูปตัว V (V–type) ซึ่งกระบอกสูบจะเรียงอยู่ในเสื้อสูบ 2 ฝั่ง โดยที่แนวศูนย์กลางของกระบอกสูบทั้ง 2 ฝั่งตัดกันเป็นรูปตัว V โดยมีเพลาข้อเหวี่ยงอยู่ด้านล่าง (ดูรูปที่ 1-2.1) มุมระหว่างแนวกระบอกสูบทั้ง 2 ฝั่งอาจจะเป็นมุม 60 องศา หรือ 90 องศา



รูปที่ 1-2.1 เครื่องยนต์แบบ I–head, V–type

รถยนต์บางคันอาจจะใช้เครื่องยนต์แบบสูบนอน (Horizontal opposed) ในกรณีนี้เครื่องยนต์จะแบ่งออกเป็น 2 แถววางนอนกับแนวระดับโดย

มีเพลาข้อเหวี่ยงอยู่ตรงกลาง การจัดตำแหน่งกระบอกสูบ เช่นนี้จะสามารถลดความสูงของเครื่องยนต์ลงได้มาก



รูปที่ 1-2.2 การจัดตำแหน่งของลิ้น

การจัดตำแหน่งของลิ้นส่วนมากใช้แบบ I–head กับ L–head แบบ I–head จะมีลิ้นอยู่ในฝาสูบ และทำงานด้วยการเคลื่อนตัวของคันกระทุ้ง (Push rod) ซึ่งไปดันให้กระเดื่องกดลิ้น (Rocker arm) โยกตัว สำหรับเครื่องยนต์ L–head ลิ้นไอดีและลิ้นไอเสียจะอยู่ด้านเดียวกัน ซึ่งจะทำงานโดยใช้การหมุนของเพลาลูกเบี้ยวตัวเดียว ส่วนเครื่องยนต์ T–head ออกแบบโดยมีลิ้นอยู่ 2 ด้านของเครื่องยนต์และใช้เพลาลูกเบี้ยว 2 เพลา ส่วนในกรณีเครื่องยนต์ F–head จะมีลิ้นไอดีอยู่ในฝาสูบและลิ้นไอเสียอยู่ที่เสื้อสูบใช้เพลาลูกเบี้ยวอันเดียว รูปที่ 1-2.2 ได้แสดงการจัดตำแหน่งลิ้นแบบต่างๆไว้

1-3 ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์

1-3.1 ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ที่ไม่เคลื่อนที่

เสื้อสูบ (Cylinder block) เป็นส่วนของเครื่องยนต์ที่อยู่ระหว่างฝาสูบกับอ่างน้ำมันเครื่อง ด้านบนของเสื้อสูบจะประกอบด้วยกระบอกสูบกับช่องน้ำระบายความร้อน และด้านล่างจะใช้ในการยึดรองรับเพลาข้อเหวี่ยงกับเพลาลูกเบี้ยวซึ่งเป็นห้องเครื่อง เสื้อสูบส่วนใหญ่จะสร้างขึ้นจากเหล็กหล่อหรืออะลูมิเนียมหล่อ

ฝาสูบ (Cylinder head) จะถูกยึดติดกับด้านบนของเสื้อสูบ ทำหน้าที่เป็นฝาปิดกระบอกสูบ ภายในฝาสูบจะมีช่องน้ำระบายความร้อนต่อกับช่องน้ำระบายความร้อนของเสื้อสูบด้วย นอกจากนี้ยังมีช่องสำหรับให้ไอดีเข้าและไอเสียออก ฝาสูบจะสร้างขึ้นจากเหล็กหล่อหรืออะลูมิเนียมหล่อ ในเครื่องยนต์บางเครื่องจะมีช่องไอดีและช่องไอเสียอยู่ที่ฝาสูบด้วย

อ่างน้ำมันเครื่อง (Sump หรือ Oil pan) ทำหน้าที่เป็นแหล่งเก็บน้ำมันเครื่องที่ใช้ในการหล่อลื่นเครื่องยนต์และเป็นฝาปิดด้านล่างของห้องเครื่อง เครื่องยนต์ส่วนมากจะมีอ่างน้ำมันเครื่องทำจากแผ่นเหล็กกล้าอัดขึ้นรูป แต่มีรถยนต์บางแบบและเครื่องยนต์สำหรับงานขนส่งขนาดใหญ่ที่ใช้อ่างน้ำมันเครื่องที่ทำจากอะลูมิเนียมหล่อ โดยมีครีบระบายความร้อนอยู่ภายนอกเพื่อระบายความร้อนของน้ำมันเครื่อง

ท่อร่วมไอดี (Intake manifold) เป็นชิ้นส่วนที่มีลักษณะเป็นท่อต่อระหว่างช่องไอดีของเครื่องยนต์ทุกช่องเข้ากับปากทางออกของคาร์บูเรเตอร์ ทำหน้าที่เป็นทางผ่านของไอดีจากคาร์บูเรเตอร์ ไปยังช่องไอดีที่ฝาสูบหรือเสื้อสูบ สุญญากาศที่เกิดขึ้นในขณะที่ลูกสูบเคลื่อนที่ลงจะดูดไอดีจากคาร์บูเรเตอร์ผ่านมาตามท่อร่วมไอดีไปสู่กระบอกสูบ ท่อร่วมไอดีมักจะสร้างจากเหล็กหล่อหรืออะลูมิเนียมหล่อ

ท่อร่วมไอเสีย (Exhaust manifold) มีลักษณะคล้ายกับท่อร่วมไอดีและใช้ต่อระหว่างช่องไอเสียกับท่อไอเสีย ท่อร่วมไอเสียจะสร้างขึ้นจากเหล็กหล่อเพื่อให้ทนความร้อนสูงของไอเสียได้ เครื่องยนต์บางเครื่องอาจจะใช้ท่อร่วมไอเสียซึ่งสร้างจากท่อเหล็กกล้านำมาดัดแล้วเชื่อมร่วมกันก็ได้ ท่อร่วมไอดีและไอเสียตามปกติจะอยู่ข้างเดียวกันและวางอยู่ใกล้ชิดกันเพื่อให้ความร้อนจากท่อร่วมไอเสียผ่านไปยังท่อร่วมไอดีเพื่อช่วยทำให้เชื้อเพลิงกลายเป็นไอได้ดีขึ้น โดยเฉพาะในฤดูหนาว

1-3.2 ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ที่เคลื่อนที่

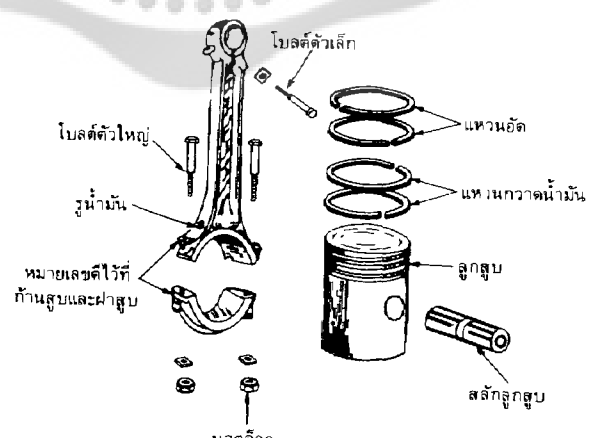
เพลาข้อเหวี่ยง (Crankshaft) จะเปลี่ยนการเคลื่อนที่แบบไป–กลับ (Reciprocating) ของลูกสูบภายในกระบอกสูบไปเป็นการหมุนของล้อตุนกำลัง การเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่นี้เกิดขึ้นได้โดยการใช้ข้อเหวี่ยงเยื้องศูนย์ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเพลาข้อเหวี่ยง ข้อเหวี่ยงแต่ละอันจะมีหน้าสัมผัสอยู่กับรองลื่น (Bearing) เรียกว่าสลักข้อเหวี่ยง (Crank pin) ซึ่งใช้ในการยึดต่อกับก้านสูบ ช่วงชักของลูกสูบจะถูกควบคุมด้วยรัศมีของข้อเหวี่ยง เพลาข้อเหวี่ยงจะอยู่ในห้องเครื่องและถูกรองรับไว้ด้วยรองลื่นรับเพลาข้อเหวี่ยง(Main bearing) รองลื่นเพลาข้อเหวี่ยงแต่ละอันจะมีฝาครอบเจอนัล (Journal) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเพลาข้อเหวี่ยง เพลาข้อเหวี่ยงสร้างจากเหล็กกล้าอัดขึ้นรูป และรองลื่นเพลาข้อเหวี่ยงกับรองลื่นก้านสูบจะมีไลเนอร์ (Liner) ซึ่งเป็นแบ็บบิต (Babbit) คือ

โลหะผสมระหว่างดีบุกกับตะกั่ว ซึ่งโลหะผสมดังกล่าวช่วยลดการกระแทกและการสึกหรอได้ดี

ล้อตุนกำลัง (Flywheel) คือล้อหรือแผ่นกลมที่มีน้ำหนักมากและถูกถ่วงสมดุลไว้อย่างดี ตามปกติมักจะยึดติดกับหน้าแปลนตรงปลายของเพลาข้อเหวี่ยงด้วยโบลต์ (Bolt) ล้อตุนกำลังจะจ่ายพลังงานให้แก่ชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ในขณะที่เป็นจังหวะดูด, อัด, และคายไอเสียด้วยความเฉื่อยของตัวมันเอง เครื่องยนต์ที่มีจำนวนสูบมากจะต้องการล้อตุนกำลังที่มีขนาดเล็กกว่าเครื่องยนต์ที่มีจำนวนสูบน้อย เพราะว่าการจุดระเบิดในสูบต่างๆ จะเกิดขึ้นสลับต่อเนื่องกันถี่มากกว่าเครื่องยนต์ที่มีจำนวนสูบน้อย

ก้านสูบ (Connecting rod) เป็นชิ้นส่วนที่ต่อระหว่างลูกสูบกับเพลาข้อเหวี่ยง ก้านสูบแต่ละก้านจะยึดติดกับลูกสูบด้วยสลักลูกสูบ (Piston pin หรือ Wrist pin) และยึดต่อกับสลักข้อเหวี่ยงโดยรองลื่นหน้าเรียบผ่าครึ่ง ผิวของรองลื่นจะเป็นแบ็บบิตเพื่อให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

ลูกสูบ (Piston) จะเคลื่อนที่ขึ้น–ลงอยู่ภายในกระบอกสูบ โดยทั่วไปจะสร้างขึ้นจากอะลูมิเนียมผสมซึ่งมีน้ำหนักเบา แต่เครื่องยนต์บางเครื่องอาจจะใช้ลูกสูบที่เป็นเหล็กหล่อ ด้านบนของลูกสูบเรียกว่าหัวลูกสูบ ส่วนด้านล่างของลูกสูบเรียกว่ากระโปรงลูกสูบ (Skirt) หัวลูกสูบจะมีร่องแหวนลูกสูบอยู่ด้วย ลูกสูบอะลูมิเนียมตามปกติจะทำร่องผ่าไว้ที่กระโปรงลูกสูบ เพื่อป้องกันไม่ให้ลูกสูบเกิดการขยายตัวมากเกินไปจนคับติดแน่นอยู่ในกระบอกสูบ ส่วนที่เป็นกระโปรงจะมีรูสำหรับใส่สลักลูกสูบรวมอยู่ด้วย



รูปที่ 1-3.1 ก้านสูบและลูกสูบ

แหวนลูกสูบ (Piston ring) มีหน้าที่ดังนี้

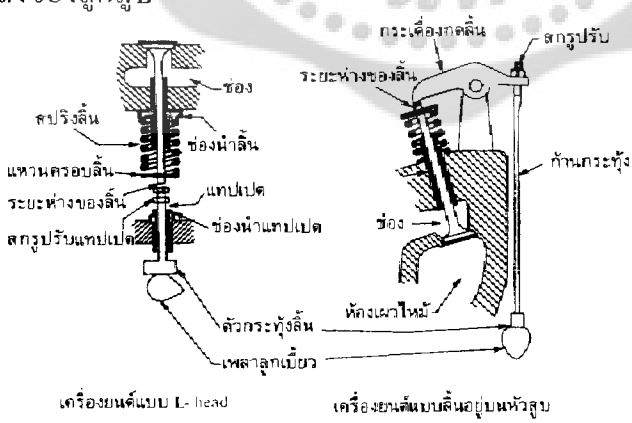
1. ใช้ปิดช่องว่างระหว่างผนังกระบอกสูบกับลูกสูบเพื่อป้องกันไม่ให้ก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้หนีออกไปจากห้องเผาไหม้

2. ใช้ในการควบคุมจำนวนน้ำมันเครื่องที่ขึ้นมาหล่อลื่นผนังกระบอกสูบ

3. ใช้ในการถ่ายเทความร้อนจากลูกสูบไปสู่ผนังกระบอกสูบ

แหวนลูกสูบจะสร้างขึ้นโดยให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบเล็กน้อย แต่แหวนจะถูกตัดให้มีเส้นรอบวงน้อยกว่า ดังนั้นเมื่อแหวนเข้าไปอยู่ในร่องแหวนภายในกระบอกสูบมันจะเบ่งตัวออก กดกับผนังกระบอกสูบทำให้สามารถเป็นซีล (Seal) ป้องกันการรั่วไหลของไอดีและไอเสียได้ตามความต้องการ

เฟืองตั้งจังหวะ (Timing gear) ในเครื่องยนต์จะมีเฟืองที่ขบกันอยู่คู่หนึ่ง โดยเฟืองอันหนึ่งติดอยู่กับเพลาข้อเหวี่ยง เรียกว่าเฟืองเพลาข้อเหวี่ยง และอีกอันหนึ่งติดอยู่กับเพลาลูกเบี้ยว เรียกว่าเฟืองเพลาลูกเบี้ยว เฟืองเพลาลูกเบี้ยวจะมีจำนวนฟันเฟืองเป็น 2 เท่าของเฟืองเพลาข้อเหวี่ยง ทำให้เพลาลูกเบี้ยวหมุนด้วยความเร็วเท่ากับครึ่งหนึ่งของเพลาข้อเหวี่ยง และลิ้นแต่ละตัวเปิด-ปิดเพียงครั้งเดียวในการหมุนทุก 2 รอบของเพลาข้อเหวี่ยงในกรณีที่เป็นเครื่องยนต์ 4 จังหวะ ผู้ผลิตเครื่องยนต์บางรายใช้โซ่และเฟืองโซ่ หรือสายพานมีฟันในการตั้งจังหวะการทำงานหรือขับเพลาลูกเบี้ยวแทนการใช้เฟือง เฟืองตั้งจังหวะจะต้องตั้งให้ขบกันในตำแหน่งที่แน่นอนเพื่อทำให้การปิด-เปิดลิ้นสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ขึ้น–ลงของลูกสูบ



รูปที่ 1-3.2 ลิ้นและกลไกในการปิด–เปิดลิ้น

เพลาลูกเบี้ยว (Camshaft) มักจะอยู่ในห้องเครื่องข้างใดข้างหนึ่งและอยู่เหนือเพลาข้อเหวี่ยงเล็กน้อย ตามปกติมักจะรองรับด้วยรองลื่นปลอก 3 ถึง 4

ตัว และมีลูกเบี้ยว 2 ลูกต่อหนึ่งกระบอกสูบ เพื่อทำให้ตัวกระทุ้งลิ้น (Valve lifter หรือ Tappet) เคลื่อนที่ไปเปิดลิ้นให้ถูกต้องตามลำดับและเวลา เฟืองที่อยู่บริเวณกลางของเพลาลูกเบี้ยวจะใช้ในการขับเพลาปั๊มน้ำมันเครื่องและแกนจานจ่าย ให้หมุนด้วยความเร็วเท่ากับเพลาลูกเบี้ยว นอกจากนี้เพลาลูกเบี้ยวยังใช้เป็นตัวขับปั๊มน้ำมันเชื้อเพลิงอีกด้วย

ตัวกระทุ้งลิ้น (Valve lifter หรือ Tappet) จะอยู่บนเพลาลูกเบี้ยวโดยด้านล่างสัมผัสอยู่กับลูกเบี้ยว ด้านล่างของตัวกระทุ้งลิ้นจะต้องมีความแข็งแรงมากพอที่จะต้านทานการสึกหรอที่เกิดขึ้น เมื่อลูกเบี้ยวหมุนขับดันตัวกระทุ้งลิ้น ตัวกระทุ้งลิ้นจะเคลื่อนที่ขึ้น–ลงอยู่ภายในร่องนำ (Guide) ซึ่งเป็นช่องทรงกระบอกที่อยู่ในเสื้อสูบ เพื่อทำให้ลิ้นปิดอย่างสนิทจึงจำเป็นต้องมีระยะห่างระหว่างด้านบนของตัวกระทุ้งลิ้นกับตีนลิ้นเพื่อเผื่อไว้สำหรับการขยายตัวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในเครื่องยนต์แบบ L–head ระยะห่างของตีนลิ้นจะปรับได้โดยใช้สกรูปรับ ส่วนเครื่องยนต์แบบ I–head จะปรับที่สกรูของกระเดื่องกดลิ้น เครื่องยนต์สมัยใหม่จะใช้ตัวกระทุ้งลิ้นไฮดรอลิก ซึ่งจะเงียบมากและไม่มีระยะห่างของลิ้นเลย

ลิ้น ถูกใช้ในการปิด–เปิดช่องไอดีและช่องไอเสียโดยใช้ตัวกระทุ้งลิ้นหรือกระเดื่องกดลิ้นไปดันที่ก้านลิ้น ส่วนกว้างของลิ้นคือหัวลิ้น (Valve head) ซึ่งต่ออยู่กับก้านลิ้น (Valve stem) ส่วนเอียงของหัวลิ้น เรียกว่าหน้าลิ้น (Valve face) และส่วนของช่องลิ้นที่สัมผัสอยู่กับหน้าลิ้นเรียกว่าบ่าลิ้น (Valve seat) ลิ้นไอดีจะสร้างขึ้นจากเหล็กกล้าผสมโครเมียม–นิกเกิล และลิ้นไอเสียจะสร้างขึ้นจากโลหะผสมพิเศษที่มีความต้านทานความร้อนดีเป็นพิเศษ คือเป็นเหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของนิกเกิล, ทังสเตน, ซิลิคอน, และโครเมียม ลิ้นนี้จะอยู่ในตำแหน่งของมันได้ด้วยแรงกดของสปริงลิ้นที่สวมอยู่กับก้านลิ้น

1-4 ระบบช่วยของเครื่องยนต์

ระบบระบายความร้อน

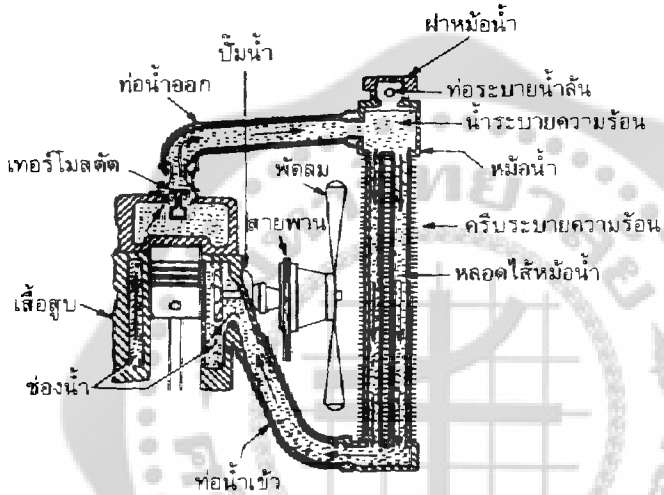
จุดประสงค์ของระบบระบายความร้อนคือ

1. ป้องกันไม่ให้ห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงมากเกินไป ซึ่งจะป้องกันไม่ให้ลูกสูบ กระบอกสูบ ลิ้นและชิ้นส่วนเครื่องยนต์อื่นๆ เกิดความเสียหาย และน้ำมันเครื่องที่หล่อลื่นเครื่องยนต์ไม่เสื่อมคุณภาพเร็ว

2. เพื่อควบคุมอุณหภูมิทำงาน (Operating temperature) ให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย แม้ว่าเครื่องยนต์จะถูกใช้งานที่ความเร็วสูง หรือรับภาระมาก และอุณหภูมิอากาศโดยรอบสูงมากก็ตาม

3. เพื่อช่วยให้การอุ่นเครื่องเครื่องยนต์ที่เย็นให้ร้อนถึงอุณหภูมิทำงานเร็วขึ้น

โดยทั่วไปเครื่องยนต์จะมีการระบายความร้อนด้วยน้ำหรืออากาศ ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ (ดูรูปที่ 1-4.1) จะมีส่วนประกอบหลักคือ ช่องน้ำระบายความร้อน, ปั๊มน้ำระบายความร้อน, พัดลม, เทอร์โมสตัต (Thermostat), ท่อน้ำ, รังผึ้งหม้อน้ำ, และฝาหม้อน้ำ



รูปที่ 1-4.1 ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ

ทิศทางการไหลของน้ำในระบบระบายความร้อนจะไหลขึ้นจากกระบอกสูบไปสู่ถังด้านบนของรังผึ้งหม้อน้ำแล้วไหลผ่านหลอดไส้หม้อน้ำ (Radiator core) ลงมาสู่ถังด้านล่างของรังผึ้งหม้อน้ำ จากถังด้านล่างของรังผึ้งหม้อน้ำ น้ำระบายความร้อนจะไหลผ่านท่อยางไปสู่ช่องน้ำในเสื้อสูบแล้วปั๊มน้ำก็จะสูบให้น้ำไหลเวียนตลอดทั้งระบบ

เครื่องยนต์ที่ระบายความร้อนด้วยอากาศจะมีครีบระบายความร้อนติดอยู่กับด้านนอกของฝาสูบ และผนังกระบอกสูบ อากาศที่ไหลผ่านครีบระบายความร้อนเหล่านี้จะรับความร้อนจากครีบทำให้ครีบเย็นลง จำนวนอากาศที่ไหลเข้ามาระบายความร้อนจะควบคุมด้วยพัดลมและลิ้นปิด–เปิดช่องอากาศซึ่งควบคุมด้วยเทอร์โมสตัตที่อยู่ทางด้านบนของเครื่องยนต์

ระบบหล่อลื่น

ในเครื่องยนต์จะใช้น้ำมันเครื่องเพื่อการหล่อลื่น โดยทำหน้าที่ต่อไปนี้

1. ลดความเสียดทานและป้องกันไม่ให้หน้าสัมผัสที่เป็นโลหะกับโลหะสัมผัสกันโดยตรง

2. พาความร้อนที่เกิดขึ้นที่ลูกสูบ, ก้านลิ้น, และรองลื่นก้านสูบออกไปจากแหล่งที่เกิดความร้อน รวมทั้งที่หน้าสัมผัสอื่นๆ ด้วย

3. ทำหน้าที่เป็นซีลไม่ให้เกิดการรั่วระหว่างแหวนลูกสูบกับผนังกระบอกสูบ เพื่อป้องกันไม่ให้กำลังอัดรั่วไหล

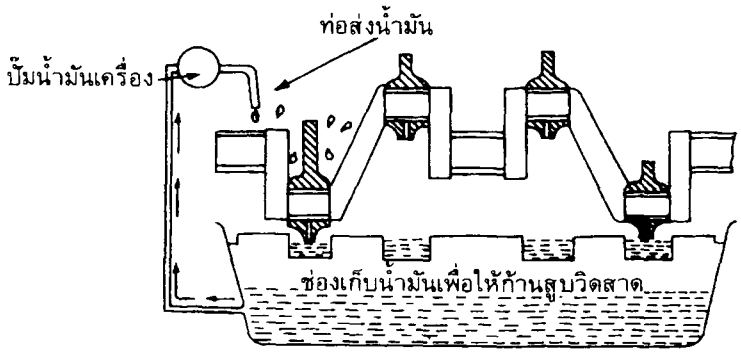
4. ป้องกันไม่ให้หน้าสัมผัสต่างๆ เกิดการกัดกร่อน

5. พาเศษโลหะและคราบเขม่าออกจากหน้าสัมผัส

เพื่อให้แน่ใจว่าระบบหล่อลื่นจะมีปริมาณน้ำมันเครื่องเพียงพอกับความต้องการ จึงมีการเก็บน้ำมันเครื่องไว้ในอ่างน้ำมันเครื่อง น้ำมันเครื่องจากอ่างน้ำมันเครื่องจะถูกจ่ายไปยังส่วนต่างๆของเครื่องยนต์โดยอาจใช้ระบบวิดสาดหรือระบบส่งด้วยความดัน

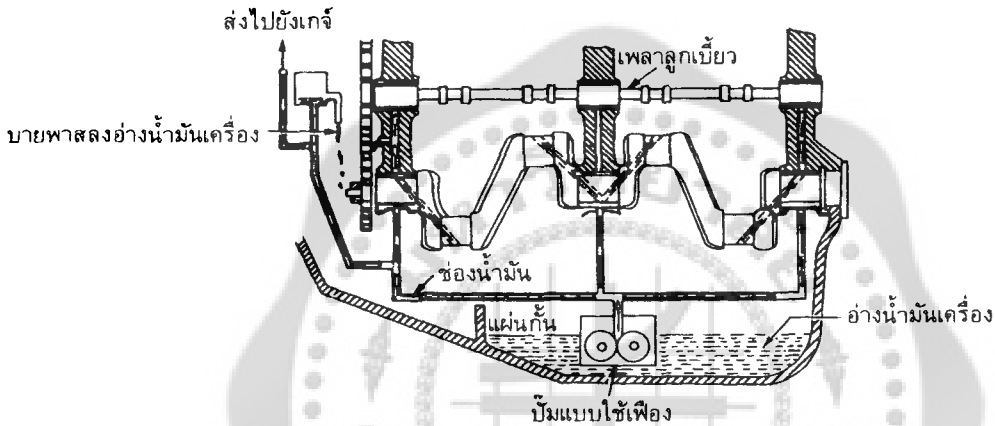
ในกรณีที่เป็นเครื่องยนต์ 2 จังหวะ ห้องเครื่องจะไม่มีน้ำมันเครื่องเก็บไว้ ในกรณีนี้การหล่อลื่นจะทำได้โดยผสมน้ำมันเครื่องกับน้ำมันเบนซินโดยตรง หรือใช้ปั๊มน้ำมันหล่อลื่นต่างหากก็ได้

(ก) ระบบวิดสาด จะใช้ช้อนหรือดิปเปอร์ (Dipper) ซึ่งติดอยู่ตรงปลายด้านล่างของก้านสูบ (ฝาครอบรองลื่นก้านสูบ) เพื่อวิดสาดน้ำมันเครื่องไปยังส่วนต่างๆของเครื่องยนต์ เช่น ที่กระบอกสูบ, เพลาลูกเบี้ยว, สลักลูกสูบ ฯลฯ ในขณะที่ข้อเหวี่ยงหมุนลงมาถึงจุดสุดช่วงชัก น้ำมันจะถูกส่งไปยังรองลื่นเพลาข้อเหวี่ยงด้วยความดันของปั๊มน้ำมันเครื่องผ่านรูที่เจาะไว้ในห้องเครื่อง เรียกว่าช่องน้ำมัน (Galleries) ลักษณะของระบบวิดสาดแสดงไว้ในรูปที่ 1-4.2



รูปที่ 1-4.2 ระบบวิดสาด

(ข) ระบบส่งด้วยความดัน ตามปกติวิธีนี้จะใช้กับการหล่อลื่นเครื่องยนต์สมัยใหม่ น้ำมันเครื่องจะถูกดูดจากอ่างน้ำมันเครื่องผ่านไส้กรองน้ำมันเครื่องเข้าไปในปั๊ม แล้วถูกส่งไปยังรองลื่นเพลาข้อเหวี่ยงทุกตัว ผ่านช่องน้ำมันในห้องเครื่อง (ดูรูปที่ 1-4.3) น้ำมันเครื่องจะถูกดันส่งจากรองลื่นเพลาข้อเหวี่ยงไปยังรองลื่นก้านสูบ ผ่านรูน้ำมันเครื่องที่อยู่ในเพลาข้อเหวี่ยง น้ำมันที่มีความดันนี้จะถูกดันต่อไปยังสลักลูกสูบในขณะที่เพลาข้อเหวี่ยงหมุน น้ำมันเครื่องที่มีความดันจากรองลื่นก้านสูบจะถูกสาดไปยังผนังกระบอกสูบและด้านล่างของลูกสูบ แล้วน้ำมันเครื่องจะตกลงกลับสู่อ่างน้ำมันเครื่องเพื่อระบายความร้อนและหมุนเวียนต่อไป



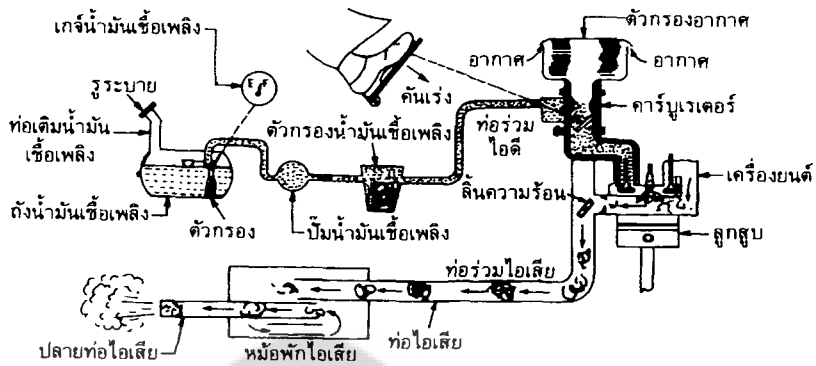
รูปที่ 1-4.3 ระบบหล่อลื่นที่ส่งด้วยความดัน

ระบบเชื้อเพลิง

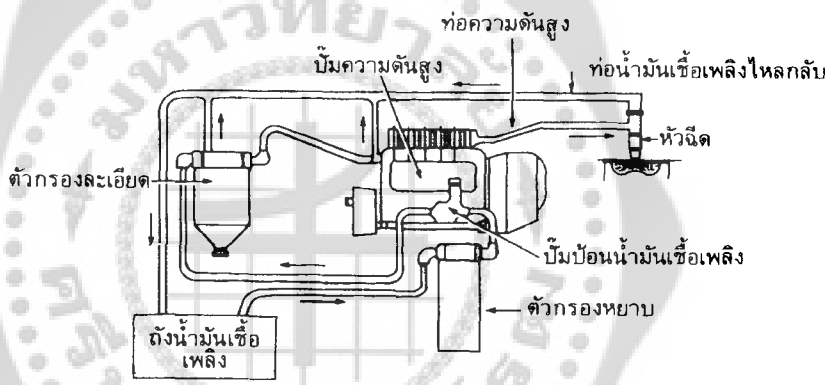
เครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยประกายไฟ การทำงานของระบบเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยประกายไฟ คือ เก็บน้ำมันเชื้อเพลิงในปริมาณที่เพียงพอแล้วสูบส่งน้ำมันเชื้อเพลิงไปยังคาร์บูเรเตอร์ ระบบเชื้อเพลิงจะทำการผสมส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ในกระบอกสูบและส่งก๊าซไอเสียออกจากเครื่องยนต์ด้วย ระบบเชื้อเพลิงจะต้องป้อนน้ำมันเชื้อเพลิงในอัตราที่พอเหมาะและมีความดันเพียงพอสำหรับภาระและความเร็วที่ต้องการของเครื่องยนต์ โดยใช้คาร์บูเรเตอร์เป็นตัวควบคุม (ดูรูปที่ 1-4.4) ส่วนประกอบหลักของระบบเชื้อเพลิงคือ ถังน้ำมันเชื้อเพลิง, ท่อน้ำมันเชื้อเพลิง, ปั๊มน้ำมันเชื้อเพลิง, หม้อกรองน้ำมันเชื้อเพลิง, และคาร์บูเรเตอร์

เครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยการอัด ระบบเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซลมีหน้าที่ทำให้มีการส่งน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าไปในกระบอกสูบ โดยทำให้น้ำมันเชื้อเพลิงเป็นฝอยละเอียดและฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้ ส่วนประกอบหลักของ

ระบบเชื้อเพลิงคือถังน้ำมันเชื้อเพลิง, ท่อน้ำมันเชื้อเพลิง, หม้อกรองหยาบ, ปั๊มส่งน้ำมันเชื้อเพลิง, หม้อกรองละเอียด, ปั๊มหัวฉีด, และหัวฉีด รูปที่ 1-4.5 ได้แสดงระบบเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลไว้



รูปที่ 1-4.4 ระบบเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยประกายไฟ



รูปที่ 1-4.5 ระบบเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยการอัด

ปั๊มหัวฉีดเป็นหัวใจและเป็นส่วนที่ซับซ้อนที่สุดของระบบเชื้อเพลิงนี้ โดยจะมีหน้าที่กำหนดปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงให้เหมาะสมกับภาระของเครื่องยนต์แล้วยังส่งน้ำมันเชื้อเพลิงไปสู่หัวฉีดอย่างถูกต้องกับลำดับการเผาไหม้ในแต่ละสูบ น้ำมันเชื้อเพลิงจะถูกปั๊มให้มีความดันสูงมากส่งผ่านเข้าไปในหัวฉีด ซึ่งเมื่อออกจากหัวฉีด น้ำมันเชื้อเพลิงจะกระจายเป็นฝอยละเอียดเข้าไปในห้องเผาไหม้ในช่วงสุดท้ายของจังหวะอัด

การจำแนกระบบเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซลจะขึ้นอยู่กับการออกแบบปั๊มหัวฉีดและหัวฉีด เครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้กับรถยนต์จะใช้ระบบเชื้อเพลิง 2 แบบใหญ่ๆ คือ

(1) ปั๊มหัวฉีดกับหัวฉีดแยกออกจากกันคนละหน่วย

(2) ปั๊มหัวฉีดกับหัวฉีดรวมเป็นหน่วยเดียวกัน

ระบบไอเสีย

ก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้จะไหลออกจากกระบอกสูบผ่านไปตามช่องไอเสียโดยมีเสียงดังมาก ดังนั้นก๊าซไอเสียจะต้องถูกทำให้มีความดังน้อยลงและส่งออกไปทิ้งด้านท้ายรถให้พ้นห้องโดยสาร ส่วนประกอบหลักของระบบไอเสียคือ ท่อร่วมไอเสีย, ท่อไอเสีย, หม้อเก็บเสียง, และปลายท่อไอเสีย

ระบบสตาร์ต

ระบบสตาร์ตมีหน้าที่ทำให้เครื่องยนต์หมุนในตอนที่ต้องการเริ่มติดเครื่อง ประกอบด้วยแบตเตอรี่, มอเตอร์สตาร์ต, และอุปกรณ์ควบคุม ในขณะสตาร์ตเครื่อง มอเตอร์จะได้รับพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานกลเพื่อใช้ในการหมุนเครื่องยนต์

ระบบจุดระเบิด

ระบบจุดระเบิดมีหน้าที่ส่งประกายไฟให้แก่กระบอกสูบแต่ละสูบในขณะที่ไอดีถูกอัดและพร้อมที่จะเกิดการเผาไหม้ ระบบนี้ประกอบด้วยแบตเตอรี่, สวิตซ์ไฟจุดระเบิด, คอยล์จุดระเบิด, จานจ่าย, และหัวเทียน เมื่อเปิดสวิตช์คอยล์จะได้รับพลังงานจากแบตเตอรี่และทำให้เกิดไฟฟ้าแรงสูงไหลไปยังจานจ่าย จานจ่ายจะจ่ายไฟฟ้าแรงสูงไปยังหัวเทียน ประกายไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่เขี้ยวหัวเทียนจะทำให้ส่วนผสมไอดีเกิดการเผาไหม้ และก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้นี้จะขับดันให้ลูกสูบเคลื่อนที่ลง เครื่องยนต์ก็จะสามารถถ่ายทอดกำลังกลผ่านเพลาข้อเหวี่ยงออกไปได้

ระบบชาร์จไฟฟ้า

ระบบนี้จะประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและอุปกรณ์ควบคุม เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกขับด้วยเครื่องยนต์โดยใช้สายพานเป็นตัวถ่ายทอดกำลัง ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะถูกส่งไปชาร์จแบตเตอรี่ และส่งไปใช้กับอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้า

1-5 การหล่อลื่น

จุดประสงค์หลักของการหล่อลื่นก็คือเพื่อลดความเสียดทานและการสึกหรอที่เกิดขึ้นระหว่างหน้าสัมผัสที่มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันด้วยสารหล่อลื่น

การหล่อลื่นสามารถแบ่งออกเป็นแบบทั่วไปได้สองแบบ แบบแรกเรียกว่าการหล่อลื่นด้วย**ของไหล** (Fluid lubrication) หรือการหล่อลื่นด้วย**ฟิล์มหนา** (Thick-film lubrication) การหล่อลื่นแบบนี้เป็นสภาวะอุดมคติซึ่งหน้าสัมผัสที่มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันนั้นแยกออกจากกันด้วยสารหล่อลื่นตลอดเวลา อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติไม่เคยมีสภาวะเช่นนี้เกิดขึ้นอย่างแท้จริง แต่มีสภาวะเช่นนี้โดยประมาณเกิดขึ้นที่รองลื่นหลัก (Main bearing) และรองลื่นสลักข้อเหวี่ยง

การหล่อลื่นแบบที่สองเรียกว่าการหล่อลื่น**แบบขอบเขต** (Boundary lubrication) หรือการหล่อลื่น**ฟิล์มบาง** (Thin-film lubrication) การหล่อลื่นแบบนี้เป็นสภาวะที่มีสารหล่อลื่นแต่หน้าสัมผัสที่มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันไม่แยกออกจากกันอย่างสมบูรณ์ด้วยชั้นฟิล์มบางของสารหล่อลื่น ฟิล์มบางอาจจะมีความหนาน้อยกว่า 0.00025 in (0.00635 mm) การหล่อลื่นแบบฟิล์มบางเกิดขึ้นในกระบอกสูบโดยตรงหลังจากเริ่มติดเครื่องยนต์ที่ยังเย็นอยู่

1-5.1 การหล่อลื่นในรถยนต์

เครื่องยนต์

ระบบหล่อลื่นเครื่องยนต์สมัยใหม่ทั้งหลายขึ้นอยู่กับความมีประสิทธิผลของเครื่องยนต์ในการทำให้น้ำมันหล่อลื่นในปริมาณค่อนข้างมากไหลผ่านรองลื่น (Bearing) อย่างต่อเนื่อง ความต้องการน้ำมันหล่อลื่นไม่เพียงเฉพาะเพื่อการหล่อลื่นเท่านั้นแต่ยังใช้ในการระบายความร้อนออกจากรองลื่นอีกด้วย เพราะฉะนั้นจะต้องมีน้ำมันหล่อลื่นส่วนที่เกินสำหรับการรักษาให้เกิดชั้นฟิล์มหนามากพอสมควรถูกจ่ายผ่านรองลื่น

การรักษาให้ชั้นฟิล์มน้ำมันคงตัวอยู่ได้นั้นได้รับอิทธิพลจากทั้งอุณหภูมิทำงานของเครื่องยนต์และสภาวะภูมิอากาศ ในสภาวะของภูมิอากาศเขตร้อนจะต้องใช้น้ำมันที่มีเกรดข้นมากพอเพื่อที่จะประกันได้ว่าจะยังคงมีชั้นฟิล์มหนาเพียงพอ แต่ในสภาวะอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าก็จะสามารถใช้น้ำมันที่มีเกรดข้นน้อยกว่าได้ ตามปกติผู้ผลิตรถยนต์จะแนะนำเกรดของน้ำมันสำหรับฤดูหนาว, ฤดูร้อน, และภูมิอากาศเขตร้อนไว้ ถ้าเกรดของน้ำมันข้นเกินไปเครื่องยนต์ก็จะมีปัญหาในการเริ่มติดเครื่องในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำ เพราะว่าจะมีความต้านทานการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ของเครื่องยนต์มาก ในทางตรงกันข้าม การใช้น้ำมันที่มีเกรดข้นน้อย (ใส) เกินไปก็จะทำให้ไม่เกิดชั้นฟิล์มของน้ำมันหนา

เพียงพอซึ่งจะส่งผลให้เกิดการสึกหรออย่างรวดเร็วและเป็นไปได้ที่จะทำให้ชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ของเครื่องยนต์ถูกยึดตาย

ระบบส่งกำลัง

ชุดเฟืองทด (Gear box) และเพลาท้าย (Rear axle) ใช้น้ำมันพิเศษ น้ำมันเหล่านี้สามารถต้านทานความดันสูงที่เกิดขึ้นโดยไม่ถูกบีบอัดให้ไหลออกมาจากหน้าสัมผัสของฟันเฟืองที่ขบกัน จึงควรหลีกเลี่ยงไม่ทำให้หน้าสัมผัสที่เป็นโลหะกับโลหะสัมผัสกันแน่นเกินควรเพราะจะทำให้เกิดการสึกหรอมากและผิวหน้าสัมผัสเสียหายได้

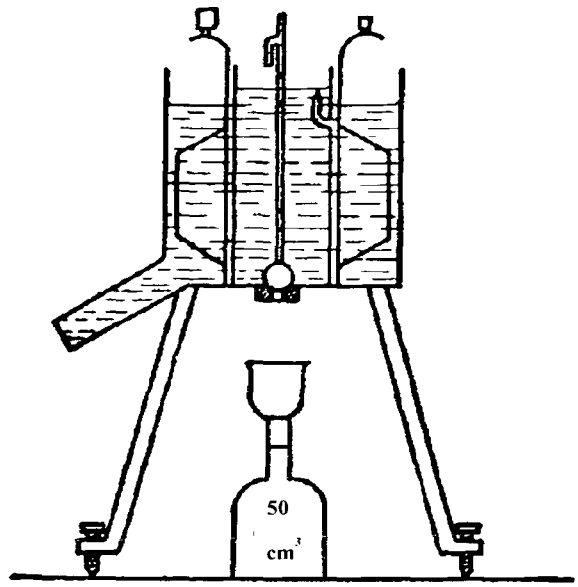
1-5.2 ความหนืด

คำว่า**ข้น**และใสที่ใช้กับน้ำมันนั้นไม่มีความแน่นอน ด้วยเหตุนี้โดยทั่วไปจึงใช้คำว่า**ความหนืด**แทนเมื่อต้องการระบุคุณสมบัติด้านนี้ของน้ำมัน ความหนืดเป็นการวัดความต้านทานการไหลของน้ำมัน หรือพูดง่ายๆว่าเป็นความเหนียวแน่นของน้ำมันนั่นเอง น้ำมันที่มีความหนืดสูงหมายถึงน้ำมันที่ข้น ส่วนน้ำมันที่มีความหนืดต่ำก็คือน้ำมันที่ใส เพื่อที่จะทำให้สามารถเปรียบเทียบความหนืดของน้ำมันได้ในทางปฏิบัติจึงใช้การวัดเวลาในการไหลผ่านรูเล็กๆที่สอบเทียบแล้ว (Calibrated jet) ได้ครบปริมาณตามกำหนดที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง เครื่องทดสอบที่ใช้เรียกว่าเครื่องวัดความหนืด (Viscometer หรือมาตรความหนืด)

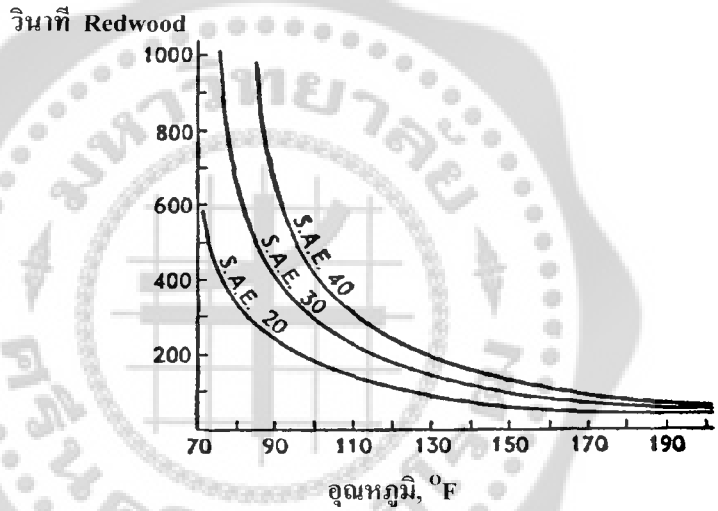
รูปที่ 1-5.1 แสดงเครื่องวัดความหนืดเรดวูด (Redwood) ซึ่งใช้กันโดยทั่วไปในสหราชอาณาจักร ใช้เครื่องวัดนี้จับเวลาที่น้ำมันไหลผ่ารูที่มีพื้นที่หน้าตัด 1 mm^2 โดยอุณหภูมิของน้ำมันตามปกติอยู่ที่ 70^{o}F (21.1^{o}C), 140^{o}F (60^{o}C) และ 200^{o}F (93.3^{o}C) ค่าความหนืดของน้ำมันจะระบุเป็นวินาทีเรดวูด (Redwood seconds) เครื่องวัดความหนืดเซย์โบลต์ (Saybolt) ใช้ในการวัดความหนืดในสหรัฐอเมริกา และค่าความหนืดจะระบุเป็นวินาทีเซย์โบลต์ (Saybolt Universal seconds)

ผลของอุณหภูมิต่อความหนืด

ความหนืดของน้ำมันจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ อุณหภูมิที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้น้ำมันใสมากขึ้นทำให้ความหนืดลดลง น้ำมันที่มีอุณหภูมิต่ำลงจะข้นมากขึ้นทำให้ความหนืดเพิ่มมากขึ้น ดูรูปที่ 1-5.2



รูปที่ 1-5.1



รูปที่ 1-5.2

ตัวเลขความหนืด

เพราะว่าการจำแนกน้ำมันโดยทั่วไปมักจะจำแนกเป็น ใส (Light), ปานกลาง (Medium), ข้น (Heavy), และอื่นๆ ซึ่งมีความแตกต่างกันในระหว่างผู้ผลิตน้ำมันต่างๆ ซึ่งคำที่ใช้นั้นกว้างเกินไปและไม่มีความแน่นอน เพราะฉะนั้น **SAE** (Society of Automotive Engineers) จึงจำแนกน้ำมันเครื่อง (Crankcase oil) และน้ำมันเกียร์ (Transmission oil) ออกเป็นเกรดตามค่าความหนืดของมัน แต่ละเกรดจะถูกระบุด้วยตัวเลข (Number) เรียกว่าตัวเลข SAE และค่าความหนืดของน้ำมันที่มีตัวเลข SAE ค่าหนึ่งจะต้องอยู่ในช่วงขีดจำกัดที่แน่นอนที่อุณหภูมิที่กำหนด ควรทำความเข้าใจไว้ก่อนว่าค่าตัวเลข SAE นั้นหมายความถึงค่าความ

หนืดเพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดยไม่พิจารณาถึงคุณสมบัติข้ออื่นๆของน้ำมันเลย ดังนั้นค่าตัวเลข SAE จึงไม่ได้แสดงถึง**คุณภาพ**ของน้ำมัน

ตารางที่ 1-5.1 ค่าความหนืดเป็นวินาทีเรดวูด

ตัวเลข SAE	ที่ 0°F (-17.8°C) ต่ำสุด	สูงสุด	ที่ 200°F (93.3°C) ต่ำสุด	สูงสุด
5	-	3520	-	-
10W	5250	10,560	-	-
20W	10,560	42,000	-	-
20	-	-	43	55
30	-	-	55	67
40	-	-	67	83
50	-	-	83	112

ตารางที่ 1-5.2 ค่าความหนืดเป็นวินาทีเซย์โบลต์

ตัวเลข SAE	ที่ 130°F (54.4°C)	ที่ 210°F (98.9°C)
10	90 – 120	-
20	120 – 185	-
30	185 – 255	-
40	255	80
50	-	80 – 105
60	-	105 – 125
70	-	125 – 150

ตัวเลข SAE

ตัวเลข SAE ของน้ำมันมักจะระบุตามค่าความหนืดของมันและเกรดของน้ำมันเครื่องที่ใช้โดยทั่วไปอยู่ในตารางที่ 1-5.1 เป็นวินาทีเรดวูดและเป็นวินาทีเซย์โบลต์ในตารางที่ 1-5.2

โดยทั่วไป ตัวเลขน้อยจะหมายถึงมีค่าความหนืดน้อย และตัวเลขมากจะหมายถึงมีค่าความหนืดมาก น้ำมันแต่ละชนิดจะถูกระบุเกรดที่อุณหภูมิจำเพาะค่าหนึ่งเท่านั้น แต่น้ำมันที่มีตัวเลข SAE เดียวกันอาจมีค่าความหนืดต่างกันมากที่อุณหภูมิสูงกว่าหรือต่ำกว่าอุณหภูมิที่กำหนด

หอสมุด มศว องครักษ์

http://oklib.swu.ac.th
6641000 ต่อ 1250-6

ดัชนีความหนืด

ผู้ผลิตเครื่องยนต์ส่วนมากจะกำหนดรายละเอียดจำเพาะของตนเองสำหรับน้ำมันเครื่อง รายละเอียดจำเพาะนี้มักจะระบุเป็นค่าความหนืดในช่วงแคบๆที่อุณหภูมิ 70°F (21.1°C), 140°F (60°C), และ 200°F (93.3°C) เพื่อที่จะแน่ใจได้ว่าน้ำมันที่ใช้จะมีความเป็นไปได้ที่ค่าความหนืดจะเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นหรือต่ำลง วิธีที่นำมาใช้ในการหาระดับของการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดเมื่อรู้ค่าตัวเลข SAE เรียกว่า**ดัชนีความหนืด** (Viscosity index) ของน้ำมัน

ค่าดัชนีความหนืดต่ำหรือเป็นศูนย์จะถูกกำหนดสำหรับน้ำมันที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดมากเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ค่าดัชนีความหนืดสูง, เป็น 100 หรือสูงกว่า 100 จะถูกกำหนดสำหรับน้ำมันที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดน้อยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

โดยทั่วไป น้ำมันที่มีคุณภาพต่ำจะมีความหนืดสูงเมื่อเย็นและมีความหนืดน้อยเมื่อร้อน น้ำมันเกรดนี้จะมีค่าดัชนีความหนืดเป็นศูนย์ น้ำมันที่มีคุณภาพสูงจะรักษาระดับความหนืดของมันไว้ได้และจะมีค่าดัชนีความหนืดอยู่ระหว่าง 90 – 100

การนำตัวเลข SAE ไปใช้ในทางปฏิบัติ

ตารางที่ 1-5.1 และ 1-5.2 ให้เกรดของน้ำมันเครื่องในช่วงตั้งแต่ SAE 5 ถึง SAE 70 ในประเทศแถบยุโรป เครื่องยนต์สำหรับรถยนต์นั่งและรถบรรทุกในสภาพดีโดยทั่วไปใช้น้ำมันเครื่อง SAE 5 และ SAE 10W การใช้น้ำมันเครื่องเกรดนี้ไม่เพียงทำให้การเริ่มติดเครื่องที่อุณหภูมิต่ำทำได้ดีเท่านั้นแต่ยังทำให้มีความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงน้อยลงและกำลังสูงสุดของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น 2% – 5% อีกด้วย แต่ในบางกรณี ข้อดีเช่นนี้อาจต้องชดเชยด้วยการสิ้นเปลืองน้ำมันเครื่องมากขึ้นและการสึกหรอที่เพิ่มมากขึ้น สิ่งที่น่าสนใจก็คือมีผู้ผลิตรถบรรทุกขนาดใหญ่อย่างน้อยหนึ่งรายที่แนะนำให้ใช้น้ำมันเครื่องเกรด SAE 5 ทั้งในฤดูร้อนและฤดูหนาว

น้ำมันเครื่องเกรด SAE 20W และ SAE 20 มักจะใช้กับเครื่องยนต์ในสภาพดีได้ทั้งปี

น้ำมันเครื่องเกรด SAE 30 เป็นน้ำมันเครื่องฤดูร้อนที่นิยมกันมากสำหรับเครื่องยนต์ส่วนใหญ่

น้ำมันเครื่องเกรด SAE 40 เป็นน้ำมันเครื่องที่ใช้สำหรับเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนที่ทำงานหนักในระหว่างฤดูร้อน

น้ำมันเครื่องเกรด SAE 50 เป็นน้ำมันเครื่องที่ใช้กับเครื่องยนต์เก่าเมื่อต้องการลดความสิ้นเปลืองน้ำมันเครื่อง

จุดวาบไฟ จุดวาบไฟคืออุณหภูมิซึ่งน้ำมันเครื่องจะลุกไหม้หรือให้ก๊าซที่สามารถติดไฟได้ออกมา ช่วงของอุณหภูมินี้สำหรับน้ำมันหล่อลื่นอยู่ระหว่าง 350^{O}F (176.7^{O}C) ถึง 500^{O}F (260^{O}C)

1-5.3 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น

เป็นไปไม่ได้ที่จะวัดคุณภาพหรือความเหมาะสมกับการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นด้วยการสัมผัสหรือการมองดู การทดสอบทางเคมีเป็นสิ่งเดียวอย่างแท้จริงที่จะหาได้ว่าน้ำมันหล่อลื่นนั้นมีคุณสมบัติทางการหล่อลื่นที่จำเป็นสำหรับงานนั้นๆหรือไม่ คุณสมบัติเหล่านี้บางประการจะอธิบายต่อไปจากนี้โดยจะแบ่งการพิจารณาออกเป็นสองส่วนคือ ตัวเนื้อน้ำมัน (Body เป็นสิ่งวัดความเหลวหรือข้นของน้ำมัน) และคุณภาพด้านการไหล (Flow quality)

ตัวเนื้อน้ำมันเกี่ยวข้องกับความต้านทานในส่วนที่ทำให้ชั้นฟิล์มน้ำมันยังคงอยู่ได้เมื่อรับภาระมาก ยกตัวอย่างเช่น ในขณะที่เครื่องยนต์เริ่มต้นจังหวะกำลัง ภาระที่กระทำกับรองลื่นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 300 psi (20.67 bar) โดยประมาณเป็น 1400 psi (96.48 bar) ตัวเนื้อน้ำมันจะป้องกันไม่ให้ภาระนี้บีบอัดชั้นฟิล์มน้ำมันออกไปจากช่องว่างระหว่างเพลากับรองลื่น ตัวเนื้อน้ำมันเป็นตัวรองรับภาระแบบกระแทก, เป็นตัวช่วยที่ดีในการรักษาให้เกิดการกันรั่วระหว่างแหวนลูกสูบกับกระบอกสูบ, ทำให้รักษาการเกิดชั้นฟิล์มที่เพียงพอที่รองลื่นทั้งหลายไว้ได้

คุณภาพด้านการไหลเกี่ยวข้องกับความง่ายที่น้ำมันจะสามารถไหลผ่านท่อหรือช่องรูน้ำมันเพื่อที่จะกระจายไปสู่ผิวสัมผัสของรองลื่น ตัวเนื้อน้ำมันและคุณภาพด้านการไหลดูเหมือนว่าจะมีคุณสมบัติตรงข้ามกัน เพราะว่าน้ำมันที่มีความหนืดน้อยก็จะมีตัวเนื้อน้ำมันน้อยตามไปด้วย น้ำมันเครื่องจะต้องมีตัวเนื้อน้ำมันเพียงพอที่จะทำงานตามที่กล่าวมาแล้วและยังต้องมีคุณภาพด้านการไหลอย่างเพียงพอที่จะไหลผ่านช่องรูน้ำมัน, ไส้กรอง, ฯลฯ ได้ง่ายและสามารถกระจายไปทั่วผิวสัมผัสของรองลื่นได้อย่างมีประสิทธิผล อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ตัวเนื้อน้ำมันลดน้อยลงและทำให้คุณภาพด้านการไหลเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิลดลงก็จะทำให้ตัวเนื้อน้ำมันเพิ่มมากขึ้นและคุณภาพด้านการไหลลด

น้อยลง ภายใต้สภาวะการทำงานตามปกติอุณหภูมิของน้ำมันเครื่องจะอยู่ระหว่าง 120°F (48.9°C) ถึง 160°F (71.1°C) แต่ภายใต้สภาวะที่ภาระหนักสุดๆ อุณหภูมิอาจจะสูงขึ้นไปมากกว่านี้แต่ก็เป็นช่วงสั้นๆ เครื่องยนต์ที่ใช้งานหนักมักจะมีเครื่องระบายความร้อนน้ำมันเครื่อง (Oil cooler) ติดอยู่ด้วยเพื่อรักษาให้อุณหภูมิของน้ำมันเครื่องอยู่ในช่วงที่ใช้งานได้ตามปกติ

1-5.4 สารหล่อลื่นเครื่องยนต์

น้ำมันประเภท Detergent oil ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้กับสภาวะการทำงานที่รุนแรงสุดๆของเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยการอัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีอาการแหวนลูกสูบติดตายและลูกสูบถูกเคลือบด้วยคราบไหม้ปรากฏขึ้น สภาวะเช่นนี้เกิดขึ้นจากการที่น้ำมันเครื่องกระทบกับอุณหภูมิสูงมากซึ่งจะเกิดคราบที่ดูคล้ายกับวานิช (Varnish-like) จับอยู่ที่ลูกสูบและร่องแหวน ผลอย่างอื่นที่อาจพบอีกก็คือการเกิดน้ำมันขี้โล้ (Sludge), ที่รองลื่นมีคราบจับหรือถูกกรดกัด, และโดยทั่วไปก็จะทำให้น้ำมันเครื่องเสื่อมสภาพจากการเป็นสารหล่อลื่น การใช้ Detergent oil จะขจัดปัญหาเหล่านี้และทำให้การทำงานเป็นที่น่าพอใจ

Detergent oil ประกอบด้วยสารประกอบโลหะหรือ**สบู่**อยู่ในสภาพแขวนลอยจึงป้องกันไม่ให้ผลผลิตที่เป็นของแข็งจาก Oxidation และการเผาไหม้ (น้ำมันขี้โล้) เกิดขึ้น สิ่งเหล่านี้จะถูกระบายออกไปเมื่อถ่ายน้ำมันออกจากเครื่องยนต์

1-5.5 สารหล่อลื่นระบบส่งกำลัง

การหล่อลื่นระบบส่งกำลังใช้น้ำมันหล่อลื่นสี่เกรดต่อไปนี้คือ SAE 80, 90, 140, และ 250 น้ำมันหล่อลื่นระบบส่งกำลังจะต้องไม่จับตัวกันเป็นสารในสภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิต่ำ มิฉะนั้นมันจะถูกเฟืองที่หมุนตัดออกเป็นก้อนๆ ถ้าไม่เกิดการจับตัวดังกล่าว น้ำมันหล่อลื่นทั้งหมดจะถูกผลักดันไปอยู่อีกด้านหนึ่งของห้องเกียร์ และถ้าน้ำมันหล่อลื่นไม่ไหลกลับไปสู่ฟันเฟืองที่ขบกันได้เร็วพอ หน้าสัมผัสของฟันที่ขบกันก็จะขาดน้ำมันหล่อลื่น และรองลื่นก็อาจเป็นเช่นนี้ด้วย

สารหล่อลื่นชุดเฟืองทด

ชุดเฟืองทดแบบเปลี่ยนเกียร์ด้วยการเลื่อนเฟืองเข้าขบกันตามปกติมักจะใช้น้ำมันเกียร์ที่ข้นเกรด SAE 140 แต่น้ำมันเกียร์บางชนิดที่นำมาใช้มี

ความสามารถในการต้านทานความดันสูงที่เกิดจากการขบกันของฟันเฟืองได้ น้ำมันเกียร์ชนิดนี้จึงลดการขัดสีที่เกิดขึ้นบนหน้าสัมผัสของฟันเฟืองได้ น้ำมันเกียร์ประเภทนี้เรียกว่าน้ำมันเกียร์ EP (Extreme Pressure)

ชุดเฟืองทดแบบฟันเฟืองขบกันตลอดเวลา (Synchromesh) ที่ใช้กับรถยนต์ ใช้น้ำมันเครื่องเกรด SAE 40/50 เป็นสารหล่อลื่น เมื่อนำไปใช้กับรถบรรทุกจะใช้น้ำมันเกียร์ชนิดใสเกรด SAE 80/90, น้ำมันเครื่องเกรด SAE 50 หรือน้ำมัน EP ชนิดใส เป็นสารหล่อลื่น ส่วน Epicyclic gear-box นั้นใช้น้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดต่ำคล้ายกันกับน้ำมันเครื่องเกรด SAE 30/40

สารหล่อลื่นเพลาท้าย

เฟืองท้ายแบบเฟืองฉากเกลียว (Spiral bevel gear) ของเพลาท้ายรถยนต์ใช้น้ำมันเกียร์เกรด SAE 90 แต่เมื่อนำไปใช้กับรถบรรทุกตามปกติจะใช้น้ำมันเกียร์เกรด SAE 140

เฟืองท้ายแบบเฟืองหนอน (Worm gear) ทำงานที่อุณหภูมิสูงเพราะว่ามีความร้อนจากความเสียดทานเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจากการเคลื่อนที่แบบเลื่อนและความดันสูงที่ผิวสัมผัส เพราะฉะนั้นผู้ผลิตรถยนต์ส่วนใหญ่ยังคงแนะนำให้ใช้น้ำมันสารประกอบ (Compound oil) ซึ่งได้จากกระบวนการกลั่นสารละลาย (Solvent) ออกและผสมกับสารเติมแต่งเช่นคลอรีน, ซัลเฟอร์ และฟอสฟอรัส

เฟืองท้ายแบบ Hypoid ต้องการน้ำมัน EP ที่พัฒนาขึ้นมาเป็นพิเศษมีเกรดโดยประมาณเป็น SAE 70 - 140 เพราะว่ามีความเร็วสูงในการบดในขณะเข้าขบกันและมีความดันสูงที่ผิวสัมผัส สารเติมแต่งที่ใช้ในน้ำมันเกียร์ Hypoid ตามปกติคือสารประกอบของคลอรีนและของซัลเฟอร์ สารประกอบของคลอรีนช่วยลดความเสียดทานและสารประกอบของซัลเฟอร์ช่วยขจัดการสึกของเฟือง

สารหล่อลื่นแชสซิส

การหล่อลื่นแชสซิส (Chassis) นั้นใช้สารหล่อลื่นหลายประเภท ตั้งแต่น้ำมันเกียร์เกรด SAE 140/225 จนถึงจารบีทนความร้อนสำหรับงานหนักประเภท Soda base หรือ Lime-soda base

รถยนต์นั่งส่วนใหญ่และรถบรรทุกขนาดเล็กใช้น้ำมันเกียร์เกรด SAE 140 หรือจารบีเหลวที่มีความสามารถกันน้ำประเภท Lime-base ซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่ประมาณ 200^{O}F (93.3^{O}C)

รถบรรทุกขนาดใหญ่ใช้จารบีข้นปานกลางที่ทำขึ้นจากน้ำมันที่ข้นกว่าและมีปริมาณ Lime-soap มากกว่า จารบีประเภทนี้ไม่ค่อยไหลออกมาเมื่อใช้กับรองลื่นที่ทำงานภายใต้ความดันสูงจึงช่วยในการป้องกันรองลื่นจากน้ำ, ฝุ่น และโคลน

จารบีที่มีจุดหลอมเหลวสูงถูกนำไปใช้กับการหล่อลื่นดุมล้อ (Wheel-hub) โดยจารบีประเภทนี้มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 320^{O}F (160^{O}C) โดยประมาณตามปกติจุดหลอมเหลวระดับนี้มักจะเพียงพอสำหรับต้านทานผลความร้อนที่ถ่ายเทมาจากกระทะหรือจานห้ามล้อ ซึ่งความร้อนนี้จะมีผลทำให้จารบีดุมล้อละลายได้

1-6 การคำนวณพื้นฐานของเครื่องยนต์

ศูนย์ตายบน (Top dead center, TDC) คือตำแหน่งไกลสุดที่ลูกสูบจะสามารถเคลื่อนที่ไปได้ภายในกระบอกสูบ

ศูนย์ตายล่าง (Bottom dead center, BDC) คือตำแหน่งใกล้สุดที่ลูกสูบจะสามารถเคลื่อนกลับได้ภายในกระบอกสูบ

ช่วงชัก (Stroke, l) คือระยะทางระหว่างศูนย์ตายบนกับศูนย์ตายล่างที่ลูกสูบเคลื่อนที่ได้ในกระบอกสูบ การเคลื่อนที่ไป–กลับอย่างละหนึ่งครั้งของลูกสูบจะทำให้เพลาข้อเหวี่ยงหมุนไปได้หนึ่งรอบ

ความโตของกระบอกสูบ (Bore, d) คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของกระบอกสูบ

รัศมีข้อเหวี่ยง (Throw, R) คือระยะทางระหว่างจุดศูนย์กลางของเพลาข้อเหวี่ยงกับจุดศูนย์กลางของสลักข้อเหวี่ยงหรือรองลื่นก้านสูบ รัศมีข้อเหวี่ยงจะมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของช่วงชัก

ปริมาตรระยะห่าง (Clearance volume, V_C) หรือ**ปริมาตรห้องเผาไหม้** คือปริมาตรภายในกระบอกสูบที่อยู่เหนือหัวลูกสูบขึ้นไปในขณะที่ลูกสูบอยู่ที่ TDC

ปริมาตรแทนที่ของลูกสูบ (Piston displacement หรือ**ปริมาตรดูด**หรือ**ปริมาตรกวาด** Swept volume, V_d) คือปริมาตรที่ลูกสูบเข้าไปแทนที่ในกระบอกสูบเมื่อลูกสูบเคลื่อนที่จากศูนย์ตายล่างถึงศูนย์ตายบน ปริมาตรแทนที่ของลูกสูบมีค่าเป็น

$$V_d = \frac{\pi}{4} d^2 l \qquad (1\text{-}6.1)$$

เมื่อ d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ และ l คือช่วงชักของลูกสูบ

อัตราการดูดอากาศเข้าเครื่องยนต์ทางทฤษฎีของเครื่องยนต์จำนวน k สูบที่หมุนด้วยความเร็วรอบ N rpm คือ

$$\dot{V}_d = \frac{\pi}{4} d^2 \; l \; n \; k \qquad (1\text{-}6.2)$$

เมื่อ n คือจำนวนครั้งที่เครื่องยนต์ดูดไอดีเข้ากระบอกสูบ ถ้าเป็นเครื่องยนต์ 4 จังหวะ n = N/2 และมีค่าเป็น n = N สำหรับเครื่องยนต์ 2 จังหวะ

ปริมาตรทั้งหมด (Total volume, V_t) คือปริมาตรที่วัดจากหัวลูกสูบขึ้นไปเมื่อลูกสูบอยู่ที่ศูนย์ตายล่าง ปริมาตรทั้งหมดจะมีค่าเป็น

$$V_t = V_d + V_C \qquad (1\text{-}6.3)$$

อัตราส่วนการอัด (Compression ratio, ε) คืออัตราส่วนระหว่างปริมาตรทั้งหมดกับปริมาตรระยะห่าง ซึ่งจะหาได้จาก

$$\varepsilon = \frac{V_t}{V_C} = 1 + \frac{V_d}{V_c} \qquad (1\text{-}6.4)$$

ความเร็วของลูกสูบ (Piston speed, C) คืออัตราการเปลี่ยนตำแหน่งของลูกสูบ ซึ่งมีค่าไม่คงที่ในขณะที่ลูกสูบเคลื่อนที่ระหว่างศูนย์ตายล่างกับศูนย์ตายบน ความเร็วเฉลี่ยของลูกสูบจะหาได้จาก

$$C = 2 \, l \, n \qquad (1\text{-}6.5)$$

ความเร็วเฉลี่ยของลูกสูบจะมีค่าประมาณ 58% ของความเร็วสูงสุดของลูกสูบซึ่งเกิดขึ้นเมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ลงมาจากศูนย์ตายบนเป็นมุมหมุนของเพลาข้อเหวี่ยงประมาณ 80^O

แรงที่กระทำบนหัวลูกสูบ เกิดขึ้นเนื่องจากความดัน p ของก๊าซที่อยู่ในกระบอกสูบซึ่งคำนวณได้จาก

$$F = p \, A \qquad (1\text{-}6.6)$$

เมื่อ A คือพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบ

งานซึ่งเกิดขึ้นจากแรงภายในกระบอกสูบที่ทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่ไปขับกลไกต่างๆของเครื่องยนต์เรียกว่า**งานหัวสูบ** (Indicated work) สามารถคำนวณได้จาก

$$W = p \, V_d \qquad (1\text{-}6.7)$$

งานหัวสูบสามารถคำนวณได้โดยใช้ค่าความดันเฉลี่ยประสิทธิผล (Mean effective pressure, p_i) ซึ่งใช้ Engine indicator เป็นเครื่องวัด โดยเขียนออกมาเป็นแผนภาพที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในกระบอกสูบกับ

ระยะทางที่ลูกสูบเคลื่อนที่บน Indicator card ซึ่งอัตราของงานหัวสูบในหนึ่งหน่วยเวลาเรียกว่า**กำลังหัวสูบ** (Indicated power) มีค่าเป็น

$$P_i = p_i \dot{V}_d = p_i lAnk \qquad (1\text{-}6.8)$$

จังหวะการทำงานของเครื่องยนต์ (Engine timing) คือการทำงานของระบบต่างๆของเครื่องยนต์ เช่น จังหวะของลิ้น (Valve timing) จังหวะจุดระเบิด จังหวะฉีดน้ำมัน เมื่อเครื่องยนต์ทำงานครบวัฏจักร จังหวะการทำงานของเครื่องยนต์สามารถแสดงให้เห็นชัดได้ด้วยแผนภาพของจังหวะลิ้น (Valve timing diagram) สำหรับเครื่องยนต์ 4 จังหวะ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1-6.1 ซึ่งเป็นแผนภาพจังหวะของลิ้นสำหรับเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน 4 จังหวะรอบช้า ที่มีจังหวะการทำงานดังนี้ คือ

5^O BTDC ลิ้นไอดีเปิด, 25^O ABDC ลิ้นไอดีปิด

35^O BBDC ลิ้นไอเสียเปิด, 8^O ATDC ลิ้นไอเสียปิด

34^O BTDC จุดระเบิด

เมื่อ BTDC คือก่อนศูนย์ตายบน, ATDC คือหลังศูนย์ตายบน, BBDC คือก่อนศูนย์ตายล่าง, และ ABDC คือหลังศูนย์ตายล่าง, จะได้จำนวนองศาของเพลาข้อเหวี่ยงที่หมุนไปในแต่ละจังหวะดังนี้:

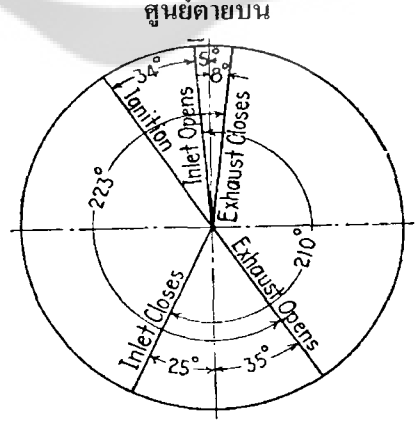
จำนวนองศาที่เกิดจังหวะดูดหรือช่วงองศาที่ลิ้นไอดีเปิด = $180^O+5^O+25^O = 210^O$

จำนวนองศาที่เกิดจังหวะอัด = $180^O - 25^O - 34^O = 121^O$

จำนวนองศาที่เกิดจังหวะกำลัง = $180^O + 34^O - 35^O = 179^O$

จำนวนองศาที่เกิดจังหวะคายหรือช่วงที่ลิ้นไอเสียเปิด = $180^O + 35^O + 8^O = 223^O$

ช่วงองศาที่ลิ้นไอดีกับไอเสียเปิดพร้อมกัน = $5^O + 8^O = 13^O$



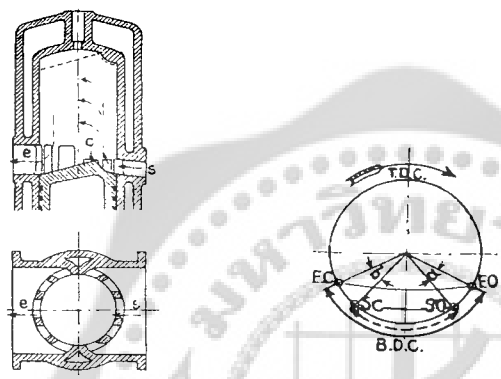
รูปที่ 1-6.1 แผนภาพของลิ้น

เวลาที่เครื่องยนต์ใช้ในการทำงานแต่ละจังหวะจะหาได้จากความเร็วรอบของเครื่องยนต์ คือ

$$t = \frac{\theta}{360^{O}} \frac{60}{N} \qquad (1\text{-}6.9)$$

เมื่อ t คือเวลา (s) ในการทำงานของเครื่องยนต์คิดจากมุมหมุนของเพลาข้อเหวี่ยง θ องศา และ N คือความเร็วรอบ (rpm) ของเพลาข้อเหวี่ยง

สำหรับเครื่องยนต์ 2 จังหวะ จังหวะการทำงานสามารถแสดงให้เห็นชัดด้วยแผนภาพจังหวะของช่อง (Port timing diagram) ดังแสดงในรูปที่ 1-6.2 ซึ่งสามารถคำนวณด้วยหลักการเดียวกันกับแผนภาพจังหวะของลิ้น



รูปที่ 1-6.2 แผนภาพจังหวะของช่อง

ตัวอย่างที่ 1-6.1 เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน 4 สูบ 4 จังหวะที่มีอัตราส่วนการอัด 8:1 เครื่องหนึ่งมีกระบอกสูบโต 80 mm ช่วงชักยาว 86 mm ถูกทดสอบหากำลังหัวสูบได้ค่าความดันเฉลี่ยประสิทธิผล 6 bar ที่ 2500 rpm จงคำนวณหา (1) ปริมาตรห้องเผาไหม้, (2) ความเร็วของลูกสูบ, (3) ปริมาตรดูดไอดีทางทฤษฎี, และ (4) กำลังหัวสูบ

วิธีทำ (1) จากสมการที่ (1-6.4) จะได้

$$V_c = \frac{V_d}{\varepsilon - 1} = \frac{432.28 \text{ cc}}{8 - 1} = 61.75 \text{ cc} \qquad \textbf{ตอบ}$$

เมื่อ $V_d = \frac{\pi}{4}(8 \text{ cm})^2(8.6 \text{ cm}) = 432.28 \text{ cm}$ และ $\varepsilon = 8$

(2) ความเร็วเฉลี่ยของลูกสูบจะหาได้จาก

$$C = 2 l N = 2 (0.086 \text{ m}) (2500/60 \text{ rev/s}) = 7.167 \text{ m/s} \qquad \textbf{ตอบ}$$

(3) ปริมาตรดูดไอดีเข้าเครื่องยนต์ทางทฤษฎีจะหาได้จาก

$$\dot{V}_d = \frac{\pi}{4} d^2 l \text{ n k} = V_d n \text{ k} = (432.28 \text{ cm}^3) [(2500/60)/2 \text{ cycle/s}] (4)$$

$$= 36\,023.3 \text{ cm}^3/\text{s} = 0.036\,02 \text{ m}^3/\text{s} \qquad \textbf{ตอบ}$$

(4) กำลังหัวสูบหาได้จากสมการ (1-6.8) คือ

$$P_i = p_i \dot{V}_d = (7\times10^5\ \text{N/m}^2)\,(0.036\ 02\ \text{m}^3/\text{s}) = 25\ 214\ \text{Nm/s}$$

$$= 25.2\ \text{kW} \qquad \textbf{ตอบ}$$

ตัวอย่างที่ 1-6.2 เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน 4 สูบ 4 จังหวะเครื่องหนึ่งมีจังหวะการทำงานดังนี้คือ ลิ้นไอดีเปิด 18^O ก่อนลูกสูบถึงศูนย์ตายบน และปิดหลังลูกสูบผ่านศูนย์ตายล่างไป 40^O ลิ้นไอเสียเปิดก่อนลูกสูบถึงศูนย์ตายล่าง 35^O และปิดหลังจากลูกสูบผ่านศูนย์ตายบนไปแล้ว 20^O หัวเทียนจุดประกายไฟเมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ในจังหวะอัดก่อนถึงศูนย์ตายบน 12^O จงหาเวลาที่ลิ้นไอดีและไอเสียเปิดและเวลาจุดระเบิดล่วงหน้า

วิธีทำ จำนวนองศาที่ลิ้นไอดีเปิด $= 180^O + 18^O + 40^O = 238^O$

จำนวนองศาที่ลิ้นไอเสียเปิด $= 180^O + 20^O + 35^O = 235^O$

เวลาที่ลิ้นเปิดจะหาได้จากสมการ (1-6.9) คือ

เวลาที่ลิ้นไอดีเปิด $= \dfrac{238^O}{360^O}\dfrac{60}{2400} = 0.0165\ \text{s}$ **ตอบ**

เวลาที่ลิ้นไอเสียเปิด $= \dfrac{235^O}{360^O}\dfrac{60}{2400} = 0.0163\ \text{s}$ **ตอบ**

เวลาจุดระเบิดล่วงหน้า $= \dfrac{12^O}{360^O}\dfrac{60}{2400} = 0.0083\ \text{s} = 8.3\ \text{ms}$ **ตอบ**

แบบฝึกหัด

1. รถยนต์คันหนึ่งใช้เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน 4 สูบ 4 จังหวะที่มีกระบอกสูบโต 60 mm ช่วงชักยาว 70 mm วิ่งด้วยความเร็ว 30 km/h ด้วยเกียร์ 2 ซึ่งมีอัตราทดเป็น 2:1 ถ้าอัตราทดเฟืองท้ายเป็น 5:1 โดยยางมีรัศมีพลวัต 300 mm จงคำนวณหาความเร็วเฉลี่ยของลูกสูบและความเร็วสูงสุดของลูกสูบ

(ตอบ 6.18 m/s และ 10.66 m/s)

2. เครื่องยนต์เครื่องหนึ่งมีอัตราส่วนการอัด 10:1 มีปริมาตรกวาดสูบละ 110 cc โดยมีช่วงชักยาว 85 mm ถ้ารองปะเก็นฝาสูบให้หนาขึ้นกว่าเดิมอีก 1 mm จงคำนวณหาอัตราส่วนการอัดใหม่

(ตอบ 9.139:1)

3. เครื่องยนต์ 4 สูบ 4 จังหวะเครื่องหนึ่งมีกระบอกสูบโต 70 mm มีช่วงชักยาว 80 mm มีอัตราส่วนการอัด 11:1 ถ้าเครื่องยนต์เครื่องนี้ถูกนำไปคว้านให้โตขึ้น

กว่าเดิมอีก 0.5 mm จงคำนวณหาอัตราส่วนการอัดใหม่และอธิบายวิธีทำให้อัตราส่วนการอัดกลับมาเท่าเดิม

(ตอบ อัตราส่วนการอัดใหม่เป็น 11.14:1)

4. เครื่องยนต์ 4 สูบ 4 จังหวะเครื่องหนึ่งมีกระบอกสูบโต 84 mm มีช่วงชักยาว 96 mm ห้องเผาไหม้มีความสูง 8 mm หมุนด้วยความเร็วรอบ 1100 rpm จงคำนวณหา (1) ปริมาตรกวาด, (2) ปริมาตรห้องเผาไหม้, (3) อัตราส่วนการอัด และ (4) อัตราการดูดไอดี

5. เครื่องยนต์ 6 สูบ 4 จังหวะเครื่องหนึ่งมีกระบอกสูบโต 80 mm มีช่วงชักยาว 70 mm ในขณะที่หมุนด้วยความเร็วรอบ 4200 rpm มีความดันเฉลี่ยประสิทธิผลในกระบอกสูบ 8.5 bar จงคำนวณหา (1) แรงระเบิดที่กระทำบนหัวลูกสูบ, (2) งานหัวสูบต่อหนึ่งวัฏจักร และ (3) กำลังหัวสูบ

6. ในขณะนี้ได้มีการนำน้ำมันที่มีค่าความหนืดต่ำต่อไปนี้คือ

SAE 20, SAE 30, SAE 50, SAE 90

มาใช้กับเครื่องยนต์ใหม่ จงอธิบายข้อดีที่ได้จากการใช้น้ำมันหล่อลื่นแบบนี้

จงบรรยายในมุมมองของท่านเองเกี่ยวกับข้อแนะนำในการใช้น้ำมันหล่อลื่นที่เหมาะสมกับเครื่องยนต์เก่าที่ค่อนข้างจะหลวม (สึกหรอ) มาก บรรยายสิ่งที่ท่านเข้าใจในแง่มุมที่เกี่ยวพันกับเกรดต่างๆของน้ำมัน และระบุจุดประสงค์ของน้ำมันแต่ละเกรดที่ดูเหมือนว่าจะใช้กันมากในการหล่อลื่นยานยนต์

7. จงอธิบายสั้นๆเกี่ยวกันน้ำมัน EP ที่ท่านทราบ ควรระบุว่าน้ำมันชนิดนี้มีเพื่อวัตถุประสงค์ใด และข้อควรระวังที่จำเป็นในการให้บริการ

8. จงอธิบายการหล่อลื่นชิ้นส่วนของยานยนต์ต่อไปนี้ คือ (1) เฟืองท้าย, (2) รองลื่นด้านใหญ่ของก้านสูบ, (3) รองลื่นดุมล้อ, (4) หูแหนบ, (5) จุดต่อของก้านต่อโยงกลไกคันเร่ง

9. จงอธิบายความหมายของการหล่อลื่นแบบบังคับ (Forced lubrication) และจงเขียนภาพร่าง (Sketch) แสดงเส้นทางการไหลของน้ำมันไปสู่ผิวสัมผัสที่สำคัญของรองลื่นสำหรับเครื่องยนต์สี่สูบที่เพลาข้อเหวี่ยงมีรองลื่นสามอัน

10. จงวิจารณ์การใช้สารหล่อลื่น EP ในระบบส่งกำลัง (ชุดเฟืองทดและเพลาท้าย) และจงเขียนภาพร่างแสดงชนิดของซีลน้ำมัน (Oil seal) ที่ใช้กับสารหล่อลื่นเช่นนี้

11. จงอธิบายวิธีการหล่อลื่นชิ้นส่วนของรถยนต์ต่อไปนี้ คือ (1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, (2) รองลื่นของก้านสูบ, (3) กากบาท (Universal joints), (4) ลูกหมากคันชัก-คันส่ง

12. จงอธิบายความหมายของค่าดัชนีความหนืด

13. จงเขียนภาพร่างแสดงหม้อกรองน้ำมันหล่อลื่นบางรูปแบบและให้ทำคำอธิบายประกอบภาพร่างด้วย จากนั้นจงอธิบายว่ามันทำให้น้ำมันสะอาดได้อย่างไร

14. จงอธิบายการหล่อลื่นสองแบบที่สามารถพบได้ในทางปฏิบัติ

15. จงพิจารณาน้ำมันเครื่องที่มีคุณภาพสูงสองชนิดต่อไปนี้คือ ชนิดแรกเป็นน้ำมันแบบที่มีค่าความหนืดต่ำ ชนิดที่สองเป็นน้ำมันที่มีค่าความหนืดปานกลาง จงระบุว่าน้ำมันแต่ละชนิดเมื่อนำมาใช้กับเครื่องยนต์ก๊าซโซลีจะเหมาะสมกับสภาวการณ์ใด

จงเขียนภาพร่างเป็นภาคตัด (Section) แล้วให้คำอธิบาย (1) หม้อกรองอากาศแบบแช่ในน้ำมัน (Oil bath air-cleaner), (2) หม้อกรองน้ำมันเครื่องแบบติดอยู่ข้างนอก

16. จงอธิบายคำว่า "ความหนืด" และ "จุดวาบไฟ" ของน้ำมันหล่อลื่น

จงอธิบายว่าคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงได้อย่างไรเมื่อได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิ และจงบรรยายว่าจะป้องกันไม่ให้น้ำมันเครื่องของรถยนต์สูงมากเกินไปได้อย่างไร

17. จงอธิบายว่า Detergent oil คืออะไร และจงอธิบายถึงข้อดีเมื่อนำน้ำมันชนิดนี้มาใช้ในเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยการอัดซึ่งมีความเร็วสูง

เอกสารอ้างอิง

1. บัญชา ค้งตระกูล, ปานเพชร ชินินทร, ยงยศ จินารักษ์ (2532). **กลศาสตร์ยานยนต์,** ซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ, หน้า 15-29.

2. เตื้อง โรมา, บัญชา ค้งตระกูล, ประจวบ ส่องรส, สนั่น วงษ์รอด, จำนง นุกูลคาม, ประยูร แซ่กำ และ สมนึก ศักดิ์พลาดิศัย (2521). **คณิตศาสตร์ช่างยนต์และกลศาสตร์วิศวกรรมเบื้องต้น**, โรงพิมพ์ประยูรวงศ์, กรุงเทพฯ, หน้า 25-77.

3. Champion RC, Arnold EC (1964). **Motor Vehicle Calculations and Science Part II**, London: Edward Arnold, pp. 78-87.

4. Hall AS, Holowenko AR, Laughlin HG (1961). **Theory and Problems of Machine Design**, Schaum's Outline Series, New York: McGraw-Hill, p. 277.

5. Maleev VL (1945). **Internal-Combustion Engines Theory and Design**, 2nd ed., New York: McGraw-Hill, pp. 271-278.

เอกสารที่แนะนำให้ศึกษาเพิ่มเติม

1. บัญชา ค้งตระกูล, ปานเพชร ชินินทร, ยงยศ จินารักษ์ (2532). **กลศาสตร์ยานยนต์,** ซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ, บทที่ 2 เครื่องยนต์.

2. เตื้อง โรมา, บัญชา ค้งตระกูล, ประจวบ ส่องรส, สนั่น วงษ์รอด, จำนง นุกูลคาม, ประยูร แซ่กำ และ สมนึก ศักดิ์พลาดิศัย (2521). **คณิตศาสตร์ช่างยนต์และกลศาสตร์วิศวกรรมเบื้องต้น**, โรงพิมพ์ประยูรวงศ์, กรุงเทพฯ, บทที่ 1 ความเร็วแล่นของลูกสูบ, บทที่ 2 ปริมาตรและอัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์, บทที่ 3 ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร, บทที่ 4 แรงที่กระทำบนหัวลูกสูบและงานที่เกิดขึ้น, บทที่ 5 การคำนวณกำลังและกำลังม้าที่หัวสูบของเครื่องยนต์.

3. Arkhangelsky V, Khovakh M, Stepanov Y, Trusov V, Vikhert M and Voinov A (1976). **Motor Vehicle Engines**, Translated by Troitsky A and Lieb G, Moscow: Mir Publishers, Chapter 24 Lubrication system.

4. Arkhangelsky V, Khovakh M, Stepanov Y, Trusov V, Vikhert M and Voinov A (1979). **Motor Vehicle Engines**, Translated by Troitsky A

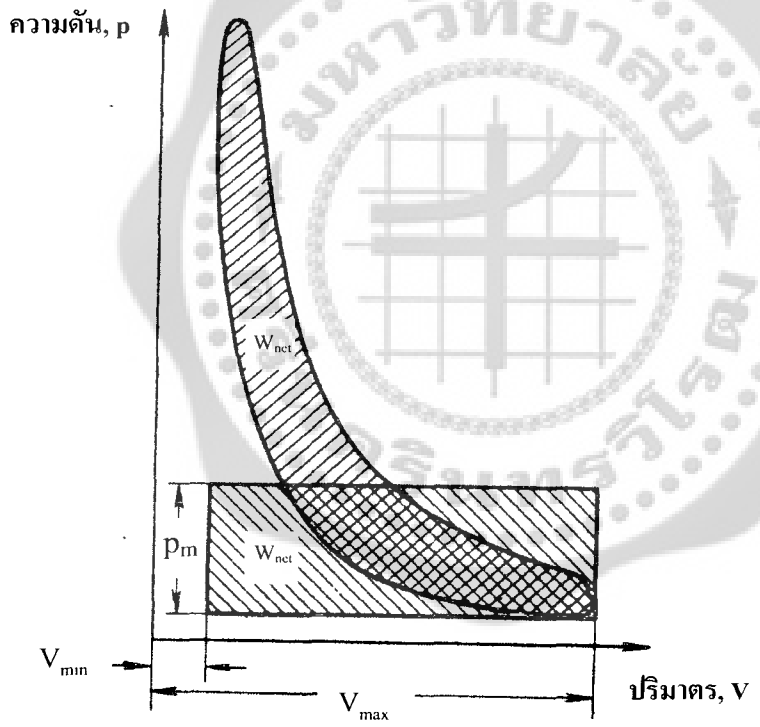
and Samokhvalov M, Moscow: Mir Publishers, Chapter 25 Lubrication system.

5. Petrovsky N (19xx). **Marine Internal Combustion engines**, Translated by Isakson HE, Moscow: Mir Publishers, Chapter XX Miscellaneous accessory equipment.

บทที่ 2
วัฏจักรทางทฤษฎีของเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบลูกสูบ

2-1 บทนำ

การเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานกลในเครื่องยนต์สันดาปภายในนั้นเป็นผลเนื่องมาจากสารทำงาน (Working fluid) หรือก๊าซภายในกระบอกสูบของเครื่องยนต์เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะขึ้นเป็นวัฏจักรอย่างต่อเนื่อง ผลของการเปลี่ยนแปลงสถานะหรือกระบวนการเหล่านี้รวมกันเป็นวัฏจักรที่แท้จริง (Actual cycle) ของเครื่องยนต์ (ดูรูปที่ 2-1.1)



รูปที่ 2-1.1 วัฏจักรจริงของเครื่องยนต์ แสดงด้วยแผนภาพความดันกับปริมาตร

วัฏจักรที่แท้จริงประกอบด้วยกระบวนการที่แท้จริงที่เกิดขึ้นภายในกระบอกสูบของเครื่องยนต์โดยค่าความจุความร้อน (Heat capacity) ของอากาศและผลผลิตจากการเผาไหม้ (Products of combustion) มีค่าไม่คงที่ การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงทำให้ส่วนประกอบทางเคมีเปลี่ยนแปลงไปมาก ด้วยเหตุนี้

คุณสมบัติทางกายภาพของก๊าซในกระบอกสูบจึงเปลี่ยนแปลงไปด้วย ในระหว่างกระบวนการการอัดและกระบวนการขยายตัวนั้นปริมาณของก๊าซไม่คงที่เพราะว่าการเปิดและการปิดของลิ้นไอดีและลิ้นไอเสียไม่ได้เกิดขึ้นในขณะที่ลูกสูบอยู่ที่ศูนย์ตายบนและศูนย์ตายล่างอย่างแท้จริง นอกจากนี้ยังมีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นระหว่างก๊าซกับผนังกระบอกสูบและลูกสูบ นำมาซึ่งการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานการไหลและการสูญเสียทางกลอีกด้วย

พฤติกรรมที่ซับซ้อนของกระบวนการจริงที่เกิดขึ้นภายในกระบอกสูบนั้นทำให้การวิเคราะห์วัฏจักรจริงด้วยหลักการของอุณหพลศาสตร์มีความยุ่งยากมาก ด้วยเหตุนี้จึงใช้วัฏจักรทางทฤษฎี (วัฏจักรทางอุณหพลศาสตร์) แสดงแทนและวิเคราะห์ปัจจัยพื้นฐาน (Basic factors) ซึ่งจะเป็นดัชนีที่สำคัญซึ่งบ่งชี้วัดคุณภาพในการทำงานของเครื่องยนต์แทนการวิเคราะห์วัฏจักรจริงของเครื่องยนต์

วัฏจักรทางทฤษฎีต่างจากวัฏจักรที่แท้จริงตรงที่วัฏจักรทางทฤษฎีนั้นไม่มีการสูญเสียใดๆ ยกเว้นการระบายความร้อนออกจากวัฏจักรสู่แหล่งอุณหภูมิต่ำ ซึ่งเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ เพราะว่าตามกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์นั้นพลังงานความร้อนจะไม่สามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานกลได้ถ้าไม่มีการระบายความร้อนส่วนหนึ่งออกไปสู่แหล่งอุณหภูมิต่ำ

ในการวิเคราะห์วัฏจักรทางทฤษฎีจะมีสมมติฐานต่อไปนี้

1. วัฏจักรทางทฤษฎีจะเป็นวัฏจักรปิด และสมมติว่าปริมาณของก๊าซอุดมคติในวัฏจักรมีค่าคงที่ นั่นคือ กระบวนการดูด กระบวนการคายไอเสีย และการสูญเสียในการบรรจุไอดี (Pumping losses) ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องจากกระบวนการทั้งสองไม่นำมาพิจารณา

2. ค่าความจุความร้อนของก๊าซถูกสมมติให้มีค่าคงที่ตลอดทั้งวัฏจักร นั่นคือค่าความจุความร้อนของก๊าซไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

3. การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงภายในกระบอกสูบถูกแทนที่ด้วยปริมาณความร้อนเสมือนที่สมมติว่าถ่ายเทมาจากแหล่งภายนอกในชั่วขณะ และการระบายก๊าซไอเสียถูกแทนที่ด้วยปริมาณความร้อนเสมือนที่สมมติว่าถ่ายเทออกไปสู่แหล่งอุณหภูมิต่ำภายนอกในชั่วขณะ

4. กระบวนการอัดและขยายตัวของก๊าซเป็นแบบไอเซนโทรปิก นั่นคือไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างสารทำงานกับสิ่งแวดล้อมภายนอก

ถึงแม้ว่าสมมติฐานเหล่านี้ทำให้ประสิทธิภาพของวัฏจักรทางทฤษฎีสูงกว่าวัฏจักรจริง แต่วัฏจักรทางทฤษฎีนั้นมีประโยชน์ในการชี้ให้เห็นผลจากปัจจัย

ที่สำคัญต่างๆทางอุณหพลวัตที่มีต่อกระบวนการในการเปลี่ยนรูปความร้อนไปเป็นงานกล และนำไปใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างวัฏจักรแบบต่างๆจากมุมมองในแง่ของความมีประสิทธิผลและในแง่ของความประหยัดเชื้อเพลิงอีกด้วย

ตามกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ ประสิทธิภาพความร้อนของวัฏจักรทางทฤษฎีสำหรับสารทำงาน 1 kg สามารถหาได้จาก

$$\eta_t = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = \frac{q_{in} - q_{out}}{q_{in}} = \frac{w_{net}}{q_{in}} \qquad (2\text{-}1.1)$$

เมื่อ q_{in} = ปริมาณความร้อนที่วัฏจักรได้รับ, J/kg

q_{out} = ค่าสมบูรณ์ปริมาณความร้อนที่ระบายออกจากวัฏจักร, J/kg

$w_{net} = q_{in} - q_{out}$ = งานที่กระทำโดยสารทำงานต่อหนึ่งวัฏจักร, J/kg

ในวัฏจักรปิดใดๆ งานที่กระทำโดยสารทำงานที่มีมวลเป็น m (มีหน่วยเป็น kg) จะหาได้จาก $W_{net} = \oint p\, dV$ (เมื่อ p คือความดันและ V คือปริมาตร) ซึ่งเมื่อพิจารณาวัฏจักรในรูปที่ 2-1.1 งานนี้จะมีค่าเท่ากับพื้นที่ซึ่งล้อมรอบด้วยวิถี (Path) ซึ่งประกอบเป็นวัฏจักรทั้งหมด

เพื่อเปรียบเทียบวัฏจักรทำงานของเครื่องยนต์ชนิดต่างๆซึ่งกระบอกสูบมีขนาดไม่เท่ากัน ในทางปฏิบัติจึงพิจารณางานที่ได้จากวัฏจักรต่อปริมาตรทำงาน (คือผลต่างระหว่าง V_{max} กับ V_{min}) หรือปริมาตรกวาดหนึ่งหน่วย

$$V_d = V_{max} - V_{min} \qquad (2\text{-}1.2)$$

เมื่อ V_{max} = ปริมาตรมากที่สุดในกระบอกสูบเมื่อสิ้นสุดกระบวนการขยายตัว, m^3

V_{min} = ปริมาตรน้อยที่สุดในกระบอกสูบเมื่อสิ้นสุดกระบวนการอัด, m^3

ด้วยจุดประสงค์นี้ พื้นที่ซึ่งแสดงถึงงานของวัฏจักร W_{net} จึงแทนด้วยสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งมีพื้นที่เท่ากัน โดยมีความยาวฐานเป็น $V_d = V_{max} - V_{min}$ และมีความสูงของสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็น

$$p_m = \frac{W_{net}}{V_d} \qquad (2\text{-}1.3)$$

ซึ่งแสดงถึงงานจำเพาะ (Specific work) คืองานต่อปริมาตรทำงานหนึ่งหน่วย (มีหน่วยเป็น J/m^3 หรือ N/m^2)

สมการ (2-1.3) แสดงให้เห็นว่างานจำเพาะมีค่าเป็นตัวเลขเท่ากับค่าของความดันที่คงที่ค่าหนึ่งที่กระทำกับลูกสูบโดยปริมาตรเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง

V_{max} กับ V_{min} ปริมาณ p_m ตามปกติจะเรียกว่าความดันเฉลี่ยของวัฏจักร (มีหน่วยเป็น N/m^2)

2-2 วัฏจักรอุดมคติ

วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์สันดาปภายในสามารถแยกออกเป็นกระบวนการต่างๆตามลำดับ คือ การดูด, การอัด, การเผาไหม้, การขยายตัว, และการคาย ซึ่งเมื่อกำหนดแบบจำลองของแต่ละกระบวนการ เหล่านี้แล้วก็สามารถนำมารวมกันสร้างขึ้นเป็นวัฏจักรการทำงานที่สมบูรณ์และนำไปวิเคราะห์หาสมรรถนะของเครื่องยนต์ต่อไปได้ ซึ่งแบบจำลองของกระบวนการต่างๆของเครื่องยนต์มีหลายแบบ

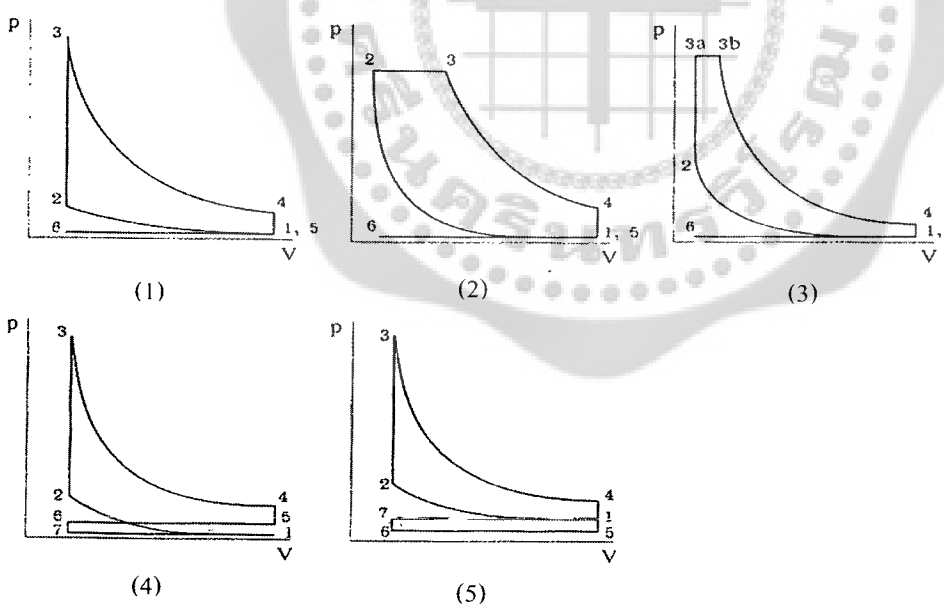
โดยข้อเท็จจริงแล้วเครื่องยนต์สันดาปภายในไม่ได้เป็นระบบปิด และสารทำงานไม่ได้เป็นไปตามวัฏจักรของอุณหพลศาสตร์ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นไม่ใช่เป็นผลมาจากการถ่ายเทความร้อนเป็นหลัก เครื่องยนต์สันดาปภายในจึงควรวิเคราะห์เป็นระบบเปิดที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนและงานกับสิ่งแวดล้อม (บรรยากาศ) โดยมีสารทำปฏิกิริยา (เชื้อเพลิงและอากาศ) ไหลเข้าไปในระบบ มีผลผลิตจากการเผาไหม้ (ก๊าซไอเสีย) ไหลออกจากระบบ ดังนั้นวัฏจักรการทำงานที่จะกล่าวต่อไปนี้จึงประกอบด้วยกระบวนการที่เกิดขึ้นติดต่อกันตามลำดับจนครบวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์

แบบจำลองอุดมคติของกระบวนการต่างๆ ที่ประกอบกันขึ้นเป็นวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์สันดาปภายในอยู่ในตารางที่ 2-2.1 ซึ่งมีวัฏจักรอุดมคติหลัก 3 วัฏจักรที่แบ่งตามลักษณะของกระบวนการเผาไหม้ คือ **วัฏจักรปริมาตรคงที่** หรือวัฏจักรออตโต (Otto cycle), **วัฏจักรความดันคงที่** หรือวัฏจักรดีเซล (Diesel cycle), และ**วัฏจักรจำกัดความดัน** (Limited-pressure cycle) **หรือวัฏจักรผสม** (Dual cycle)) แต่ไม่ได้หมายความว่าแบบจำลองโดยประมาณที่ดีที่สุดสำหรับวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟหรือเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนเป็นวัฏจักรปริมาตรคงที่ และก็ไม่ได้หมายความว่าแบบจำลองโดยประมาณที่ดีที่สุดสำหรับวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดหรือเครื่องยนต์ดีเซลเป็นวัฏจักรความดันคงที่ด้วยเช่นกัน

แผนภาพความดันกับปริมาตรของวัฏจักรปริมาตรคงที่, วัฏจักรความดันคงที่, และวัฏจักรจำกัดความดันได้แสดงไว้ในรูปที่ 2-2.1 ซึ่งยังแบ่งตามสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ต่อไปออกเป็น

ตารางที่ 2-2.1 แบบจำลองอุดมคติของกระบวนการในเครื่องยนต์สันดาปภายใน

กระบวนการ	สมมติฐาน
การอัด (1-2)	1. แอเดียแบติกและย้อนกลับได้ (ไอเซนโทรปิก)
การเผาไหม้ (2-3)	1. แอเดียแบติก 2. การเผาไหม้เกิดขึ้นโดย (1) ปริมาตรคงที่ (2) ความดันคงที่ (3) แบบจำกัดความดัน (ซึ่งส่วนหนึ่งเป็นปริมาตรคงที่และอีกส่วนหนึ่งเป็นความดันคงที่) 3. เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์
การขยายตัว (3-4)	1. แอเดียแบติกและย้อนกลับได้
การคาย (4-5-6) และ การดูด (6-7-1)	1. แอเดียแบติก 2. การปิด-เปิดลิ้นเกิดขึ้นที่ศูนย์ตายบนและศูนย์ตายล่าง 3. ไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในกระบอกสูบเมื่อความดันแตกต่างซึ่งวัดผ่านลิ้นที่เปิดอยู่ลดลงเหลือศูนย์ 4. ความดันในการดูดและในการคายคงที่ 5. ไม่คิดผลของความเร็ว



รูปที่ 2-2.1 แผนภาพความดันกับปริมาตรของวัฏจักรอุดมคติ

(1) วัฏจักรปริมาตรคงที่ในสภาวะการทำงานที่ไม่เปิดลิ้นเร่ง (2) วัฏจักรความดันคงที่ในสภาวะภารทำงานที่ไม่เปิดลิ้นเร่ง (3) วัฏจักรจำกัดความดันในสภาวะการทำงานที่ไม่เปิดลิ้นเร่ง (4) วัฏจักรปริมาตรคงที่ในสภาวะการทำงานที่เปิดลิ้นเร่ง (5) วัฏจักรปริมาตรคงที่ในสภาวะการทำงานแบบใช้เครื่องอัดบรรจุ

(1) การทำงานเมื่อไม่เปิดลิ้นเร่ง (Unthrottled operation) ซึ่งในกรณีนี้ให้ความดันในการดูด (p_i) และในการคาย (p_e) เท่ากัน ($p_i = p_e$) (ดูรูปที่ 2-2.1 (1), (2), และ (3))

(2) การทำงานโดยเปิดลิ้นเร่ง (throttled operation) ซึ่งทำให้ความดันในการดูดต่ำกว่าความดันในการคาย ($p_i < p_e$) (ดูรูปที่ 2-2.1 (4)) และ

(3) การทำงานโดยใช้เครื่องอัดบรรจุ (Supercharged operation) ซึ่งมีความดันการดูดสูงกว่าความดันการคาย ($p_i > p_e$) (ดูรูปที่ 2-2.1 (5))

เป็นผลให้วัฏจักรอุดมคติแต่ละวัฏจักรสามารถวิเคราะห์เป็น 3 กรณีตามสภาวะการทำงานข้างต้นหรือเมื่อพิจารณารวมทั้งหมดแล้วก็จะมีแบบจำลองของวัฏจักรอุดมคติที่จะนำไปวิเคราะห์ได้ทั้งหมด 9 แบบ

แต่ละวัฏจักรในรูปที่ 2-2.1 กระบวนการ 1-2 เป็นกระบวนการอัด, กระบวนการ 2-3 (หรือ 2-3a-3b ในวัฏจักรจำกัดความดัน) เป็นกระบวนการเผาไหม้, กระบวนการ 3-4 (หรือ 2-4 ในวัฏจักรความดันคงที่) เป็นกระบวนการขยายตัว, กระบวนการ 4-5-6 เป็นกระบวนการคาย, และกระบวนการ 6-7-1 หรือ 6-1 เป็นกระบวนการดูด

การพิจารณาจะเลือกวัฏจักรอุดมคติใดไปใช้ในการพยากรณ์สมรรถนะของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟและเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดชนิดต่างๆนั้น มักจะพิจารณาจากการเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจริงกับกระบวนการเผาไหม้อุดมคติที่มีอยู่ 3 กระบวนการ คือ

1) กระบวนการเผาไหม้แบบปริมาตรคงที่ ซึ่งเป็นกระบวนการเผาไหม้ที่สมมติให้การเผาไหม้เกิดขึ้นทันทีทันใดเมื่อลูกสูบอยู่ที่ศูนย์ตายบน

2) กระบวนการเผาไหม้แบบความดันคงที่ ซึ่งเป็นการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ โดยเริ่มต้นเมื่อลูกสูบอยู่ที่ศูนย์ตายบน

3) กระบวนการเผาไหม้แบบจำกัดความดัน ซึ่งเป็นการเผาไหม้ที่ประกอบด้วยกระบวนการที่กล่าวมาแล้วทั้งสองกระบวนการ

แต่กระบวนการเผาไหม้ในเครื่องยนต์จริง ทั้งเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยประกายไฟและเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยการอัดนั้น จะใช้เวลาซึ่งคิดเป็นมุมหมุนของข้อเหวี่ยงได้ระหว่าง 20 ถึง 70 องศา และส่วนใหญ่จะมีการเริ่มต้นการเผาไหม้ก่อนที่ลูกสูบจะขึ้นมาถึงศูนย์ตายบน ดังนั้นถ้ากระบวนการเผาไหม้ในเครื่องยนต์จริงเกิดขึ้นในขณะที่ลูกสูบใกล้ศูนย์ตายบนและเกิดอย่างรวดเร็วมากก็อาจจะเลือกใช้วัฏจักรปริมาตรคงที่เป็นแบบจำลอง แต่ถ้ากระบวนการเผาไหม้เกิดขึ้นช้ามากก็อาจจะเลือกใช้วัฏจักรความดันคงที่เป็นแบบจำลอง และถ้า

กระบวนการเผาไหม้ในเครื่องยนต์จริงเกิดขึ้นโดยอยู่ระหว่างกระบวนการข้างต้นทั้งสองก็อาจเลือกใช้วัฏจักรจำกัดความดันเป็นแบบจำลอง

ตารางที่ 2-2.2 แบบจำลองในการหาคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารทำงาน

ส่วนผสมที่ยังไม่เผาไหม้	ส่วนผสมที่เผาไหม้แล้ว
1. ก๊าซอุดมคติเดี่ยวตลอดวัฏจักรการทำงาน โดยมี c_v (และ c_p) คงที่	ก๊าซอุดมคติเดี่ยวตลอดวัฏจักรการทำงาน โดยมี c_v (และ c_p) คงที่
2. ก๊าซอุดมคติโดย $c_{v,u}$ คงที่	ก๊าซอุดมคติ $c_{v,b}$ คงที่
3. ส่วนผสมของก๊าซอุดมคติที่ส่วนประกอบไม่เปลี่ยนแปลง; $c_{v,i}(T)$	ส่วนผสมของก๊าซอุดมคติที่ส่วนประกอบไม่เปลี่ยนแปลง; $c_{v,i}(T)$
4. ส่วนผสมของก๊าซอุดมคติที่ส่วนประกอบไม่เปลี่ยนแปลง; $c_{v,i}(T)$	สามารถประมาณได้กับคุณสมบัติที่สมดุลทางอุณหพลศาสตร์
5. ส่วนผสมของก๊าซอุดมคติที่ส่วนประกอบไม่เปลี่ยนแปลง; $c_{v,i}(T)$	ส่วนผสมของก๊าซอุดมคติที่อยู่ในสภาวะสมดุลทางอุณหพลศาสตร์

หมายเหตุ: ตัวห้อย i หมายถึงสาร i ที่อยู่ในส่วนผสมของก๊าซ, u คือส่วนผสมที่ยังไม่เผาไหม้, และ b คือส่วนผสมที่เผาไหม้แล้ว

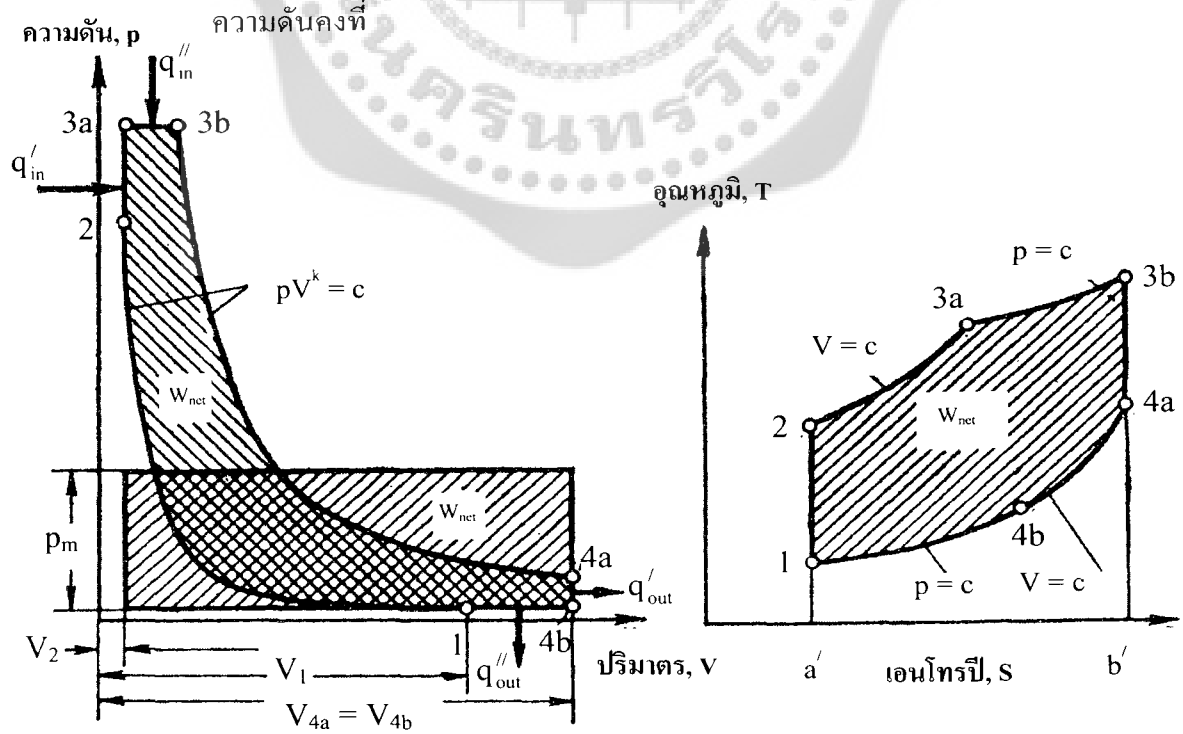
นอกจากการเลือกวัฏจักรอุดมคติและสภาวะการทำงานแล้ว ในการวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์ของวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์นั้นจะต้องเลือกแบบจำลองสำหรับการหาคุณสมบัติทางอุณหพลวัตของสารทำงานซึ่งมีอยู่ 5 แบบ (ดูตารางที่ 2-2.2) ทำให้การวิเคราะห์วัฏจักรอุดมคติแต่ละวัฏจักรในแต่ละสภาวะการทำงานสามารถทำได้ 5 ลักษณะ ซึ่งเมื่อรวมทุกวัฏจักรและทุกสภาวะการทำงานแล้วก็จะทำให้การวิเคราะห์สามารถทำได้รวม 45 ลักษณะด้วยกัน

แต่การวิเคราะห์ที่นิยมกันได้แก่ วัฏจักรอุดมคติในสภาวะการทำงานต่างๆ โดยใช้แบบจำลองก๊าซอุดมคติอย่างง่าย (แบบจำลองที่ 1 ในตารางที่ 2-2.2 ซึ่งพิจารณาโดยให้สารทำงานเป็นก๊าซอุดมคติตัวเดียวที่มีค่าความร้อนจำเพาะคงที่) ซึ่งเรียกว่าเป็น **วัฏจักรอากาศมาตรฐาน** (Air standard cycle) โดยสมมติให้สารทำงานเป็นอากาศเพียงอย่างเดียว (อยู่ในบทนี้), กับ **วัฏจักรก๊าซมาตรฐานอุดมคติ** (Ideal gas standard cycle) โดยสมมติให้สารทำงานมีปริมาณไอเสียตกค้างรวมอยู่ด้วย (อยู่ในบทที่ 6) ที่จะให้ผลลัพธ์ในเชิงวิเคราะห์และใช้เป็นตัวอย่างสำหรับการสาธิตวิธีคำนวณเบื้องต้น กับอีกวัฏจักรหนึ่งซึ่งเรียกว่า **วัฏ**

จักรเชื้อเพลิงกับอากาศ (Fuel-air cycle) ซึ่งเป็นการรวมเอาวัฏจักรอุดมคติต่างๆ เข้ากับแบบจำลองของการหาคุณสมบัติของสารทำงานที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น (แบบจำลองที่ 5 ในตารางที่ 2-2.2 ซึ่งแบ่งสารทำงานออกเป็น (1) สารผสมที่ยังไม่เผาไหม้ให้เป็นส่วนผสมของก๊าซอุดมคติที่ไม่เปลี่ยนแปลง และ (2) ส่วนผสมที่เผาไหม้แล้วให้เป็นส่วนผสมในสภาวะสมดุล) ซึ่งจะให้สมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น (อยู่ในบทที่ 7) ส่วนการวิเคราะห์ที่เป็นจริงที่สุดคือการวิเคราะห์**วัฏจักรจริง** (อยู่ในบทที่ 8)

2-3 การวิเคราะห์วัฏจักรอากาศมาตรฐาน

รูปที่ 2-3.1 แสดงวัฏจักรทางทฤษฎีในรูปแบบทั่วไป (Generalized cycle) เป็นแผนภาพความดันกับปริมาตรและแผนภาพอุณหภูมิกับเอนโทรปี (Entropy) สำหรับเครื่องยนต์แบบลูกสูบ ซึ่งจะสามารถประยุกต์กับวัฏจักรกำลังก๊าซ (Gas-power cycle) ได้ทั้งหมด ในวัฏจักรนี้กระบวนการอัดซึ่งแสดงด้วยวิถี 1-2 และกระบวนการขยายตัว (วิถี 3b-4a) เกิดขึ้นโดยไม่มีการถ่ายเทความร้อนกับสิ่งแวดล้อม ($dq = 0$) ปริมาณความร้อน q'_{in} เข้าสู่วัฏจักรโดยปริมาตรคงที่ และปริมาณความร้อน q''_{in} เข้าสู่วัฏจักรโดยความดันคงที่ สำหรับความร้อนที่ระบายออกจากวัฏจักรก็เช่นกันคือปริมาณความร้อน q'_{out} ระบายออกจากวัฏจักรโดยปริมาตรคงที่และปริมาณความร้อน q''_{out} ระบายออกจากวัฏจักรโดยความดันคงที่



รูปที่ 2-3.1 วัฏจักรทางทฤษฎีในรูปแบบทั่วไปสำหรับเครื่องยนต์แบบลูกสูบ

ปริมาณความร้อนที่วัฏจักรได้รับและทำให้เกิดงานจากสารทำงาน 1 kg คือ

$$q_{in} = c_v(T_{3a} - T_2) + c_p(T_{3b} - T_{3a}) \qquad (2\text{-}3.1)$$

เมื่อ c_v และ c_p คือค่าความร้อนจำเพาะ (Specific heat มีหน่วยเป็น J/kg K) ที่ปริมาตรคงที่และความดันคงที่, ตามลำดับ, โดยที่ T_{3a}, T_2 และ T_{3b} คืออุณหภูมิ (มีหน่วยเป็น K) ของวัฏจักรที่สถานะ 3a, 2 และ 3b, ตามลำดับ, ในแผนภาพอุณหภูมิกับเอนโทรปี q_{in} คือพื้นที่ a′-1-2-3a-3b-4a-b′-a′ นั่นเอง

ค่าของปริมาณความร้อนที่ระบายออกจากวัฏจักรคือ

$$q_{out} = c_v(T_{4a} - T_{4b}) + c_p(T_{4b} - T_1) \qquad (2\text{-}3.2)$$

เมื่อ T_{4a}, T_{4b} และ T_1 คืออุณหภูมิสมบูรณ์ของวัฏจักรที่สถานะ 4a, 4b และ 1, ตามลำดับ และในแผนภาพอุณหภูมิกับเอนโทรปี q_{out} คือพื้นที่ a′-1-4b-4a-b′-a′

ประสิทธิภาพความร้อนของวัฏจักรทางทฤษฎีสามารถหาได้จาก

$$\eta_t = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = \frac{c_v[(t_{4a} - T_{4b}) + k(T_{4b} - T_1)]}{c_v[(T_{3a} - T_2) + k(T_{3b} - T_{3a})]} \qquad (2\text{-}3.3)$$

เมื่อ $k = \frac{c_p}{c_v}$ คืออัตราส่วนของค่าความร้อนจำเพาะ (Specific heat ratio)

เมื่อพิจารณาจากแผนภาพอุณหภูมิกับเอนโทรปี ประสิทธิภาพความร้อนของวัฏจักรทางทฤษฎีสามารถหาได้จาก

$$\eta_t = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = \frac{\text{area } a' - 1 - 4b - 4a - b' - a'}{\text{area } a' - 2 - 3a - 3b - b' - a'} \qquad (2\text{-}3.4)$$

พิจารณารูปที่ 2-3.1 ให้

$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$ = อัตราส่วนการอัด (Compression ratio) ของเครื่องยนต์

V_1 = ปริมาตรเมื่อเริ่มกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิก, m^3

V_2 = ปริมาตรของห้องเผาไหม้, m^3

V_d = ปริมาตรแทนที่โดยลูกสูบ, m^3

$\lambda = \frac{p_{3b}}{p_2}$ = อัตราส่วนการเพิ่มความดัน (Pressure increase ratio)

$\rho = \frac{V_{3b}}{V_2}$ = อัตราส่วนการขยายตัวช่วงแรก (Preliminary expansion ratio) หรือเรียกว่าอัตราส่วนการตัด (Cut-off ratio) และยังเรียกว่าอัตราส่วนการขยายตัวแบบความดันคงที่ (Constant-pressure expansion ratio) อีกด้วย

$\delta = \frac{V_{4a}}{V_{3b}}$ = อัตราส่วนการขยายตัวช่วงหลัง (Subsequent expansion) หรืออาจจะเรียกว่าเป็นอัตราส่วนการขยายแบบไอเซนโทรปิก

$\rho' = \frac{V_{4a}}{V_1} = \frac{V_{4b}}{V_1}$ = อัตราส่วนการอัดช่วงแรก (Preliminary compression ratio)

เพื่อที่จะสร้างสมการสำหรับประสิทธิภาพความร้อน จึงแทนค่าอุณหภูมิต่างๆในสมการ (2-3.3) ให้อยู่ในพจน์ของอุณหภูมิ T_1 ที่สถานะเริ่มต้นของกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิก คือ

$$T_2 = T_1\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = T_1\varepsilon^{k-1} \qquad (2\text{-}3.5)$$

$$T_{3a} = T_2\frac{p_{3a}}{p_2} = T_2\lambda = T_1\lambda\varepsilon^{k-1} \qquad (2\text{-}3.6)$$

$$T_{3a} = T_{3b}\left(\frac{V_{3a}}{V_2}\right) = T_{3b}\rho = T_1\lambda\rho\varepsilon^{k-1} \qquad (2\text{-}3.7)$$

$$T_{4a} = T_{3a}\left(\frac{V_{3a}}{V_2}\right)^{k-1} = T_{3b}\frac{1}{\delta^{k-1}} = T_1\lambda\rho\left(\frac{\varepsilon}{\delta}\right)^{k-1} \qquad (2\text{-}3.8)$$

แต่ $$\frac{\varepsilon}{\delta} = \frac{V_1}{V_2}\frac{v_{3b}}{v_{4a}} = \frac{\rho}{\rho'} \qquad (2\text{-}3.9)$$

ดังนั้น $$T_{4a} = T_1\lambda\rho\left(\frac{\rho}{\rho'}\right)^{k-1} \qquad (2\text{-}3.10)$$

$$T_{4b} = T_1\frac{V_{4b}}{V_1} = T_1\rho' \qquad (2\text{-}3.11)$$

แทนค่าลงในสมการ (2-3.3) จะได้

$$\eta_t = 1 - \frac{\lambda\rho\left(\frac{\rho}{\rho'}\right)^{k-1} - \rho' + k(\rho' - 1)}{\varepsilon^{k-1}[\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)]} \qquad (2\text{-}3.12)$$

หรือ $$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}\frac{\rho'\left[\lambda\left(\frac{\rho}{\rho'}\right)^{k} - 1\right] + k(\rho' - 1)}{\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)} \qquad (2\text{-}3.13)$$

ความดันเฉลี่ยของวัฏจักรคือ

$$p_m = \frac{w_{net}}{v_{4b} - v_2} \qquad (2\text{-}3.14)$$

เนื่องจาก $$q_{in} = c_v T_1\varepsilon^{k-1}[\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)] \qquad (2\text{-}3.15)$$

และ $$v_{4b} - v_2 = v_2\left(\frac{v_{4b}}{v_2} - 1\right) = v_2(\varepsilon\rho' - 1) = \frac{v_1}{\varepsilon}(\varepsilon\rho' - 1) \qquad (2\text{-}3.16)$$

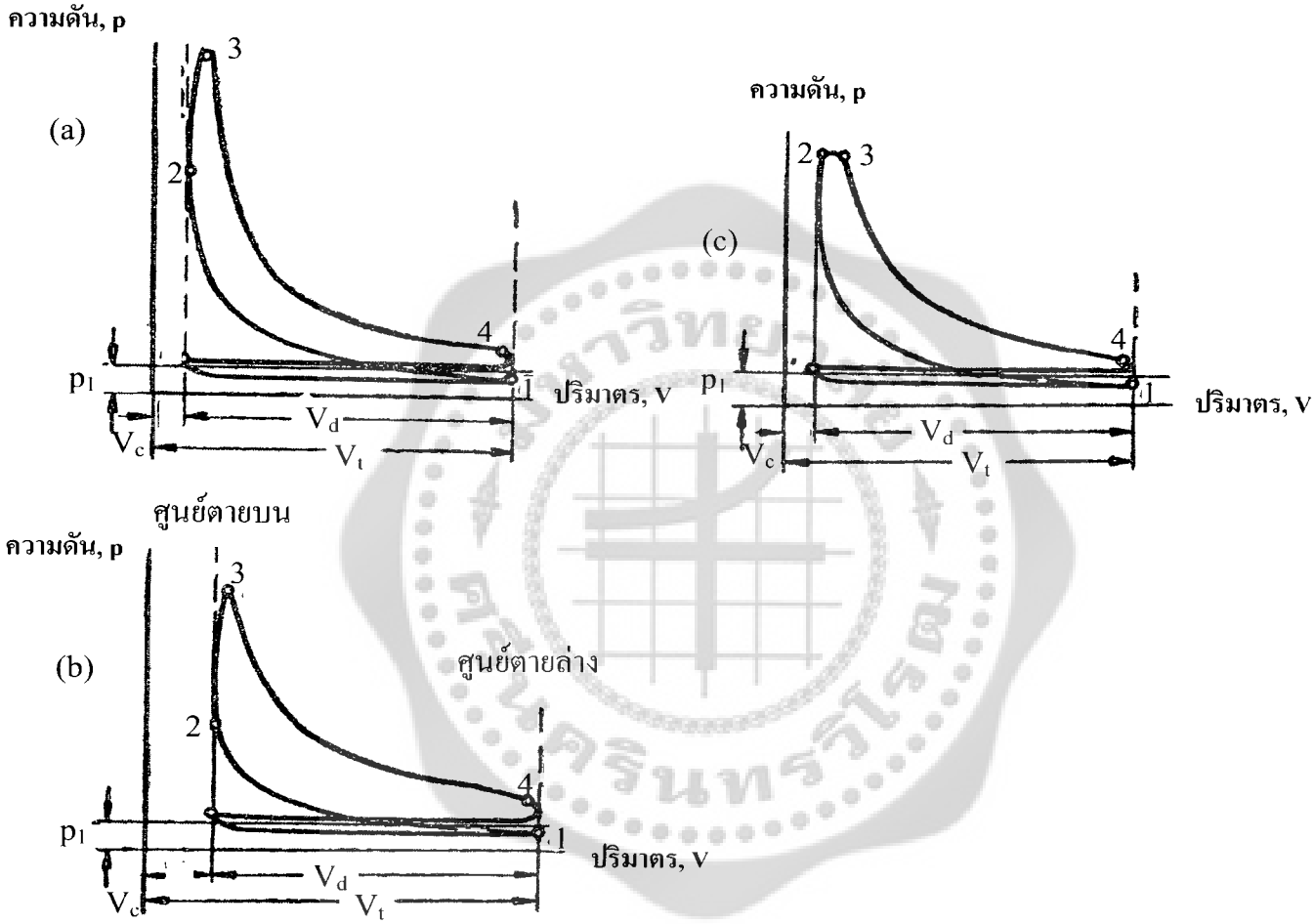
แทนค่า w_{net} ด้วยค่าที่ได้จากสมการ (2-1.1) และสมการ (2-3.15) กับ (2-3.16) ลงใน (2-3.14) จะได้

$$p_m = c_v \frac{T_1 \varepsilon^{k-1} \varepsilon}{v_1 (\rho' \varepsilon - 1)} \eta_t [\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)] \quad (2\text{-}3.17)$$

เนื่องจาก $c_v = \frac{R}{k-1}$ และ $p_1 = \frac{RT_1}{v_1}$

เมื่อ R คือค่าคงที่ของก๊าซ (Gas constant) จะได้

$$p_m = \frac{p_1}{(k-1)} \frac{\varepsilon^{k-1}}{(\rho' \varepsilon - 1)} \eta_t [\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)] \quad (2\text{-}3.18)$$



รูปที่ 2-3.2 แผนภาพซึ่งเป็นวัฏจักรจริงของเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบลูกสูบ (a) เครื่องยนต์ดีเซลแบบ Airless injection, (b) เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน, (c) เครื่องยนต์ดีเซลแบบ Air injection

รูปที่ 2-3.2 แสดงแผนภาพอินดิเคเตอร์ ซึ่งเป็นวัฏจักรจริงของเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบลูกสูบที่ไม่มีการอัดบรรจุ (Non-supercharging) ที่มีกระบวนการเผาไหม้ที่แตกต่างกันสามวิธี ดังนั้นในการวิเคราะห์เครื่องยนต์

สันดาปภายในแบบลูกสูบที่ไม่มีการอัดบรรจุ สามารถใช้วัฏจักรทางทฤษฎีที่มีวิธีการในการให้ความร้อนแก่สารทำงานที่แตกต่างกันได้สามวัฏจักร คือ

1. วัฏจักรที่มีกระบวนการให้ความร้อนเกิดขึ้นโดยปริมาตรคงที่ (*Constant volume combustion cycle*) การให้ความร้อนด้วยวิธีนี้กระบวนการให้ความร้อนจะใกล้เคียงกับกระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์ที่ทำให้ส่วนผสมไอดีเกิดการจุดระเบิดด้วยประกายไฟฟ้า (Spark-ignition) วัฏจักรนี้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่าเป็นวัฏจักรออตโต้ (Otto cycle) และใช้เป็นวัฏจักรทางทฤษฎีสำหรับการวิเคราะห์เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน (Gasoline engine), เครื่องยนต์ก๊าซ (Gas engine คือเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงก๊าซ) และเครื่องยนต์ที่ใช้หัวเผา (Hot-bulb) หรือพื้นผิวที่ร้อน (Hot surface)

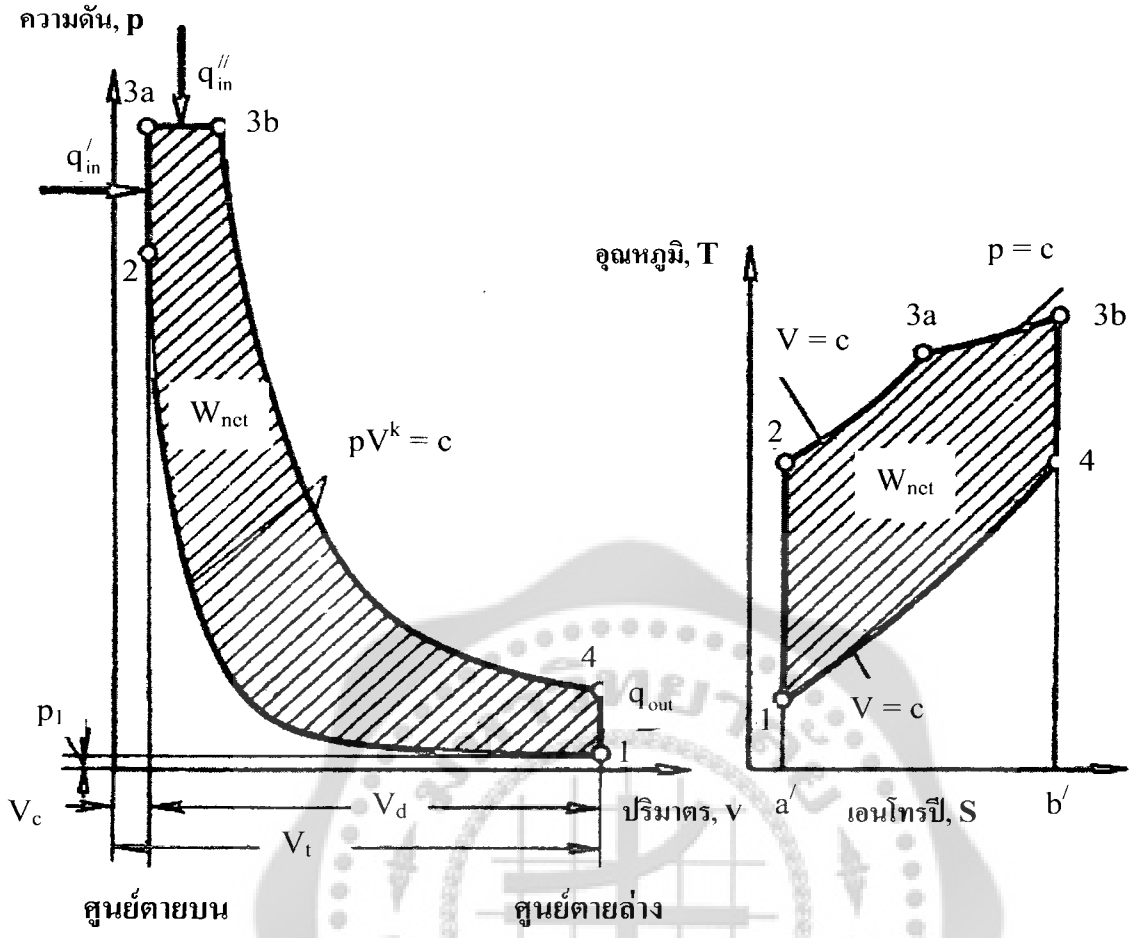
2. วัฏจักรที่มีกระบวนการให้ความร้อนเกิดขึ้นโดยความดันคงที่ (Constant pressure combustion cycle) ในกรณีนี้กระบวนการให้ความร้อนจะใกล้เคียงกับกระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์ซึ่งเชื้อเพลิงถูกทำให้เป็นฝอยละเอียดด้วยอากาศที่มีความดันสูง (Compressed air) (วิธีนี้เรียกว่า Air-injection ซึ่งวิธีนี้ไม่ได้ใช้ในเครื่องยนต์สำหรับรถยนต์ในปัจจุบันแล้ว) วัฏจักรนี้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่าเป็นวัฏจักรดีเซล (Diesel cycle) ใช้เป็นวัฏจักรทางทฤษฎีสำหรับการวิเคราะห์เครื่องยนต์ดีเซลแบบ Air-injection ซึ่งความดันของก๊าซระหว่างกระบวนการเผาไหม้มีค่าค่อนข้างจะคงที่

3. วัฏจักรที่มีกระบวนการให้ความร้อนเกิดขึ้นทั้งปริมาตรคงที่และความดันคงที่ หรือเรียกว่า**วัฏจักรผสม** (Dual cycle) กระบวนการให้ความร้อนด้วยวิธีนี้เปรียบได้กับกระบวนการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซลแบบ Airless-injection และการเผาไหม้ในเครื่องยนต์แบบอัดระเบิด วัฏจักรนี้ใช้สำหรับการวิเคราะห์เครื่องยนต์ดีเซลแบบ Airless-injection ทุกชนิด วัฏจักรนี้นิยมเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าเป็นวัฏจักรจำกัดความดัน (Limited-pressure combustion cycle)

การระบายความร้อนออกจากวัฏจักรตามกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ของทุกวัฏจักรเกิดขึ้นแบบปริมาตรคงที่

2-3.1 วัฏจักรผสม

วัฏจักรทางทฤษฎีของเครื่องยนต์สันดาปภายในที่มีความร้อนเข้าสู่วัฏจักรส่วนหนึ่งเป็นแบบปริมาตรคงที่และอีกส่วนหนึ่งเป็นแบบความดันคงที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2-3.3 วัฏจักรนี้ใช้แสดงการทำงานของเครื่องยนต์แบบอัดระเบิด (หรือเครื่องยนต์ดีเซลแบบ Airless-injection)



รูปที่ 2-3.3 วัฏจักรผสม

สารทำงานที่สถานะ 1 ถูกอัดแบบไอเซนโทรปิกไปตามวิถี 1-2 ซึ่งมีสมการเป็น $pV^k = \text{const}$ การเปลี่ยนแปลงของปริมาตรระหว่างกระบวนการอัดแสดงได้ด้วยอัตราส่วนการอัด $\varepsilon = V_1 / V_2$ จากนั้นสารทำงานจะได้รับความร้อน q_{in} ซึ่งเท่ากับผลรวมของ q'_{in} และ q''_{in} ถ้ามวลของสารทำงานเป็น 1 kg ปริมาณความร้อน q'_{in} ที่ให้ตามวิถี 2-3a โดยปริมาตรคงที่ (มีหน่วยเป็น kJ/kg) คือ

$$q'_{in} = c_v (T_{3a} - T_2) \qquad (2\text{-}3.19)$$

และปริมาณความร้อนที่ให้ตามวิถี 3a-3b โดยความดันคงที่คือ

$$q''_{in} = c_p (T_{3b} - T_{3a}) \qquad (2\text{-}3.20)$$

สารทำงานจะระบายความร้อนทิ้งสู่แหล่งอุณหภูมิต่ำตามวิถี 4-1 ในปริมาณ

$$q_{out} = c_v (T_4 - T_1) \qquad (2\text{-}3.21)$$

วัฏจักรนี้ต่างจากวัฏจักรในรูปแบบทั่วไปตรงที่ไม่มีวิถี 4b-1 ซึ่งเป็นการระบายความร้อนแบบความดันคงที่เท่านั้นเอง นั่นคือในกรณีนี้ $\rho' = 1$

ดังนั้นประสิทธิภาพความร้อนของวัฏจักรผสมสามารถหาได้จากสมการ (2-3.13) เป็น

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{\lambda\rho^k - 1}{\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)} \qquad (2\text{-}3.22)$$

จะเห็นได้ว่าปริมาณ ε, ρ, δ และ λ เป็นปัจจัยพื้นฐานที่คุณลักษณะที่สำคัญของเครื่องยนต์

จากสมการ (2-3.22) จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพความร้อนของวัฏจักรผสมจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการอัด εและอัตราส่วนความดัน λ เพิ่มขึ้นโดยอัตราส่วนการขยายตัว ρ ลดลง

ความดันเฉลี่ยของวัฏจักรผสมสามารถหาได้จากสมการ (2-3.17) เป็น

$$p_m = \frac{p_1}{(k-1)} \frac{\varepsilon^{k-1}}{(\varepsilon - 1)} \eta_t [\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)] \qquad (2\text{-}3.23)$$

ในการวิเคราะห์ทางทฤษฎี วัฏจักรนี้ถือได้ว่าเป็นวัฏจักรในรูปแบบทั่วไปของวัฏจักรซึ่งมีความร้อนเข้าสู่วัฏจักรที่กระบวนการปริมาตรคงที่และที่กระบวนการความดันคงที่ โดยสามารถพิจารณาเป็นกรณีเฉพาะของวัฏจักรผสมได้ดังต่อไปนี้

2-3.2 วัฏจักรความดันคงที่

วัฏจักรความดันคงที่ซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 2-3.4 ประกอบด้วยกระบวนการต่อไปนี้:

1-2 = กระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิกของก๊าซ, pV^k = const

2-3 = กระบวนการให้ความร้อน q_{in} แบบความดันคงที่, p = const

3-4 = กระบวนการขยายตัวแบบไอเซนโทรปิกของก๊าซ, pV^k = const

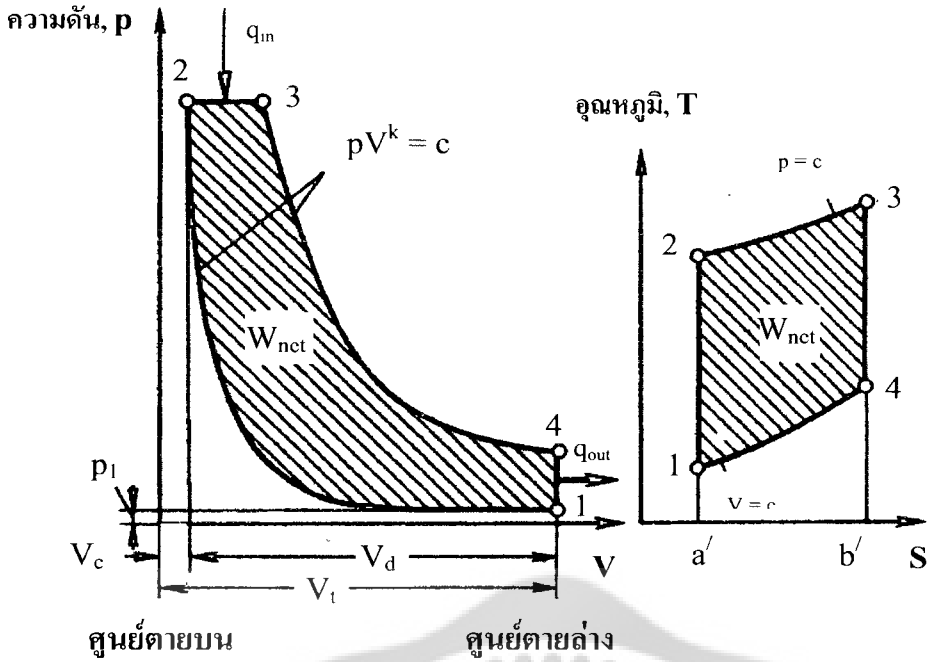
4-1 = กระบวนการระบายความร้อน q_{out} แบบปริมาตรคงที่, V = const

เนื่องจากในกระบวนการให้ความร้อนความดันมีค่าคงที่ ($p_{3b} = p_3 = p_2$ ดูรูปที่ 2-3.4) ดังนั้นอัตราส่วนการเพิ่มความดันคือ $\lambda = \frac{p_{3b}}{p_2} = 1$ ดังนั้นสมการ (2-3.22) จะกลายเป็นสมการประสิทธิภาพความร้อนของวัฏจักรความดันคงที่ คือ

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{\rho^k - 1}{k(\rho - 1)} \qquad (2\text{-}3\text{-}24)$$

และความดันเฉลี่ยของวัฏจักรความดันคงที่สามารถหาได้จากสมการ (2-3.23) เป็น

$$p_m = \frac{p_1}{(k-1)} \frac{\varepsilon^{k-1}}{(\varepsilon - 1)} \eta_t k(\rho - 1) \qquad (2\text{-}3.25)$$



รูปที่ 2-3.4 วัฏจักรความดันคงที่

2-3.3 วัฏจักรปริมาตรคงที่

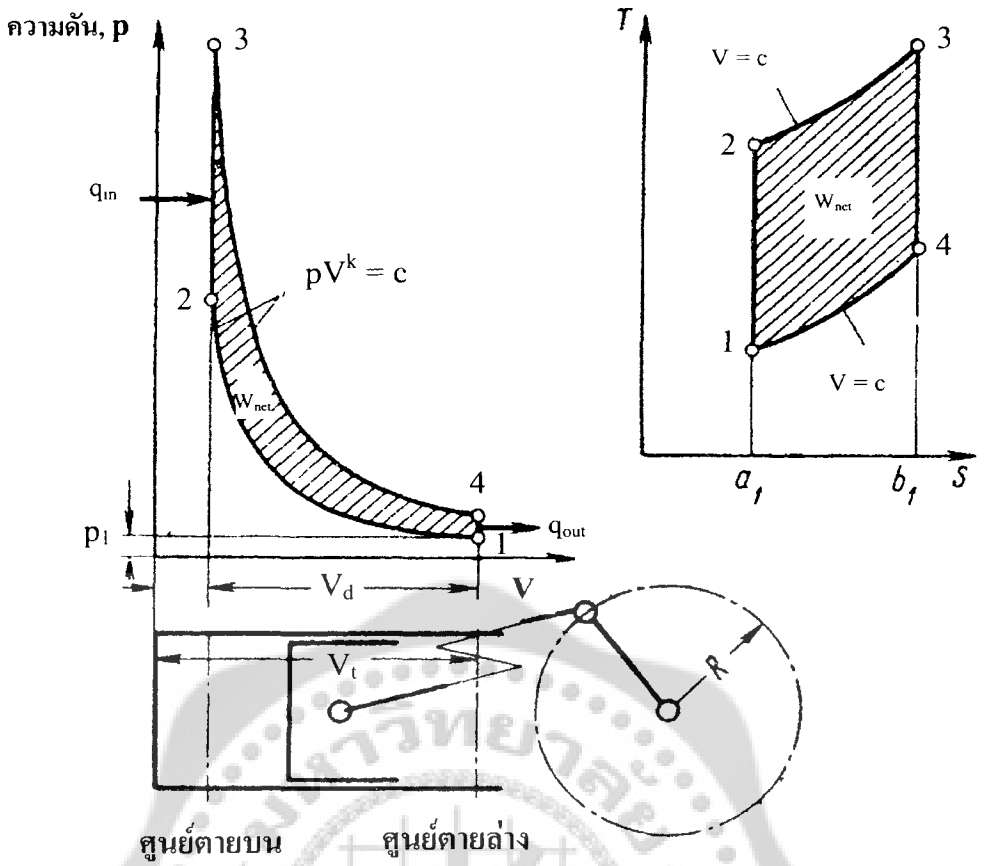
วัฏจักรทางทฤษฎีของเครื่องยนต์สันดาปภายในซึ่งมีความร้อนเข้าที่กระบวนการปริมาตรคงที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2-3.5 ประกอบด้วยกระบวนการต่อไปนี้

การอัดตัวของสารทำงานทำให้ความดันในกระบอกสูบเปลี่ยนแปลงตามวิถี 1-2 โดยไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับสิ่งแวดล้อม คือเกิดขึ้นอย่างไอเซนโทรปิก จากนั้นวิถี 2-3 จะได้รับความร้อนเข้าจากภายนอกในปริมาณ q_{in} ต่อสารทำงานหนึ่งกิโลกรัม (มีหน่วยเป็น kJ/kg) โดยปริมาตรคงที่ คือ ตามวิถีปริมาตรคงที่ ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิและความดันของสารทำงานสูงเพิ่มมากขึ้น หลังจากนั้นสารทำงานจะขยายตัวแบบไอเซนโทรปิกไปตามวิถี 3-4 และความร้อน q_{out} (มีหน่วยเป็น kJ/kg) จะถูกระบายทิ้งออกไปตามวิถี 4-1 สู่แหล่งอุณหภูมิต่ำภายนอกโดยปริมาตรคงที่ เพราะฉะนั้นสารทำงานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะไปสี่กระบวนการแล้วกลับคืนสู่สถานะเริ่มต้นครบวัฏจักร

ถ้าพิจารณาโดยกำหนดให้มวลของสารทำงานเป็น 1 kg ปริมาณความร้อน q_1 และ q_2 สำหรับกระบวนการปริมาตรคงที่ทั้งสองจะหาได้เหมือนกับสมการ (2-3.20) และ (2-3.21) คือ

$$q_{in} = c_v (T_3 - T_2) \qquad (2\text{-}3.26)$$

$$q_{out} = c_v (T_4 - T_1) \qquad (2\text{-}3.21)$$



รูปที่ 2-3.5 วัฏจักรปริมาตรคงที่

แทนสมการ (2-3.21) และ (2-3.26) ลงใน (2-1.1) จะได้

$$\eta_t = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \qquad (2\text{-}3.27)$$

จากสมการ (2-3.22) ถ้าให้ปริมาตร $V_{3b} = V_2$, อัตราส่วน $\rho = 1$, และอัตราส่วน $\delta = \frac{V_{4b}}{V_{3b}} = \frac{V_1}{V_2} = \varepsilon$ สมการ (2-3.22) จะกลายเป็นสมการประสิทธิภาพความร้อนของวัฏจักรปริมาตรคงที่ คือ

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \qquad (2\text{-}3.28)$$

และความดันเฉลี่ยของวัฏจักรปริมาตรคงที่สามารถหาได้จากสมการ (2-3.23) เป็น

$$p_m = \frac{p_1}{(k-1)} \frac{\varepsilon^{k-1}}{(\varepsilon - 1)} \eta_t (\lambda - 1) \qquad (2\text{-}3.29)$$

2-4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพความร้อนและงานสุทธิของวัฏจักร

จากสมการ (2-3.8) จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพความร้อนของวัฏจักรทางทฤษฎี นั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการอัด ε และอัตราส่วนของค่าความร้อนจำเพาะ k

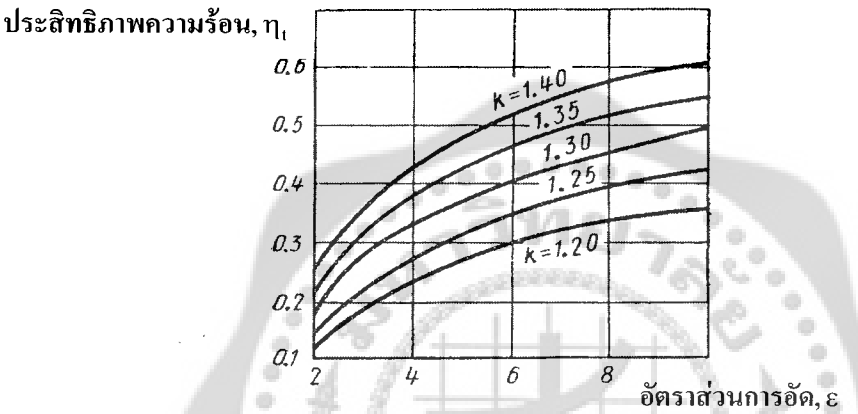
รูปที่ 2-4.1 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพความร้อนจะสูงขึ้นเมื่อ ε และ k สูงขึ้น ผลนี้จะมากในช่วงที่ ε สูง แต่มีผลน้อยกว่าในช่วงที่ ε ต่ำ

อัตราส่วนการอัดที่สูงขึ้นนั้นนอกจากจะทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นแล้ว ยังเพิ่มงานสุทธิของวัฏจักรอีกด้วย ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 2-4.2

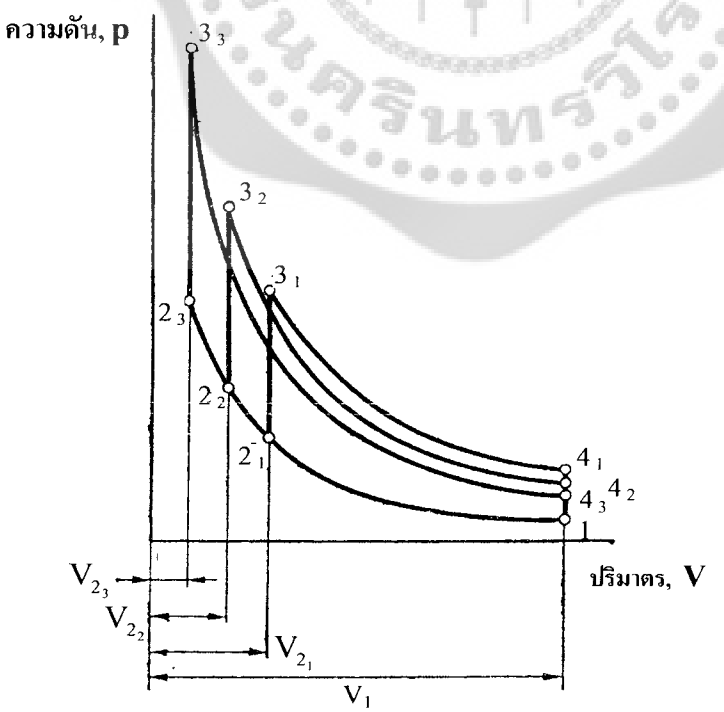
จากสมการ (2-3.2) จะได้

$$W_{net} = \eta_t q_{in} \qquad (2\text{-}4.1)$$

สมการ (2-4.1) แสดงให้เห็นว่างานสุทธิของวัฏจักรขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อน q_{in} ที่ได้รับอีกด้วย



รูปที่ 2-4.1 ประสิทธิภาพความร้อนของวัฏจักรปริมาตรคงที่เทียบกับอัตราส่วนการอัดที่อัตราส่วนความร้อนจำเพาะต่างๆ



รูปที่ 2-4.2 วัฏจักรปริมาตรคงที่เมื่ออัตราส่วนการอัดเปลี่ยนแปลง

เมื่อศึกษารูปที่ 2-4.2 ต่อไปจะเห็นได้ว่า ค่า ε ที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความดันของสารทำงานที่สถานะ 3_2 และ 3_3 ต่ำลงเนื่องจากอุณหภูมิของสารทำงานลดลง การลดลงของความดันนี้ทำให้ปริมาณความร้อน q_{out} ที่จะระบายทิ้งลดลงไปด้วย นั่นคือลดการสูญเสียความร้อนที่ระบายทิ้งไปกับไอเสีย

เพราะฉะนั้นการเพิ่มอัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์จึงมีข้อดี แต่เป็นไปได้ยากที่เครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยประกายไฟฟ้าจะมีอัตราส่วนการอัดสูงกว่าช่วง ε = 11-12 เพราะว่าความดันและอุณหภูมิที่สูงขึ้นในการอัดและการขยายตัวจะทำให้ภาระที่กระทำกับชิ้นส่วนเครื่องยนต์เพิ่มมากขึ้นและมีผลให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานมากขึ้นอีกด้วย นอกจากนี้อัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์ยังถูกจำกัดด้วยปรากฏการณ์ของการเผาไหม้แบบการจุดระเบิดด้วยตัวเอง (Self-ignition) และการเผาไหม้แบบระเบิด (Detonation) ของส่วนผสมไอดี ด้วยเหตุนี้อัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์ต่างๆจึงเป็นดังต่อไปนี้

เครื่องยนต์ที่มีการจุดระเบิดไอดีด้วยประกายไฟฟ้า

ที่ใช้น้ำมันก๊าด (Kerosene) ε = 4-5

ที่ใช้น้ำมันก๊าซโซลีน (Gasoline หรือ Petrol) ε = 6-12

ที่ใช้ก๊าซเป็นเชื้อเพลิง (Gas engine) ε = 8-11

อัตราส่วนการอัดสำหรับเครื่องยนต์ชนิดต่างๆนอกเหนือจากนี้จะดูได้จากตารางที่ 2-4.1

การวิเคราะห์วัฏจักรที่ผ่านมาแล้วนี้ถ้าวิเคราะห์โดยให้สารทำงานในระบบเป็นอากาศเพียงอย่างเดียวจะรู้จักกันทั่วไปว่าเป็นการวิเคราะห์วัฏจักรอากาศมาตรฐาน (Air-standard cycle) ถ้าวิเคราะห์โดยให้สารทำงานในระบบเป็นส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจะเรียกว่าเป็นการวิเคราะห์วัฏจักรก๊าซอุดมคติมาตรฐาน (Ideal gas standard cycle)

สำหรับการวิเคราะห์วัฏจักรที่เหมือนจริงมากกว่าจะใช้สารทำงานเป็นส่วนผสมของอากาศกับเชื้อเพลิงและตัวเลขยกกำลังของกระบวนการอัดและขยายตัวไม่เท่ากับ k ซึ่งการวิเคราะห์วัฏจักรเช่นนี้รู้จักกันทั่วไปว่าเป็นการวิเคราะห์วัฏจักรเชื้อเพลิงกับอากาศ (Fuel-air cycle)

ตารางที่ 2-4.1 ความดัน, อัตราส่วนการอัด, และ สัมประสิทธิ์อากาศของเครื่องยนต์

วัฏจักรของเครื่องยนต์	การจุดระเบิด	เชื้อเพลิง	ความดันหลังการอัด (bar g)	อัตราส่วนการอัด	ความดันเฉลี่ยประสิทธิผล (bar)	อากาศที่ใช้โดยเฉลี่ย, (1 + e)
ปริมาตรคงที่-รถยนต์	ประกายไฟ	ก๊าซโซลีน	6.20-8.61	5.2-7.5	5.17-6.89	1.0
ปริมาตรคงที่-เครื่องบิน	ประกายไฟ	ก๊าซโซลีน, เครื่องบิน	6.89-8.61	5.7-7.9	6.55-9.30	1.0
ปริมาตรคงที่	ประกายไฟ	แอลกอฮอล์	8.96-15.51	6.0-9.0	4.14—5.86	1.0
ปริมาตรคงที่	ประกายไฟ	ก๊าซธรรมชาติ	6.89-8.96	5.0-6.0	5.10-6.20	1.3
ปริมาตรคงที่	ประกายไฟ	Coke-oven gas	6.89-9.30	5.0-6.2	4.82-6.20	1.3
ปริมาตรคงที่	ประกายไฟ	Producer gas	7.58-11.03	5.4-7.0	4.13-5.51	1.25
ปริมาตรคงที่	ประกายไฟ	Blast-furnace gas	8.27-13.09	5.7-7.9	4.13-5.65	1.2
ปริมาตรคงที่	หัวเผา	น้ำมันก๊าด, น้ำมันใส	3.45-5.17	3.2-4.2	3.45-4.82	2.0
ความดันคงที่-Air injection	อัดระเบิด	น้ำมันใส-น้ำมันเตา	31.01-36.18	14-16	5.17-5.86	1.8
ผสม -Airless injection รอบช้า	อัดระเบิด	น้ำมันใส-น้ำมันเตา	25.50-31.01	12-14.5	5.17-6.20	1.75
ผสม- Solid injection รอบสูง	อัดระเบิด	น้ำมันใส	31.01-44.79	14-18	5.51-7.58	1.3-1.7

หมายเหตุ e คือปริมาณอากาศส่วนเกินจากทฤษฎีเป็นร้อยละ (Percentage of excess air)

2-5 ตัวอย่างการวิเคราะห์วัฏจักรอากาศมาตรฐาน

ตัวอย่างที่ 2-5.1 วัฏจักรอากาศมาตรฐานออตโตมีอัตราส่วนการอัด 8 ที่จุดเริ่มต้นการอัดมีอุณหภูมิ 30°C ความดัน 1 bar วัฏจักรได้รับความร้อน 1800 kJ/kg จงหา (1) อุณหภูมิสูงสุด, (2) ความดันสูงสุด, (3) อุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการขยายตัว, (4) ประสิทธิภาพทางความร้อน, และ (5) ความดันเฉลี่ยของวัฏจักร

วิธีทำ ข้อมูลที่ทราบจากโจทย์คือ $\varepsilon = 8 = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3}$

$T_1 = 273+30 = 303$ K, $p_1 = 1$ bar, $q_{in} = 1800$ kJ/kg

(1) จาก $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1}$

จะได้ $T_2 = (303\text{ K})(8^{1.4-1}) = 696$ K

จาก $q_{in} = c_V (T_3 - T_2)$

หรือ $(1800 \text{ kJ/kg}) = (0.718 \text{ kJ/kg K}) (T_3 - 696 \text{ K})$

จะได้ $T_3 = 3203 \text{ K}$

ดังนั้น อุณหภูมิสูงสุดคือ $T_3 = 3203 \text{ K}$ **ตอบ**

(2) จาก $$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k$$

จะได้ $p_2 = (1 \text{ bar}) (8)^{1.4} = 18.38 \text{ bar}$

จาก $$\frac{P_2}{T_2} = \frac{P_3}{T_3}$$

จะได้ $$p_3 = \frac{(3203 \text{ K})}{(696 \text{ K})} \times (18.38 \text{ bar}) = 84.58 \text{ bar}$$

ดังนั้น ความดันสูงสุดคือ $p_3 = 84.58 \text{ bar}$ **ตอบ**

(3) จาก $$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{k-1}$$

จะได้ $$T_4 = \frac{(3203 \text{ K})}{(8)^{0.4}} = 1394 \text{ K}$$

ดังนั้น อุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการขยายตัวคือ $T_4 = 1394 \text{ K}$ **ตอบ**

(4) จาก $$\eta_t = 1 - \frac{1}{(\varepsilon)^{k-1}} = 1 - \frac{1}{8^{0.4}} = 56.47\%$$

ดังนั้นประสิทธิภาพทางความร้อนคือ $\eta_t = 56.47\%$ **ตอบ**

(5) จาก $$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{(287 \text{ J/kgK})(303 \text{ K})}{(100\ 000 \text{ N/m}^2)} = 0.8696 \text{ m}^3/\text{kg}$$

และ $$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = 0.1087 \text{ m}^3/\text{kg}$$

เนื่องจาก $q_{out} = \Delta u + w_{1\text{-}2}$

ดังนั้น $0 = c_V(T_2 - T_1) + w_{1\text{-}2}$

หรือ $w_{1\text{-}2} = - c_V(T_2 - T_1)$

และ $w_{3\text{-}4} = c_V(T_3 - T_4)$

จะได้ $w_{net} = w_{3\text{-}4} - w_{1\text{-}2} = c_V [(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)]$

$= (0.718 \text{ kJ/kg K}) [(3203 - 1394) - (696 - 303) \text{ K}]$

$= 1016.7 \text{ kJ/kg}$

และ $$p_m = \frac{w_{net}}{v_d} = \frac{(1016.7 \text{ kJ/kg})}{(0.8696 - 0.1087)\text{m}^3/\text{kg}} = 1336.2 \text{ kPa}$$

ดังนั้น ความดันเฉลี่ยคือ $p_m = 1336.2 \text{ kPa}$ **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 2-5.2 เครื่องยนต์ดีเซลทางทฤษฎีเครื่องหนึ่งมีอัตราส่วนการอัด 18:1 ช่วงให้ความร้อนลูกสูบขยายตัวไป 10 % ของช่วงชัก อุณหภูมิและความดันที่จุดเริ่มอัดเป็น 30°C และ 100 kPa ตามลำดับ ถ้าเครื่องยนต์นี้ใช้อากาศ 120 m^3/h จงหา (1) อุณหภูมิสูงสุด, (2) ความดันสูงสุด, (3) ประสิทธิภาพทางความร้อน, และ (4) กำลังของเครื่องยนต์

วิธีทำ ข้อมูลที่ได้จากโจทย์คือ $p_1 = 100$ kPa, $T_1 = 303$ K, $V_1/V_2 = 18:1$

นั่นคือเมื่อ $V_1 = 18$ หน่วยปริมาตร, $V_2 = 1$ หน่วยปริมาตร, จะได้

$$V_3 = V_2 + 0.10\,(V_1 - V_2) = 2.7 \text{ หน่วยปริมาตร}$$

(1) $$T_2 = T_1\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = (303\text{ K})\,(18)^{1.4\ -\ 1} = 962.8\text{ K}$$

$$T_3 = T_2\left(\frac{V_3}{V_2}\right) = (962.8\text{ K})(2.7/1) = 2600\text{ K}$$ **ตอบ**

(2) $$p_2 = p_1\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k} = (100\text{ kPa})\,(18)^{1.4} = 5719.8\text{ kPa}$$

$$p_4 = p_3\left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{k} = (5719.8\text{ kPa})\left(\frac{2.7}{18}\right)^{1.4} = 401.7\text{ kPa}$$ **ตอบ**

(3) $$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}\left[\frac{\rho^k - 1}{k(\rho - 1)}\right] = 1 - \frac{1}{18^{1.4-1}}\left[\frac{2.7^{1.4} - 1}{1.4(2.7 - 1)}\right]$$

$$= 60.11\ \%$$ **ตอบ**

(4) เนื่องจาก $\dot{V}_d = \dot{V}_1 - \dot{V}_2 = 120\ m^3/h = 0.033\,333\ m^3/s$

ดังนั้น $18\,\dot{V}_2 - \dot{V}_2 = 0.033\,333\ m^3/s$

$$\dot{V}_2 = 0.00196\ m^3/s$$

$$\dot{V}_1 = 18 \times 0.00196 = 0.03528\ m^3/s$$

$$\dot{V}_3 = 2.7 \times 0.00196 = 0.00529\ m^3/s$$

$$W = p_2\,(\dot{V}_3 - \dot{V}_2) + \frac{p_3\dot{V}_3 - p_4\dot{V}_4}{k-1} - \frac{p_2\dot{V}_2 - p_1\dot{V}_1}{k-1}$$

$$= (5719.8\text{ kN/m}^2)\,(0.00529 - 0.00196\ m^3/s) +$$

$$\frac{(5719.8\ \text{kN/m}^2)(0.00529\ \text{m}^3/\text{s}) - (401.7\ \text{kN/m}^2)(0.03528\ \text{m}^3/\text{s})}{1.4-1} -$$

$$\frac{(5719.8\ \text{kN/m}^2)(0.00196\ \text{m}^3/\text{s}) - (100\ \text{kN/m}^2)(0.03528\ \text{m}^3/\text{s})}{1.4-1}$$

$$= 40.054\text{ kW}$$ **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 2-5.3 เครื่องยนต์ดีเซลเครื่องหนึ่งทำงานตามวัฏจักรผสม เริ่มอัดอากาศที่ความดัน 1.01 bar อุณหภูมิ 20°C ความดันสูงสุดของวัฏจักรเท่ากับ 69 bar อัตราส่วนการอัด 18:1 ความร้อนที่ได้รับที่ปริมาตรคงที่และความดันคงที่มีค่าเท่ากัน จงหา (1) ประสิทธิภาพความร้อน, และ (2) ความดันเฉลี่ยประสิทธิผลของวัฏจักร

วิธีทำ ข้อมูลจากโจทย์คือ $p_1 = 1.01$ bar, $T_1 = 20 + 273 = 293$ K

$$p_3 = p_4 = 69 \text{ bar และ } q'_{in} = q''_{in}$$

(1) ประสิทธิภาพความร้อนจะหาได้จาก

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{\lambda\rho^k - 1}{\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)}$$

เนื่องจาก $\lambda = \frac{p_3}{p_2}$ และกระบวนการ 1–2 เป็นกระบวนการไอเซนโทรปิก ซึ่ง

$$p_2 V_2^k = p_1 V_1^k$$

ดังนั้น $$p_2 = p_1 \frac{V_1^k}{V_2^k} = (1.01 \text{ bar})(18)^{1.4} = 57.77 \text{ bar}$$

และ $$\lambda = \frac{69 \text{ bar}}{57.77 \text{ bar}} = 1.194$$

เนื่องจากจาก $\rho = \frac{V_{4b}}{V_{3a}}$ และกระบวนการ 3a –3b เป็นขบวนการความดันคงที่ ซึ่ง

$$\frac{V_{3b}}{V_{3a}} = \frac{T_{3b}}{T_{3a}}$$

จึงหา T_{3a} ได้จาก

$$T_{3a} = \lambda T_1 (\varepsilon)^{k-1} = (1.194)(293 \text{ K})(18^{1.4-1}) = 1112 \text{ K}$$

หา T_{3b} ได้จาก $q'_{in} = q''_{in}$

หรือ $$c_V(T_{3a} - T_2) = c_p(T_{3b} - T_{3a})$$

จะได้ $$T_{3b} = \frac{c_v}{c_p}(T_{3a} - T_2) + T_{3a}$$

หา T_2 ได้จาก $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1}$

นั่นคือ $$T_2 = T_1\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = (293 \text{ K})(18)^{1.4-1} = 931 \text{ K}$$

ดังนั้น $$T_{3b} = \frac{(0.718 \text{ kJ/kgK})}{(1.005 \text{ kJ/kgK})}(1112 - 931 \text{ K}) + 1112 \text{ K} = 1241 \text{ K}$$

และ $$\rho = \frac{1241 \text{ K}}{1112 \text{ K}} = 1.116$$

เพราะฉะนั้น $\eta_t = 1 - \left[\frac{1}{18^{1.4\ 1}}\right]\left[\frac{(1.194)(1.116^{1.4}) - 1}{(1.194) - 1 + (1.4)(1.194)(1.116 - 1)}\right]$

$= 68.18\ \%$ **ตอบ**

(2) ความดันเฉลี่ยจะหาได้จาก $p_m = \frac{w_{net}}{v_d}$

หา w_{net} จาก $w_{net} = q_{in} + q_{out}$

เนื่องจาก $q_{in} = q'_{in} + q''_{in} = 2q'_{in} = 2[c_v(T_3 - T_2)]$

$= 2[(0.718\ kJ/kg\ K)(1112 - 931)\ K] = 259.92\ kJ/kg$

และ $q_{out} = c_v(T_1 - T_4)$

หา T_4 ได้จาก $T_4 = \lambda\rho^k T_1 = (1.194)(1.116^{1.4})(293\ K) = 408\ K$

ดังนั้น $q_{out} = (0.718\ kJ/kg\ K)(293\ K - 408\ K) = -82.57\ kJ/kg$

และ $w_{net} = (259.92 - 82.57)\ kJ/kg = 177.35\ kJ/kg$

หา v_d จาก $v_d = v_1 - v_2$

หา v_1 จาก $p_1v_1 = R\ T_1$ จะได้

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{(0.287\ kJ/kgK)(293\ K)}{(1.01 \times 10^2\ kN/m^2)} = 0.8326\ m^3/kg$$

หา v_2 จาก $p_2v_2 = R\ T_2$ จะได้

$$v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{(0.287\ kJ/kgK)(931\ K)}{(57.77 \times 10^2\ kN/m^2)} = 0.04625\ m^3/kg$$

เพราะฉะนั้น $$p_m = \frac{(177.35\ kJ/kg)}{(0.8326 - 0.04625\ m^3/kg)(10^2\ kPa/bar)}$$

$= 2.255\ bar$ **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 2-5.4 เครื่องยนต์สี่สูบสี่จังหวะเครื่องหนึ่ง มีอัตราส่วนการอัด 11:1 มีปริมาตรกวาด 280 cc ต่อกระบอกสูบ ที่จุดเริ่มต้นของการอัด สารทำงานมีความดัน 100 kPa และอุณหภูมิ 30°C สมมติให้สารทำงานในวัฏจักรเป็นอากาศเพียงอย่างเดียว (1) จงหาความดันเฉลี่ยและพลังงานที่ใส่เข้าไปสู่เครื่องยนต์เมื่อทำงานตามวัฏจักรออตโตโดยให้กำลัง 50 kW ที่ความเร็ว 3000 rpm, (2) ถ้าเครื่องยนต์เครื่องนี้ทำงานตามวัฏจักรดีเซลโดยได้รับพลังงานเท่ากัน จงหาว่าเครื่องยนต์นี้ให้กำลังออกมาเท่าใด, และ (3) จงเปรียบเทียบประสิทธิภาพ และอุณหภูมิสูงสุดของวัฏจักรทั้งสอง

วิธีทำ เนื่องจาก $V_1 - V_2 = 280\ cc = 0.28 \times 10^{-3}\ m^3$, และ $\frac{V_1}{V_2} = \varepsilon = 11$,

ดังนั้น $V_1 = 0.308 \times 10^{-3}\ m^3$

และ $V_2 = 0.028 \times 10^{-3}\ m^3$

มวลของสารทำงานคือ

$$m = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = \frac{(100\ kN/m^2)(0.308 \times 10^{-3}\ m^3)}{(0.287\ kJ/kg\ K)(303\ K)} = 0.3542 \times 10^{-3}\ kg$$

(1) เมื่อทำงานตามวัฏจักรออตโต

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{(\varepsilon)^{k-1}} = 1 - \frac{1}{(11)^{1.4-1}} = 61.68\ \%$$

$$W_{net}/Cylinder/Cycle = \frac{50\ kJ/s}{(4\ cyl)\frac{(3000\ rev/min)}{2(60\ s/min)}} = 0.5\ kJ/cyl/cycle$$

$$p_m = \frac{W_{net}}{V_D} = \frac{(0.50\ kJ)}{(0.280 \times 10^{-3}\ m^3)} = 1785.7\ kPa$$ **ตอบ**

$$\dot{q}_{in} = \frac{(50\ kW)}{0.6168} = 81.064\ kJ/s$$ **ตอบ**

$$\dot{q}_{in}/Cylinder/Cycle = \frac{(81.064\ kJ/s)}{(4\ cyl)(\frac{3000}{2 \times 60}\ cycle/s)} = 0.8106\ kJ$$

นั่นคือ $Q_{2\text{-}3} = 0.8106\ kJ$

และ $T_2 = T_1\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = 303\ (11)^{1.4-1} = 791\ K$

เนื่องจาก $Q_{2\text{-}3} = m\ c_v\ (T_3 - T_2)$

หรือ $0.8106\ kJ = (0.3542 \times 10^{-3}\ kg)\ (0.718\ kJ/kg\ K)\ (T_3 - 791)$

ดังนั้น $T_3 = 3978\ K$

(2) เมื่อทำงานตามวัฏจักรดีเซล

$$Q_{2\text{-}3} = m\ c_P(T_3 - T_2)$$

$$0.8106\ kJ = (0.3542 \times 10^{-3}\ kg)\ (1.005\ kJ/kg\ K)\ (T_3' - 791)$$

ดังนั้น $T_3 = 3068\ K$

เนื่องจาก $\rho = \frac{V_3}{V_2} = \frac{T_3}{T_2} = \frac{3068}{791} = 3.879$

ดังนั้น $$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}\left[\frac{\rho^k - 1}{k(\rho - 1)}\right]$$

$$= 1 - \frac{1}{(11)^{1.4-1}}\left[\frac{3.879^{1.4} - 1}{1.4(3.879 - 1)}\right] = 46.08\ \%$$

และ $W_{net} = 0.4608\ (81.064\ kJ/s) = 37.35\ kW$ **ตอบ**

(3) ประสิทธิภาพ เมื่อทำงานตามวัฏจักรออตโต = 61.68 %

เมื่อทำงานตามวัฏจักรดีเซล = 46.08 %

อุณหภูมิสูงสุดของวัฏจักร เมื่อทำงานตามวัฏจักรออตโต = 3978 K

เมื่อทำงานตามวัฏจักรดีเซล = 3068 K **ตอบ**

แบบฝึกหัด

1. จงอธิบายสมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์วัฏจักรมาตรฐานอากาศ

2. จงอธิบายชนิดของวัฏจักรทางอุณหพลศาสตร์ที่นำมาใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายใน

3. จงพิสูจน์ว่าประสิทธิภาพของวัฏจักรออตโต้นั้นไม่ขึ้นอยู่สารทำงาน แต่จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการอัดเท่านั้น

4. Cut-off ratio ของวัฏจักรดีเซลคืออะไร จงแสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของ Cut-off ratio

5. จงเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัฏจักรออตโต, ดีเซล, และผสม ที่มีความดันสูงสุดและอุณหภูมิสูงสุดเท่ากัน

6. เครื่องยนต์ความร้อนที่ใช้อากาศเป็นสารทำงานเครื่องหนึ่ง มีกระบวนการทำงานดังนี้

1 –2 อัดอากาศ 1 kg ความดัน 100 kPa อุณหภูมิ 97°C แบบไอเซนโทรปิก

2 –3 รับความร้อนแบบปริมาตรคงที่จนกระทั่งอากาศมีความดัน 3400 kPa

3 –4 ขยายตัวแบบไอเซนโทรปิกจนมีปริมาตรเท่ากับเมื่อเริ่มต้น

4 –1 ระบายความร้อนแบบปริมาตรคงที่ จนกระทั่งมีสถานะเดิม

จงหา ความดัน, ปริมาตร, และอุณหภูมิของจุดต่างๆ

7. เครื่องยนต์ก๊าซโซลีนเครื่องหนึ่งมีอัตราส่วนการอัด 9:1 ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อน 43.953 MJ/kg อัตราส่วนผสมอากาศ/น้ำมัน 15:1 อุณหภูมิและความดันของไอดีตรงจุดสิ้นสุดจังหวะดูดเป็น 60°C และ 0.9806 bar จงหาความดันสูงสุดในกระบอกสูบ เมื่อ k = 1.32 และความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่ โดยใช้ความสัมพันธ์ $c_v = 0.7116 + 20.93 \times 10^{-5} T$ (มีหน่วยเป็น kJ/kg K เมื่อ T มีหน่วยเป็น K)

8. เครื่องยนต์ที่ใช้อากาศเป็นสารตัวกลางเครื่องหนึ่งทำงานตามวัฏจักรออตโต เริ่มอัดอากาศที่ความดัน 1.013 bar, 17°C จนกระทั่งความดันเป็น 12.5 bar หลังการให้ความร้อนแบบกระบวนการปริมาตรคงที่ อากาศมีความดัน 34 bar จงหา (1) ความร้อนที่ให้แก่วัฏจักร, (2) ความร้อนที่ระบายออกจากวัฏจักร, (3) ประสิทธิภาพความร้อน, และ (4) ความดันเฉลี่ยประสิทธิผล

9. เครื่องยนต์ที่ทำงานตามวัฏจักรออตโตเครื่องหนึ่งมีรายละเอียดดังนี้ ก่อนการอัดมีความดัน 1.013 bar หลังการอัดมีความดัน 8 bar ใช้อากาศเป็นสารตัวกลาง จงหาประสิทธิภาพความร้อน

10. เครื่องยนต์ที่ใช้วัฏจักรอากาศมาตรฐานออตโตเครื่องหนึ่ง ทำงานระหว่างอุณหภูมิ 1400°C และ17°C ถ้าปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ระบบเท่ากับ 760 kJ/kg จงหา (1) อัตราส่วนการอัด, (2) ประสิทธิภาพความร้อน, และ (3) อัตราส่วนความดัน

11. เครื่องยนต์เครื่องหนึ่งทำงานตามวัฏจักรออตโต โดยเริ่มอัดอากาศที่ความดัน 103 kPa อุณหภูมิ 37°C มีอัตราส่วนปริมาตรเท่ากับ 6:1 ความร้อนที่ระบบได้รับเท่ากับ 900 kJ/kg จงหา (1) อุณหภูมิสูงสุดของวัฏจักร, (2) ประสิทธิภาพความร้อน, และ (3) งานสุทธิของวัฏจักร

12. เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน 4 สูบเครื่องหนึ่งมีปริมาตรกวาดเท่ากับ 1800 cm^3 ปริมาตรห้องเผาไหม้เท่ากับ 200 cm^3 จงหาประสิทธิภาพความร้อน และถ้าก่อนการอัดสารตัวกลางมีความดัน 1 bar อุณหภูมิ 27°C อุณหภูมิสูงสุดของวัฏจักรเท่ากับ 1400°C จงหาความดันเฉลี่ย

13. เครื่องยนต์ก๊าซเครื่องหนึ่งทำงานตามวัฏจักรออตโต มีกระบอกสูบโต 10 cm และระยะชัก 15 cm ถ้าปริมาตรห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์มีค่าเท่ากับ 250 cm^3 จงคำนวณหาประสิทธิภาพความร้อนของวัฏจักร

(ตอบ 50.19 %)

14. เครื่องยนต์เครื่องหนึ่งทำงานตามวัฏจักรออตโตโดยมีอัตราส่วนการอัด 5.8:1 มีเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ 20 cm ระยะชัก 30 cm จงคำนวณหา 1) ปริมาตรห้องเผาไหม้, และ 2) ประสิทธิภาพความร้อนของวัฏจักร

(ตอบ 1964 cm^3, 50.5 %)

15. เครื่องยนต์ก๊าซโซลีนเครื่องหนึ่งมีอุณหภูมิตอนเริ่มและตอนสุดท้ายของจังหวะอัดแบบไอเซนโทรปิกเป็น 110°C และ 450°C ตามลำดับ จงคำนวณหา (1) อัตราส่วนการอัด, และ (2) ประสิทธิภาพความร้อนของวัฏจักรออตโต

(ตอบ 4.9, 47%)

16. เครื่องยนต์เครื่องหนึ่งทำงานตามวัฏจักรออตโตโดยอุณหภูมิและความดันตอนเริ่มจังหวะอัดเป็น 75°C และ 0.9806 bar ตามลำดับ และอุณหภูมิตอนสุดท้ายของจังหวะอัดแบบไอเซนโทรปิกเป็น 400°C ถ้าอุณหภูมิในตอนที่สิ้นสุดการให้ความร้อนในแบบปริมาตรคงที่เป็น 1450°C จงคำนวณหา (1) ประสิทธิภาพความร้อนของวัฏจักร, (2) อัตราส่วนการอัด, และ (3) ความดันของสถานะสุดท้ายของจังหวะอัด

(ตอบ 48.3 %, 5.2, 9.904 bar)

17. ในเครื่องยนต์ที่ทำงานตามวัฏจักรออตโตเครื่องหนึ่ง ความดันและอุณหภูมิตอนเริ่มต้นของจังหวะอัดเป็น 0.9806 bar และ 45°C ตามลำดับ (1) จงคำนวณหาประสิทธิภาพความร้อนของวัฏจักร ถ้าความดันตอนสิ้นสุดการอัดเป็น 11.77 bar กำหนดให้อุณหภูมิสูงสุดของวัฏจักรเป็น 1775°C, (2) จงคำนวณหาความร้อนที่ให้เครื่องยนต์ต่ออากาศ 1 kg, (3) จงคำนวณหางานที่ได้ต่ออากาศ 1 kg, และ (4) ความดันเมื่อสิ้นสุดการขยายตัว

(ตอบ 50.83 %, 997.1 kJ, 510.7 kJ, 3.1 bar)

18. เครื่องยนต์ดีเซลเครื่องหนึ่งมีความดันและอุณหภูมิที่จุดเริ่มต้นการอัดเป็น 98.5 kN/m^2 และ 60°C ความดันสูงสุดในวัฏจักรวัดได้ 4.5 kN/m^2 วัฏจักรได้รับความร้อน 580 kJ/kg กำหนดให้ k = 1.4 และ C_p = 1.003 kJ/kg K จงหา (1) อัตราส่วนการอัด, (2) อุณหภูมิที่จุดอัดสุด, และ (3) อุณหภูมิสุดท้ายของกระบวนการเผาไหม้

19. วัฏจักรดีเซลที่ใช้อากาศเป็นสารตัวกลางเครื่องหนึ่ง เริ่มทำงานโดยการอัดอากาศที่ความดัน 0.9806 bar และอุณหภูมิ 55°C และมีอัตราส่วนการอัดเป็น

16:1 ความดันหลังการขยายตัวเท่ากับ 26.48 bar จงหา (1) ความดันสูงสุดของวัฏจักร, และ (2) ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ระบบ

20. วัฏจักรดีเซลวัฏจักรหนึ่งใช้อากาศก่อนการอัดตัวจำนวน 0.5 kg ที่ความดัน 1 bar อุณหภูมิ 17°C อัตราส่วนการอัด 16:1 หลังการอัดตัวได้รับความร้อนแบบความดันคงที่จนมีปริมาตรเป็น 2 เท่าของก่อนได้รับความร้อน จงหา (1) ประสิทธิภาพความร้อน, (2) ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ระบบ, และ (3) งานสุทธิของวัฏจักร

21. วัฏจักรความดันคงที่วัฏจักรหนึ่งใช้อากาศเป็นสารตัวกลาง เริ่มทำงานที่อากาศความดัน 1.013 bar 23°C ปริมาตร 0.085 m^3 อัตราส่วนการอัดเท่ากับ 8:1 อัตราส่วนการตัดเชื้อเพลิงเท่ากับ 2 จงหาประสิทธิภาพความร้อนของวัฏจักร

22. เครื่องยนต์ดีเซลเครื่องหนึ่งมีอัตราส่วนการอัดตัวเท่ากับ 15:1 อุณหภูมิสูงสุดของวัฏจักรเท่ากับ 1650°C อุณหภูมิต่ำสุดของวัฏจักรเท่ากับ 14°C ความดันสูงสุดของวัฏจักรเท่ากับ 45 bar จงหา (1) ประสิทธิภาพความร้อน, และ (2) ความดันเฉลี่ย

23. วัฏจักรความดันคงที่ใช้อากาศเป็นสารตัวกลางวัฏจักรหนึ่ง ก่อนการอัดตัวอากาศมีอุณหภูมิ 60°C ทำงานอยู่ระหว่างความดัน 98.5 kN/m^2 และ 4.5 MN/m^2 ปริมาณความร้อนที่ได้รับเท่ากับ 580 kJ/kg จงหา (1) อัตราส่วนการอัดตัว, (2) อุณหภูมิหลังการอัด, และ (3) อุณหภูมิหลังการเผาไหม้

(ตอบ 15.3:1, 721°C, 1300°C)

24. เครื่องยนต์เครื่องหนึ่งทำงานตามวัฏจักรดีเซล โดยเริ่มอัดอากาศที่ความดัน 9 kPa ที่ 40°C มีอัตราส่วนการอัด 16:1 ได้รับความร้อนที่ขบวนการความดันคงที่จนกระทั่งอุณหภูมิสูงถึง 1400°C จงคำนวณหา (1) ความดันและอุณหภูมิทุกจุด, และ (2) ประสิทธิภาพความร้อน

(ตอบ T = 46, 676, 1400, 418 °C, p = 90, 4365, 4365, 199 kPa)

25. เครื่องยนต์ดีเซลเครื่องหนึ่ง ทำงานโดยอากาศก่อนการอัดตัวมีความดัน 100 kN/m^2 และอุณหภูมิ 20°C มีปริมาตรห้องเผาไหม้ 00.002 m^3 และปริมาตรกวาด 0.0315 m^3 หลังจากการเผาไหม้แล้วมีอุณหภูมิ 1090°C จงหา (1) อุณหภูมิและ

ความดันหลังการอัด, (2) อุณหภูมิและความดันหลังการให้ความร้อน, และ (3) ประสิทธิภาพความร้อน

26. วัฏจักรความดันคงที่ใช้อากาศเป็นสารตัวกลางวัฏจักรหนึ่ง เริ่มอัดอากาศ 0.05 m^3/s ที่ความดัน 96 kPa อุณหภูมิ 18°C มีอัตราส่วนการอัด 15:1 การเพิ่มความร้อนระหว่างกระบวนการ 2-3 เกิดขึ้นในช่วงที่ปริมาตรเพิ่มขึ้น 10 % ของระยะชัก จงหา (1) ประสิทธิภาพความร้อน, และ (2) งานสุทธิของวัฏจักรต่อวินาที

27. เครื่องยนต์ดีเซลเครื่องหนึ่งเริ่มอัดอากาศที่ความดัน 96.5 kN/m^2 อุณหภูมิ 60°C อัตราส่วนการอัด 14:1 ปริมาณความร้อนที่เติมให้กับระบบเท่ากับ 44 MJ/kg จงหา (1) อุณหภูมิและความดันหลังการอัด, และ (2) อุณหภูมิและความดันหลังการให้ความร้อน

28. เครื่องยนต์ดีเซลเครื่องหนึ่งมีอัตราส่วนการอัด 15:1 และค่า Cut–off เป็น 6% ของระยะชัก จงหา (1) Cut–off ratio, และ (2) ประสิทธิภาพความร้อน

29. ในวัฏจักรความดันคงที่วัฏจักรหนึ่งมีอัตราส่วนการอัดเท่ากับ 5:1 ความร้อนที่ออกจากวัฏจักรในช่วงปริมาตรคงที่คือ 60 kJ จงหางานสุทธิของวัฏจักร

30. เครื่องยนต์ดีเซลเครื่องหนึ่งมีอัตราส่วนการอัดเท่ากับ 14:1 และจุดตัดอยู่ที่ 5 % ของระยะชัก จงคำนวณหาประสิทธิภาพความร้อนของวัฏจักร

(ตอบ 61.15 %)

31. วัฏจักรผสมวัฏจักรหนึ่งมีอัตราส่วนปริมาตร 15:1 เริ่มอัดอากาศที่ความดัน 1.013 bar อุณหภูมิ 22°C ปริมาตร 0.835 m^3 ความดันสูงสุดของวัฏจักร 64.73 bar อุณหภูมิสูงสุดของวัฏจักรเท่ากับ 1314°C จงหา (1) งานของวัฏจักร, (2) ประสิทธิภาพความร้อน, และ (3) ความร้อนที่วัฏจักรได้รับ

32. วัฏจักรผสมใช้อากาศเป็นสารตัวกลางวัฏจักรหนึ่ง เริ่มอัดอากาศที่ความดัน 1 bar อุณหภูมิ 17°C อัตราส่วนการอัด 18:1 อุณหภูมิและความดันสูงสุดของวัฏจักรเท่ากับ 2000°C และ 70 bar ตามลำดับ จงหา (1) ประสิทธิภาพความร้อน, และ (2) ความดันเฉลี่ยของวัฏจักร

33. เครื่องยนต์ที่ทำงานตามวัฏจักรผสมเครื่องหนึ่ง ทำงานระหว่างความดันและอุณหภูมิต่ำสุดเป็น 1 bar และ 17°C โดยความดันสูงสุดของวัฏจักรเท่ากับ 60 bar ความดันเฉลี่ย 10 bar อัตราส่วนการอัด 16:1 ประสิทธิภาพความร้อน 55 % จงหาอุณหภูมิสูงสุดของวัฏจักร

34. วัฏจักรผสมที่ใช้อากาศเป็นสารตัวกลางวัฏจักรหนึ่ง เริ่มอัดอากาศที่ความดัน 0.985 bar อุณหภูมิ 60°C ความดันสูงสุดของวัฏจักรเท่ากับ 45 bar ความร้อนที่เติมให้กับวัฏจักรเท่ากับ 580 kJ/kg จงหา (1) อัตราส่วนการอัด, (2) อุณหภูมิที่สถานะ 2, และ (3) อุณหภูมิที่สถานะ 4

35. วัฏจักรผสมที่ใช้อากาศเป็นสารตัวกลางวัฏจักรหนึ่ง เริ่มอัดอากาศที่ 1.013 bar ปริมาตร 0.05 m^3 อุณหภูมิ 27°C มีรายละเอียดดังนี้; $V_1/V_2 = 9$, $p_3/p_2 = 1.5$ และ $V_4/V_3 = 2$ จงหา (1) งานของวัฏจักร, และ (2) ประสิทธิภาพความร้อนของวัฏจักร

36. ในวัฏจักรผสมซึ่งอุณหภูมิและความดันสูงสุดของวัฏจักรเท่ากับ 2200°C และ 70 bar ตามลำดับ ถ้าอากาศก่อนเกิดการอัดมีความดัน 1 bar อุณหภูมิ 17°C อัตราส่วนการอัดเท่ากับ 18:1 จงหา (1) ประสิทธิภาพความร้อน, และ (2) ความดันเฉลี่ยของวัฏจักร

37. เครื่องยนต์ดีเซลทำงานตามวัฏจักรผสมเครื่องหนึ่ง มีเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ 20 cm และมีระยะชัก 30 cm ปริมาตรห้องเผาไหม้ 950 cm^3 และจุดตัดอยู่ที่ 5% ของระยะชัก โดยอัตราส่วนความดันเป็น1.65 จงคำนวณหาประสิทธิภาพความร้อนของวัฏจักรของเครื่องยนต์นี้

(ตอบ 50.8%)

เอกสารอ้างอิง

1. Arkhangelsky V, Khovakh M, Stepanov Y, Trusov V, Vikhert M and Voinov A (1976). **Motor Vehicle Engines**, Translated by Troitsky A and Lieb G, Moscow: Mir Publishers, pp. 27-34.

2. Arkhangelsky V, Khovakh M, Stepanov Y, Trusov V, Vikhert M and Voinov A (1979). **Motor Vehicle Engines**, Translated by Troitsky A and Samokhvalov M, Moscow: Mir Publishers, pp. 25-31.

3. Artamonov MD, Ilarionov VA and Morin MM (1976). **Motor Vehicles Fundamentals and Design**, Translated by Troitsky A, Moscow: Mir Publishers, pp. 13-18.

4. Heywood JB (1988). **Internal Combustion Engine Fundamentals**, New York: McGraw-Hill, pp. 161-164.

5. Morse FT (1974). **Power Plant Engineering**, New Delhi: Affiliated East-West Press, pp. 150-151.

6. Petrovsky N (19xx). **Marine Internal Combustion engines**, Translated by Isakson HE, Moscow: Mir Publishers, pp. 13-16.

เอกสารแนะนำให้ศึกษาเพิ่มเติม

1. Arkhangelsky V, Khovakh M, Stepanov Y, Trusov V, Vikhert M and Voinov A (1976). **Motor Vehicle Engines**, Translated by Troitsky A and Lieb G, Moscow: Mir Publishers, pp. 34-42.

2. Arkhangelsky V, Khovakh M, Stepanov Y, Trusov V, Vikhert M and Voinov A (1979). **Motor Vehicle Engines**, Translated by Troitsky A and Samokhvalov M, Moscow: Mir Publishers, pp. 31-38.

3. Petrovsky N (19xx). **Marine Internal Combustion engines**, Translated by Isakson HE, Moscow: Mir Publishers, pp. 16-17.

บทที่ 3
สมรรถนะของเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบลูกสูบ

3-1 กำลังและความดันเฉลี่ยประสิทธิผล

กำลังที่หัวสูบ

กำลังที่หัวสูบ (Indicated power) คือกำลังที่แท้จริงซึ่งเกิดขึ้นที่หัวลูกสูบในขณะที่เครื่องยนต์ทำงาน เหตุที่เรียกกำลังนี้ว่า Indicated power ก็เพราะว่าหาได้โดยการใช้เครื่องมือวัดที่เรียกว่า Engine indicator กำลังที่หัวสูบจะหาได้จาก

$$P_i = p_i lAnk \qquad (3\text{-}1.1)$$

เมื่อ p_i คือ ความดันเฉลี่ยประสิทธิผลหัวสูบ (Indicated mean effective pressure, imep)

l คือ ช่วงชักของลูกสูบ

A คือ พื้นที่หน้าตัดของลูกสูบหรือกระบอกสูบ

n คือ จำนวนครั้งที่เกิดการจุดระเบิด

k คือ จำนวนกระบอกสูบของเครื่องยนต์

ความดันเฉลี่ยประสิทธิผลหัวสูบ

ความดันเฉลี่ยประสิทธิผลหัวสูบ (p_i หรือ imep) คือผลรวมทางพีชคณิตของความดันเฉลี่ยที่กระทำกับหัวลูกสูบในแต่ละจังหวะการทำงานในวัฏจักรที่สมบูรณ์ 1 วัฏจักร ค่าของความดันจะวัดได้จากแผนภาพอินดิเคเตอร์ (Indicator diagram) ที่ Engine indicator เขียนออกมา ดังนั้น

$$p_i = \textbf{(พื้นที่ของแผนภาพ/ความยาวของแผนภาพ)}\times\textbf{(ค่าความแข็งของสปริง)} \qquad (3\text{-}1.2)$$

กำลังเพลา

กำลังเพลา (Brake power หรือ Shaft power) เป็นกำลังที่แท้จริงที่เครื่องยนต์ให้ออกมาในขณะที่เครื่องยนต์ทำงาน โดยถ่ายทอดกำลังนี้ออกมาที่เพลาข้อเหวี่ยง กำลังที่เพลานี้วัดออกมาได้โดยใช้ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) แบบต่างๆ อาจจะเป็นไดนาโมมิเตอร์ไฟฟ้าหรือไดนาโมมิเตอร์แบบความเสียดทาน หรือไดนาโมมิเตอร์แบบไฮดรอลิกก็ได้

รูปที่ 3.1-1 ได้แสดงไดนาโมมิเตอร์แบบใช้เชือกรัด (Rope-brake absorption type dynamometer) ไว้ ในกรณีเช่นนี้กำลังเพลาจะหาได้จากสูตร

$$P_b = 2\pi\ TN \qquad (3\text{-}1.3)$$

เมื่อ T คือแรงบิดที่วัดได้จากไดนาโมมิเตอร์ หรือแรงบิดของเครื่องยนต์ และ N คือความเร็วรอบของเครื่องยนต์

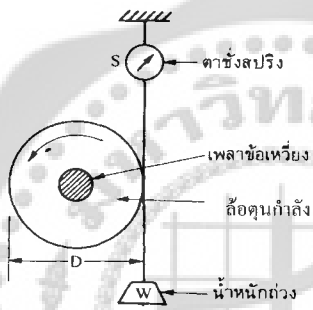
สำหรับไดนาโมมิเตอร์ในรูปที่ 3.1-1 แรงบิดจะมีค่าเป็น

$$T = (W - S)\frac{D}{2} \qquad (3\text{-}1.4)$$

เมื่อ W คือ น้ำหนักที่นำมาถ่วง

S คือ แรงที่อ่านได้จากเครื่องชั่งสปริง

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของดรัม (Drum)



รูปที่ 3.1-1 ไดนาโมมิเตอร์แบบใช้เชือกรัด

ความดันเฉลี่ยประสิทธิผลเพลา

ความดันเฉลี่ยประสิทธิผลเพลา (Brake mean effective pressure, bmep หรือ p_b) คือความดันเฉลี่ยซึ่งจะทำให้เกิดกำลังที่หัวสูบเท่ากับกำลังที่เพลา เป็นค่าตัวเลขที่กำหนดขึ้นเพื่อใช้ในการคำนวณหากำลังที่เพลาโดยใช้สูตรของกำลังที่หัวสูบ ค่าความดันเฉลี่ยประสิทธิผลเพลาจะเป็นตัวเลขที่ใช้ในการเปรียบเทียบความสามารถในการผลิตกำลังของเครื่องยนต์ ซึ่งมีความจุของกระบอกสูบและมีความเร็วรอบเท่ากัน โดยจะหาได้จากสูตร

$$p_b = \frac{P_b}{lAnk} \qquad (3\text{-}1.5)$$

ความดันเฉลี่ยประสิทธิผลเพลาไม่เหมือนกับความดันเฉลี่ยประสิทธิผลหัวสูบ กล่าวคือ ไม่สามารถวัดออกมาได้โดยตรง ทั้งความดันเฉลี่ยประสิทธิผลเพลาและความดันเฉลี่ยประสิทธิผลหัวสูบของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน

จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการอัดเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งถึงขีดจำกัดซึ่งกำหนดด้วยคุณสมบัติในการเกิดระเบิด (Detonation) ของเชื้อเพลิงที่ใช้

กำลังที่สูญเสียไปกับความเสียดทาน

กำลังที่เพลาของเครื่องยนต์จะมีค่าน้อยกว่ากำลังที่หัวสูบ เนื่องจากมีความเสียดทานเกิดขึ้นที่หน้าสัมผัสต่างๆ ของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ที่มีการเคลื่อนไหว เช่น รองลื่น, แหวนลูกสูบ, และลิ้น กำลังที่สูญเสียไปนี้เรียกว่ากำลังที่สูญเสียไปกับความเสียดทาน (Friction power) ซึ่งจะหาได้จาก

$$P_f = P_i - P_b \qquad (3\text{-}1.6)$$

กำลังที่หัวสูบสามารถจะหาได้จากการเอากำลังที่เพลาและกำลังที่สูญเสียไปกับความเสียดทานมารวมกัน วิธีนี้เหมาะสมกับเครื่องยนต์กำลังสูงซึ่งมีการสูญเสียกำลังไปกับความเสียดทานมาก และการหากำลังที่หัวสูบโดยใช้ Engine indicator ไม่สามารถกระทำได้ กำลังที่สูญเสียไปกับความเสียดทานจะหาได้โดยการขับเครื่องยนต์ให้หมุนด้วยไดนาโมมิเตอร์ไฟฟ้าที่ทำงานเป็นมอเตอร์ ดังนั้นกำลังที่สูญเสียไปกับความเสียดทานจะได้ออกมาโดยรวมเอาความเสียดทานของกลไกและความเสียดทานของของไหล (Pumping losses ของกระบวนการคายไอเสียและการดูดไอดี) ไว้ด้วยกัน

แรงบิดของเครื่องยนต์

แรงบิดและความดันเฉลี่ยประสิทธิผลเพลาของเครื่องยนต์จะมีความสัมพันธ์กันโดยตรง เนื่องจาก $P_b = 2\pi\ TN = p_b lAnk$ เพราะฉะนั้น

$$T = \frac{lAnk}{2\pi\ N} P_b = Kp_b \qquad (3\text{-}1.7)$$

เมื่อ $K = lAnk/(2\pi N)$ คือค่าคงที่ของเครื่องยนต์ที่พิจารณา

ดังนั้นเมื่อนำเอาแรงบิดมาเขียนเป็นกราฟเปรียบเทียบกับความเร็วรอบของเครื่องยนต์ รูปร่างของเส้นกราฟที่ได้แต่ละเส้นจะคล้ายคลึงกัน สิ่งนี้ไม่ใช่ดัชนีบ่งชี้ที่ดีสำหรับการบอกสมรรถนะของเครื่องยนต์ เพราะว่ามันขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องยนต์ แต่สำหรับเครื่องยนต์ของรถยนต์ แรงบิดนับว่าเป็นสิ่งที่สำคัญเมื่อพิจารณาในแง่ของการขับเคลื่อน

จำนวนครั้งที่เกิดการจุดระเบิด

ถ้าการจุดระเบิดเป็นไปอย่างสมบูรณ์ จำนวนครั้งในการจุดระเบิดของเครื่องยนต์ Single acting 2 จังหวะจะมีค่าเท่ากับความเร็วรอบของเครื่องยนต์, แต่เครื่องยนต์ Double acting 2 จังหวะจะมีค่าเท่ากับ 2 เท่าของความเร็วรอบ, ส่วนเครื่องยนต์ Single acting 4 จังหวะจะมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของความเร็วรอบ, และเครื่องยนต์ Double acting 4 จังหวะจะมีค่าเท่ากับความเร็วรอบของเครื่องยนต์

การเปรียบเทียบเครื่องยนต์ไม่สามารถใช้กำลังมาเปรียบเทียบเพียงอย่างเดียวได้ เพราะว่ากำลังไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องยนต์เพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบด้วย

3-2 ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ และความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

ประสิทธิภาพทางทฤษฎี

ประสิทธิภาพทางทฤษฎีเรียกว่าประสิทธิภาพอากาศมาตรฐาน (Air-standard efficiency) ประสิทธิภาพอากาศมาตรฐานขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการอัด และวิธีการเผาไหม้ วัฏจักรทางทฤษฎีจะใช้อากาศเป็นสารทำงาน ประสิทธิภาพของวัฏจักรซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างงานที่ได้กับพลังงานที่ให้ในรูปของความร้อน สำหรับวัฏจักรของเครื่องยนต์ทั้ง 3 จะหาได้ดังนี้

ประสิทธิภาพของวัฏจักรออตโตคือ

$$\eta_t = (q_{in} - q_{out})/q_{in} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)} \qquad (3\text{-}2.1)$$

เมื่อ $q_{in} = c_v (T_3 - T_2)$ เป็นพลังงานที่ให้แก่ระบบ

$q_{out} = c_v (T_4 - T_1)$ เป็นพลังงานที่ถ่ายเทออกจากระบบ

และ c_V คือ ค่าความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่

สำหรับอากาศ ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาตรคือ

$$T_2 = T_i (V_i / V_2)^{k-1} = T_1 \varepsilon^{k-1}$$

และ $$T_4 = T_3 / \varepsilon^{k-1}$$

เมื่อ ε คือ อัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์ $= V_1 / V_2$

k คือ c_p / c_V

ดังนั้นประสิทธิภาพอากาศมาตรฐานของวัฏจักรออตโตคือ

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \qquad (3\text{-}2.2)$$

ประสิทธิภาพของวัฏจักรดีเซลคือ

$$\eta_t = 1 - q_{out1}/q_{in3} = 1 - c_V(T_4 - T_1)/\left[c_p(T_3 - T_2)\right]$$
$$= 1 - (T_4 - T_1)/\left[\frac{1}{k}(T_3 - T_2)\right] \qquad (3\text{-}2.3)$$

ในกรณีนี้ $T_2 = T_1\varepsilon^{k-1}$

และ $T_3 = T_3\rho$

เมื่อ $\rho = V_3 / V_2$ คืออัตราส่วนการตัด

และ $T_4 = T_3/(\varepsilon/\rho)^{k-1}$

ดังนั้นประสิทธิภาพอากาศมาตรฐานของเครื่องยนต์ดีเซลคือ

$$\eta_t = 1 - \left(\frac{1}{\varepsilon^{k-1}}\right)\frac{1}{k}\left(\frac{\rho^k - 1}{\rho - 1}\right) \qquad (3\text{-}2.4)$$

ประสิทธิภาพอากาศมาตรฐานของวัฏจักรดีเซลนั้นนอกจากอัตราส่วนการอัดแล้วยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการตัดอีกด้วย ถ้าอัตราส่วนการอัดคงที่ประสิทธิภาพอากาศมาตรฐานจะมีค่าน้อยลงเมื่ออัตราส่วนการตัดเพิ่มขึ้น ปริมาณ $(\rho^k - 1)/[k(\rho - 1)]$ จะมีค่ามากกว่า 1 เมื่อ ρ มากกว่า 1 เพราะฉะนั้นประสิทธิภาพของวัฏจักรดีเซลจะมีค่าน้อยกว่าวัฏจักรออตโตที่มีอัตราส่วนการอัดเท่ากัน แต่เนื่องจากอัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์ดีเซลสูงกว่า จึงทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ดีเซลในทางปฏิบัติมีค่ามากกว่าเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนที่ทำงานตามวัฏจักรออตโต ประสิทธิภาพของวัฏจักรดีเซลจะมีค่าสูงสุดเมื่ออัตราส่วนการตัดมีค่าเท่ากับอัตราส่วนการอัด

ประสิทธิภาพของวัฏจักรผสมคือ

$$\eta_t = 1 - q_{out}/\left(q'_{in} + q''_{in}\right)$$
$$= 1 - (T_4 - T_1)/\left[(T_{3a} - T_2) + \gamma(T_{3b} - T_{3a})\right] \qquad (3\text{-}2.5)$$

เนื่องจาก $T_2 = T_1\varepsilon^{k-1}$

$$T_{3a} = T_2(p_{3a}/p_2) = T_1\lambda\varepsilon^{k-1}$$
$$T_{3b} = T_{3a}\rho = T\varepsilon^{k-1}\rho\lambda$$
$$T_4 = T_{3b}\left(\frac{\varepsilon}{\rho}\right)^{1-k} = T_1\lambda\rho k$$

เมื่อ λ คืออัตราส่วนความดัน ดังนั้นประสิทธิภาพอากาศมาตรฐานของวัฏจักรผสมคือ

$$\eta_t = 1 - \left(\frac{1}{\varepsilon^{k-1}}\right)\left[\frac{\lambda\rho^k - 1}{(\lambda - 1) + \lambda k(\rho - 1)}\right] \qquad (3\text{-}2.6)$$

ประสิทธิภาพของวัฏจักรผสมจะอยู่ระหว่างประสิทธิภาพของวัฏจักรออตโตกับวัฏจักรดีเซล ประสิทธิภาพของวัฏจักรดีเซลและวัฏจักรผสมจะลดลงเมื่อ ρ มีค่าเพิ่มขึ้น แต่วัฏจักรผสมจะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อ λ เพิ่มมากขึ้น

ประสิทธิภาพทางทฤษฎีนั้นจะหาได้โดยไม่คำนึงถึงการสูญเสียความร้อนออกไปทางผนังกระบอกสูบ แต่สำหรับการวิเคราะห์วัฏจักรที่เป็นจริงมากกว่านี้ สารใช้งานที่นำมาพิจารณานั้นจะเป็นสารใช้งานจริงที่ใช้กับเครื่องยนต์จริงๆ และต้องนำผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนจำเพาะและสภาวะสมดุลทางเคมีเข้ามาพิจารณาร่วมด้วย

ประสิทธิภาพความร้อน

ประสิทธิภาพความร้อนเป็นหลักที่ใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องยนต์สันดาปภายในทั้งหลาย ประสิทธิภาพความร้อนคืออัตราส่วนระหว่างงานที่นำไปใช้ประโยชน์ได้กับความร้อนที่ให้เข้าไปแก่เครื่องยนต์ ตัวประกอบที่มีผลต่อประสิทธิภาพความร้อนคือ

(1) อัตราส่วนการอัด ถ้าอัตราส่วนการอัดเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพความร้อนก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

(2) ความเร็วของเครื่องยนต์ ประสิทธิภาพความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของเครื่องยนต์อยู่ในช่วงที่ให้ความประหยัดมากที่สุด เครื่องยนต์ของรถยนต์สมัยใหม่จะให้ความเร็วช่วงนี้ มีค่าน้อยกว่าความเร็วที่ให้กำลังสูงสุดประมาณ 20 ถึง 30 %

(3) ภาระ (load) ในช่วงที่เครื่องยนต์รับภาระไม่เต็มที่ ประสิทธิภาพความร้อนจะน้อยกว่าในช่วงที่รับภาระเต็มที่

(4) ส่วนผสมของไอดี (Mixture strength) ประสิทธิภาพความร้อนจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมของไอดี เมื่อความเร็ว, การเปิดของลิ้นเร่ง, และตัวประกอบที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพความร้อนอื่นๆ มีค่าคงที่

(5) คุณสมบัติของเชื้อเพลิง สิ่งที่สำคัญคือค่าออกเทน (Octane number) ของเชื้อเพลิง ประสิทธิภาพความร้อนจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ถ้าเชื้อเพลิงมีค่าออกเทนสูงขึ้น

(6) อุณหภูมิของผนังกระบอกสูบ ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุดจะได้ออกมาที่อุณหภูมิของผนังกระบอกสูบมีค่าน้อยที่สุดที่แน่นอนค่าหนึ่ง ถ้ามากกว่าค่านี้ ประสิทธิภาพความร้อนจะลดลง

เมื่อหาค่าประสิทธิภาพความร้อนของเครื่องยนต์จากกำลังที่หัวสูบ ค่าประสิทธิภาพความร้อนที่ได้นี้จะเรียกว่า**ประสิทธิภาพความร้อนหัวสูบ** (Indicated thermal efficiency) และถ้าหาออกมาจากกำลังที่เพลา ก็จะเรียกค่าประสิทธิภาพความร้อนที่ได้ว่าเป็น**ประสิทธิภาพความร้อนเพลา** (Brake thermal efficiency)

ประสิทธิภาพความร้อนหัวสูบ

ประสิทธิภาพความร้อนหัวสูบคืออัตราส่วนที่ความร้อนซึ่งป้อนให้แก่เครื่องยนต์สามารถเปลี่ยนแปลงไปเป็นงานที่หัวลูกสูบ ซึ่งจะหาได้จาก

$$\eta_{it} = \frac{P_i}{\dot{m}_f q_f} \qquad (3\text{-}2.7)$$

เมื่อ $\dot{m}_f$ คือ ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ต่อหนึ่งหน่วยเวลา

q_f คือ ค่าความร้อนค่าต่ำ (Lower heating value) ของเชื้อเพลิง

ประสิทธิภาพความร้อนเพลา

ประสิทธิภาพความร้อนเพลาคืออัตราส่วนที่ความร้อนซึ่งป้อนให้แก่เครื่องยนต์จะสามารถเปลี่ยนแปลงไปเป็นงานที่เพลาได้ ซึ่งจะหาได้จาก

$$\eta_{bt} = \frac{P_b}{\dot{m}_f q_f} \qquad (3\text{-}2.8)$$

ตัวอย่างที่ 3-2.1 เครื่องยนต์ก๊าซโซลีนซึ่งทำงานตามวัฏจักรออตโตเครื่องหนึ่ง มีปริมาตรห้องเผาไหม้เท่ากับ 20% ของปริมาตรแทนที่ของลูกสูบ เครื่องยนต์ใช้เชื้อเพลิง 8.17 l/h ในขณะที่ผลิตกำลังที่หัวสูบ 24 kW ความถ่วงจำเพาะของน้ำมันก๊าซโซลีนเท่ากับ 0.76 และมีค่าความร้อน 43.95 MJ/kg จงหาประสิทธิภาพความร้อนหัวสูบของเครื่องยนต์

วิธีทำ ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงหาได้จาก

$\dot{m}_f$ = ปริมาตรของเชื้อเพลิง × ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง

= ปริมาตรของเชื้อเพลิง × ความถ่วงจำเพาะของเชื้อเพลิง × ความหนาแน่นของน้ำ

$$\dot{m}_f = \frac{(8.17\ \text{l/h})}{(60\ \text{min/h})(60\ \text{s/min})}(0.76)(1\ \text{kg/l})$$

$$= 1.725 \times 10^{-3}\ \text{kg/s}$$

ดังนั้นประสิทธิภาพความร้อนหัวสูบคือ

$$\eta_{it} = \frac{P_i}{\dot{m}_f q_f} = \frac{24\ \text{kW}}{(1.725\times10^{-3}\ \text{kg/s})(43\ 950\ \text{kJ/kg})}$$

$$= 0.3166 = 31.66\ \%$$ **ตอบ**

ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (Fuel consumption) ทั้งหมดที่เครื่องยนต์ใช้ไปภายใต้สภาวะที่ทดสอบในช่วงเวลาตามกำหนด จะหาได้โดยการวัดปริมาตรหรือมวลของเชื้อเพลิงที่หมดสิ้นไป **ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ** (Specific fuel consumption) หมายถึงจำนวนเชื้อเพลิงที่สิ้นเปลืองไปทั้งหมดในการผลิตกำลังได้ 1 หน่วย หรืออีกความหมายหนึ่ง ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ ก็คืออัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่อกำลังและเวลานั่นเอง ถ้าใช้กำลังที่หัวสูบมาหาความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ ก็จะเรียกค่าความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะที่คำนวณได้นี้ว่าเป็น**ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะหัวสูบ** (Indicated specific fuel consumption, isfc) ดังนั้น

$$\text{isfc} = \frac{\dot{m}_f}{P_i} = \frac{1}{q_f \eta_{it}} \qquad (3\text{-}2.9)$$

แต่ถ้าใช้กำลังที่เพลามาหาความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ ก็จะเรียกค่าความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะที่คำนวณได้นี้ว่าเป็น**ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเพลา** (Brake specific fuel consumption, bsfc) ดังนั้น

$$\text{bsfc} = \frac{\dot{m}_f}{P_b} = \frac{1}{q_f \eta_{bt}} \qquad (3\text{-}2.10)$$

ประสิทธิภาพเชิงกล

ประสิทธิภาพเชิงกล (Mechanical efficiency) คืออัตราส่วนระหว่างกำลังที่เพลากับกำลังที่หัวสูบ ซึ่งจะหาได้จาก

$$\eta_m = \frac{P_b}{P_i} = \frac{P_b}{P_b + P_f} = \frac{\text{bmep}}{\text{imep}} = \frac{\eta_{bt}}{\eta_{it}} = \frac{\text{isfc}}{\text{bsfc}} \qquad (3\text{-}2.11)$$

ประสิทธิภาพเชิงกลคือสิ่งที่ชี้ให้เห็นความสูญเสียเชิงกลในเครื่องยนต์ มันจะขึ้นอยู่กับสภาพการทำงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความเร็ว, กำลังที่เพลา, และการหล่อลื่น ความสูญเสียเชิงกลในเครื่องยนต์สามารถจำแนกออกได้ 4 กลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้คือ

(1) ความสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานที่ลูกสูบ, รองลื่น, เฟือง, ลิ้น, และกลไกของลิ้น ความสูญเสียนี้มีค่าประมาณ 7% ถึง 10 % ของกำลังที่หัวสูบ

(2) ความสูญเสียเนื่องจากการหมุนตีอากาศของล้อตุนกำลัง ความสูญเสียนี้มีค่าประมาณ 1% ถึง 3% ของกำลังที่หัวสูบ

(3) ความสูญเสียที่เกิดขึ้นระหว่างจังหวะดูดไอดีและคายไอเสียของเครื่องยนต์ 4 จังหวะ หรือสูญเสียโดยการกวาดล้างไอเสียของเครื่องยนต์ 2 จังหวะ การสูญเสียนี้มีค่าประมาณ 2 % ถึง 6% ของกำลังที่หัวสูบ

(4) กำลังที่ใช้ในการขับระบบช่วยต่างๆ ของเครื่องยนต์ เช่น ปั๊มเชื้อเพลิง, ปั๊มหล่อลื่น, ปั๊มน้ำระบายความร้อน, พัดลมดูดอากาศผ่านรังผึ้งหม้อน้ำ, แมกนีโต, การขับจานจ่าย, และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การสูญเสียเหล่านี้มีค่าประมาณ 1% ถึง 9 % ของกำลังที่หัวสูบ

เพราะฉะนั้นความสูญเสียเชิงกลทั้งหลายเหล่านี้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 11% ถึง 28 % ของกำลังที่หัวสูบ ทำให้ประสิทธิภาพเชิงกลมีค่าอยู่ระหว่าง 72% ถึง 89 %

ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร

ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร (Volumetric efficiency) หมายถึงอัตราส่วนระหว่างจำนวนอากาศที่ดูดเข้าเครื่องยนต์ได้จริงในจังหวะดูดกับจำนวนอากาศที่ควรจะดูดได้ตามทฤษฎีเมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ดูดอากาศที่อุณหภูมิและความดันในการดูด ดังนั้นถ้าไม่คิดปริมาณเชื้อเพลิงที่อยู่ในไอดี ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรจะมีค่าเป็น

η_V = (จำนวนอากาศที่แท้จริง)/(จำนวนอากาศตามทฤษฎี)

η_V = (ปริมาตรของอากาศที่ถูกดูดเข้ากระบอกสูบจริงต่อหนึ่งหน่วยเวลา)/(ปริมาตรแทนที่ของลูกสูบ × จำนวนครั้งในการดูดต่อหนึ่งหน่วยเวลา)

η_V = **(มวลของอากาศที่ดูดได้จริง)/(มวลของอากาศที่เข้ามาแทนที่ตามทฤษฎี)**

(3-2.12)

ในกรณีที่เป็นเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน จะไม่คำนึงถึงเชื้อเพลิงที่ผสมอยู่ในไอดีก็ได้โดยไม่ทำให้ค่าประสิทธิภาพเชิงปริมาตรที่คำนวณได้ออกมาผิดพลาดไปมากนัก แต่ในกรณีที่เป็นเครื่องยนต์ใช้ก๊าซ จำนวนเชื้อเพลิงที่ผสมอยู่ในไอดีมีปริมาณสูง ดังนั้นอิทธิพลของจำนวนเชื้อเพลิงที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงปริมาตรดังกล่าวจึงไม่สามารถมองข้ามไปได้

บางครั้งประสิทธิภาพเชิงปริมาตรจะหาโดยอ้างถึงสภาวะอุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (STP) แทนที่จะใช้สภาวะในการดูดไอดีที่แท้จริง ในกรณีนี้ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรจะหาได้จาก

η_V = **(ปริมาตรของส่วนผสมที่ถูกดูดเข้าเครื่องยนต์จริงที่ STP)/(ปริมาตรกวาดของลูกสูบ)**

(3-2.13)

จำนวนอากาศที่ถูกดูดเข้าเครื่องยนต์อย่างแท้จริงในสภาวะที่ให้กำลังเพลาสูงสุดจะมีค่าน้อยกว่าจำนวนอากาศตามทฤษฎีเสมอ เนื่องจากเหตุผลต่อไปนี้

1. ท่อทางเดินไอดีและท่อคาร์บูเรเตอร์ยาวและคดเคี้ยวไป-มา
2. พื้นที่ของลิ้นไอดีและไอเสียไม่เพียงพอ
3. มีความเสียดทานในการไหลของไอดีมากเกินไป เนื่องจากท่อทางเดินของอากาศมีผิวขรุขระและมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของท่อไอดีกับคาร์บูเรเตอร์อย่างทันทีทันใด
4. ส่วนผสมไอดีได้รับความร้อนจากท่อร่วม, ลิ้นและช่องลิ้น, ห้องเผาไหม้, และผนังกระบอกสูบ ก่อนที่ลิ้นไอดีจะปิด
5. มีไอเสียตกค้างอยู่ในห้องเผาไหม้
6. ก๊าซไอเสียมีความดันกลับ (Back pressure) สูง
7. ผลจากอุณหภูมิของน้ำระบายความร้อนในช่องทางเดินน้ำในเสื้อสูบ
8. การออกแบบลิ้นไม่ดีทำให้ลิ้นมีระยะยกตัวไม่เพียงพอ
9. จังหวะการทำงานของลิ้นไม่ถูกต้อง คือตำแหน่งการเปิดและปิดลิ้นไม่ถูกต้อง

ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรเป็นสิ่งที่ใช้วัดความสามารถในการดูดไอดีของเครื่องยนต์ สำหรับเครื่องยนต์ที่ใช้เครื่องอัดบรรจุ (Supercharger) ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรจะขึ้นอยู่กับตัวประกอบต่อไปนี้

(1) **ความเร็วของเครื่องยนต์** ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรจะมีค่าสูงสุดที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่แน่นอนค่าหนึ่ง ถ้าความเร็วรอบเพิ่มขึ้นต่อไปอีกประสิทธิภาพจะลดน้อยลงโดยทั่วไปลักษณะเช่นนี้จะเกิดกับเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน

(2) **อัตราส่วนการอัด** ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรมีแนวโน้มที่จะลดลงถ้าอัตราส่วนการอัดเพิ่มมากขึ้น

(3) **ส่วนผสมไอดี** ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรจะมีค่าต่ำสุดเมื่อส่วนผสมไอดีผสมถูกต้องหรือส่วนผสมบางเล็กน้อย แต่ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรจะมีค่าสูงสุดเมื่อส่วนผสมหนา

(4) **อุณหภูมิของอากาศที่ดูดเข้าเครื่องยนต์** ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้น

(5) **อุณหภูมิของน้ำระบายความร้อน** ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ถ้าอุณหภูมิของน้ำระบายความร้อนลดลง

อัตราส่วนประสิทธิภาพหรือประสิทธิภาพสัมพัทธ์

อัตราส่วนประสิทธิภาพ (Efficiency ratio) หรือประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (Relative efficiency) หมายถึงระดับซึ่งประสิทธิภาพความร้อนที่แท้จริงมีค่าเข้าใกล้ประสิทธิภาพความร้อนของวัฏจักรอุดมคติ ประสิทธิภาพความร้อนที่พิจารณาอาจจะเป็นที่หัวสูบหรือที่เพลาก็ได้ คือ

ประสิทธิภาพสัมพัทธ์หัวสูบ = (ประสิทธิภาพความร้อนหัวสูบ)/(ประสิทธิภาพอากาศมาตรฐาน)

ประสิทธิภาพสัมพัทธ์เพลา = (ประสิทธิภาพความร้อนเพลา)/(ประสิทธิภาพอากาศมาตรฐาน)

(3-2.14)

ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ขึ้นอยู่กับตัวประกอบอย่างเดียวกันกับประสิทธิภาพความร้อน ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ของเครื่องยนต์ในปัจจุบันมีค่าสูงประมาณ 85% ถึง 95 %

ตัวอย่างที่ 3-2.2 เครื่องยนต์ 8 สูบสำหรับรถยนต์เครื่องหนึ่ง มีกระบอกสูบโต 85.7 mm และมีช่วงชัก 82.5 mm โดยมีอัตราส่วนการอัด 7 : 1 ถูกทดสอบที่ความเร็วรอบ 4000 rpm โดยใช้ไดนาโมมิเตอร์ ซึ่งมีแขนยาว 533.5 mm ในขณะที่ทำการทดสอบใช้เวลา 10 นาที โดยที่หน้าปัดของไดนาโมมีเตอร์อ่านได้ 400 N สิ้นเปลืองน้ำมันก๊าซโซลีนซึ่งมีค่าความร้อน 46.044 MJ/kg ไป 4.55 kg และใช้อากาศที่มีอุณหภูมิ 21^{O}C ความดัน 1.007 bar ไปในอัตรา 5.44 kg/min จงหา (1) กำลังที่เพลา, (2) bmep, (3) bsfc, (4) ความสิ้นเปลืองอากาศจำเพาะ, (5) ประสิทธิภาพความร้อนเพลา, (6) ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร, และ (7) อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง

วิธีทำ (1) กำลังที่เพลา

$$P_b = 2\pi\ T\ N = 2\pi(400\ \text{N} \times 0.5335\ \text{m})\ (4000/60\ \text{rps}) = 89\ 390\ \text{W}$$

$$= 89.39\ \text{kW} \qquad \textbf{ตอบ}$$

(2) จากสูตร $P_b = p_b lAnk$

ดังนั้น bmep $p_b = \dfrac{P_b}{lAnk}$

$$= \frac{(89\ 390\ \text{N.m/s})}{(0.0825\ \text{m}) \times \frac{\pi}{4}(85.7\ \text{mm})^2 \times \left(\frac{4000}{2 \times 60}\text{cyc/s}\right) \times 8}$$

$$= 0.704\ \text{N/mm}^2 = 7.04\ \text{bar} \qquad \textbf{ตอบ}$$

(3) ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

$$\dot{m}_f = \frac{(4.55\ \text{kg})}{(10\ \text{min})(60\ \text{min/s})} = 7.583 \times 10^{-3}\ \text{kg/s}$$

ดังนั้น $\text{bsfc} = \dfrac{\dot{m}_f}{P_b} = \dfrac{7.583 \times 10^{-3}\ \text{kg/s}}{89.39\ \text{kW}} = 0.0848 \times 10^{-3}\ \text{kg/s/kW}$

$$= 0.3053\ \text{kg/kWh} \qquad \textbf{ตอบ}$$

(4) ความสิ้นเปลืองอากาศ

$$\dot{m}_a = \frac{5.44\ \text{kg/min}}{60\ \text{s/min}} = 0.0907\ \text{kg/s}$$

ดังนั้นความสิ้นเปลืองอากาศจำเพาะเพลา

$$\text{bsac} = \frac{\dot{m}_a}{P_b} = \frac{0.0907\ \text{kg/s}}{89.39\ \text{kW}} = 1.015 \times 10^{-3}\ \text{kg/s/kW}$$

$$= 3.654\ \text{kg/kWh} \qquad \textbf{ตอบ}$$

(5) ประสิทธิภาพความร้อนเพลา

$$\eta_{bt} = \frac{P_b}{\dot{m}_f q_f} = \frac{89.39\ \text{kW}}{(7.583 \times 10^{-3}\ \text{kg/s})(46\ 044\ \text{kJ/kg})} = 0.256$$

$$= 25.60\ \% \qquad \textbf{ตอบ}$$

(6) ปริมาตรแทนที่ของลูกสูบ

$$V_d = \frac{\pi}{4}(8.57\ \text{cm})^2 (8.25\ \text{cm}) = 475.9\ \text{cc/cyl}$$

ที่ 4000 rpm และเป็นเครื่องยนต์ 4 จังหวะ 8 สูบ ปริมาตรแทนที่ทั้งหมดจะมีค่าเป็น

$$\dot{V}_d = (475.9 \times 10^{-6}\ \text{m}^3/\text{cyl})\left(\frac{4000}{2 \times 60}\text{cyc/s}\right)(8\ \text{cyl}) = 0.127\ \text{m}^3/\text{s}$$

ปริมาตรของอากาศที่ถูกดูดเข้ากระบอกสูบหาได้จาก

$$\dot{V}_1 = \frac{\dot{m}_1 RT_1}{p_1} = \frac{(0.0907\ \text{kg/s})(287\ \text{J/kg K})(273+21\ \text{K})}{1.007\ \text{N/m}^2}$$

$$= 0.076\ \text{m}^3/\text{s}$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร

$$\eta_v = \frac{0.076\ \text{m}^3/\text{s}}{0.127\ \text{m}^3/\text{s}} = 0.5984 = 59.84\ \%$$ **ตอบ**

(7) อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง

$$A/F = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} = \frac{0.0907\ \text{kg/s}}{7.583\times10^{-3}\ \text{kg/s}} = 12:1$$ **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 3-2.3 ต่อไปนี้เป็นข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเครื่องยนต์ 4 จังหวะ 4 สูบเครื่องหนึ่ง

ความโตของกระบอกสูบ	101	mm
ช่วงชัก	114	mm
ความเร็วรอบ	1600	rpm
ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง	0.204	kg/min
ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง	41.86	MJ/kg
ความแตกต่างของแรงดึงในเส้นเชือกของ		
ไดนาโมมิเตอร์แบบใช้เชือกรัด	385.5	N
เส้นผ่านศูนย์กลางของดรัม (Drum)	1.066	m
ประสิทธิภาพเชิงกล	83	%

จงหา (1) ประสิทธิภาพความร้อนเพลา, (2) ประสิทธิภาพความร้อนหัวสูบ, (3) ความดันเฉลี่ยประสิทธิผลหัวสูบ, และ (4) ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ

วิธีทำ กำลังที่เพลา

$$P_b = 2\pi\ TN = 2\pi\left(385.5\ \text{N}\times\frac{1.066}{2}\text{m}\right)\left(\frac{1600}{60}\text{rps}\right) = 34430\ \text{W}$$

$$= 34.43\ \text{kW}$$

(1) ประสิทธิภาพความร้อนเพลา

$$\eta_{bt} = \frac{P_b}{\dot{m}_f q_f} = \frac{34.43\ \text{kW}}{(0.204/60\ \text{kg/s})(41\ 860\ \text{kJ/kg})} = 0.2419$$

$$= 24.19\%$$ **ตอบ**

(2) ประสิทธิภาพความร้อนหัวสูบ

$$\eta_{it} = \frac{\eta_{bt}}{\eta_m} = \frac{24.19\%}{0.83} = 29.14\ \%$$ **ตอบ**

(3) กำลังที่หัวสูบหาได้จาก

$$P_i = \frac{P_b}{\eta_m} = p_i lAnk$$

ดังนั้น $$p_i = \frac{P_b}{\eta_m \, lAnk}$$

$$= \frac{34\ 430\ \text{N.m/s}}{(0.83)(0.114\ \text{m})[\frac{\pi}{4}(101\ \text{mm})^2]\left(\frac{1600}{2\times 60}\text{cyc/s}\right)(4)}$$

$$= 0.852\ \text{N/mm}^2 = 8.52\ \text{bar}$$ **ตอบ**

(4) ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ

$$\text{bsfc} = \frac{\dot{m}_f}{P_b} = \frac{(0.204/60)\text{kg/s}}{34.43\ \text{kW}} = 0.0988 \times 10^{-3}\ \text{kg s}^{-1}/\text{kW}$$

$$= 0.3557\ \text{kg/kWh}$$ **ตอบ**

$$\text{isfc} = \eta_m \text{bfsc} = (0.83)\ (0.3557\ \text{kg/kWh})$$

$$= 0.2952\ \text{kg/kWh}$$ **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 3-2.4 เครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบ 4 จังหวะเครื่องหนึ่งมีความโตของกระบอกสูบ 105 mm ช่วงชัก 127 mm และผลิตกำลังเพลาได้ 47 kW ที่ 1800 rpm ในระหว่างทำการทดสอบในช่วง 15 นาทีสุดท้าย ที่ 1800 rpm ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อน 45.63 MJ/kg ไปจำนวน 2.78 kg อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงสำหรับการสันดาปที่ถูกต้องทางเคมีมีค่า 14.8:1 และประสิทธิภาพเชิงปริมาตรซึ่งคิดจากสถานะของอากาศที่มีปริมาตรจำเพาะ 0.805 m^3/kg มีค่าเท่ากับ 80 % จงหาประสิทธิภาพความร้อนเพลาและเปอร์เซ็นต์ของอากาศที่ใช้มากกว่าสำหรับการสันดาปที่ถูกต้องทางทฤษฎี

วิธีทำ ประสิทธิภาพความร้อนเพลา

$$\eta_{bt} = \frac{P_b}{\dot{m}_f q_f} = \frac{47\ \text{kW}}{\left(\frac{2.78}{15\times 60}\text{kg/s}\right)\times 45\ 630\ \text{kJ/kg}} = 0.3335$$

$$= 33.35\ \%$$ **ตอบ**

ปริมาตรแทนที่ของลูกสูบ 1 สูบ คือ

$$V_d = \frac{\pi}{4}d^2 l = \frac{\pi}{4}(0.105\ \text{m})^2(0.127\ \text{m}) = 1.1 \times 10^{-3}\ \text{m}^3$$

ปริมาตรดูดทั้งหมดทางทฤษฎีในขณะทำการทดสอบ คือ

$$\dot{V}_d = V_d\, n\, k = (1.1 \times 10^{-3}\text{m}^3)\ (\frac{1800}{2\times 60}\text{cyc/s})\times 4 = 0.066\ \text{m}^3/\text{s}$$

ปริมาตรของอากาศที่ดูดเข้าเครื่องยนต์จริงๆ ในขณะทำการทดสอบ คือ

$$\dot{V}_a = \eta_V \dot{V}_d = (0.8)\ (0.066\ m^3/s) = 0.0528\ m^3/s$$

ดังนั้นมวลของอากาศที่ดูดเข้าเครื่องยนต์จริงในขณะทำการทดสอบคือ

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{V}_a}{v_a} = \frac{(0.0528\ m^3/s)}{(0.805\ m^3/kg)} = 0.0656\ kg/s$$

มวลของอากาศที่ต้องการใช้ในการทำให้เกิดการสันดาปที่ถูกต้องทางเคมี ระหว่างทำการทดสอบคือ

$$\dot{m}_a = (A/F) \times \dot{m}_f = (14.8)(\frac{2.78}{15 \times 60} kg/s) = 0.0457\ kg/s$$

อัตราส่วนของอากาศที่ใช้สำหรับการสันดาปจริงกับทฤษฎี

$$= (0.0656/0.0457) = 1.4354$$

ดังนั้น ปริมาณอากาศส่วนเกินเป็นร้อยละ e = 43.54% **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 3-2.5 สมมติว่าเครื่องยนต์ของรถยนต์เครื่องหนึ่งสามารถทำงานโดยมีประสิทธิภาพความร้อนหัวสูบ 22 % เมื่อสภาวะการทำงานเป็นดังนี้

ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร	80 %
ประสิทธิภาพเชิงกล	82 %
ค่าความร้อนของน้ำมันก๊าซโซลีน	46.46 MJ/kg
ปริมาณอากาศที่ต้องการตามทฤษฎี	14.5 kg/kg เชื้อเพลิง
อากาศส่วนเกินที่มากกว่าทฤษฎี	25 %
ความหนาแน่นของไอน้ำมันเบนซิน	2 เท่าของอากาศ
สถานะไอดีตรงจุดสุดท้ายของจังหวะดูด	82.4 kPa, 60° C
ค่าคงที่ก๊าซ (Gas constant) ของอากาศ	287 J/kg K

จงหาขนาดความโตของกระบอกสูบและช่วงชักของเครื่องยนต์ 6 สูบ 4 จังหวะ เครื่องนี้ ตามสภาวะดังกล่าวข้างต้น เมื่อเครื่องยนต์ผลิตกำลังเพลาได้ 67.1 kW ที่ความเร็ว 4200 rpm กำหนดให้ช่วงชักยาวกว่าความโตของกระบอกสูบ 25%

วิธีทำ กำลังที่หัวสูบ

$$P_i = \frac{P_b}{\eta_m} = \frac{67.1\ kW}{0.82} = 81.83\ kW$$

เนื่องจากประสิทธิภาพความร้อนหัวสูบคือ

$$\eta_{it} = \frac{P_i}{\dot{m}_f\ q_f}$$

ดังนั้น ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจะมีค่าเป็น

$$\dot{m}_f = \frac{P_i}{\eta_{it}\, q_f} = \frac{81.83\ kW}{(0.22)(46\ 460\ kJ/kg)} = 8.006\times10^{-3}\ kg/s$$

ปริมาณอากาศที่ต้องใช้ตามทฤษฎี คือ

$$\dot{m}_a = (A/F)\ \dot{m}_f = (14.5)\ (8.006 \times 10^{-3} kg/s) = 0.116\ kg/s$$

ดังนั้น ปริมาณอากาศที่ต้องใช้จริงคือ

$$\dot{m}_a = (0.116\ kg/s) \times 1.25 = 0.145\ kg/s$$

ปริมาตรของอากาศที่ถูกดูดเข้าเครื่องยนต์ในสภาวะดูดจริงจะหาได้จาก

$$\dot{V}_a = \frac{\dot{m}_a\ RT}{p} = \frac{(0.145\ kg/s)(287\ kJ/kg.K)(273+60\ K)}{(82.4\times10^3\ N/m^2)}$$

$$= 0.168\ m^3/s$$

ดังนั้นความหนาแน่นของอากาศมีค่าเป็น

$$\rho_a = \frac{\dot{m}_a}{\dot{V}_a} = \frac{0.145\ kg/s}{0.168\ m^3/s} = 0.863\ kg/m^3$$

และความหนาแน่นของไอน้ำมันเบนซินเป็น

$$\rho_f = 2 \times \rho_a = 2\ (0.863\ kg/m^3) = 1.726\ kg/m^3$$

ปริมาตรของไอน้ำมันเบนซินในส่วนผสมไอดีที่ถูกดูดเข้าเครื่องยนต์คือ

$$\dot{V}_f = \frac{\dot{m}_f}{\rho_f} = \frac{(8.006\times10^{-3}\ kg/s)}{(1.726\ kg/m^3)} = 4.638 \times 10^{-3}\ m^3/s$$

ปริมาตรแทนที่ของลูกสูบทั้งหมดในขณะหมุนด้วยความเร็ว 4200 rpm คือ

$$\dot{V}_d = V_d\, n\, k = \frac{\pi}{4} d^2 (1.25d)\left(\frac{4200}{2\times60} cyc/s\right) \times 6 = 206.2\ d^3$$

เนื่องจาก $\eta_V = \dfrac{\dot{V}_a + \dot{V}_f}{\dot{V}_d}$

ดังนั้น $0.8 = \dfrac{0.168 + 4.638\times10^{-3}}{206.2d^3}$ หรือ $d^3 = 1.0465 \times 10^{-3}\ m^3$

จะได้ d = 0.1015 m = 101.5 mm **ตอบ**

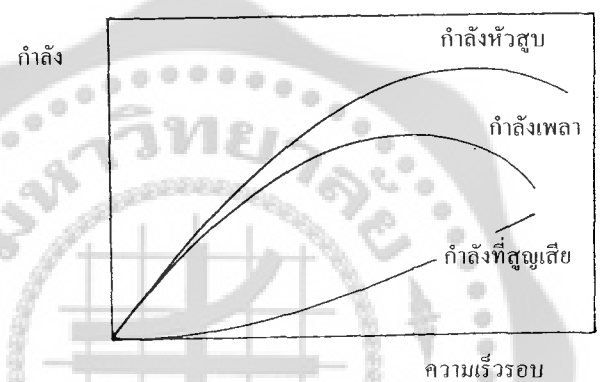
และช่วงชัก l = 1.25 × 101.5 = 126.9 mm **ตอบ**

3-3 การทดสอบเครื่องยนต์แบบ Morse Test

เครื่องยนต์สันดาปภายในมีคุณสมบัติประการหนึ่งคือ ที่ความเร็วรอบต่ำจะผลิตกำลังได้น้อยและการผลิตกำลังจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามความเร็วรอบของเครื่องยนต์จนถึงความเร็วค่าหนึ่ง หลังจากนั้นถึงแม้ความเร็วของเครื่องยนต์จะเพิ่มมากขึ้น แต่กำลังที่เครื่องยนต์ผลิตได้จะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากที่ความเร็วสูง

มากๆ การไหลวนของไอดีและการระบายไอเสียออกจากเครื่องยนต์จะไม่มีความสัมพันธ์ที่ถูกต้อง จึงทำให้การเผาไหม้ภายในกระบอกสูบของเครื่องยนต์เป็นไปได้ไม่สมบูรณ์ ขณะเดียวกันการที่เครื่องยนต์หมุนที่ความเร็วยิ่งสูงขึ้นความเสียดทานภายในก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3-3.1 กราฟเส้นบนสุดจะเป็นกราฟของกำลังที่เครื่องยนต์ผลิตได้ ส่วนกราฟเส้นล่างสุดเป็นกราฟของกำลังที่สูญเสียในเครื่องยนต์

เมื่อนำค่าของกำลังที่สูญเสียในเครื่องยนต์ไปหักออกจากกำลังที่เครื่องยนต์ผลิตได้ที่ความเร็วเดียวกัน ค่าที่ได้ก็คือกำลังเพลาของเครื่องยนต์ ซึ่งเป็นกำลังที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง ที่แสดงด้วยกราฟเส้นกลางของรูปที่ 3-3.1



รูปที่ 3-3.1 กราฟของกำลังที่เครื่องยนต์ผลิตได้

ความเร็วที่เครื่องยนต์สามารถผลิตแรงบิดได้สูงสุดและความเร็วที่เครื่องยนต์ผลิตกำลังเพลาได้สูงสุด มีความสำคัญต่อการเลือกอัตราทดของระบบส่งกำลังของรถยนต์เป็นอย่างมาก ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไปในภายหน้า

กำลังที่หัวสูบและประสิทธิภาพเชิงกลของเครื่องยนต์สำหรับเครื่องยนต์ที่มีหลายสูบ สามารถหาได้ภายในระยะเวลาอันสั้นโดยการทดสอบในขณะที่ทำการทดสอบ เครื่องยนต์จะหมุนด้วยความเร็วคงที่และเปิดลิ้นคันเร่งไว้ในตำแหน่งเดียวกัน ในครั้งแรกจะต้องหากำลังที่เพลาของเครื่องยนต์โดยทุกสูบทำงานออกมาก่อนด้วยการใช้ไดนาโมมิเตอร์ ต่อมาจึงหากำลังที่เพลาของเครื่องยนต์ออกมาโดยการลัดวงจร (Short) หัวเทียนให้สูบใดสูบหนึ่งไม่ทำงานแล้วจึงเปลี่ยนไปลัดวงจรหัวเทียนสูบอื่นต่อไปทีละสูบและหากำลังที่เพลาออกมาในลักษณะเดียวกันจนครบทุกสูบ ในกรณีที่เป็นเครื่องยนต์ดีเซลจะใช้การตัดการส่งน้ำมันเชื้อเพลิงไปยังหัวฉีดแทนการลัดวงจรหัวเทียน

เมื่อสูบใดสูบหนึ่งถูกลัดวงจรให้ไม่ทำงาน ความเร็วรอบของเครื่องยนต์จะตกลงอย่างเห็นได้ชัดก่อนที่จะอ่านค่าต่างๆจากเครื่องมือวัดของไดนาโมมิเตอร์ จะต้องปรับภาระให้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์กลับคืนเท่าความเร็วรอบเดิมเมื่อทุกสูบทำงานเสียก่อน

การทดสอบนี้เราจะสมมติว่ากำลังที่สูญเสียไปกับความเสียดทานของสูบที่ถูกลัดวงจรให้ไม่ทำงานมีค่าเท่ากับในขณะที่สูบนั้นทำงาน ในกรณีที่เป็นเครื่องยนต์ 4 สูบ สมมติให้

B = กำลังที่เพลาของเครื่องยนต์ ในขณะที่ทุกสูบทำงาน

B_1 = กำลังที่เพลาของเครื่องยนต์ ในขณะที่สูบที่ 1 ไม่ทำงาน

B_2 = กำลังที่เพลาของเครื่องยนต์ ในขณะที่สูบที่ 2 ไม่ทำงาน

B_3 = กำลังที่เพลาของเครื่องยนต์ ในขณะที่สูบที่ 3 ไม่ทำงาน

B_4 = กำลังที่เพลาของเครื่องยนต์ ในขณะที่สูบที่ 4 ไม่ทำงาน

I_1, I_2, I_3 และ I_4 = กำลังที่หัวสูบของสูบที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ

F_1, F_2, F_3 และ F_4 = กำลังที่สูญเสียไปกับความเสียดทานของสูบที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ

เพราะฉะนั้น

$$B = (I_1 - F_1) + (I_2 - F_2) + (I_3 - F_3) + (I_4 - F_4)$$

$$= (I_1 + I_2 + I_3 + I_4) - (F_1 + F_2 + F_3 + F_4) \qquad (3\text{-}3.1)$$

เมื่อสูบที่ 1 ไม่ทำงาน จะไม่มีกำลังเกิดขึ้นจากสูบที่ 1 เลย แต่ความเสียดทานในสูบที่ 1 ยังคงมีอยู่ ดังนั้น

$$B_1 = (I_2 + I_3 + I_4) - (F_1 + F_2 + F_3 + F_4) \qquad (3\text{-}3.2)$$

นำไปลบกับสมการ (3-3.1) จะได้

$$B - B_1 = I_1 \qquad (3\text{-}3.3)$$

ในทำนองเดียวกันนี้ สำหรับสูบอื่นๆ จะได้

$$B - B_2 = I_2 \qquad (3\text{-}3.4)$$

$$B - B_3 = I_3 \qquad (3\text{-}3.5)$$

และ $$B - B_4 = I_4 \qquad (3\text{-}3.6)$$

เพราะฉะนั้นกำลังที่หัวสูบทั้งหมดของเครื่องยนต์จะมีค่าเป็น

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 4B - (B_1 + B_2 + B_3 + B_4) \qquad (3\text{-}3.7)$$

และประสิทธิภาพเชิงกลจะหาได้จาก

$$\eta_m = \frac{B}{I} \qquad (3\text{-}3.8)$$

ในขณะที่ทำ Morse test มีข้อควรระวังดังนี้

1. กำลังที่เพลาควรจะวัดให้เร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้หลังจากทำการช้อร์ตหัวเทียน

2. ควรจะปรับภาระของไดนาโมมิเตอร์เพื่อทำให้เครื่องยนต์มีความเร็วกลับคืนคงที่เท่าเดิมโดยเร็ว มิฉะนั้นเครื่องยนต์จะเร่ง

ในกรณีที่ต้องการเขียนเส้นกราฟของกำลังที่หัวสูบ, กำลังที่เพลา, และประสิทธิภาพเชิงกล จะต้องทำการทดสอบหลายๆครั้งโดยกำหนดความเร็วรอบของเครื่องยนต์ให้มีค่าต่างกันออกไปจากความเร็วต่ำไปหาความเร็วสูง

ตัวอย่างที่ 3-3.1 เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน 4 สูบ 4 จังหวะเครื่องหนึ่ง ให้กำลังที่เพลา 52.2 kW ที่ 2000 rpm เครื่องยนต์เครื่องนี้ถูกทำ Morse test โดยอ่านค่าแรงบิดได้ 176.3, 169.5, 166.8 และ 173.6 Nm ตามลำดับ สำหรับการเดินเครื่องที่ความเร็วนี้ตามปกติจะสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ 0.3647 kg /kWh ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมีค่า 43.95 MJ/kg จงหาประสิทธิภาพเชิงกลและประสิทธิภาพความร้อนเพลาของเครื่องยนต์เครื่องนี้

วิธีทำ กำลังที่เพลาในขณะที่สูบที่ 1, 2, 3 และ 4 ไม่ทำงาน คือ

$B_1 = 2\pi T N = 2\pi(176.3)(2000/60 = 36\,920 \text{ W} = 36.92 \text{ kW}$

$B_2 = 2\pi (169.5)(2000/60) = 35\,500 \text{ W} = 35.5 \text{ kW}$

$B_3 = 2\pi (166.8)(2000/60) = 34\,930 \text{ W} = 34.93 \text{ kW}$

$B_4 = 2\pi (173.6)(2000/60) = 36\,360 \text{ W} = 36.36 \text{ kW}$

เพราะฉะนั้นกำลังที่หัวสูบซึ่งผลิตได้ในกระบอกสูบที่ 1, 2, 3 และ 4 คือ

$I_1 = B - B_1 = 52.2 - 36.92 = 15.28 \text{ kW}$

$I_2 = 52.2 - 35.5 = 16.7 \text{ kW}$

$I_3 = 52.2\text{-}34.93 = 17.27 \text{ kW}$

$I_4 = 52.2 - 36.36 = 15.84 \text{ kW}$

ดังนั้นกำลังที่หัวสูบที่เครื่องยนต์ผลิตได้ทั้งหมดคือ

$I = 15.28 + 16.7 + 17.27 + 15.84 = 65.1 \text{ kW}$

หรือหาจากสูตร

$I = 4B - (B_1 + B_2 + B_3 + B_4)$

$= 4 \times 52.2 - (36.92 + 35.5 + 34.93 + 36.36) = 65.1 \text{ kW}$

เพราะฉะนั้นประสิทธิภาพเชิงกล

$$\eta_m = \frac{B}{I} = \frac{52.2\ kW}{65.1\ kW} = 0.8018 = 80.18 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$ **ตอบ**

และประสิทธิภาพความร้อนเพลา

$$\eta_m = \frac{P_b}{\dot{m}_f q_f} = \frac{1}{bsfc\ q_f}$$

$$= \frac{1}{(0.3647\ kg/kWh \times 3600\ s/h)(43\ 950\ kJ/kg)}$$

$$= 0.2246 = 22.46\ \%$$ **ตอบ**

3-4 พิกัดความสามารถของเครื่องยนต์

โดยทั่วไปวิธีการที่ใช้ในการหาพิกัดความสามารถของเครื่องยนต์ (Engine rating) หรือกำลังตามพิกัด (Rated power) ของเครื่องยนต์สำหรับรถยนต์มีอยู่ 3 วิธี คือ

1. ภาระสูงสุดที่เครื่องยนต์รับได้อย่างต่อเนื่อง

ภาระนี้แสดงด้วยความดันเฉลี่ยหรือด้วยปริมาตรแทนที่ของลูกสูบ มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกำลัง 1 หน่วย และต่อเวลา 1 หน่วย อย่างไรก็ตาม สิ่งที่ใช้แสดงระดับความสามารถทั้งสองนี้ก็เหมือนกัน เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเบนซินจะมีความดันเฉลี่ยประมาณ 0.638 N/mm^2 เครื่องยนต์ทุกเครื่องควรจะสามารถรับภาระเกินกำหนดในกรณีฉุกเฉินได้ประมาณ 10 ถึง 20 %

2. กำลังสูงสุดที่เครื่องยนต์ผลิตได้

ในกรณีนี้ระดับความสามารถของเครื่องยนต์จะระบุในลักษณะของความสามารถสูงสุดของเครื่องยนต์ คือกำลังเพลาสูงสุดที่สามารถผลิตได้

3. โดยการใช้สูตรของ Royal Automobile Club (RAC rating)

RAC ได้กำหนดสมมติฐานสำหรับการคำนวณหากำลังม้าที่เพลา (Brake horse power, BHP) ใช้ในการคิดภาษีสำหรับเครื่องยนต์ 4 จังหวะไว้ดังนี้

ความเร็วของลูกสูบ = 1000 ft/min

ความดันเฉลี่ย = 90 psi

ประสิทธิภาพเชิงกล = 75%

เมื่อแทนค่าสมมติฐานเหล่านี้ลงในสูตรสำหรับหากำลังที่เพลา จะได้

$$BHP = \frac{d^2 k}{2.5} \qquad (3\text{-}4.1)$$

เมื่อ d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ (มีหน่วยเป็น in) และ k คือจำนวนสูบของเครื่องยนต์

กำลังม้าที่เพลาที่คำนวณได้นี้คือ RAC rating ของเครื่องยนต์ จะมีค่าน้อยกว่ากำลังที่ได้ในข้อ 2 มาก

การคิดภาษีรถยนต์จากขนาดของเครื่องยนต์ได้เริ่มขึ้นจากประเทศอังกฤษโดยใช้สูตรของ Automobile Club of Great Britain and Ireland (ต่อมาเรียกว่า Royal Automobile Club) ประมาณปี พ.ศ. 2447 สูตรนี้เรียกว่า Treasury Rating หรือ RAC rating โดยกำหนดสมมติฐานต่างๆดังกล่าวสำหรับเครื่องยนต์ที่ใช้ในสมัยนั้น ซึ่งตามความเป็นจริงแล้วจะได้กำลังเพลาออกมาโดยประมาณเท่านั้น แม้ว่าในปัจจุบันนี้คุณลักษณะต่างๆของเครื่องยนต์จะถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นมากกว่าเดิมก็ตาม แต่ก็ยังคงใช้สูตรดั้งเดิมอยู่

การคิดภาษีรถยนต์ในอเมริกาก็เช่นเดียวกับอังกฤษ สมาคมรถยนต์ที่สำคัญของอเมริกาคือ Society of Automotive Engineers (SAE) และ National Automobile Chamber of Commerce (NACC) กำหนดการคิดภาษีด้วยสูตร

$$\text{SAE rating หรือ bhp (SAE)} = \frac{d^2k}{2.5} = \frac{d^2k}{1613} \qquad (3\text{-}4.2)$$

และ

$$\text{NACC rating} = \frac{d^2k}{2.5} = \frac{d^2k}{1613} \qquad (3\text{-}4.3)$$

เช่นเดียวกับ RAC rating ขึ้นอยู่กับการวัดความโตของกระบอกสูบเป็น in (ใช้ค่าตัวหารเป็น 2.5) หรือ mm (ใช้ค่าตัวหารเป็น 1613)

กำลังม้าคิดภาษีของฝรั่งเศสเรียกว่า C.V. (Coevaux-Vapeur) กำหนดการหากำลังม้าคิดภาษีจาก

$$C.V. = 0.00015\ w\ l\ d^2\ k \qquad (3\text{-}4.4)$$

เมื่อ d = ความโตของกระบอกสูบ เป็น cm

l = ช่วงชักของลูกสูบ เป็น cm

w = 20 สำหรับรถยนต์ที่มีมวลตั้งแต่ 2500 kg ขึ้นไป

= 30 สำหรับรถยนต์ที่มีมวลน้อยกว่า 2500 kg

พิกัดกำลังตามมาตรฐาน SAE

SAE ได้กำหนดวิธีการวัดกำลังของเครื่องยนต์เพื่อให้เป็นมาตรฐานเดียวกันคือ โดยใช้ไดนาโมมิเตอร์วัดกำลังที่ได้จากเครื่องยนต์ในสภาวะที่เครื่องยนต์ทำงานโดยที่ไม่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, หม้อกรองอากาศ, พัดลมระบายความร้อน, ฯลฯ แต่ยังคงมีปั๊มน้ำและปั๊มน้ำมันเครื่องติดอยู่กับเครื่องยนต์

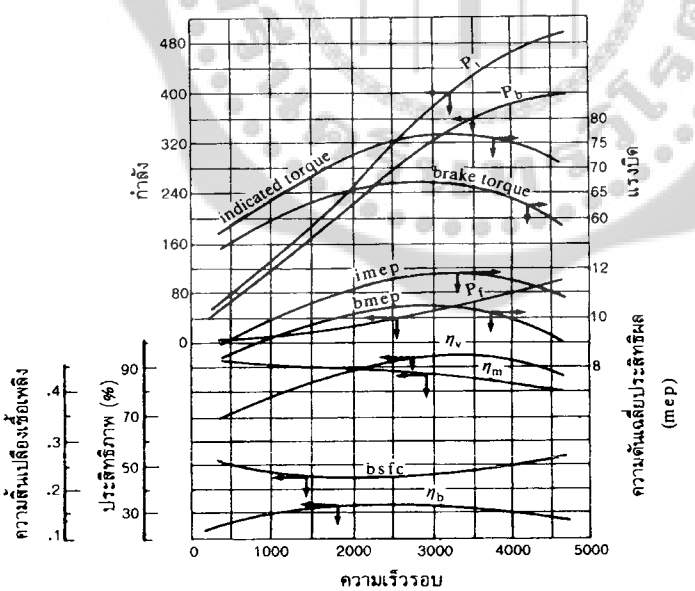
จากนั้นจึงแก้ไขผลจากการทดสอบให้เป็นค่าที่อยู่ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ, ความดัน, และความชื้นมาตรฐาน (STP)

กำลังตามมาตรฐาน DIN

กำลังตามมาตรฐาน DIN เป็นหลักการของเยอรมัน กำลังของเครื่องยนต์จะวัดออกมาโดยอุปกรณ์ประกอบทั้งหลายติดอยู่กับเครื่องยนต์ทั้งหมด คือมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, หม้อกรองอากาศ, พัดลมระบายความร้อน ฯลฯ ติดกับเครื่องยนต์ จากนั้นจึงแก้ไขผลลัพธ์จากการทดสอบให้เป็นค่าที่อยู่ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ, ความดัน, และความชื้นมาตรฐาน (STP) เช่นกัน

3-5 เส้นกราฟสมรรถนะของเครื่องยนต์

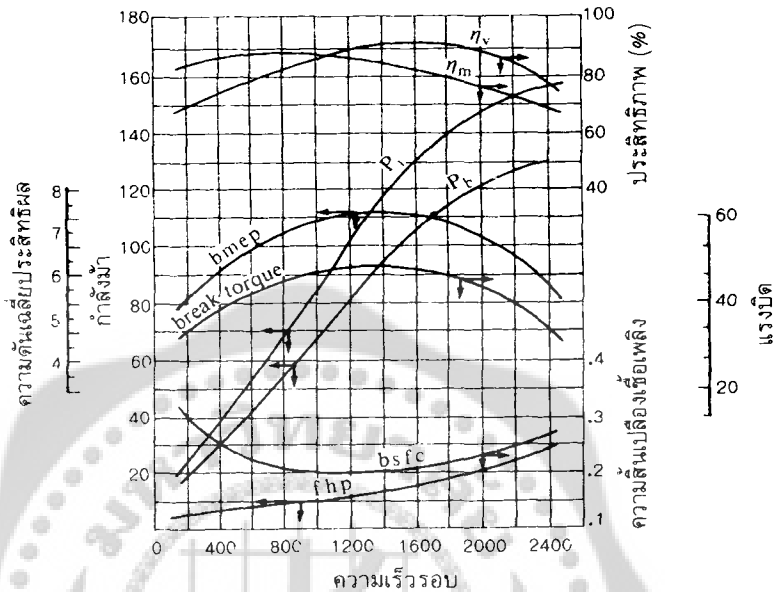
คำว่าสมรรถนะสำหรับเครื่องยนต์โดยทั่วไปจะเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่างกำลัง, ความเร็วรอบ, และความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง สำหรับเครื่องยนต์ที่ใช้งานโดยความเร็วรอบไม่คงที่ เช่นเครื่องยนต์สำหรับรถยนต์นั้น กำลังตามพิกัดที่ความเร็วรอบอันหนึ่งจะไม่ได้ให้ข้อมูลที่เพียงพอ แต่เส้นกราฟสมรรถนะ (Performance curves) จะช่วยให้ได้ข้อมูลที่จำเป็น



รูปที่ 3-5.1 เส้นกราฟสมรรถนะของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน

เส้นกราฟสมรรถนะสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในได้แสดงไว้ในรูปที่ 3-5.1 และ 3-5.2 รูปที่ 3-5.1 เป็นเส้นกราฟสมรรถนะของเครื่องยนต์ก๊าซ

โซลีนแบบ V-8 หลายคาร์บูเรเตอร์ (3 dual–throat carburetors) มีกำลังสูงสำหรับใช้กับรถยนต์และมีขนาดความจุ 7000 cc รูปที่ 3-5.2 เป็นเส้นกราฟสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซล 6 สูบ (110 × 135 mm) มีอัตราส่วนการอัด 15:1 ใช้เชื้อเพลิง 50 ซีเทน (Cetane) เป็นเครื่องยนต์ที่ใช้กับรถยนต์เช่นกัน



รูปที่ 3-5.2 เส้นกราฟสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซล

จากรูปทั้งสองจะเห็นได้ว่าเครื่องยนต์ดีเซลมีความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะน้อยกว่าเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนในช่วงที่เครื่องยนต์ยังรับภาระไม่เต็มที่ แรงบิดของเครื่องยนต์ดีเซลค่อนข้างจะคงที่สม่ำเสมอในช่วงความเร็วรอบที่กว้างกว่าเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน ผลที่ได้นี้จะทำให้สมรรถนะในเกียร์สูงสุดดีกว่า เพราะเครื่องยนต์จะสามารถใช้งานได้อย่างยืดหยุ่นมากกว่าในช่วงความเร็วรอบต่างๆกว้างกว่า ยิ่งกว่านั้นการที่เครื่องยนต์ดีเซลให้แรงบิดสูงที่ความเร็วรอบต่ำจะทำให้รถยนต์สามารถใช้ความเร็วต่ำในเกียร์สูงได้ดีกว่าเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนอีกด้วย การที่เครื่องยนต์ดีเซลมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนมากเป็นเพราะเหตุผลดังนี้

1. มีอัตราส่วนการอัดสูงกว่า
2. ใช้อัตราส่วนระหว่างอากาศกับน้ำมันเชื้อเพลิงสูงกว่าเพื่อหลีกเลี่ยงการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์และหลีกเลี่ยงไม่ให้ไอเสียมีควันมาก

ในทางตรงข้าม การใช้อัตราส่วนการอัดสูงในเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนอาจก่อให้เกิดปัญหาเครื่องยนต์น็อก (Combustion knock) เส้นกราฟของกำลังที่

เพลาของเครื่องยนต์มีจุดสูงสุด (เส้นกราฟขึ้นแล้วตกลง) แต่เครื่องยนต์ดีเซลไม่มีเพราะว่าความเร็วสัมพัทธ์สูงสุดถูกจำกัดด้วยความมีน้ำหนักมากของชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ไป-กลับ (คือลูกสูบ) เส้นกราฟของกำลังที่สูญเสียไปกับความเสียดทานจะเพิ่มขึ้นในอัตราสูง ที่ความเร็วสูงทั้ง 2 รูป และเส้นกราฟนี้รวมความเสียดทานของไหลเอาไว้ด้วย

ในทางปฏิบัติทั่วไป เครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้กับรถยนต์จะระบุระดับความสามารถของเครื่องยนต์ไว้ 3 ระดับด้วยกัน คือ

(1) ระดับความสามารถสูงสุดในช่วงเวลาทำงานสั้นๆ

(2) ระดับความสามารถในช่วงเวลาการทำงานที่ยาวนานกว่าในข้อ (1)

(3) ระดับความสามารถต่อเนื่องในการทำงานโดยไม่มีขีดจำกัดของเวลา

3-6 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์

ปัจจัยที่มีผลทำให้กำลังที่หัวสูบซึ่งเครื่องยนต์จริงสามารถผลิตออกมาได้ต่างกับเครื่องยนต์อุดมคติ มีดังนี้

1. สารใช้งานที่ใช้กับเครื่องยนต์จริงไม่ใช่อากาศ แต่เป็นส่วนผสมของอากาศกับเชื้อเพลิง

2. ส่วนประกอบทางเคมีของสารใช้งานเปลี่ยนแปลงไปในขณะเกิดการเผาไหม้

3. กระบวนการเผาไหม้ที่แท้จริงจะไม่เป็นทั้งกระบวนการปริมาตรคงที่และความดันคงที่

4. กระบวนการอัดและขยายตัวไม่เป็นแบบไอเซนโทรปิก

5. ค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซที่เป็นสารใช้งานจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ

6. เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

7. ก๊าซไอเสียที่ตกค้างอยู่ในห้องเผาไหม้จะทำให้ไอดีที่เข้ามาใหม่เปลี่ยนส่วนประกอบทางเคมี อุณหภูมิและจำนวนที่แท้จริง

8. จำนวนไอดีที่เข้ามาใหม่ลดน้อยลงเพราะมี Pumping losses

การถ่ายเทความร้อน

ความร้อนจะถ่ายเททั้ง 2 ทิศทาง คือ ระหว่างก๊าซไอเสียกับผนังกระบอกสูบ และระหว่างส่วนประกอบอื่นๆ ของเครื่องยนต์กับสารทำงาน

ในขณะเกิดการเผาไหม้, ขยายตัว, คายไอเสีย, และช่วงหลังของจังหวะอัด การถ่ายเทความร้อนจะถ่ายเทจากก๊าซไอเสียไปสู่ผนังกระบอกสูบและน้ำระบายความร้อน หรืออากาศภายนอกที่อยู่รอบๆเครื่องยนต์ ในขณะดูดไอดีและช่วงแรกของจังหวะอัด ความร้อนจะถ่ายเทจากผนังกระบอกสูบไปสู่ส่วนผสมไอดี ความร้อนที่สูญเสียให้แก่ผนังกระบอกสูบในช่วงหลังของจังหวะอัดจะมีค่าใกล้เคียงกับความร้อนที่ส่วนผสมไอดีได้รับในช่วงแรกของการอัด จำนวนการสูญเสียความร้อนในจังหวะคายไอเสียเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้และไม่มีประโยชน์ การสูญเสียความร้อนในขณะเกิดการเผาไหม้และขยายตัวทำให้ประสิทธิภาพความร้อนของเครื่องยนต์ลดน้อยลง ตัวประกอบที่มีผลต่อการสูญเสียความร้อนให้แก่ผนังกระบอกสูบมีดังนี้คือ

(1) ช่วงเวลาในการเผาไหม้ของส่วนผสมไอดี ถ้าการเผาไหม้ใช้เวลามากการสูญเสียความร้อนก็จะเพิ่มมากขึ้น

(2) อุณหภูมิของการเผาไหม้ นั้นขึ้นอยู่กับเชื้อเพลิง, อัตราส่วนการอัด, และภาระของเครื่องยนต์ อุณหภูมิจะสูงมากขึ้นถ้าภาระและอัตราส่วนการอัดเพิ่มมากขึ้น ทำให้การสูญเสียความร้อนเพิ่มขึ้น

(3) ความเร็วของเครื่องยนต์ ถ้าความเร็วของเครื่องยนต์เพิ่มมากขึ้นเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้จะน้อยลง ทำให้การสูญเสียความร้อนลดลง

(4) รูปร่างของห้องเผาไหม้ การเพิ่มอัตราส่วนระหว่างพื้นผิวห้องเผาไหม้กับปริมาตรห้องเผาไหม้จะทำให้การสูญเสียความร้อนลดน้อยลง แต่ความแปรปรวน (Turbulence) และการแพร่ของเปลวสันดาปจะมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนให้แก่ผนังห้องเผาไหม้ด้วย

(5) ขนาดของกระบอกสูบ ผลจากขนาดของกระบอกสูบนั้นค่อนข้างจะซับซ้อน การเพิ่มขนาดของกระบอกสูบจะทำให้อัตราส่วนระหว่างพื้นผิวกับปริมาตรของห้องเผาไหม้ลดลงแต่เพิ่มระยะเคลื่อนตัวของเปลวสันดาป ซึ่งมีผลทำให้ระยะเวลาในการเผาไหม้เพิ่มขึ้นและทำให้ความเร็วของเครื่องยนต์ลดลง

(6) จังหวะการจุดระเบิดหรือจังหวะการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง จังหวะที่ถูกต้องจะทำให้การเผาไหม้เกิดเร็วขึ้นโดยปฏิกิริยาหลังการเผาไหม้ลดน้อยลง ดังนั้นจึงทำให้การสูญเสียความร้อนน้อยลง

ไอเสียตกค้าง

ไอเสียที่ตกค้างอยู่ในห้องเผาไหม้จะทำให้ไอดีถูกเจือปนและมีก๊าซเฉื่อยในไอดีเพิ่มมากขึ้น สาเหตุนี้จะมีผลต่อการจุดระเบิดและการเผาไหม้ ไอ

เสียตกค้างจะทำให้ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรของจังหวะดูดลดลงและทำให้อุณหภูมิของไอดีเพิ่มขึ้น สาเหตุทั้งสองนี้จะทำให้จำนวนไอดีลดน้อยลง

ความต้านทานของลิ้น

ในวัฏจักรอุดมคติ (เครื่องยนต์ 4 จังหวะ) จะสมมติว่าความดันของไอดีและไอเสียเท่ากับความดันบรรยากาศ แต่ความเป็นจริงแล้วความดันของไอเสียจะสูงกว่าความดันบรรยากาศและความดันในการดูดไอดีจะต่ำกว่าความดันบรรยากาศ เนื่องจากความต้านทานในท่อร่วมไอดีและไอเสียและที่ลิ้น ความต้านทานของลิ้นจะมีผลต่อประสิทธิภาพเชิงปริมาตร ความต้านทานของลิ้นทำให้เกิด Pumping losses ซึ่งเป็นส่วนที่เป็นลบ ในแผนภาพอินดิเคเตอร์ ถ้าความเร็วของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น Pumping losses ก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย กำลังที่สูญเสียไปในการกวาดล้างไอเสีย และบรรจุไอดีสำหรับเครื่องยนต์ 2 จังหวะจะมีความหมายเหมือนกับ Pumping losses ของเครื่องยนต์ 4 จังหวะ

จังหวะของลิ้น

สำหรับวัฏจักรอุดมคตินั้นใช้สมมติฐานว่าการเปิดและการปิดของลิ้นไอดีและไอเสียเกิดขึ้นที่ศูนย์ตายบนหรือล่าง แต่ในเครื่องยนต์จริงนั้นลิ้นไอเสียจะปิดและลิ้นไอดีจะเปิดที่ศูนย์ตายบนโดยประมาณ แต่การเปิดของลิ้นไอเสียและการปิดของลิ้นไอดีจะห่างจากศูนย์ตายล่างมากพอสมควร ขึ้นอยู่กับความเร็วที่ต้องการเป็นส่วนใหญ่ ผลลัพธ์สุทธิที่เกิดจากการปิด-เปิดลิ้นที่ผิดไปจากศูนย์ตายล่างนี้จะทำให้แผนภาพอินดิเคเตอร์โค้งมนตรงมุมไอเสีย สาเหตุนี้ทำให้งานที่ได้จากเพลาลดลง 1 ถึง 2 %

เวลาในการเผาไหม้

สำหรับวัฏจักรอุดมคตินั้นสมมติว่าเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ที่กระบวนการปริมาตรคงที่เป็นศูนย์ และการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในกระบวนการความดันคงที่จะต้องเป็นอัตราส่วนที่แน่นอนตามความจำเป็นเพื่อรักษาให้ความดันคงที่ แต่ความจริงแล้วกระบวนการเผาไหม้ต้องการช่วงเวลามากพอสมควรขึ้นอยู่กับตัวประกอบอื่นๆหลายประการ การเพิ่มเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้จะทำให้ประสิทธิภาพทางทฤษฎีลดลง 2% ถึง 3 %

การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

จากการวิเคราะห์เชิงปริมาตร (Volumetric analysis) ของส่วนประกอบของไอเสียแสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์มีจำนวนประมาณ 2% ของค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ส่วนผสมที่มีอากาศส่วนเกิน (Excess air) มีแนวโน้มที่จะลดการสูญเสียนี้ให้เป็นศูนย์ ในทางตรงกันข้าม ถ้าส่วนผสมหนาจะมีผลทำให้เกิดเชื้อเพลิงที่ไม่เผาไหม้เนื่องจากมีออกซิเจนไม่เพียงพอ

สภาวะของบรรยากาศ

อุณหภูมิของอากาศ, ความชื้นของอากาศ, และความดันบรรยากาศ มีผลต่ออากาศที่ถูกดูดเข้าเครื่องยนต์ เพราะว่ามวลของอากาศจะเป็นสัดส่วนผกผันกับรากกำลังที่สองของอุณหภูมิ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเครื่องยนต์ความเร็วสูง

สภาวะมาตรฐาน (Standard Temperature and Pressure, STP) คือ $25^{O}C$ และ 760 mm Hg ส่วนสภาวะปกติ (Normal Temperature and Pressure) คือ $0^{O}C$ และ 760 mm Hg แต่กำลังตามมาตรฐานของ SAE นั้นกำหนดไว้ที่ $60^{O}F$ ($15.6^{O}C$) กับ 29.92 in Hg (760 mm Hg)

เพื่อให้ได้สมรรถนะที่สภาวะมาตรฐาน (STP) จึงจำเป็นต้องมีการแก้ไขต่อไปนี้สำหรับความดัน อุณหภูมิและความชื้น

ความดัน ความดันมาตรฐานถือว่ามีค่า 760 mm Hg การแก้ไขให้กำลังที่วัดได้ที่ความดันค่าอื่นเป็นกำลังที่ความดันมาตรฐานจะต้องใช้สูตร

$$P_b \text{ ที่ความดันมาตรฐาน} = P_b \frac{760}{p}$$

เมื่อ p คือ ความดันบรรยากาศในขณะที่ทำการทดสอบวัดค่า P_b ออกมาได้ มีหน่วยเป็น mm Hg

อุณหภูมิ อุณหภูมิมาตรฐานถือว่ามีค่าเท่ากับ $25^{O}C$ ดังนั้น

$$P_b \text{ ที่อุณหภูมิมาตรฐาน} = P_b \sqrt{\frac{273+t}{298}}$$

เมื่อ t คือ อุณหภูมิบรรยากาศในขณะที่ทำการทดสอบหา P_b มีหน่วยเป็น ^{O}C

ความชื้น การแก้ไขสำหรับความดันไอของละอองน้ำที่มีอยู่ในบรรยากาศ จะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความละเอียดแม่นยำมากขึ้น ความดันไอ

(Vapor pressure) สามารถหาได้ถ้ารู้อุณหภูมิกระเปาะแห้งกับอุณหภูมิกระเปาะเปียก และใช้ Psychrometric chart ช่วยในการหา

ถ้า p_v คือ ความดันไอในขณะทำการทดสอบ หน่วยเป็น mm Hg ค่าความดันบรรยากาศที่แก้ไขแล้วในขณะทำการทดสอบจะมีค่าเป็น $p - p_v$ ดังนั้น สูตรที่ใช้ในการหากำลังที่สภาวะบรรยากาศมาตรฐานโดยมีการแก้ไขตัวประกอบทั้ง 3 ประการจะกลายเป็นดังนี้

$$P_b \text{ ที่บรรยากาศมาตรฐาน} = P_b \frac{760}{p - p_V} \sqrt{\frac{273 + t}{298}}$$

จะเห็นได้ว่าผลของการเปลี่ยนแปลงความดันและอุณหภูมิจะมีผลต่อกำลังที่ผลิตได้เมื่อความดันและอุณหภูมิของบรรยากาศในขณะที่ทดสอบเปลี่ยนแปลงไป กำลังเพลาจะแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิสมบูรณ์ของอากาศที่ถูกดูดเข้าเครื่องยนต์

ตัวอย่างที่ 3-6.1 เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน 6 สูบ 4 จังหวะเครื่องหนึ่งมีกระบอกสูบโต 100 mm ช่วงชัก 100 mm เดินเครื่องด้วยความเร็วรอบ 1500 rpm โดยใช้ส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 13.5:1 โดยมวล สมมติว่าอากาศที่ถูกดูดเข้ากระบอกสูบต่อการดูด 1 ครั้ง ซึ่งวัดที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิภายในกระบอกสูบ 80 องศาเซลเซียส มีค่าเป็น 7/8 เท่าของปริมาตรแทนที่ของลูกสูบ ถ้าประสิทธิภาพความร้อนของเครื่องยนต์เท่ากับ 22 % จงหา (1) กำลังที่ผลิตได้ที่ระดับพื้นปกติเมื่อบารอมิเตอร์อ่านได้ 760 mm Hg ค่าความร้อนของน้ำมันเบนซินที่ใช้เท่ากับ 37 670 kJ/kg, และ (2) กำลังที่ผลิตได้ที่ระดับความสูง 1524 m จากระดับน้ำทะเล ถ้าการเพิ่มระดับความสูงแต่ละ 274 m จะทำให้ความดันที่อ่านได้จากบารอมิเตอร์ลดลง 25.4 mm Hg

วิธีทำ ปริมาตรแทนที่ของลูกสูบ 1 สูบ คือ

$$V_d = \frac{\pi}{4} d^2 l = \frac{\pi}{4} (0.1 \text{ m})^2 (0.1 \text{ m}) = 785.4 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

ปริมาตรจริงของอากาศที่ถูกดูดเข้ากระบอกสูบ 1 ครั้งคือ

$$V_d = \frac{7}{8} (785.4 \times 10^{-6} \text{ m}^3) = 687.2 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

มวลของอากาศที่ถูกดูดเข้ากระบอกสูบต่อการดูด 1 ครั้งจะหาได้จากสมการ $pV = mRT$, เนื่องจาก $p = 760$ mm Hg $= 1.013 \times 10^5$ N/m^2 และ $R = 287$ J / kg K ดังนั้น มวลของอากาศ

$$m = \frac{(1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(687.2 \times 10^{-6} \text{ m}^3)}{(278 \text{ J/kg.K}) \times (273 + 80 \text{ K})} = 687.1 \times 10^{-6} \text{ kg}$$

มวลของอากาศที่ถูกดูดเข้าเครื่องยนต์เครื่องนี้ ในขณะที่เดินเครื่องด้วยความเร็ว 1500 rpm คือ

$$\dot{m}_a = m\,n\,k = (687.1\times10^{-6}\ \text{kg})\left(\frac{1500}{2\times60}\times 6\ \text{cyc/s}\right)$$

$$= 51.53\times10^{-3}\ \text{kg/s}$$

ดังนั้น มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้คือ

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_a}{A/F} = \frac{(51.53\times10^{-3}\ \text{kg/s})}{13.5} = 3.817\times10^{-3}\ \text{kg/s}$$

(1) ความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์

$$\dot{q}_{in} = \dot{m}_f\, q_f = (3.817\times10^{-3})\times 37670 = 143.8\ \text{kJ/s}$$

ดังนั้น กำลังที่ผลิตได้ที่ระดับความสูงปกติจะมีค่าเป็น

$$P = \eta_t\ \dot{q}_{in} = (0.22)\ (143.8\ \text{kJ/s}) = 31.64\ \text{kW}$$ **ตอบ**

(2) ที่ระดับพื้นปกติ โจทย์กำหนดอุณหภูมิภายในกระบอกสูบมาให้ แต่ที่ระดับความสูง 1524 m ไม่ได้กำหนดให้ ดังนั้นถ้าสมมติให้อุณหภูมิภายในกระบอกสูบไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำเครื่องยนต์มาใช้งานที่ระดับความสูง 1524 m จากระดับน้ำทะเล กำลังที่เครื่องยนต์ผลิตได้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันบรรยากาศ

ที่ระดับความสูง 1524 m,

ความดันบรรยากาศจะลดลง $= \dfrac{(1524\ \text{m})(25.4\ \text{mm Hg})}{(274\ \text{m})} = 141.3\ \text{mm Hg}$

ดังนั้น กำลังที่ผลิตได้ที่ระดับความสูง 1524 m จะมีค่าเป็น

$$P = \frac{(31.64\ \text{kW})(760-141.3\ \text{mm Hg})}{(760\ \text{mm Hg})} = 25.76\ \text{kW}$$ **ตอบ**

3-7 การสมดุลความร้อน

พลังงานที่ป้อนให้แก่เครื่องยนต์ส่วนหนึ่งเท่านั้นที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นงานกลที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ พลังงานที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่จะสูญเสียไปกับไอเสียและระบบระบายความร้อน ในกรณีที่ต้องการเขียนแผนภาพการสมดุลความร้อน จะต้องทำการทดสอบเพื่อให้ได้ข้อมูลต่อไปนี้

1. พลังงานที่ให้แก่เครื่องยนต์ จะหาได้จากค่าความร้อนของเชื้อเพลิงและความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง
2. ความร้อนที่เปลี่ยนไปเป็นงานกลที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้
3. ความร้อนที่ระบายไปกับระบบระบายความร้อน

4. ความร้อนที่ติดไปกับไอเสีย

5. ความร้อนที่สูญเสียไปอื่นๆ ซึ่งไม่สามารถหาค่าได้ (เช่นการแผ่รังสี ฯลฯ)

สามารถคาดคะเนได้ว่าผลลัพธ์ของการสมดุลความร้อนของเครื่องยนต์ดีเซลจะต้องแตกต่างจากเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน เนื่องจากเครื่องยนต์ดีเซลมีอัตราส่วนการอัดและการขยายตัวสูงกว่า การที่เครื่องยนต์ดีเซลมีอัตราส่วนการอัดสูงจะมีผลทำให้อุณหภูมิก๊าซไอเสียต่ำและทำให้อุณหภูมิของเปลวสันดาปต่ำ ซึ่งจะมีผลทำให้การสูญเสียความร้อนแก่ผนังกระบอกสูบเกิดขึ้นน้อย การใช้ประโยชน์ของพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ดีเซลจะมีค่าสูงกว่าด้วยเพราะว่ามีอัตราส่วนการอัดสูงกว่า

แม้ว่าค่าที่แท้จริงของการใช้ประโยชน์ของพลังงานความร้อนจะขึ้นอยู่กับตัวประกอบหลายประการ เช่น อัตราส่วนการอัด, ภาระของเครื่องยนต์, ปริมาณการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง, จังหวะการจุดระเบิด, ฯลฯ แต่ก็สามารถหาตัวเลขเฉลี่ยสำหรับการสมดุลความร้อนสำหรับเครื่องยนต์ทั้ง 2 ชนิดได้ดังตารางที่ 3-1.1

แทนที่จะเป็นกำลังที่หัวสูบ ดังในตารางที่ 3-1.1 ถ้าในการพิจารณาเป็นงานที่เพลา (หรือกำลังที่เพลา) จะต้องเอาการสูญเสียเชิงกลเข้ามาพิจารณาด้วย ซึ่งโดยทั่วไปการสูญเสียนี้จะรวมอยู่กับความร้อนที่ระบายทิ้งไปกับน้ำหล่อเย็น

ตารางที่ 3-1.1 การสมดุลความร้อนของเครื่องยนต์ทั่วไป

รายการ	เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน	เครื่องยนต์ดีเซล
ความร้อนที่ใช้ประโยชน์ได้ (คือกำลังที่หัวสูบ)	25 – 32%	36 – 45%
ความร้อนที่ระบายออกไปกับน้ำระบายหล่อเย็น	33 – 30%	30 – 28%
ความร้อนที่ติดไปกับไอเสีย	35 – 28%	29 – 20%
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ ที่ไม่สามารถคำนวณได้	7 – 10%	5 – 7%
รวม (เท่ากับพลังงานที่ป้อนให้กับเครื่องยนต์)	100%	100%

ตัวอย่างที่ 3-7.1 ในการทดสอบเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน 4 สูบ 4 จังหวะ ซึ่งมีความโตของกระบอกสูบ 102 mm และช่วงชัก 127 mm เครื่องหนึ่ง ภาระสุทธิที่กระทำบนแขนไดนาโมมิเตอร์ซึ่งยาว 508 mm มีค่า 183.2 N เมื่อความเร็วรอบเป็น 2500 rpm ในตำแหน่งการเปิดลิ้นคันเร่งและที่ความเร็วรอบเดียวกันนี้เมื่อ

ใช้ไดนาโมมิเตอร์เป็นมอเตอร์ขับให้เครื่องยนต์หมุนไปโดยปิดสวิตซ์ไฟจุดระเบิดไว้จะต้องใช้กำลังจากไดนาโมมิเตอร์ 4.69 kW (1) จงหาความดันเฉลี่ยประสิทธิผลหัวสูบและประสิทธิภาพเชิงกล, และ (2) ในขณะที่เดินเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบนี้ เป็นเวลา 3 นาที เครื่องยนต์ใช้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อน 45 375 kJ/kg ไป 0.598 กิโลกรัม และใช้น้ำระบายความร้อนทั้งหมด 22.68 kg โดยน้ำระบายความร้อนมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 55.5°C จงเขียนตารางสมดุลความร้อนของเครื่องยนต์เครื่องนี้

วิธีทำ (1) กำลังเพลาที่เครื่องยนต์ผลิตได้ คือ

$$P_b = 2\pi TN = 2\pi(183.2\ \text{N}\times 0.508\ \text{m})(2500/60\ \text{rps}) = 24.36\ \text{kW}$$

กำลังที่หัวสูบจะมีค่าเป็น

$$P_i = P_b + P_f = 24.36\ \text{kW} + 4.69\ \text{kW} = 29.05\ \text{kW}$$

ประสิทธิภาพเชิงกล

$$\eta_m = \frac{P_b}{P_i} = \frac{24.36\ \text{kW}}{29.05\ \text{kW}} = 0.8386 = 83.86\ \%$$ **ตอบ**

ความดันเฉลี่ยประสิทธิผลหัวสูบ

$$p_i = \frac{P_i}{lAnk} = \frac{(29\ 050\ \text{W})}{(0.127\ \text{m})\times\frac{\pi}{4}(102\ \text{m})^2\left(\frac{2500}{2\times 60}\times 4\ \text{cyc/s}\right)}$$

$$= 0.3359\ \text{N/mm}^2$$ **ตอบ**

(2) ความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์

$$= \dot{m}_f q_f = \left(\frac{0.598}{3\times 60}\text{kg/s}\right)(45\ 375\ \text{kJ/kg}) = 150.75\ \text{kJ/s}$$

ความร้อนที่ระบายไปกับน้ำระบายความร้อน

$$= \dot{m}_w c_w \Delta T = \left(\frac{22.68}{3\times 60}\text{kg/s}\right)(4.186\ \text{kJ/kg K})(55.5\ \text{K})$$

$$= 29.27\ \text{kJ/s}$$

(น้ำมีค่าความร้อนจำเพาะ $c_w = 4.186$ kJ/kg K)

ความร้อนที่เปลี่ยนไปเป็นงานเพลา $= P_b = 24.36$ kJ/s

ตารางสมดุลความร้อนของเครื่องยนต์

ความร้อนเข้า	kJ/s	ความร้อนออก	kJ/s	%
ความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง	150.75	เปลี่ยนเป็นงานเพลา	24.36	16.16
		ระบายไปกับน้ำระบายความร้อน	29.27	19.42
		สูญเสียไปกับไอเสียการแผ่รังสีความร้อน ฯลฯ	97.12	64.42
รวม	150.75	รวม	150.75	100

ความร้อนที่สูญเสียไปกับความเสียดทานจะไม่ปรากฏในตารางสมดุลความร้อนอีก เพราะว่ามันถูกรวมอยู่ในจำพวกความร้อนที่สูญเสียไปกับไอเสีย, น้ำระบายความร้อน, และการแผ่รังสีไปสู่บรรยากาศไว้แล้ว ถ้าคิดความร้อนที่สูญเสียไปกับความเสียดทานอีกจะเป็นการคิดความร้อนค่านี้ซ้ำ 2 ครั้ง

ตัวอย่างที่ 3-7.2 เครื่องยนต์ของรถยนต์เครื่องหนึ่งใช้น้ำมันเบนซินต่อกำลังที่เพลา 1 kW เท่ากับ 0.1072×10^{-3} kg/s ค่าความร้อนของน้ำมันเบนซินเท่ากับ 43.53 MJ/kg สมมติว่าความร้อน 30 เปอร์เซ็นต์ของความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์ถูกน้ำระบายความร้อนถ่ายเทออกไปและน้ำที่ไหลผ่านช่องน้ำระบายความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น 25°C เมื่อไหลออกจากช่องน้ำไปสู่รังผึ้งหม้อน้ำ จงหาอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนต่อกำลัง 1 kW และปริมาตรของอากาศที่จะต้องไหลผ่านรังผึ้งหม้อน้ำต่อกำลัง 1 kW กำหนดให้อากาศมีค่าความร้อนจำเพาะ 1.005 kJ/kg K มีความหนาแน่น 1.263 kg/m^3 และอุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้น 25°C

วิธีทำ ความร้อนที่เชื้อเพลิงให้แก่เครื่องยนต์ในการผลิตกำลังเพลา 1 kW มีค่าเป็น

$$\dot{q}_f = \text{bsfc HV} = (0.1072 \times 10^{-3}) \times 43530$$

$$= 4.666 \text{ kJ/s ต่อกำลังเพลา 1 kW}$$

ความร้อนที่ถ่ายเทไปกับน้ำระบายความร้อน

$$\dot{q}_w = 30\% \text{ ของ } \dot{q}_f = 0.3 \times 4.666$$

$$= 1.4 \text{ kJ/s ต่อกำลังเพลา 1 kW}$$

เนื่องจาก $\dot{q}_w = \dot{m}_w c_w \Delta T$

ดังนั้น อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน

$$\dot{m}_w = \frac{\dot{q}_w}{c_w \Delta T} = \frac{1.4}{4.186 \times 25}$$

$$= 0.0134 \text{ kg/s ต่อกำลังเพลา 1 kW}$$ **ตอบ**

ความร้อนที่ถ่ายเทให้แก่อากาศที่ไหลผ่านรังผึ้งหม้อน้ำจะหาได้จาก

$$\dot{q}_a = \dot{m}_a c_a \Delta T$$

ความร้อนที่ถ่ายเทออกจากน้ำระบายความร้อนจะมีค่าเท่ากับความร้อนที่อากาศรับไว้ ดังนั้นอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านรังผึ้งหม้อน้ำจะมีค่าเป็น

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{q}}{c_a \Delta T} = \frac{1.4}{1.005 \times 25} = 0.0557 \text{ kg/s ต่อกำลังเพลา 1 kW}$$

ดังนั้น ปริมาตรของอากาศที่ไหลผ่านรังผึ้งหม้อน้ำ

$$\dot{V}_a = \frac{\dot{m}_a}{\rho_a} = \frac{0.0557}{1.263} = 0.0441 \text{ m}^3\text{/s ต่อกำลังเพลา 1 kW}$$ **ตอบ**

แบบฝึกหัด

1. เครื่องยนต์ก๊าซโซลีนเครื่องหนึ่งมีความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเพลา 0.09793×10^{-3} kg/s/kW เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพเชิงกล 78 % และอัตราส่วนการอัดเป็น 5.6:1 ถ้าค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเป็น 43.95 MJ/kg จงหา (1) ประสิทธิภาพความร้อนเพลา, (2) ประสิทธิภาพความร้อนหัวสูบ, (3) ประสิทธิภาพอากาศมาตรฐาน, และ (4) ประสิทธิภาพสัมพัทธ์

(ตอบ $\eta_{bt} = 0.2323$, $\eta_{it} = 0.2979$, $\eta_t = 0.498$, $\eta_{ir} = 0.598$, $\eta_{br} = 0.4665$)

2. เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน 6 สูบเครื่องหนึ่งผลิตกำลังที่เพลาได้ 46.3 kW ที่ 3000 rpm ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรที่หาจากอุณหภูมิและความดันปกติมีค่า 85% ความโตของกระบอกสูบเท่ากับความยาวของช่วงชักและมีประสิทธิภาพความร้อน 27% ค่าความร้อนของน้ำมันเบนซิน 43.95 MJ/kg ส่วนผสมไอดี 15:1 จงหาขนาดของกระบอกสูบและช่วงชัก

(ตอบ d = l = 63.07 mm)

3. จากการทดสอบเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน 6 สูบ 4 จังหวะ ที่มีกระบอกสูบโต 127 mm และช่วงชักยาว152.4 mm เครื่องหนึ่ง พบว่าภาระสุทธิของไดนาโมมิเตอร์มีค่า 200 N ที่รัศมีของแขน 762 mm และความเร็วรอบ 3000 rpm ที่ความเร็วรอบและการเปิดลิ้นคันเร่งเดียวกันนี้เครื่องยนต์ต้องใช้กำลังจากไดนาโมมิเตอร์ขับเป็นมอเตอร์เพื่อให้เครื่องหมุนเท่ากับ 7.56 kW (โดยปิดสวิตซ์จุดระเบิดไว้) จงคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงกลและความดันเฉลี่ยประสิทธิผลหัวสูบ อัตราการไหลของเชื้อเพลิงเป็น 5.292×10^{-3} kg/s และค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเท่ากับ 45.375 MJ/kg โดยอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนเท่ากับ 0.227 l/s และน้ำมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 55°C จงเขียนตารางสมดุลความร้อนของเครื่องยนต์นี้

(ตอบ $\eta_m = 0.8962$, imep = 19.65 kN/m^2)

4. ข้อมูลต่อไปนี้เป็นของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน 4 จังหวะที่ทำงานตามวัฏจักรออตโตเครื่องหนึ่ง

ความโตของกระบอกสูบ × ช่วงชัก = 76.2 × 88.9 mm

ปริมาตรระยะห่าง = 81 cm^3

กำลังที่หัวสูบที่ผลิตได้ = 20.9 kW

ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง = 183.33×10^{-3} kg/s

ค่าความร้อนของน้ำมันเบนซิน = 41.86 MJ/kg

จงหาประสิทธิภาพความร้อนที่แท้จริง, ประสิทธิภาพอากาศมาตรฐาน, และประสิทธิภาพสัมพัทธ์ สมมติให้ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ c_p = 0.992 kJ/kg K, c_v = 0.707 kJ/kg K

(ตอบ $\eta_{it} = 0.2723, \eta_t = 0.5143, \eta_{ir} = 0.5295$)

5.ในระหว่างทำการทดสอบเครื่องยนต์เครื่องหนึ่ง ได้ข้อมูลดังต่อไปนี้

ความโตของกระบอกสูบ × ช่วงชัก = 63.5 × 53.5 mm

จำนวนกระบอกสูบ = 4

ภาระที่แขนไดนาโมมิเตอร์ = 49 N

ความยาวของแขนไดนาโมมิเตอร์ = 1.053 m

ความเร็วรอบ = 4500 rpm

จำนวนเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ = 600 cm^3

เวลาที่ใช้ในการทดสอบ = 220 วินาที

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง = 45.375 MJ/kg

จงหาความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเพลา, ประสิทธิภาพความร้อนเพลา, ความดันเฉลี่ยประสิทธิผลเพลา, และ RAC rating ของเครื่องยนต์เครื่องนี้

(ตอบ bsfc = 0.0847×10^{-3} kg/s/kW, η_{bt} = 0.2602, bmep = 805.9 kN/m^2, RAC Rating = 10 hp)

6. ในการทดสอบเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน 4 สูบ 4 จังหวะ เครื่องหนึ่ง ปรากฏว่ากำลังที่เพลาเมื่อทุกสูบทำงาน คือ 23.9 kW และกำลังที่เพลาเมื่อสูบที่ 1, 2, 3, 4 ไม่ทำงาน คือ 16.1, 16.6, 16.8, 17.2 kW ตามลำดับ จงหากำลังที่หัวสูบและประสิทธิภาพเชิงกลของเครื่องยนต์เครื่องนี้

(ตอบ i = 2809 kW, η_m = 0.827)

7. เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน 4 สูบ 4 จังหวะ เครื่องหนึ่ง มีกระบอกสูบโต 63.5 mm และช่วงชักยาว 95.2 mm จากการทดสอบพบว่าเครื่องนี้สามารถผลิตแรงบิดได้ 62.66 Nm เมื่อหมุนด้วยความเร็วรอบ 3000 rpm ถ้าปริมาตรระยะห่างของแต่ละสูบเท่ากับ 63 cc ประสิทธิภาพความร้อนเพลาที่หาจากวัฏจักรอากาศมาตรฐานเท่ากับ 50 % และค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเท่ากับ 44.58 MJ/kg จงหาความ

สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและความดันเฉลี่ยประสิทธิผลเพลา กำหนดให้ใช้ k = 1.4 สำหรับอากาศ

(ตอบ bsfc = 0.8831×10^{-3} kg/s/kW, bmep = 653 kN/m^2)

8. เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน 4 สูบ 4 จังหวะเครื่องหนึ่ง ใช้เชื้อเพลิงที่ให้ค่าความร้อน 43 950 kJ/kg ไป 1.72kg/min ประสิทธิภาพความร้อนเพลาเท่ากับ 25 % และประสิทธิภาพเชิงกล 85 % ถ้าความดันเฉลี่ยประสิทธิผลมีค่าเป็น 5.513 bar และอัตราส่วนระหว่างความโตของกระบอกสูบกับระยะชักเป็น 1:1.2 จงหาขนาดของกระบอกสูบของเครื่องยนต์นี้โดยใช้ความเร็วสูงสุดของเครื่องยนต์เป็น 3000 rpm แล้วสเกตช์รูปร่างของเครื่องยนต์นี้โดยสมมติขนาดต่างๆให้เหมาะสม

(ตอบ d = 192.5 mm, l = 231 mm)

9. เครื่องยนต์ 6 สูบเครื่องหนึ่งใช้ส่วนผสมน้ำมันเบนซินกับอากาศซึ่งให้พลังงาน 1.03 J/cc อัตราส่วนการอัดเป็น 6:1 และเลขชี้กำลังกำลังของ Compression curves เท่ากับ 1.25 ความเร็วของลูกสูบเท่ากับ 10.17 m/s และความต้านทานการเคลื่อนที่ของรถยนต์ซึ่งรวมความต้านทานของอากาศไว้ด้วยเท่ากับ 1275 N ที่ความเร็ว 96 km/h ประสิทธิภาพความร้อนที่แท้จริงมีค่าเท่ากับ 70 % ประสิทธิภาพความร้อนอุดมคติและประสิทธิภาพเชิงปริมาตรเท่ากับ 80% ถ้าช่วงชักกับความโตของกระบอกสูบเป็นอัตราส่วนกันเท่ากับ 1.25:1 จงหาความโตของกระบอกสูบและช่วงชักของเครื่องยนต์เครื่องนี้ สมมติให้ประสิทธิภาพการส่งกำลังเท่ากับ 85 %

(ตอบ d = 7.61cm, l = 9.51 mm)

10. จงเขียนเส้นกราฟสมรรถนะของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนสำหรับรถยนต์อย่างคร่าวๆ โดยแสดงคุณลักษณะของกำลังที่เพลา, กำลังที่สูญเสียไปกับความเสียดทาน, กำลังที่หัวสูบ, แรงบิด, ความดันเฉลี่ยประสิทธิผลเพลา, ประสิทธิภาพเชิงกล, และความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงโดยเปรียบเทียบกับความเร็วรอบของเครื่องยนต์

11. การทำ Morse test ของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน 4 สูบ เครื่องนี้ ได้ผลดังนี้

กำลังที่เพลาเมื่อทำงานครบทุกสูบ = 74.6 kW
กำลังที่เพลาเมื่อสูบที่ 1 ไม่ทำงาน = 51.1 kW
กำลังที่เพลาเมื่อสูบที่ 2 ไม่ทำงาน = 51.5 kW
กำลังที่เพลาเมื่อสูบที่ 3 ไม่ทำงาน = 53.0 kW
กำลังที่เพลาเมื่อสูบที่ 4 ไม่ทำงาน = 53.3 kW

จงหากำลังที่สูญเสียไปกับความเสียดทาน, กำลังที่หัวสูบ, และประสิทธิภาพเชิงกลของเครื่องยนต์เครื่องนี้

(ตอบ F = 14.9 kW, I = 89.5 kW, $\eta_m = 0.8335$)

12. ในขณะที่ทำการทดสอบเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน 4 สูบที่ใช้กับรถยนต์ซึ่งมีกระบอกสูบโต 85 mm และช่วงชัก 92.2 mm เครื่องหนึ่ง มีความเร็วรอบ 3500 rpm ได้ข้อมูลดังนี้

ความดันเฉลี่ยประสิทธิผลหัวสูบ	= 0.961 MPa
แรงบิดที่เครื่องยนต์ผลิตได้	= 135.6 N m
จำนวนเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ	= 1.36 kg
เวลาที่ใช้ในการทดสอบ	= 5 นาที
ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง	= 44.33 MJ/kg

จงหากำลังที่หัวสูบ, กำลังที่เพลา, ประสิทธิภาพเชิงกล, และประสิทธิภาพความร้อนรวม (Overall thermal efficiency) ของเครื่องยนต์

(ตอบ $P_i = 58.66$ kW, $P_b = 49.7$ kW, $\eta_m = 0.8473$, $\eta_{it} = 0.2910$)

13. เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน 8 สูบที่ใช้กับรถยนต์เครื่องหนึ่ง มีความโตของกระบอกสูบ 85.7 mm ช่วงชัก 82.5 mm และอัตราส่วนการอัด 7:1 เครื่องยนต์เครื่องนี้ถูกทดสอบด้วยไดนาโมมิเตอร์ที่มีแขนยาว 533.5 mm ได้รับภาระที่ปลายแขนไดนาโมมิเตอร์ 400 N ที่ความเร็วรอบ 4000 rpm ในขณะที่เดินเครื่องเป็นเวลา 10 นาทีใช้น้ำมันเชื้อเพลิงไป 4.55 kg ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเท่ากับ 46.04 MJ/kg ปริมาณของอากาศที่ถูกดูดผ่านคาร์บูเรเตอร์เท่ากับ 5.44 kg/min ที่ความดัน 1.007 bar และอุณหภูมิ 21 ^{O}C จงหากำลังที่เพลา, ความดันเฉลี่ยประสิทธิผลเพลา, ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและอากาศจำเพาะเพลา, และประสิทธิภาพเชิงปริมาตร

(ตอบ $P_b = 89.39$ kW, bmep = 704 kN/m^2, bsfc = 8.488×10^{-5} kg/s/kW, bsac = 1.0149×10^{-3} kg/s/kW, $\eta_{bt} = 0.2559$, $\eta_V = 0.6234$)

14. เครื่องยนต์ 4 สูบ 4 จังหวะ เครื่องหนึ่งมีกระบอกสูบโต 70 mm ช่วงชักยาว 90 mm ถูกนำมาทดสอบที่ความเร็วคงที่โดยให้ลิ้นคันเร่งเปิดสุด เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบค่าความร้อน 43.53 MJ/kg และสิ้นเปลืองไป 0.065 kg/min (คงที่) เครื่องยนต์เครื่องนี้ถูกทำ Morse test ด้วยและได้กำลังเพลาเมื่อทำงานครบทุกสูบเท่ากับ 12.1 kW กำลังเพลาเมื่อสูบที่ 1, 2, 3 และ 4 ไม่ทำงานเท่ากับ 8.58, 8.67, 8.73 และ8.62 kW ตามลำดับ จงหากำลังที่หัวสูบ, ประสิทธิภาพเชิงกล, และประสิทธิภาพความร้อนเครื่องยนต์เครื่องนี้

(ตอบ I = 13.8 kW, η_m = 0.8768, η_{it} = 0.2926, η_{bt} = 0.2566)

15. เครื่องยนต์ก๊าซโซลีนเครื่องหนึ่งมีขนาดกระบอกสูบ 250 mm ช่วงชักยาว 350 mm ปริมาตรห้องเผาไหม้ 0.003 m^3 จงหาประสิทธิภาพความร้อนของวัฏจักรอากาศมาตรฐาน และประสิทธิภาพความร้อนหัวสูบ ถ้าอัตราส่วนประสิทธิภาพเป็น 65 %

16. เครื่องยนต์ก๊าซโซลีนเครื่องหนึ่งมีปริมาตรกวาด 500 cm^3 ปริมาตรห้องเผาไหม้เท่ากับ 60 cm^3 จงคำนวณหาประสิทธิภาพความร้อนของเครื่องยนต์ ถ้าประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (Relative efficiency) เท่ากับ 45 %

เอกสารอ้างอิง

1. บัญชา ค้งตระกูล, ปานเพชร ชินินทร, ยงยศ จินารักษ์ (2532). **กลศาสตร์ยานยนต์,** ซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ, หน้า 29-46.
2. เตื้อง โรมา, บัญชา ค้งตระกูล, ประจวบ ส่องรส, สนั่น วงษ์รอด, จำนง นุกูลคาม, ประยูร แซ่กำ และ สมนึก ศักดิ์พลาดิศัย (2521). **คณิตศาสตร์ช่างยนต์และกลศาสตร์วิศวกรรมเบื้องต้น**, โรงพิมพ์ประยูรวงศ์, กรุงเทพฯ, หน้า 78-104.

เอกสารที่แนะนำให้ศึกษาเพิ่มเติม

1. บัญชา ค้งตระกูล, ปานเพชร ชินินทร, ยงยศ จินารักษ์ (2532). **กลศาสตร์ยานยนต์,** ซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ, บทที่ 2 เครื่องยนต์.
2. เตื้อง โรมา, บัญชา ค้งตระกูล, ประจวบ ส่องรส, สนั่น วงษ์รอด, จำนง นุกูลคาม, ประยูร แซ่กำ และ สมนึก ศักดิ์พลาดิศัย (2521) **คณิตศาสตร์ช่างยนต์และกลศาสตร์วิศวกรรมเบื้องต้น**, โรงพิมพ์ประยูรวงศ์, กรุงเทพฯ, บทที่ 7 กำลังและกำลังม้าที่เพลาของเครื่องยนต์.
3. Taborek JJ (1957). **Mechanics of Vehicles**, MACHINE DESIGN Extra copies, Chapter 13 Powerplant characteristics.

บทที่ 4
ระบบเชื้อเพลิง

4-1 เชื้อเพลิง

ส่วนประกอบพื้นฐานของเชื้อเพลิงทั้งหลายคือ**ธาตุ** (Element) **คาร์บอน** และ **ไฮโดรเจน** ซึ่งเมื่อรวมตัวกับออกซิเจนที่อยู่ในอากาศก็จะทำให้เกิดความร้อนขึ้น

เชื้อเพลิงเหลวที่ใช้กับเครื่องยนต์สามารถแบ่งออกเป็น**เชื้อเพลิงที่ระเหย** (Volatile) ซึ่งสามารถระเหยเป็นไอที่อุณหภูมิปกติ กับ**เชื้อเพลิงที่ไม่ระเหย** (Non-volatile) ซึ่งจะไม่ระเหยเป็นไอที่อุณหภูมิปกติ

เชื้อเพลิงที่ระเหย เช่น น้ำมันก๊าซโซลีน (Gasoline หรือ Petrol), เบนโซล (Benzole), แอลกอฮอล์ (Alcohol), และ น้ำมันก๊าด (Kerosene) ใช้กับเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยประกายไฟ

เชื้อเพลิงที่ไม่ระเหยคือน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel oil หรือน้ำมันข้นซึ่งเป็นน้ำมันเกรดตั้งแต่น้ำมันดีเซลจนถึงน้ำมันเตา) และน้ำมันก๊าซ (Gas oil) เชื้อเพลิงเหล่านี้ใช้กับเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยการอัด

เชื้อเพลิงทั้งหลายนี้ประกอบด้วยไฮโดรเจนกับคาร์บอน (เรียกว่าไฮโดรคาร์บอน) แต่แอลกอฮอล์มีออกซิเจนอยู่ด้วย

ธาตุคือสสารซึ่งไม่สามารถแยกออกเป็นสสารอื่นๆได้อีกต่อไป ธาตุประกอบด้วยอนุภาคที่เล็กที่สุดซึ่งไม่สามารถแยกอีกต่อไปได้ เรียกว่า**อะตอม** (Atom) อะตอมของธาตุใดๆก็ตามจะเหมือนกันอย่างแท้จริง มันจะมีน้ำหนักเท่ากันและเป็นอนุภาคที่เล็กที่สุดของธาตุนั้นๆเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี **ธาตุอโลหะ**ทั่วไปคือก๊าซไฮโดรเจน, ออกซิเจนกับไนโตรเจน, และคาร์บอนที่เป็นของแข็ง **ธาตุโลหะ**ทั่วไปคือตะกั่ว, ดีบุก, ทองแดง, อะลูมิเนียม, และเหล็ก

สารประกอบ (Compound) ประกอบด้วยธาตุหลายอย่างมารวมกันในสัดส่วนที่แน่นอนและยึดเข้าด้วยกันด้วยแรงทางเคมี รูปโฉมที่ปรากฏและคุณสมบัติของสารประกอบจะไม่เหมือนกับธาตุที่ประกอบเป็นสารประกอบนั้นๆ เช่น น้ำเป็นสารประกอบที่ประกอบด้วยไฮโดรเจนกับออกซิเจน

สารผสม (Mixture) ประกอบด้วยธาตุหรือสารประกอบต่างๆซึ่งยังคงรักษาคุณลักษณะและคุณสมบัติของธาตุหรือสารประกอบนั้นๆไว้ได้ ยกตัวอย่าง เช่น ออกซิเจนซึ่งรวมอยู่กับไนโตรเจนในอากาศยังคงช่วยให้เกิดการเผาไหม้

เช่นเดียวกับออกซิเจนบริสุทธิ์ ก๊าซที่ใช้ในการเชื่อมก๊าซอยู่ในรูปที่เป็นส่วนผสม เมื่อมันไหลออกจากหัวเชื่อมก๊าซ น้ำและคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดขึ้นหลังจากเกิดการเผาไหม้

โมเลกุล (Molecule) คืออนุภาคที่เล็กที่สุดของสสารซึ่งจะสามารถอยู่ในสถานะอิสระได้ โมเลกุลอาจสร้างขึ้นจากหนึ่งอะตอมหรือหลายอะตอมมารวมกัน ยกตัวอย่างเช่น หนึ่งโมเลกุลของน้ำประกอบด้วยไฮโดรเจนสองอะตอมกับออกซิเจนหนึ่งอะตอม ความใกล้ชิดระหว่างโมเลกุลสามารถพิจารณาได้จากสถานะของสสารว่าเป็นก๊าซ, ของเหลว, หรือของแข็ง โมเลกุลของของแข็งจะอยู่ชิดกันกว่าโมเลกุลของของเหลว และโมเลกุลของของเหลวจะอยู่ชิดกันมากกว่าโมเลกุลของก๊าซ โมเลกุลของของเหลวและก๊าซมีการเคลื่อนที่มากและการเคลื่อนที่นี้จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อได้รับความร้อน โมเลกุลของก๊าซจะมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างโมเลกุล

มวลอะตอม (Atomic mass) ของธาตุใดธาตุหนึ่งก็คือตัวเลขที่แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างมวลของอะตอมของธาตุนั้นหนึ่งอะตอมกับมวลของไฮโดรเจนหนึ่งอะตอม มวลอะตอมของไฮโดรเจนคือ 1

มวลโมเลกุล (Molecular mass) ของสสารคือตัวเลขที่แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างมวลของโมเลกุลของสสารนั้นๆหนึ่งโมเลกุลกับมวลของไฮโดรเจนหนึ่งอะตอม ถ้าทราบจำนวนและชนิดของอะตอมในหนึ่งโมเลกุลก็จะสามารถหามวลโมเลกุลได้จากการเอามวลอะตอมมารวมกัน

4-1.1 สัญลักษณ์และสูตรทางเคมี

สัญลักษณ์ทางเคมีที่แสดงถึงธาตุต่างๆได้มาจากชื่อในภาษาละตินของธาตุนั้น ยกตัวอย่างเช่น ชื่อในภาษาละตินของทองแดงคือ Cuprum และสัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับทองแดงคือ Cu

ไฮโดรเจนมีสัญลักษณ์เป็น H หนึ่งโมเลกุลของไฮโดรเจนประกอบด้วยสองอะตอม ดังนั้นจึงเขียนเป็น H_2 ตัวห้อย (Subscript) 2 หมายความว่ามันประกอบด้วยสองอะตอม เนื่องจากไฮโดรเจนมีมวลอะตอมเป็น 1 ดังนั้นมวลโมเลกุลของไฮโดรเจนจึงเป็น 2 สัญลักษณ์ $2H_2$ หมายถึงสองโมเลกุลของไฮโดรเจน แต่ละโมเลกุลมีอยู่ 2 อะตอม มวลโมเลกุลของ $2H_2$ จึงเป็น $2 \times 2 = 4$ ในทำนองเดียวกัน H_2O (สูตรทางเคมีของน้ำ) หมายถึง 2 อะตอมของไฮโดรเจนรวมกับออกซิเจน 1 อะตอม มวลโมเลกุลของน้ำคือ

$$H_2O = (1 \times 2) + (16 \times 1) = 18$$

เนื่องจากมวลอะตอมของออกซิเจนเป็น 16

สำหรับออกเทน (Octane) ซึ่งมีสูตรทางเคมี C_8H_{18} หมายความว่า 8 อะตอมของคาร์บอนรวมตัวกับ 18 อะตอมของไฮโดรเจน เพราะฉะนั้นมวลโมเลกุลของออกเทนคือ

$$C_8H_{18} = (12 \times 8) + (1 \times 18) = 114$$

ในทำนองเดียวกัน สูตรทางเคมีของเบนซีน (Benzene) คือ C_6H_6 ดังนั้นมวลโมเลกุลของเบนซีน คือ

$$C_6H_6 = (12 \times 6) + (1 \times 6) = 78$$

ตารางที่ 4-1.1 มวลอะตอมและมวลโมเลกุลของธาตุและสารประกอบพื้นฐาน

ธาตุหรือสารประกอบ	สัญลักษณ์	มวลอะตอม	มวลโมเลกุล
ไฮโดรเจน	H	1	2
คาร์บอน	C	12	12
ไนโตรเจน	N	14	28
ออกซิเจน	O	16	32
ซัลเฟอร์	S	32	32
คาร์บอนโมน็อกไซด์	CO	-	28
คาร์บอนไดอ๊อกไซด์	CO_2	-	44
ไอน้ำ หรือ น้ำ	H_2O	-	18
ซัลเฟอร์ไดอ๊อกไซด์	SO_2	-	64
มีเทน	CH_4	-	16

เชื้อเพลิงที่ระเหยได้จากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมดิบซึ่งประกอบด้วยสารประกอบต่างๆที่เดือดอยู่ระหว่างอุณหภูมิ 135°F (57.2°C) ถึง 400°F (204.4°C) ในระหว่างกระบวนการกลั่นจะมีการเก็บรวบรวมไอของสารประกอบในช่วงของอุณหภูมิต่างๆแล้วนำมาทำให้ควบแน่น เชื้อเพลิงที่เรียกกันว่าก๊าซโซลีนที่ถูกทำให้**แตกตัว** (Cracked gasoline) นั้นผลิตขึ้นโดยทำให้น้ำมันดิบได้รับอุณหภูมิและความดันสูง

ลำดับส่วน (Fraction) จากการกลั่นของเชื้อเพลิงแบ่งออกทางเคมีเป็นสามอนุกรมคือ อนุกรมพาราฟิน (Paraffins) C_xH_{x+2}, อนุกรมเนฟทีน (Naphthenes) C_xH_{2x}, และอนุกรมอะโรเมติก (Aromatics) C_xH_{2x-6}

สูตรเคมี C_xH_{x+2} หมายความว่าถ้าในหนึ่งโมเลกุลประกอบด้วยคาร์บอน 8 อะตอม, x = 8, ดังนั้นโมเลกุลนี้จะมีไฮโดรเจนจำนวน (2×8) + 2 = 18 อะตอม นั่นคือ

$$C_xH_{x+2} = C_8H_{18}$$

ลำดับส่วนเชื้อเพลิงในอนุกรมทั้งสามและข้อมูลอื่นๆได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-1.2

ตารางที่ 4-1.2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิง	สัญลักษณ์	ความถ่วงจำเพาะ	จุดเดือด ^{O}F (^{O}C)	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ Btu/lb (kJ/kg)	A/F โดยมวล	ช่วงของค่าความร้อนค่าต่ำ Btu/lb (MJ/kg)
Paraffin series						19,400 (45.130)
Hexane	C_6H_{14}	0.663	156 (68.9)	156 (362.9)	15.2	ถึง
Heptane	C_7H_{16}	0.691	209 (98.3)	133 (309.4)	15.1	19,700 (45.828)
Octane	C_8H_{18}	0.709	258 (125.6)	128 (297.8)	15.05	
Nonane	C_9H_{20}	0.723	302 (150)	_	15	
Decane	$C_{10}H_{22}$	0.735	343 (172.8)	108 (251.2)	15	
Undecane	$C_{11}H_{24}$	0.746	383 (195)	-	-	
Naphthene series						18,890 (43.943)
Cyclohexane	C_6H_{12}	0.780	178 (81.1)	156 (362.9)	14.7	ถึง
Hexahydrotoluene	C_7H_{14}	0.770	212 (100)	138 (321.0)	14.7	18,940 (44.060)
Hexahydroxylene	C_8H_{16}	0.756	246 (118.9)	133 (309.4)	14.7	
Aromatic series						18,500 (43.037)
Benzene	C_6H_6	0.884	176 (80)	172 (400.1)	13.2	ถึง
Toluene	C_7H_8	0.870	230 (110)	151 (351.3)	13.4	19,250 (44.781)
Xylene	C_8H_{10}	0.862	284 (140)	145 (337.3)	13.6	
Alcohols						10,000 (23.263)
Ethyl alcohol	C_2H_5O	0.806	173 (78.3)	397 (923.5)	8.95	ถึง
Methyl alcohol	CH_4O	0.800	149 (65)	512 (1191.1)	6.44	11,800 (27.450)

4-1.2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิง

จุดวาบไฟ (Flash point) คืออุณหภูมิที่ทำให้เชื้อเพลิงกลายเป็นไออยู่บนผิวหน้าของเชื้อเพลิงมากเพียงพอที่จะเกิดการวาบไฟ (Flash) ชั่วขณะเมื่อนำเปลวไฟเข้าไปใกล้กับไอเชื้อเพลิง

จุดติดไฟ (Fire point) คืออุณหภูมิที่ทำให้น้ำมันกลายเป็นไอมากเพียงพอที่จะเกิดการเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง มีค่าสูงกว่า Flash point ประมาณ $20^{\circ}F$ ($11.2^{\circ}C$)

จุดเดือด (Boiling point) คืออุณหภูมิในขณะที่เชื้อเพลิงเกิดการเดือด เชื้อเพลิงแต่ละชนิดมีค่าของจุดเดือดต่างกันออกไปและเป็นสิ่งที่ใช้วัดความสามารถในการระเหย (Volatility) อย่างหนึ่ง

ความสามารถในการระเหย (Volatility) เป็นการวัดความรวดเร็วในการระเหยของเชื้อเพลิงและปริมาณของการอุ่น (Pre-heating) ที่ต้องการในการทำให้เชื้อเพลิงเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการอุ่นจะมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับค่าความร้อนแฝง เชื้อเพลิงส่วนมากมีสารบางส่วนที่ระเหยง่ายมาก สิ่งนี้จะทำให้เครื่องยนต์เริ่มติดเครื่องได้ง่าย (Easy start) ในสภาวะที่อากาศในบรรยากาศเย็นถ้าเชื้อเพลิงมีค่าความร้อนแฝงมาก เช่นในเชื้อเพลิงแอลกอฮอล์และเบนโซล การเริ่มติดเครื่องยนต์ในขณะอากาศเย็นจะทำได้ยาก และจะยากยิ่งขึ้นถ้าท่อทางดูดต่างๆมีลักษณะยาวและเย็น (ทำให้เกิดการควบแน่นได้อย่างรวดเร็ว) ในสภาวะอากาศที่หนาวเย็นมากมักจะเริ่มติดเครื่องยนต์โดยใช้ Ether (เป็นน้ำมันระเหยเร็ว)

ค่าความร้อน (Calorific value หรือ Heating value) ของเชื้อเพลิงคือปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากเชื้อเพลิงในปริมาณหนึ่งหน่วยเมื่อมีการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ เชื้อเพลิงที่มีไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบจะมีทั้ง**ค่าความร้อนค่าสูง** (Higher heating value) และ**ค่าความร้อนค่าต่ำ** (Lower heating value) ในการคำนวณค่าประสิทธิภาพความร้อนของเครื่องยนต์นั้นจะใช้ค่าความร้อนค่าต่ำ เพราะว่าน้ำในสภาพไอที่เกิดจากการเผาไหม้ไฮโดรเจนที่อยู่ในก๊าซไอเสียนั้นออกจากห้องเผาไหม้ไปสู่ระบบไอเสียโดยไม่ควบแน่นและไม่คายความร้อนแฝงออกมา

ตัวเลขออกเทน (Octane number) ของเชื้อเพลิงก็คือแนวโน้มที่จะเกิดการเผาไหม้แบบระเบิด (Detonation หรือการระเบิดรุนแรง หรือเรียกว่าการน็อก) ของเชื้อเพลิง **ไอโซออกเทน** (Iso-octane) มีคุณสมบัติในการต้านทานการน็อก (Knock) สูงและถูกกำหนดให้มีค่าตัวเลขออกเทนเป็น 100 **เฮพเทน** (Heptane) ซึ่งมีคุณสมบัติเกิดการน็อกได้ง่ายถูกกำหนดให้มีตัวเลขออกเทนเป็น 0 ค่าตัวเลขออกเทนของเชื้อเพลิงใดๆจะหาได้โดยการทดสอบเชื้อเพลิงนั้นๆกับเครื่องยนต์ทดสอบมาตรฐาน โดยสังเกตผลลัพธ์เมื่อเกิดการน็อกขึ้นว่าตรงกับเชื้อเพลิงที่เป็นส่วนผสมระหว่างไอโซออกเทนกับเฮพเทนในอัตราส่วนเท่าใด

ปริมาณเป็นร้อยละของไอโซออกเทนในเชื้อเพลิงที่เป็นส่วนผสมก็คือตัวเลขออกเทนของเชื้อเพลิงที่นำมาทดสอบ ยกตัวอย่างเช่น เมื่อนำเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งมาทดสอบกับเครื่องยนต์มาตรฐานพบว่ามีคุณสมบัติในการน็อกเหมือนกับเชื้อเพลิงที่เป็นส่วนผสมซึ่งประกอบด้วยไอโซออกเทน 73% กับเฮพเทน 27% ดังนั้นตัวเลขออกเทนของเชื้อเพลิงที่นำมาทดสอบคือ 73

สารต้านการน็อก (Anti-detonators) คือสสารที่เติมลงไปในเชื้อเพลิงเพื่อหน่วงอัตราการเผาไหม้และมีผลให้การเผาไหม้แบบระเบิดลดลง **สารเติมแต่ง** (Additive) ที่เติมลงไปตามปกติประกอบด้วย Tetra-ethyl-lead ประมาณ 0.04% ผสมกับ Ethyl bromide ในปริมาณเล็กน้อย เมื่อใช้สารเติมแต่งลงไปนี้พบว่าจะมีตะกั่วออกมาจากเครื่องยนต์ในรูปของไอ Lead bromide, และผลของการกัดกร่อนและการเกิดคราบเขม่าของตะกั่วจับที่ลิ้นและหัวเทียนลดลง การเผาไหม้ด้วยการระเบิดจะลดลงได้โดยการใช้เชื้อเพลิงที่เป็นส่วนผสมของก๊าซโซลีน, เบนโซล และแอลกอฮอล์

คุณสมบัติอื่นๆของเชื้อเพลิงคือค่าความถ่วงจำเพาะ, ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ และค่าความหนืด (Viscosity) คุณสมบัติเหล่านี้จะได้กล่าวถึงต่อไปในหัวข้ออื่น

ก๊าซโซลีนมีส่วนประกอบของคาร์บอน 85% กับไฮโดรเจน 15% โดยประมาณ ปริมาณไฮโดรเจนของเชื้อเพลิงเป็นสาเหตุปฐมภูมิของการเผาไหม้แบบระเบิด ซึ่งมีอยู่เป็นปริมาณมากในก๊าซโซลีนทางการค้าที่มีอนุกรมพาราฟินในปริมาณสูง เชื้อเพลิงที่มีลำดับส่วนอนุกรมอะโรเมติกในปริมาณมากจะมีส่วนที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้แบบระเบิดต่ำ เชื้อเพลิงแบบนี้มีค่าความร้อนแฝงสูงและสามารถใช้กับเครื่องยนต์ที่มีอัตราส่วนการอัดสูงได้อย่างน่าพึงพอใจ

น้ำมันก๊าดเป็นเชื้อเพลิงที่ไม่ใช้กับเครื่องยนต์ของรถยนต์แต่ใช้กับเครื่องยนต์สำหรับเครื่องจักรกลการเกษตรและรถแทรกเตอร์ อุณหภูมิในการกลั่นของน้ำมันก๊าดอยู่ระหว่าง 300^{O}F (148.9^{O}C) ถึง 550^{O}F (287.8^{O}C) เพราะฉะนั้นน้ำมันก๊าดจึงมีความสามารถในการระเหยน้อยกว่าก๊าซโซลีนที่ความดันบรรยากาศ เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันก๊าดมักจะเริ่มติดเครื่องด้วยก๊าซโซลีนก่อน ความร้อนในเครื่องยนต์ที่อุ่นแล้วจะช่วยให้น้ำมันก๊าดระเหยเป็นไอง่ายขึ้น

เบนโซลเป็นเชื้อเพลิงที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิน (Coal tar) ซึ่งเป็นผลผลิตพลอยได้จากการผลิตก๊าซจากถ่านหิน เบนโซลเป็นส่วนผสมของอนุกรมอะโรเมติก ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเบนซีน C_6H_6 ซึ่งกลั่นตัวระหว่าง 180^{O}F (82.2^{O}C) ถึง 250^{O}F (121.1^{O}C) เบนโซลเป็นเชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับเครื่องยนต์ที่

มีอัตราส่วนการอัดสูงเพราะว่ามันมีแนวโน้มที่จะเกิดการเผาไหม้แบบระเบิดน้อยกว่าก๊าซโซลีน

เชื้อเพลิงจากพืช เมทิลแอลกอฮอล์ CH_4O และเอทิลแอลกอฮอล์ C_2H_6O ผลิตขึ้นจากพืชและมีออกซิเจนอยู่ในตัวทั้งคู่ เชื้อเพลิงทั้งคู่นี้ระเหยง่ายมาก ค่าความร้อนของแอลกอฮอล์ต่ำกว่าเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนมากและในการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ต้องการส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงประมาณ 9 ต่อ 1 ค่าความร้อนแฝงที่มีค่าสูงของแอลกอฮอล์จะป้องกันการเกิดการเผาไหม้แบบระเบิดเมื่อความดันในการอัดต่ำกว่า 200 psi (13.78 bar) และต้องการอัตราส่วนการอัดอยู่ระหว่าง 10 ถึง 14 ต่อ 1 เพื่อให้ได้ความร้อนมากเพียงพอสำหรับการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์และมีประสิทธิผล

เชื้อเพลิงที่ไม่ระเหย เชื้อเพลิงประเภทนี้คือน้ำมันข้น (Fuel oil) และน้ำมันก๊าซ (Gas oil) ซึ่งมีอยู่หลายเกรด ตั้งแต่น้ำมันใส (Light oil หรือเรียกว่าน้ำมันดีเซล) และน้ำมันก๊าซใสที่ใช้กับเครื่องยนต์ของรถยนต์จนถึงน้ำมันเกรดข้น (เรียกว่าน้ำมันเตา) ที่ใช้กับหม้อน้ำอุตสาหกรรมและเรือเดินสมุทร ค่าความหนืดของเชื้อเพลิงที่ไม่ระเหยที่ $60^{\circ}F$ ($15.6^{\circ}C$) แปรผันอยู่ระหว่าง 55 ถึง 750 Redwood seconds และค่าความถ่วงจำเพาะแปรผันอยู่ระหว่าง 0.75 ถึง 0.9 ส่วนประกอบทางเคมีโดยประมาณของเชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับเครื่องยนต์ของรถยนต์มีคาร์บอน 87%, ไฮโดรเจน 11%, ออกซิเจน 1%, และซัลเฟอร์ 1% ปริมาณซัลเฟอร์ควรจะต่ำเพราะว่ามันจะทำให้เกิดกรดกำมะถันในระหว่างเกิดการเผาไหม้ กรดนี้จะทำให้ผนังกระบอกสูบเกิดการกัดกร่อน

จุดแข็งเป็นไข (Congealing point) คืออุณหภูมิซึ่งไขพาราฟินเริ่มเกิดขึ้นและต้านทานการไหลของน้ำมันข้น หม้อกรองน้ำมันข้นมักจะติดอยู่ใกล้กับส่วนที่ร้อนของเครื่องยนต์ด้วยสาเหตุนี้

จุดวาบไฟของน้ำมันข้นทั้งหลายนั้นสูง จึงไม่เสี่ยงต่อการถูกไฟไหม้

ตัวเลขซีเทน (Cetane number) คือประมาณเป็นร้อยละโดยปริมาตรของ**ซีเทน**ที่มีอยู่ในส่วนผสมของซีเทน $C_{16}H_{34}$ กับ Alpha-methyl-naphthalene $C_{11}H_{10}$ ซึ่งมีคุณภาพในการจุดระเบิด (Ignition quality) เหมือนกันกับคุณภาพในการจุดระเบิดของเชื้อเพลิงที่ถูกนำมาทดสอบ คุณภาพในการจุดระเบิดหาได้โดยเดินเครื่องยนต์ทดสอบมาตรฐานภายใต้สภาวะที่กำหนดและใช้เครื่องมือวัดจำนวนมุมหมุนของเพลาข้อเหวี่ยง (Crank angle) เป็นองศาระหว่างจุดเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงกับจุดเริ่มต้นที่ความดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เชื้อเพลิงที่มีมุมจุดระเบิดล่าช้า (Delay angle) น้อยจะเริ่มติดเครื่องได้ง่าย, เดินเครื่องได้เรียบมาก

และมีการกระแทกจากการเผาไหม้ (Combustion shock) น้อย เชื้อเพลิงชนิดนี้จะถูกกำหนดให้มีตัวเลขซีเทนตั้งแต่ 60 หรือสูงกว่า เชื้อเพลิงที่มีมุมจุดระเบิดล่าช้ามากจะมีคุณภาพในการจุดระเบิดต่ำและมีค่าตัวเลขซีเทนอยู่ที่ 30

สารเติมแต่งของน้ำมันข้น ค่าตัวเลขซีเทนของเชื้อเพลิงสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการเติม Amyl nitrate หรือ Ethyl nitrate จำนวนหนึ่งซึ่งโดยปกติเป็นปริมาณที่น้อยกว่า 5% สารนี้จะช่วยลดอุณหภูมิจุดระเบิด (Ignition temperature) เพราะฉะนั้นจึงทำให้ความดันสูงสุดในการเผาไหม้ (Maximum combustion pressure) ลดน้อยลง

4-1.3 คุณสมบัติของธาตุและสารประกอบ

คาร์บอน C มีอยู่หลายรูปแบบ มีความแตกต่างทั้งด้านคุณสมบัติทางกายภาพ, สี, ความหนาแน่น, จุดหลอมเหลว และรูปทรงของผลึก รูปแบบของคาร์บอนต่างๆเช่นนั้นเรียกว่า Allotropic form ของคาร์บอน ประกอบด้วย เพชร, กราไฟท์, ถ่าน, คาร์บอนในก๊าซและเขม่า ซึ่งเป็นผงคาร์บอนที่เกิดจากการจับตัวของก๊าซไฮโดรคาร์บอนต่างๆ

ไฮโดรเจน H เป็นก๊าซที่ไม่มีสี, ไม่มีกลิ่น, ไม่มีรส ซึ่งเบากว่าอากาศ เป็นก๊าซที่เผาไหม้ได้ แต่ไม่ช่วยทำให้เกิดการเผาไหม้

ออกซิเจน O เป็นก๊าซที่ไม่มีสี, ไม่มีกลิ่น, ไม่มีรส ซึ่งหนักกว่าอากาศ เป็นก๊าซที่ไม่เผาไหม้ แต่ช่วยทำให้เกิดการเผาไหม้

ไนโตรเจน N เป็นก๊าซที่ไม่มีสี, ไม่มีกลิ่น, ไม่มีรส ซึ่งหนักกว่าอากาศ ที่ไม่เผาไหม้ และไม่ช่วยทำให้เกิดการเผาไหม้ เมื่อไนโตรเจนถูกทำให้ร้อน มันจะรวมตัวกับโลหะเป็น Nitride ต่างๆ (เช่น การเกิดไนไตรท์ของเพลาข้อเหวี่ยง) และที่อุณหภูมิสูงมากๆ มันจะรวมตัวกับเป็นสารประกอบเรียกว่า Nitric oxide

คาร์บอนมอนอกไซด์ CO เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ในทางปฏิบัติไม่มีกลิ่นและจะเป็นก๊าซพิษอย่างรุนแรง มันจะเบากว่าอากาศเล็กน้อยและเผาไหม้ได้ แต่ไม่ช่วยทำให้เกิดการเผาไหม้

คาร์บอนไดออกไซด์ CO_2 เป็นก๊าซที่ไม่มีสีและไม่มีกลิ่น มีคุณสมบัติเป็นกรดเจือจาง และไม่ช่วยทำให้เกิดการเผาไหม้ มีน้ำหนักมากกว่าอากาศและการประยุกต์ทางอุตสาหกรรมถูกนำไปใช้กับเครื่องทำความเย็น และเครื่องดับเพลิง

สูตรทางเคมีสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นคำสรุปของปฏิกิริยาทางเคมีตามความเป็นจริงในความหมายที่ถูกต้องมากกว่า เนื่องจากมีน้ำหนักอะตอม

ของธาตุต่างๆเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย จึงเป็นไปได้ที่จะคำนวณน้ำหนักของสสารต่างๆ เพราะว่าน้ำหนักของสสารต่างๆจะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดปฏิกิริยาขึ้น สมการเคมีของการเผาไหม้เขียนขึ้นโดยให้ธาตุ, สารประกอบ, และอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้อยู่ด้านซ้ายของสมการและผลผลิตจากการเผาไหม้อยู่ด้านขวาของสมการ ปริมาณต่างๆจะแสดงให้อยู่ในเทอมของปริมาตร เพราะว่าจาก**กฎของ Avogadro** ก๊าซทั้งหลายที่มีปริมาตรเท่ากันที่อุณหภูมิและความดันเดียวกันจะมีจำนวนโมเลกุลเท่ากัน นั่นคือ ปริมาตรเป็นปฏิภาคกับจำนวนโมเลกุล

ทฤษฎีของ Avogadro นี้ต่อไปจะถูกนำไปใช้กับไอน้ำ

การทดลองในห้องปฏิบัติการสามารถแสดงว่าไฮโดรเจนสองหน่วยปริมาตรต้องการออกซิเจนหนึ่งหน่วยปริมาตรสำหรับการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ และผลผลิตที่เกิดขึ้นคือไอน้ำสองหน่วยปริมาตร เครื่องทดลองประกอบด้วยหลอดตัวยู (U-tube) หนึ่งหลอดซึ่งปลายขาข้างหนึ่งถูกปิด ปลายด้านนี้ติดอยู่ในห้องอบ (Heating chamber) ปรอทถูกเติมเข้าไปอยู่ในหลอดเพื่อไปไล่อากาศออกจากปลายด้านปิด จากนั้นไฮโดรเจนสองหน่วยปริมาตรและออกซิเจนหนึ่งหน่วยปริมาตรถูกดูดเข้ามาอยู่ในขาข้างที่ถูกปิดปลาย ห้องอบถูกทำให้ร้อนจนก๊าซมีอุณหภูมิสูงถึง 130^{o}C จากนั้นจึงถ่ายปรอทออกเป็นบางส่วนจนกระทั่งระดับของปรอทในขาทั้งสองสูงเท่ากัน การทำเช่นนี้ก็เพื่อประกันได้ว่าออกซิเจนกับไฮโดรเจนอยู่ที่ความดันบรรยากาศ วัดปริมาตรของก๊าซ แล้วให้ประกายไฟ (Electric spark) ผ่านเข้าไปในหลอดส่วนที่บรรจุก๊าซเพื่อจุดให้ก๊าซเกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็วเกิดเป็นไอน้ำ และไอน้ำนี้มีปริมาตรเท่ากันกับปริมาตรของไฮโดรเจนกับออกซิเจน เพราะฉะนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าไฮโดรเจนสองหน่วยปริมาตรรวมกับออกซิเจนหนึ่งหน่วยปริมาตรได้ไอน้ำสองหน่วยปริมาตร เมื่อความดันและอุณหภูมิของก๊าซคงที่

2 โมเลกุลของไฮโดรเจนรวมกับ 1 โมเลกุลของออกซิเจนเกิดเป็น 2 โมเลกุลของไอน้ำ

1 โมเลกุลของไฮโดรเจนรวมกับ 0.5 โมเลกุลของออกซิเจนเกิดเป็น 1 โมเลกุลของไอน้ำ

โมเลกุลของไฮโดรเจนและออกซิเจนมีสองอะตอมทั้งคู่ ดังนั้น

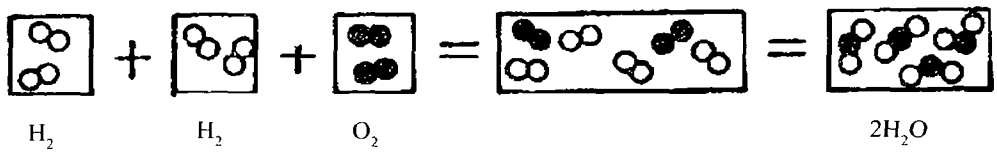
2 อะตอมของไฮโดรเจนรวมกับ 1 อะตอมของออกซิเจนเกิดเป็น 1 โมเลกุลของไอน้ำ สมการคือ

$$H_2 + O = H_2O$$

ตามปกติจะไม่เขียน 0.5 โมเลกุล ดังเช่นที่ได้ทำนี้ สมการตามปกติสำหรับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่นิยมมากกว่าคือ

2 โมเลกุลของไฮโดรเจนรวมกับ 1 โมเลกุลของออกซิเจนเกิดเป็น 2 โมเลกุลของไอน้ำ

ดังนั้น สมการคือ $2H_2 + O_2 = 2H_2O$



H_2 H_2 O_2 $2H_2O$

1 หน่วยปริมาตร + 1 หน่วยปริมาตร + 1 หน่วยปริมาตร = 3 หน่วยปริมาตรผสม = 2 หน่วยปริมาตรรวมตัว

รูปที่ 4-1.1

รูปที่ 4-1.1 เป็นแผนภาพที่แสดงปริมาตรแต่ละหน่วยของออกซิเจนกับไฮโดรเจนที่รวมกันเป็นปริมาตรรวมตัวของไอน้ำ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ปริมาตรที่แยกออกจากกันสามหน่วยรวมกันเป็นปริมาตรผสมสามหน่วย ซึ่งเมื่อรวมกันแล้วเกิดเป็นปริมาตรรวมตัวสองหน่วย

4-1.4 การคำนวณการเผาไหม้

อากาศประกอบด้วยออกซิเจน 23% โดยมวล สิ่งนี้หมายความว่าอากาศ 1 kg มีออกซิเจน 0.23 kg

ถ้าอากาศ 1 kg มีออกซิเจน 0.23 kg, ดังนั้นออกซิเจน 1 kg จะบรรจุอยู่ในอากาศจำนวน 1/0.23 kg = 4.35 kg

อากาศประกอบด้วยไนโตรเจน 77% โดยมวล

ถ้าอากาศ 1kg มีไนโตรเจนอยู่ 0.77 kg, ดังนั้น 1kg ของไนโตรเจนจะบรรจุอยู่ในอากาศจำนวน 1/0.77 kg = 1.3 kg

อากาศประกอบด้วยออกซิเจน 21% และไนโตรเจน 79% โดยปริมาตร

ปริมาณอากาศที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้ไฮโดรเจน

มวลของอากาศที่จำเป็นสำหรับการเผาไหม้ไฮโดรเจน 1 kg อย่างสมบูรณ์ไปเป็นน้ำ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$2H_2 + O_2 = 2H_2O$$

ในทางปฏิบัติตามปกติและเพื่อความสะดวกจะพิจารณาจากเชื้อเพลิงจำนวน 1 kg เสมอ จากสมการ

2×มวลโมเลกุลของไฮโดรเจน + มวลโมเลกุลของออกซิเจน = 2(2+16)

$2 \times 2 + 32 = 36$

ถ้าหน่วยที่ใช้เป็น kg, จะได้

$4\ kg\ H + 32\ kg\ O = 36\ kg\ H_2O$

หารตลอดด้วย 4 เพื่อทำให้มวลของไฮโดรเจนเป็น 1 kg ตามต้องการ จะได้

$1\ kg\ H$ รวมกับ $8\ kg\ O$ ได้ $9\ kg\ H_2O$

เนื่องจากออกซิเจน 1 kg มีอยู่ในอากาศ 4.35 kg ดังนั้นมวลของอากาศที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้ไฮโดรเจน 1 kg คือ $4.35 \times 8 = 34.8\ kg$

ปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากไฮโดรเจน = 144.462 MJ/kg (62,100 Btu/lb)

ปริมาณอากาศที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้คาร์บอนอย่างสมบูรณ์

สมการสำหรับการเผาไหม้คาร์บอนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์คือ

$C + O_2 = CO_2$

มวลโมเลกุลของคาร์บอนบวกกับน้ำหนักโมเลกุลของออกซิเจนคือ

$12 + 32 = 44$

ดังนั้น $12\ kg\ C + 32\ kg\ O = 44\ kg\ CO_2$

$1\ kg\ C + (32/12)\ kg\ O = (44/12)\ kg\ CO_2$

$1\ kg\ C + 2.66\ kg\ O = 3.66\ kg\ CO_2$

เนื่องจากออกซิเจน 1 kg มีอยู่ในอากาศ 4.35 kg ดังนั้นมวลของอากาศที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้คาร์บอน 1 kg คือ $4.35 \times 2.66 = 11.6\ kg$

ปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากคาร์บอนระหว่างการเผาไหม้ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ = 33.825 MJ/kg (14,540 Btu/lb)

ปริมาณอากาศที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้คาร์บอนเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์

สมการสำหรับการเผาไหม้คาร์บอนเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ หรือการเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์คือ

$2C + O_2 = 2CO$

มวลโมเลกุลของคาร์บอนบวกกับมวลโมเลกุลของออกซิเจนคือ

$2 \times 12 + 32 = 2(12+16)$

ดังนั้น $24\ kg\ C + 32\ kg\ O = 56\ kg\ CO_2$

$1\ kg\ C + (32/24)\ kg\ O - (56/24)\ kg\ CO_2$

$$1\ kg\ C + 1.33\ kg\ O = 2.33\ kg\ CO_2$$

เนื่องจากออกซิเจน 1 kg มีอยู่ในอากาศ 4.35 kg ดังนั้นมวลของอากาศที่ต้องการสำหรับออกซิเจน 1.33 kg คือ $4.35 \times 1.33 = 5.8$ kg

ปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากคาร์บอนระหว่างการเผาไหม้ไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ = 10.236 MJ/kg (4,400 Btu/lb)

ปริมาณอากาศที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้คาร์บอนมอนอกไซด์ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์

สมการการเผาไหม้คาร์บอนมอนอกไซด์ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ คือ

$$2CO + O_2 = 2CO_2$$

มวลโมเลกุลของคาร์บอนบวกกับมวลโมเลกุลของออกซิเจนคือ

$$2 \times 28 + 32 = 2(12+32)$$

ดังนั้น

$$56\ kg\ C + 32\ kg\ O = 88\ kg\ CO_2$$

$$1\ kg\ C + (32/56)\ kg\ O = (88/56)\ kg\ CO_2$$

$$1\ kg\ C + 0.571\ kg\ O = 1.571\ kg\ CO_2$$

เนื่องจากออกซิเจน 1 kg มีอยู่ในอากาศ 4.35 kg ดังนั้นมวลของอากาศที่ต้องการสำหรับออกซิเจน 0.571 kg คือ $4.35 \times 0.571 = 2.484$ kg

ปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากคาร์บอนมอนอกไซด์ระหว่างการเผาไหม้ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ = 10.119 MJ/kg (4,350 Btu/lb)

ปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากคาร์บอนจำนวน 1 kg ทั้งหมดมีค่าคงที่เสมอ โดยมันอาจจะเผาไหม้ไปเป็น CO_2 โดยตรงหรือเป็น CO ก่อนแล้วจึงเป็น CO_2 ในภายหลัง

ปริมาณอากาศที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้ซัลเฟอร์

สมการสำหรับการเผาไหม้ซัลเฟอร์เป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คือ

$$S + O_2 = SO_2$$

มวลโมเลกุลของซัลเฟอร์บวกกับมวลโมเลกุลของออกซิเจนคือ

$$32 + 32 = 64$$

ดังนั้น

$$32\ kg\ S + 32\ kg\ O = 64\ kg\ SO_2$$

$$1\ kg\ S + 1\ kg\ O = 2\ kg\ SO_2$$

เนื่องจากออกซิเจน 1 kg มีอยู่ในอากาศ 4.35 kg ดังนั้นมวลของอากาศที่ต้องการสำหรับซัลเฟอร์ 1 kg คือ 4.35 kg

ปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากซัลเฟอร์ระหว่างการเผาไหม้ไปเป็นซัลเฟอร์ได ออกไซด์ = 9.306 MJ/kg (4,000 Btu/lb)

ปริมาณอากาศที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิง

เพื่อทำให้การคำนวณง่ายขึ้น ควรจำข้อมูลตัวเลขต่อไปนี้ให้ได้ คือ

ไฮโดรเจน 1 kg ต้องการออกซิเจน 8 kg

คาร์บอน 1 kg ต้องการออกซิเจน 8/3 = 2.66 kg

ซัลเฟอร์ 1 kg ต้องการออกซิเจน 1 kg

ออกซิเจน 1 kg มีอยู่ในอากาศ 4.35 kg

ตัวอย่างที่ 4-1.1 จงหามวลของอากาศที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของก๊าซโซลีนซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน 84% และไฮโดรเจน 16% โดยมวล

วิธีทำ O ที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้ 1 kg C = 2.66 kg

เพราะฉะนั้น O ที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้ 0.84 kg C = 0.84×2.66

= 2.2344 kg

O ที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้ 1 kg H = 8 kg

เพราะฉะนั้น O ที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้ 0.16 kg H = 0.16×8

= 1.28 kg

เพราะฉะนั้น O ที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้รวม = 2.2344 + 1.28

= 3.5144 kg

เพราะฉะนั้น อากาศที่ต้องการ = $3.5144 \times 4.35 = 15.288$ kg

ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงโดยมวลคือ 15.288:1 **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 4-1.2 จงหามวลของอากาศที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของน้ำมันข้นซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน 87%, ไฮโดรเจน 16%, ซัลเฟอร์ 1% และออกซิเจน 1% โดยมวล

วิธีทำ O ที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้ C = 0.87×2.66 = 2.314 kg

O ที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้ H = 0.11×8 = 8.88 kg

O ที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้ S = 0.01×1 = 0.01 kg

รวม = 3.204 kg

เชื้อเพลิงให้ออกซิเจน 0.01 kg ต่อเชื้อเพลิง 1 kg

ดังนั้น มวลจริงของออกซิเจนที่ต้องการจากอากาศ = 3.204-0.01 = 3.194 kg

เพราะฉะนั้น อากาศที่ต้องการ = $3.194 \times 4.35 = 13.894$ kg

ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงโดยมวลคือ 13.894:1 **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 4-1.3 จงหามวลของอากาศที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของเบนโซล C_6H_6 จำนวน 1kg

วิธีทำ มวลโมเลกุลของเบนโซล C_6H_6 คือ 12(6) + 1(6) = 72+6 = 78

ปริมาณเป็นร้อยละโดยมวลของคาร์บอน = 72/78(100) = 92

ปริมาณเป็นร้อยละโดยมวลของไฮโดรเจน = 6/78(100) = 8

O ที่ต้องการสำหรับ C = 0.92(2.66) = 2.45 kg

O ที่ต้องการสำหรับ H = 0.08(8) = 0.64 kg

รวม = 3.09 kg

อากาศที่ต้องการ = 3.09(4.35) = 13.4 kg

ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงโดยมวลคือ 13.4:1 **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 4-1.4 จงหามวลของอากาศที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของเอทิลแอลกอฮอล์ C_2H_6O จำนวน 1kg

วิธีทำ มวลโมเลกุลของเอทิลแอลกอฮอล์ C_2H_6O คือ 12(2) + 1(6) + 16(1) = 24+6+16 = 46

ปริมาณเป็นร้อยละโดยมวลของคาร์บอน = 24/46(100) = 52

ปริมาณเป็นร้อยละโดยมวลของไฮโดรเจน = 6/46(100) = 13

O ที่ต้องการสำหรับ C = 0.52(2.66) = 1.383 kg

O ที่ต้องการสำหรับ H = 0.13(8) = 1.04 kg

รวม = 2.423 kg

เชื้อเพลิงให้ออกซิเจน 0.35 kg ต่อเชื้อเพลิง 1 kg

ดังนั้น มวลจริงของออกซิเจนที่ต้องการจากอากาศ = 2.423-0.35 = 2.073 kg

เพราะฉะนั้น อากาศที่ต้องการ = $2.073 \times 4.35 = 9$ kg

ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงโดยมวลคือ 9:1 **ตอบ**

การหาค่าความร้อนด้วยการคำนวณ

เมื่อทราบส่วนประกอบของเชื้อเพลิงก็จะสามารถหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงได้ วิธีนี้ไม่แม่นยำเท่ากับการหาค่าความร้อนด้วยบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (Bomb calorimeter) ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณจึงเป็นค่าโดยประมาณเท่านั้น

ตัวอย่างที่ 4-1.5 จงหาค่าความร้อนของเฮกเซน C_6H_{14} เชื้อเพลิงนี้ประกอบด้วยคาร์บอน 84% และไฮโดรเจน 16%

วิธีทำ ความร้อนที่ปลดปล่อยจาก 1 kg C = 33.825 MJ

ความร้อนที่ปลดปล่อยจาก 0.84 kg C = 0.84(33.825) = 28.413 MJ

ความร้อนที่ปลดปล่อยจาก 1 kg H = 144.462 MJ

ความร้อนที่ปลดปล่อยจาก 0.16 kg H = 0.16(144.462) = 23.114 MJ

เพราะฉะนั้น

ค่าความร้อนค่าสูงของเฮกเซน = 28.413+23.114 = 51.527 MJ

ในการหาค่าความร้อนค่าต่ำจะต้องรู้ค่าความร้อนแฝงของไอน้ำที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวของไฮโดรเจนและออกซิเจน แล้วนำมาลบออกจากค่าความร้อนค่าสูง

ออกซิเจนที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้ไฮโดรเจน = 8(0.16) = 1.28 kg

ไอน้ำที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้จะมีมวลเท่ากับมวลของไฮโดรเจนกับออกซิเจนซึ่งมารวมตัวกับไฮโดรเจน เพราะฉะนั้น

มวลของ H_2O = 0.16 kg H + 1.28 kg O = 1.44 kg

ความร้อนแฝงของไอน้ำที่เกิดขึ้น = น้ำหนักของไอน้ำ× ความร้อนแฝงของไอน้ำ

= 1.44(1024.2 kJ) = 1475 kJ

เพราะฉะนั้น

ค่าความร้อนแฝงค่าต่ำ = ค่าความร้อนแฝงค่าสูง – ค่าความร้อนแฝงของไอน้ำ

= 51.527 – 1475 = 50.054 MJ/kg of hexane **ตอบ**

4-2 ระบบเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน

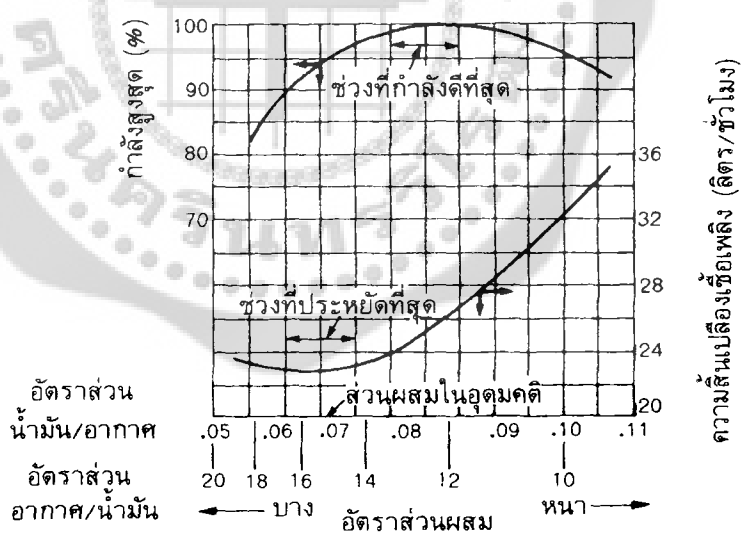
4-2.1 ส่วนผสมไอดีของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน

การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนต้องการอากาศ 15 kg ต่อจำนวนเชื้อเพลิง 1 kg โดยประมาณ ถ้าอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงน้อยกว่านี้จะทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งจะทำให้เกิดสิ่งที่ไม่เผาไหม้เนื่องจาก

ออกซิเจนไม่เพียงพอไปในก๊าซไอเสียขึ้น ในทางปฏิบัติแล้วสำหรับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ต้องการให้เชื้อเพลิงคลุกเคล้าผสมเข้ากับอากาศส่วนเกิน (ที่มากกว่าความต้องการตามทฤษฎี) อย่างทั่วถึง

ส่วนผสมบางจะใช้เพื่อให้ได้การประหยัดดีที่สุดเนื่องจากจะสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงน้อยที่สุด ส่วนผสมหนาจะใช้เพื่อลดการน็อก (Combustion knock) และเพื่อให้ได้กำลังสูงสุดจากเครื่องยนต์ แต่อากาศกับไอน้ำมันเชื้อเพลิงที่กระจายและผสมกันอย่างไม่ถูกต้องทำให้จำเป็นต้องใช้ส่วนผสมหนาเพื่อให้ได้กำลังจากเครื่องยนต์สูงสุด

การเอาชนะผลของการเจือจางและการรั่วของอากาศเนื่องจากมีสุญญากาศสูงในท่อร่วมไอดีภายใต้สภาวะเดินเบาหรือสภาวะไม่มีภาระ ทำให้จำเป็นต้องใช้ส่วนผสมหนาด้วยเช่นกัน ที่สภาวะสูงสุดจะต้องการกำลังสูงสุด แต่ที่ภาระน้อย (ลิ้นคันเร่งเปิดเพียงบางส่วน) ต้องการความประหยัดสูงสุด ดังนั้นช่วงของอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ต้องการจึงแปรเปลี่ยนตั้งแต่จุดที่ต้องการประหยัดที่สุดไปจนถึงจุดที่ต้องการกำลังสูงสุด คาร์บูเรเตอร์สมัยใหม่ถูกออกแบบมาให้สามารถผสมไอดีให้ได้อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงภายใต้ทุกสภาวะการทำงานได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 4-2.1 เส้นกราฟแสดงผลของส่วนผสมไอดีที่มีต่อประสิทธิภาพและกำลัง

ในรูปที่ 4-2.1 ได้แสดงเส้นกราฟที่ใช้สำหรับการพิจารณาผลของส่วนผสมที่มีต่อประสิทธิภาพและกำลัง ซึ่งประสิทธิภาพสูงสุดจะเกิดได้ก็ต่อเมื่อส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงอยู่ระหว่าง 15.3:1 ถึง 16:1 เมื่อส่วนผสมเพิ่มมากกว่า 18:1 ประสิทธิภาพจะลดลงอย่างรวดเร็ว และส่วนผสมจะ

กลายเป็นส่วนผสมบางจนการเผาไหม้ไม่อาจเกิดขึ้นได้ กำลังสูงสุดจะได้ที่ส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงอยู่ระหว่าง 12:1 ถึง 13.5:1 แต่สำหรับการเดินเบาต้องการส่วนผสมหนาเพียงประมาณ 18:1 ก็เพียงพอแล้ว

4-2.2 คาร์บูเรเตอร์

หน้าที่ของคาร์บูเรเตอร์คือทำการผสมส่วนผสมของเชื้อเพลิง (เช่น ก๊าซโซลีน) ที่เป็นฝอยละเอียดให้เข้ากับอากาศในสัดส่วนที่ถูกต้องและเหมาะสมกับความต้องการของเครื่องยนต์ภายใต้สภาวะการทำงาน (ความเร็วและภาระ) ต่างๆของเครื่องยนต์ คาร์บูเรเตอร์จะติดอยู่กับท่อร่วมไอดี การจัดเตรียมส่วนผสมสำหรับการเผาไหม้จากเชื้อเพลิงกับอากาศเรียกว่า Carburation ตัวประกอบที่มีผลต่อกระบวนการจัดเตรียมส่วนผสมสำหรับการเผาไหม้คือ

1. เวลา การจัดเตรียมส่วนผสมไอดีในเครื่องยนต์สมัยใหม่ที่มีความเร็วสูงต้องทำในเวลาที่สั้นมากเป็นเศษส่วนในร้อยของวินาที เครื่องยนต์ที่มีความเร็วสูงจะมีเวลาในการผสมเชื้อเพลิงน้อยมาก ในช่วงเวลาอันสั้นนี้การผลิตส่วนผสมสำหรับการเผาไหม้ที่มีคุณภาพสูงทำได้ยากมาก

2. อุณหภูมิ สภาวะแวดล้อมของอากาศที่อยู่รอบข้าง (อุณหภูมิ ความดันและปริมาณความชื้น), ภาระของเครื่องยนต์, ลักษณะการออกแบบของระบบป้อนเชื้อเพลิง, และคุณสมบัติของเชื้อเพลิง มีอิทธิพลเหนือสถานะทางความร้อนของส่วนผสมไอดีก่อนเกิดการเผาไหม้ ส่วนผสมที่มีอุณหภูมิสูงจะทำให้เชื้อเพลิงกลายเป็นไอได้ดี ซึ่งจะมีผลทำให้การผสมส่วนผสมไอดีดีขึ้น ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์จะเพิ่มขึ้น แต่กำลังจะลดลงเนื่องจากส่วนผสมไอดีที่มีอุณหภูมิสูงจะมีมวลของไอดีน้อยลง

3. การออกแบบ การออกแบบคาร์บูเรเตอร์เกี่ยวกับส่วนประกอบ, ระบบให้ความร้อนสำหรับส่วนผสม, รูปร่างและพื้นที่หน้าตัดของท่อไอดี, และรูปร่างของห้องเผาไหม้ มีผลต่อการจ่ายส่วนผสมไอดีเข้ากระบอกสูบและความคงที่ของส่วนประกอบทางเคมีของส่วนผสมในสภาวะการทำงานต่างๆของเครื่องยนต์มาก ถ้าออกแบบไม่ดีการจ่ายผสมเข้ากระบอกสูบแต่ละสูบอาจจะไม่เท่ากัน หรือส่วนประกอบทางเคมีของส่วนผสมอาจจะไม่คงที่เหมือนกันทุกสูบก็ได้

4. คุณภาพของเชื้อเพลิง น้ำมันก๊าซโซลีนประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนต่างๆที่มีความไวในการระเหยต่างกัน น้ำมันก๊าซโซลีนที่มีความ

ไวในการระเหยสูงผสมเข้ากับอากาศได้ดีกว่าน้ำมันก๊าซโซลีนที่มีความไวในการระเหยต่ำ

คาร์บูเรเตอร์จะต้องทำงานตามความต้องการหลักต่อไปนี้ได้ คือ

(1) ทำให้สามารถสตาร์ทเครื่องยนต์ได้ง่ายไม่ว่าอุณหภูมิจะสูงหรือต่ำก็ตาม

(2) สามารถเปลี่ยนแปลงส่วนผสมได้ตามความต้องการของเครื่องยนต์ และตามสภาพการทำงานของเครื่องยนต์ทุกสภาพ

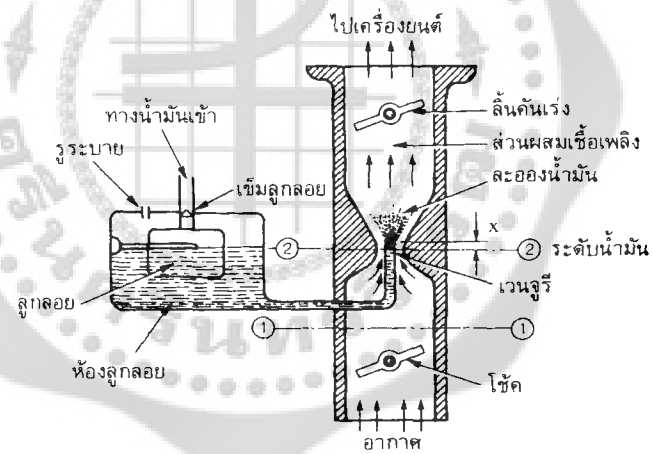
(3) ทำงานได้เรียบและสม่ำเสมอ แม้ว่าเครื่องยนต์จะมีการเปลี่ยนแปลงภาระและความเร็ว

(4) มีความสามารถในการเร่งเครื่องสูง หรือเร่งเครื่องได้ดี

(5) ให้กำลังสูงสุดที่ภาระสูงสุด

(6) ประหยัดเชื้อเพลิงดีที่สุด

เพื่อให้เข้าใจหลักการพื้นฐานที่ใช้กับคาร์บูเรเตอร์ทั้งหลาย จึงควรจะพิจารณาคาร์บูเรเตอร์ที่แสดงไว้ในรูปที่ 4-2.2 ก่อน



รูปที่ 4-2.2 คาร์บูเรเตอร์

ในระหว่างจังหวะดูด สุญญากาศที่เกิดขึ้นภายในกระบอกสูบจะทำให้อากาศไหลผ่านหลอดโช้ค (Choke tube) เมื่ออากาศไหลผ่านเวนจูรี (Venturi) ความดันของอากาศจะลดลงแต่ความเร็วจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นความดันที่ด้านบนของเจ็ต (Jet) จึงน้อยกว่าความดันบรรยากาศ แต่ความดันที่กดบนผิวของน้ำมันก๊าซโซลีนในห้องลูกลอยมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ เนื่องจากมีรูระบายเจาะไว้ทางด้านบน ความแตกต่างของความดันนี้ทำให้น้ำมันก๊าซโซลีนถูกฉีดเป็นฝอยด้วยเจ็ตเข้ามาผสมกับอากาศที่ไหลผ่านเจ็ต ทำให้เกิดส่วนผสมของอากาศกับ

เชื้อเพลิงขึ้นในท่อโช้ค และส่งเข้าไปในเครื่องยนต์ผ่านลิ้นคันเร่งและท่อร่วมไอดี ระดับของเชื้อเพลิงในห้องลูกลอยจะถูกรักษาให้คงที่ด้วยการเคลื่อนไหวของลูกลอยและเข็มลูกลอย ปริมาณของส่วนผสมที่ส่งเข้าเครื่องยนต์จะถูกควบคุมด้วยลิ้นคันเร่ง แต่ลิ้นโช้คจะควบคุมความหนาหรือบางของส่วนผสมในขณะสตาร์ทเครื่อง

คาร์บูเรเตอร์สมัยใหม่จะมีระบบอยู่ 6 ระบบ โดยระบบต่างๆจะทำงานร่วมกันเพื่อให้สามารถทำหน้าที่ตามความต้องการของเครื่องยนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพดังนี้

1. ระบบลูกลอย ระบบลูกลอยจะรักษาให้การส่งเชื้อเพลิงเข้าห้องลูกลอยอยู่ในระดับที่พอเหมาะ และระดับความสูงของน้ำมันเชื้อเพลิงจะต้องสูงใกล้เคียงกับปลายของเมนเจ็ต (Main jet) โดยต่ำจากปลายของเมนเจ็ตลงมาประมาณ 2 mm ถ้าระดับความสูงของน้ำมันเชื้อเพลิงในห้องลูกลอยสูงมากเกินไปจะทำให้เกิดส่วนผสมหนา และถ้าต่ำเกินไปก็จะทำให้เกิดส่วนผสมบาง

2. ระบบเดินเบาและความเร็วต่ำ ระบบนี้จะควบคุมการจ่ายเชื้อเพลิงในขณะเดินเบา เครื่องยนต์รับภาระน้อยและที่ความเร็วต่ำ คือที่ความเร็วตั้งแต่ 0 ถึง 32 km/h ที่ความเร็วต่ำผลของเวนจูรีจะเกิดขึ้นน้อยและลิ้นคันเร่งเกือบจะปิด การไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงจะผ่านไปทางวงจรบายพาส (By-pass circuit) เข้าไปในช่องจ่ายน้ำมันเดินเบา การไหลจะควบคุมด้วยเข็มปรับตัวหนึ่ง

3. ระบบความเร็วสูง ระบบจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงหลักจะจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงให้เหมาะสมกับการทำงานของเครื่องยนต์ตั้งแต่จุดที่เครื่องยนต์เดินเบาไปจนถึงจุดที่มีความเร็วสูงสุดเมื่อลิ้นคันเร่งเกือบจะเปิดสุด เมื่อรถยนต์มีความเร็วสูงกว่า 32 km/h ลิ้นคันเร่งจะเปิดกว้างมากพอที่จะทำให้อากาศไหลเข้าไปในปริมาณที่เพียงพอและทำให้ความดันตรงปลายของ Main nozzle น้อยกว่าความดันบรรยากาศเล็กน้อย การควบคุมการไหลของเชื้อเพลิงสำหรับความเร็วปานกลางและความเร็วสูงจะทำได้โดยการปิดกั้นทาง Main jet orifice อย่างถูกต้องโดยอาศัยการปิด-เปิดของลิ้นคันเร่ง

4. ระบบโช้คหรือระบบสตาร์ท ระบบสตาร์ทของคาร์บูเรเตอร์ส่วนมากเป็นลิ้นโช้คที่ติดไว้ในท่อไอดี และเป็นลิ้นอัตโนมัติ เมื่อลิ้นโช้คอยู่ในตำแหน่งเปิดอยู่บางส่วน อากาศจะไหลเข้าไปในคาร์บูเรเตอร์ได้น้อยและเกิดสุญญากาศสูงขึ้นใน Diffuser สาเหตุนี้จะทำให้น้ำมันเชื้อเพลิงไหลออกจากตัวฉีดให้เป็นละออง (Atomizer) เป็นจำนวนมาก ในขณะที่เครื่องยนต์สตาร์ทเครื่องโดยเครื่องยนต์ยังเย็นอยู่ จะมีน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าไปมากและน้ำมันเชื้อเพลิง

ส่วนหนึ่งจะควบแน่นบนผนังของท่อไอดีซึ่งยังเย็นอยู่ทำให้มีน้ำมันเชื้อเพลิงเพียงจำนวนน้อยเท่านั้นที่เข้าไปในกระบอกสูบ ด้วยเหตุนี้การสตาร์ทเครื่องในขณะที่เครื่องยนต์ยังเย็นอยู่จึงจำเป็นต้องใช้ส่วนผสมหนา ระบบโช้คจะประกอบด้วยแกนโช้คและชุดคันโช้ค, ลิ้นโช้ค, สกรูและอุปกรณ์ที่ใช้ในการตั้งตำแหน่งของลิ้น ระบบโช้คอาจจะทำงานด้วยมือหรือทำงานอัตโนมัติก็ได้

5. ระบบกำลังหรือระบบเร่ง ในขณะที่เร่งความเร็วของรถยนต์โดยเปิดลิ้นคันเร่งให้กว้างอย่างรวดเร็ว ช่องทางเดินของห้องผสมไอดีจะใหญ่ขึ้น อากาศซึ่งมีความเฉื่อยน้อยกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงจะมีความเร่งสูงกว่า น้ำมันเชื้อเพลิงจึงไหลในอัตราที่ต่ำกว่าอากาศซึ่งจะมีผลทำให้เกิดส่วนผสมบางและทำให้กำลังตกชั่วขณะ ผลอันนี้เรียกว่า Flat spot เพราะว่ามีน้ำมันเชื้อเพลิงไหลออกจากเมนเจ็ตในปริมาณน้อย การจะเอาชนะข้อบกพร่องอันนี้ คาร์บูเรเตอร์ส่วนมากจึงมีปั๊มเร่งเพื่อฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงผ่านเจ็ตอีกอันหนึ่ง ทำให้ส่วนผสมหนาเพิ่มขึ้นในขณะที่ลิ้นคันเร่งเปิดกว้างอย่างรวดเร็ว โดยทั่วไปแล้วปั๊มเร่งจะถูกขับให้ทำงานโดยใช้ระบบกลไก

6. ระบบประหยัด (Compensating system) ระบบนี้เป็นวงจรที่ทำให้การทำงานของคาร์บูเรเตอร์ดีขึ้นโดยใช้ Economizer ตัวหนึ่ง ระบบนี้จะสามารถสร้างส่วนผสมที่ประหยัดเมื่อเครื่องยนต์มีภาระน้อยและความเร็วปานกลาง ส่วนผสมที่ให้ความประหยัดสูงสุดจะเปลี่ยนไปเป็นส่วนผสมที่ให้กำลังสูงสุดถ้ามีการจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงเพิ่มเติมขึ้นอีกเมื่อต้องการกำลังจากเครื่องยนต์เพิ่มมากขึ้น

คาร์บูเรเตอร์จำแนกได้เป็น (1) แบบตั้งหรือแบบดูดขึ้น, (2) แบบนอนหรือแบบดูดด้านข้าง, และ (3) แบบกลับหรือแบบดูดลง โดยเปรียบเทียบกับตำแหน่งของเวนจูรี

ส่วนผสมระหว่างอากาศกับน้ำมันเชื้อเพลิงในคาร์บูเรเตอร์แบบดูดขึ้นจะเคลื่อนที่ขึ้นข้างบน คาร์บูเรเตอร์แบบดูดด้านข้างจะให้ประสิทธิภาพในการส่งไอดีสูงเพราะว่ามีข้อต่อที่ต่อเข้ากับท่อร่วมสั้นกว่าแบบอื่นๆ แต่ไม่เหมาะสมกับการใช้หม้อกรองอากาศ ส่วนคาร์บูเรเตอร์แบบดูดลงมีทิศทางการไหลของส่วนผสมไอดีลงข้างล่าง คาร์บูเรเตอร์แบบนี้จะให้การบำรุงรักษาได้สะดวกและสามารถติดตั้งหม้อกรองอากาศได้ง่าย และไม่มีอันตรายที่เกิดจากการฟุ้งกระจายของสารเจือปนที่มีน้ำหนักมากกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งปนอยู่ในน้ำมันเชื้อเพลิงอีกด้วย เพราะสารเจือปนที่เป็นของเหลวเหล่านั้นไหลไปในทิศทางเดียวกันกับความโน้มถ่วง

4-2.3 การไหลของอากาศ

เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ จึงสมมติให้อากาศเป็นของไหลที่ยุบตัวไม่ได้ (Incompressible) และการไหลของอากาศเป็นแบบไอเซนโทรปิกโดยไม่มีความเสียดทาน ซึ่งกฎการไหลของอากาศจะสามารถใช้สมการพลังงานของ Bernoulli ได้ คือ

$$\frac{C^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z = \text{ค่าคงที่} \qquad (4\text{-}2.1)$$

เมื่อ C คือ ความเร็ว

p คือ ความดัน

γ คือ น้ำหนักจำเพาะ

z คือ ระดับความสูงหรือ Elevation head

g คือ ความโน้มถ่วงของโลก

เมื่อตัดความแตกต่างของระดับความสูงออกไป จะเขียนสมการการไหลสำหรับหน้าตัด 1-1 และหน้าตัด 2-2 ในรูปที่ 4-2.2 ได้เป็น

$$\frac{C_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma_a} = \frac{C_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma_a} \qquad (4\text{-}2.2)$$

เมื่อ γ_a คือ น้ำหนักจำเพาะของอากาศซึ่งมีค่าเท่ากันทั้ง 2 หน้าตัด เนื่องจากสมมติให้อากาศเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้

เมื่อเปรียบเทียบ C_1 กับ C_2 แล้วเราจะเห็นว่า C_1 มีค่าน้อยกว่า C_2 มากจนสามารถตัดทิ้งไปได้ ดังนั้นความเร็วทางทฤษฎีของอากาศตรงคอคอดจะมีค่าเป็น

$$C_2 = \sqrt{2g\frac{(p_1 - p_2)}{\gamma_a}} = \sqrt{\frac{2g\ \Delta p_a}{\gamma_a}} \qquad (4\text{-}2.3)$$

เมื่อ $\Delta p_a = p_1 - p_2$

เนื่องจากมีการลู่ตัว (Contraction) ของลำอากาศที่ไหลผ่านและมีความเสียดทานเกิดขึ้นในการไหลที่แท้จริง ความเร็วที่แท้จริงของอากาศที่ไหลผ่านคอคอดจึงมีค่าเป็น

$$C_a = c_a C_2 = c_a \sqrt{\frac{2g\ \Delta p_a}{\gamma_a}} \qquad (4\text{-}2.4)$$

เมื่อ c_a คือ Coefficient of discharge สำหรับอากาศ และ $\Delta p_a / \gamma_a$ เป็น Head ที่ทำให้เกิดการไหลของอากาศ

มวลของอากาศที่ไหลผ่านคอคอดภายในเวลา 1 หน่วย คือ

$$\dot{m}_a = \rho_a A_a C_a = \rho_a A_a c_a \sqrt{\frac{2g\ \Delta p_a}{\gamma_a}} = A_a c_a \sqrt{2\rho_a \Delta p_a} \qquad (4\text{-}2.5)$$

สมการ (4-2.5) ซึ่งยึดถือสมมติฐานว่าอากาศเป็นของไหลที่ยุบตัวไม่ได้ที่แสดงไว้นี้จะให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำเพียงพอถ้า Δp_a มีค่าน้อยและเลือกใช้ค่า c_a ได้อย่างถูกต้อง ค่าของ c_a ที่ให้ความละเอียดแม่นยำเพียงพอคือ 0.84

สมการที่ให้ความละเอียดแม่นยำมากกว่านี้จะหาได้โดยไม่มองข้ามผลของการยุบตัวได้ของอากาศ ความเร็วทางทฤษฎีของอากาศที่ไหลผ่านคอคอดสามารถหาได้โดยใช้สมการพลังงานของการไหลอย่างสม่ำเสมอและสมมติให้การไหลเป็นแบบอาเดียแบติก สมการการไหลอย่างสม่ำเสมอของอากาศ 1 kg คือ

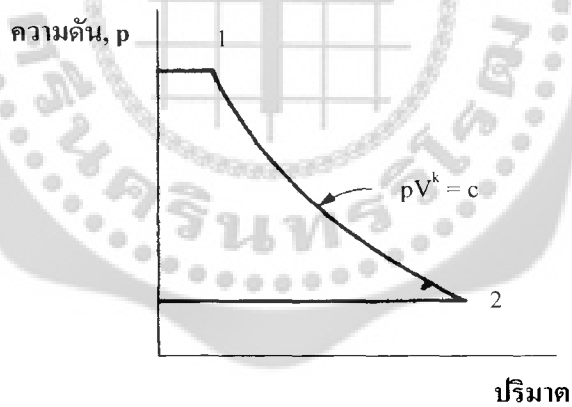
$$q - w = u_2 - u_1 + p_2 v_2 - p_1 v_1 + \frac{C_2^2}{2} - \frac{C_1^2}{2} \qquad (4\text{-}2.6)$$

เนื่องจาก $q = 0$, $w = 0$ และ C_1 มีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ C_2 ดังนั้น

$$\frac{C_2^2}{2} = (u_1 + p_1 v_1) - (u_2 + p_2 v_2) = h_1 - h_2$$

หรือ $$C_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2)} \qquad (4\text{-}2.7)$$

เมื่อ $h_1 - h_2$ คือค่าความแตกต่างของเอนทัลปี



รูปที่ 4-2.3 แผนภาพความดันกับปริมาตร

สมการที่แสดงสถานะของก๊าซตามกระบวนการอาเดียแบติกคือ pv^k = ค่าคงที่ ดังนั้นความแตกต่างของเอนทัลปี (ดูรูปที่ 4-2.3) คือ

$$h_1 - h_2 = \int_2^1 v\, dp = \frac{k}{k-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2)$$

= พื้นที่ใต้เส้นกราฟในแผนภาพความดันกับปริมาตร (ดูรูปที่ 4-2.3)

ดังนั้น สมการ (4-2.7) จึงเปลี่ยนเป็น

$$C_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_1 v_1 (1 - \frac{p_2 v_2}{p_1 v_1})} \qquad (4\text{-}2.8)$$

เนื่องจาก $p_1 v_1^k = p_2 v_2^k$ ดังนั้น

$$\frac{v_2}{v_1} = (\frac{p_1}{p_2})^{\frac{1}{k}} = (\frac{p_2}{p_1})^{-\frac{1}{k}}$$

เพราะฉะนั้น $$C_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \qquad (4\text{-}2.9)$$

และความเร็วที่แท้จริงของอากาศตรงคอคอดจะมีค่าเป็น

$$C_a = c_a C_2 = c_a \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_1 \left[1 - (\frac{p_2}{p_1})^{\frac{k-1}{k}} \right]} \qquad (4\text{-}2.10)$$

เนื่องจาก $$\dot{m}_a = \frac{C_a A_a}{v_2}$$

และ $$v_2 = v_1 (\frac{p_1}{p_2})^{\frac{1}{k}}$$

ดังนั้น $$\dot{m}_a = A_a c_a \sqrt{\frac{2k}{k-1} (p_1 / v_1) \left[(p_2 / p_1)^{\frac{2}{k}} - (p_2 / p_1)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \qquad (4\text{-}2.11)$$

ตัวอย่างที่ 4-2.1 (1) จงหาสมการสำหรับใช้ในการหาความเร็วของก๊าซที่ไหลผ่านลิ้นของเครื่องยนต์ในเทอมของความโตของกระบอกสูบ (d) ช่วงชัก (1) เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องลิ้น (D) ระยะยกตัวของลิ้น (L) จำนวนลิ้นไอดีหรือไอเสีย (m) จำนวนมุมที่เพลาข้อเหวี่ยงหมุนไปเมื่อลิ้นเปิด (θ) ความเร็วรอบของเพลาข้อเหวี่ยง (N) และ Coefficient of discharge (c_d)

(2) จงหาความเร็วของก๊าซที่ไหลผ่านลิ้นของเครื่องยนต์ที่มีกระบอกสูบโต 150 mm ช่วงชัก 200 mm หมุนด้วยความเร็วรอบ 2100 rpm เครื่องยนต์มีลิ้น 2 ลิ้นต่อ 1 สูบ ช่องลิ้นมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm ระยะยกตัวของลิ้น 12 mm และจำนวนองศาที่ลิ้นเปิดคือ 14 องศาก่อนศูนย์ตายบนและ 40 องศาหลังศูนย์ตายล่าง กำหนดให้ c_d เท่ากับ 0.60

(3) จงอธิบายสั้นๆ ถึงปัจจัยที่ควรพิจารณาในการหาขนาดและจังหวะการทำงานของลิ้น

วิธีทำ (1) ปริมาตร (เป็น m^3) ของก๊าซที่ไหลผ่านลิ้นจะเท่ากับปริมาตรแทนที่ของลูกสูบ คือ

$$V_d = \frac{\pi}{4} d^2 l$$

และลิ้นจะเปิดเป็นเวลา (เป็น s)

$$t = \frac{60}{N} \times \frac{\theta}{360}$$

ดังนั้น อัตราการไหลเฉลี่ย (เป็น m^3/s) ของก๊าซที่ไหลผ่านลิ้นคือ

$$\dot{V}_d = \frac{V_d}{t} = \frac{\pi}{4} d^2 1 \times \frac{360N}{60\theta} = 1.5\ \pi d^2 1\ N/\theta$$

พื้นที่ (เป็น m^2) ซึ่งก๊าซไหลออกจากช่องลิ้นคือ

$$A = c_d\ \pi\ D\ L\ m$$

ดังนั้น ความเร็ว (เป็น m/s) ของก๊าซที่ไหลผ่านช่องลิ้นคือ

$$C = \frac{\dot{V}_d}{A} = \frac{1.5\pi d^2 1N/\theta}{c_d \pi DLm} = \frac{1.5d^2 1N}{c_d \theta DLm}$$ **ตอบ**

(2) ความเร็วของก๊าซที่ไหลผ่านลิ้นคือ

$$C = \frac{1.5(0.15\ m)^2(0.2\ m)(2100\ cyc/s)}{0.6(14^O + 180^O + 40^O)(0.04\ m)(0.012\ m)(2)}$$

$$= 101.7\ m/s$$ **ตอบ**

(3) ปัจจัยต่อไปนี้มีความสำคัญต่อการหาขนาดและจังหวะของลิ้น

ขนาด พื้นที่ของลิ้น (คือ เส้นรอบวง×ระยะยกตัวของลิ้น) ควรจะมากเพียงพอที่จะทำให้การ Throttling ของก๊าซมีน้อยที่สุด และช่องทางเดินของก๊าซที่จะไปสู่ลิ้นนั้นต้องเรียบ การ Throttling ของไอดีที่ไหลเข้าเครื่องยนต์จะทำให้ไอดีมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จึงมีผลให้ปริมาตรจำเพาะของไอดีเพิ่มมากขึ้นเป็นเหตุทำให้ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรลดลง

แต่เส้นรอบวงของลิ้นไม่ควรจะมากเกินไป ในกรณีที่เป็นลิ้นไอเสียจะทำให้พื้นผิวที่ร้อนเพิ่มมากขึ้นและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มการน็อกเนื่องจากการชิงจุดระเบิด (Pre-ignition) ภาระที่กระทำกับลิ้นจะเพิ่มขึ้นด้วย เพราะฉะนั้นลิ้นไอเสียจึงควรจะมีขนาดเล็กกว่าลิ้นไอดี แต่ควรจะมีระยะยกตัวของลิ้นมากกว่าลิ้นไอดี ซึ่งจะทำให้ได้พื้นที่เพียงพอและแก้ข้อยุ่งยากดังกล่าวไปได้

จังหวะของลิ้น ลิ้นไอดีควรจะเปิดช้า (ที่ศูนย์ตายบน) เพื่อป้องกันไม่ให้ก๊าซไอเสียไหลกลับเข้ากระบอกสูบผ่านทางลิ้นไอดีซึ่งมีความดันต่ำกว่า แต่ถ้าเปิดช้าเกินไปเวลาที่ใช้ในการดูดไอดีจะสั้นเกินไปที่จะทำให้ได้ระยะยกตัวของลิ้นที่เพียงพอ

ลิ้นไอดีควรจะปิดช้า (ที่ศูนย์ตายล่าง) ด้วยเพื่อที่จะได้ปริมาณไอดีที่เพียงพอ แต่ลิ้นไอดีไม่ควรจะปิดช้าเกินไปเพราะว่าลูกสูบอาจจะดันไอดีออกไปจากกระบอกสูบได้ในจังหวะอัด

ตัวอย่างที่ 4-2.2 เครื่องยนต์ 4 สูบ 4 จังหวะเครื่องหนึ่งเดินเครื่องด้วยความเร็วรอบ 2000 rpm และใช้เชื้อเพลิง 13.12 kg/h กระบอกสูบแต่ละสูบมีปริมาตรแทนที่ของลูกสูบ 655.5 cc และเครื่องยนต์ดูดอากาศผ่าน Flow nozzle ตัวหนึ่ง อัตราการไหลของอากาศที่ผ่าน Flow nozzle แทนด้วย $\dot{V}_a$ (มีหน่วยเป็น m^3/min) จะหาได้จากสูตร $\dot{V}_a = 0.231\sqrt{h_a}$ เมื่อ h_a เป็นค่าความแตกต่างของความดัน (มีหน่วยเป็นเมตรของอากาศ) ตรงคอของ Nozzle ถ้าความหนาแน่นเฉลี่ยของอากาศที่ใช้มีค่าเท่ากับ 1.2 kg/m^3 และมาโนมิเตอร์แบบใช้หลอดน้ำซึ่งใช้ในการวัดความดันของอากาศที่ไหลผ่าน Flow nozzle มีความสูงต่างกัน 127 mm จงหา (1) มวลของอากาศที่ถูกดูดผ่าน Flow nozzle, (2) ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร, และ (3) อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง

วิธีทำ เปลี่ยนความดันจาก mm H_2O ไปเป็น m air เสียก่อน

$$127 \text{ mm } H_2O = 127 \times \frac{\rho_{H_2O}}{\rho_{air}} \text{mm} = 127 \times \frac{1000}{1.2} = 105\,833 \text{ mm Air}$$

นั่นคือ $h_a = 105.8$ m ของอากาศ

เพราะฉะนั้นอัตราการไหลของอากาศจะมีค่าเป็น

$$\dot{V}_a = 0.231\sqrt{h_a} = 0.231\sqrt{105.8} = 2.376 \text{ m}^3/\text{min} = 0.0396 \text{ m}^3/\text{s}$$

(1) มวลของอากาศที่ถูกดูดเข้าเครื่องยนต์

$$\dot{m}_a = \dot{V}_a \rho_a = (0.0396 \text{ m}^3/\text{s})(1.2 \text{ kg/m}^3) = 0.0475 \text{ kg/s}$$ **ตอบ**

(2) ปริมาตรของอากาศที่ถูกดูดเข้ากระบอกสูบตามทฤษฎีทั้งหมดคือ

$$\dot{V}_d = V_d \, n \, k = (655.5 \times 10^{-6} \text{m}^3)(\frac{2000}{2 \times 60} \text{ cyc/s}) \times 4 = 0.0437 \text{ m}^3/\text{s}$$

ดังนั้นประสิทธิภาพเชิงปริมาตรมีค่าเป็น

$$\eta_V = \frac{0.0396}{0.0437} = 0.9062 = 90.62\ \%$$ **ตอบ**

(3) อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง

$$A/F = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} = \frac{(0.0475 \text{ kg/s})}{(13.12/3600 \text{ kg/s})} = 13:1$$ **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 4-2.3 เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน 6 สูบเครื่องหนึ่งมีกระบอกสูบโต 75 mm ช่วงชักยาว 100 mm เป็นเครื่องยนต์ Single acting 4 จังหวะ และใช้เชื้อเพลิงซึ่งเป็นไอที่ประกอบด้วยคาร์บอน 84 % ไฮโดรเจน 16 % เส้นผ่านศูนย์กลางตรงคอคอดของหลอดโช้คเท่ากับ 38.5 mm ที่ความเร็ว 3000 rpm มีประสิทธิภาพเชิง

ปริมาตร 75 % (ที่ $0^{o}C$ และ 1.007 bar) ความดันตรงคอคอดของหลอดโช้คเท่ากับ 0.897 bar และอุณหภูมิ $15.5^{o}C$ ถ้าส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ใช้นั้นถูกต้องทางเคมีสำหรับการเผาไหม้ จงคำนวณหาความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านหลอดโช้ค กำหนดให้ค่าคงที่ (R) สำหรับอากาศเป็น 287 J/kg K และสำหรับไอเชื้อเพลิงเป็น 97.1 J/kg K ส่วนประกอบโดยน้ำหนักของอากาศมีออกซิเจน 23 % และไนโตรเจน 77 %

วิธีทำ ปริมาตรของส่วนผสมซึ่งจ่ายที่ $0^{o}C$ และ 1.007 bar ต่อเวลา 1 วินาที คือ

$$\dot{V}_{a+f} = \frac{\pi}{4} d^2 \ln k \eta_v = \frac{\pi}{4}(0.075)^2 \times 0.1 \times (\frac{3000}{2 \times 60}) \times 6 \times 0.75$$

$$= 49.7 \times 10^{-3}\ m^3/s$$

เนื่องจาก

$$C + O_2 = CO_2 \quad | \quad H_2 + O = H_2O$$

$$12 + 32 = 44 \quad | \quad 2 + 16 = 18$$

จำนวนออกซิเจนที่ต้องใช้สำหรับการเผาไหม้ที่ถูกต้องทางเคมีของเชื้อเพลิง 1 kg จึงมีค่าเป็น

$$0.84 \times \frac{32}{12} + 0.16 \times \frac{16}{2} = 3.52\ kg$$

ดังนั้น อากาศที่ต้องการใช้สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 kg คือ

$$m_a = \frac{3.52\ kg}{0.23} = 15.3\ kg$$

เพราะฉะนั้นอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงคือ

$$A/F = \frac{m_a}{m_f} = \frac{15.3}{1} = 15.3:1$$

ปริมาตรจำเพาะของอากาศที่ $0^{o}C$ และ 1.007 bar คือ

$$v_a = R_a T_1 / p_1 = \frac{(287\ J/kg\ K)(273 + 0\ K)}{(1.007 \times 10^5\ N/m^2)} = 0.778\ m^3/kg$$

ปริมาตรจำเพาะของไอเชื้อเพลิงที่ $0^{o}C$ และ 1.007 bar คือ

$$v_f = R_f T_1 / p_1 = \frac{(97.1\ J/kg\ K)(273 + 0\ K)}{(1.007 \times 10^5\ N/m^2)} = 0.263\ m^3/kg$$

เนื่องจาก $\dot{V}_{a+f} = \dot{V}_a + \dot{V}_f = \dot{m}_a v_a + \dot{m}_f v_f$

และ $A/F = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} = 15.3:1$

ดังนั้น $(49.7 \times 10^{-3}\ m^3/s) = (15.3\ \dot{m}_f)(0.778\ m^3/kg) + \dot{m}_f (0.263\ m^3/kg)$

หรือ $\dot{m}_f = 4.085 \times 10^{-3}\ kg/s$

เพราะฉะนั้น ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง $\dot{m}_f = 4.085\times10^{-3}$ kg/s **ตอบ**

ความหนาแน่นของอากาศตรงคอคอดของหลอดโช้ค คือ

$$\rho_a = p_2/R_aT_2 = \frac{(0.897\times10^5\ \text{N/m}^2)}{(287\ \text{J/kg K})(273+15.5\ \text{K})} = 1.083\ \text{kg/m}^3$$

ดังนั้น ความเร็วของอากาศตรงคอคอดมีค่าเป็น

$$C_a = \frac{\dot{m}_a}{A_a\rho_a} = \frac{15.3\dot{m}_f}{A_a\rho_a} = \frac{15.3(4.085\times10^{-3}\ \text{kg/s})}{\frac{\pi}{4}(0.0385\ \text{m})^2(1.083\ \text{kg/m}^3)}$$

$= 49.55$ m/s **ตอบ**

4-2.4 การไหลของเชื้อเพลิง

ในคาร์บูเรเตอร์ ปลายด้านบนของเจ็ตส่งเชื้อเพลิงจะสูงกว่าระดับเชื้อเพลิงในห้องลูกลอยอยู่เล็กน้อยเสมอ ดังนั้นเชื้อเพลิงจึงไม่ไหลออกจากเจ็ตเมื่อเครื่องยนต์ไม่ทำงาน (ดูรูปที่ 4-2.2) สมมติให้

x คือ ความสูงของเจ็ตส่วนที่เหนือระดับเชื้อเพลิงในห้องลูกลอย

γ_f คือน้ำหนักจำเพาะของเชื้อเพลิง มีค่าคงที่เมื่อเชื้อเพลิงเป็นของไหลที่ยุบตัวไม่ได้

Δp_f คือความดันที่ลดลงซึ่งจะมีผลทำให้เชื้อเพลิงเกิดการไหล

A_f คือพื้นที่หน้าตัดของเจ็ต

c_f คือ Coefficient of discharge สำหรับเชื้อเพลิง

เนื่องจาก Δp_f = ความดันบนผิวของเชื้อเพลิงในห้องลูกลอย–ความดันที่ปลายด้านบนของเจ็ต

$$= p_1 - (p_2 + x\gamma_f) = (p_1 - p_2) - x\gamma_f = \Delta p_a - x\gamma_f$$

เพราะฉะนั้น ความเร็วของเชื้อเพลิงจะมีค่าเป็น

$$C_f = c_f\sqrt{2g\frac{(\Delta p_a - x\gamma_f)}{\gamma_f}} \qquad (4\text{-}2.12)$$

ดังนั้นมวลของเชื้อเพลิงที่ไหลคือ

$$\dot{m}_f = A_fC_f\rho_f = A_fc_f\sqrt{2\rho_f(\Delta p_a - x\gamma_f)} \qquad (4\text{-}2.13)$$

ค่า c_f สำหรับเจ็ตที่มีปากรู (Orific) เป็นวงกลมมีค่าอยู่ระหว่าง 0.6 ถึง 1.0 ขึ้นอยู่กับปัจจัยทั้ง 2 ประการนี้เป็นส่วนใหญ่ คือ (1) ความดันที่ทำให้เชื้อเพลิงไหลและ (2) อุณหภูมิของเจ็ต ถ้าไม่ได้กำหนดค่าของ c_f ไว้ในโจทย์ ให้ใช้ค่า $c_f = 0.7$

อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง (Air-fuel ratio, A/F) จะมีค่าเป็น

$$A/F = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} = \frac{A_a c_a}{A_f c_f}\sqrt{\frac{\rho_a \Delta p_a}{\rho_f(\Delta p_a - x\gamma_f)}} \qquad (4\text{-}2.14)$$

ถ้าไม่คิดผลของความต่างระดับตรงปากของเจ็ต, คือให้ x = 0, จะได้

$$A/F = \frac{A_a c_a}{A_f c_f}\sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_f}} \qquad (4\text{-}2.15)$$

ตัวอย่างที่ 4-2.4 เส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ตในคาร์บูเรเตอร์แบบง่ายอันหนึ่งเป็น 1 mm ตรงคอคอดมีความดันลดลงเท่ากับ 1020 mm H_2O และ Coefficient of discharge ของเจ็ตเท่ากับ 0.6 ความถ่วงจำเพาะของน้ำมันก๊าซโซลีนเท่ากับ 0.77 จงคำนวณหามวลของน้ำมันก๊าซโซลีนที่ถูกจ่ายออกไปต่อเวลา 1 วินาที

วิธีทำ ความแตกต่างของความดันตรงคอคอดคือ

$$\Delta p_a = (\frac{1020}{1000}\text{m } H_2O)\times\gamma_w = (1.020\text{ m})(9.81\times10^3\text{ kg/m}^3)$$
$$= 10\times10^3\text{ N/m}^2$$

และความหนาแน่นของเชื้อเพลิงคือ

$$\rho_f = (0.77)(1000\text{ kg/m}^3) = 770\text{ kg/m}^3$$

เมื่อไม่คิดผลตรงปากของเจ็ต (เพราะไม่มีข้อมูลในโจทย์ที่จะหาได้) อัตราการไหลของเชื้อเพลิงจะมีค่าเป็น

$$\dot{m}_f = A_f c_f\sqrt{2\rho_f \Delta p_a}$$
$$= \frac{\pi}{4}(0.001\text{ m})^2\times0.6\sqrt{2(770\text{ kg/m}^3)(10\times10^3\text{ N/m}^2)}$$
$$= 1.849\times10^{-3}\text{ kg/s}$$ **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 4-2.5 เครื่องยนต์ก๊าซโซลีนเครื่องหนึ่งใช้อากาศ 6.8 kg/h ความถ่วงจำเพาะของเชื้อเพลิงเท่ากับ 0.7 และอากาศมีอุณหภูมิ 32°C อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็น 15:1 หลอดโช้คมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm จงคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ตอันเดียวที่จะใช้กับคาร์บูเรเตอร์ของเครื่องยนต์เครื่องนี้ ถ้าปลายด้านบนของเจ็ตอยู่สูงกว่าระดับของน้ำมันเชื้อเพลิงในห้องลูกลอย 5 mm กำหนดให้ใช้ R = 287 J/kg K สำหรับอากาศ

วิธีทำ ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงคือ $\rho_f = (0.7)(1000\text{ kg/m}^3) = 700\text{ kg/m}^3$

ดังนั้นน้ำหนักจำเพาะของเชื้อเพลิงมีค่าเป็น

$$\gamma_f = \rho_f g = (700\text{ kg/m}^3)(9.81\text{ m/s}^2) = 6867\text{ N/m}^3$$

และ
$$\rho_a = \frac{p}{RT} = \frac{(1.013\times10^5\text{ N/m}^2)}{(287\text{ J/kg K})(273+32\text{ K})} = 1.157\text{ kg/m}^3$$

สมมติให้ $c_a = 0.84,\ c_f = 0.7$ และไม่คิดผลกระทบเนื่องจากการอัด (Compressibility effect) ของอากาศ สมการสำหรับอัตราการไหลของอากาศจะเป็น

$$\dot{m}_a = A_a c_a \sqrt{2\rho_a \Delta p_a}$$

หรือ
$$\Delta p_a = \frac{\left[\dot{m}_a/(A_a c_a)\right]^2}{2\rho_a}$$

$$= \frac{\left[(6.8\times 15/3600\ \text{kg/s})/\frac{\pi}{4}(0.02\ \text{m})^2 \times 0.84\right]^2}{2(1.157\ \text{kg/m}^3)} = 4982\ \text{Pa}$$

อัตราการไหลของเชื้อเพลิงหาได้จาก

$$\dot{m}_f = A_f c_f \sqrt{2\rho_f(\Delta p_a - x\gamma_f)}$$

หรือ
$$A_f = \frac{\dot{m}_f}{c_f\sqrt{2\rho_f(\Delta p_a - x\gamma_f)}}$$

$$= \frac{(6.8/3600\ \text{kg/s})}{0.7\sqrt{2(700\ \text{kg/m}^3)(4982 - 0.005\times 6867\ \text{N/m}^2)}}$$

$$= 1.025\times 10^{-5}\ \text{m}^2$$

เนื่องจาก
$$\frac{\pi}{4}d_f^2 = 1.025\times 10^{-6}\ \text{m}^2$$

ดังนั้น
$$d_f = 1.142\times 10^{-3}\ \text{m} = 1.142\ \text{mm}$$ **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 4-2.6 เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน 4 สูบ 4 จังหวะเครื่องหนึ่งกระบอกสูบโต 82.5 mm และช่วงชักยาว 115 mm มีความเร็วสูงสุด 3000 rpm และประสิทธิภาพเชิงปริมาตร 80 % ถ้าตรงคอคอดมีความดันลดลงสูงสุดเท่ากับ 1.5 m H_2O จงหาขนาดของคอคอดและขนาดของรู (Orifice) สำหรับเชื้อเพลิง ถ้าอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ใช้เท่ากับ 12:1 และจงระบุสมมติฐานที่ใช้ด้วย

วิธีทำ สมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณคือ

(1) ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรที่กำหนดให้หาได้จากความดันและอุณหภูมิปกติ (NTP) และคิดจากอากาศเพียงอย่างเดียว

(2) ไม่คิดผลกระทบเนื่องจากการอัดตัวได้ (Compressibility effect) ที่มีต่อการไหลของอากาศดังนั้นความหนาแน่นของอากาศจึงคงที่

(3) การไหลผ่านคอคอดไม่มีความเสียดทาน ดังนั้นจึงไม่มีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น และไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายใน

(4) ความแตกต่างของระดับความสูงระหว่างปากทางเข้าคาร์บูเรเตอร์กับคอคอดมีน้อยมาก ดังนั้นจึงถือว่ามีระดับเท่ากัน

(5) ไม่คิดผลของความต่างระดับระหว่างปลายของเจ็ตกับระดับของเชื้อเพลิง

(6) สมมติให้ $c_a = 0.84$, $c_f \approx 0.7$ และ $\rho_f = 700\ \text{kg/m}^3$

เนื่องจากปริมาตรของอากาศที่ไหลผ่านคอคอดภายใน 1 วินาที คือ

$$\dot{V}_d = \frac{\pi}{4} d^2 \ln k \eta_v$$

$$= \frac{\pi}{4}(0.0825\ \text{m})^2 (0.115\ \text{m}) \left(\frac{3000}{2 \times 60} \text{cyc/s} \right) \times 4 \times 0.8$$

$$= 49.18 \times 10^{-3}\ \text{m}^3/\text{s}$$

และความแตกต่างของความดันตรงคอคอด

$$\Delta p_a = (1.5\ \text{m}\ H_2O) \times \gamma_w = (1.5\ \text{m})(9.81 \times 10^3\ \text{N/m}^3) = 14\,715\ \text{Pa}$$

ที่ NTP ความหนาแน่นของอากาศมีค่าเท่ากับ

$$\rho_a = p/RT = \frac{\left(1.013 \times 10^5\ \text{N/m}^2\right)}{(287\ \text{J/kg K})(273 + 0\ \text{K})} = 1.293\ \text{kg/m}^3$$

ความเร็วของอากาศตรงคอคอดมีค่าเป็น

$$C_a = c_a \sqrt{\frac{2g\Delta p_a}{\gamma_a}}$$

$$= c_a \sqrt{2\Delta p_a / \rho_a} = 0.84 \sqrt{\frac{2(14\ 715\ \text{N/m}^2}{(1.293\ \text{kg/m}^3)}} = 126.7\ \text{m/s}$$

เนื่องจาก เมื่อไม่คิดผลกระทบเนื่องจากการอัดตัวได้อัตราการไหลของอากาศมีค่าเป็น

$$C_a A_a = \dot{V}_d = 49.18 \times 10^{-3}\ \text{m}^3/\text{s}$$

ดังนั้น $$A_a = \frac{49.18 \times 10^{-3}\ \text{m}^3/\text{s}}{126.7\ \text{m/s}} = 0.3882 \times 10^{-3}\ \text{m}^2$$

หรือ $$\frac{\pi}{4} d_a^2 = 0.3882 \times 10^{-3}\ \text{m}^2$$

เพราะฉะนั้น เส้นผ่านศูนย์กลางของคอคอด $d_a = 0.0222\ \text{m} = 22.23\ \text{mm}$ **ตอบ**

เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงหาได้จาก

$$A/F = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} = \frac{A_a c_a}{A_f c_f} \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_f}}$$

หรือ $$12:1 = \frac{\left(0.3882 \times 10^{-3}\ \text{m}^2\right) \times 0.84}{A_f \times 0.7} \sqrt{\frac{1.293\ \text{kg/m}^3}{700\ \text{kg/m}^3}}$$

จะได้ $$A_f = \frac{\pi}{4} d_f^2 = 1.668 \times 10^{-6}\ \text{m}^2$$

เพราะฉะนั้น เส้นผ่านศูนย์กลางของ Orifice, $d_f = 1.457 \times 10^{-3} = 1.457$ mm **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 4-2.7 คาร์บูเรเตอร์แบบใช้เจ็ตอย่างง่ายอันหนึ่งจ่ายอากาศ 6.11 kg/min และเชื้อเพลิง 0.408 kg/min ให้แก่เครื่องยนต์ น้ำมันเชื้อเพลิงมีความหนาแน่น 768 kg/m^3 สถานะเริ่มต้นอากาศมีความดัน 1.007 bar และอุณหภูมิ 15.5°C (1) จงคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางตรงคอคอดของหลอดโช้ค ถ้าอากาศมีความเร็ว 97.5 m/s และมีสัมประสิทธิ์ความเร็วเป็น 0.84 สมมติให้การขยายตัวเป็นแบบอาเดียแบติก และ k = 1.4 สำหรับอากาศ, (2) ถ้าความดันที่ลดลงตรงปากหลอด (Orifice) ของเชื้อเพลิงเป็น 0.8 เท่าของความดันที่ลดลงตรงหลอดโช้ค จงคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางของปากหลอด โดยสมมติให้ Coefficient of discharge เท่ากับ 0.66

วิธีทำ (1) เมื่อการขยายตัวเป็นแบบอาเดียแบติกจะได้

$$C_a = c_a \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_1 \left[1 - (p_2/p_1)^{\frac{k-1}{k}}\right]}$$

หรือ

$$97.5 \text{ m/s} = 0.84 \sqrt{\frac{2 \times 1.4}{1.4-1} (287 \text{ J/kg K})(273 + 15.5 \text{ K}) \left[1 - (p_2/p_1)^{\frac{1.4-1}{1.4}}\right]}$$

$$\left(\frac{97.5 \text{ m/s}}{0.84}\right)^2 = (579\ 600 \text{ J/kg}) \left[1 - (p_2/p_1)^{0.286}\right]$$

$$0.0232 = 1 - (p_2/p_1)^{0.286}$$

$$p_2/p_1 = (1 - 0.0232)^{\frac{1}{0.286}} = (0.977)^{3.5}$$

$$p_2 = p_1 \times (0.977)^{3.5} = (1.007 \times 10^5 \text{ Pa})(0.977)^{3.5} = 92\ 845 \text{ Pa}$$

เนื่องจาก $T_2 = T_1 (p_2/p_1)^{\frac{k-1}{k}} = (288.5 \text{ K})\ (0.977) = 281.8 \text{ K}$

ความหนาแน่นของอากาศตรงคอคอด

$$\rho_a = p_2/(RT_2) = (92\ 845 \text{ N/m}^2)/[(287 \text{ J/kg K})\ (281.8 \text{ K})]$$

$$= 1.148 \text{ kg/m}^3$$

อัตราการไหลของอากาศจะหาได้จาก $\dot{m}_a = A_a C_a \rho_a$

หรือ $$A_a = \frac{\dot{m}_a}{c_a \rho_a} = \frac{(6.11/60 \text{ kg/s})}{(97.5 \text{ m/s})(1.148 \text{ kg/m}^3)} = 0.9098 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

เนื่องจาก $A_a = \frac{\pi}{4} d_a^2$

ดังนั้น $$d_a^2 = \frac{4}{\pi}(0.9098 \times 10^{-3} \text{ m}^2) = 11.58 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

เส้นผ่านศูนย์กลางตรงคอคอด $d_a = 3.403 \times 10^{-2}$ m $= 34.03$ mm **ตอบ**

(2) อัตราการไหลของเชื้อเพลิงจะหาได้จาก

$$\dot{m}_f = A_f c_f \sqrt{2\rho_f [0.8(p_1 - p_2)]}$$

ดังนั้น $$A_f = \frac{\dot{m}_f}{c_f \sqrt{2\rho_f [0.8(p_1 - p_2)]}}$$

หรือ $$\frac{\pi}{4} d_f^2 = \frac{(0.408/60 \text{ kg/s})}{0.66\sqrt{2(768 \text{ kg/m}^3)[0.8(100\ 700 - 92\ 845) \text{ N/m}^2]}}$$

จะได้ $$d_f^2 = 4.223 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

เส้นผ่านศูนย์กลางของปากหลอด $d_f = 2.055 \times 10^{-3}$ m = 2.055 mm **ตอบ**

4-2.5 ความเร็ววิกฤตของอากาศ

ความเร็วต่ำสุดของอากาศตรงคอคอดที่จะสามารถทำให้เชื้อเพลิงเริ่มไหลออกมาผสมกับอากาศได้ เรียกว่า**ความเร็ววิกฤตของอากาศ** (Critical air velocity)

ความแตกต่างของความดันซึ่งจะทำให้เชื้อเพลิงไหลคือ

$$\Delta p_f = \Delta p_a - x\gamma_f \qquad (4\text{-}2.16)$$

ถ้า $\Delta p_a = x\gamma_f$, เชื้อเพลิงจะถูกยกตัวสูงขึ้นจนถึงด้านบนของปากเจ็ต (Jet orifice) แต่ยังไม่มีการไหลออกมาผสมกับอากาศ เมื่อ Δp_a มากกว่า $x\gamma_f$ เชื้อเพลิงจึงจะเริ่มต้นไหลออกมาผสมกับอากาศ เนื่องจาก

$$C_a = c_a \sqrt{\frac{2g\Delta p_a}{\gamma_a}}$$

และ $$C_f = c_f \sqrt{2g \frac{(\Delta p_a - x\gamma_f)}{\gamma_f}}$$

ดังนั้น $$\frac{C_a^2 \gamma_a}{c_a^2} = \frac{C_f^2 \gamma_f}{c_f^2} + 2gx\gamma_f \qquad (4\text{-}2.17)$$

ถ้า $C_f = 0$, จะได้

$$C_a = c_a \sqrt{\frac{2gx\gamma_f}{\gamma_a}} \qquad (4\text{-}2.18)$$

นี่คือความเร็ววิกฤตของอากาศซึ่งเชื้อเพลิงเริ่มต้นจะไหลออกมาผสมกับอากาศ

หมายเหตุ

(1) ถ้าคาร์บูเรเตอร์มีหม้อกรองอากาศเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ความดัน p_1 จะน้อยกว่าความดันบรรยากาศ เพราะว่ามีการสูญเสียความดันในหม้อกรองอากาศด้วย

(2) ถ้าการลดความดันที่คอคอดกำหนดให้ในเทอมของ mm H_2O จะหา Δp_a ในหน่วย N/m^2 ได้จาก

$$\Delta p_a = \frac{\text{mm } H_2O}{1000} \times \gamma_w$$

เมื่อ γ_w คือน้ำหนักจำเพาะของน้ำ

ตัวอย่างที่ 4-2.8 เครื่องยนต์เครื่องหนึ่งใช้คาร์บูเรเตอร์อย่างง่ายที่มีเจ็ตอันเดียว ระดับของเชื้อเพลิงอยู่ต่ำกว่ารูของท่อ (Nozzle) 3 mm เมื่อเครื่องยนต์ไม่ได้ทำงาน สถานะของอากาศโดยเฉลี่ยมีอุณหภูมิ $15.5^{\circ}C$ และความดัน 1.007 bar เชื้อเพลิงมีความถ่วงจำเพาะ 0.7 เครื่องยนต์ใช้เชื้อเพลิง 6.35 kg/h เจ็ตมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.27 mm และมี Coefficient of discharge 0.6, Coefficient of discharge ของอากาศเท่ากับ 0.8 อัตราส่วนระหว่างน้ำมันเชื้อเพลิงกับอากาศเท่ากับ 0.066:1 จงหา (1) ความเร็ววิกฤตของอากาศ, (2) ความดันที่ลดลงตรงคอคอด, และ (3) เส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลตรงคอคอด

วิธีทำ ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงคือ $\rho_f = (0.7)\,(1000\ kg/m^3) = 700\ kg/m^3$

น้ำหนักจำเพาะของเชื้อเพลิง $\gamma_f = \rho_f g = (700\ kg/m^3)(9.81\ m/s^2) = 6867\ N/m^3$

ความหนาแน่นของอากาศตามสภาวะที่กำหนด มีค่าเป็น

$$\rho_a = p/(RT) = \frac{\left(1.007 \times 10^5\ N/m^2\right)}{(287\ J/kg.K)(273 + 15.5\ K)} = 1.216\ kg/m^3$$

(1) เมื่อไม่คิดผลกระทบเนื่องจากการอัดตัวได้ของอากาศ ความเร็ววิกฤตของอากาศจะมีค่าเป็น

$$C_a = c_a\sqrt{\frac{2gx\gamma_f}{\gamma_a}}$$

$$= c_a\sqrt{\frac{2x\gamma_f}{\rho_a}} = 0.8\sqrt{\frac{2(0.003\ m)(6867\ N/m^3)}{(1.216\ kg/m^3)}}$$

$$= 4.657\ m/s$$ **ตอบ**

(2) อัตราการไหลของเชื้อเพลิงคือ $\dot{m}_f = A_f c_f \sqrt{2\rho_f\left(\Delta p_a - x\gamma_f\right)}$ หรือ

$$\left(\frac{6.35}{3600}\right) = \frac{\pi}{4}(0.00127)^2(0.6)\sqrt{2(700)\left(\Delta p_a - 0.003 \times 6867\right)}$$

ดังนั้นความดันที่ลดลง

$$\Delta p_a = 3867\ Pa = \frac{3867\ N/m^2}{\gamma_w} = \frac{3867\ N/m^2}{9.81 \times 10^3\ N/m^3}$$

$$= 0.3942\ m\ H_2O = 394.2\ mm\ H_2O$$ **ตอบ**

(3) อัตราการไหลของอากาศคือ $\dot{m}_a = A_a c_a \sqrt{2\rho_a \Delta p_a}$ หรือ

$$\left(\frac{6.35}{3600\times 0.066}\right)=\frac{\pi}{4}d_a^2\times 0.8\sqrt{2(1.216)(3867)}$$

ดังนั้น $d_a^2 = 4.386\times10^{-4}\ m^2$

เส้นผ่านศูนย์กลางตรงคอคอด d_a = 0.02094 m = 20.94 mm **ตอบ**

4-3 ระบบเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซล

4-3.1 การฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซล

หน้าที่หลักของระบบฉีดเชื้อเพลิงก็คือ ทำหน้าที่ฉีดเชื้อเพลิงในปริมาณและอัตราที่แน่นอนจำนวนหนึ่งในช่วงเวลาที่ต้องการเข้าไปในห้องเผาไหม้ในตอนปลายของจังหวะอัด (เมื่อความดันภายในกระบอกสูบตามปกติมีค่าประมาณ 19.6 ถึง 35.5 bar) และเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าไปจะต้องเป็นฝอยกระจายเข้าไปผสมกับอากาศที่ถูกอัดอยู่ในกระบอกสูบอย่างสมบูรณ์

หัวฉีด (ซึ่งเป็นรูปที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.34 ถึง 0.70 mm) จะทำให้เชื้อเพลิงเป็นฝอยละเอียด (เส้นผ่านศูนย์กลางของละอองเชื้อเพลิงอยู่ระหว่าง 3 ถึง 35 micron) ฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ การจะทำให้เชื้อเพลิงเป็นฝอยที่ดีนั้นต้องทำให้มีความเร็วในการฉีดสูงและต้องใช้ความแตกต่างของความดันมาก (ประมาณ 9.8 ถึง 19.6 MPa)

การฉีดเชื้อเพลิงจะเกิดขึ้นใกล้เคียงกับศูนย์ตายบนมาก (ประมาณ 7 ถึง 10 องศาก่อนศูนย์ตายบน) สำหรับเครื่องยนต์ที่มีความเร็วต่ำ แต่สำหรับเครื่องยนต์ความเร็วสูงจำเป็นต้องฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้าก่อนถึงศูนย์ตายบนมาก (ประมาณ 35 ถึง 40 องศาก่อนศูนย์ตายบน) เพื่อให้มีเวลาเพียงพอสำหรับการเผาไหม้ เมื่อเครื่องยนต์มีความเร็วสูงขึ้น ความดันในการฉีดเชื้อเพลิงก็จะต้องเพิ่มมากขึ้น และช่วงเวลาในการฉีดก็จะน้อยลง สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล อัตราส่วนการอัดอย่างต่ำควรจะเป็น 12:1 โดยทั่วไปอัตราส่วนการอัดจะอยู่ระหว่าง 12:1 ถึง 15:1 เครื่องยนต์ดีเซลสมัยใหม่ทำอัตราส่วนการอัดได้สูงกว่านี้

ระบบฉีดเชื้อเพลิงจะต้อง

1. จ่ายเชื้อเพลิงให้เหมาะสมกับภาระและความเร็ว
2. ทำให้เชื้อเพลิงเป็นฝอยละเอียดและจ่ายเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้ได้อย่างถูกต้อง
3. มีคุณลักษณะในการใช้เชื้อเพลิงอย่างประหยัดและรักษาจังหวะการฉีดเชื้อเพลิงได้ทุกความเร็วและทุกภาระ

4. จ่ายเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่องและคงที่โดยมีการปรับตั้งในขั้นต้นที่เหมือนกัน

4-3.2 ความเร็วและงานของการฉีดเชื้อเพลิง

ให้ p_1 คือ ความดันในการฉีด

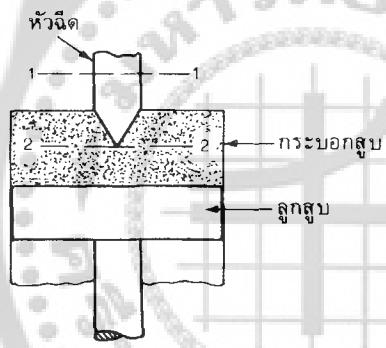
p_2 คือ ความดันในการอัด

v คือ ปริมาตรจำเพาะของเชื้อเพลิง ซึ่งจะมีค่าเท่ากันทั้งที่หน้าตัด 1-1 และหน้าตัด 2-2 (ดูรูปที่ 4-3.1) ถ้าเชื้อเพลิงเป็นของไหลที่ยุบตัวไม่ได้

ρ_f คือ ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง = 1/v

C_1 คือ ความเร็วของเชื้อเพลิงที่หน้าตัด 1-1

C_2 คือ ความเร็วเชิงอุดมคติที่เชื้อเพลิงถูกฉีดเป็นฝอยในห้องเผาไหม้



รูปที่ 4-3.1

เมื่อใช้สมการพลังงานสำหรับการไหลเชิงอุดมคติที่หน้าตัด 1-1 และหน้าตัด 2-2 ในรูปที่ 4-3.1 จะได้

$$\frac{C_1^2}{2} + p_1 v = \frac{C_2^2}{2} + p_2 v \qquad (4\text{-}3.1)$$

ถ้า C_1 มีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ C_2 จะได้

$$C_2 = \sqrt{2v(p_1 - p_2)} = \sqrt{\frac{2}{\rho_f}(p_1 - p_2)} \qquad (4\text{-}3.2)$$

ถ้าคิดความเสียดทาน สมการความเร็วข้างบนจะต้องมี Coefficient of discharge, c_f คูณเข้าไปด้วย ดังนั้นความเร็วที่แท้จริงของเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดก็คือ

$$C_f = c_f \sqrt{\frac{2}{\rho_f}(p_1 - p_2)} \qquad (4\text{-}3.3)$$

การฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปในห้องเผาไหม้ด้วยความเร็วสูงมากๆ จะมีผลทำให้ปริมาตรของเชื้อเพลิงลดลง ผลอันนี้จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวได้ (Coefficient of compressibility, c_c) เข้ามาเกี่ยวข้องสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวได้คือ การลดลงของปริมาตรต่อปริมาตรเดิมต่อความแตกต่างของความดัน ดังนั้นสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวได้ก็คือ

$$c_c = \frac{(v_1 - v_2)/v_1}{(p_1 - p_2)} \qquad (4\text{-}3.4)$$

$c_c = 80 \times 10^{-6}$ โดยประมาณ เมื่อใช้ความดันในหน่วยของบรรยากาศ (atm)

งานทั้งหมดในการฉีดเชื้อเพลิงประกอบด้วยงาน 2 ส่วนคือ งานในการอัด (Work of compression) และงานในการส่ง (Work of delivery) งานที่ทำในช่วงของการอัดเชื้อเพลิงจากความดันในการฉีด (Injection pressure, p_1) เป็นความดันในการอัด (compression pressure, p_2) ก็คืองานในการอัด ซึ่งมีค่าเป็น

$$w_c = \frac{1}{2}(p_2 - p_1)(v_1 - v_2) \qquad (4\text{-}3.5)$$

ซึ่งสมมติว่าการอัดเป็นไปตามกฎเส้นตรง เมื่อไม่คิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร งานในการส่งก็คือ

$$w_d = (\text{Compression pressure} - \text{Sump pressure}) \times (\text{Plunger displacement}) \qquad (4\text{-}3.6)$$

หัวข้อนี้จะเข้าใจได้ดีขึ้นเมื่อศึกษาตัวอย่างที่ 4-3.1 และ 4-3.2 แล้ว

ตัวอย่างที่ 4-3.1 เครื่องยนต์ดีเซล 6 สูบ 4 จังหวะเครื่องหนึ่งมีกระบอกสูบโต 115 mm ช่วงชักยาว 140 mm ทำงานโดยใช้อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงทางทฤษฎี 16:1 ถ้าสถานะของอากาศที่ถูกดูดเข้าเครื่องยนต์คือ 0.981 bar และ $21^{\circ}C$ และมีประสิทธิภาพเชิงปริมาตร 80 % (1) จงหาปริมาณสูงสุดของเชื้อเพลิงที่จะสามารถฉีดเข้าไปในกระบอกสูบแต่ละสูบได้ต่อ 1 วัฏจักร (ให้ R = 287 J/kg K สำหรับอากาศ), (2) ถ้าเครื่องยนต์หมุนด้วยความเร็วรอบ 1500 rpm ความดันในการฉีดเชื้อเพลิง 132.4 bar ความดันในการอัด 41.2 bar และระหว่างการฉีดเชื้อเพลิง เพลาข้อเหวี่ยงหมุนไป 20° จงหาขนาดของปากรู (Orifice) ที่จะใช้ในการฉีดเชื้อเพลิงตามปริมาณที่ต้องการ เชื้อเพลิงมีความหนาแน่น 768 kg/m^3 และ Coefficient of discharge ของ Orifice เท่ากับ 0.95

วิธีทำ (1) จำนวนอากาศที่ถูกดูดเข้ากระบอกสูบแต่ละสูบต่อ 1 วัฏจักรคือ

V = ปริมาตรแทนที่ × ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร

$$= \frac{\pi}{4}(0.115\ \text{m})^2(0.14\ \text{m}) \times 0.8 = 1.163 \times 10^{-3}\ \text{m}^3$$

มวลของอากาศจำนวนนี้ภายใต้สถานะที่ถูกดูด

$$m_a = pV/RT$$

$$= \frac{(0.981 \times 10^5\ \text{N/m}^2)(1.163 \times 10^3\ \text{m}^3)}{(287\ \text{J/kg.K})(273 + 21\ \text{K})} = 1.352 \times 10^{-3}\ \text{kg}$$

ดังนั้น มวลของเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้ากระบอกสูบแต่ละสูบต่อ 1 วัฏจักรคือ

$$m_f = \frac{m_a}{A/F} = \frac{1.352 \times 10^{-3}\ \text{kg}}{16:1} = 84.5 \times 10^{-6}\ \text{kg}$$ **ตอบ**

(2) เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการฉีดต่อ 1 วัฏจักรหาได้จาก

$$t = \frac{\theta}{360N} = \frac{20^\circ}{360^\circ(1500/60\ \text{cyc/s})} = 2.222 \times 10^{-3}\ \text{s}$$

ดังนั้น อัตราการฉีดเชื้อเพลิงเข้ากระบอกสูบแต่ละสูบต่อ 1 วัฏจักรคือ

$$\dot{m}_f = \frac{84.5 \times 10^{-6}\ \text{kg}}{2.222 \times 10^{-3}\ \text{s}} = 0.038\ \text{kg/s}$$

จากรูปที่ 4-3.1 จะได้

$$\dot{m}_f = \rho_f A_f c_f \sqrt{2(p_1 - p_2)/\rho_f}$$

$$0.038 = (768)\frac{\pi}{4} d_f^2 \times 0.95 \sqrt{\frac{2[(132.4 - 41.2) \times 10^5]}{(768)}}$$

$$d_f^2 = 0.4303 \times 10^{-6}\ \text{m}^2$$

เส้นผ่านศูนย์กลางของ Orifice, $d_f = 0.656 \times 10^{-3}\ \text{m} = 0.656\ \text{mm}$ **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 4-3.2 ในเครื่องยนต์ดีเซลเครื่องหนึ่ง ปริมาตรเชื้อเพลิงในกระบอกสูบปั๊มฉีด (Barrel) ก่อนทำการฉีดเท่ากับ 6.5 cc ท่อส่งน้ำมันเชื้อเพลิงไปยังหัวฉีดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm ยาว 700 mm และมีเชื้อเพลิงใน Injection valve 2.5 cc สมมติว่าความดันที่อ่างน้ำมัน (Sump pressure) เท่ากับ 0.981 bar จงหาปริมาตรอัดของลูกสูบ (Plunger) ที่ต้องใช้ในการส่งน้ำมันเชื้อเพลิง 0.15 cc ที่ความดัน 147.6 bar และหางานที่ลูกสูบใช้ในการฉีดเชื้อเพลิง กับกำลังที่สูญเสียในการปั๊มเชื้อเพลิง เมื่อเครื่องยนต์หมุนด้วยความเร็ว 1200 rpm

วิธีทำ ปริมาตรในตอนแรกทั้งหมดของเชื้อเพลิง

V_1 = (เชื้อเพลิงในกระบอกสูบปั๊มฉีด) + (เชื้อเพลิงในท่อ)
+ (เชื้อเพลิงใน Injection valve)

$$= 6.5\ \text{cc} + \frac{\pi}{4}(0.3\ \text{cm})^2(70\ \text{cm}) + 2.5\ \text{cc} = 13.95\ \text{cc}$$

ปริมาตรนี้ถูกอัดจากความดันที่อ่างน้ำมัน 0.981 bar จนมีความดันเป็นความดันส่ง (Delivery pressure) 147.6 bar เพราะฉะนั้นปริมาตรจำนวนนี้จะลดลง ดังนั้นสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวได้, c_c, คือ

$$c_c = 80\times10^{-6} = \frac{(V_1 - V_2)/V_1}{p_2 - p_1}$$

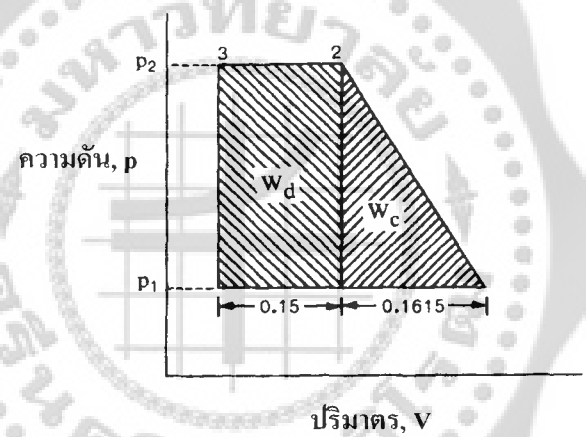
เมื่อความดันมีหน่วยเป็น atm (1 atm = 1.013 bar)

เพราะฉะนั้น $$80\times10^{-6} = \frac{(V_1 - V_2)/(13.95\ \text{cc})}{(147.6 - 0.981\ \text{bar})/(1.013\ \text{bar/atm})}$$

หรือ $$V_1 - V_2 = 0.1615\ \text{cm}^3$$

เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่อัดเชื้อเพลิงส่งออกไป 0.15 cm^3 การเปลี่ยนแปลงปริมาตร 0.1615 cm^3 เนื่องจากการอัดตัวนี้จะต้องรวมเข้าไปด้วย ดังนั้นปริมาตรที่ลูกสูบต้องเคลื่อนที่อัดทั้งหมดคือ

V = 0.15 cc + 0.1615 cc = 0.3115 cc **ตอบ**



รูปที่ 4-3.2 งานที่ใช้ในการฉีดเชื้อเพลิง

งานทั้งหมดที่ลูกสูบใช้ในการฉีดเชื้อเพลิง (ดูรูปที่ 4-3.2)

W = งานที่ใช้ในการอัด + งานที่ใช้ในการส่ง = $W_c + W_d$

เนื่องจาก $$W_c = \frac{1}{2}(p_2 - p_1)(V_1 - V_2)$$

$$= \frac{1}{2}[(147.6 - 0.981)\times10^5\ \text{N/m}^2](0.1615\times10^{-6}\ \text{m}^3)$$

$$= 1.184\ \text{N m}$$

และ $$W_d = [(147.6 - 0981)\times10^5\ \text{N/m}^2](0.15\times10^{-6}\ \text{m}^3)$$

$$= 2.199\ \text{N m}$$

ดังนั้น W = 1.184 N m + 2.199 N m = 3.384 N m **ตอบ**

กำลังที่ใช้ในการปั๊มเชื้อเพลิงหาได้จาก

P = งานที่ใช้ต่อ 1 วัฏจักร × จำนวนวัฏจักรต่อ 1 วินาที

$$= (3.383\ \text{Nm})\left(\frac{1200}{2\times 60}\text{cyc/s}\right) = 33.83\ \text{W}$$ **ตอบ**

4-4 การอัดบรรจุของเครื่องยนต์

4-4.1 การอัดบรรจุของเครื่องยนต์ดีเซล

เครื่องยนต์สำหรับรถยนต์สมัยใหม่มักจะต้องการเพิ่มกำลังโดยไม่เพิ่มขนาดและน้ำหนักของเครื่องยนต์ การเพิ่มกำลังที่ได้จากเครื่องยนต์ดีเซลสามารถทำได้โดยเพิ่มความเร็วและความดันเฉลี่ยประสิทธิผลเพลาของเครื่องยนต์

ความเร็วสูงสุดของเครื่องยนต์จะถูกจำกัดด้วยข้อพิจารณาในการออกแบบเชิงกล แต่ความดันเฉลี่ยประสิทธิผลเพลาสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการเปลี่ยนแปลงขีดจำกัดความดันของวัฏจักรที่ใช้งาน

ในเครื่องยนต์ธรรมดา การดูดอากาศและการปล่อยไอเสียเกิดขึ้นที่ความดันบรรยากาศ สำหรับเครื่องยนต์ที่ใช้เครื่องอัดบรรจุ (Supercharger) การปล่อยไอเสียก็ปล่อยออกสู่บรรยากาศเช่นเดียวกับเครื่องยนต์ธรรมดา แต่จะมีความดันในการอัดอากาศเข้ากระบอกสูบสูงกว่าความดันบรรยากาศ ความหนาแน่นของอากาศจะเพิ่มขึ้นมาก ปริมาณของเชื้อเพลิงที่เข้าไปในเครื่องยนต์ก็จะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการเพิ่มมวลของอากาศ ความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความหนาแน่นของอากาศที่อัดเข้าไปในกระบอกสูบ ทำให้ความเค้นเนื่องจากความร้อน (Thermal stresses) ในเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการจำกัดความดันด้วย

การอัดอากาศเข้ากระบอกสูบสามารถทำได้โดยใช้เครื่องอัดบรรจุ ซึ่งอาจจะเป็นเครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ หรือปั๊มแบบหมุน (Rotary positive displacement pump) เครื่องอัดแบบแอโรไดนามิก (Aerodynamic compressor) หรือเป็นเครื่องเป่าอากาศ (Blower) ก็ได้ ตามปกติเครื่องอัดบรรจุจะถูกขับด้วยเครื่องยนต์เอง

โดยการใช้เครื่องอัดบรรจุ กำลังที่ได้จากเครื่องยนต์จะเพิ่มขึ้นมาก งานที่ใช้ในการอัดหรือได้รับจากการขยายตัวของก๊าซจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิเริ่มต้น (Initial temperature) ของก๊าซ เนื่องจากในจังหวะอัดอากาศจะถูกอัดที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำและการขยายตัวในกระบอกสูบของเครื่องยนต์เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า ดังนั้นจึงให้งานมากกว่างานที่สูญเสียไปในการอัด

เมื่อเครื่องอัดบรรจุถูกขับโดยใช้กังหันที่ทำงานด้วยไอเสียของเครื่องยนต์เป็นต้นกำลังก็จะเรียกชื่อใหม่ว่าเป็นกังหันอัดบรรจุ (Turbocharger)

4-4.2 ผลของการใช้เครื่องอัดบรรจุ

กำลังที่เพิ่มขึ้นของเครื่องยนต์ประเมินได้จากระดับของการอัดบรรจุ (Degree of supercharging) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความดันเฉลี่ยประสิทธิผลเพลาของเครื่องยนต์ที่ใช้เครื่องอัดบรรจุ กับความดันเฉลี่ยประสิทธิผลเพลาของเครื่องยนต์เครื่องเดียวกันเมื่อไม่ใช้เครื่องอัดบรรจุ การใช้เครื่องอัดบรรจุจะเพิ่มอุณหภูมิและความดันของอากาศที่ถูกอัดเข้าเครื่องยนต์ตรงปลายของจังหวะอัด

ในเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน การใช้การอัดบรรจุมีผลทำให้แนวโน้มที่จะเกิดการน็อก (Fuel knock) เนื่องจากความดันและอุณหภูมิของวัฏจักรเพิ่มมากขึ้น เครื่องยนต์ก๊าซโซลีนธรรมดาไม่สามารถใช้การอัดบรรจุได้มากกว่า 30 % (คือความดันในสถานะเริ่มต้นของการดูดเป็น 1.3 เท่าของความดันบรรยากาศ) โดยไม่เกิดการน็อก

ในทางตรงกันข้าม เครื่องยนต์ดีเซลนั้นมีความเหมาะสมกับการใช้เครื่องอัดบรรจุ เพราะว่าการเพิ่มความดันและอุณหภูมิของวัฏจักรนั้นมีความจำเป็นสำหรับการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพในเครื่องยนต์ดีเซล สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล ขีดจำกัดของการอัดบรรจุขึ้นอยู่กับความเค้นเชิงกล (Mechanical stresses) และความเค้นเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ ในเครื่องยนต์ดีเซลที่ยังไม่ถูกดัดแปลงปรับปรุง (Modified) การอัดบรรจุ 50% นับว่าเป็นเรื่องธรรมดา เครื่องยนต์ที่ได้รับการดัดแปลงปรับปรุงเล็กน้อยอาจจะเพิ่มการอัดบรรจุได้ถึง 140%

ตัวอย่างที่ 4-4.1 เครื่องยนต์ที่มีอัตราส่วนการอัด 6:1 เครื่องหนึ่งผลิตกำลังเพลาได้ 82 kW และใช้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อน 42 060 kJ/kg ในอัตรา 27 kg/h เครื่องยนต์เครื่องนี้ต้องการเพิ่มกำลังเป็น 112 kW โดยการใช้เครื่องอัดบรรจุ เนื่องจากเครื่องยนต์เครื่องนี้มีอัตราส่วนการอัดต่ำจึงสามารถใช้เครื่องอัดบรรจุได้โดยเชื้อเพลิงสามารถเผาไหม้ได้โดยไม่มีการระเบิด (Detonation) เกิดขึ้น จงพิสูจน์ว่า Induction pressure ที่ต้องการมีค่าประมาณ 1.49 bar และจงหาอัตราส่วนการอัดใหม่เมื่อใช้เครื่องอัดบรรจุ สมมติว่าการเพิ่ม Induction pressure 10 % จะทำให้กำลังที่หัวสูบเพิ่มขึ้น 11 % เมื่ออัตราส่วนการอัดและปัจจัยอื่นๆ คงที่ แต่การเพิ่มความดัน 1 bar ทำให้อัตราส่วนการอัดลดลง 2:1 และ

ประสิทธิภาพเชิงกลเมื่อไม่ใช้เครื่องอัดบรรจุมีค่าเท่ากับ 90 % แต่เมื่อใช้เครื่องอัดบรรจุลดลงเป็น 87 % สมมติว่าประสิทธิภาพความร้อนหัวสูบสามารถหาได้จากสูตร $\eta_{it} = 1-(1/\varepsilon)^c$ กำหนดให้ใช้ค่า Induction pressure เมื่อไม่ใช้เครื่องอัดบรรจุเท่ากับ 1 bar

วิธีทำ กำลังที่หัวสูบเดิม (ไม่ใช้เครื่องอัดบรรจุ) หาได้จาก

$$P_i = \frac{82\ \text{kW}}{0.9} = 91.11\ \text{kW}$$

ความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงคือ

$$\dot{q}_{in} = \left(\frac{27}{3600}\text{kg/s}\right)(42\ 060\ \text{kJ/kg}) = 315.5\ \text{kJ/s}$$

ดังนั้นประสิทธิภาพความร้อนหัวสูบมีค่าเป็น

$$\eta_{it} = \frac{91.11\ \text{kW}}{315.5\ \text{kJ/s}} = 0.2888$$

เนื่องจาก $\eta_{it} = 1-(1/\varepsilon)^c$

นั่นคือ $0.2888 = 1-(1/6)^c$

ดังนั้น $c = 0.19$

สมมติให้การเพิ่มความดัน $\Delta p = 1.49\ \text{bar} - 1\ \text{bar} = 0.49\ \text{bar}$ ทำให้ได้กำลังที่เพลาเป็น P_b' kW ถ้าปัจจัยอื่นๆไม่เปลี่ยนแปลง แต่การเพิ่มกำลังที่หัวสูบทุกๆ 11 % จะต้องเพิ่มความดันขึ้นอีก 10 % เพราะฉะนั้นเมื่อให้ P_i' เป็นกำลังหัวสูบเมื่อมีการอัดบรรจุโดยมีความดันเพิ่มขึ้นเท่ากับ Δp จะได้

$$\frac{P_i' - P_i}{P_i} \times \frac{\Delta p}{\frac{P_i' - P_i}{P_i}} = \Delta p$$

หรือ

$$\frac{\frac{P_b'}{\eta_m} - P_i}{P_i} \times \frac{(10\% \times 1\ \text{bar})}{11\%} = \Delta p$$

ดังนั้น

$$\frac{\frac{P_b'}{0.87} - 91.11}{91.11} \times \frac{(10\% \times 1\ \text{bar})}{11\%} = 0.49\ \text{bar}$$

จะได้ $P_b' = 122\ \text{kW}$

เนื่องจากการเพิ่มความดันนี้มีผลต่ออัตราส่วนการอัด อัตราส่วนการอัดที่ลดลงคือ

$$\Delta\varepsilon = 2 \times \frac{0.49\ \text{bar}}{1\ \text{bar}} = 0.98$$

ดังนั้นอัตราส่วนการอัดเมื่อใช้เครื่องอัดบรรจุ $\varepsilon' = 6 - 0.98 = 5.02{:}1$ **ตอบ**

ประสิทธิภาพความร้อนหัวสูบเมื่อใช้เครื่องอัดบรรจุเปลี่ยนเป็น

$$\eta_{it} = 1 - (1/5.02)^{0.19} = 0.264$$

มีผลให้กำลังที่เพลาลดลงในอัตราส่วน = 0.264/0.2888 = 0.914

เพราะฉะนั้น กำลังที่เพลาคิดผลจากอัตราส่วนการอัดลดลง = 0.914 (122) = 111.5 kW

ดังนั้น Induction pressure 1.49 bar ทำให้ได้กำลังที่เพลาจริง 111.5 kW ≈ 122 kW **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 4-4.2 เครื่องอัดบรรจุทำงานตามกฎ $pV^{1.7} = c$ ต้องการกำลัง 1.343 kW ต่อการอัดอากาศ 1 kg/min ที่ระดับความสูง 3 km จากระดับน้ำทะเล ความหนาแน่นของอากาศที่จ่ายออกจากเครื่องอัดบรรจุจะมีค่าเท่าไร สมมติให้ความดันบรรยากาศที่ระดับความสูง 3 km คือ 0.736 bar และความดันส่งของเครื่องอัดบรรจุเท่ากับ 1.013 bar และการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานมีค่าเป็น 11.72 kJ/kg

วิธีทำ งานที่เครื่องอัดบรรจุต้องใช้คือ

$$w_S = (1.343 \text{ kW})/ (1 \text{ kg/min}) (60 \text{ s/min}) = 80.58 \text{ kNm/kg}$$

งานที่สูญเสียเนื่องจากความเสียดทานและระบายความร้อนคือ

$$w_L = 11.72 \text{ kNm/kg}$$

ดังนั้นงานสุทธิที่เครื่องอัดบรรจุใช้ในการอัด

$$w = w_S - w_L = 80.58 \text{ kNm/kg} - 11.72 \text{ kNm/kg} = 68.86 \text{ kNm/kg}$$

สำหรับกระบวนการโพลีโทรปิก $pV^n = c$ ดังนั้นงานสำหรับกระบวนการไหลอย่างสม่ำเสมอจะหาได้จาก

$$w = \int_1^2 v\,dp = \frac{n}{n-1}\left(p_2 v_2 - p_1 v_1\right)$$

$$= \frac{n}{n-1} p_2 v_2 \left[1 - (p_1/p_2)(v_1/v_2)\right]$$

หรือ $$w = \frac{n}{n-1} p_2 v_2 \left[1 - (p_1/p_2)^{\frac{n-1}{n}}\right]$$

แทนค่าข้อมูลที่รู้ค่าลงไป จะได้

$$(68.86 \times 10^3) = \frac{1.7}{1.7-1}(1.013 \times 10^5) v_2 \left[1 - [(0.736)/(1.013)]^{\frac{1.7-1}{1.7}}\right]$$

หรือ $v_2 = 2.271 \text{ m}^3/\text{kg}$

ดังนั้นความหนาแน่นของอากาศ $\rho_a = 1/(2.271 \text{ m}^3/\text{kg}) = 0.44 \text{ kg/m}^3$ **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 4-4.3 (1) ในกรณีใดบ้างที่สามารถตัดสินใจที่จะสมมติให้กำลังที่หัวสูบของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสิ้นเปลืองอากาศ
(2) เครื่องยนต์ที่ไม่ใช้เครื่องอัดบรรจุเครื่องหนึ่งผลิต Gross imep ได้ 10.006 bar เมื่อเดินเครื่องยนต์ใช้ส่วนผสมหนากว่าค่าที่ถูกต้องทางเคมี 20 % Pumping imep มีค่า 0.343 bar ความดันและอุณหภูมิของไอดีตอนเริ่มจังหวะอัดมีค่า 0.942 bar และ 100^{O}C ตามลำดับความดันเฉลี่ยระหว่างจังหวะดูดมีค่า 0.893 bar เมื่อทำการอัดบรรจุโดยใช้เครื่องเป่าอากาศซึ่งมี Isentropic efficiency 70% ไอดีหลังจากออกจากเครื่องเป่าอากาศจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 35^{O}C ในช่วงที่ไหลไปเข้ากระบอกสูบและเกิดความดันตก (Pressure drop) 6.867 kPa ความดันของไอดีในกระบอกสูบมีค่าเป็น 1.57 bar ในระหว่างจังหวะดูด จงหาการเพิ่ม (เป็น %) ของ Net inep เนื่องจากการอัดบรรจุ ไม่คิดผลของก๊าซที่ตกค้างอยู่ในกระบอกสูบ สมมติให้สถานะของบรรยากาศเป็น 1.013 bar กับ 15^{O}C และ k = 1.4

วิธีทำ (1) กำลังที่หัวสูบของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสิ้นเปลืองอากาศเมื่อ
1) อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็นส่วนผสมหนา (คือเชื้อเพลิงที่มีค่ามากกว่าความต้องการที่ต้องการทางเคมี) จนกระทั่งอากาศที่เพิ่มเข้าสู่กระบอกสูบทั้งหมดถูกใช้ไปทั้งหมด
2) อากาศมีความร้อนเท่ากันทุกสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์
3) การจ่ายอากาศเข้ากระบอกสูบไม่ถูกรบกวนด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ตัวอย่างเช่นการเปลี่ยนแปลงความเร็ว เป็นต้น
(2) ถ้ากำหนดให้ตัวห้อย 1 และ 2 หมายถึงสภาวะที่ใช้และไม่ใช้เครื่องอัดบรรจุ, ตามลำดับ, จะได้

$$\frac{(\text{Gross imep})_1}{(\text{Gross imep})_2} = \frac{(\text{Air consumption})_1}{(\text{Air consumption})_2} = \frac{m_1}{m_2}$$

เนื่องจากปริมาตรไอดีถูกพิจารณาที่กระบอกสูบเดียวกันทั้ง 2 กรณี ดังนั้น

$$V_1 = V_2$$

เพราะฉะนั้นจากความสัมพันธ์ pV = mRT จะได้

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{p_1 T_2}{p_2 T_1}$$

ดังนั้น $$\frac{(\text{Gross. mep})_1}{(\text{Gross imep})_2} = \frac{p_1 T_2}{p_2 T_1}$$

อุณหภูมิ T_1 ซึ่งเป็นอุณหภูมิภายใต้สภาวะอัดบรรจุสามารถคำนวณหาได้จาก

T_1 = อุณหภูมิของอากาศตรงปากทางออกของเครื่องเป่าอากาศ + อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นระหว่างการดูด

ให้

T_b = อุณหภูมิที่แท้จริงของอากาศตรงปากทางออกของเครื่องเป่าอากาศ

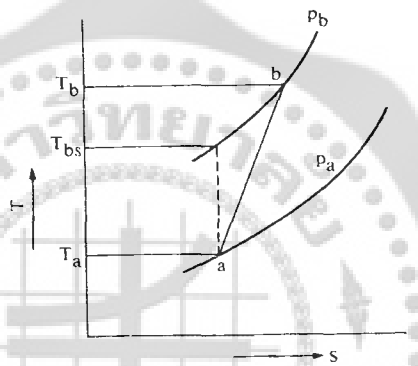
T_a = อุณหภูมิที่แท้จริงของอากาศตรงปากทางออกของเครื่องเป่าอากาศ = 15°C

T_{bs} = อุณหภูมิของอากาศตรงปากทางออกของเครื่องเป่าอากาศเมื่อการอัดเป็นแบบไอเซนโทรปิก

p_a = ความดันก่อนเข้าเครื่องเป่าอากาศ = 1.013 bar และ

p_b = ความดันก่อนทำการอัด = ความดันในจังหวะดูด+ความดันตก

= 1.57+6.867 = 1.639 bar



รูปที่ 4-4.1 แผนภาพอุณหภูมิกับเอนโทรปีสำหรับเครื่องเป่าอากาศ

อุณหภูมิตรงปากทางออกของเครื่องเป่าอากาศเมื่อการวัดเป็นแบบไอเซนโทรปิกคือ

$$T_{bs} = T_a\left(p_b / p_a\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(273+15\ \text{K}\right)\left(\frac{1.639\ \text{bar}}{1.013\ \text{bar}}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 330.4\ \text{K}$$

Isentropic efficiency ของเครื่องเป่าอากาศ (ดูรูปที่ 4-4.1) จะหาได้จาก

$$\eta = \frac{T_{bs} - T_a}{T_b - T_a}$$

หรือ $$0.7 = \frac{330.4 - 288}{T_b - 288}$$

จะได้ $T_b = 348.6$ K

ดังนั้น $T_1 = 348.6 + 35 = 383.6$ K

เนื่องจาก $$\left(\text{Gross imep}\right)_1 = \left(\text{Gross imep}\right)_2 \frac{p_1 T_2}{p_2 T_1}$$

$$= (10.006)\frac{1.57(273+100)}{0.942\text{x}383.6} = 16.22\ \text{bar}$$

ความดันไอเสีย = ความดันเฉลี่ยในจังหวะดูด – ความดันไอเสีย

$$= 1.57 - 1.236 = 0.334 \text{ bar}$$

(ในกรณีนี้ (Pumping imep)$_1$ มีค่าเป็นบวก) เพราะฉะนั้น Net imep ของเครื่องยนต์เมื่อใช้เครื่องอัดบรรจุ

$$(\text{Net imep})_1 = (\text{Gross imep}) + (\text{Pumping imep})_1$$

$$= 16.22 + 0.334 = 16.554 \text{ bar}$$

และ Net imep ของเครื่องยนต์เมื่อไม่ใช้เครื่องอัดบรรจุ

$$(\text{Net imep})_2 = 10.006 - 0.343 = 9.663 \text{ bar}$$

ดังนั้นการเพิ่มของ Net imep เนื่องจากการใช้เครื่องอัดบรรจุ

$$= \frac{16.554 - 9.663}{9.663} \times 100 = 71.31\ \%$$ **ตอบ**

แบบฝึกหัด

1. (1) จงหาค่าความร้อนโดยประมาณของก๊าซโซลีน และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์

(2) จะต้องดัดแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงอย่างไร ถ้าต้องการ (2.1) ให้มีการประหยัดสูงสุด, (2.2) ให้ได้กำลังที่เป็นไปได้สูงสุด

(3) การเปลี่ยนแปลงเช่นนั้นจะทำให้เกิดผลกระทบอย่างใดขึ้นบ้าง

[ตอบ (1) 45.596 MJ/kg, (2.1) 17:1, (2.2) 12:1]

2. การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนทำให้เกิดไอน้ำ, คาร์บอนไดออกไซด์, และไนโตรเจน ขึ้นในท่อไอเสีย จงอธิบายว่าผลผลิตจากการเผาไหม้เหล่านี้เกิดขึ้นได้อย่างไร

ความเปลี่ยนแปลงใดบ้างจะเกิดขึ้นเมื่อ (1) ส่วนผสมไอดีหนาขึ้นเล็กน้อย, (2) ส่วนผสมไอดีบางลงเล็กน้อย

3. เครื่องยนต์เครื่องหนึ่งใช้อากาศจำนวน 3.084 kg/min จงหามวลของออกซิเจนที่มีอยู่ในอากาศปริมาณนี้

ถ้าออกซิเจนในปริมาณข้างต้นรวมตัวกับไฮโดรเจนในปริมาณที่ถูกต้อง จงหาปริมาณของน้ำที่จะเกิดขึ้น

(ตอบ 0.7094 kg O, 0.7981 kg H_2O)

4. จงระบุตัวประกอบหรือปัจจัยในการออกแบบ (Engine design factors) ที่จะเป็นตัวกำหนดค่าออกเทน (Octane rating) ของเชื้อเพลิงที่จะนำไปใช้กับเครื่องยนต์เครื่องหนึ่งโดยเฉพาะ

5. จงอธิบายถึงเหตุผลที่นำเชื้อเพลิงที่มีค่าออกเทนสูงมาใช้กับเครื่องยนต์ที่มีประสิทธิภาพสูง

จงอธิบายถึงผลที่จะเกิดขึ้นเมื่อนำเชื้อเพลิงที่มีค่าตัวเลขออกเทน 100 มาใช้กับเครื่องยนต์ที่ถูกออกแบบมาให้เดินเครื่องด้วยเชื้อเพลิงที่มีค่าตัวเลขซีเทน 70

6. ก๊าซโซลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.725) ที่ใช้กับเครื่องยนต์ของรถยนต์ประกอบด้วยคาร์บอน 83.5% และไฮโดรเจน 16.5% โดยมวล สมมติว่าการเผาไหม้เกิดขึ้นโดยถูกต้องทางเคมีและเครื่องยนต์ใช้เชื้อเพลิงไปในอัตรา 341 cm^3/min จงหา (1) อัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงโดยมวล, (2) ความสิ้นเปลืองอากาศเป็น kg/min

(ตอบ 15.403:1, 3.801 kg)

7. อะไรเป็นเหตุผลหลักซึ่งนำไปสู่การใช้เชื้อเพลิงที่ต้านทานการน็อกหรือมีค่าออกเทนสูง

8. อะไรเป็นธาตุทางเคมีที่สำคัญที่มีอยู่ในก๊าซโซลีนทั่วไป

อัตราส่วนระหว่างอากาศกับก๊าซโซลีนจะเป็นเท่าใดเพื่อที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ และผลผลิตจากการเผาไหม้จะประกอบด้วยอะไรบ้าง

(ตอบ คาร์บอนกับไฮโดรเจน, 15:1)

9. จงอธิบายความหมายของคำต่อไปนี้เมื่อใช้กับเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์สันดาปภายใน (1) ความสามารถในการระเหย (Volatility), (2) การเผาไหม้แบบระเบิด (Detonation), และ (3) ค่าความร้อน

10. จงระบุอัตราส่วนระหว่างก๊าซโซลีนกับอากาศสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในสมัยใหม่ เพื่อให้ได้สิ่งที่ต้องการต่อไปนี้ คือ (1) การเผาไหม้ที่สมบูรณ์แบบ, (2) กำลังสูงสุด, (3) ความประหยัดเชื้อเพลิงสูงสุดเมื่อแสดงอยู่ในหน่วย cm^3 ต่อกำลังหัวสูบหนึ่งหน่วย

11. เครื่องยนต์ดีเซลสี่จังหวะเครื่องหนึ่งใช้เชื้อเพลิง 9.072 kg/h เมื่อเดินเครื่องด้วยความเร็ว 1000 rpm จงหา (1) มวลของเชื้อเพลิงที่ฉีดต่อหนึ่งวัฏจักร, (2) ปริมาตรของเชื้อเพลิงที่ฉีดต่อหนึ่งวัฏจักร เมื่อสมมติให้น้ำมันมีความหนาแน่น 0.8304 kg/cm^3

(ตอบ (1) 0.7258×10^{-6} kg, (2) 0.08685 cm^3)

12. เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าส่วนผสมไอดีที่บางเล็กน้อยนั้นจะทำให้ได้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุดจากเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน และส่วนผสมไอดีที่หนานั้นจำเป็นเพื่อให้ได้กำลังสูงสุด จงอธิบายยกเหตุผลประกอบให้เห็นจริง

13. จงระบุธาตุหลักสองอย่างที่มีอยู่ในก๊าซโซลีน และระบุสัดส่วนโดยเฉลี่ยของอากาศกับก๊าซโซลีนสำหรับ (1) การเดินเครื่องตามปกติ (2) การเริ่มติดเครื่องจากสภาวะที่เย็น

จงอธิบายว่าไอเสียของเครื่องยนต์ประกอบด้วยก๊าซอะไรบ้าง

14. ก๊าซไอเสียจากเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนเครื่องหนึ่งมีอุณหภูมิ $450^{\circ}C$ และค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่เป็น 1.0027 kJ/kg K ถ้าการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ใช้ไป 1 kg ทำให้เกิดก๊าซไอเสียขึ้น 8.165 kg จงหาปริมาณความร้อนที่ติดออกไปกับไอเสียถ้าอากาศในขณะที่ไหลเข้าคาร์บูเรเตอร์มีอุณหภูมิ $35^{\circ}C$

ถ้าค่าความร้อนของก๊าซโซลีนเป็น 43.966 MJ/kg จงหาว่าปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับไอเสียคิดเป็นร้อยละเท่าใดของความร้อนที่เครื่องยนต์ได้รับ

(ตอบ 3398 kJ, 17.1%)

15. ส่วนผสมของเบนโซลประกอบด้วยเบนโซล C_6H_6 30% และก๊าซโซลีน C_8H_{18} 70% โดยมวล จงหาอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้ที่ถูกต้องทางเคมี

16. เครื่องยนต์ที่มีอัตราส่วนการอัดสูงเครื่องหนึ่งถูกดัดแปลงเพื่อใช้เชื้อเพลิงเมทิล แอลกอฮอล์ CH_4O แทนเบนโซล C_6H_6 จงหาอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงโดยมวลสำหรับเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดนี้

ถ้าขนาดของหลอดโช้คของคาร์บูเรเตอร์ไม่เปลี่ยนแปลง จะต้องจ่ายเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นอีกร้อยละเท่าใด

(ตอบ 6.525:1, 13.4:1, 105.4%)

17. เครื่องยนต์เครื่องหนึ่งใช้เชื้อเพลิงในอัตรา 6.804 kg/h เชื้อเพลิงมีค่าความร้อน 43.501 MJ/kg ถ้าเครื่องยนต์มีประสิทธิภาพความร้อน 30% จงหากำลังที่เครื่องยนต์ผลิตได้

[ตอบ 33.07 hp (24.67 kW)]

18. จงอธิบายปรากฏการณ์ของการเผาไหม้แบบระเบิด (Detonation) ที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยประกายไฟ

19. จงอธิบายความหมายของประสิทธิภาพความร้อนเพลา (Brake thermal efficiency) ของเครื่องยนต์

จงบรรยายว่าท่านจะดำเนินการทดสอบอย่างไรเพื่อให้สามารถหาประสิทธิภาพความร้อนเพลาได้ ให้ระบุอุปกรณ์ต่างๆที่ต้องการและข้อมูลตัวเลขที่ควรจะต้องจดบันทึก

(ควรจะระบุสิ่งที่ต้องทราบก่อนเกี่ยวกับเชื้อเพลิงเพื่อที่จะทำให้การคำนวณจบลงอย่างสมบูรณ์)

20. เครื่องยนต์ของรถยนต์เครื่องหนึ่งเผาไหม้เชื้อเพลิงในอัตรา 3.538 kg/h เชื้อเพลิงมีค่าความร้อน 44.199 MJ/kg ถ้า 36% ของความร้อนจากเชื้อเพลิงสูญเสียไปกับไอเสีย จงคำนวณหาปริมาณความร้อนที่สูญเสียนี้ในหน่วย J/s

(ตอบ 26.063 J/s)

21. เครื่องยนต์เครื่องหนึ่งผลิตกำลัง 1 hp (0.746 kW) โดยใช้เชื้อเพลิงในอัตรา 0.2177 kg/h ถ้าเชื้อเพลิงมีค่าความร้อนค่าต่ำ 43.269 MJ/kg จงหาประสิทธิภาพความร้อนของเครื่องยนต์นี้

(ตอบ 28.5%)

22. โดยการใช้สมมติฐานที่เหมาะสม จงคำนวณหาอัตราส่วนทางทฤษฎีระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ตกับ เส้นผ่านศูนย์กลางของคอคอดสำหรับคาร์บูเรเตอร์ที่มีเจ็ตอันเดียวเพื่อให้ได้อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็น 15:1 ให้ใช้ความหนาแน่นของน้ำมันเบนซินเท่ากับ 752 kg/m^3 และอากาศที่ไหลผ่านคอคอดมีความหนาแน่น 1.28 kg/m^3

(ตอบ 14. d_a/d_f = 17.406)

23. จงหาความเร็ววิกฤตของอากาศและพื้นที่ประสิทธิผลตรงคอคอดของคาร์บูเรเตอร์ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดของเจ็ตเท่ากับ 1 mm^2 อันหนึ่ง คาร์บูเรเตอร์นี้ถูกนำมาใช้กับเครื่องยนต์ของรถยนต์ซึ่งเดินเครื่องได้กำลังที่เพลา 9 kW โดยมี bsfc

เท่ากับ 0.304 kg/kWh กำหนดให้ R = 287 J/kg K สำหรับอากาศ น้ำมันเชื้อเพลิงมีความถ่วงจำเพาะ 0.79, A/F = 15:1 ระดับของน้ำมันเบนซินในห้องลูกลอยต่ำกว่าปลายของเจ็ต 6.35 mm และอากาศที่ใช้มีอุณหภูมิเฉลี่ย 15.5^{O}C และความดันเฉลี่ย 1.013 bar จงหาความดันที่ลดลงในหลอดโช้คด้วย

(ตอบ $\dot{V}_a$ = 7.536 m/s, A_a = 317.7 mm^2, Δp_a = 795.27 Pa)

24. เครื่องยนต์เครื่องหนึ่งใช้คาร์บูเรเตอร์แบบง่ายๆ ซึ่งมีเจ็ตเพียงอันเดียว ในขณะที่เครื่องยนต์ไม่ทำงานระดับของน้ำมันเบนซินในห้องลูกลอยต่ำกว่าปลายของเจ็ต 2.8 mm ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านคอคอดเท่ากับ 58 m/s ความหนาแน่นของอากาศ 1.28 kg/m^3 ความหนาแน่นของน้ำมันเบนซิน 750 kg/m^3 พื้นที่หน้าตัดของเจ็ต 1.8 mm^2 และ Coefficient of discharge ของเจ็ตเท่ากับ 0.6 จงหาความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์เครื่องนี้

(ตอบ $\dot{m}_f$ = 2.3.3 × 10^{-3} kg/s)

25. เจ็ตของคาร์บูเรเตอร์อันหนึ่งมีรูทางออกโต 1.55 mm Coefficient of discharge เท่ากับ 0.94 คอคอดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 31.8 mm Coefficient of discharge เท่ากับ 0.84 ในขณะที่ทำการทดสอบที่ภาระที่แน่นอนค่าหนึ่ง ความดันที่ลดลงตรงคอคอดมีค่าเท่ากับ 290 mm H_2O ค่าความดันต่ำสุดที่จะทำให้เชื้อเพลิงไหลออกจากคอคอดมีค่าเท่ากับ 8.9 mm H_2O จงหาอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง ถ้าในขณะทำการทดสอบอากาศมีความหนาแน่น 1.1 kg/m^3 และความถ่วงจำเพาะของน้ำมันเบนซินเท่ากับ 0.72 ถ้าเครื่องยนต์เครื่องนี้เป็นเครื่องยนต์ 4 สูบ 4 จังหวะ ซึ่งมีกระบอกสูบโต 77.5 mm ช่วงชัก 107.5 mm และมีความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 10.9 kg/h จงหาประสิทธิภาพเชิงปริมาตรของเครื่องยนต์ เมื่อความเร็วรอบในขณะทำการทดสอบเท่ากับ 3200 rpm สำหรับการหาประสิทธิภาพเชิงปริมาตรให้สมมติว่าในกระบอกสูบมีแต่อากาศเพียงอย่างเดียว

(ตอบ A/F = 14.9:1, η_{bt} = 0.7582)

26. เครื่องยนต์ 4 สูบ 4 จังหวะ ขนาดความโตกระบอกสูบ × ช่วงชัก = 100 × 120 mm เครื่องหนึ่ง เดินเครื่องที่ 2000 rpm โดยใช้คาร์บูเรเตอร์ซึ่งคอคอดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm จงหาการดูดตรงคอคอด เมื่อสมมติให้ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรเท่ากับ 70 % สัมประสิทธิ์ของอากาศที่ไหลผ่านเท่ากับ 0.8 และ ความหนาแน่นของอากาศเท่ากับ 1.29 kg/m^3

(ตอบ Δp_a = 6095 Pa)

เอกสารอ้างอิง

1. บัญชา ค้งตระกูล, ปานเพชร ชินินทร, ยงยศ จินารักษ์ (2532). **กลศาสตร์ยานยนต์,** ซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ, หน้า 45-56.

2. Champion, R.C., Arnold, E.C. (1964). **Motor Vehicle Calculations and Science Part II**, London: Edward Arnold, pp. 167-184.

เอกสารที่แนะนำให้ศึกษาเพิ่มเติม

1. บัญชา ค้งตระกูล, ปานเพชร ชินินทร, ยงยศ จินารักษ์ (2532). **กลศาสตร์ยานยนต์,** ซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ, บทที่ 2 เครื่องยนต์.

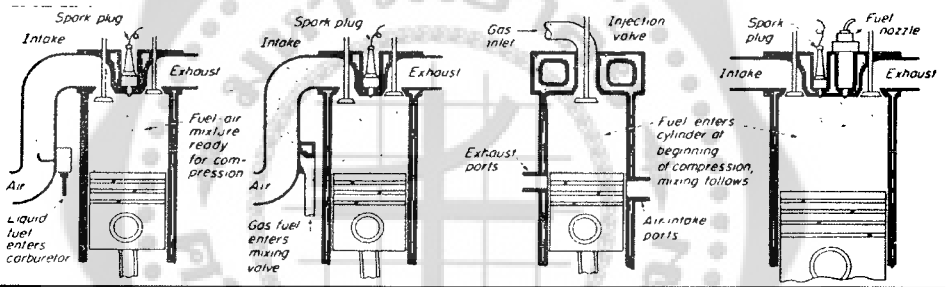
2. Aggarwa KM (1995). **Automobile design problems**, New Delhi: Satya Prakashan, Chapter3 Carburettor, Chapter 10 Fuel injection and Supercharging.

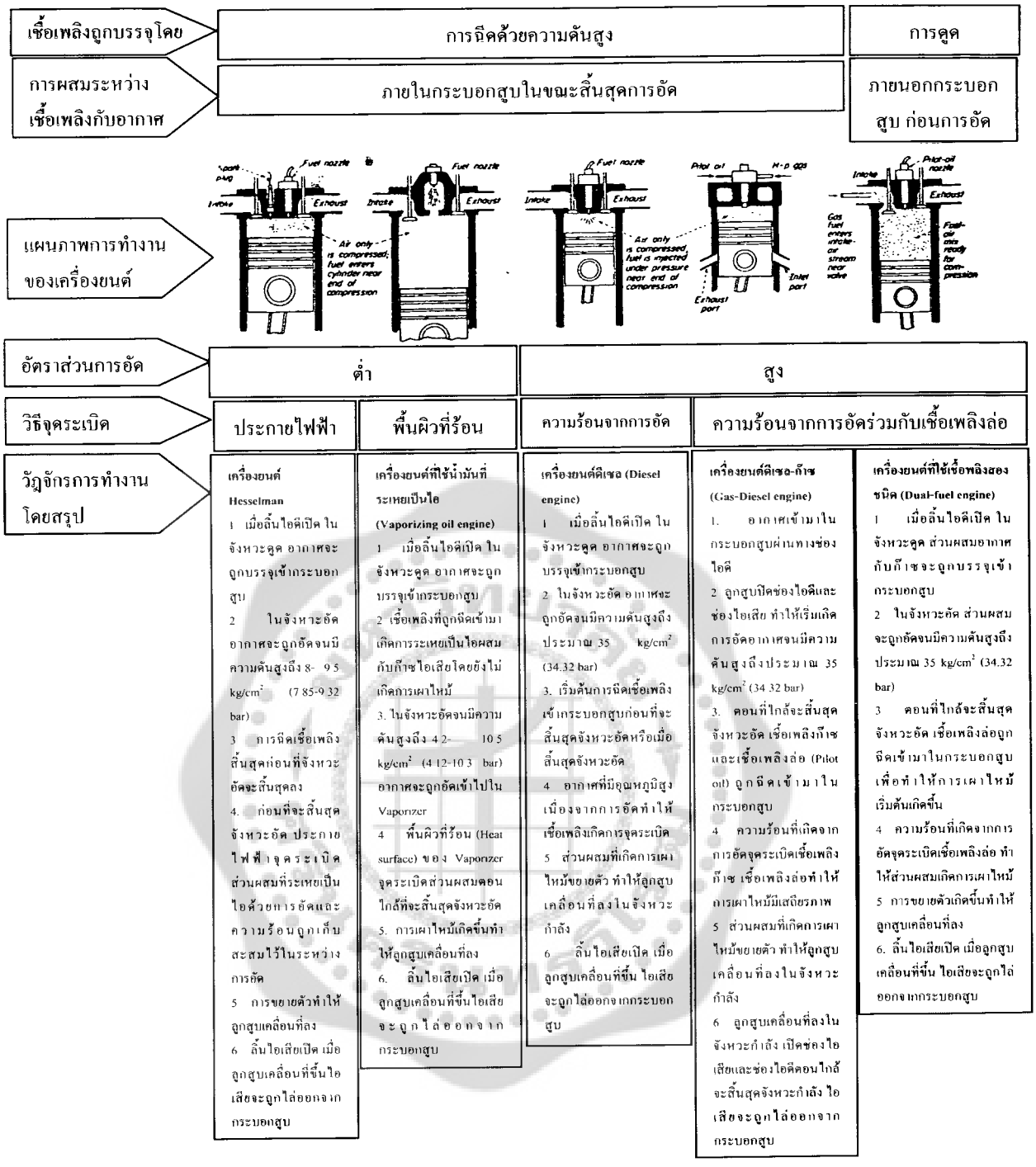
3. Sen SP (1998). **Internal Combustion Engine Theory and Practice**, Delhi: Khanna Publishers, Chapter 3 Fuels for internal combustion engine.

บทที่ 5
การเผาไหม้ของเชื้อเพลิง

5-1 บทนำ

แหล่งพลังงานสำหรับเครื่องยนต์ได้มาจากเชื้อเพลิงหลายชนิด คือ จากน้ำมันก๊าซโซลีนสำหรับเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน จากน้ำมันดีเซลสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล และจากก๊าซธรรมชาติที่ถูกอัด (Compressed natural gas: CNG) หรือก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Liquid petroleum gas: LPG) หรือก๊าซที่ได้จากการทำให้เชื้อเพลิงของแข็งกลายเป็นก๊าซ (Gasification) สำหรับเครื่องยนต์ก๊าซ

เชื้อเพลิงถูกบรรจุโดย	คาร์บูเรเตอร์	ลิ้นผสม	การฉีดด้วยความดันต่ำ	การฉีดด้วยความดันสูง
การผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ	ภายนอกกระบอกสูบ ก่อนการอัด		ภายในกระบอกสูบ ในระหว่างการอัด	
แผนภาพการทำงานของเครื่องยนต์				
อัตราส่วนการอัด	ต่ำ		ต่ำ	
วิธีจุดระเบิด	ประกายไฟฟ้า		ประกายไฟฟ้า	
วัฏจักรการทำงานโดยสรุป	**เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน (Gasoline engine)** 1 คาร์บูเรเตอร์ทำให้เชื้อเพลิงเป็นไอและผสมเชื้อเพลิงกับอากาศในสัดส่วนที่ถูกต้อง 2. เมื่อลิ้นไอดีเปิด ในจังหวะดูด ส่วนผสมจะถูกบรรจุเข้ากระบอกสูบ 3. ส่วนผสมจะถูกอัดในจังหวะอัดจนมีความดันสูงถึง 7- 15.8 kg/cm^2 (6.86-15.49 bar) 4 ประกายไฟฟ้าจุดระเบิดส่วนผสมตอนใกล้จะสิ้นสุดจังหวะอัด 5 ส่วนผสมที่เกิดการเผาไหม้ขยายตัว ทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่ลง 6. ลิ้นไอเสียเปิด เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้น ไอเสียจะถูกไล่ออกจากกระบอกสูบ	**เครื่องยนต์ก๊าซ (Gas engine)** 1 ลิ้นผสม (Mixing valve) ทำหน้าที่ผสมเชื้อเพลิงก๊าซกับอากาศในสัดส่วนที่ถูกต้อง 2. เมื่อลิ้นไอดีเปิด ในจังหวะดูด ส่วนผสมจะถูกบรรจุเข้ากระบอกสูบ 3 ส่วนผสมจะถูกอัดในจังหวะอัดจนมีความดันสูงถึง 5- 21 kg/cm^2 (4.9-20.59 bar) 4 ประกายไฟฟ้าจุดระเบิดส่วนผสมตอนใกล้จะสิ้นสุดจังหวะอัด 5. ส่วนผสมที่เกิดการเผาไหม้ขยายตัว ทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่ลง 6. ลิ้นไอเสียเปิด เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้นไอเสียจะถูกไล่ออกจากกระบอกสูบ	**เครื่องยนต์ก๊าซที่ใช้การฉีดเชื้อเพลิงก๊าซ (Gas injection engine)** 1 อากาศเข้ามาในกระบอกสูบผ่านช่องไอดีซึ่งอยู่ที่ผนังกระบอกสูบ 2. ลูกสูบปิดช่องไอดีและช่องไอเสีย ทำให้เริ่มเกิดการอัด 3 เชื้อเพลิงก๊าซถูกฉีดเข้ามาที่ความดันต่ำก่อนในระหว่างจังหวะอัด 4 ส่วนผสมที่เกิดขึ้นถูกอัดจนมีความดันสูงถึง 5- 21 kg/cm^2 (4.9-20.59 bar) ขึ้นอยู่กับเชื้อเพลิงที่ใช้ 5 ประกายไฟฟ้าจุดระเบิดส่วนผสมตอนใกล้จะสิ้นสุดจังหวะอัด ส่วนผสมที่เผาไหม้เกิดการขยายตัว 6. ลูกสูบเคลื่อนที่ลงในจังหวะกำลัง เปิดช่องไอเสียตอนใกล้จะสิ้นสุดจังหวะกำลัง ไอเสียจะถูกไล่ออกจากกระบอกสูบ	**เครื่องยนต์ก๊าซโซลีนที่ใช้การฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง (Injection gasoline engine)** 1 ในจังหวะดูด เมื่อลิ้นไอดีเปิดอากาศจะถูกบรรจุเข้ากระบอกสูบ 2 ลิ้นไอดีปิด เริ่มต้นการอัดเชื้อเพลิงถูกฉีดเข้ามาด้วยความดันสูง 3 เชื้อเพลิงกับอากาศผสมกันในในระหว่างจังหวะอัด จนมีความดันสูงถึง 7- 15.8 kg/cm^2 (6.86-15.49 bar) 4 ประกายไฟฟ้าจุดระเบิดส่วนผสมตอนใกล้จะสิ้นสุดจังหวะอัด 5 ส่วนผสมที่เกิดการเผาไหม้ขยายตัว ทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่ลง 6 ลิ้นไอเสียเปิด เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้นไอเสียจะถูกไล่ออกจากกระบอกสูบ



รูปที่ 5-1.1 หลักการทำงานของเครื่องยนต์ที่นำมาใช้ในเชิงพาณิชย์

หลักในการเตรียมส่วนผสมและการเผาไหม้ส่วนผสมในเครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ 9 ชนิดได้แสดงเปรียบเทียบกันไว้ไว้ในรูปที่ 5-1.1 เครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงก๊าซจะพบเห็นน้อยกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงของเหลว เพราะว่าการขนส่งเชื้อเพลิงที่เป็นของเหลวนั้นทำได้ง่ายกว่าเชื้อเพลิงก๊าซ เครื่องยนต์ซึ่งใช้เชื้อเพลิงของเหลวที่ใช้กันมากที่สุดคือเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน

และเครื่องยนต์ดีเซล ด้วยเหตุนี้เนื้อหาส่วนใหญ่จึงเกี่ยวข้องกับเครื่องยนต์ 2 ชนิดนี้

5-2 หลักการพื้นฐานของการเผาไหม้

ดังที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าเชื้อเพลิงของเหลวคือของผสมทางเคมีของธาตุพื้นฐานสามชนิดคือ คาร์บอน C, ไฮโดรเจน H, และออกซิเจน O ถ้าให้มวลของธาตุแต่ละชนิดแทนด้วยสัญลักษณ์ข้างต้น สมการสำหรับเชื้อเพลิงของเหลว 1 kg จะเขียนได้เป็น

$$C + H + O = 1 \qquad (5\text{-}2.1)$$

การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจะสมบูรณ์หรือไม่ ขึ้นอยู่กับปริมาณของออกซิเจนที่เข้าไปสู่กระบอกสูบของเครื่องยนต์ การเผาไหม้ที่สมบูรณ์จะทำให้ผลผลิตจากการเผาไหม้ประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ CO_2, น้ำ H_2O (ในสถานะที่เป็นไอ), ออกซิเจนส่วนเกิน O_2, และไนโตรเจน N_2 ซึ่งเข้ามาในกระบอกสูบพร้อมกับอากาศ

ในกรณีที่การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ การที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอทำให้คาร์บอนเพียงบางส่วนเท่านั้นที่จะเกิดการเผาไหม้ได้ เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ CO_2 (คือ $C + O_2 = CO_2$) และคาร์บอนส่วนที่เหลือจะกลายเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ CO (คือ $2C + O_2 = 2CO$)

การคำนวณในหน่วยกิโลโมล (kilomole = kmole) นั้นมีข้อดีคือเทียบได้กับการคำนวณในหน่วยปริมาตร แต่ไม่ต้องเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิและความดันของก๊าซ จึงนำมาใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป ปริมาณออกซิเจนในหน่วยกิโลโมลที่ต้องการทางทฤษฎีสำหรับการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง 1 kg คือ

$$\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O_f}{32}$$

เมื่อ $\frac{O_f}{32}$ คือจำนวนกิโลโมลของออกซิเจนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง

อากาศมีออกซิเจนอยู่ 21% และมีไนโตรเจนอยู่ 79% โดยปริมาตร (โดยประมาณ) ด้วยเหตุนี้ปริมาณของอากาศเป็นกิโลโมลที่ต้องการทางทฤษฎีสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 kg คือ

$$L_{theo} = \frac{1}{0.21}\left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O_f}{32}\right) \qquad (5\text{-}2.2)$$

ค่าของ L_{theo} (มีหน่วยเป็น kmole/kg) มีค่าเป็น 0.512 สำหรับน้ำมันก๊าซโซลีนและมีค่าเป็น 0.496 สำหรับน้ำมันดีเซล

ในความเป็นจริง สำหรับเชื้อเพลิงในกระบอกสูบแต่ละกิโลกรัมหรือแต่ละลูกบาศก์เมตร จะได้รับอากาศมากเกินกว่าความจำเป็นทางทฤษฎี อัตราส่วนระหว่างจำนวนอากาศที่แท้จริงกับจำนวนอากาศที่ต้องการทางทฤษฎีเรียกว่าสัมประสิทธิ์อากาศส่วนเกิน (Excess air coefficient) หรือสัมประสิทธิ์อากาศ คือ

$$\alpha = \frac{L_{act}}{L_{theo}} \qquad (5\text{-}2.3)$$

ถ้า $\alpha = 1$ การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของเชื้อเพลิงจะเป็นไปได้ก็เฉพาะเมื่อเชื้อเพลิงและอากาศผสมกันอย่างอุดมคติและอนุภาคแต่ละอนุภาคของเชื้อเพลิงมีออกซิเจนในจำนวนที่เพียงพอสำหรับการเผาไหม้ เพราะฉะนั้นการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงหมดอย่างสมบูรณ์ที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติคือเมื่อ $\alpha > 1$

เพื่อเพิ่มกำลังของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนที่ใช้คาร์บูเรเตอร์และเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนแบบหัวฉีดซึ่งจุดระเบิดด้วยประกายไฟฟ้า ส่วนผสมไอดีจะถูกเตรียมให้มีสัมประสิทธิ์อากาศ $\alpha < 1$ ในกรณีนี้ ส่วนที่เป็นคาร์บอนของเชื้อเพลิงเผาไหม้แล้วกลายเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จะส่งผลให้ประสิทธิภาพความร้อนของเครื่องยนต์ลดลง

ค่าของสัมประสิทธิ์อากาศ α เป็นดังนี้

เครื่องยนต์ก๊าซโซลีนที่ป้อนเชื้อเพลิงให้อย่างเต็มที่ $\alpha = 0.85\text{-}1.15$

เครื่องยนต์ก๊าซ $\alpha = 1.1\text{-}1.3$

เครื่องยนต์ดีเซล $\alpha = 1.3\text{-}1.7$

(เครื่องยนต์ดีเซลในขณะที่รับภาระน้อย $\alpha = 4$ หรือมากกว่านั้น)

5-2.1 ส่วนผสมที่เผาไหม้ได้และผลผลิตจากการเผาไหม้

ส่วนผสมที่เผาไหม้ได้ (Combustible mixture) ในเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนประกอบด้วยอากาศกับไอเชื้อเพลิง ถ้ามวลโมเลกุล (Molecular mass) ของเชื้อเพลิงแทนด้วย M_f (มีหน่วยเป็น kg/kmole) จำนวนกิโลโมลของส่วนผสมที่เผาไหม้ได้ต่อเชื้อเพลิง 1 kg จะหาได้จาก

$$L_{mix} = \alpha L_{theo} + \frac{1}{M_f} \qquad (5\text{-}2.4)$$

เนื่องจากมวลโมเลกุลของน้ำมันก๊าซโซลีน M_f = 110-120 kg/kmole การคำนวณโดยประมาณจากสมการ (5-2.4) จึงสามารถทำได้โดยไม่ต้องคิดค่าของ $1/M_f$

ในเครื่องยนต์ก๊าซ ส่วนผสมที่เผาไหม้ได้ประกอบด้วยก๊าซ 1 กิโลโมล และอากาศจำนวน αM_{theo} กิโลโมล ด้วยเหตุนี้ปริมาณส่วนผสมของอากาศกับก๊าซในหน่วย kmole/kg จะมีค่าเป็น

$$L_{mix} = 1 + \alpha L_{theo} \qquad (5\text{-}2.5)$$

ในเครื่องยนต์ดีเซล เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาตรของอากาศ ปริมาตรของเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้ากระบอกสูบนั้นมีค่าน้อยจนสามารถตัดทิ้งไปได้ (มีค่าสูงได้ถึงเพียง 0.01% ของปริมาตรอากาศ) เพราะฉะนั้นค่าของ $1/M_f$ จึงสามารถตัดทิ้งไปได้ ดังนั้นจำนวนกิโลโมลของไอดีจึงสามารถหาได้จาก

$$L_{mix} = \alpha L_{theo} \qquad (5\text{-}2.6)$$

จำนวนผลผลิตจากการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของเชื้อเพลิงทั้งของเหลวและก๊าซสามารถหาได้โดยนำสมการที่พิจารณามาแล้วข้างต้นมาใช้ต่อ

ส่วนประกอบของผลผลิตจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงของเหลว 1 kg เมื่อแสดงอยู่ในหน่วยของ kmole/kg จะหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$L_{CO_2} = \frac{C}{12} \qquad (5\text{-}2.7)$$

$$L_{H_2O} = \frac{H}{2} \qquad (5\text{-}2.8)$$

$$L_{O_2} = 0.21(\alpha - 1)L_{theo} \qquad (5\text{-}2.9)$$

$$L_{N_2} = 0.79\alpha L_{theo} \qquad (5\text{-}2.10)$$

จำนวนทั้งหมดของผลผลิตจากการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของน้ำมันเชื้อเพลิงจะหาได้จากผลรวมเป็นกิโลโมลของผลผลิตจากการเผาไหม้แต่ละอย่าง คือ

$$L_{prod} = L_{CO_2} + L_{H_2O} + L_{O_2} + L_{N_2} \qquad (5\text{-}2.11)$$

หรือ

$$L_{prod} = \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + 0.21(\alpha - 1)L_{theo} + 0.79\alpha L_{theo} \qquad (5\text{-}2.12)$$

หลังจากจัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$L_{prod} = \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + (\alpha - 0.21)L_{theo} \qquad (5\text{-}2.13)$$

มวลของผลผลิตจากการเผาไหม้จะเท่ากับผลรวมของมวลของเชื้อเพลิงกับอากาศก่อนการเผาไหม้ แต่จำนวนกิโลโมลของผลผลิตจากการเผาไหม้ไม่จำเป็นต้องเท่ากับจำนวนกิโลโมลของไอดี

การเปลี่ยนแปลงของจำนวนกิโลโมลในไอดีเนื่องจากเกิดการเผาไหม้จะหาได้จาก

$$\Delta L = L_{prod} - L_{mix} \qquad (5\text{-}2.14)$$

น้ำมันเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ ปริมาตรของผลผลิตจากการเผาไหม้จะมากกว่าปริมาตรของไอดีเสมอ และหลังจากเชื้อเพลิงก๊าซเกิดการเผาไหม้ ปริมาตร (จำนวนกิโลโมล) ของผลผลิตจากการเผาไหม้อาจจะน้อยกว่า, เท่ากับ, หรือมากกว่าปริมาตร (จำนวนกิโลโมล) ของไอดีก็ได้

การเปลี่ยนแปลงของปริมาตร (จำนวนกิโลโมล) ขึ้นอยู่กับธรรมชาติและปริมาณของสารไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในเชื้อเพลิงและขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนไฮโดรคาร์บอนและจำนวนไฮโดรเจนกับคาร์บอนมอนอกไซด์

การเปลี่ยนแปลงปริมาตรในระหว่างการเผาไหม้ที่กล่าวมาแล้วนำไปสู่สิ่งที่เรียกว่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงเชิงโมล (Molar change coefficient) ของส่วนผสมที่เผาไหม้ได้ μ_o ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างจำนวนกิโลโมลของผลผลิตจากการเผาไหม้ M_{prod} กับจำนวนกิโลโมลของส่วนผสมที่เผาไหม้ได้ M_{mix} คือ

$$\mu_o = \frac{L_{prod}}{L_{mix}} = 1 + \frac{\Delta L}{L_{mix}} \qquad (5\text{-}2.15)$$

ที่ปลายของจังหวะอัด ในกระบอกสูบบรรจุไว้ด้วยส่วนผสมทำงาน (Working mixture) ซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมที่เผาไหม้ได้กับก๊าซไอเสียที่ตกค้างอยู่ แต่สัมประสิทธิ์ μ_o ไม่นำผลของก๊าซไอเสียตกค้างมาคิด ด้วยเหตุนี้จึงมีการนิยามสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงเชิงโมลของส่วนผสมทำงาน μ ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างจำนวนกิโลโมลทั้งหมดของก๊าซในกระบอกสูบหลังจากเกิดการเผาไหม้ (ผลผลิตจากการเผาไหม้ L_{prod} กับก๊าซไอเสียตกค้าง L_r จากวัฏจักรที่แล้ว) กับจำนวนกิโลโมลทั้งหมดก่อนเกิดการเผาไหม้ (ส่วนผสมที่เผาไหม้ได้ L_{prod} กับก๊าซไอเสียตกค้าง L_r) ขึ้นมา คือ

$$\mu = \frac{L_{prod} + L_r}{L_{mix} + L_r} \qquad (5\text{-}2.16)$$

กำหนดให้ f เป็นสัมประสิทธิ์ของก๊าซไอเสียตกค้าง คือ

$$f = \frac{L_r}{L_{mix}} \qquad (5\text{-}2.17)$$

เมื่อหารสมการ (5-2.16) ด้วย L_{mix} แล้วแทนค่า $\mu_o = L_{prod} / L_{mix}$ จากสมการ (5-2.15) กับสมการ (5-2.17) ลงไปจะได้

$$\mu = \frac{\mu_o + f}{1 + f} \qquad (5\text{-}2.18)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ μ ที่มากหมายถึงผลผลิตจากการเผาไหม้มีปริมาตรมาก และจะมีส่วนช่วยทำให้งานสุทธิของวัฏจักรสูงขึ้นด้วย

ค่าของสัมประสิทธิ์ μ ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิง สัมประสิทธิ์ของก๊าซไอเสียตกค้าง f และสัมประสิทธิ์อากาศส่วนเกิน α ปัจจัย

สำคัญที่มีผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์ μ_o และ μ คือสัมประสิทธิ์ α ถ้าค่าของ α ลดน้อยลงค่าของ μ_o และ μ จะเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ μ_o และ μ ที่มีค่าสูงจึงทำให้กำลังของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนเพิ่มมากมากขึ้นเมื่อทำงานโดยมีส่วนผสมหนา คือ $\alpha < 1$

ค่าของสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงเชิงโมลของส่วนผสมทำงาน μ มีดังต่อไปนี้

เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน	μ = 1.02-1.12
เครื่องยนต์ดีเซล	μ = 1.01-1.06
เครื่องยนต์ที่ทำงานด้วย Generator gas	μ = 1.02-1.12

5-2.2 ค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงและส่วนผสม

วิธีหลักในการหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงคือการเผาไหม้เชื้อเพลิงในบอมบ์แคลอริมิเตอร์

ค่าความร้อนค่าต่ำ (Lower heating value มีหน่วยเป็น kJ/kg) ของน้ำมันเชื้อเพลิงและเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งสามารถคำนวณได้จากสูตรของ Mendeleyev คือ

$$q_f = 34\,013C + 125\,600H - 10\,900(O-S) - 2512\,(9H+W) \quad (5\text{-}2.19)$$

เมื่อ C, H, O, S และ W คือปริมาณเป็นร้อยละของธาตุแต่ละชนิดและน้ำในเชื้อเพลิง

ค่าความร้อนค่าต่ำสำหรับเชื้อเพลิงเหลว (มีหน่วยเป็น kJ/kg) สามารถคำนวณได้จากสูตรของ Mendeleyev คือ

$$q_f = 33\,915C + 125\,610H - 10\,886(O-S) - 2512\,(W-9H) \quad (5\text{-}2.20)$$

สำหรับน้ำมันข้น (Fuel oil ซึ่งหมายถึงน้ำมันดีเซลและน้ำมันเตา) ค่าความร้อนค่าสูง (มีหน่วยเป็น kJ/kg) จะคำนวณได้จาก

$$q_{fh} = 41130 + 139.6\,(^{o}API) \quad (5\text{-}2.21)$$

$$q_{fh} = 51716 - 8793.8\,(SG)^2 \quad (5\text{-}2.22)$$

เมื่อ $^{o}API = \dfrac{141.5}{SG} - 131.5$ = Degrce API ของเชื้อเพลิง

SG = ค่าความถ่วงจำเพาะที่ 15.6 ^{O}C

กำลังของเครื่องยนต์ซึ่งทำงานด้วยเชื้อเพลิงชนิดต่างๆขึ้นอยู่กับค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของส่วนผสมเชื้อเพลิงกับปริมาณของอากาศที่จำเป็นต่อการเผาไหม้

ถ้าไม่คิดปริมาณของเชื้อเพลิง ค่าความร้อน (เป็น kJ/m^3) ของส่วนผสมน้ำมันเชื้อเพลิงกับอากาศสามารถหาได้จาก

$$q_{mix} = \frac{q_f}{\alpha V'_{theo}} \qquad (5\text{-}2.23)$$

เมื่อ V'_{theo} คือจำนวนปริมาตรของอากาศที่ต้องการทางทฤษฎีเพื่อที่จะเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 kg (มีหน่วยเป็น m^3 of air/kg of fuel)

ค่าความร้อนจากการเผาไหม้ส่วนผสมเชื้อเพลิงก๊าซกับอากาศจะหาได้จาก

$$q_{mix} = \frac{q_f}{1 + \alpha V''_{theo}} \qquad (5\text{-}2.24)$$

เมื่อ V''_{theo} คือจำนวนปริมาตรของอากาศที่ต้องการทางทฤษฎีเพื่อที่จะเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซ 1 m^3 (มีหน่วยเป็น m^3 of air/m^3 of fuel)

5-2.3 ความจุความร้อนของไอดีและผลผลิตจากการเผาไหม้

อุณหภูมิของการเผาไหม้จะหาได้ถ้ารู้ความจุความร้อนเชิงโมลของก๊าซต่างๆ ซึ่งความจุความร้อนนี้ก็ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย

ความจุความร้อนเชิงโมลที่แท้จริงกับความจุความร้อนเชิงโมลเฉลี่ยนั้นต่างกัน

ความจุความร้อนเชิงโมลที่แท้จริงคือค่าความจุความร้อนเชิงโมลที่แท้จริงของก๊าซที่แน่นอนด้วยอุณหภูมิจำเพาะค่าหนึ่ง

ความจุความร้อนเชิงโมลเฉลี่ยคือค่าเฉลี่ยที่แน่นอนค่าหนึ่งของค่าความจุความร้อนเชิงโมลระหว่างอุณหภูมิที่กำหนดสองค่า โดยสมมติว่าในช่วงระหว่างอุณหภูมิทั้งสองนั้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุความร้อนเป็นแบบเชิงเส้น

ค่าความจุความร้อนเชิงโมลเฉลี่ยที่ปริมาตรคงที่ $M\,c_v$ ในหน่วย kJ/kmole K สามารถหาได้จาก

$$M\,c_v = a + b\,T \qquad (5\text{-}2.25)$$

เมื่อ a และ b คือค่าคงที่ และ T คืออุณหภูมิเป็น K

ค่าความจุความร้อนเชิงโมลเฉลี่ยที่ความดันคงที่ $M\,c_p$ ในหน่วย kJ/kmole K สามารถหาได้จาก

$$M\,c_p = M\,c_v + M\,R = M\,c_v + 8314 \qquad (5\text{-}2.26)$$

เมื่อ M R = 8314 kJ/kmole K คือค่าคงที่ของก๊าซสากลเชิงโมล (Molar universal gas constant)

ตามปกติจะสมมติให้ค่าความจุความร้อนของไอดีสำหรับเครื่องยนต์ทั้งหลายเท่ากับค่าความจุความร้อนของอากาศ นั่นคือไม่คิดผลของไอเชื้อเพลิง (ในกรณีที่เป็นเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน) และไม่คิดความแตกต่างระหว่างค่าความจุความร้อนของเชื้อเพลิงก๊าซกับอากาศ (ในกรณีที่เป็นเครื่องยนต์ก๊าซ)

5-3 ปฏิกิริยาเคมีในการเผาไหม้เชื้อเพลิง

รายละเอียดของปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นระหว่างที่เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้นั้นซับซ้อนมาก แต่ผลลัพธ์โดยรวมสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเคมีอย่างง่าย เชื้อเพลิงของเหลวและเชื้อเพลิงก๊าซตามปกติจะประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจน ในบางกรณีจะมีออกซิเจนและซัลเฟอร์ในปริมาณน้อยปนอยู่ด้วย

การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต้องมีอากาศ ในกรณีที่เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ คาร์บอนและไฮโดรเจนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำในสภาพเป็นไอ ซัลเฟอร์ก็จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนด้วย เกิดเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ปฏิกิริยาทั้งหลายนี้จะปลดปล่อยความร้อนออกมา ออกซิเจนในเชื้อเพลิงก็จะมีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาด้วย

ข้อมูลสำหรับส่วนประกอบของอากาศตามปกติที่ใช้ในสมการการเผาไหม้มีดังนี้

ก๊าซ	ppm โดยปริมาตร	M	Mole fraction	Mole ratio
O_2	209,500	31.998 ≈ 32	0.2095	1
N_2	780,900	28.012 ≈ 28	0.7905	3.773
A	9,300	38.948 ≈ 39	-	-
CO_2	300	44.009 ≈ 44	-	-
Air	1,000,000	28.962 ≈ 29	1	4.773

5-3.1 การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของเชื้อเพลิงของเหลวที่ส่วนผสมมีความถูกต้องทางเคมี

กระบวนการรวมตัวกับออกซิเจนของคาร์บอนและไฮโดรเจนถูกกำหนดด้วยสมการเคมีต่อไปนี้

$$C + O_2 = CO_2$$

$$12 \text{ kg } C + 32 \text{ kg } O_2 = 44 \text{ kg } CO_2$$

1 kmole C + 1 kmole O_2 = kmole CO_2

และ $2H_2 + O_2 = 2H_2O$

4 kg H_2 + 32 kg O_2 = 36 kg H_2O

2 kmole H_2 + 1 kmole O_2 = 2 kmole H_2O

สมการเคมีของเชื้อเพลิงในรูปแบบทั่วไป

ตามปกติมักจะรู้ส่วนประกอบโดยมวลของเชื้อเพลิงเหลว ถ้ามีคาร์บอน C kg และไฮโดรเจน H kg อยู่ในเชื้อเพลิง 1 kg สมการเคมีในรูปแบบทั่วไป C_xH_y สามารถหาได้จาก

มวลของคาร์บอนในเชื้อเพลิง/มวลของเชื้อเพลิง

$$= \frac{C}{1\ kg} = \frac{12x}{12x + 2.02\frac{y}{2}} \qquad (5\text{-}3.1)$$

โดยการแทนค่าของ x ลงในสมการ (5-3.1) ก็จะหาค่าของ y ได้ จากนั้นก็จะได้สมการในรูปแบบทั่วไปสำหรับเชื้อเพลิง

สมมติว่าสมการทั่วไปของเชื้อเพลิงเป็น C_xH_y สมการปฏิกิริยาของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนสำหรับสภาวะการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ (Stoichiometric condition) สำหรับส่วนผสมที่มีความถูกต้องทางเคมีคือ

$$C_xH_y + (x+\frac{y}{4})O_2 + 3.773(x+\frac{y}{4})N_2$$

$$= xCO_2 + \frac{y}{2}H_2O + 3.773(x+\frac{y}{4})N_2 \qquad (5\text{-}3.2)$$

เมื่อ x คือโมเลกุลของคาร์บอนในเชื้อเพลิง, y/2 คือโมเลกุลของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง, และ 3.773 คือจำนวนโมเลกุลของ N_2 ต่อโมเลกุลของ O_2 ที่มีอยู่ในอากาศ

โดยสมมติฐานที่ใช้มีดังต่อไปนี้

(1) เชื้อเพลิงส่วนใหญ่ประกอบด้วยของผสมระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจน

(2) การรวมตัวกับออกซิเจนอย่างสมบูรณ์ของคาร์บอนและไฮโดรเจนจะเกิดขึ้นเมื่อมีอากาศจ่ายให้ในปริมาณที่ทำให้อัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศมีความถูกต้องทางเคมี

(3) เชื้อเพลิงซึ่งตามปกติประกอบด้วยส่วนผสมของไฮโดรคาร์บอนสามารถแทนได้ด้วยไฮโดรคาร์บอนเชิงเดี่ยวซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจนและมีมวลโมเลกุลเท่ากับเชื้อเพลิง

ปริมาณอากาศที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของเชื้อเพลิง 1 kg คือ

$$m_{theo} = \frac{4.31 \times 32}{M_f}(x + \frac{y}{4}) \text{ kg อากาศ/kg เชื้อเพลิง} \qquad (5\text{-}3.3)$$

เมื่อ M_f คือมวลโมเลกุลของเชื้อเพลิง

5-3.2 การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของเชื้อเพลิงก๊าซที่ส่วนผสมเชื้อเพลิงกับอากาศมีความถูกต้องทางเคมี

นอกเหนือจากคาร์บอนและไฮโดรเจนแล้วเชื้อเพลิงก๊าซมักจะมีออกซิเจนอยู่ด้วย สมมติว่ามีคาร์บอน x โมเลกุล, ไฮโดรเจน y/2 โมเลกุล, และออกซิเจน r/2 โมเลกุลอยู่ในเชื้อเพลิง ดังนั้นเชื้อเพลิงจะสามารถแสดงได้ด้วยสมการทั่วไปอยู่ในรูป $C_xH_yO_r$ ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจนและมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากันกับเชื้อเพลิง สมการปฏิกิริยากับอากาศสามารถเขียนได้เป็น

$$C_xH_yO_r + (x+\frac{y}{4}-\frac{r}{2})O_2 + 3.773(x+\frac{y}{4}-\frac{r}{2})N_2$$

$$= xCO_2 + \frac{y}{2}H_2O + 3.773(x+\frac{y}{4}-\frac{r}{2})N_2 \qquad (5\text{-}3.4)$$

ปริมาณอากาศ (โดยปริมาตร) ที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของเชื้อเพลิงก๊าซ 1 kg จะหาได้จาก

$$V_{theo} = 4.773(x+\frac{y}{4}-\frac{r}{2}) \text{ kmole/kmole of fuel} \qquad (5\text{-}3.5)$$

ในกรณีของเชื้อเพลิงก๊าซ ถ้ารู้ส่วนประกอบโดยปริมาตร (หรือกิโลโมลของส่วนประกอบต่อกิโลโมลของเชื้อเพลิง หรือ m^3 ของส่วนประกอบต่อ m^3 ของเชื้อเพลิง หรือ ปริมาณเป็นร้อยละโดยปริมาตรของส่วนประกอบ) x จะเท่ากับจำนวนกิโลโมลของคาร์บอน, y จะเท่ากับสองเท่าของจำนวนกิโลโมลของไฮโดรเจน, และ r จะเท่ากับสองเท่าของจำนวนออกซิเจนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง จึงต้องคูณ x, y, และ r ด้วยตัวประกอบเพื่อให้ได้ค่าจำนวนทั้งหมด

5-3.3 ปฏิกิริยาเคมีในกรณีที่มีอากาศมากกว่าหรือน้อยกว่าปริมาณที่ต้องการทางทฤษฎี

ปริมาณอากาศ (สำหรับเชื้อเพลิงหนึ่งหน่วยมวล) ที่ส่งเข้าสู่เครื่องยนต์สำหรับการสันดาปกับเชื้อเพลิงแปรเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ขึ้นอยู่กับการเตรียมส่วนผสม (ส่วนผสมถูกจัดเตรียมภายนอกหรือภายใน), ภาระ

ที่เครื่องยนต์รับ, สภาวะการจุดระเบิด, และสภาวะการทำงานอื่นๆ ทำให้อากาศที่ส่งเข้าเครื่องยนต์อาจจะมากกว่า, น้อยกว่า, หรือเท่ากับปริมาณที่ต้องการทางทฤษฎีเพื่อทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ในการคำนวณทางทฤษฎีจึงกำหนดตัวประกอบขึ้นมาตัวหนึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณอากาศที่ใช้จริงกับปริมาณอากาศที่ต้องการทางทฤษฎีเพื่อทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ เรียกว่า สัมประสิทธิ์อากาศ (Air coefficient, α) คือ

$$\alpha = \frac{m_{act}}{m_{theo}} \qquad (5\text{-}3.6)$$

เมื่อ m_{act} คือมวล (เป็น kg) จริงของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงจำนวน 1 kg ค่าของ α อาจมากกว่า 1 (เป็นส่วนผสมบาง), เท่ากับ 1 (เป็นส่วนผสมที่ถูกต้องทางเคมี), หรือน้อยกว่า 1 (เป็นส่วนผสมหนา)

5-3.4 ปฏิกิริยาเคมีในกรณีที่เป็นส่วนผสมบาง

เชื้อเพลิงของเหลว สมการปฏิกิริยาทั่วไปสำหรับส่วนผสมบาง ($\alpha > 1$) คือ

$$C_xH_y + \alpha\left(x+\frac{y}{4}\right)O_2 + 3.773\,\alpha\left(x+\frac{y}{4}\right)N_2$$

$$= xCO_2 + \frac{y}{2}H_2O + (\alpha-1)\left(x+\frac{y}{4}\right)O_2 + 3.773\,\alpha\left(x+\frac{y}{4}\right)N_2 \qquad (5\text{-}3.7)$$

เชื้อเพลิงก๊าซ สมการปฏิกิริยาทั่วไปสำหรับส่วนผสมบาง ($\alpha > 1$) คือ

$$C_xH_yO_r + \alpha\left(x+\frac{y}{4}-\frac{r}{2}\right)O_2 + 3.773\,\alpha\left(x+\frac{y}{4}-\frac{r}{2}\right)N_2$$

$$= xCO_2 + \frac{y}{2}H_2O + (\alpha-1)\left(x+\frac{y}{4}-\frac{r}{2}\right)O_2 + 3.773\,\alpha\left(x+\frac{y}{4}-\frac{r}{2}\right)N_2 \qquad (5\text{-}3.8)$$

5-3.5 ปฏิกิริยาเคมีในกรณีที่เป็นส่วนผสมหนา

เชื้อเพลิงของเหลว

สมการปฏิกิริยาทั่วไปสำหรับส่วนผสมหนา ($\alpha < 1$) ไม่สามารถเขียนได้โดยตรง เนื่องจากมีปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอ ในกรณีนี้คาร์บอนในเชื้อเพลิงจึงไม่รวมกับออกซิเจนเป็น CO_2 ได้ทั้งหมด มีบางส่วนเป็น CO นอกจากนี้บางส่วนของไฮโดรเจนก็ไม่สามารถรวมตัวกับออกซิเจนอีกด้วย ให้ส่วนของคาร์บอนที่เผาไหม้ไปเป็น CO แทนด้วย ϕ สมการปฏิกิริยาจะสามารถเขียนได้เป็น

$$C_xH_y + \alpha\left(x+\frac{y}{4}\right)O_2 + 3.773\,\alpha\left(x+\frac{y}{4}\right)N_2 = (1-\phi)xCO_2$$

$$+\phi\, xCO+\frac{\phi x}{2}H_2+(\frac{x}{2}-\frac{\phi x}{2})H_2O+3.773\,\alpha\,(x+\frac{y}{4})N_2 \qquad (5\text{-}3.9)$$

โดยการสมดุลออกซิเจนก่อนและหลังการเผาไหม้จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\alpha\,(x+\frac{y}{4})=(1-\phi)x+\frac{\phi x}{2}+\frac{y}{4}-\frac{\phi x}{4}=x-\frac{3}{4}\phi x+\frac{y}{4}$$

หรือ $$\frac{3}{4}\phi x=(1-\alpha)\,(x+\frac{y}{4}) \qquad (5\text{-}3.10)$$

จะสามารถคำนวณหาค่าของ ϕ จากสมการ (5-3.10) ได้ ถ้ารู้ค่าของ x, y, และ α จากนั้นนำ ϕ ไปแทนค่าลงในสมการ (5-3.9) ก็จะได้สมการปฏิกิริยาสำหรับการเผาไหม้ของส่วนผสมหนา

เชื้อเพลิงก๊าซ

ในกรณีที่เป็นส่วนผสมหนา ($\alpha<1$) สมการปฏิกิริยาทั่วไปจะเขียนได้เป็น

$$C_xH_yO_r+\alpha\,(x+\frac{y}{4}-\frac{r}{2})O_2+3.773\,\alpha\,(x+\frac{y}{4}-\frac{r}{2})N_2=(1-\phi)xCO_2+\phi\, xCO$$
$$+\frac{\phi x}{b}H_2+(\frac{y}{2}-\frac{\phi x}{b})H_2O+3.773\,\alpha\,(x+\frac{y}{4}-\frac{r}{2})N_2 \qquad (5\text{-}3.11)$$

ค่า b ซึ่งเป็นอัตราส่วนของจำนวนโมเลกุลคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อจำนวนโมเลกุลไฮโดรเจนสำหรับเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะสามารถหาได้จากการวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย ซึ่งการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียในช่วงส่วนผสมหนาแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนระหว่างจำนวนโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮโดรเจนมีค่าคงที่ และไม่เปลี่ยนแปลงแม้ว่า α จะเปลี่ยนแปลงไป อัตราส่วนนี้มีค่าคงที่และเท่ากับ b ค่าของ b จึงประมาณเท่ากับ 2 สำหรับเชื้อเพลิงที่ได้จากจากการกลั่นปิโตรเลียม

โดยการสมดุลออกซิเจนก่อนและหลังการเผาไหม้ จะได้

$$\alpha\,(x+\frac{y}{4}-\frac{r}{2})O_2=(1-\phi)x+\phi\, x+\frac{y}{4}-\frac{\phi x}{2b} \qquad (5\text{-}3.12)$$

เมื่อทราบค่าของ x, y, r, α, และ b ก็จะสามารถหาค่าของ ϕ ได้จากสมการ (5-3.12) สมการปฏิกิริยาขั้นสุดท้ายจะได้โดยการแทนค่า ϕ ที่หาได้ลงในสมการ (5-3.11)

5-3.6 ส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศที่กำหนดด้วยอัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศ

อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศ

ส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศสามารถกำหนดจากอัตราส่วนโดยมวลระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ ตามปกติแล้วมักจะรู้อัตราส่วนไฮโดรเจนกับคาร์บอน

และมวลโมเลกุลของเชื้อเพลิง ในกรณีเช่นนี้ จำนวนกิโลโมลของออกซิเจนที่จ่ายให้ต่อจำนวนกิโลโมลของเชื้อเพลิงจะสามารถหาได้ดังนี้

สำหรับส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ **อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศ** (Fuel-air ratio, F/A) คือ

$$F/A = \frac{\text{kg of fuel}}{\text{kg of air}} = \frac{\dfrac{\text{kg of fuel}}{\text{kmole of fuel}}}{\dfrac{\text{kmole of } O_2}{\text{kmole of fuel}} \times \dfrac{\text{kg of } O_2}{\text{kmole of } O_2} \times \dfrac{\text{kg of air}}{\text{kg of } O_2}}$$

$$= \frac{M_f}{\dfrac{\text{kmole of } O_2}{\text{kmole of fuel}} \times M_{O_2} \times 4.31} = \frac{M_f}{\dfrac{\text{kmole of } O_2}{\text{kmole of fuel}} \times 32 \times 4.31}$$

จะได้ $$\frac{\text{kmole of } O_2}{\text{kmole of fuel}} = \frac{M_f}{(4.31 \times 32)(F/A)} \qquad (5\text{-}3.13)$$

เมื่อ M_f คือมวลโมเลกุลของเชื้อเพลิง, M_{O_2} คือมวลโมเลกุลของออกซิเจน, 4.31 คืออัตราส่วนระหว่างมวลของอากาศกับมวลของออกซิเจนที่มีอยู่ในบรรยากาศ (อากาศในบรรยากาศปกติมีออกซิเจนอยู่ 23.2 % โดยมวล)

สัมประสิทธิ์อากาศและอัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศ

ส่วนผสมเชื้อเพลิงกับอากาศที่ใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายในถูกกำหนดด้วยสัมประสิทธิ์อากาศและอัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศโดยมวล สำหรับเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนแต่ละชนิดจะมีความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างค่าทั้งสองนี้ ถ้าเชื้อเพลิงที่ใช้มีสูตรเคมีเป็น C_xH_y ปริมาณอากาศทางทฤษฎีที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของเชื้อเพลิง 1 kg จะหาได้จาก

$$m_{theo} = \frac{32 \times 4.31(x + \frac{y}{4})}{12x + y} \text{ kg อากาศ/kg เชื้อเพลิง} \qquad (5\text{-}3.14)$$

สัมประสิทธิ์อากาศจะหาได้จาก

$$\alpha = \frac{m_{act}}{m_{theo}} = \frac{(12x + y)m_{act}}{32 \times 4.31(x + \frac{y}{4})} \qquad (5\text{-}3.15)$$

อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศกลายเป็น

$$F/A = \frac{1}{m_{act}} = \frac{1}{\alpha\ m_{theo}} = \frac{(12x + y)}{32 \times 4.31(x + \frac{y}{4})\alpha} \qquad (5\text{-}3.16)$$

หรือ $$\alpha = \frac{(12x + y)}{32 \times 4.31(x + \frac{y}{4})F/A} \qquad (5\text{-}3.17)$$

ตัวอย่างที่ 5-3.1 Ethyl alcohol $C_2H_5(OH)$ ถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน คาร์บูเรเตอร์ถูกปรับเพื่อให้ได้อัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงเป็น 9:1 ถ้าเชื้อเพลิงจำนวน 60% จะต้องระเหยก่อนเข้าไปสู่กระบอกสูบของเครื่องยนต์เพื่อทำให้การเริ่มติดเครื่องได้เรียบ จงคำนวณหาอุณหภูมิต่ำสุดของส่วนผสมไอดีที่จะทำให้เริ่มติดเครื่องได้เรียบ

วิธีทำ

$$\frac{\text{kg of air}}{\text{kg of fuel vapor}} = \frac{\text{A/F}}{\%\ \text{fuel evaporated}/100} = \frac{9:1}{60/100}$$

$$= 15 \text{ kg อากาศ/kg เชื้อเพลิง}$$

และ $$\frac{\text{kg of air}}{\text{kg of fuel vapor}} = \frac{\text{kmole of air} \times M_{air}}{\text{kmole of vapor} \times M_{\text{fuel vapor}}}$$

$$= \frac{p_a - p_f}{p_f}\frac{M_a}{M_f} = \frac{1.013 - p_f}{p_f}\frac{29}{46}$$

เมื่อ p_a และ p_f เป็นความดันทั้งหมดและความดันไอของไอเชื้อเพลิง, ตามลำดับ ดังนั้น

$$\frac{1.013 - p_f}{p_f}\frac{29}{46} = 15 \text{ kg อากาศ/kg เชื้อเพลิง}$$

นั่นคือ $p_f = 0.04089$ bar

จากตารางความดันไอของเอทิลแอลกอฮอล์ อุณหภูมิอิ่มตัวที่ความดัน 0.042 ksc (0.04119 bar) คือ $14.2^{O}C$

ดังนั้น อุณหภูมิ (โดยประมาณ) ที่ต้องการคือ $14.2^{O}C$ **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 5-3.2 ไอของก๊าซโซลีนและอากาศจะรวมตัวเป็นส่วนผสมไอดีโดยอัตราส่วนไอเชื้อเพลิงกับอากาศอยู่ในช่วง 1:8 ซึ่งเป็นส่วนผสมหนา ถึง 1:20 ซึ่งเป็นส่วนผสมบาง ถ้าคาร์บูเรเตอร์ถูกปรับตั้งให้ได้อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศเป็น 1:6 สำหรับช่วงการเริ่มติดเครื่อง จงคำนวณหาช่วงของอุณหภูมิที่จะสามารถเริ่มติดเครื่องด้วยก๊าซโซลีนได้ มวลโมเลกุลของก๊าซโซลีนทางการค้าเป็น 113 จาก Equilibrium air distillation curve สำหรับก๊าซโซลีนทางการค้าพบว่าอุณหภูมิที่ทำให้ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศเป็น 1:6 ระเหยในปริมาณ 30%, 70%, และ 80% คือ $14^{O}C$, $49^{O}C$, และ $57^{O}C$, ตามลำดับ ซึ่งช่วงที่อัตราการระเหยเกิน 30% นั้น เส้น Distillation curve แทบจะเป็นเส้นตรง

วิธีทำ ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศเป็น 1:20 จะใช้สำหรับการระเหยในจำนวน = (6/20)100 = 30% ของเชื้อเพลิง

ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศเป็น 1:8 จะใช้สำหรับการระเหยในจำนวน = (6/8)100 = 75% ของเชื้อเพลิง

สำหรับอัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศ 1:6 กับปริมาณการระเหย 30% อุณหภูมิของการกลายเป็นไอคือ 14°C และที่อัตราการกลายเป็นไอ 75% อุณหภูมิของการกลายเป็นไอคือ (49+57)/2 = 53°C

ดังนั้น ช่วงของอุณหภูมิที่เครื่องยนต์จะสามารถเริ่มติดเครื่องได้คืออยู่ระหว่าง 14°C ถึง 53°C **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 5-3.3 Iso-octane C_8H_{18} ถูกเผาไหม้โดยมีส่วนผสมทางเคมีถูกต้องกับอากาศที่ความดันบรรยากาศ จงเขียนสมการปฏิกิริยาและตรวจสอบความถูกต้องของสมการ และจงคำนวณหาปริมาณเป็นร้อยละโดยปริมาตรกับโดยมวลของผลิตผลจากการเผาไหม้ที่ความดันบรรยากาศด้วย

วิธีทำ จากสมการ (5-3.2)

$$C_xH_y + (x+\frac{y}{4})O_2 + 3.773(x+\frac{y}{4})N_2 = xCO_2 + \frac{y}{2}H_2O + 3.773(x+\frac{y}{4})N_2$$

จะได้ $C_8H_{18} + (12.5)O_2 + 3.773(12.5)N_2 = 8CO_2 + 9H_2O + 3.773(12.5)N_2$

หรือ $C_8H_{18} + (12.5)O_2 + 47.1625N_2 = 8CO_2 + 9H_2O + 47.1625N_2$ **ตอบ**

ตรวจสอบความถูกต้องของสมการปฏิกิริยาด้วยการสมดุลมวลในตารางต่อไปนี้

ส่วนผสม		**ผลิตผลจากการเผาไหม้**	
ส่วนประกอบ	มวล (kg)	ส่วนประกอบ	มวล (kg)
C_8H_{18}	$1\times114 = 114$	CO_2	$8\times44 = 352$
O_2	$12.5\times32 = 400$	H_2O	$9\times18 = 162$
N_2	$47.1625\times28 = 1320.55$	N_2	$47.1625\times28 = 1320.55$
	รวม 1834.55		รวม 1834.55

ตอบ

ปริมาณเป็นร้อยละโดยปริมาตรและโดยมวลของผลิตผลจากการเผาไหม้สามารถคำนวณหาได้ดังนี้

ปริมาณเป็นร้อยละโดยปริมาตร

CO_2: $[8/(8+9+47.1625)]\times100 = 12.47\%$

H_2O: $[9/(8+9+47.1625)]\times100 = 14.03\%$

N_2: $[47.1625/(8+9+47.1625)]\times100 = 73.50\%$

รวม = 100% **ตอบ**

ปริมาณเป็นร้อยละโดยมวล

CO_2: $[(8\times44)/(8\times44+9\times18+47.1625\times28)]\times100$ = 19.19%

H_2O: $[(9\times18)/(8\times44+9\times18+47.1625\times28)]\times100$ = 8.83%

N_2: $[(47.1625\times28)/(8\times44+9\times18+47.1625\times28)]\times100$ = 71.98%

<u>รวม = 100%</u> **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 5-3.4 (1) จงหาอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงสำหรับสภาวะที่เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของส่วนผสมที่มีความถูกต้องทางเคมีสำหรับตัวอย่างก๊าซโซลีนที่มีสมการเคมีโดยประมาณเป็น C_6H_{14}

(2) จงเขียนสมการปฏิกิริยาของก๊าซโซลีนที่เผาไหม้โดยมีอากาศส่วนเกิน 20%

(3) วิเคราะห์ผลิตผลจากการเผาไหม้จากข้อ (2) ในเชิงปริมาตร ถ้ามันถูกทำให้เย็นลงเป็น $30^{O}C$ และมีความดัน 1.01 bar

วิธีทำ (1) อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศสำหรับสภาวะที่เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของส่วนผสมที่มีความถูกต้องทางเคมีคือ

$$F/A = \frac{(12x+y)}{32\times4.31(x+\frac{y}{4})\alpha} = \frac{(12\times6+14)}{32\times4.31(6+\frac{14}{4})(1)}$$

$$= 0.06564 \text{ kg เชื้อเพลิง/kg อากาศ}$$

ดังนั้นอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงคือ

$$A/F = 1/0.06564 = 15.23 \text{ kg อากาศ/kg เชื้อเพลิง}$$ **ตอบ**

(2) ในกรณีที่มีอากาศส่วนเกิน 20%, นั่นคือ $\alpha = 1.2$, สมการปฏิกิริยาคือ

$$C_xH_y+\alpha(x+\frac{y}{4})O_2+3.773\,\alpha(x+\frac{y}{4})N_2$$

$$= xCO_2+\frac{y}{2}H_2O+(\alpha-1)(x+\frac{y}{4})O_2+3.773\,\alpha(x+\frac{y}{4})N_2$$

$$C_6H_{14}+1.2(6+\frac{14}{4})O_2+3.773(1.2)(6+\frac{14}{4})N_2$$

$$= 6CO_2+\frac{14}{2}H_2O+(1.2-1)(6+\frac{14}{4})O_2+3.773(1.2)(6+\frac{14}{4})N_2$$

ดังนั้น สมการปฏิกิริยาคือ

$$C_6H_{14}+11.4O_2+43.0122N_2 = 6CO_2+7H_2O+1.9O_2+43.0122N_2$$ **ตอบ**

(3) Partial pressure ของน้ำในสถานะไอ $= \frac{7}{(6+7+1.9+43.0122)}(1.01 \text{ bar})$

$$= 0.12208 \text{ bar}$$

จากตารางไอน้ำ อุณหภูมิอิ่มตัวที่ความดัน 0.12208 bar คือ $49.8^{O}C$ เพราะฉะนั้นจะมีการควบแน่นเป็นน้ำ เมื่อเย็นตัวลงถึง $30^{O}C$

ปริมาณเป็นร้อยละโดยปริมาตรของผลิตผลจากการเผาไหม้ (ฐานแห้ง) คือ

CO_2: $[6/(6+1.9+43.0122)]\times 100 = 11.79\%$

O_2: $[1.9/(6+1.9+43.0122)\times 100 = 3.73\%$

N_2: $[43.0122/(6+1.9+43.0122)]\times 100 = 84.48\%$

รวม = 100% **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 5-3.5 Ethyl alcohol $CH_3(OH)$ ถูกเผาไหม้ในเครื่องยนต์เครื่องหนึ่ง (1) จงเขียนสมการปฏิกิริยาและหาอัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศสำหรับการเผาไหม้ส่วนผสมที่มีความถูกต้องทางเคมี, และ (2) จงเขียนสมการปฏิกิริยาและคำนวณปริมาณเป็นร้อยละโดยมวลของผลิตผลจากการเผาไหม้ เมื่ออัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศเป็น 0.14

วิธีทำ (1) ควรสังเกตด้วยว่าในเชื้อเพลิงมีออกซิเจนอยู่ด้วย ดังนั้นสมการที่ให้ความสัมพันธ์ระหว่างกิโลโมลของออกซิเจนกับกิโลโมลของเชื้อเพลิงสำหรับเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนจะไม่สามารถนำมาใช้ได้ สมการปฏิกิริยาสำหรับการเผาไหม้ส่วนผสมที่มีความถูกต้องทางเคมีคือ

$$C_xH_yO_r + (x+\frac{y}{4}-\frac{r}{2})O_2 + 3.773(x+\frac{y}{4}-\frac{r}{2})N_2 = xCO_2 + \frac{y}{2}H_2O + 3.773(x+\frac{y}{4}-\frac{r}{2})N_2$$

$$CH_3(OH) + (1+\frac{4}{4}-\frac{1}{2})O_2 + 3.773(1+\frac{4}{4}-\frac{1}{2})N_2 = 1CO_2 + \frac{4}{2}H_2O + 3.773(1+\frac{4}{4}-\frac{1}{2})N_2$$

$$CH_3(OH) + 1.5O_2 + 5.6595N_2 = CO_2 + 2H_2O + 5.6595N_2$$ **ตอบ**

จากสมการปฏิกิริยาจะได้

32 kg เชื้อเพลิง + 48 kg O_2+158.5 kg $N_2 \rightarrow$ 44 kg CO_2+36 kg H_2O+158.5 kg N_2

ดังนั้น อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศคือ

$$F/A = \frac{32}{48+158.5} = 0.155 \text{ kg เชื้อเพลิง/kg อากาศ}$$ **ตอบ**

(2) สัมประสิทธิ์อากาศเมื่ออัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศเป็น 0.14 คือ

$$\alpha = \frac{0.155}{0.14} = 1.1071$$

เป็นส่วนผสมบาง เพราะว่า $\alpha > 1$, ดังนั้น สมการปฏิกิริยาคือ

$$C_xH_yO_r + \alpha(x+\frac{y}{4}-\frac{r}{2})O_2 + 3.773\alpha(x+\frac{y}{4}-\frac{r}{2})N_2 = xCO_2 + \frac{y}{2}H_2O + (\alpha-1)(x+\frac{y}{4}-\frac{r}{2})O_2 + 3.773\alpha(x+\frac{y}{4}-\frac{r}{2})N_2$$

$$CH_3(OH) + 1.1071(1+\frac{4}{4}-\frac{1}{2})O_2 + 3.773(1.1071)(1+\frac{4}{4}-\frac{1}{2})N_2$$

$$= 1CO_2+\frac{4}{2}H_2O+(1.1071-1)(1+\frac{4}{4}-\frac{1}{2})O_2+3.773(1.1071)(1+\frac{4}{4}-\frac{1}{2})N_2$$

$CH_3(OH)+1.661O_2+6.2656N_2 = CO_2+2H_2O+0.16065O_2+6.2656N_2$ **ตอบ**

ปริมาณเป็นร้อยละโดยปริมาตรของผลิตผลจากการเผาไหม้ คือ

CO_2: $[1/(1+2+0.16065+6.2656)]\times 100 = 10.61\%$

H_2O: $[2/(1+2+0.16065+6.2686)]\times 100 = 21.22\%$

O_2: $[0.16065/(1+2+0.16065+6.2656)]\times 100 = 1.70\%$

N_2: $[6.2656/(1+2+0.16065+6.2656)]\times 100 = 66.47\%$

รวม = 100% **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 5-3.6 น้ำมันข้นที่ประกอบด้วยคาร์บอน 86% กับไฮโดรเจน 14% โดยมวล ถูกเผาไหม้โดยมีอากาศส่วนเกิน 10% ถ้าอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เป็นอากาศแห้งและเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ (1) จงหาส่วนประกอบของผลิตผลจากการเผาไหม้โดยมวล, (2) จงหาจุดน้ำค้างของผลิตผลจากการเผาไหม้เมื่อมันมีความดันเป็น 1.01 bar, (3) มวลของน้ำที่ควบแน่นต่อเชื้อเพลิง 1 kg เมื่อผลิตผลจากการเผาไหม้ถูกทำให้เย็นลงเป็น 35^oC ที่ความดัน 1.01 bar

วิธีทำ จากสมการ (5-3.1) จะได้มวลของคาร์บอนในเชื้อเพลิง/มวลของเชื้อเพลิงเป็น

$$\frac{C}{1\ kg} = \frac{12x}{12x+2.02\frac{y}{2}} \quad \text{หรือ} \quad \frac{0.86}{1} = \frac{12x}{12x+1.01y}$$

จะได้ x = 1, y = 1.934 ดังนั้นสมการเคมีของเชื้อเพลิงคือ $CH_{1.934}$ เนื่องจากเป็นส่วนผสมบาง (มีอากาศส่วนเกิน 10%, $\alpha = 1.1$ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของเทอมที่ 2 ของสมการปฏิกิริยาจะให้

$$\frac{\text{kmole of } O_2}{\text{kmole of fuel}} = \alpha\ (x+\frac{y}{4}) = 1.1(1+\frac{1.934}{4}) = 1.63185$$

สมการปฏิกิริยาจะเป็น

$$CH_{1.934}+(1.63185)O_2+3.773(1.63185)N_2$$
$$= 1CO_2+\frac{1.934}{2}H_2O+(1.1-1)(1+\frac{1.934}{4})O_2+3.773(1.63185)N_2$$
$$CH_{1.934}+1.63185O_2+6.157N_2 = CO_2+0.967H_2O+0.14835O_2+6.157N_2$$

13.934 kg เชื้อเพลิง+52.22 kg O_2 +172.4 kg N_2

$\rightarrow$ 44 kg CO_2+17.406 kg H_2O+4.7472 kg O_2+172.4 kg N_2

สำหรับเชื้อเพลิง 1 kg ผลิตผลจากการเผาไหม้ คือ

$$3.1577 \text{ kg } CO_2 + 1.2492 \text{ kg } H_2O + 0.3407 \text{ kg } O_2 + 12.3726 \text{ kg } N_2$$

(1) เนื่องจาก ส่วนประกอบโดยมวลของก๊าซในผลิตผลจากการเผาไหม้

= มวลของก๊าซ/มวลทั้งหมดของผลิตผลจากการเผาไหม้

ซึ่งจะได้ $CO_2 = 0.1846$, $H_2O = 0.0\dot{7}297$, $O_2 = 0.0199$, และ $N_2 = 0.7227$ **ตอบ**

(2) เนื่องจาก

$$\frac{p_w}{p} = \frac{\text{kmole of } H_2O}{\text{kmole of product}} = \frac{0.967}{(1 + 0.967 + 0.14835 + 6.157)} = 0.1169$$

ดังนั้น $p_w = (0.1169)(1.01 \text{ bar}) = 0.1181 \text{ bar} \approx 0.12 \text{ bar}$

ที่ความดัน 0.12 bar อุณหภูมิอิ่มตัวซึ่งเป็นจุดน้ำค้างของผลิตผลจากการเผาไหม้คือ $49.45^{\circ}C$ **ตอบ**

(3) ถ้าผลิตผลจากการเผาไหม้เย็นลงเป็น $35^{\circ}C$ ที่ 1.01 bar น้ำในสถานะไอทั้งหมดที่อยู่ในผลิตผลจากการเผาไหม้จะควบแน่นเป็นน้ำ โดยมีมวลเป็น 1.2492 kg/kg ของเชื้อเพลิง **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 5-3.7 น้ำมันดีเซลใสซึ่งมีสมการเคมีโดยเฉลี่ยเป็น $C_{12}H_{26}$ เผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซลด้วยสัมประสิทธิ์อากาศเป็น $\alpha = 4.5$ ในขณะเดินเบาและเป็น 1.35 ในขณะรับภาระเต็มที่ (1) จงคำนวณหาอัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศของส่วนผสมที่ใช้ในแต่ละกรณีและเขียนสมการปฏิกิริยาสำหรับส่วนผสมทั้งสองกรณี, (2) จงหาปริมาณเป็นร้อยละโดยมวลของผลิตผลจากการเผาไหม้สำหรับส่วนผสมในขณะที่รับภาระเต็มที่, และ (3) ถ้าก๊าซไอเสียจากเครื่องยนต์ในขณะรับภาระเต็มที่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการให้ความร้อนกับอุปกรณ์อื่น จงหาอุณหภูมิต่ำสุดที่ก๊าซไอเสียจะสามารถเย็นลงได้โดยไม่เกิดการควบแน่น ความดันของก๊าซไอเสียในอุปกรณ์ที่ใช้ประโยชน์จากไอเสียเป็น 1.18 bar

วิธีทำ (1) ในขณะที่เดินเบา อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศเป็น

$$F/A = \frac{(12x + y)}{32 \times 4.31(x + \frac{y}{4})\alpha} = \frac{(12 \times 12 + 26)}{32 \times 4.31(12 + \frac{26}{4})4.5} = 0.0148$$

สมการปฏิกิริยาคือ

$$C_xH_y + \alpha(x + \frac{y}{4})O_2 + 3.773\,\alpha(x + \frac{y}{4})N_2$$

$$= xCO_2 + \frac{y}{2}H_2O + (\alpha - 1)(x + \frac{y}{4})O_2 + 3.773\,\alpha(x + \frac{y}{4})N_2$$

$$C_{12}H_{26}+4.5(12+\frac{26}{4})O_2+3.773(4.5)(12+\frac{26}{4})N_2$$

$$= 12CO_2+\frac{26}{2}H_2O+(4.5-1)(12+\frac{26}{4})O_2+3.773(4.5)(12+\frac{26}{4})N_2$$

หรือ

$$C_{12}H_{26}+83.25O_2+314.1023N_2 = 12CO_2+13H_2O+64.75O_2+314.1023N_2$$ **ตอบ**

ในขณะที่รับภาระเต็มที่ อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศเป็น

$$F/A = \frac{(12\times 12+26)}{32\times 4.31(12+\frac{26}{4})1.35} = 0.04935$$

สมการปฏิกิริยาคือ

$$C_{12}H_{26}+1.35(12+\frac{26}{4})O_2+3.773(1.35)(12+\frac{26}{4})N_2$$

$$= 12CO_2+\frac{26}{2}H_2O+(1.35-1)(12+\frac{26}{4})O_2+3.773(1.35)(12+\frac{26}{4})N_2$$

หรือ

$$C_{12}H_{26}+24.975O_2+94.2307N_2 = 12CO_2+13H_2O+6.475O_2+94.2307N_2$$ **ตอบ**

(2) ปริมาณเป็นร้อยละโดยมวลของผลิตผลจากการเผาไหม้สำหรับส่วนผสมในขณะที่รับภาระเต็มที่คือ

CO_2: $[(12\times 44)/(12\times 44+13\times 18+6.475\times 32+94.2307\times 28)]\times 100 = 14.64\%$

H_2O: $[(13\times 18)/(12\times 44+13\times 18+6.475\times 32+94.2307\times 28)]\times 100 = 6.49\%$

O_2: $[(6.475\times 32)/(12\times 44+13\times 18+6.475\times 32+94.2307\times 28)]\times 100 = 5.74\%$

N_2: $[(94.2307\times 28)/(12\times 44+13\times 18+6.475\times 32+94.2307\times 28)]\times 100 = 73.13\%$

ตอบ

(3) Partial pressure ของไอน้ำคือ $= \frac{13}{12+13+6.475+94.2307}(1.18 \text{ bar})$

$= 0.122$ bar

ดังนั้นอุณหภูมิต่ำสุดของก๊าซไอเสีย คือ $= 49.8^{\circ}C$ (ซึ่งเป็นอุณหภูมิอิ่มตัวที่ความดัน 0.122 bar) **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 5-3.8 น้ำมันผสมซึ่งประกอบด้วย 75% C_8H_{18}, 13% C_8H_{16} และ 12% C_7H_{16} ถูกเผาไหม้โดยมีอากาศส่วนเกิน 8% จงคำนวณหาอัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศของส่วนผสมไอดีและปริมาณเป็นร้อยละโดยปริมาตรของผลิตผลจากการเผาไหม้ ถ้า (1) เมื่อมีน้ำในสภาพไอทั้งหมดอยู่ในผลิตผลจากการเผาไหม้, และ (2) เมื่อคิดเป็นผลิตผลจากการเผาไหม้ฐานแห้ง

วิธีทำ

ส่วนประกอบของเชื้อเพลิง	kg ส่วนประกอบ/ส่วนผสม 100 kg	มวลโมเลกุลของส่วนประกอบ	kmole ของเชื้อเพลิง/ส่วนผสม 100 kg	สมการปฏิกิริยากับ O_2 (ปริมาณที่ถูกต้องทางเคมี)	kmole ของ O_2/ส่วนผสม 100 kg
C_8H_{18}	75	114	0.6579	$C_8H_{18}+12.5O_2=8CO_2+9H_2O$	$12.5\times0.6579=8.2238$
C_8H_{16}	13	112	0.1161	$C_8H_{16}+12O_2=8CO_2+8H_2O$	$12\times0.1161=1.3932$
C_7H_{16}	12	100	0.1200	$C_7H_{16}+11O_2=7CO_2+8H_2O$	$11\times0.12=1.3200$
					รวม = 10.937

สำหรับอากาศส่วนเกิน 8%, $\underline{O_2 = 0.875}$

รวม = 11.812

ผลิตผลจากการเผาไหม้เป็น kmole/ส่วนผสม 100 kg (อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศที่ถูกต้องทางเคมี) คือ

CO_2	H_2O	O_2	N_2
$8\times0.6579=5.2632$	$9\times0.6579=5.9211$	-	-
$8\times0.1161=0.9288$	$8\times0.1161=0.9288$	-	-
$7\times0.12=0.84$	$8\times0.12=0.96$	-	-
รวม = 7.032	รวม = 7.8099	รวม = 0	รวม = $10.937\times3.773=41.2653$

สำหรับอากาศส่วนเกิน 8%, - - = 0.875 $0.875\times3.773=3.3014$

รวม = 7.032 รวม = 7.8099 รวม = 0.875 รวม = 44.5067

อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศคือ

$$F/A = \frac{100}{11.812\times32\times4.31} = 0.06138$$ **ตอบ**

ปริมาณเป็นร้อยละโดยปริมาตรของผลิตผลจากการเผาไหม้ (1) เมื่อมีน้ำในสถานะไอคือ

CO_2: $[7.032\times/(7.032+7.8099+0.875+44.5067)]\times100 = 11.68\%$

H_2O: $[7.8099/(7.032+7.8099+0.875+44.5067)]\times100 = 12.97\%$

O_2: $[0.875/(7.032+7.8099+0.875+44.5067)]\times100 = 1.45\%$

N_2: $[44.5067/(7.032+7.8099+0.875+44.5067)]\times100 = 73.90\%$ **ตอบ**

(2) เมื่อพิจารณาบนฐานแห้ง คือ

CO_2: $[7.032\times/(7.032+0.875+44.5067)]\times100 = 13.42\%$

O_2: $[0.875/(7.032+0.875+44.5067)]\times100 = 1.67\%$

N_2: $[44.5067/(7.032+0.875+44.5067)]\times100 = 84.91\%$ **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 5-3.9 เชื้อเพลิงก๊าซซึ่งประกอบด้วย 60% Methane (CH_4), 25% Ethane (C_2H_4), 5% N_2, และ 10% O_2 โดยปริมาตรถูกเผาไหม้โดยมีอากาศส่วนเกิน 10% (1) จงคำนวณหาอัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศ, และ (2) จงหาปริมาณปริมาตรของผลิตผลจากการเผาไหม้ต่อปริมาตรของเชื้อเพลิงหนึ่งหน่วย ถ้าอุณหภูมิและความดันของผลิตผลจากการเผาไหม้เป็น 500°C และ 1.08 bar ตามลำดับ และของเชื้อเพลิงเป็น 40°C และ 1.18 bar ตามลำดับ

วิธีทำ

ส่วนประกอบของเชื้อเพลิง	% โดยปริมาตร = kmole/ส่วนผสม 100 kmole	สมการปฏิกิริยากับ O_2 (ปริมาณที่ถูกต้องทางเคมี)	kmole ของ O_2 ที่ต้องการ/ส่วนผสมเชื้อเพลิง 100 kmole (ที่ถูกต้องทางเคมี)	ผลิตผลจากการเผาไหม้เป็น kmole/ส่วนผสม 100 kmole			
				CO_2	H_2O	O_2	N_2
CH_4	60	$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$	$60 \times 2 = 120$	60	120	0	0
C_2H_4	25	$C_2H_4 + 3O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$	$25 \times 3 = 75$	50	50	0	0
N_2	5	-	(ในเชื้อเพลิง) 0	0	0	0	5
O_2	10	-	(ในเชื้อเพลิง) -10	0	0	0	0
			185	110	170	0	5

สำหรับส่วนผสมที่ถูกต้องทางเคมี 185 698

จากอากาศส่วนเกิน 10% 18.5 18.5 69.8

รวม 203.5 110 170 18.5 767.8

kmole ของผลิตผลจากการเผาไหม้/เชื้อเพลิง 100 kmole = 110+170+18.5+767.8

= 1066.3

kg ของส่วนผสม/เชื้อเพลิง 100 kmole:

CH_4: $60 \times 16 = 960$

C_2H_4: $25 \times 28 = 700$

N_2: $5 \times 28 = 140$

O_2: $10 \times 32 = 320$

รวม = 2120 kg ส่วนผสม/100 kmole ของส่วนผสมเชื้อเพลิง

(หรือมวลโมเลกุลเป็น 21.2)

(1) อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศ

$$F/A = \frac{\text{kg of mixture}/100 \text{ kmole of mixture}}{\text{kg of air}/\text{kmole of mixture}}$$

$$= \frac{2120}{203.5 \times 32 \times 4.31} = 0.07553$$ **ตอบ**

(2) เนื่องจาก m^3 ของผลิตผลจากการเผาไหม้/ m^3 ของส่วนผสมเชื้อเพลิง = 1066.3/100 = 10.663

เมื่อความดันและอุณหภูมิของผลิตผลจากการเผาไหม้และเชื้อเพลิงเท่ากัน ดังนั้น m^3 ของผลิตผลจากการเผาไหม้/ m^3 ของเชื้อเพลิง

= 10.663(773/313)(1.18/1.08) = 28.772 m^3/m^3 ของเชื้อเพลิง **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 5-3.10 ก๊าซธรรมชาติซึ่งมีส่วนผสมเป็น 15.8% C_2H_6, 80.4% CH_4, 3.0% CO, และ0.8% N_2 โดยปริมาตร ถูกเผาไหม้ในเครื่องยนต์โดยมีอากาศส่วนเกิน 20% ในขณะที่เครื่องยนต์ทำงานรับภาระ 75% ของพิกัดเต็มความสามารถ จงคำนวณหามวลโมเลกุลของก๊าซธรรมชาติที่ใช้

วิธีทำ

ส่วนประกอบของเชื้อเพลิง	Kmole ของส่วนประกอบ/ส่วนผสม 100 kmole	สมการปฏิกิริยากับ O_2 (ปริมาณที่ถูกต้องทางเคมี)	kmole ของ O_2/ส่วนผสม 100 kmole	ผลิตผลจากการเผาไหม้เป็น kmole/ส่วนผสม 100 kmole			
				CO_2	H_2O	O_2	N_2
C_2H_6	15.8	$C_2H_6 + 3.5O_2 = 2CO_2 + 3H_2O$	$15.8 \times 3.5 = 55.3$	$15.8 \times 2 = 31.6$	$15.8 \times 3 = 47.4$	0	0
CH_4	80.4	$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$	$80.4 \times 2 = 160.8$	80.4	160.8	0	0
CO	3.0	$2CO + O_2 = 2CO_2$	$3 \times 0.5 = 1.5$	3.0	0	0	0
N_2	0.8	-	-	0	0	0	0.8
			217.6	115	208.2	0	0.8
อากาศสำหรับส่วนผสมที่ถูกต้องทางเคมี			217.6	-	-	-	821.0
อากาศส่วนเกิน 20%			43.52	-	-	43.52	164.2
รวม			261.12	115.0	208.2	43.52	985.2

C_2H_6: $15.8 \times 30 = 474.0$

CH_4: $80.4 \times 16 = 1286.4$

CO: $3.0 \times 28 = 84.0$

N_2: $0.8 \times 28 = 22.4$

รวม = 1866.8 kg /100 kmole ของส่วนผสม

นั่นคือ มวลโมเลกุลเฉลี่ยของตัวอย่างก๊าซเป็น 18.668 **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 5-3.11 เครื่องยนต์หลายสูบเครื่องหนึ่งผลิตกำลัง 44.2 kW ที่ 75% ของภาระสูงสุดโดยมีประสิทธิภาพความร้อนเพลาเป็น 26% โดยใช้เชื้อเพลิงจากตัวอย่างที่ 5-3.10 ค่าความร้อนค่าต่ำของเชื้อเพลิงคือ 38 100 kJ/m^3 ที่ 1.01 bar

และ 15^{O}C ถ้าความดันและอุณหภูมิของไอเสียเป็น 1.08 bar และ 600^{O}C โดยความดันและอุณหภูมิของเชื้อเพลิงเป็น 1.18 bar และ 40^{O}C จงคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยที่สุดของท่อเชื้อเพลิงและท่อไอเสีย ความเร็วเฉลี่ยของก๊าซในท่อไอเสียต้องไม่เกิน 120 m/s และในท่อเชื้อเพลิงต้องไม่เกิน 60 m/s

วิธีทำ กิโลโมลไอเสีย/เชื้อเพลิง 100 kmole = 115.0+208.2+43.52+985.2

= 1351.92

หรือที่ความดันและอุณหภูมิเดียวกัน จะได้

m^3 ของผลิตผลจากการเผาไหม้/ m^3 ของเชื้อเพลิง = 13.5192

ความร้อนที่ป้อนเข้าสู่เครื่องยนต์ใน 1 นาที

= 44.2 kW × 60 s/min/0.26 = 10200 kJ/min

ปริมาตรของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่เครื่องยนต์ใน 1 นาที ที่ 1.01 bar และ 15^{O}C

= (10200 kJ/min)/(38 100 kJ/m^3) = 0.2677 m^3/min

ปริมาตรของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่เครื่องยนต์ใน 1 นาที ที่ 1.18 bar และ 40^{O}C

= (0.2677 m^3/min)(1.01/1.18)(313/288) = 0.249 m^3/min

เนื่องจาก $\frac{\pi}{4}(\frac{d_1}{100})^2 \times 60$ m/s = (0.249 m^3/min)/60

เมื่อ d_1 คือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเชื้อเพลิงเป็น cm

จะได้ d_1 = 1 cm (โดยประมาณ) **ตอบ**

ปริมาตรของก๊าซไอเสียใน 1 นาที ที่ 1.08 bar และ 600^{O}C

= 13.5192(0.2677 m^3/min)(1.01/1.08)(873/288) = 10.259 m^3/min

เนื่องจาก $\frac{\pi}{4}(\frac{d_2}{100})^2 \times 120 = (10.259\ m^3/min)/60$

เมื่อ d_2 คือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อไอเสียเป็น cm

เพราะฉะนั้นจะได้เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อไอเสีย d_2 = 4.259 cm **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 5-3.12 ตัวอย่างก๊าซหุงต้มประกอบด้วย 20% CH_4, 20% CO, 30% H_2, 5% CO_2, และ 25% N_2 โดยปริมาตร และถูกนำไปเผาไหม้ในเครื่องยนต์ด้วยอัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศเป็น 0.188 (1) จงคำนวณหามวลโมเลกุลของตัวอย่างก๊าซนี้, และ (2) จงหาปริมาณเป็นร้อยละโดยปริมาตรของผลิตผลจากการเผาไหม้บนฐานแห้ง

วิธีทำ

ส่วนประกอบของเชื้อเพลิง	Kmole ของส่วนประกอบ/ส่วนผสม 100 kmole	สมการปฏิกิริยากับ O_2 (ปริมาณที่ถูกต้องทางเคมี)	kmole ของ O_2/ส่วนผสม 100 kmole	ผลิตผลจากการเผาไหม้เป็น kmole/ส่วนผสม 100 kmole			
				CO_2	H_2O	O_2	N_2
CH_6	20	$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$	40	20	40	-	-
CO	20	$2CO + O_2 = 2CO_2$	10	10	-	-	-
H_2	30	$2H_2 + O_2 = 2H_2O$	15	-	30	-	-
CO_2	5	-	-	5	-	-	-
N_2	25	-	-	-	-	-	25
			65	45	45	30	25
อากาศสำหรับส่วนผสมที่ถูกต้องทางเคมี			65	-	-	-	245.25
อากาศส่วนเกิน 10.3% (ดูรายการคำนวณข้างล่าง)			6.7	-	-	6.7	25.26
รวม			71.7	35	70	6.7	270.51

CH_4: $20 \times 16 = 320$

CO: $20 \times 28 = 560$

H_2: $30 \times 2 = 60$

CO_2: $5 \times 44 = 220$

N_2: $25 \times 28 = 700$

รวม = 1860 kg /100 kmole ของส่วนผสม

นั่นคือ มวลโมเลกุลเฉลี่ยของตัวอย่างก๊าซเป็น 18.6 kg/kmole **ตอบ**

อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศ F/A = 0.188 =

$$\frac{\text{kg of fuel}/100\ \text{kmole of fuel mixture}}{\text{kmole of } O_2/100\ \text{kmole of fuel mixture}} \times 32 \times 4.31$$

นั่นคือ $$\frac{\text{kmole of } O_2}{100\ \text{kmole of fuel mixture}} = \frac{1860}{0.188 \times 32 \times 4.31} = 71.7$$

ปริมาณอากาศส่วนเกิน = $\frac{(71.7 - 65)}{65} \times 100 = 10.3\%$

ปริมาณผลิตผลจากการเผาไหม้แห้งคือ = 35+6.7+270.51

= 312.21 kmole/ส่วนผสมเชื้อเพลิง 100 kmole

ปริมาณเป็นร้อยละโดยปริมาตร

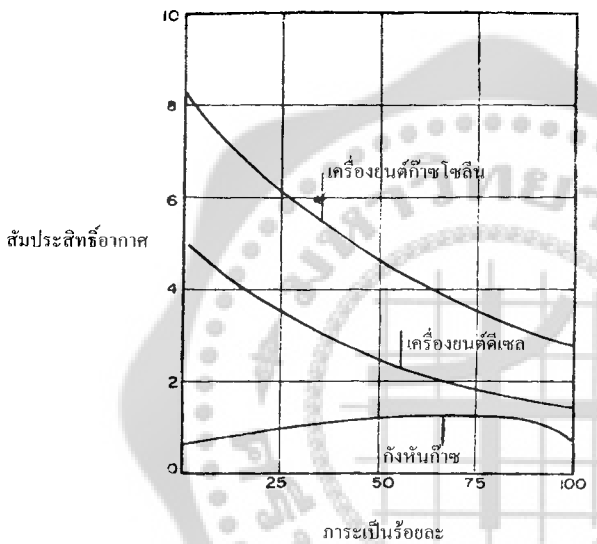
CO_2: $(35/312.21) \times 100 = 11.21\%$

O_2: $(6.7/312.21) \times 100 = 2.15\%$

N_2: $(270.51/312.21) \times 100 = 86.64\%$ **ตอบ**

5-4 การวิเคราะห์ผลผลิตจากการเผาไหม้

ปริมาณอากาศจริงที่จ่ายเข้าสู่เครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงเหลวหรือก๊าซอาจจะมากกว่าหรือน้อยกว่าปริมาณที่ต้องการเพื่อทำให้เกิดส่วนผสมพอดีก็ได้ (นั่นคือ α อาจจะมากหรือน้อยกว่า 1) เครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซโซลีนซึ่งต้องการส่วนผสมที่เผาไหม้ได้ที่เป็นเนื้อเดียวกัน α (และอัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศด้วย) ไม่ทำให้กำลังของเครื่องยนต์เปลี่ยนแปลงมากนัก เครื่องยนต์จะทำงานโดยมีสัมประสิทธิ์อากาศเป็น 1 (ส่วนผสมพอดี) หรือมากกว่า 1 เล็กน้อย (ส่วนผสมบาง, α มากกว่า 1.0 ขึ้นไปถึง 1.2) และภายใต้สภาวะให้กำลังสูงสุดสัมประสิทธิ์อากาศจะมีค่าน้อยกว่า 1 เล็กน้อย (α ประมาณ 0.9)

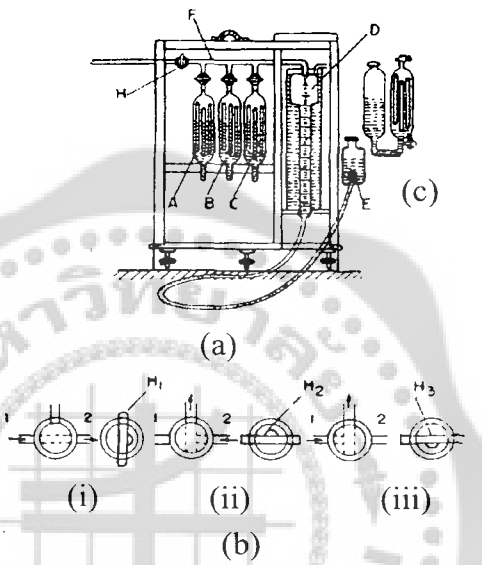


รูปที่ 5-4.1 การแปรเปลี่ยนของสัมประสิทธิ์อากาศเทียบกับภาระ

ในเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยการอัด จะต้องมีปริมาณอากาศส่วนเกินโดยตลอดช่วงของการรับภาระทั้งหมด เพื่อให้ได้การเผาไหม้ที่มีประสิทธิผล (ค่าของสัมประสิทธิ์อากาศแปรเปลี่ยนอยู่ระหว่างประมาณ 1.35 ที่ภาระเต็มพิกัดและ 4.5 เมื่อเดินเบา) การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์อากาศเทียบกับภาระของเครื่องยนต์สันดาปภายในได้แสดงไว้ในรูปที่ 5-4.1

ส่วนประกอบของส่วนผสมที่จ่ายให้แก่เครื่องยนต์จะสามารถหาได้ 2 วิธี โดยในวิธีแรก ปริมาณของอากาศและเชื้อเพลิงที่เข้าสู่กระบอกสูบจะถูกวัดด้วยเครื่องมือวัดที่เหมาะสม สัมประสิทธิ์อากาศจะถูกคำนวณออกมาได้เมื่อรู้ปริมาณของส่วนประกอบในเชื้อเพลิง ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ได้ศึกษามาแล้ว อีกวิธีหนึ่งคือหาโดยการวิเคราะห์ไอเสีย ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปนี้

Orsat apparatus เป็นเครื่องมือที่ใช้กันโดยปกติในการวัดส่วนประกอบโดยปริมาตรของก๊าซไอเสียจากเครื่องยนต์สันดาปภายในสี่จังหวะ ความละเอียดในการวัดด้วยเครื่องมือนี้จะดีขึ้นมากถ้าเอาใจใส่ต่อข้อควรระวังอย่างถูกต้องในระหว่างทำการทดลอง ส่วนประกอบของผลิตผลจากการเผาไหม้จากเครื่องยนต์สองจังหวะไม่สามารถหาจากการวิเคราะห์ไอเสียอย่างง่ายได้ เพราะว่าในไอเสียมีส่วนผสมไอดีที่บรรจุเข้ามาใหม่ในช่วงระหว่างการกวาดล้างไอเสีย เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคพิเศษในการเก็บตัวอย่างก๊าซไอเสีย



รูปที่ 5-4.2 Orsat apparatus

Orsat apparatus เป็นเครื่องมือในรูปแบบที่ง่ายที่สุด ประกอบด้วย Absorption chamber สามอันคือ A, B, และ C กับ Eudiometer tube คือ D ซึ่งมีขีดบอกปริมาตรตั้งแต่ 0 cc (อยู่ข้างล่าง) หนึ่งหลอดแช่อยู่ในกระบอกน้ำ (Water jacket) (ดูรูปที่ 5-4.2) Eudiometer ต่อเข้ากับ Aspirator bottle E ด้วยท่อยาง ด้านบนของ Eudiometer ต่อเข้ากับหลอดแก้ว F และลิ้น (Cock) สามทาง H โดยมีท่อยางนำตัวอย่างก๊าซไอเสียเข้าต่อเข้าทางด้านซ้ายมือ ใน Aspirator bottle จะมีน้ำเกลือเจือสีใส่ไว้ Absorption chamber แต่ละอันจะประกอบด้วยกระเปาะสองอันต่ออยู่กับหลอดงอและตัวอย่างก๊าซจะสามารถเข้ามาสู่ Absorption chamber แต่ละอันได้โดยผ่านเข้าที่ลิ้น และมีหลอดแก้วเล็กๆเป็นท่อนำตัวอย่างก๊าซเข้าสู่ Absorption chamber ภายใน Absorption chamber จะมีสารละลายของ KOH, สารละลายด่างของ Pyrogallic acid และสารละลาย Cuprous chloride ที่ปรากฏในรูปของแผ่นทองแดงบางๆใส่ไว้ ตามลำดับ

รายละเอียดของวิธีการวัดองค์ประกอบของไอเสียจะหาได้จากหนังสือเกี่ยวกับปฏิบัติการทางวิศวกรรม

5-4.1 อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศ และสัมประสิทธิ์อากาศ

เมื่อเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนถูกเผาไหม้กับอากาศที่รู้ปริมาณ เช่นในเครื่องยนต์สันดาปภายใน (สัมประสิทธิ์อากาศน้อยกว่า, เท่ากับ, หรือมากกว่าหนึ่ง) จากการวิเคราะห์ผลผลิตจากการเผาไหม้จะสังเกตได้ดังต่อไปนี้

1. ผลผลิตที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้คือ CO_2, O_2, CO, H_2, CH_4 กับไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ, H_2O (ในสถานะไอ) และ N_2

2. น้ำในสถานะไอในผลผลิตจากการเผาไหม้จะควบแน่นถ้าตัวอย่างผลผลิตจากการเผาไหม้ถูกเก็บเพื่อการวิเคราะห์ผ่านสารละลายที่ทำปฏิกิริยา เช่นใน Orsat apparatus

3. CH_4 กับไฮโดรคาร์บอนอื่นๆเกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบอื่นๆโดยปริมาตร จึงสามารถตัดทิ้งไปได้

4. สำหรับช่วงของอัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศที่ใช้ในเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน อาจจะเกิดได้ทั้ง คือ CO_2 และ CO

อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศสำหรับส่วนผสมไอดี เมื่อพิจารณาส่วนผสมเชื้อเพลิงกับอากาศจำนวน 100 kmole จะหาได้จาก

$$\text{F/A} = \frac{\text{kg of fuel in 100 kmole of mixture}}{\text{kg of air in 100 kmole of mixture}}$$

$$= \frac{\text{kg of C in 100 kmole of mixture}}{\text{kg of } N_2 \text{ in 100 kmole of mixture}} \times \frac{\text{kg of fuel in 100 kmole of mixture}}{\text{kg of C in 100 kmole of mixture}} \times \frac{\text{kg of } N_2 \text{ in 100 kmole of mixture}}{\text{kg of air in 100 kmole of mixture}}$$

kg of C in 100 kmole of mixture

= kg of C in products

= kg of C in CO_2, CO and any hydrocarbon of the products

(สามารถไม่คิดไฮโดรคาร์บอนในการคำนวณนี้ได้)

สำหรับเชื้อเพลิง ให้

$$\frac{\text{kg of } H_2 \text{ per kg of fuel}}{\text{kg of C per kg of fuel}} = h \qquad (5\text{-}4.1)$$

และ kg of fuel per kg of C = 1+h

เนื่องจาก $$\frac{\text{kg of } N_2 \text{ in 100 kmole of mixture}}{\text{kg of air in 100 kmole of mixture}} = \frac{3.31}{4.31}$$

ดังนั้น $$F/A = \frac{\text{kg of C in } CO_2 \text{ and CO of the product}}{\text{kg of } N_2 \text{ in the product}} (1+h) \left(\frac{3.31}{4.31}\right)$$

(5-4.2)

ปริมาณเป็นร้อยละโดยปริมาตรขององค์ประกอบผลผลิตจากการเผาไหม้ในตัวอย่างก๊าซไอเสียแห้งคือ CO_2, CO, H_2, และ O_2 องค์ประกอบต่างๆเหล่านี้จะได้มาจากการวิเคราะห์ด้วย Orsat apparatus

kg of C in CO_2 and CO of products

$= 12(CO_2 + CO)$ for 100 kmole of mixture

kg of N_2 in exhaust for 100 kmole of mixture

$= 28(100 - CO_2 - CO - H_2 - O_2)$

$$\frac{\text{kg of C in products}}{\text{kg of } N_2 \text{ in products}} = \frac{12(CO_2 + CO)}{28(100 - CO_2 - 1.5CO - O_2)} \quad (5\text{-}4.3)$$

kg of H_2 in products $= 2.015(H_2 + H_2O) = 2.015(0.5CO + H_2O)$

Moles of H_2O in products $= \frac{12}{2.015} hCO_2 + \left(\frac{12}{2.015} h - 0.5\right)CO$

$= 5.955\ h\ CO_2 + (5.955\ h\text{-}0.5)CO$ (5-4.4)

ใน 1 kmole ของ CO_2 มีคาร์บอน 12 kg, ด้วย 12 kg ของคาร์บอน จะมี 12h kg ของไฮโดรเจน หรือ (12h/2.015) kmole ของไฮโดรเจน และ (12h/2.015) kmole ของไฮโดรเจน ทำให้เกิด (12h/2.015) kmole ของน้ำ เนื่องจากใน 1 kmole ของคาร์บอนมอนอกไซด์มีคาร์บอน 12 kg, เพราะฉะนั้น (12h/2.015) kmole ของน้ำจะเกิดขึ้นด้วย

kmole of N_2 in products

$= 3.773O_2$ (kmole of free O_2) + kmole of O_2 (ที่ใช้ไประหว่างการเผาไหม้)

$= CO_2 + 0.5CO + 0.5H_2O$

$= CO_2 + 0.5CO + 2.978hCO_2 + 2.978hCO - 0.25CO$

โดยใช้ค่ากิโลโมลของน้ำในผลผลิตจากการเผาไหม้จากสมการ (5-4.4)

kmole of N_2 in products

$= 3.773\ O_2 + 3.773\ (1+2.978h)\ CO_2$

$+ 3.773\ (0.5\text{-}0.25+2.978h)\ CO$ (5-4.5)

จากการวิเคราะห์ผลผลิตจากการเผาไหม้:

kmole of N_2 in products $= 100 - CO_2 - 1.5CO - O_2$ (5-4.6)

เมื่อจับสมการ (5-4.5) ให้เท่ากับสมการ (5-4.6) แล้วแก้สมการเพื่อหาคาร์บอนมอนอกไซด์ จะได้

$$\text{kmole of CO in products} = \frac{100 - 4.773O_2 - (4.773 + 11.24h)CO_2}{2.443 + 11.24h} \qquad (5\text{-}4.7)$$

แทนค่าสมการ (5-4.7) ลงในสมการ (5-4.3) แล้วจัดรูปให้ง่ายเป็น

$$\frac{\text{kg of C in products}}{\text{kg of } N_2 \text{ in products}} =$$

$$\frac{12}{28} \times \frac{CO_2 + \dfrac{100 - 4.773O_2 - (4.773 + 11.24h)CO_2}{2.443 + 11.24h}}{100 - CO_2 - O_2 - 1.5\dfrac{100 - 4.773O_2 - (4.773 + 11.24h)CO_2}{2.443 + 11.24h}}$$

$$\frac{\text{kg of C in products}}{\text{kg of } N_2 \text{ in products}} =$$

$$\frac{12}{28} \times \frac{100 - 2.33CO_2 - 4.773O_2}{94.3 + 1124h + (4.7165 + 5.62h)CO_2 + (4.7165 - 11.24h)O_2} \qquad (5\text{-}4.8)$$

แทนค่าสมการ (5-4.8) ลงในสมการ (5-4.2)

$$F/A = 0.3291(1+h) \times \frac{100 - 2.33CO_2 - 4.773O_2}{94.3 + 1124h + (4.7165 + 5.62h)CO_2 + (4.7165 - 11.24h)O_2}$$

$$= 0.3291(1+h)\frac{21 - O_2 - 0.49CO_2}{19.8 + 235h + (1 + 1.18h)CO_2 + (1 - 2.35h)O_2}$$

อัตราส่วนระหว่างมวลของไฮโดรเจนต่อมวลของคาร์บอน h สำหรับเชื้อเพลิงที่ใช้กันโดยทั่วไปในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟหรือด้วยการอัดแปรผันอยู่ในช่วง 0.176 ถึง 0.18 สำหรับเชื้อเพลิงที่ใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในทั่วไปเมื่อใช้ h = 0.178, จะได้

$$F/A = 0.388\frac{21 - O_2 - 0.49CO_2}{19.8 + 41.8 + 1.21CO_2 + 0.58O_2}$$

$$= 0.388\frac{21 - O_2 - 0.49CO_2}{61.6 + 0.58O_2 + 1.21CO_2}$$

$$F/A = 0.669\frac{21 - O_2 - 0.49CO_2}{106 + O_2 + 2.08CO_2} \qquad (5\text{-}4.9)$$

หรือ

$$A/F = 1.495\frac{106 + O_2 + 2.08CO_2}{21 - O_2 - 0.49CO_2} \qquad (5\text{-}4.10)$$

เนื่องจากสัมประสิทธิ์อากาศคือ

$$\alpha = \frac{A/F_{act}}{A/F_{theo}}$$

ถ้าสมมติให้ค่าเฉลี่ยของ F/A_{theo} สำหรับเชื้อเพลิงที่ใช้โดยทั่วไปสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในเป็น 0.067 สัมประสิทธิ์อากาศจะเขียนได้เป็น

$$\alpha = 1.495(0.067)\frac{106 + O_2 + 2.08CO_2}{21 - O_2 - 0.49CO_2}$$

$$= 0.1\frac{106 + O_2 + 2.08CO_2}{21 - O_2 - 0.49CO_2} \qquad (5\text{-}4.11)$$

5-4.2 น้ำในสภาพไอที่อยู่ในผลผลิตจากการเผาไหม้

น้ำในสภาพไอที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สันดาปภายในจะออกไปจากเครื่องยนต์ในสถานะของไอดง ไอเหล่านี้ยังมีความร้อนอยู่มาก (คือความร้อนแฝงของการเป็นไอและค่าความร้อนจากการทำให้ไออิ่มตัวเป็นไอดง) ความร้อนจำนวนนี้เป็นความร้อนส่วนที่สูญเสียออกไปกับไอเสียซึ่งควรจะนำมาคิดด้วยในการทำสมดุลความร้อนของเครื่องยนต์ อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของไอน้ำต่อเชื้อเพลิง (สำหรับส่วนผสมไอดี 100 kmole) สามารถเขียนเป็น

$$\frac{\text{kg of } H_2O}{\text{kg of fuel}}$$

$$= \frac{\text{kmole of } H_2O}{\text{kg of C in product}} \times \frac{\text{kg of } H_2O}{\text{kmole of } H_2O} \times \frac{\text{kg of C in product}}{\text{kg of fuel}}$$

$$= \frac{5.96hCO_2 + (5.96h - 0.5)Co}{12(CO_2 + CO)} \times 18 \times \frac{1}{1+h}$$

แทนค่า CO ที่ได้จากสมการ (5-4.7) แล้วจัดรูปสมการให้ง่าย (และใช้ค่า h = 0.178)

$$\frac{\text{kg of } H_2O}{\text{kg of fuel}}$$

$$= 1.273\frac{1.06CO_2 + (1.06 - 0.5)\dfrac{100 - 4.773O_2 - (4.773 + 11.24h)CO_2}{2.443 + 11.24h}}{CO_2 + \dfrac{100 - 4.773O_2 - (4.773 + 11.24h)CO_2}{2.443 + 11.24h}}$$

$$\frac{\text{kg of } H_2O}{\text{kg of fuel}} = 1.273\frac{1.06CO_2 + 0.56\dfrac{100 - 4.773O_2 - 6.774CO_2}{4.4437}}{CO_2 + \dfrac{100 - 4.773O_2 - 6.774CO_2}{4.4437}}$$

$$\frac{\text{kg of } H_2O}{\text{kg of fuel}} = 1.273\frac{1.06CO_2 + 12.602 - 0.6014O_2 - 0.8537CO_2}{CO_2 + 22.504 - 1.0741O_2 - 1.5244CO_2}$$

$$= 1.273\frac{12.602 - 0.6014O_2 + 0.2063CO_2}{22.504 - 1.0741O_2 - 0.5244CO_2}$$

$$= 1.273 \times \frac{0.6014}{1.0741} \times \frac{20.95 - O_2 + 0.343CO_2}{22.95 - O_2 - 0.4882CO_2}$$

$$\frac{\text{kg of } H_2O}{\text{kg of fuel}} = 0.7128 \times \frac{20.95 - O_2 + 0.343CO_2}{20.95 - O_2 - 0.4882CO_2} \qquad (5\text{-}4.12)$$

5-4.3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้

ประสิทธิภาพการเผาไหม้สามารถเขียนได้เป็น

$$\eta_{comb} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{E_1}{E_1 + E_0}$$

เมื่อ E_1 คือพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจริงจากส่วนผสมที่ทำให้เกิดผลผลิตจากการเผาไหม้ 100 kmole, E_2 คือพลังงานที่ควรจะปลดปล่อยออกมาจากส่วนผสมอันเดียวกันเมื่อเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์, และ E_0 คือพลังงานที่ไม่ปลดปล่อยออกมา

ผลผลิตจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์คือ CO, H_2, ส่วนผลผลิตที่เผาไหม้อย่างสมบูรณ์คือ CO_2 และ H_2 ความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาต่อผลผลิตจากการเผาไหม้ 1 กิโลโมลคือ

$C \rightarrow CO$ 120 586 kJ/kmole ของ C (หรือ kmole ของ CO)

$C \rightarrow CO_2$ 404 046 kJ/ kmole ของ C (หรือ kmole ของ CO_2)

$CO \rightarrow CO_2$ 283 460 kJ/ kmole ของ CO (หรือ kmole ของ CO_2)

$H_2 \rightarrow H_2O$ 239 496 kJ/ kmole ของ H_2 (หรือ kmole ของ H_2O)

ดังนั้น พลังงานที่ปลดปล่อยออกมา (100 kmole ของผลผลิตจากการเผาไหม้)

E_1 = (404 046 kJ/ kmole)CO_2 + (120 586 kJ/ kmole)CO
+ (239 496 kJ/ kmole)H_2O

พลังงานที่ไม่ปลดปล่อยออกมา (100 kmole ของผลผลิตจากการเผาไหม้)

E_0 = (283 460 kJ/ kmole)CO + (239 496 kJ/ kmole)H_2

แทนค่าจำนวนกิโลโมลของ H_2O และ CO จากสมการ (5-4.4) กับ (5-4.7) จะได้พลังงานที่ปลดปล่อยออกมา

E_1 = (404 046 kJ/ kmole)CO_2+(120 586 kJ/ kmole)CO
+(239 496 kJ/ kmole)(1.06CO_2+0.56CO)

= (404 046+253 866 kJ/ kmole)CO_2
+ (120 586+134 118 kJ/ kmole)CO

= (657 912 kJ/ kmole)CO_2
$$+ (254\ 704 \text{ kJ/ kmole}) \frac{100 - 4.773O_2 - 6.7737CO_2}{4.4437}$$

= (657 912 kJ/ kmole)CO_2

$$+ (254\ 704\ kJ/\ kmole)(22.5\text{-}1.074O_2\text{-}1.5243CO_2)$$

$$= (657\ 912\text{-}388\ 245\ kJ/\ kmole)CO_2 - (273\ 552\ kJ/\ kmole)O_2$$

$$+5\ 730\ 840$$

$$= (269\ 667\ kJ/\ kmole)CO_2 - (273\ 552\ kJ/\ kmole)O_2 + 5\ 730\ 840$$

พลังงานที่ไม่ปลดปล่อยออกมา

$$E_0 = (283\ 460\ kJ/\ kmole)CO + (239\ 496\ kJ/\ kmole)H_2$$

$$= (283\ 460\ kJ/\ kmole)CO + (120\ 586\ kJ/kmole)CO$$

$$= (404\ 046\ kJ/kmole)CO$$

$$= (404\ 046\ kJ/kmole)\ \frac{100 - 4.773O_2 - 6.7737CO_2}{4.4437}$$

$$= (404\ 046\ kJ/kmole)(22.5\text{-}1.074O_2\text{-}1.5243CO_2)$$

$$= 9\ 091\ 035 - 433\ 945O_2 - 615\ 887CO_2$$

ดังนั้น $\eta_{comb} =$

$$\frac{5730840 - 273552O_2 + 269667CO_2}{5730840 - 273552O_2 + 269667CO_2 + 9091035 - 433945O_2 - 615887CO_2}$$

$$= \frac{5730840 - 273552O_2 + 269667CO_2}{14821875 - 707497O_2 - 346220CO_2}$$

$$= \frac{273552}{707497} \times \frac{20.95 - O_2 + 0.9858CO_2}{20.95 - O_2 - 0.4894CO_2}$$

เพราะฉะนั้น $$\eta_{comb} = 0.3866 \times \frac{20.95 - O_2 + 0.9858CO_2}{20.95 - O_2 - 0.4894CO_2} \qquad (5\text{-}4.13)$$

5-4.4 ปริมาณก๊าซไอเสียแห้งที่เกิดขึ้นต่อเชื้อเพลิง 1 kg

เมื่อได้องค์ประกอบของไอเสียจาก Orsat apparatus คือ CO_2, CO, N_2 และ O_2 เป็นเศษส่วนเชิงโมล ของคาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์, ไนโตรเจน, และออกซิเจน ตามลำดับ ถ้าเชื้อเพลิงที่ใช้มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนเป็น h เมื่อพิจารณาก๊าซหลังจากการเผาไหม้จำนวน 1 กิโลโมลจะได้

$$\frac{\text{kg of fuel}}{\text{kg of air}} = \frac{\frac{\text{kmole of C}}{\text{kmole of gas}} \times \frac{\text{kg of C}}{\text{kmole of C}} \times \frac{\text{kg of } N_2}{\text{kg of air}}}{\frac{\text{kmole of } N_2}{\text{kmole of gas}} \times \frac{\text{kg of } N_2}{\text{kmole of } N_2} \times \frac{\text{kg of C}}{\text{kg of fuel}}}$$

นั่นคือ $$F/A = \frac{(CO_2 + CO) \times 12 \times 0.768}{N_2 \times 28 \times (\frac{1}{1+h})}$$

$$F/A = 0.33(1+h)\frac{(CO_2 + CO)}{N_2} \qquad (5\text{-}4.14)$$

หรือ $$F/A = 0.389\frac{(CO_2 + CO)}{N_2} \qquad (5\text{-}4.15)$$

เมื่อ h = 0.178, หรือ

$$F/A = \frac{0.33}{C}\frac{(CO_2 + CO)}{N_2} \qquad (5\text{-}4.16)$$

เมื่อ C คือจำนวน kg ของคาร์บอนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง 1 kg

ในกรณีของปริมาณไอเสียแห้งต่อเชื้อเพลิง 1 kg จะเขียนได้เป็น

$$\frac{\text{kg of dry gas}}{\text{kg of fuel}} = \frac{\dfrac{\text{kg of dry gas}}{\text{kmole of dry gas}} \times \dfrac{\text{kg of C}}{\text{kg of fuel}}}{\dfrac{\text{kg of C}}{\text{kmole of C}} \times \dfrac{\text{kmole of C}}{\text{kmole of dry gas}}}$$

$$= \frac{44CO_2 + 28CO + 32O_2 + 28N_2}{12(CO_2 + CO)} \times \frac{1}{1+h}$$

หรือ $$\frac{\text{kg of dry gas}}{\text{kg of fuel}} = \frac{1}{12(1+h)} \times \frac{44CO_2 + 28CO + 32O_2 + 28N_2}{CO_2 + CO} \qquad (5\text{-}4.17)$$

สำหรับ h = 0.178,

$$\frac{\text{kg of dry gas}}{\text{kg of fuel}} = 0.07074 \times \frac{44CO_2 + 28CO + 32O_2 + 28N_2}{CO_2 + CO} \qquad (5\text{-}4.18)$$

เมื่อมี C kg ของคาร์บอนอยู่ในเชื้อเพลิง 1 kg,

$$\frac{\text{kg of dry gas}}{\text{kg of fuel}} = \frac{C}{12} \times \frac{44CO_2 + 28CO + 32O_2 + 28N_2}{CO_2 + CO} \qquad (5\text{-}4.19)$$

ตัวอย่าง 5-4.1 น้ำมันดีเซลข้นซึ่งมีสูตรเคมีโดยประมาณเป็น $C_{14}H_{30}$ ถูกเผาไหม้ในเครื่องยนต์เครื่องหนึ่ง ในขณะที่เครื่องยนต์รับภาระเต็มพิกัด การวิเคราะห์ก๊าซไอเสียด้วย Orsat apparatus ให้องค์ประกอบโดยปริมาตรของไอเสียประกอบด้วย 10%CO_2, 0.05%CO, 6.35%O_2, 83.6%N_2 จงคำนวณหา (1) อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศของส่วนผสมไอดีที่จ่ายให้กับเครื่องยนต์ในขณะรับภาระเต็มพิกัด, และ (2) จำนวน kg ของก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นต่อเชื้อเพลิง 1 kg

วิธีทำ (1) จากสมการ (5-4.14)

$$F/A = 0.33(1+h)\frac{(CO_2 + CO)}{N_2}$$

และ $$h = \frac{30(1.0075)}{14(12)} = 0.1799$$

ดังนั้น $$F/A = 0.33(1+0.1799)\frac{(10+0.05)}{83.6} = 0.04681$$ **ตอบ**

โดยการใช้สมการ (5-4.9) จะได้

$$F/A = 0.669\frac{21-O_2-0.49CO_2}{106+O_2+2.08CO_2}$$

$$= 0.669\frac{21-6.35-0.49\times10}{106+6.35+2.08\times10} = 0.04899$$

(2) จากสมการ (5-4.17)

$$\frac{\text{kg of dry gas}}{\text{kg of fuel}} = \frac{1}{12(1+h)}\times\frac{44CO_2+28CO+32O_2+28N_2}{CO_2+CO}$$

$$= \frac{1}{12(1+0.1799)}\times\frac{44\times10+28\times0.05+32\times6.35+28\times83.6}{10+0.05}$$

เพราะฉะนั้น $\frac{\text{kg of dry gas}}{\text{kg of fuel}} = 20.98$ **ตอบ**

ตัวอย่าง 5-4.2 การวิเคราะห์ไอเสียจากเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนเครื่องหนึ่งซึ่งทำงานที่ภาระ 50% ของพิกัดด้วย Orsat apparatus ได้ 12.4%CO_2 และ 3.2%O_2 โดยปริมาตร จงคำนวณหา (1) อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศและสัมประสิทธิ์อากาศของส่วนผสมไอดีที่ใช้, (2) ประสิทธิภาพการเผาไหม้, (3) จำนวน kg ของน้ำในสถานะไอที่เกิดขึ้นจากเชื้อเพลิง 1 kg

วิธีทำ (1) โดยการใช้สมการ (5-4.9) จะได้

$$F/A = 0.669\frac{21-O_2-0.49CO_2}{106+O_2+2.08CO_2} = 0.669\frac{21-3.2-0.49\times12.4}{106+3.2+2.08\times12.4}$$

$= 0.0581$ **ตอบ**

อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศสำหรับส่วนผสมพอดีจะหาได้จากสมการ (5-3.16) สำหรับ C_8H_{17} โดยใช้ $\alpha = 1$, จะได้

$$F/A = \frac{(12x+y)}{32\times4.31(x+\frac{y}{4})\alpha} = \frac{(12\times8+17)}{32\times4.31(8+\frac{17}{4})(1)} = 0.0669$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์อากาศที่ใช้คือ

$$\alpha = \frac{0.0669}{0.0581} = 1.1515$$ **ตอบ**

(2) ประสิทธิภาพการเผาไหม้หาได้จากสมการ (5-4.13) คือ

$$\eta_{comb} = 0.3866\times\frac{20.95-O_2+0.9858CO_2}{20.95-O_2-0.4894CO_2}$$

$$= 0.3866\times\frac{20.95-3.2+0.9858\times12.4}{20.95-3.2-0.4894\times12.4} = 0.992$$ **ตอบ**

(3) จากสมการ (5-4.12)

$$\frac{\text{kg of } H_2O}{\text{kg of fuel}} = 0.7128\times\frac{20.95-O_2+0.343CO_2}{20.95-O_2-0.4882CO_2}$$

$$= 0.7128 \times \frac{20.95 - 3.2 + 0.343 \times 12.4}{20.95 - 3.2 - 0.4882 \times 12.4} = 1.3409$$ **ตอบ**

ตัวอย่าง 5-4.3 เครื่องยนต์ในตัวอย่างที่ 5-4.2 เมื่อรับภาระเต็มพิกัดผลิตไอเสียที่ประกอบด้วย 9%CO_2 และ 0.1%O_2 โดยการวัดด้วย Orsat apparatus จงคำนวณหา (1) อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศและประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ภาระเต็มพิกัด, และ (2) ปริมาตรของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่อยู่ในไอเสีย

วิธีทำ (1) โดยการใช้สมการ (5-4.9) จะได้

$$F/A = 0.669 \frac{21 - O_2 - 0.49CO_2}{106 + O_2 + 2.08CO_2} = 0.669 \frac{21 - 0.1 - 0.49 \times 9}{106 + 0.1 + 2.08 \times 9}$$

$$= 0.0884$$ **ตอบ**

และสัมประสิทธิ์อากาศที่ใช้คือ

$$\alpha = \frac{0.0669}{0.0884} = 0.757$$

ประสิทธิภาพการเผาไหม้จะหาได้จากสมการ (5-4.13) คือ

$$\eta_{comb} = 0.3866 \times \frac{20.95 - O_2 + 0.9858CO_2}{20.95 - O_2 - 0.4894CO_2}$$

$$= 0.3866 \times \frac{20.95 - 0.1 + 0.9858 \times 9}{20.95 - 0.1 - 0.4894 \times 9} = 0.6987$$ **ตอบ**

(2) ปริมาตรของ CO ที่อยู่ในไอเสียหาได้จากสมการ (5-4.7) คือ

$$\text{kmole of CO in products} = \frac{100 - 4.773O_2 - (4.773 + 11.24h)CO_2}{2.443 + 11.24h}$$

$$CO = \frac{100 - 4.773 \times 0.1 - (4.773 + 11.24 \times 0.178) \times 9}{2.443 + 11.24 \times 0.178}$$

$$= 8.677\%$$ โดยปริมาตร **ตอบ**

ตัวอย่าง 5-4.4 (1) ก๊าซไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเครื่องหนึ่งซึ่งทำงานรับภาระเต็มพิกัดถูกวิเคราะห์ด้วย Orsat apparatus พบว่าก๊าซไอเสียประกอบด้วย 9.4%CO_2 และ 7.4%O_2 โดยปริมาตร จงคำนวณหา อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศ, สัมประสิทธิ์อากาศ, และประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ภาระเต็มพิกัด

(2) ถ้าเครื่องยนต์เครื่องเดียวกันนี้ทำงานโดยรับภาระน้อย องค์ประกอบของไอเสียประกอบด้วย 4.5%CO_2 และ 14.5%O_2 โดยปริมาตร จงคำนวณหา อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศ, สัมประสิทธิ์อากาศ, และประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ภาระน้อย

วิธีทำ (1) โดยการใช้สมการ (5-4.9) จะได้

$$F/A = 0.669\frac{21 - O_2 - 0.49CO_2}{106 + O_2 + 2.08CO_2} = 0.669\frac{21 - 7.4 - 0.49 \times 9.4}{106 + 7.4 + 2.08 \times 9.4}$$

$$= 0.0453 \qquad \textbf{ตอบ}$$

อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศสำหรับส่วนผสมพอดีจะหาได้จากสมการ (5-3.16) สำหรับ $C_{12}H_{26}$ โดยใช้ $\alpha = 1$, จะได้

$$F/A = \frac{(12x + y)}{32 \times 4.31(x + \frac{y}{4})\alpha} = \frac{(12 \times 12 + 26)}{32 \times 4.31(12 + \frac{26}{4})(1)} = 0.0666$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์อากาศที่ใช้คือ

$$\alpha = \frac{0.0666}{0.0453} = 1.47 \qquad \textbf{ตอบ}$$

ประสิทธิภาพการเผาไหม้จะหาได้จากสมการ (5-4.13) คือ

$$\eta_{comb} = 0.3866 \times \frac{20.95 - O_2 + 0.9858CO_2}{20.95 - O_2 - 0.4894CO_2}$$

$$= 0.3866 \times \frac{20.95 - 7.4 + 0.9858 \times 9.4}{20.95 - 7.4 - 0.4894 \times 9.4} = 0.9856 \qquad \textbf{ตอบ}$$

(2) จะได้อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศเป็น

$$F/A = 0.669\frac{21 - O_2 - 0.49CO_2}{106 + O_2 + 2.08CO_2} = 0.669\frac{21 - 14.5 - 0.49 \times 4.5}{106 + 14.5 + 2.08 \times 4.5}$$

$$= 0.0221 \qquad \textbf{ตอบ}$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์อากาศที่ใช้คือ

$$\alpha = \frac{0.0666}{0.0221} = 3.0136 \qquad \textbf{ตอบ}$$

หรือเมื่อใช้สมการ (5-4.11) จะได้

$$\alpha = 1.47(0.0666)\frac{106 + O_2 + 2.08CO_2}{21 - O_2 - 0.49CO_2}$$

$$= 1.47(0.0666)\frac{106 + 14.5 + 2.08 \times 4.5}{21 - 14.5 - 0.49 \times 4.5} = 2.96$$

ประสิทธิภาพการเผาไหม้จะหาได้จากสมการ (5-4.13) คือ

$$\eta_{comb} = 0.3866 \times \frac{20.95 - O_2 + 0.9858CO_2}{20.95 - O_2 - 0.4894CO_2}$$

$$= 0.3866 \times \frac{20.95 - 14.5 + 0.9858 \times 4.5}{20.95 - 14.5 - 0.4894 \times 4.5} = 0.9908 \qquad \textbf{ตอบ}$$

ตัวอย่าง 5-4.5 ก๊าซโซลีนซึ่งมีสูตรทางเคมีโดยเฉลี่ยเป็น C_8H_{17} ถูกเผาไหม้ในเครื่องยนต์ด้วยอัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศเป็น 0.08 จงเขียนสมการปฏิกิริยาของการเผาไหม้แล้วคำนวณหาค่าความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาต่อส่วนผสมไอดี 1 kg และคำนวณหาค่าอัตราส่วนความร้อนส่วนที่สูญเสียไปกับผลผลิตที่ไม่เผาไหม้

วิธีทำ จากสมการ (5-3.17)

$$\alpha = \frac{(12x+y)}{32\times 4.31(x+\frac{y}{4})F/A} = \frac{(12\times 8+17)}{32\times 4.31(8+\frac{17}{4})(0.08)} = 0.836$$

แสดงให้เห็นว่าเป็นส่วนผสมหนา จากสมการ (5-3.13)

$$\frac{\text{kmole of } O_2}{\text{kmole of fuel}} = \frac{M_f}{(4.31\times 32)(F/A)} = \frac{113}{(4.31\times 32)(0.08)} = 10.24$$

ดังนั้น จากสมการ (5-3.9) จะได้

$$C_xH_y+\alpha(x+\frac{y}{4})O_2+3.773\alpha(x+\frac{y}{4})N_2$$

$$=(1-\phi)xCO_2+\phi xCO+\frac{\phi x}{2}H_2+(\frac{y}{2}-\frac{\phi x}{2})H_2O+3.773\alpha(x+\frac{y}{4})N_2$$

$$C_8H_{17}+10.24O_2+3.773(10.22)N_2$$

$$=(1-\phi)8CO_2+\phi 8CO+\frac{\phi 8}{2}H_2+(\frac{17}{2}-\frac{\phi 8}{2})H_2O+3.773(10.24)N_2$$

$$C_8H_{17}+10.24O_2+38.636N_2$$

$$=8(1-\phi)CO_2+8\phi CO+4\phi H_2+(8.5-4\phi)H_2O+38.636N_2$$

โดยการสมดุลออกซิเจนก่อนและหลังการเผาไหม้จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$10.24=(1-\phi)8+4\phi+4.25-2\phi = 12.25-6\phi$$

หรือ $\phi = 0.335$

สมการปฏิกิริยาจะกลายเป็น

$$C_8H_{17}+10.24O_2+38.636N_2 = 8(1-0.335)CO_2+8(0.335)CO$$
$$+4(0.335)H_2+(8.5-4\times 0.335)H_2O+38.636N_2$$

$$C_8H_{17}+10.24O_2+38.636N_2 = 5.32CO_2+2.68CO+1.34H_2+7.16H_2O+38.636N_2$$

ตอบ

พลังงานต่อ 1 kg ของส่วนผสมไอดี จะหาได้จาก

$$q_{mix} = \frac{m_f q_f}{m_f+m_a} = \frac{q_f}{1+\frac{1}{F/A}} = \frac{44047}{1+\frac{1}{0.08}} = 3263 \text{ kJ/kg of mixture}$$

พลังงานที่สูญเสียไปกับ CO ที่ไม่เผาไหม้ต่อ 1 kg ของส่วนผสมไอดี จะหาได้จาก

$$q_{CO} = \frac{m_{CO}}{m_f}\times\frac{q_{CO}}{1+\frac{1}{F/A}} = \frac{2.68\times 28}{113}\times\frac{10091}{1+\frac{1}{0.08}} = 496.4 \text{ kJ/kg of mixture}$$

พลังงานที่สูญเสียไปกับ H_2 ที่ไม่เผาไหม้ต่อ 1 kg ของส่วนผสมไอดี จะหาได้จาก

$$q_{H_2} = \frac{m_{H_2}}{m_f}\times\frac{q_{H_2}}{1+\frac{1}{F/A}} = \frac{1.34\times 2}{113}\times\frac{119748}{1+\frac{1}{0.08}} = 210.4 \text{ kJ/kg of mixture}$$

พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาต่อส่วนผสมไอดี 1 kg

$$= q_{mix}-q_{CO}-q_{H_2} = 3263-496.4-210.4 = 2556.2 \text{ kJ/kg of mixture}$$ **ตอบ**

อัตราส่วนของความร้อนส่วนที่สูญเสียไปกับผลผลิตที่ไม่เผาไหม้

$$= \frac{496.4 + 210.4}{3263} = 0.217$$ **ตอบ**

หมายเหตุ: การวิเคราะห์ไอเสียในกรณีที่เป็นส่วนผสมหนาพบว่าจะมี CH_4 เกิดขึ้นด้วย แต่เนื่องจากเกิดขึ้นในปริมาณที่น้อยมาก จึงสามารถตัดทิ้งไปได้ โดยไม่ทำให้เกิดความผิดพลาดมากนัก

5-5 อิทธิพลของเชื้อเพลิงต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์

คุณลักษณะของเครื่องยนต์มีผลมากพอสมควรต่อกำลังที่ผลิตได้, ประสิทธิภาพความร้อน, และความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเครื่องยนต์

กำลังที่ผลิตได้

กำลังที่ผลิตได้ของเครื่องยนต์สามารถแสดงได้ด้วยสมการ

$$P_b = V \rho_a \left(\frac{F/A}{1 + F/A}\right) q_f \eta_{bt} \qquad (5\text{-}5.1)$$

เมื่อ V = ปริมาตรของส่วนผสมที่สิ้นเปลืองไป ที่ความหนาแน่นในสถานะดูดเข้าเครื่องยนต์

ρ_a = ความหนาแน่นในสถานะดูดเข้าเครื่องยนต์

F/A = อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศโดยน้ำหนัก

q_f = ค่าความร้อนค่าต่ำของเชื้อเพลิงเป็น kJ/kg

η_{bt} = ประสิทธิภาพความร้อนเพลาของเครื่องยนต์

ในกรณีที่เป็นเครื่องยนต์ดีเซล ค่าของ F/A มีค่าต่ำ เพราะฉะนั้น จึงสามารถใช้ปริมาตรของอากาศและความหนาแน่นในสถานะดูดเข้าของอากาศโดยไม่ผิดพลาดมากนัก q_v ซึ่งเป็นตัววัดเปรียบเทียบความสามารถในการผลิตกำลังของส่วนผสมภายใต้ความหนาแน่นในสถานะดูดเข้า, อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศ, และประสิทธิภาพที่กำหนด และขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของเชื้อเพลิง จะสามารถเขียนได้เป็นสมการ

$$q_v = \rho_a \frac{F/A}{1 + F/A} q_f \qquad (5\text{-}5.2)$$

ตารางในภาคผนวกได้ให้ค่าของ q_v สำหรับเชื้อเพลิงมาตรฐานบางชนิดที่มีส่วนผสมที่ถูกต้องทางเคมี สถานะดูดเข้าอยู่ที่ความดันกับอุณหภูมิเป็น 1.01 bar, 15°C นอกจาก q_v แล้วประสิทธิภาพความร้อนและอุณหภูมิสถานะดูดเข้าของส่วนผสมซึ่งแปรเปลี่ยนไปตามคุณลักษณะของเชื้อเพลิงก็มีอิทธิพลต่อกำลังของเครื่องยนต์ด้วย

ประสิทธิภาพความร้อน

ค่าความร้อน q_f นั้นวัดโดยการเผาไหม้เชื้อเพลิงในบอมบ์แคลอรีมิเตอร์โดยปริมาตรคงที่ เพราะฉะนั้น q_f จะไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงจำนวนโมเลกุลเนื่องจากการเผาไหม้ ให้ $\Delta L (= L_{prod}-L_{mix})$ เป็นการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล (หรือการเปลี่ยนแปลงเชิงโมล) โดย L_{prod} และ L_{mix} เป็นโมเลกุล (หรือจำนวนโมล) ของผลิตผลจากการเผาไหม้และส่วนผสม ตามลำดับ เมื่อเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ภายในเครื่องยนต์ที่ปริมาตรคงที่ ความดันที่เกิดขึ้นจะหาได้จาก

$$p_{prod} = p_{mix} \frac{T_{prod}}{T_{mix}} \frac{L_{prod}}{L_{mix}} \qquad (5\text{-}5.3)$$

ดังนั้นการเพิ่มของจำนวนโมเลกุลจะทำให้ความดันของผลิตผลจากการเผาไหม้เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของ T_{prod} ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าของ q_f เพราะฉะนั้น สำหรับเชื้อเพลิงซึ่งมีจำนวนโมเลกุลเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการเผาไหม้จะมีประสิทธิภาพความร้อนสูงกว่าเชื้อเพลิงที่ไม่มีการเพิ่มจำนวนของโมเลกุล

ในกรณีที่เป็นเชื้อเพลิงเหลว ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงซึ่งหามาจากบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ นั้นจะแตกต่างจากปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้และค่าความร้อนของการระเหยของเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงระเหยนอกกระบอกสูบเครื่องยนต์ที่ใช้คาร์บูเรเตอร์ เพราะฉะนั้น ปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาภายในกระบอกสูบต่อเชื้อเพลิง 1 kg จึงน้อยกว่าค่า q_f ด้วยเหตุนั้น ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์จะสูงขึ้นเนื่องจากมีความร้อนปลดปล่อยภายในเครื่องยนต์มากกว่า

สถานะดูดเข้าเครื่องยนต์

ถ้าอุณหภูมิบรรยากาศสูงมากว่าอุณหภูมิที่จำเป็นสำหรับการระเหยและการส่งเชื้อเพลิงอย่างมีประสิทธิผล อุณหภูมิสถานะดูดเข้าเครื่องยนต์ของเครื่องยนต์ที่ใช้คาร์บูเรเตอร์จะลดลงเนื่องจากการระเหยของเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนของการกลายเป็นไอยิ่งสูงจะลดอุณหภูมิสถานะดูดเข้าเครื่องยนต์ยิ่งมาก การใช้เชื้อเพลิงเช่นนี้จะทำให้กำลังผลิตของเครื่องยนต์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นตรงสถานะดูดเข้าเครื่องยนต์สูงขึ้น

ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ

ในเครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นปฏิภาคผกผันกับผลคูณของประสิทธิภาพความร้อนกับค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ในกรณีที่เป็นน้ำมันปิโตรเลียม ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจะแปรเปลี่ยนไม่มากนัก เพราะฉะนั้นความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะส่วนใหญ่จึงขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพความร้อน สำหรับแอลกอฮอล์และเบนโซล ซึ่งค่าความร้อนต่ำกว่าน้ำมันปิโตรเลียมมากนั้น ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะจะสูงกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันปิโตร เลียมในการผลิตกำลังเท่าๆกันและมีประสิทธิภาพความร้อนเท่าๆกัน

แบบฝึกหัด

1. ตัวอย่างก๊าซโซลีนประกอบด้วยคาร์บอน 85.25% และไฮโดรเจน 14.75% โดยน้ำหนัก การวิเคราะห์ผลิตผลจากการเผาไหม้แห้งที่ใช้ก๊าซโซลีนนี้ได้ 10.3% CO_2, 4.1% O_2, และ 85.6% N_2 จงหาอัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศที่ใช้

(ตอบ F/A = 0.0465)

2. น้ำมันดีเซลซึ่งมีสูตรเคมีเป็น $C_{13}H_{28}$ ถูกเผาไหม้กับอากาศโดยส่วนผสมมีสัมประสิทธิ์อากาศเป็น 1.6 (1) จงเขียนสมการการเผาไหม้และหามวลของน้ำในสถานะไอที่เกิดขึ้นต่อเชื้อเพลิง 1 kg, (2) จงหาปริมาณเป็นร้อยละโดยปริมาตรของ CO_2 ที่เกิดขึ้นในผลิตผลจากการเผาไหม้แห้ง, และ (3) จงหาอัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศของส่วนผสม

(ตอบ H_2O = 1.37, CO_2 = 8.95, F/A = 0.417)

3. เครื่องยนต์ก๊าซโซลีนเครื่องหนึ่งใช้เชื้อเพลิงซึ่งมีสูตรเคมีโดยประมาณเป็น C_7H_{16} ถ้าการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจริงใช้อากาศเพียง 95% ของปริมาณอากาศที่ต้องการทางทฤษฎีภายใต้ภาระเต็มที่ จงหาอัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศในขณะที่รับภาระเต็มที่

(ตอบ F/A = 0.0693)

4. เชื้อเพลิงก๊าซซึ่งมีส่วนผสมโดยปริมาตรเป็น 16% C_2H_6, และ 84% CH_4 ถูกเผาไหม้กับอากาศในปริมาณที่ทำให้เกิดส่วนผสมที่ถูกต้องทางเคมี จงหา (1) มวลโมเลกุลของเชื้อเพลิงและอัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศของส่วนผสม, และ (2) ส่วนประกอบโดยมวลของผลิตผลจากการเผาไหม้ (โดยให้คิดว่าไอน้ำไม่ควบแน่น)

(ตอบ M_f = 18.24, F/A = 0.059, CO_2 = 15.7%, H_2O = 12, N_2 = 72.3%)

5. ก๊าซไอเสียจากเครื่องยนต์ดีเซลมีส่วนประกอบเป็น 6.5% CO_2, 9% O_2, และ CO ในปริมาณที่ตัดทิ้งไปได้ จงคำนวณหาอัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศของส่วนผสม และมวลของไอเสียแห้งต่อ 1 kg ของเชื้อเพลิงที่ถูกเผาไหม้ (ให้ทำทั้ง 2 วิธี แล้วนำผลลัพธ์มาเปรียบเทียบกัน)

(ตอบ F/A = 0.03, ไอเสีย = 31.8 kg/kg)

6. คุณลักษณะของเชื้อเพลิงมีอิทธิพลอย่างใดต่อประสิทธิภาพความร้อนของเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงนั้นๆ จงอธิบายให้ชัดเจนและยกตัวอย่างประกอบ

7. จากรายการต่อไปนี้คือ (1) H_2, (2) C_8H_{17}, และ (3) $C_{12}H_{26}$ เชื้อเพลิงใดที่จะทำให้ได้ประสิทธิความร้อนสูงกว่า จงเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย

8. ความสามารถในการระเหยเป็นไอ (Volatility) ของเชื้อเพลิงมีอิทธิพลอย่างใดต่อกำลังที่เครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยประกายไฟจะผลิตได้ จงอธิบายเหตุผล

ภาคผนวก ข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของก๊าซอุดมคติและเชื้อเพลิง

คุณสมบัติของก๊าซอุดมคติที่ความดันต่ำและที่อุณหภูมิห้องตามปกติ (20 ^{O}C)

ก๊าซ	M_f	C_p (kJ/kg K)	C_v (kJ/kg K)	R (kJ/kg K)	k
อากาศ	28.97	1.005	0.718	287.1	1.40
ไฮโดรเจน, H_2	2.016	14.32	10.17	4127	1.41
ฮีเลี่ยม, He	4.003	5.234	3.14	2078	1.66
มีเทน, CH_4	16.04	2.227	1.687	518.7	1.32
ไอน้ำ, H_2O	18.02	1.867	1.407	460.6	1.33
อะซิทีลีน, C_2H_2	26.04	1.712	1.394	319.6	1.23
คาร์บอนมอนอกไซด์, CO	28.01	1.043	0.745	296.6	1.40
ไนโตรเจน, N_2	28.02	1.038	0.741	296.6	1.40
อีเทน, C_2H_6	30.07	1.767	1.495	276	1.18
ออกซิเจน, O_2	32.00	0.917	0.653	259.6	1.40
อาร์กอน, A	39.94	0.515	0.310	208	1.67
คาร์บอนไดออกไซด์, CO_2	44.01	0.846	0.653	188.9	1.30
โพรเพน, C_3H_8	44.09	1.692	1.507	188.3	1.12
ไอโซบิวเทน, C_4H_{10}	58.12	1.758	1.62	143.1	1.09

ข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิง	สูตรเคมี (สถานะ)	M_f	γ (ρ)	h_{fg}	ความร้อนจำเพาะ, kJ/kg K		q_{fh}	q_f	$q_{f,c}$	A/F	F/A	RON	MON
					ของเหลว,	ไอ , c_p							
เชื้อเพลิงทางปฏิบัติ													
ก๊าซโซลีน	$C_nH_{1.87n}$ (l)	~ 110	0.72-0.78	305	2.4	~1.7	47.3	44.0	2.83	14.6	0.0685	92-98	80-90
ดีเซลใส	$C_nH_{1.8n}$ (l)	~ 170	0.84-0.88	270	2.2	~1.7	44.8	42.5	2.74	14.5	0.0690	-	-
ดีเซลข้น	$C_nH_{1.7n}$ (l)	~ 200	0.82-0.95	230	1.9	~1.7	43.8	41.4	2.76	14.4	0.0697	-	-
ก๊าซธรรมชาติ	$C_nH_{3.8n}N_{0.1n}$ (g)	~ 18	(~0.79*)	-	-	~2	50	45	2.9	14.5	0.0690	-	-
ไฮโดรคาร์บอนบริสุทธ์													
มีเทน	CH_4 (g)	16.04	(0.72*)	509	0.63	2.2	55.5	50.0	2.72	17.23	0.0580	120	120
โพรเพน	C_3H_8 (g)	44.10	0.51 (2.0*)	426	2.5	1.6	50.4	46.4	2.75	15.67	0.0638	112	97
ไอโซออกเทน	C_8H_{18} (l)	114.23	0.692	308	2.1	1.63	47.8	44.3	2.75	15.13	0.0661	100	100
ซีเทน	$C_{16}H_{34}$ (l)	226.44	0.773	358		1.6	47.3	44.0	2.78	14.82	0.0675	-	-
เบนซีน	C_6H_6 (l)	78.11	0.879	433	1.72	1.1	41.9	40.2	2.82	13.27	0.0753		115
โทลูอีน	C_7H_8 (l)	92.14	0.867	412	1.68	1.1	42.5	40.6	2.79	13.50	0.0741	120	109
แอลกอฮอล์													
เมทานอล	CH_4O (l)	32.04	0.792	1103	2.6	1.72	22.7	20.0	2.68	6.47	0.155	106	92
เอทานอล	C_7H_8O (l)	46.07	0.785	840	2.5	1.93	29.7	26.9	2.69	9.00	0.111	107	89
เชื้อเพลิงอื่นๆ													
คาร์บอน	C (s)	12.01	~2**	-	-	-	33.8	33.8	2.70	11.51	0.0869		
คาร์บอนมอนอกไซด์	CO (g)	28.01	(1.25*)	-	-	1.05	10.1	10.1	2.91	2.467	0.4050		
ไฮโดรเจน	H_2 (g)	2.015	(0.090*)	-	-	1.44	142.0	120.0	3.40	34.3	0.0292		

คุณสมบัติของเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายใน

เชื้อเพลิง	สูตรเคมี	M_f	γ ***	q_f	F/A	q_f (F/A)	q_v
นอร์มอล เฮพเทน	C_7H_{16} (l)	100	0.688	44.5	0.066	2940	347
นอร์มอล ออกเทน	C_8H_{18} (l)	114	0.707	44.4	0.0665	2950	347
ไอโซ ออกเทน	C_8H_{18} (l)	114	0.702	44.3	0.0665	2940	346
เบนซีน	C_6H_6 (l)	78	0.884	40.2	0.0755	3030	
เมทีล แอลกอฮอล์	CH_3OH (l)	32	0.796	20.4	0.1550	3160	339
เอทีล แอลกอฮอล์	C_2H_5OH (l)	46	0.794	28.2	0.1110	3130	342
ก๊าซโซลีน	C_8H_{17} (l)	113	0.702	44.0	0.0670	2940	349
น้ำมันก๊าด	$C_{12}H_{26}$ (l)	154	0.825	43.0	0.0667	2870	339
ดีเซลใส	$C_{12}H_{26}$ (l)	170	0.876	42.3	0.0666	2820	338
ดีเซลข้น	$C_{14}H_{30}$ (l)	198	0.960	41.2	0.0670	2860	326
C เป็น CO_2	C (s)	12		33.8	0.0868	2980	
C เป็น CO	C (s)	12		10.1			
ไฮโดรเจน	H_2 (g)	2	$\rho / \rho_a = 0.069$	119.6	0.029	3490	
มีเทน	CH_4 (g)	16	$\rho / \rho_a = 0.552$	49.8	0.058	2900	
อีเทน	C_2H_6 (g)	30	$\rho / \rho_a = 1.03$	47.3	0.062	2940	
CO	CO (g)	28	0.999	10.1	0.404	4100	

คุณสมบัติของเชื้อเพลิงก๊าซ

เชื้อเพลิงก๊าซ (ส่วนผสมของก๊าซ)	ส่วนประกอบโดยปริมาตร									M_f	ρ / ρ_a	q_f	F/A	q_f (F/A)
	C_2H_4	CO_2	CO	C_2H_6	CH_4	N_2	O_2	H_2	C_6H_6					
Coal gas	1.5	3.0	10.9	-	24.2	4.4	0.2	54.5	1.3	12.1	0.42	34.3	0.092	3150
ก๊าซธรรมชาติ	-	-	-	15.8	83.4	0.8	-	-	-	18.3	0.61	50.6	0.058	2940
Producer gas	-	4.5	27.0	-	3.0	50.9	0.6	14.0	-	24.7	0.86	5.4	0.70	3780

หมายเหตุ: M_f = มวลโมเลกุล

ρ = ความหนาแน่น, kg/m^3

l = สถานะเป็นของเหลว

s = สถานะเป็นของแข็ง

q_{fh} = ค่าความร้อนค่าสูง, MJ/kg

$q_{f,c}$ =ค่าความร้อนค่าต่ำของส่วนผสมที่ถูกต้องทางเคมี, MJ/kg

q_f (F/A) = ค่าความร้อนต่อกิโลกรัมของส่วนผสมที่ถูกต้องทางเคมี, kJ/kg

A/F = อัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงที่ถูกต้องทางเคมี

MON = motor octane number

** = ที่ความดันบรรยากาศและ 25 ^{O}C

γ = ความถ่วงจำเพาะ

ρ / ρ_a = อัตราส่วนความหนาแน่นของก๊าซต่ออากาศที่ 1 atm และ 15 ^{O}C

g = สถานะเป็นก๊าซ

h_{fg} = ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ, kJ/kg

q_f = ค่าความร้อนค่าต่ำ, MJ/kg

q_v = ค่าความร้อนต่อลูกบาศก์เมตรของส่วนผสมที่ถูกต้องทางเคมี, kJ/m^3

F/A = อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศที่ถูกต้องทางเคมี

RON = research octane number

* = ที่ความดันบรรยากาศและ 0 ^{O}C

*** = ที่ความดันบรรยากาศและ 15 ^{O}C

เอกสารอ้างอิง

1. Artamonov MD, Ilarionov VA, Morin MM (1976). **Motor Vehicles Fundamentals and Design**, Translated by Troitsky A, Moscow: Mir Publishers, pp. 19-24.

2. Heywood JB (1988). **Internal Combustion Engine Fundamentals**, New York: McGraw-Hill, pp. 65, 915.

3. Holman JP (1985). **Thermodynamics**, 3rd ed., Auckland: McGraw-Hill, p. 63.

4. Morse FT (1974). **Power Plant Engineering**, New Delhi: Affiliated East-West Press, pp. 121, 150-151.

5. Petrovsky N (19xx). **Marine Internal Combustion engines**, Translated by Isakson HE, Moscow: Mir Publishers., pp. 35-43

6. Sen SP (1998). **Internal Combustion Engine Theory and Practice**, Delhi: Khanna Publishers, pp. 111-169.

เอกสารแนะนำให้อ่านเพิ่มเติม

1. Heywood JB (1988). **Internal Combustion Engine Fundamentals**, New York: McGraw-Hill, pp. 64-72.

2. Sen SP (1998). **Internal Combustion Engine Theory and Practice**, Delhi: Khanna Publishers, Chapter 3 Fuels for internal combustion engine.

3. Holman JP (1985). **Thermodynamics**, 3rd ed., Auckland: McGraw-Hill, pp. 63-65.

บทที่ 6
การวิเคราะห์วัฏจักรก๊าซมาตรฐาน

6-1 บทนำ

วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์สันดาปภายในสามารถแยกออกเป็นกระบวนการต่างๆตามลำดับ คือ การดูด, การอัด, การเผาไหม้, การขยายตัว, และการคาย โดยข้อเท็จจริงแล้วเครื่องยนต์สันดาปภายในไม่ได้เป็นระบบปิด และสารทำงานไม่ได้เป็นไปตามวัฏจักรของอุณหพลศาสตร์ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นไม่ใช่เป็นผลมาจากการถ่ายเทความร้อนเป็นหลัก จึงควรวิเคราะห์เครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นระบบเปิดที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนและงานกับสิ่งแวดล้อม (บรรยากาศ) โดยมีสารทำปฏิกิริยา (เชื้อเพลิงและอากาศ) ไหลเข้าไปในระบบ มีผลิตผลจากการเผาไหม้ (ก๊าซไอเสีย) ไหลออกจากระบบ ดังนั้นวัฏจักรการทำงานที่จะกล่าวต่อไปนี้จึงประกอบด้วยกระบวนการที่เกิดขึ้นติดต่อกันตามลำดับจนครบวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์

6-2 การวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์

การวิเคราะห์วัฏจักรอุดมคติด้วยอุณหพลศาสตร์มีจุดประสงค์เพื่อที่จะหาค่าของพารามิเตอร์ที่เป็นตัวกำหนดการทำงานของเครื่องยนต์ และหาคุณสมบัติของสารทำงานที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดวัฏจักรการทำงาน

พารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่ ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานเชื้อเพลิง (η_f) โดย

$$\eta_f = \eta_t \eta_{comb} = \frac{W_{cyc}}{Q_{in}} \frac{Q_{in}}{Q_f} = \eta_{comb} \frac{W_{cyc}}{m_f q_f} \qquad (6\text{-}2.1)$$

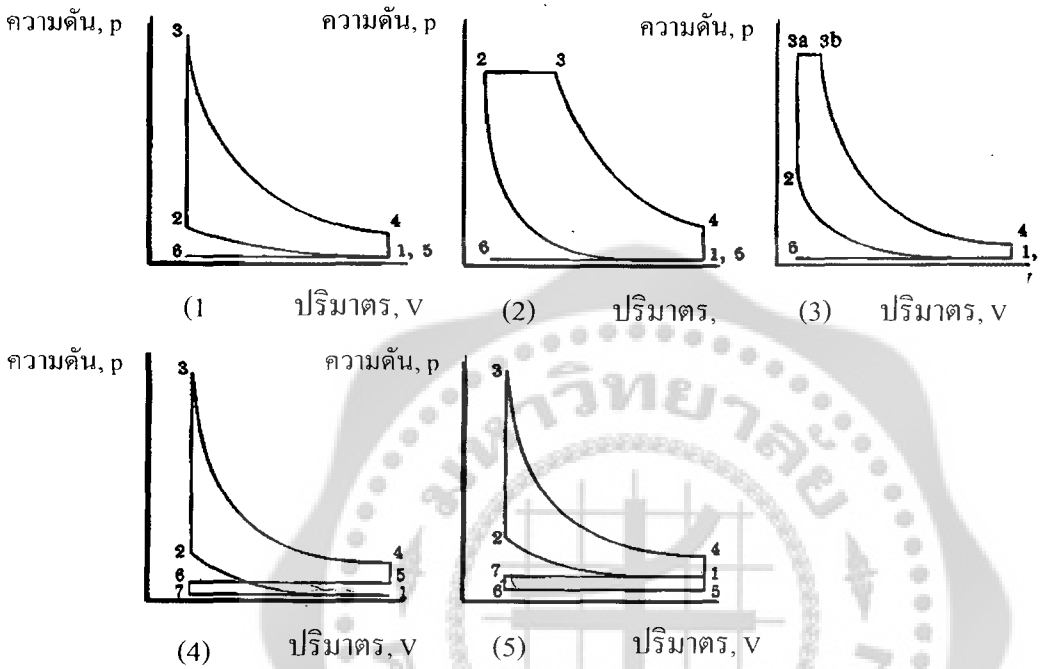
เมื่อ W_{cyc} เป็นงานต่อหนึ่งวัฏจักร ซึ่งเป็นผลรวมของงานในการอัด (W_C) กับงานในการขยายตัว (W_E) คือ

$$W_{cyc} = W_C + W_E \qquad (6\text{-}2.2)$$

ถ้ากำหนดให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ $\eta_{comb} = 1$, ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานเชื้อเพลิง (η_f) ก็จะเท่ากับประสิทธิภาพความร้อน (η_t) และความดันเฉลี่ยประสิทธิผลจะมีค่าเป็น

$$p_m = \frac{W_{cyc}}{V_d} = \frac{m_f \cdot q_f \cdot \eta_t}{V_d} \qquad (6\text{-}2.3)$$

ซึ่ง W_C, W_E และสภาวะของสารทำงานที่สถานะต่างๆ สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ทางอุณหพลวัตของกระบวนการต่างๆ คือ



รูปที่ 6-2.1 แผนภาพความดันกับปริมาตรของวัฏจักรอุดมคติ
(1) วัฏจักรปริมาตรคงที่ในสภาวะการทำงานที่ไม่เปิดลิ้นเร่ง (2) วัฏจักรความดันคงที่ในสภาวะการทำงานที่ไม่เปิดลิ้นเร่ง (3) วัฏจักรจำกัดความดันในสภาวะการทำงานที่ไม่เปิดลิ้นเร่ง (4) วัฏจักรปริมาตรคงที่ในสภาวะการทำงานที่เปิดลิ้นเร่ง (5) วัฏจักรปริมาตรคงที่ในสภาวะการทำงานแบบใช้เครื่องอัดบรรจุ

1) กระบวนการอัด

กระบวนการอัดหรือจังหวะอัด (กระบวนการ 1-2 ในรูปที่ 6-2.1) จะได้

$$\frac{v_i}{v_2} = \varepsilon \qquad (6\text{-}2.4)$$

เนื่องจากกระบวนการเป็นแบบไอเซนโทรปิก ซึ่งจะได้

$$s_2 = s_1 \qquad (6\text{-}2.5)$$

และงานในการอัดก็จะเป็น

$$W_C = U_1 - U_2 = m(u_1 - u_2) \qquad (6\text{-}2.6)$$

2) กระบวนการเผาไหม้

กระบวนการเผาไหม้ (กระบวนการ 2-3 หรือ 2-3a-3b ในรูปที่ 6-2.1) สำหรับวัฏจักรปริมาตรคงที่จะได้

$$v_3 = v_2 \quad \text{และ} \quad u_3 - u_2 = 0 \qquad (6\text{-}2.7\ a, b)$$

สำหรับวัฏจักรความดันคงที่จะได้

$$p_3 = p_2 \quad \text{และ} \quad h_3 - h_2 = 0 \qquad (6\text{-}2.7\ c, d)$$

สำหรับวัฏจักรจำกัดความดันจะได้

$$v_{3a} = v_2 \quad \text{และ} \quad p_{3b} = p_{3a} \qquad (6\text{-}2.7\ e, f)$$

และ $$u_{3a} - u_2 = 0 \quad \text{และ} \quad h_{3b} - h_{3a} = 0 \qquad (6\text{-}2.7\ g, h)$$

3) กระบวนการขยายตัว

กระบวนการขยายตัวหรือจังหวะขยายตัว (กระบวนการ 3-4 หรือ 2-4 ในวัฏจักรความดันคงที่ในรูปที่ 6-2.1) สำหรับวัฏจักรปริมาตรคงที่จะได้

$$\frac{v_4}{v_3} = \varepsilon \quad \text{และ} \quad s_4 = s_3 \qquad (6\text{-}2.8)$$

และงานของการขยายตัวก็จะเป็น

$$W_E = U_3 - U_4 = m(u_3 - u_4) \qquad (6\text{-}2.9)$$

สำหรับวัฏจักรความดันคงที่จะได้

$$p_3 = p_2 \quad \text{และ} \quad \frac{v_4}{v_2} = \varepsilon \quad \text{และ} \quad s_4 = s_3 \qquad (6\text{-}2.10)$$

ดังนั้นงานในการขยายตัวก็จะเป็น

$$\begin{aligned} W_E &= U_3 - U_4 + p_2(V_3 - V_2) \quad = m[(u_3 - u_4) + p_2(v_3 - v_2)] \\ &= m[(h_3 - h_4) + p_4 v_4 - p_2 v_2)] \end{aligned} \qquad (6\text{-}2.11)$$

สำหรับวัฏจักรจำกัดความดันจะได้

$$\frac{v_4}{v_{3a}} = \varepsilon \quad \text{และ} \quad p_{3b} = p_{3a} \quad \text{และ} \quad s_4 = s_{3b} \qquad (6\text{-}2.12)$$

ดังนั้นงานของการขยายตัวก็จะเป็น

$$\begin{aligned} W_E &= U_{3b} - U_4 + p_3(V_{3b} - V_{3a}) \\ &= m[(u_{3b} - u_4) + p_3(v_{3b} - v_{3a})] \\ &= m[(h_{3b} - h_4) + p_4 v_4 - p_3 v_{3a})] \end{aligned} \qquad (6\text{-}2.13)$$

ซึ่งสามารถที่จะหาประสิทธิภาพความร้อนได้โดยการแทนค่าลงในสมการ (6-2.2) และสมการ (6-2.1) คือ สำหรับวัฏจักรปริมาตรคงที่จะได้

$$\eta_t = \frac{m[(u_3 - u_4) - (u_2 - u_1)]}{m_f q_f} \qquad (6\text{-}2.14)$$

สำหรับวัฏจักรความดันคงที่จะได้

$$\eta_t = \frac{m[(h_3 - h_4) - (u_3 - u_4) - p_4 v_4 - p_2 v_2)]}{m_f q_f} \qquad (6\text{-}2.15)$$

สำหรับวัฏจักรจำกัดความดันจะได้

$$\eta_t = \frac{m[(h_{3b} - h_4) - (u_2 - u_1) - p_4 v_4 - p_3 v_{3a})]}{m_f q_f} \qquad (6\text{-}2.16)$$

เนื่องจากงานต่อวัฏจักร (W_{cyc}) คิดจากงานของจังหวะอัดและจังหวะขยายตัวเท่านั้นจึงเป็นงานต่อวัฏจักรรวม (Gross) (ซึ่งต่างจาก W_{net} ที่คิดจากงานทั้ง 4 กระบวนการ) และประสิทธิภาพความร้อนตามสมการ (6-2.14), (6-2.15) และ (6-2.16) ก็จะเป็นประสิทธิภาพความร้อนรวม (η_{tg}) สำหรับเครื่องยนต์สี่จังหวะ

4) กระบวนการคาย

กระบวนการคาย (กระบวนการ 4-5-6 ในรูปที่ 6-2.1) ตามวัฏจักรอุดมคติสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการย่อย คือ

4.1) กระบวนการระบายออก (Blowdown process) ด้วยความดันสูงกว่าเกิดขึ้นเมื่อลิ้นไอเสียเปิดที่สถานะ 4 ซึ่งความดันในกระบอกสูบจะสูงกว่าความดันในท่อร่วมไอเสีย ทำให้ไอเสียระบายออก สำหรับกระบวนการอุดมคติ การระบายออกของไอเสียนี้เกิดขึ้นขณะที่ลูกสูบหยุดอยู่ที่ศูนย์ตายล่าง (เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด) ในระหว่างกระบวนการระบายออกนี้ก๊าซในกระบอกสูบ (ก๊าซที่สถานะ 4) สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ก๊าซที่ตกค้างอยู่ในกระบอกสูบซึ่งจะกำหนดให้การขยายตัวเป็นแบบไอเซนโทรปิก และก๊าซที่ไหลออกไปจากกระบอกสูบจะถูกกำหนดให้เป็นไปตามกระบวนการทรอตทลิง (Throttling process)

4.2) กระบวนการแทนที่ (Displacement process) เกิดขึ้นหลังกระบวนการระบายออก คือในขณะที่ลูกสูบเคลื่อนที่จากศูนย์ตายล่างไปยังศูนย์ตายบน ลูกสูบก็จะไปแทนที่หรือดันก๊าซในกระบอกสูบออกไปยังท่อไอเสีย ซึ่งจะทำให้มวลของก๊าซภายในกระบอกสูบที่สถานะสิ้นสุดของกระบวนการระบายออกลดลงไปอีกด้วยอัตราส่วน V_5/V_6

เนื่องจากสภาวะของสารผสมที่สถานะ 1 ในวัฏจักร (สถานะเริ่มต้นของกระบวนการอัด) จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของส่วนผสมที่นำเข้าและคุณสมบัติของก๊าซที่ตกค้างอยู่ในกระบอกสูบตรงสถานะสิ้นสุดของจังหวะอัด (สถานะ 6 ในรูปที่ 6-2.1) โดยปริมาณของก๊าซที่ตกค้างค้างอยู่ในกระบอกสูบนี้ถูกกำหนดด้วยเศษส่วนโดยมวลของไอเสียที่ตกค้างอยู่ในกระบอกสูบ (f) ซึ่ง

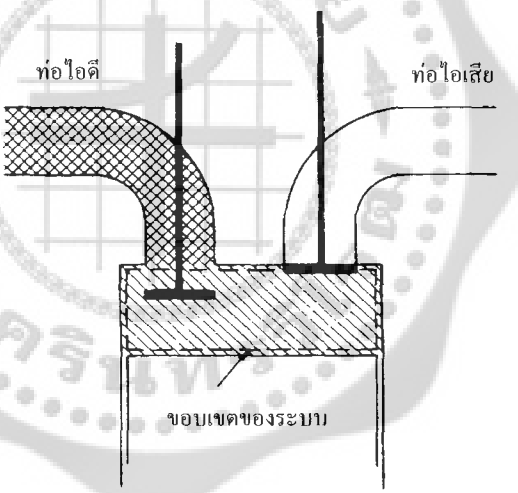
$$f = \frac{m_r}{m}$$

โดยที่ $$m_r = m_6 = \frac{m_5}{V_5 / V_6} = \frac{m_5}{\varepsilon}$$

และ $$m = m_1 = m_2 = m_3 = m_4$$

จะได้ $$f = \frac{m_5}{m_4 \varepsilon} = \frac{V_5 / v_5}{(V_4 / v_4)\varepsilon} = \frac{v_4 / v_5}{\varepsilon} = \frac{v_4 / v_5}{v_1 / v_2}$$

ดังนั้น $$f = \frac{v_2}{v_5} \qquad (6\text{-}2.17)$$



รูปที่ 6-2.2 ขอบเขตของระบบสำหรับการวิเคราะห์ทางอุณหพลวัตของกระบวนการในวัฏจักรอุดมคติ

สำหรับสภาวะเฉลี่ยของไอเสียสามารถหาได้โดยพิจารณาระบบเปิดซึ่งมีขอบเขตของระบบที่กำหนดโดยหัวลูกสูบ, ผนังกระบอกสูบ, และด้านล่างของฝาสูบดังแสดงในรูปที่ 6-2.2 เมื่อใช้กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์สำหรับระบบเปิดกับกระบวนการคาย จะได้

$$U_6 - U_4 = p_{cx}(V_4 - V_6) - H_{cx} \qquad (6\text{-}2.18\ a)$$

โดย H_{ex} เป็นเอนทัลปีของไอเสียที่ออกจากกระบอกสูบ และเอนทัลปีจำเพาะเฉลี่ยของไอเสีย ($\bar{h}_{cx}$) จะ เท่ากับ

$$\bar{h}_{cx} = \frac{m_4 u_4 - m_6 u_6 + p_{ex} V_d}{m_4 - m_6} \qquad (6\text{-}2.18\ b)$$

ซึ่งค่าความดันในท่อไอเสีย (p_{ex}) สามารถที่จะกำหนดสภาวะเฉลี่ยของไอเสียได้

5) กระบวนการดูด

กระบวนการดูด (กระบวนการ 6-1 หรือ 6-7-1 ในรูปที่ 6-2.1) จะถูกวิเคราะห์เพื่อหาอุณหภูมิของสารผสมที่สถานะสิ้นสุดของจังหวะดูด ซึ่งก็คือสถานะเริ่มต้นของจังหวะอัด (สถานะ 1 ในรูปที่ 6-2.1) โดยพิจารณาเป็นระบบเปิดตามรูปที่ 6-2.2 ใช้กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์กับกระบวนการ 6-1 จะได้

$$U_1 - U_6 = -p_i (V_1 - V_6) + (m_1 - m_6) h_i \qquad (6\text{-}2.19\ a)$$

หรือ $$m_1 u_1 - m_6 u_6 = -p_i (V_1 - V_6) + (m_1 - m_6) h_i \qquad (6\text{-}2.19\ b)$$

หรือ $$m_1 h_1 = m_6 h_6 + (m_1 - m_6) h_i + V_2 (p_i - p_{ex}) \qquad (6\text{-}2.19\ c)$$

โดย h_1 เป็นเอนทัลปีจำเพาะของส่วนผสมที่ถูกดูดเข้า และ $p_1 = p_i$

ในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์สี่จังหวะจะมีงานที่กระทำบนลูกสูบในระหว่างกระบวนการดูดและการคายด้วย ซึ่งงานที่กระทำโดยก๊าซในกระบอกสูบบนหัวลูกสูบในช่วงการคาย (W_{ex}) จะเป็น

$$W_{cx} = p_{cx} (V_2 - V_1) \qquad (6\text{-}2.20)$$

และงานที่กระทำโดยก๊าซในกระบอกสูบบนลูกสูบในช่วงการดูด (W_i) จะเป็น

$$W_i = p_i (V_1 - V_2) \qquad (6\text{-}2.21)$$

งานสุทธิที่กระทำบนลูกสูบของจังหวะคายและจังหวะดูดก็คืองานในการสูบไอดี (Pumping work, W_p) คือ

$$W_P = (p_i - p_{cx})(V_1 - V_2) \qquad (6\text{-}2.22)$$

โดยจะมีค่าเป็นลบเมื่อ $p_i < p_{ex}$ (เป็นงานที่ลูกสูบกระทำต่อก๊าซในกระบอกสูบ) ซึ่งเป็นกรณีของการทำงานเมื่อเปิดลิ้นเร่ง และจะมีค่าเป็นบวกเมื่อ $p_i > p_{ex}$ (เป็นงานที่ก๊าซในกระบอกสูบกระทำต่อลูกสูบ) ซึ่งเป็นกรณีของการทำงานแบบอัดบรรจุ นอกจากนี้ ในกรณีของการทำงานโดยไม่เปิดลิ้นเร่งคือ $p_i = p_{ex}$ งานในการสูบไอดีก็จะมีค่าเป็นศูนย์

ส่วนความดันเฉลี่ยประสิทธิผลในการสูบไอดี (Pumping mean effective pressure, pmep) ซึ่งมักกำหนดเป็นจำนวนบวกจะเป็นดังนี้

เมื่อ $p_i < p_{ex}$ จะได้

$$p_{pm} = p_{ex} - p_i \qquad (6\text{-}2.23\ a)$$

เมื่อ $p_i > p_{ex}$ จะได้

$$p_{pm} = p_i - p_{ex} \qquad (6\text{-}2.23\ b)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความดันเฉลี่ยประสิทธิผลสุทธิกับความดันเฉลี่ยประสิทธิผลรวมก็จะเป็น

$$p_{mn} = p_{mg} - (p_{ex} - p_i) \qquad (6\text{-}2.24)$$

และความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพความร้อนสุทธิกับประสิทธิภาพความร้อนรวมก็จะเป็น

$$\eta_{tn} = \eta_{tg}\left(1 - \frac{p_{ex} - p_i}{p_{mg}}\right) \qquad (6\text{-}2.25)$$

6-3 การวิเคราะห์วัฏจักรก๊าซมาตรฐาน

วัฏจักรก๊าซมาตรฐานเป็นวัฏจักรอุดมคติที่ใช้สารทำงานเป็นก๊าซอุดมคติเดี่ยวที่มีค่า c_v และ c_p คงที่ตลอดวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ โดยจะแยกการวิเคราะห์ออกเป็นวัฏจักรปริมาตรคงที่, วัฏจักรความดันคงที่, และวัฏจักรจำกัดความดัน

6-3.1 วัฏจักรปริมาตรคงที่

งานในการอัดตามสมการ (6-2.6) ก็จะเป็น

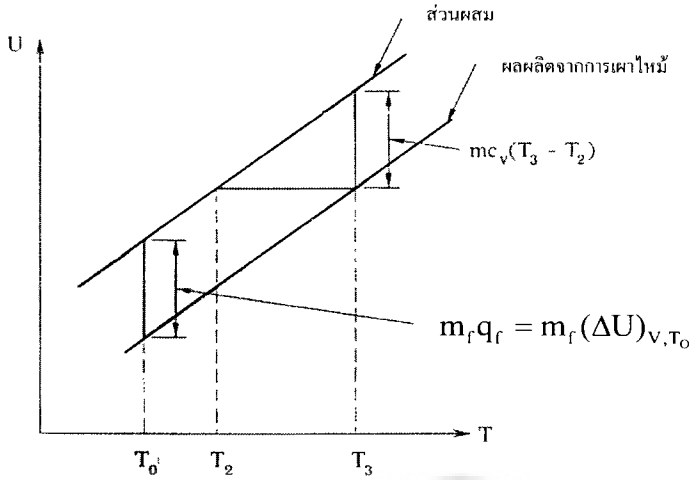
$$W_C = mc_v(T_1 - T_2) \qquad (6\text{-}3.1)$$

งานในการขยายตัวตามสมการ (6-2.9) ก็จะเป็น

$$W_E = mc_v(T_3 - T_4) \qquad (6\text{-}3.2)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนของเชื้อเพลิงกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นระหว่างการเผาไหม้สามารถหาได้จากรูปที่ 6-3.1 (กราฟระหว่าง U กับ T ของสารทำปฏิกิริยากับสารที่ได้จากการเผาไหม้จะขนานกันและมีความชันเท่ากัน มีค่าเท่ากับ c_v) สำหรับกระบวนการเผาไหม้แบบแอเดียแบติกและปริมาตรคงที่จะเป็น

$$mc_v(T_3 - T_2) = \eta_{comb} m_f q_f \qquad (6\text{-}3.3)$$



รูปที่ 6-3.1 แผนภาพพลังงานภายในกับอุณหภูมิ เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนของเชื้อเพลิงกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นระหว่างการเผาไหม้

ในกรณีที่เป็นการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ด้านขวามือของสมการ (6-3.3) ก็จะเป็น $m_f q_f$ โดยประสิทธิภาพการเผาไหม้ $\eta_{comb} = 1$

ประสิทธิภาพความร้อนรวมสามารถหาได้โดยการแทนค่าลงในสมการ (6-2.1) และ (6-2.2) นั่นคือ

$$\eta_{tg} = \frac{mc_v[(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)]}{mc_v(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \quad (6\text{-}3.4)$$

เนื่องจากกระบวนการ 1-2 และ 3-4 เป็นกระบวนการไอเซนโทรปิกระหว่างปริมาตรเดียวกัน คือ V_1 และ V_2 จะได้ว่า

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = \varepsilon^{k-1} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{k-1} = \frac{T_3}{T_4}$$

โดย $k = c_p / c_v$ ดังนั้น

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} \qquad \text{และ} \qquad \frac{T_4}{T_1} - 1 = \frac{T_3}{T_2} - 1$$

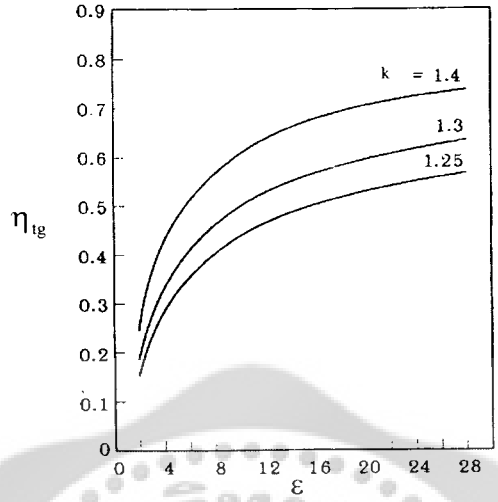
หรือ $$\frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

แทนค่าลงในสมการ (6-3.4) จะได้

$$\eta_{tg} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \quad (6\text{-}3.5)$$

ซึ่งจะเห็นว่าประสิทธิภาพความร้อนรวมนั้นจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการอัด (ε) และอัตราส่วนค่าความร้อนจำเพาะ (k) โดยประสิทธิภาพความร้อนรวมจะ

เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการอัดเพิ่มขึ้นและจะลดลงเมื่ออัตราส่วนค่าความร้อนจำเพาะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 6-3.2



รูปที่ 6-3.2 ประสิทธิภาพความร้อนรวมของวัฏจักรก๊าซมาตรฐานแบบปริมาตรคงที่ (η_{tg}) เทียบกับอัตราส่วนการอัด (ε) ที่อัตราส่วนค่าความร้อนจำเพาะ (k) ต่างๆ

ความดันเฉลี่ยประสิทธิผลจะหาจากพารามิเตอร์ที่ไร้หน่วย คือ ε, k และ $q^*/(c_v T_1)$ โดยกำหนดให้

$$q^* = \frac{m_f q_f}{m} \qquad (6\text{-}3.6)$$

เมื่อ m เป็นมวลของสารทำงาน จากสมการ (6-2.3)

$$p_m = \frac{m_f q_f \eta_t}{V_d}$$

แทนค่า η_{tg} จากสมการ (6-3.5) และ $m_f q_f = mq^*$ จะได้

$$p_m = \frac{mq^*(1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}})}{V_d}$$

ที่สถานะ 1, จาก $p_1 V_1 = mRT_1$, จะได้ $m = \frac{p_1 V_1}{RT_1}$

และ $$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_d + V_c}{V_c} = 1 + \frac{V_d}{V_c} = 1 + \frac{V_d}{V_2}$$

ดังนั้น $$V_d = (\varepsilon - 1)V_2$$

แทนค่า V_d และ m จะได้

$$p_m = \frac{p_1 V_1}{RT_1} q^* \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}\right)\left(\frac{1}{V_2(\varepsilon - 1)}\right)$$

แทน R ด้วย $c_v(k - 1)$ จะได้

$$\frac{p_m}{p_1} = \left(\frac{q^*}{c_v T_1}\right)\left(\frac{1}{k-1}\right)\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1}\right)\left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}\right) \qquad (6\text{-}3.7)$$

นอกจากนี้แล้วยังนิยมหาความดันเฉลี่ยประสิทธิผลต่อความดันสูงสุดของวัฏจักร(p_m/p_3) โดยหาจากสมการ (6-3.7) และจากกระบวนการ 2-3 ซึ่งเป็นกระบวนการปริมาตรคงที่ จะได้

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2}$$

และกระบวนการ 1-2 ซึ่งเป็นกระบวนการไอเซนโทรปิกจะได้

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^k = \frac{1}{\varepsilon^k}$$

แทนค่า p_2 จะได้

$$\frac{p_3}{p_1} = \varepsilon^k \left(\frac{T_3}{T_2}\right)$$

หาความสัมพันธ์ของ T_3/T_2 จากสมการ (6-3.3)

$$mc_v(T_3 - T_2) = m_f q_f$$

$$mc_v(T_3 - T_2) = mq^*$$

$$T_3 - T_2 = \frac{q^*}{c_v}$$

$$\frac{T_3}{T_2} = 1 + \frac{q^*}{c_v T_2} = 1 + \frac{q^*}{c_v T_1 \varepsilon^{k-1}}$$

จะได้

$$\frac{p_3}{p_1} = \varepsilon^k \left(1 + \frac{q^*}{c_v T_1 \varepsilon^{k-1}}\right) \qquad (6\text{-}3.8)$$

ดังนั้น

$$\frac{p_m}{p_3} = \frac{p_m}{p_1} \cdot \frac{p_1}{p_3}$$

$$\frac{p_m}{p_3} = \frac{1}{(k-1)\varepsilon^k}\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1}\right)\frac{1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}}{\frac{c_v T_1}{q^*} + \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}} \qquad (6\text{-}3.9)$$

การวิเคราะห์วัฏจักรอุดมคติโดยทั่วไปจะต้องทราบสภาวะของสารทำงานที่สถานะเริ่มต้นของกระบวนการอัด (สถานะ 1 ในรูปที่ 6-2.1) ซึ่ง $p_i = p_i$ แต่ T_i ขึ้นอยู่

กับปริมาณและสภาวะของก๊าซที่ตกค้างอยู่ในกระบอกสูบโดยปริมาณของก๊าซที่ตกค้างอยู่ในกระบอกสูบนี้ถูกกำหนดด้วยเศษส่วนโดยมวลของก๊าซไอเสียที่ตกค้างอยู่ (f) ซึ่งสามารถหาจากสมการ (6-2.17) นั่นคือ

$$\frac{m_r}{m} = f = \frac{v_4 / v_5}{\varepsilon}$$

เนื่องจากกระบวนการ 4-5 ของก๊าซส่วนที่อยู่ในกระบอกสูบเป็นการขยายตัวแบบไอเซนโทรปิก จะได้

$$f = \frac{(p_{ex} / p_4)^{1/k}}{\varepsilon} = \frac{(p_{ex} / p_i)^{1/k} (p_1 / p_4)^{1/k}}{\varepsilon}$$

โดย $p_5 = p_{ex}$ และ $p_1 = p_i$ และเนื่องจาก

$$\frac{p_1}{p_4} = \frac{p_1}{p_2}\frac{p_2}{p_3}\frac{p_3}{p_4} = \frac{1}{\varepsilon^k}\frac{T_2}{T_3}\varepsilon^k = \left(1 + \frac{q^*}{c_v T_1 \varepsilon^{k-1}}\right)^{-1}$$

จะได้

$$f = \frac{1}{\varepsilon}\frac{(p_{ex} / p_i)^{1/k}}{\left[1 + \dfrac{q^*}{c_v T_1 \varepsilon^{k-1}}\right]^{1/k}} \qquad (6\text{-}3.10)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่าเศษส่วนโดยมวลของก๊าซที่ตกค้าง (f) จะเพิ่มขึ้นเมื่อ p_i ลดลงต่ำกว่า p_{ex} และ f จะลดลงเมื่อ ε เพิ่มขึ้นหรือเมื่อ $q^* /(c_v T_1)$ เพิ่มขึ้น

ในการวิเคราะห์ทำนองเดียวกัน จะสามารถหาอุณหภูมิของก๊าซที่ตกค้างอยู่ (T_6) ได้เป็น

$$\frac{T_6}{T_1} = \left(\frac{p_{ex}}{p_i}\right)^{(k-1)/k}\left(1 + \frac{q^*}{c_v T_1 \varepsilon^{k-1}}\right)^{1/k} \qquad (6\text{-}3.11)$$

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของส่วนผสมที่สถานะ 1 ในวัฏจักร (T_1) กับอุณหภูมิของส่วนผสมที่ดูดเข้า (T_i) สามารถหาได้จากสมการ (6-2.19) เมื่อสารทำงานมี c_v และ c_p คงที่ จะได้

$$c_p T_1 = f c_p T_6 + (1 - f) c_p T_i - \frac{R T_1}{\varepsilon}\left(\frac{p_{ex}}{p_i} - 1\right) \qquad (6\text{-}3.12)$$

แทนค่า T_6 จากสมการ (6-3.11) จะได้

$$\frac{T_1}{T_i} = \frac{1 - f}{\left(1 - \dfrac{1}{k\varepsilon}\right)\left(\dfrac{p_{ex}}{p_i} + (k - 1)\right)} \qquad (6\text{-}3.13)$$

6-3.2 วัฏจักรจำกัดความดันและวัฏจักรความดันคงที่

วัฏจักรความดันคงที่ก็คือวัฏจักรจำกัดความดันซึ่ง $p_3 = p_2$ สำหรับวัฏจักรจำกัดความดันซึ่งสารทำงานมี c_v และ c_p คงที่ตลอดทั้งวัฏจักร งานในการอัดก็จะเป็น

$$W_C = mc_v(T_1 - T_2) \qquad (6\text{-}3.14)$$

งานในการขยายตัวจากสมการ (6-2.13) ก็จะเป็น

$$W_E = m[c_v(T_{3b} - T_4) + p_3(v_{3b} - v_{3a})] \qquad (6\text{-}3.15)$$

สำหรับกระบวนการเผาไหม้ จากสมการ (6-2.7 g, h) จะได้

$$m_{f2-3a}q_f = mc_v(T_{3a} - T_2) \qquad (6\text{-}3.16\ a)$$

$$m_{f3a-3b}q_f = mc_p(T_{3b} - T_{3a}) \qquad (6\text{-}3.16\ b)$$

และเมื่อรวมสมการ (6-3.16 a และ b) เข้าด้วยกันก็จะได้เป็น

$$m_f q_f = m[c_v(T_{3a} - T_2) + c_p(T_{3b} - T_{3a})] \qquad (6\text{-}3.16\ c)$$

แทนค่า W_C, W_E และ $m_f q_f$ ลงในสมการ (6-2.1) และ (6-2.2) จะได้

$$\eta_{tg} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{(T_{3a} - T_2) + k(T_{3b} - T_{3a})} \qquad (6\text{-}3.17)$$

ใช้ความสัมพันธ์ของกระบวนการไอเซนโทรปิกสำหรับสารทำงานตามกระบวนการ 1-2 และ 3b-4 และกำหนดให้

$$\lambda = \frac{p_3}{p_2} \quad \text{และ} \quad \rho = \frac{V_{3b}}{V_{3a}} \qquad (6\text{-}3.17\ a, b)$$

จะได้ประสิทธิภาพความร้อนรวมเป็น

$$\eta_{tg} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}\left[\frac{\lambda\rho^k - 1}{\lambda - 1 + \lambda k(\rho - 1)}\right] \qquad (6\text{-}3.18)$$

เมื่อแทนค่า $\rho = 1$ ในสมการ (6-3.18) ก็จะได้เป็นประสิทธิภาพของวัฏจักรปริมาตรคงที่ (สมการ (6-3.6)) และเมื่อแทนค่า $\lambda = 1$ ในสมการ (6-3.18) ก็จะได้เป็นประสิทธิภาพของวัฏจักรความดันคงที่

สำหรับความดันเฉลี่ยประสิทธิผลต่อ p_1 และ p_3 จะได้เป็น

$$\frac{p_m}{p_1} = \frac{q^*}{c_v T_1(k-1)}\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1}\right)\eta_{tg} \qquad (6\text{-}3.19)$$

$$\frac{p_m}{p_3} = \frac{1}{\lambda\varepsilon^k}\left(\frac{q^*}{c_v T_1}\right)\left(\frac{1}{k-1}\right)\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1}\right)\eta_{tg} \qquad (6\text{-}3.20)$$

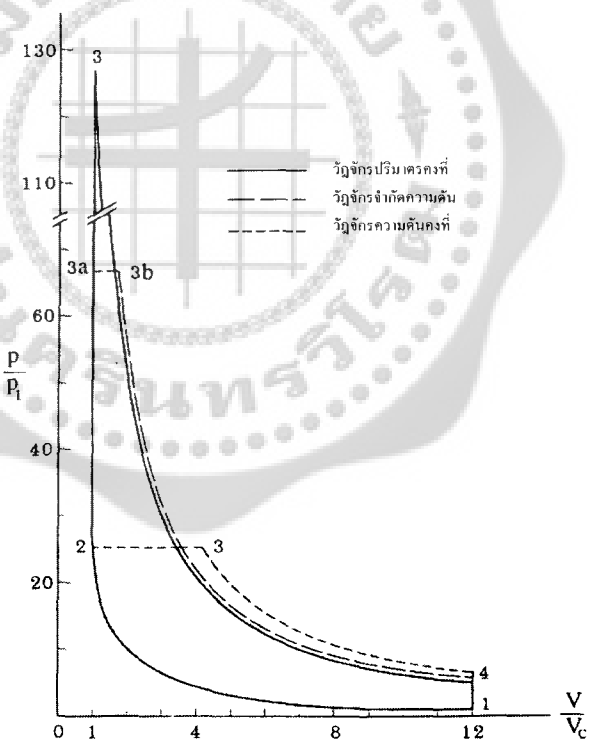
6-3.3 การเปรียบเทียบวัฏจักร

การวิเคราะห์วัฏจักรก๊าซมาตรฐานอุดมคติจะมีประโยชน์สูงสุดถ้าเลือกค่า k และค่า q^*/c_vT_1 ให้เข้ากับคุณสมบัติของสารทำงานจริง สำหรับค่า k = 1.3 จะเป็นค่าที่เหมาะสมของทั้งวัฏจักร ส่วน q* ตามสมการ (6-3.6) นั้นจะเขียนใหม่ได้เป็น

$$q^* = \left(\frac{m_f}{m_a}\right) q_f \left(\frac{m_a}{m}\right) \qquad (6\text{-}3.21)$$

ซึ่ง m_a/m สามารถประมาณให้เท่ากับ $(\varepsilon - 1)/\varepsilon$ (ให้อากาศเข้าไปเต็มปริมาตรแทนที่และก๊าซที่ตกค้างอยู่เต็มปริมาตรห้องเผาไหม้ที่ความหนาแน่นเท่ากัน)

สำหรับเชื้อเพลิงไอโซออกเทนและเป็นส่วนผสมที่ถูกต้องทางเคมี q* ก็จะเท่ากับ $2.92 \times 10^6 (\varepsilon - 1)/\varepsilon$ (หน่วยเป็น J/kg ของอากาศ) เมื่อ k = 1.3 และมวลโมเลกุลเฉลี่ย M = 29.3, c_v = 946 J/(kg K) ดังนั้นเมื่อใช้ค่า T_1 = 333 K, $q^*/(c_v T_1)$ ก็จะเท่ากับ $9.3(\varepsilon - 1)/\varepsilon$



รูปที่ 6-3.3 แผนภาพความดันกับปริมาตรของวัฏจักรก๊าซมาตรฐานที่มีการเผาไหม้แบบปริมาตรคงที่, แบบจำกัดความดัน และแบบความดันคงที่ เมื่อ ε = 12, k = 1.3,

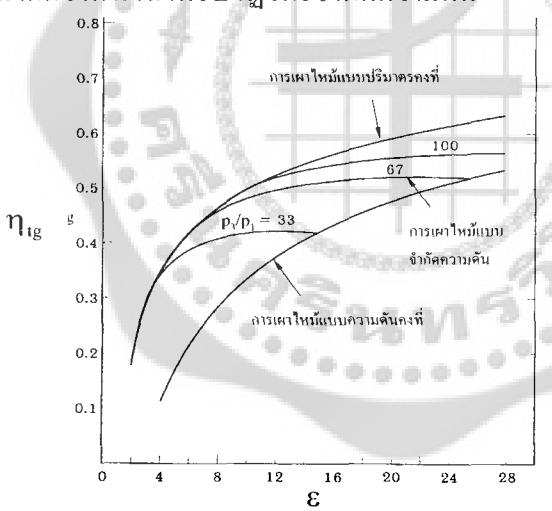
$$q^*/(c_vT_1) = 9.3(\varepsilon - 1)/\varepsilon = 8.525, \; p_{3a}/p_1 = 67$$

ตารางที่ 6-3.1 การเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการวิเคราะห์วัฏจักรก๊าซมาตรฐาน

วัฏจักร	η_t	$\frac{p_m}{p_1}$	$\frac{p_m}{p_3}$	$\frac{p_{max}}{p_1}$
ปริมาตรคงที่	0.525	16.3	0.128	128
จำกัดความดัน	0.500	15.5	0.231	67
ความดันคงที่	0.380	11.8	0.466	25.3

หมายเหตุ: $k = 1.3,\ \varepsilon = 12,\ q^*/(c_v T_1) = 8.525$

แผนภาพความดันกับปริมาตรของวัฏจักรอุดมคติหลักทั้ง 3 วัฏจักร เมื่อทุกวัฏจักรใช้ค่า $k = 1.3,\ \varepsilon = 12$ และ $q^*/(c_v T_1) = 9.3(\varepsilon - 1)/\varepsilon = 8.525$ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6-3.3 และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการกำหนดการทำงานของแต่ละวัฏจักรได้สรุปไว้ในตารางที่ 6-3.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าวัฏจักรปริมาตรคงที่จะมีประสิทธิภาพสูงสุดโดยวัฏจักรความดันคงที่จะมีประสิทธิภาพต่ำสุด โดยสามารถพิจารณาได้จากสมการ (6-3.18) ซึ่งเทอมในวงเล็บใหญ่จะมีค่าเท่ากับหนึ่งสำหรับวัฏจักรปริมาตรคงที่ และจะมีค่ามากกว่าหนึ่งสำหรับวัฏจักรจำกัดความดัน



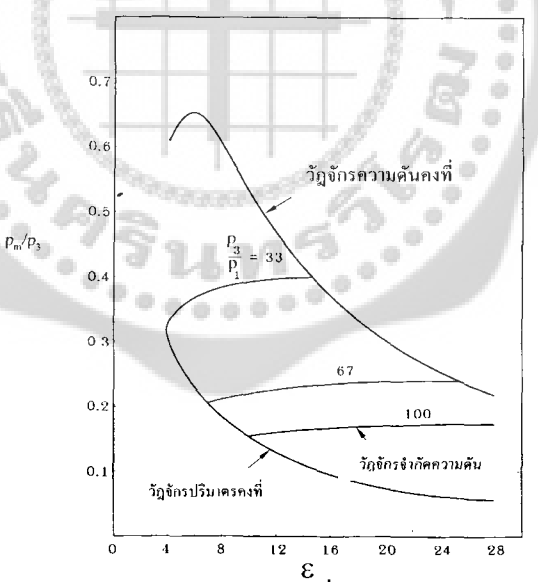
รูปที่ 6-3.4 ประสิทธิภาพความร้อนรวม (η_{tg}) เทียบกับอัตราส่วนการอัดของวัฏจักรก๊าซมาตรฐานแบบปริมาตรคงที่, แบบจำกัดความดัน, และแบบความดันคงที่ เมื่อ $k = 1.3,\ q^*/(c_v T_1) = 9.3(\varepsilon - 1)/\varepsilon$ สำหรับวัฏจักรแบบจำกัดความดันอัตราส่วน $p_3/p_1 =$ 33, 67, และ 100

ในวัฏจักรความดันคงที่ ค่าความดันเฉลี่ยประสิทธิผลจะแปรผันโดยตรงกับ η_{tg} เนื่องจากมวลของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ต่อหนึ่งวัฏจักรเท่ากันทั้ง 3 วัฏจักร

เมื่อความดันสูงสุด p_3 ลดลง อัตราส่วน p_m/p_3 จะเพิ่มขึ้น อัตราส่วนนี้มีความสำคัญเนื่องจากความดันเฉลี่ยประสิทธิผลเป็นการวัดความดันที่ใช้ประโยชน์ได้ที่กระทำต่อหัวลูกสูบ และโดยทั่วไปแล้วความดันสูงสุดจะมีผลต่อการกำหนดความแข็งแรงทางโครงสร้างของเครื่องยนต์

รูปที่ 6-3.3 แสดงประสิทธิภาพความร้อนรวม (η_{tg}) เทียบกับอัตราส่วนการอัดของวัฏจักรก๊าซมาตรฐานทั้ง 3 แบบ ส่วนรูปที่ 6-3.4 นั้นแสดงความดันเฉลี่ยประสิทธิผล (p_m) ต่อความดันสูงสุดของวัฏจักร (p_3) เทียบกับอัตราส่วนการอัดของทั้ง 3 วัฏจักรเช่นกัน โดยใช้ค่า $k = 1.3$ และ $q^*/(c_vT_1) = 9.3(\varepsilon - 1)/\varepsilon$ ทุกวัฏจักร ซึ่งจะเห็นว่าที่ค่า ε ค่าหนึ่งวัฏจักรปริมาตรคงที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและมี p_m/p_3 ต่ำสุด และที่ค่าความดันสูงสุด p_3 ค่าหนึ่งวัฏจักรความดันคงที่มีประสิทธิภาพสูงสุด (และอัตราส่วนการอัดสูงสุด)

สำหรับวัฏจักรจำกัดความดันที่ ค่า p_3/p_1 นั้นค่อนข้างจะคงที่ ประสิทธิภาพและความดันเฉลี่ยประสิทธิผลจะเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยเมื่อ ε มีค่าสูงกว่า 9 (โดยประมาณ)



รูปที่ 6-3.5 อัตราส่วนระหว่างความดันเฉลี่ยประสิทธิผลกับความดันสูงสุดของวัฏจักร เทียบกับอัตราส่วนการอัดของวัฏจักรก๊าซมาตรฐานแบบปริมาตรคงที่, แบบจำกัดความดัน, และแบบความดันคงที่ซึ่งมีรายละเอียดเช่นเดียวกับรูปที่ 6-3.4

6-4 ตัวอย่างการวิเคราะห์วัฏจักรก๊าซมาตรฐาน

ตัวอย่าง 6-4.1 การทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลจำนวนมากสามารถประมาณได้ด้วยวัฏจักรจำกัดความดัน ในวัฏจักรจำกัดความดันวัฏจักรหนึ่งซึ่งเชื้อเพลิงส่วนหนึ่งจะถูกเผาไหม้ที่ปริมาตรคงที่และส่วนที่เหลือจะถูกเผาไหม้ที่ความดันคงที่ ให้ใช้วัฏจักรนี้และกำหนดให้สารทำงานเป็นก๊าซอุดมคติเดี่ยวที่มี $k = c_p/c_v = 1.3$ ในการวิเคราะห์ปัญหา และมีข้อมูลที่กำหนดให้ดังต่อไปนี้

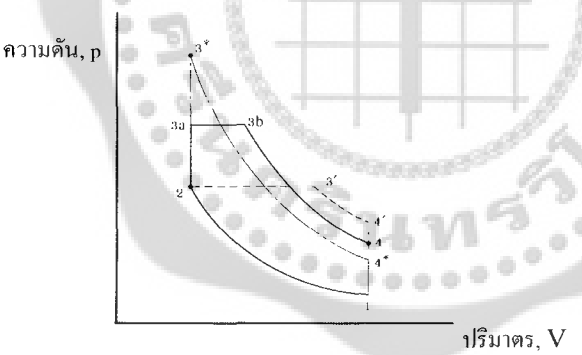
สถานะการดูดเข้า $p_1 = 1.0$ bar, $T_1 = 289$ K

อัตราส่วนการอัด 15 : 1

ความร้อนที่ป้อนให้ในช่วงการเผาไหม้ 43 000 kJ/kg ของเชื้อเพลิง

อัตราส่วนเชื้อเพลิง/อากาศโดยรวม 0.045 kg เชื้อเพลิง/kg ของอากาศ

จงเขียนแผนภาพความดันกับปริมาตร และคำนวณหาประสิทธิภาพความร้อนของวัฏจักรและความดันสูงสุดของวัฏจักรที่จะได้ เมื่อ (1) ถ้ากำหนดให้ครึ่งหนึ่งของเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้ที่ปริมาตรคงที่ และอีกครึ่งหนึ่งเผาไหม้ที่ความดันคงที่, (2) ถ้าเป็นกรณีที่เชื้อเพลิงทั้งหมดถูกเผาไหม้โดยปริมาตรคงที่, และ (3) เมื่อเป็นกรณีที่เชื้อเพลิงทั้งหมดถูกเผาไหม้โดยความดันคงที่



รูปที่ 6-4.1

วิธีทำ (1) สิ่งที่กำหนดให้คือ $p_1 = 1$ bar, $T_1 = 289$ K และ $r_c = 15$

ถ้าสมมติให้มวลโมเลกุลเฉลี่ยของสารทำงาน = 29 จะได้

$$R = 8314/29 = 287 \text{ J/(kg K)}$$

$$c_v = R(k - 1) = 957 \text{ J/(kg K)}$$

$$c_p = kc_v = 1244 \text{ J/(kg K)}$$

จากวัฏจักรจำกัดความดัน (1-2-3a-3b-4), ในกระบวนการอัด (1-2):

$$p_2 = p_1\varepsilon^k = 1\times 15^{1.3} = 33.8 \text{ bar}$$

$$T_2 = T_1\varepsilon^{k-1} = 289\times 15^{0.3} = 651 \text{ K}$$

ความร้อนที่ป้อนให้ในระหว่างการเผาไหม้

q* = (43000 kJ/kg)(0.045 kg เชื้อเพลิง/kg อากาศ)/(1+0.045 kg ของสารทำงาน)

= 1852 kJ/kg ของสารทำงาน

ซึ่งความร้อนที่เพิ่มให้ที่ปริมาตรคงที่และความร้อนที่เพิ่มให้ที่ความดันคงที่

$$q_{2-3a} = q_{3a-3b} = 1852/2 = 926 \text{ kJ/kg ของสารทำงาน}$$

ในกระบวนการเผาไหม้แบบปริมาตรคงที่ (2 - 3a):

$$q_{2-3a} = c_v(T_{3a} - T_2)$$

$$926\times 10^3 = 957(T_{3a} - 651)$$

จะได้ $T_{3a} = 1618$ K

และ $$\lambda = \frac{p_{3a}}{p_2} = \frac{T_{3a}}{T_2} = \frac{1618}{651} = 2.49$$

ดังนั้น $p_{3a} = 33.8\times 2.49 = 84$ bar **ตอบ**

ในกระบวนการเผาไหม้แบบความดันคงที่ (3a - 3b):

$$q_{3a-3b} = c_p(T_{3b} - T_{3a})$$

$$926\times 10^3 = 1244(T_{3b} - 1618)$$

จะได้ $T_{3b} = 2362$ K

และ $$\rho = \frac{V_{3b}}{V_{3a}} = \frac{T_{3b}}{T_{3a}} = \frac{2362}{1618} = 1.46$$

จากสมการ (6-3.18)

$$\eta_{tg} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}\left[\frac{\lambda\rho^k - 1}{k\lambda(\rho-1)+\lambda-1}\right]$$

$$= 1 - \frac{1}{15^{0.3}}\left[\frac{2.49\times 1.46^{1.3} - 1}{(2.49\times 1.3\times 0.46)+2.49-1}\right] = 0.542$$ **ตอบ**

(2) ถ้าเชื้อเพลิงทั้งหมดถูกเผาไหม้ที่ปริมาตรคงที่ก็จะเป็นวัฏจักรปริมาตรคงที่ (1-2-3*-4*) จากกระบวนการเผาไหม้แบบปริมาตรคงที่ (2-3*) จะได้

$$q_{2-3*} = c_v(T_{3*} - T_2)$$

$$1852\times 10^3 = 957(T_{3*} - 651)$$

$$T_{3*} = 2586 \text{ K}$$

และ $$\frac{p_{3*}}{p_2} = \frac{T_{3*}}{T_2}$$

$$p_{3^*} = \frac{33.8 \times 2586}{651} = 134 \text{ bar}$$ **ตอบ**

จากสมการ (6-3.5) จะได้

$$\eta_{tg} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} = 1 - \frac{1}{15^{0.3}} = 0.56$$ **ตอบ**

(3) ถ้าเชื้อเพลิงทั้งหมดถูกเผาไหม้ที่ความดันคงที่ก็จะเป็นวัฏจักรความดันคงที่ (1-2-3′-4′) จากกระบวนการเผาไหม้แบบความดันคงที่ (2-3′) จะได้

$$q_{2-3'} = c_p(T_{3'} - T_2)$$

$$1852 \times 10^3 = 1 \times 1244(T_{3'} - 651)$$

$$T_{3'} = 2140 \text{ K}$$

$\lambda = 1$ และ $\rho = \frac{V_{3'}}{V_2} = \frac{T_{3'}}{T_2} = \frac{2140}{651} = 3.29$

จากสมการ (6-3.18) จะได้

$$\eta_{tg} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}\left[\frac{\lambda\rho^k - 1}{k\lambda(\rho - 1) + \lambda - 1}\right] = 1 - \frac{1}{15^{0.3}}\left[\frac{3.29^{1.3} - 1}{1.3 \times (3.29 - 1)}\right]$$

$= 0.45$ **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 6-4.2 การเพิ่มสมรรถนะของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟสามารถทำได้โดย (1) เพิ่มอัตราส่วนการอัดจาก 8 เป็น 10 หรือ (2) เพิ่มความดันที่เข้าจาก 1.0 atm เป็น 1.5 atm ถ้ากำหนดให้ใช้วัฏจักรปริมาตรคงที่เป็นแบบจำลองสำหรับการทำงานของเครื่องยนต์ดังกล่าวและหาว่าวิธีใดจะทำให้ได้ (1) ความดันของวัฏจักรสูงที่สุด, (2) ประสิทธิภาพสูงที่สุด, และ (3) ความดันเฉลี่ยประสิทธิผลสูงที่สุด โดยสมมติให้ k = 1.3 และ $\frac{m_f q_f}{mc_v T_1} = \frac{9.3(\varepsilon - 1)}{\varepsilon}$

วิธีทำ (1) จากสมการ (6-3.8) และใช้ความสัมพันธ์

$$q^* = \frac{m_f q_f}{m} = \frac{9.3(\varepsilon - 1)}{\varepsilon}$$

จะได้ $p_3 = p_1\varepsilon^k + 9.3(\varepsilon - 1)p_1$

เครื่องยนต์เดิม: $\varepsilon = 8$, $p_i = 1$ atm,

$$p_3 = 14.9 + 9.3(8 - 1) \times 1.0 = 80 \text{ atm}$$

การเพิ่มสมรรถนะตามวิธี (1): $\varepsilon = 10$, $p_i = 1$ atm,

$$p_3' = 20 + 9.3(10 - 1) \times 1.0 = 103.7 \text{ atm}$$

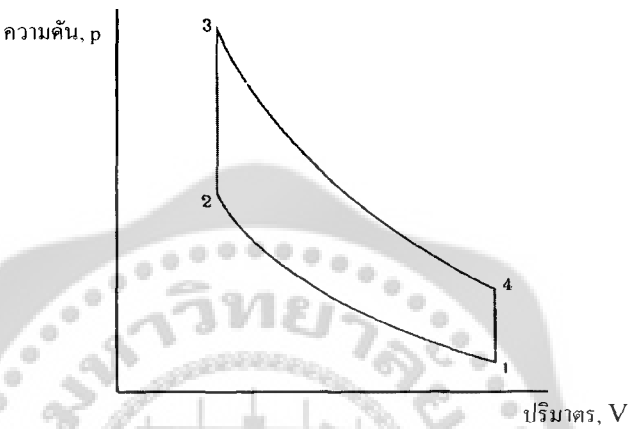
การเพิ่มสมรรถนะตามวิธี (2): $\varepsilon = 8$, $p_i = 1.5$ atm,

$$p_3'' = 22.4 + 9.3(8 - 1) \times 1.5 = 120.1 \text{ atm}$$

การเพิ่มสมรรถนะตามวิธี (3): $\varepsilon = 10$, $p_i = 1.5$ atm,

$$p_3''' = 29.9 + 9.3(10 - 1) \times 1.5 = 155.5 \text{ atm}$$

เพราะฉะนั้น การปรับปรุงตามวิธี (3) ให้ความดันของวัฏจักรสูงที่สุด **ตอบ**



รูปที่ 6-4.1

(2) จากสมการ (6-3.5) $\eta_{tg} = 1 - \dfrac{1}{\varepsilon^{k-1}}$

เครื่องยนต์เดิม: $\varepsilon = 8$, $p_i = 1$ atm, $\eta_{tg} = 1 - \dfrac{1}{8^{0.3}} = 0.464$

การเพิ่มสมรรถนะตามวิธี (1): $\varepsilon = 10$, $p_i = 1$ atm, $\eta_{tg}' = 1 - \dfrac{1}{10^{0.3}} = 0.499$

การเพิ่มสมรรถนะตามวิธี (2): $\varepsilon = 8$, $p_i = 1.5$ atm, $\eta_{tg}'' = 1 - \dfrac{1}{8^{0.3}} = 0.464$

การเพิ่มสมรรถนะตามวิธี (3): $\varepsilon = 10$, $p_i = 1.5$ atm, $\eta_{tg}''' = 1 - \dfrac{1}{10^{0.3}} = 0.499$

เพราะฉะนั้น การปรับปรุงตามวิธี (1) และ (3) ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด **ตอบ**

(3) จาก $$p_m = \frac{W_{cyc}}{V_1 - V_2} = \frac{\eta_{tg} Q_{2-3}}{V_1(1 - \frac{V_2}{V_1})} = \frac{\eta_{tg} Q_{2-3}}{\frac{mRT_1}{p_1}(1 - \frac{1}{\varepsilon})}$$

เนื่องจาก $R = c_v(k - 1)$ จะได้

$$p_m = \frac{\eta_{tg}}{1 - (1/\varepsilon)} \cdot \frac{p_1}{(k-1)} \cdot \frac{Q_{2-3}}{mc_v T_1} = \frac{\varepsilon \eta_{tg}}{\varepsilon - 1} \frac{p_1}{(k-1)} 9.3 \frac{(\varepsilon - 1)}{\varepsilon}$$

เพราะฉะนั้น $p_m = 9.3\eta_{tg}\frac{p_1}{k-1}$

เครื่องยนต์เดิม: $\varepsilon = 8$, $p_1 = 1.0$ atm

$$p_m = \frac{9.3\times 0.464\times 1.0}{(1.3-1)} = 14.4 \text{ atm}$$

การเพิ่มสมรรถนะตามวิธี (1): $\varepsilon = 10$, $p_1' = 1.0$ atm

$$p_m' = \frac{9.3\times 0.499\times 1.0}{(1.3-1)} = 15.5 \text{ atm}$$

การเพิ่มสมรรถนะตามวิธี (2): $\varepsilon = 8$, $p_1'' = 1.5$ atm

$$p_m'' = \frac{9.3\times 0.464\times 1.5}{(1.3-1)} = 21.6 \text{ atm}$$

การเพิ่มสมรรถนะตามวิธี (3): $\varepsilon = 10$, $p_1''' = 1.5$ atm

$$p_m''' = \frac{9.3\times 0.499\times 1.5}{(1.3-1)} = 23.2 \text{ atm}$$

เพราะฉะนั้น การปรับปรุงตามวิธี (3) ให้ความดันเฉลี่ยประสิทธิผลสูงที่สุด **ตอบ**

ตัวอย่าง 6-4.3 กำหนดให้ k = 1.3 อัตราส่วนการอัด (ε) = 6 และส่วนผสมไอดีมีความถูกต้องทางเคมี มีอุณหภูมิดูดเข้า 300 K จงหาเศษส่วนโดยมวลของก๊าซที่ตกค้างอยู่ในกระบอกสูบ, อุณหภูมิของก๊าซที่ตกค้าง, และอุณหภูมิของส่วนผสมที่สถานะ 1 ในวัฏจักรแบบปริมาตรคงที่ เมื่อ $p_{ex}/p_i = 1$ (เป็นการทำงานเมื่อไม่เปิดลิ้นเร่ง) และ $p_{ex}/p_i = 2$ (เป็นการทำงานเมื่อเปิดลิ้นเร่ง)

วิธีทำ จากสมการ (6-3.6)

$$q^* = \frac{m_f q_f}{m} = \left(\frac{m_f}{m_i}\right)\left(\frac{m_i}{m}\right)q_f = \left(\frac{m_f}{m_a+m_f}\right)\left(\frac{m-m_r}{m}\right)q_f$$

$$= \left(\frac{1}{A/F+1}\right)(1-f)q_f$$

สำหรับส่วนผสมพอดีสำหรับการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ และเชื้อเพลิงเป็นไอโซออกเทน จะได้

$$q^* = \frac{44.38}{15.14+1}(1-f) = 2.75(1\text{-}f) \text{ MJ/kg}$$

เมื่อ 15.14 คือส่วนผสมอากาศกับเชื้อเพลิงที่ถูกต้องทางเคมี, เมื่อ k = 1.3, c_v = 946 J/kg K จะได้

$$\frac{q^*}{c_v T_1} = \frac{2.75\times 10^6}{946 T_1}(1-f) = \frac{2910}{T_1}(1-f) \qquad (1)$$

จากสมการ (6-3.10), (6-3.11) และ (6-3.13) เมื่อ $\varepsilon = 6$ และ $k = 1.3$ จะได้

$$f = \frac{1}{6}\frac{(p_{ex}/p_1)^{0.769}}{\left[1+\dfrac{q^*}{c_v T_1 \times 6^{0.3}}\right]^{0.769}} \tag{2}$$

$$\frac{T_6}{T_1} = \left(\frac{p_{ex}}{p_i}\right)^{0.23}\left(1+\frac{q^*}{c_v T_1 \times 6^{0.3}}\right)^{0\,769} \tag{3}$$

$$\frac{T_1}{300} = \frac{1-f}{1-\left(\dfrac{1}{1.3\times 6}\right)\left(\dfrac{p_{ex}}{p_i}+0.3\right)} \tag{4}$$

ใช้วิธีทดลองแทนค่าในสมการ (1) ถึง (4) โดยเริ่มจากการประมาณค่า f หา T_1 จากสมการ (4) แล้วหา $q^*/(c_v T_1)$ จากสมการ (1) แล้วตรวจสอบค่า f ที่สมมติกับค่าที่ได้จากสมการ (2)

สำหรับ $\frac{p_{ex}}{p_i} = 1$ จะได้ $f = 0.044$, $T_1 = 344$ K, $\frac{q^*}{c_v T_1} = 8.1$, $T_r = 1316$ K **ตอบ**

สำหรับ $\frac{p_{ex}}{p_i} = 2$ จะได้ $f = 0.082$, $T_1 = 391$ K, $\frac{q^*}{c_v T_1} = 6.8$, $T_r = 1580$ K **ตอบ**

แบบฝึกหัด

1. เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟถูกเร่งเครื่องเพื่อรับภาระเพียงบางส่วน (ลิ้นเร่งเปิดเพียงบางส่วน ซึ่งความดันในการดูดจะลดลงต่ำกว่าการทำงานที่ไม่เปิดลิ้นเร่ง) ในขณะที่อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศถูกรักษาไว้ให้คงที่ โดยการทำงานรับภาระบางส่วนของเครื่องยนต์สามารถใช้แบบจำลองตามวัฏจักรที่แสดงในรูปที่ 6-2.1 (4) ถ้าอากาศเข้าที่ความดัน p_1, ความดันของการคายเท่ากับความดันบรรยากาศ p_{atm} และอุณหภูมิโดยรอบเป็น T_{atm} จงหาประสิทธิภาพความร้อนสุทธิเนื่องจากการเปิดลิ้นเร่งซึ่งจะลดน้อยลงจากประสิทธิภาพของวัฏจักรก๊าซมาตรฐานปริมาตรคงที่ที่ไม่เปิดลิ้นเร่ง และจงแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพที่ลดลงนี้แปรผันโดยตรงกับ $(\frac{p_{atm}}{p_1}-1)$ โดยสมมติให้มวลของเชื้อเพลิงน้อยกว่ามวลของอากาศมาก

2. เมื่อใช้วัฏจักรก๊าซมาตรฐานที่มีการเผาไหม้แบบปริมาตรคงที่ตามรูปที่ 6-2.1 (1) เป็นแบบจำลองการทำงานของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟซึ่งมีอัตราส่วน

การอัดเป็น 9 เมื่อสมมติให้สถานะ 1 มีความดันเป็น 100 kPa และมีอุณหภูมิเป็น 320 K, $m_f/m = 0.06$, $c_v = 946$ J/(kg K), $k = 1.3$ และน้ำมันก๊าซโซลีนที่ใช้มีค่า $q_f = 44$ MJ/kg ภายใต้สภาวะการทำงานดังกล่าวจงหา (1) ความดันและอุณหภูมิที่สถานะ 2, 3, 4 และ 5, (2) ประสิทธิภาพความร้อน, และ (3) ความดันเฉลี่ยประสิทธิผล

3. จงวิเคราะห์วัฏจักรก๊าซมาตรฐานแบบจำกัดความดันโดยเขียนเป็นเส้นโค้งที่แสดงการแปรผันระหว่างประสิทธิภาพความร้อนกับอัตราส่วนความดัน p_3/p_1 สำหรับเครื่องยนต์ที่มีอัตราส่วนการอัดเป็น 15 ซึ่งใช้น้ำมันดีเซลหมุนเร็วเป็นเชื้อเพลิง โดยกำหนดให้ใช้ $m_f/m = 0.04$, $T_1 = 45$ °C, $k = 1.3$, และ $c_v = 946$ J/kg K

เอกสารอ้างอิง

Heywood JB (1988). **Internal Combustion Engine Fundamentals**, New York: McGraw-Hill, pp. 74, 161-180.

เอกสารที่แนะนำให้ศึกษาเพิ่มเติม

Heywood JB (1988). **Internal Combustion Engine Fundamentals**, New York: McGraw-Hill, Chapter 3 Thermochemistry of fuel-air mixtures, Chapter 4 Properties of working fluids and Chapter5 Ideal models of engine cycles.

บทที่ 7
การวิเคราะห์วัฏจักรเชื้อเพลิงกับอากาศ

7-1 บทนำ

วัฏจักรทางทฤษฎีที่มีกระบวนการต่างๆเกิดขึ้นใกล้เคียงกับกระบวนการของเครื่องยนต์จริงมากกว่าวัฏจักรอากาศมาตรฐานและสารทำงานเป็นส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศหรือผลิตผลจากการเผาไหม้ของส่วนผสมเชื้อเพลิงกับอากาศ เรียกว่า **วัฏจักรเชื้อเพลิงกับอากาศ** การวิเคราะห์วัฏจักรในบทนี้เป็นการวิเคราะห์วัฏจักรจริงโดยวิธีประมาณอย่างหยาบเท่านั้น

ในวัฏจักรนี้ สารทำงานในกระบวนการอัดเป็นส่วนผสมระหว่างอากาศกับผลิตผลจากการเผาไหม้ที่ตกค้างจากวัฏจักรที่แล้ว (เชื้อเพลิงถูกดูดเข้ามาตรงจุดสิ้นสุดของกระบวนการอัด) ความร้อนไม่ได้ถูกจ่ายให้แก่สารทำงานจากภายนอก แต่ความร้อนเกิดในสารทำงานเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่าการเผาไหม้ ซึ่งจะเกิดขึ้นตรงจุดสิ้นสุดของจังหวะอัด สารทำงานในกระบวนการขยายตัวเป็นส่วนผสมของผลิตผลจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง

เนื่องจากการเผาไหม้เป็นกระบวนการที่ย้อนกลับไม่ได้ สารทำงานจึงไม่สามารถกลับสู่สถานะเดิมได้อีก ด้วยเหตุนั้น กระบวนการจะไม่เป็นวัฏจักรตามความหมายที่แท้จริงทางอุณหพลศาสตร์ อย่างไรก็ตาม กระบวนการในวัฏจักรเชื้อเพลิงกับอากาศและกระบวนการในเครื่องยนต์จริงถูกเรียกเป็นวัฏจักรเนื่องมาจากการที่มันประกอบด้วยกระบวนการต่างๆที่เกิดขึ้นซ้ำเป็นวัฏจักรนั่นเอง

กระบวนการในการเผาไหม้ของส่วนผสมไอดีมีธรรมชาติของผลกระทบต่อสารทำงานเหมือนกับการที่สารทำงานถูกทำให้ร้อนขึ้นเช่นในวัฏจักรอากาศมาตรฐาน เพราะฉะนั้นความร้อนที่ป้อนให้จึงมีค่าเท่ากับการจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง (เป็น kg) ต่อหนึ่งวัฏจักร คูณกับค่าความร้อนของเชื้อเพลิง q_f (เป็น kJ/kg) ประสิทธิภาพความร้อนจึงถูกนิยามให้เป็นอัตราส่วนของงานในหนึ่งวัฏจักรเชื้อเพลิงกับอากาศหารด้วยค่าความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงที่สิ้นเปลืองไปต่อหนึ่งวัฏจักร

สมมติฐานของการวิเคราะห์วัฏจักรเชื้อเพลิงกับอากาศ มีดังนี้

1) สารทำงานประกอบด้วยก๊าซจริงใกล้เคียงกับที่ใช้ในเครื่องยนต์

2) ไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างสารทำงานและสิ่งแวดล้อมในระหว่างกระบวนการอัด, กระบวนการเผาไหม้, และกระบวนการขยายตัว

3) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงด้านเคมีเกิดขึ้นในอากาศหรือเชื้อเพลิงก่อนที่จะเกิดการเผาไหม้

4) สารทำงานอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อนหลังจากเกิดการเผาไหม้

7-2 วัฏจักรเชื้อเพลิงกับอากาศแบบปริมาตรคงที่

วัฏจักรนี้แสดงถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์ที่ใช้คาร์บูเรเตอร์และเครื่องยนต์ก๊าซ การอัดของไอดีเกิดขึ้นอย่างย้อนกลับได้ และไม่มีการถ่ายเทความร้อน (เป็นไปอย่างไอเซนโทรปิก) จากปริมาตร v_1 จนถึง v_2 โดยอัตราส่วนการอัดเป็น ε การเผาไหม้เกิดขึ้นโดยปริมาตรคงที่อยู่ที่ v_2 และส่วนผสมเชื้อเพลิงกับอากาศจะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นผลผลิตจากการเผาไหม้ที่สภาวะสมดุลทางความร้อน สารทำงานถูกสมมติให้เป็นส่วนผสมของก๊าซจริง และดังนั้น **การแยกตัว** (Dissociation ดูรายละเอียดในบทที่ 8) จะเกิดขึ้นในผลผลิตจากการเผาไหม้จนกระทั่งเกิดสภาวะสมดุลทางความร้อนขึ้น

ค่าความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของสารทำงานจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิและส่วนประกอบ จึงมีผลทำให้อุณหภูมิและความดันเมื่อสิ้นสุดกระบวนการเผาไหม้ต่ำกว่าค่าที่เป็นในวัฏจักรอากาศมาตรฐานมาก (เมื่อให้ความร้อนแก่วัฏจักรในปริมาณที่เท่ากัน) กระบวนการขยายตัวแบบย้อนกลับได้ของผลผลิตจากการเผาไหม้ เริ่มต้นจากปริมาตร v_3 $(= v_2)$ ถึงปริมาตร v_4 $(= v_1)$ ต่อมาจากกระบวนการเผาไหม้ ในกระบวนการสุดท้าย ความร้อนจะถูกระบายออกจากผลิตผลจากการเผาไหม้โดยเกิดขึ้นที่ปริมาตร v_4

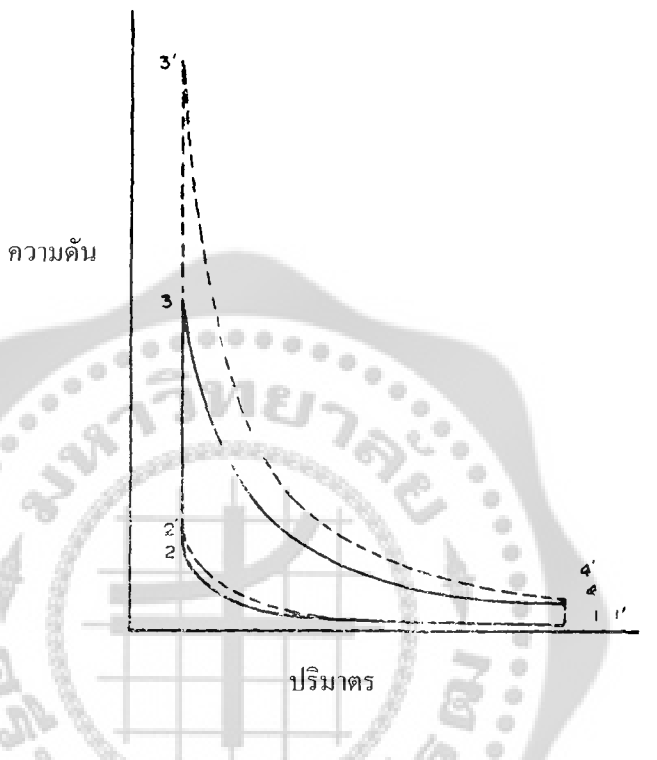
การวิเคราะห์โดยประมาณการของวัฏจักรสามารถทำได้โดยการหาค่าเฉลี่ยของเลขชี้กำลัง k_{comp} และ k_{exp} ของกระบวนการอัดและกระบวนการขยายตัวทางทฤษฎีโดยนำส่วนประกอบที่แท้จริงของสารทำงานเข้ามาพิจารณาด้วย ซึ่งผลที่ได้จากส่วนผสมเชื้อเพลิงกับอากาศที่ใช้โดยทั่วไปในเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนในขณะที่รับภาระเต็มพิกัดด้วยอัตราส่วนการอัดโดยทั่วไป (ε อยู่ระหว่าง 5 ถึง 9) คือ $k_{comp} = k_{exp} = 1.3$

อุณหภูมิ (ซึ่งหมายถึงความดันด้วย) ตรงจุดสิ้นสุดของกระบวนการเผาไหม้จะน้อยกว่าค่าที่ได้จากวัฏจักรอากาศมาตรฐาน เนื่องจากเหตุต่อไปนี้

(1) ค่าความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของสารทำงานจะสูงมากขึ้น

(2) เนื่องจากเกิดการแยกตัว ไฮโดรเจนทั้งหมดจึงจะไม่ถูกเผาไหม้กลายไปเป็นน้ำ และคาร์บอนทั้งหมดก็จะไม่ถูกเผาไหม้กลายไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์

(3) เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนโมเลกุลก่อนและหลังการเผาไหม้ จึงทำให้เกิดผลกระทบต่อความดันสุดท้ายของกระบวนการเผาไหม้



รูปที่ 7-2.1 แผนภาพความดันกับปริมาตรของวัฏจักรเชื้อเพลิงกับอากาศที่มีการเผาไหม้แบบปริมาตรคงที่ (1-2-3-4) เปรียบเทียบกับวัฏจักรอากาศมาตรฐานแบบที่มีการให้ความร้อนแบบปริมาตรคงที่ ($1'$-$2'$-$3'$-$4'$) ความร้อนที่ให้แก่วัฏจักรคือ $q_{in} = (1-f)(F/A)q_f$

ค่าความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของส่วนผสมเชื้อเพลิงอากาศ (ไอดี) และผลผลิตจากการเผาไหม้ (ไอเสีย) จะสามารถคำนวณได้จากสมการของค่าความร้อนจำเพาะซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของส่วนประกอบแต่ละอย่างที่อยู่ในส่วนผสมไอดีและใช้ปริมาณของส่วนประกอบที่แท้จริงของส่วนผสมไอดี

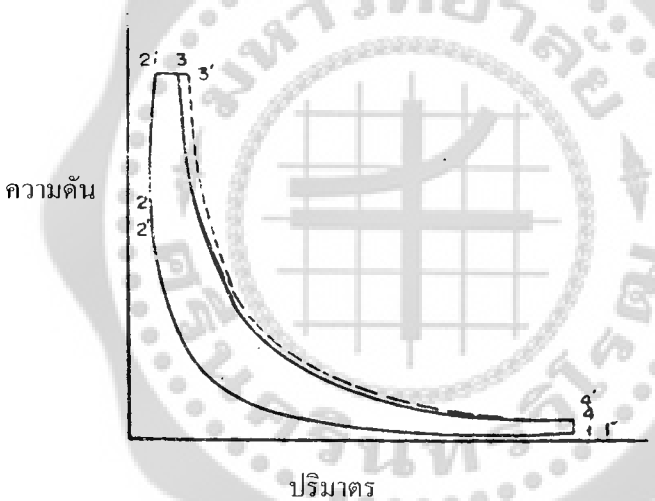
การวิเคราะห์หาผลกระทบจากการแยกตัวนั้นซับซ้อนมาก เพราะฉะนั้นในการคำนวณหาอุณหภูมิสุทธิที่เพิ่มขึ้นโดยคิดผลของการแยกตัวจึงใช้ตัวประกอบแก้ไข (Correction factor) โดยประมาณซึ่งมีพื้นฐานมาจากการคำนวณทางทฤษฎี เรียกว่าค่า**ตัวประกอบแก้ไขการแยกตัว** และแทนด้วย Z คือ

$$Z = \frac{T_3 - T_2}{T_3' - T_2'} \qquad (7\text{-}2.1)$$

โดย T_3-T_2 คืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเมื่อคิดการแยกตัว, และ $T_3' - T_2'$ คืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเมื่อไม่คิดการแยกตัว เมื่ออัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศและอัตราส่วนการอัดอยู่ในช่วงที่ใช้งานตามปกติทั่วไป

7-3 วัฏจักรเชื้อเพลิงกับอากาศแบบจำกัดความดัน

ตามปกติทั่วไปวัฏจักรนี้จะใช้แสดงกระบวนการต่างๆที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์ดีเซลแบบ Solid injection ความดันสูงสุดจะถูกจำกัดให้อยู่ที่ค่าความดันที่เหมาะสมสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลจริงจะทำได้โดยการจัดให้มีคุณลักษณะในการฉีดเชื้อเพลิงและจังหวะการฉีดที่ถูกต้อง เพื่อให้ได้ความดันสูงสุด จึงมีการให้ความร้อนส่วนหนึ่งที่ปริมาตรคงที่และส่วนที่เหลือจะให้ที่ความดันคงที่ (เป็นวัฏจักรผสมนั่นเอง)



รูปที่ 7-3.1 แผนภาพความดันกับปริมาตรของวัฏจักรเชื้อเพลิงกับอากาศที่มีการเผาไหม้แบบจำกัดความดัน (1-2-2i-3-4) เปรียบเทียบกับวัฏจักรอากาศมาตรฐานแบบที่มีการให้ความร้อนแบบผสม ($1'$-$2'$-2i-$3'$-$4'$) ความร้อนที่ให้แก่วัฏจักรคือ

$$q_{in} = (1 - f)(F / A)q_f$$

การอัดอากาศกับก๊าซไอเสียที่ตกค้างเริ่มต้นจากปริมาตร v_1 จนถึง v_2 (ดูรูปที่ 6-3.1) เชื้อเพลิงถูกฉีดตรงสถานะ 2 ด้วยความดันที่สูงกว่า p_2' มาก สมมติว่าการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเกิดขึ้นที่ปริมาตรคงที่จนกระทั่งความดันสูงถึง p_{2i} (ความดันที่ขีดจำกัดของวัฏจักร) จากนั้นก็จะเกิดขึ้นโดยความดันคงที่จนกระทั่งปริมาตรเป็น v_3 ผลิตผลจากการเผาไหม้ขยายตัวแบบไอเซนโทรปิคจากปริมาตร

v_3 จนถึง v_4 (= v_1) ในกระบวนการสุดท้าย ความร้อนจะระบายออกสู่บรรยากาศโดยปริมาตรคงที่จากสถานะ 4 สู่สถานะ 1

ในวัฏจักรเชื้อเพลิงกับอากาศแบบจำกัดความดันจะใช้ส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่เป็นส่วนผสมบาง และการให้ความร้อนส่วนหนึ่งเกิดขึ้นโดยความดันคงที่ เพราะฉะนั้นความดันสูงสุดของวัฏจักรจึงน้อยกว่าความดันสูงสุดของวัฏจักรอากาศมาตรฐานแบบปริมาตรคงที่มาก ผลของการแยกตัวเกิดขึ้นไม่มากนักจึงสามารถตัดทิ้งไปได้

วัฏจักรทางทฤษฎีสามารถคำนวณโดยประมาณการด้วยการหาค่าเฉลี่ยของ k_{comp} และ k_{exp} จากส่วนประกอบของส่วนผสม ในกรณีของเครื่องยนต์ดีเซลที่มีอัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศและอัตราส่วนการอัดอยู่ในช่วงที่ใช้กันตามปกติ สามารถใช้ค่า $k_{comp} = 1.36$, และ $k_{exp} = 1.3$ ค่าความร้อนจำเพาะของส่วนผสมระหว่างอากาศกับก๊าซไอเสียตกค้างจะสามารถหาได้โดยวิธีการเช่นเดียวกันกับของวัฏจักรปริมาตรคงที่ที่กล่าวมาแล้ว ผลของการแยกตัวไม่นำมาคิดในการวิเคราะห์วัฏจักรจำกัดความดัน

7-4 วิธีประมาณในการคำนวณวัฏจักรเชื้อเพลิงกับอากาศ

จุดประสงค์หลักของวิธีประมาณการนี้ก็เพื่อหาเศษส่วนโดยมวลของก๊าซที่ตกค้าง f และอุณหภูมิ T_1 ของส่วนผสมตรงสถานะเริ่มต้นของกระบวนการอัด เพื่อให้สามารถทำการวิเคราะห์วัฏจักรโดยประมาณต่อไปได้

7-4.1 วัฏจักรที่มีการเผาไหม้แบบปริมาตรคงที่

ขั้นตอนในการประมาณการสามารถทำได้ดังนี้

1) กำหนดค่าเฉลี่ยต่างๆของวัฏจักร

สมมติค่าเฉลี่ยต่างๆของวัฏจักรต่อไปนี้

(1) ความดันดูดเข้า p_1 และความดันไอเสีย p_{ex}

(2) อุณหภูมิบรรยากาศ T_{atm}

(3) ความดันของก๊าซตรงจุดเริ่มต้นของการระบายไอเสีย p_4

(4) อุณหภูมิของก๊าซตรงจุดเริ่มต้นของการระบายไอเสีย T_4

2) หาค่าเศษส่วนก๊าซตกค้าง

ถ้าอัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศเป็น F/A ดังนั้นสำหรับอากาศ 1 kg ก็จะเกิดผลิตผลจากการเผาไหม้เป็น (1+F/A) kg ผลิตผลจากการเผาไหม้จำนวน

(1+F/A) kg นี้อยู่ที่ p_4 และ T_4 เกิดกระบวนการระบายออกด้วยความดันที่สูงกว่าจากความดัน p_4 ไปสู่ p_{ex} โดยปริมาตรคงที่อยู่ที่ v_1 จากนั้นก๊าซอีกส่วนหนึ่งจะระบายออกจนกระทั่งปริมาตรเป็น v_2 น้ำหนักของก๊าซซึ่งเป็นผลิตผลจากการเผาไหม้ที่มีปริมาตร v_2 ความดัน p_{ex} และอุณหภูมิ T_4 จากผลิตผลจากการเผาไหม้จำนวน (1+F/A) kg นี้เรียกว่าเศษส่วนก๊าซตกค้าง (Residual gas fraction, f) ซึ่งจะหาได้จาก

$$f = (1 + F/A)\frac{p_{ex}}{p_4}\frac{v_2}{v_1} = (1 + F/A)\frac{p_{ex}}{\varepsilon p_4} \qquad (7\text{-}4.1)$$

3) หาองค์ประกอบของส่วนผสม

เมื่อก๊าซไอเสียที่ตกค้างผสมกับส่วนผสมไอดีที่เข้ามาใหม่ องค์ประกอบของส่วนผสมจะประกอบด้วย f kg ของก๊าซไอเสียที่ตกค้าง, (1-f) kg ของอากาศ, และ (1-f) F kg ของเชื้อเพลิง

4) หาอุณหภูมิของส่วนผสม

อุณหภูมิของส่วนผสมจะหาได้โดยการให้ผลรวมของเอนทัลปีของส่วนประกอบเท่ากับเอนทัลปีของส่วนผสม

ขั้นตอนการประมาณประกอบตัวเลข เป็นดังต่อไปนี้

1) สำหรับวัฏจักรเชื้อเพลิงอากาศแบบปริมาตรคงที่ใช้เชื้อเพลิงเป็นน้ำมันก๊าซโซลีน (C_8H_{17}) โดยมีอัตราส่วนเชื้อเพลิงอากาศเป็น 0.0785 จะมีค่าของความดันและอุณหภูมิดังต่อไปนี้

p_1 = 0.961 bar (0.98 ksc)

p_{ex} = 1.079 bar (1.1 ksc)

T_{atm} = 323 K (50^{O}C)

p_4 = 4.413 bar (4.5 ksc)

T_4 = 1600 K

2) สำหรับอัตราส่วนการอัด 7:1 จะได้

$$f = (1 + 0.0785)\frac{1.079 \text{ bar}}{(7)(4.413 \text{ bar})} = 0.03767$$

3) องค์ประกอบของส่วนผสมไอดีที่สถานะ 1 คือ

ก๊าซไอเสียตกค้าง = 0.03767 kg

อากาศ = (1-0.03767) = 0.96233 kg

เชื้อเพลิง = (0.96233 kg) (0.0785) = 0.07554 kg

น้ำหนักทั้งหมดของส่วนผสมไอดี = 0.03767+0.96233+0.07554

= 1.07554 kg

4) สมมติให้ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ c_p ของไอเสียตกค้างและอากาศเป็น 1.005 kJ/kg K, ของน้ำมันก๊าซโซลีนเป็น 2.094 kJ/kg K, ของไอก๊าซโซลีนเป็น 1.675 kJ/kg K, และ ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของก๊าซโซลีนที่ 25^{O}C เป็น 347.5 kJ/kg ดังนั้น เอนทัลปีของไอก๊าซโซลีน 1 kg ที่ 323 K คือ

h = (1 kg)(2.094 kJ/kg K)(298-273 K)

+ (1 kg)(1.675 kJ/kg K)(323-298 K) - (1 kg)(347.5 kJ/kg)

= 52.35+41.875-347.5 = -343.275 kJ/kg

เนื่องจากเอนทัลปีของส่วนผสมมีค่าเท่ากับผลรวมของเอนทัลปีขององค์ประกอบ คือ

(1.07554 kg)(1.005 kJ/kg K)(T_1 -273 K)

= (0.96233 kg)(1.005 kJ/kg K)(323-273 K)

+(0.03767 kg)(1.005 kJ/kg K)(1600-273 K)

+ (0.07554 kg)(-343.275 kJ/kg)

(1.0809 kJ/K)(T_1 -273 K) = 48.357 kJ + 50.238 kJ -25.931 kJ

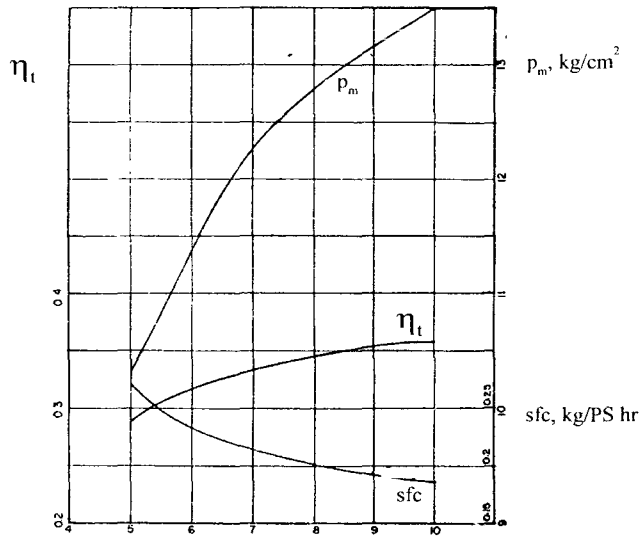
= 72.664 kJ

(T_1 -273 K) = (72.664 kJ)/(1.0809 kJ/K)

หรือ T_1 = 273 + (72.664 kJ)/(1.0809 kJ/K) = 340 K (67^{O}C)

จะสามารถตรวจสอบค่าของ f และ T_1 ได้จากค่าที่คำนวณได้จากการวิเคราะห์วัฏจักร ซึ่งจะดูได้จากตัวอย่างการวิเคราะห์วัฏจักรเชื้อเพลิงกับอากาศและวิธีการคำนวณหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสำหรับวัฏจักรปริมาตรคงที่ (และวัฏจักรจำกัดความดันด้วย) จะดูจากตัวอย่างการวิเคราะห์วัฏจักรเชื้อเพลิงกับอากาศได้ด้วยเช่นกัน

ประสิทธิภาพความร้อน, ความดันเฉลี่ยประสิทธิผล, และความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะสำหรับค่าอัตราส่วนการอัดและอัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศต่างๆ ก็จะสามารถคำนวณหาได้ในลำดับต่อมา เส้นโค้งที่แสดงการแปรผันของประสิทธิภาพความร้อน, ความดันเฉลี่ยประสิทธิผล, และความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะสำหรับวัฏจักรเชื้อเพลิงกับอากาศที่เผาไหม้แบบปริมาตรคงที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 7-4.1



รูปที่ 7-4.1 การแปรผันของประสิทธิภาพความร้อน, ความดันเฉลี่ยประสิทธิผล, และความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเทียบกับอัตราส่วนการอัด สำหรับวัฏจักรเชื้อเพลิงกับอากาศแบบปริมาตรคงที่ โดย p_1 = 0.98 ksc (0.961 bar), p_{cx} = 1.1 ksc (1.079 bar), T_{atm} = 323 K, F/A = 0.0785, เชื้อเพลิงเป็น C_8H_{17}

7-4.2 วัฏจักรที่มีการเผาไหม้แบบจำกัดความดัน

สามารถคำนวณหาค่าของ f และ T_1 ได้ด้วยวิธีเดียวกันกับวัฏจักรปริมาตรคงที่ แต่การคำนวณหาค่า T_1 ไม่จำเป็นต้องใช้เอนทัลปีของเชื้อเพลิง เพราะว่าในกระบวนการอัดมีเฉพาะอากาศกับไอเสียตกค้างเท่านั้น

สำหรับวัฏจักรเชื้อเพลิงอากาศแบบจำกัดความดันใช้เชื้อเพลิงเป็นน้ำมันดีเซล ($C_{12}H_{26}$) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์อากาศเป็น 1.30 จะสามารถสมมติค่าของความดันและอุณหภูมิได้ดังต่อไปนี้

p_1 = 0.9806 bar (1.0 ksc)

p_{cx} = 1.03 bar (1.05 ksc)

T_{atm} = 323 K (50^{O}C)

P_4 = 4.413 bar (4.5 ksc)

T_4 = 1200 K

7-5 ตัวอย่างการวิเคราะห์วัฏจักรเชื้อเพลิงกับอากาศ

ตัวอย่างที่ 7-5.1 ในวัฏจักรเชื้อเพลิงอากาศที่เผาไหม้แบบปริมาตรคงที่ด้วยอัตราส่วนการอัด ε = 9 ส่วนผสมมีอัตราส่วนเชื้อเพลิงอากาศเท่ากับ 0.0785 เชื้อเพลิงที่ใช้คือ C_8H_{17} ซึ่งมีค่าความร้อนค่าต่ำแท่เท่ากับ 44 MJ/kg ในการคำนวณ

ขั้นต้นสมมติให้ความดันและอุณหภูมิของส่วนผสมในขณะเริ่มต้นการอัดเป็น 0.961 bar และ 328 K โดย Z = 0.90 จงคำนวณหาประสิทธิภาพความร้อน, ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ, และความดันเฉลี่ยประสิทธิผลของวัฏจักร

วิธีทำ การเผาไหม้ของ C_8H_{17} ด้วยอัตราส่วนเชื้อเพลิงอากาศเท่ากับ 0.0785 จะได้

$$\frac{\text{kmole of } O_2}{\text{kmole of fuel}} = \frac{M_f}{(4.31\times 32)(F/A)} = \frac{113}{(4.31\times 32)0.0785} = 10.44$$

$$\alpha = \frac{(12x+y)}{32\times 4.31(x+\frac{y}{4})F/A} = \frac{(12\times 8+17)}{32\times 4.31(8+\frac{17}{4})0.0785} = 0.852$$

ดังนั้นจึงเป็นเป็นส่วนผสมหนา ซึ่งสมการปฏิกิริยาคือ

$$C_xH_y+\alpha(x+\frac{y}{4})O_2+3.773\,\alpha(x+\frac{y}{4})N_2$$

$$= (1-\phi)xCO_2+\phi\,xCO+\frac{\phi x}{2}H_2+(\frac{y}{2}-\frac{\phi x}{2})H_2O+3.773\,\alpha(x+\frac{y}{4})N_2$$

$$C_8H_{17}+10.44O_2+3.773(10.44)N_2$$

$$= (1-\phi)(8)CO_2+\phi\,(8)CO+\frac{8\phi}{2}H_2+(\frac{17}{2}-\frac{8\phi}{2})H_2O+3.773(10.44)N_2$$

$$C_8H_{17}+10.44O_2+39.39N_2$$

$$= (1-\phi)(8)CO_2+\phi\,(8)CO+\frac{8\phi}{2}H_2+(\frac{17}{2}-\frac{8\phi}{2})H_2O+39.39N_2$$

โดยการสมดุลออกซิเจน จะได้

$$10.44 = 8(1-\phi)+4\phi\quad 4.25-2\phi = 12.25-6\phi$$

หรือ $\phi = (12.25-10.44)/6 = 0.3017$

ดังนั้น สมการปฏิกิริยาขั้นสุดท้ายคือ

$$C_8H_{17}+10.44O_2+39.39N_2 = (1-0.3017)(8)CO_2+(0.3017)(8)CO$$
$$+\frac{8\times 0.3017}{2}H_2+(\frac{17}{2}-\frac{8\times 0.3017}{2})H_2O+39.39N_2$$

หรือ $C_8H_{17}+10.44O_2+39.39N_2$

$$= 5.5864CO_2+2.4136CO+1.2068H_2+7.2932H_2O+39.39N_2$$

จำนวนโมเลกุล (หรือโมล) ของส่วนผสมและผลิตผลจากการเผาไหม้คือ

$L_{mix} = 1+10.44+39.39 = 50.83$ โมเลกุล

$L_{prod} = 5.5864+2.4136+1.2068+7.2932+39.39 = 55.89$ โมเลกุล

ส่วนประกอบโดยปริมาตรของผลิตผลจากการเผาไหม้คือ

CO_2 $= (5.5864)/(55.89) = 0.09995$

CO $= (2.4136)/(55.89) = 0.04319$

H_2 $= (1.2068)/(55.89) = 0.02159$

H_2O = (7.2932)/(55.89) = 0.13049

N_2 = (39.39)/(55.89) = 0.70478

ค่าคงที่ของก๊าซสำหรับผลิตผลจากการเผาไหม้คือ

$$R_{prod} = \frac{8314 \text{ J/kmole K}}{0.09995\times 44 + 0.04319\times 28 + 0.02159\times 2 + 0.13049\times 18 + 0.70478\times 28}$$

$$= \frac{8314}{27.73} = 300 \text{ J/kg K}$$

มวลโมเลกุลของผลิตผลจากการเผาไหม้คือ M_{prod} = 27.73 kg/kmole

ส่วนประกอบโดยมวลของผลิตผลจากการเผาไหม้คือ

CO_2: = (44/27.73)(0.09995) = 0.1586

CO: = (28/27.73)(0.04319) = 0.04361

H_2: = (2/27.73)(0.02159) = 0.001557

H_2O: = (18/27.73)(0.13049) = 0.0847

N_2: = (28/27.73)(0.70478) = 0.7116

สมมติว่าค่าความร้อนจำเพาะสามารถคำนวณได้จากค่าอุณหภูมิเฉลี่ย 3000 K ค่าความร้อนจำเพาะขององค์ประกอบ (ดูรายละเอียดในภาคผนวก) คือ

สำหรับ CO_2: $c_p = 67.83\text{-}15\,189\,T^{-1} + 1.82\times 10^6\,T^{-2}$

$= 67.83\text{-}15\,189\,(2800)^{-1} + 1.82\times 10^6\,(2800)^{-2}$

= 62.9692 kJ/kmole K

สำหรับ CO: $c_p = 39.61\text{-}7652\,T^{-1} + 1.38\times 10^6\,T^{-2}$

$= 39.61\text{-}7652\,(2800)^{-1} + 1.38\times 10^6\,(2800)^{-2}$

= 37.2127 kJ/kmole K

สำหรับ H_2: $c_p = 24.12\text{-}4.356\times 10^{-3}\,T + 62.41\,T^{-0.5} - 5.94\times 10^{-4}\,(T\text{-}2222)$

$= 24.12\text{-}4.356\times 10^{-3}(2800) + 62.41(2800)^{-0.5} - 5.94\times 10^{-4}(2800\text{-}2222)$

= 11.7293 kJ/kmole K

สำหรับ H_2O: $c_p = 83.15\text{-}1863\,T^{-0.5} + 17\,445\,T^{-1}$

$= 83.15\text{-}1863\,(2800)^{-0.5} + 17\,445\,(2800)^{-1} = 54.9514$ kJ/kmole K

สำหรับ N_2: $c_p = 39.65\text{-}8071\,T^{-1} + 1.5\times 10^6\,T^{-2}$

$= 39.65\text{-}8071(2800)^{-1} + 1.5\times 10^6(2800)^{-2} = 37.1263$ kJ/kmole K

ดังนั้นค่าความร้อนจำเพาะของผลผลิตจากการเผาไหม้คือ

$$c_{p,prod} = (0.1586)\frac{62.9692}{44} + (0.04361)\frac{37.2127}{28} + (0.001557)\frac{11.7293}{2}$$

$$+(0.0847)\frac{54.9514}{18}+(0.7116)\frac{37.1263}{28}$$

$$= 0.227 + 0.05796 + 0.009131 + 0.2586 + 0.9435 = 1.496 \text{ kJ/kg K}$$

และ $c_{v,prod} = c_{p,prod} - R_{prod} = 1496 - 300 = 1196$ J/kg K

เนื่องจากกำหนดให้ $\varepsilon = 9$, ดังนั้นเศษส่วนไอเสียตกค้างคือ

$$f = (1 + F/A)\frac{p_{ex}}{\varepsilon p_4} = (1 + 0.0785)\frac{1.079 \text{ bar}}{(9)(4.413 \text{ bar})} = 0.0293$$

องค์ประกอบของส่วนผสมไอดีที่สถานะ 1 คือ

ไอเสียตกค้าง $= f = 0.0293$ kg

อากาศ $= (1-f) = (1-0.0293) = 0.9707$ kg

เชื้อเพลิง $= (1-f)(F/A) = (0.9707 \text{ kg})(0.0785) = 0.0762$ kg

มวลทั้งหมดของส่วนผสมไอเสีย $= 0.0293+0.9707+0.0762 = 1.0762$ kg

ส่วนประกอบโดยปริมาตรของส่วนผสมไอดีคือ

เชื้อเพลิง $= (0.0762)/(1.0762) = 0.0708$

ไอเสียตกค้าง $= (0.0293)/(1.0762) = 0.0272$

อากาศ $= (0.9707)/(1.0762) = 0.902$

มวลโมเลกุลของส่วนผสมไอดีคือ

$$M_{mix} = \frac{1}{\frac{0.0708}{113}+\frac{0.0272}{27.73}+\frac{0.902}{28.96}} = 30.53 \text{ kg/kmole}$$

ดังนั้น ค่าคงที่ของก๊าซสำหรับส่วนผสมไอดีคือ

$$R_{mix} = \frac{8314 \text{ J/kmole K}}{30.53 \text{ kg/kmole}} = 272.3 \text{ J/kg K}$$

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น $\Delta T'$ ในกระบวนการเผาไหม้โดยไม่เกิดการแยกตัวหาได้จาก

$$[f+(1-f)+(1-f)(F/A)]\ c_{v,prod}\ \Delta T' = (1-f)(F/A)\ q_f$$

$$[0.0293+0.9707+0.9707(0.0785) \text{ kg}](1.196 \text{ kJ/kg K})\ \Delta T'$$

$$= (0.9707 \text{ kg})(0.0785)\ (44\,000 \text{ kJ/kg})$$

$$\Delta T' = 2605 \text{ K} (= T_3' - T_2')$$

สมมติให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีค่าน้อยลงเนื่องจากผลของการแยกตัวเป็น 10% ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นโดยไม่มีการแยกตัว หรือ $Z = 0.90$ ดังนั้น

$$\Delta T = 0.90(2605 \text{ K}) = 2345 \text{ K} (= T_3 - T_2)$$

กำหนดให้กระบวนการอัดและขยายตัวมีเลขชี้กำลังเป็น $k_{comp} = k_{exp} = 1.3$ ดังนั้น สำหรับกระบวนการอัด

$$T_2 = T_1\ \varepsilon^{k_{comp}-1} = (328\ K)(9^{0.3}) = 634\ K$$

ดังนั้น $T_3 = 2345 + 634 = 2979\ K$ (ค่าที่ใช้ในการคำนวณคือ 3000 K, คลาดเคลื่อนเพียง 0.7%)

และ $$T_4 = \frac{T_3}{\varepsilon^{k_{exp}-1}} = (2979/9^{0.3}) = 1541\ K$$

งานในการขยายตัวคือ

$$W_E = \frac{(1.0762\ kg)(300\ J/kg\ K)(2979-1541\ K)}{(1.3-1)}$$

$$= 1547.58\ kJ/อากาศ\ 1\ kg$$

งานในการอัดคือ

$$W_C = \frac{(1.0762\ kg)(272.3\ J/kg\ K)(328-634\ K)}{(1.3-1)}$$

$$= -298.91\ kJ/อากาศ\ 1\ kg$$

งานต่อหนึ่งวัฏจักรคือ

$$W_{cyc} = 1547.58\text{-}298.91 = 1248.67\ kJ/อากาศ\ 1\ kg$$

ประสิทธิภาพความร้อน (เป็นค่ารวม หรือ Gross) คือ

$$\eta_{tg} = \frac{1248.67\ kJ}{(0.0762\ kg)(44\ 000\ kJ/kg)} = 0.3724$$ **ตอบ**

ปริมาตรที่สถานะ 1 คือ

$$v_1 = \frac{(1.0762\ kg)(272.3\ J/kg\ K)(328\ K)}{(0.961\times10^5\ N/m^2)} 1.0002\ m^3/อากาศ\ 1\ kg$$

ปริมาตรที่สถานะ 2 คือ

$$V_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = (1.0002/9) = 0.11113\ m^3/อากาศ\ 1\ kg$$

ดังนั้น ความดันเฉลี่ยประสิทธิผลคือ

$$p_m = \frac{1248.67\ kJ/kg\ air}{(1.0002-0.11113)m^3/kg\ air} = 14.045\ bar$$ **ตอบ**

และความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะคือ

$$sfc = \frac{(3600\ s/h)}{(0.3724)(44\ 000\ kJ/kg)} = 0.2197\ kg/kWh$$ **ตอบ**

การตรวจสอบค่าของความดันและอุณหภูมิที่สมมติขึ้นมาใช้ ทำได้ดังนี้

จาก $$p_2 = p_1\varepsilon^{k_{comp}} = (0.961\ bar)\ (9^{1.3}) = 16.72\ bar$$

และ $$p_3 = p_2 \frac{T_3}{T_2}\frac{L_{prod}}{L_{mix}}$$

$$= (16.72\ bar)\ (2979\ K/634\ K)(55.89\ โมเลกุล/50.83\ โมเลกุล)$$

$$= 86.38\ bar$$

จะได้ $p_4 = \frac{86.38 \text{ bar}}{9^{1.3}} = 4.965$ bar (ค่าที่สมมติคือ 4.413 bar)

จากการสมมูลระหว่างค่าเอนทัลปีของส่วนผสมกับองค์ประกอบคือ

$$1.0762(1.005 \text{ kJ/kg K})(T_1\text{-}273) = 0.9707(1.005 \text{ kJ/kg K})(328\text{-}273) + 0.0762 (-253.3 \text{ kJ/kg}) + 0.0293(1.005 \text{ kJ/kg K})(1541\text{-}273)$$

จะได้ $T_1 = 67+273 = 340$ K (ค่าที่สมมติใช้คือ 328 K)

ตัวอย่างที่ 7-5.2 วัฏจักรเชื้อเพลิงกับอากาศแบบเผาไหม้ที่ปริมาตรคงที่ ใช้ส่วนผสมไอดีที่มีอัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศเป็น 0.0785 เชื้อเพลิงมีสูตรเคมีเป็น C_8H_{17} และมีค่าความร้อน 44 MJ/kg มีอัตราส่วนการอัดเท่ากับ 5 สมมติให้เศษส่วนไอเสียตกค้าง f = 0.053, ความดันและอุณหภูมิของสารทำงานก่อนเกิดการอัดเป็น 0.961 bar และ 369 K จงคำนวณหาประสิทธิภาพความร้อน, ความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะและความดันเฉลี่ยประสิทธิผลของวัฏจักร

วิธีทำ การเผาไหม้ของ C_8H_{17} ด้วยอัตราส่วนเชื้อเพลิงอากาศเท่ากับ 0.0785 จะได้

$$\frac{\text{kmole of } O_2}{\text{kmole of fuel}} = \frac{M_f}{(4.31\times 32)(F/A)} = \frac{113}{(4.31\times 32)0.0785} = 10.44$$

$$\alpha = \frac{(12n+m)}{32\times 4.31(n+\frac{m}{4})F/A} = \frac{(12\times 8+17)}{32\times 4.31(8+\frac{17}{4})0.0785} = 0.852$$

ซึ่งเป็นเป็นส่วนผสมหนาที่มีสมการปฏิกิริยาเหมือนกับตัวอย่างที่ 7-5.1 ทุกประการ ดังนั้นอุณหภูมิที่เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการเผาไหม้จะสามารถคำนวณโดยใช้ค่า $R_{prod} = 300$ kJ/kg K, $c_{p,prod} = 1.496$ kJ/kg K, และ $c_{v,prod} = 1196$ J/kg K ของตัวอย่างที่ 7-5.1 ได้โดยไม่ต้องแสดงการคำนวณซ้ำ

เนื่องจากกำหนดให้ $\varepsilon = 5$, F/A = 0.0785, ดังนั้นเศษส่วนไอเสียตกค้างคือ

$$f = (1+F/A)\frac{p_{ex}}{\varepsilon p_4} = (1+0.0785)\frac{1.079 \text{ bar}}{(5)(4.413 \text{ bar})} = 0.05274$$

องค์ประกอบของส่วนผสมไอดีที่สถานะ 1 คือ

ไอเสียตกค้าง = f = 0.05274 kg

อากาศ = (1-f) = (1-0.05274) = 0.94726 kg

เชื้อเพลิง = (1-f)(F/A) = (0.94726 kg) (0.0785) = 0.07436 kg

มวลทั้งหมดของส่วนผสมไอเสีย = 0.05274+0.94726+0.07436 = 1.07436 kg

ส่วนประกอบโดยปริมาตรของส่วนผสมไอดีคือ

เชื้อเพลิง = (0.07436)/(1.07436) = 0.06921

ไอเสียตกค้าง = (0.05274)/(1.07436) = 0.04909

อากาศ = (0.94726)/(1.07436) = 0.8817

มวลโมเลกุลของส่วนผสมไอดีคือ

$$M_{mix} = \frac{1}{\frac{0.06921}{113} + \frac{0.04909}{27.73} + \frac{0.8817}{28.96}} = 30.46 \text{ kg/kmole}$$

ดังนั้น ค่าคงที่ของก๊าซสำหรับส่วนผสมไอดีคือ

$$R_{mix} = \frac{8314 \text{ J/kmole K}}{30.46 \text{ kg/kmole}} = 273 \text{ J/kg K}$$

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น $\Delta T'$ ในกระบวนการเผาไหม้โดยไม่เกิดการแยกตัวหาได้จาก

$$[f+(1-f)+(1-f)(F/A)]\ c_{v,prod}\ \Delta T' = (1-f)(F/A)\ q_f$$

$$[(0.05274+0.94726+0.07436)\text{ kg}](1.196 \text{ kJ/kg K})\ \Delta T'$$

$$= (0.94726 \text{ kg})(0.0785)\ (44\ 000 \text{ kJ/kg})$$

$$\Delta T' = 2546 \text{ K } (= T_3' - T_2')$$

สมมติให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีค่าน้อยลงเนื่องจากผลของการแยกตัวเป็น 10% ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ΔT โดยไม่มีการแยกตัว หรือ $Z = 0.90$ ดังนั้น

$$\Delta T = 0.90(2546 \text{ K}) = 2291 \text{ K } (= T_3 - T_2)$$

กำหนดให้กระบวนการอัดและขยายตัวมีเลขชี้กำลังเป็น $k_{comp} = k_{exp} = 1.3$ ดังนั้น สำหรับกระบวนการอัด

$$T_2 = T_1\ \varepsilon^{k_{comp}-1} = (369 \text{ K})(5^{0.3}) = 598 \text{ K}$$

ดังนั้น $T_3 = 2291 + 598 = 2889$ K (ค่าที่สมมติใช้คือ 3000 K)

และ $$T_4 = \frac{T_3}{\varepsilon^{k_{exp}-1}} = (2889/5^{0.3}) = 1783 \text{ K}$$

งานในการขยายตัวคือ (สมมติให้ R_{prod} เท่ากับตัวอย่างที่ 7-5.1)

$$w_E = \frac{(1.07436 \text{ kg})(300 \text{ J/kg K})(2889 - 1783 \text{ K})}{(1.3 - 1)}$$

$$= 1188.242 \text{ kJ/อากาศ 1 kg}$$

งานในการอัดคือ

$$w_C = \frac{(1.07436 \text{ kg})(273 \text{ J/kg K})(369 - 598 \text{ K})}{(1.3 - 1)}$$

$$= -223.885 \text{ kJ/อากาศ 1 kg}$$

งานต่อหนึ่งวัฏจักรคือ

$$W_{cyc} = 1188.242 - 223.885 = 964.357 \text{ kJ/อากาศ 1 kg}$$

ประสิทธิภาพความร้อนคือ

$$\eta_{tg} = \frac{964.357\ \text{kJ}}{(0.06921\ \text{kg})(44\ 000\ \text{kJ/kg})} = 0.3167$$ **ตอบ**

ปริมาตรที่สถานะ 1 คือ

$$v_1 = \frac{(1.07436\ \text{kg})(273\ \text{J/kg K})(369\ \text{K})}{(0.961\times10^5\ \text{N/m}^2)} = 1.1262\ \text{m}^3/\text{อากาศ 1 kg}$$

ปริมาตรที่สถานะ 2 คือ

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = (1.1262/5) = 0.2252\ \text{m}^3/\text{อากาศ 1 kg}$$

ดังนั้น ความดันเฉลี่ยประสิทธิผลคือ

$$p_m = \frac{964.357}{(1.1262 - 0.2252)} = 10.7\ \text{bar}$$ **ตอบ**

และความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะคือ

$$\text{sfc} = \frac{(3600\ \text{s/h})}{(0.3167)(44\ 000\ \text{kJ/kg})} = 0.2584\ \text{kg/kWh}$$ **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 7-5.3 วัฏจักรเชื้อเพลิงกับอากาศแบบจำกัดความดันที่มีอัตราส่วนการอัดเป็น 16 และความดันสูงสุดของวัฏจักรเป็น 68.6 bar โดยใช้อัตราส่วนเชื้อเพลิงอากาศเป็น 0.051 และใช้อากาศในปริมาณที่เป็น 130% ของอากาศที่ต้องการตามทฤษฎี เชื้อเพลิงที่ใช้คือ $C_{12}H_{26}$ ซึ่งมีค่าความร้อนเป็น 42.2 MJ/kg) ความดันดูดเข้าเป็น 0.9806 bar, ความดันของไอเสียเป็น 1.03 bar, อุณหภูมิบรรยากาศเป็น 323 K จงคำนวณหาประสิทธิภาพความร้อน, ค่าความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะ, และความดันเฉลี่ยประสิทธิผล (สำหรับการคำนวณหาค่าของ f และ T_1 ให้สมมติค่า $p_4 = 4.413$ bar และ $T_4 = 1200$ K)

วิธีทำ การเผาไหม้ของเชื้อเพลิง $C_{12}H_{26}$ โดยอัตราส่วนเชื้อเพลิงอากาศ F/A = 0.051 ต้องการใช้ออกซิเจนในอัตราส่วนเท่ากับ

$$\frac{\text{kmole of } O_2}{\text{kmole of fuel}} = \frac{M_f}{(4.31\times32)(F/A)} = \frac{113}{(4.31\times32)0.051} = 16.065$$

โดย $$\alpha = \frac{(12x+y)}{32\times4.31(x+\frac{y}{4})F/A} = \frac{(12\times12+26)}{32\times4.31(12+\frac{26}{4})0.051} = 1.3064$$

ดังนั้นจึงเป็นเป็นส่วนผสมบาง ซึ่งสมการปฏิกิริยาคือ

$$C_xH_y + \alpha(x+\frac{y}{4})O_2 + 3.773\,\alpha(x+\frac{y}{4})N_2$$

$$= xCO_2 + y\,H_2O + (\alpha-1)(x+\frac{y}{4})O_2 + 3.773\,\alpha(x+\frac{y}{4})N_2$$

$$C_{12}H_{26} + 24.1684O_2 + 91.1874N_2 = 12CO_2 + 13H_2O + 5.6684O_2 + 91.1874N_2$$

จำนวนโมเลกุลของส่วนผสมไอดีและผลิตผลจากการเผาไหม้คือ

L_{mix} = 1+24.1684+91.1874 = 116.3558 โมเลกุล

L_{prod} = 12+13+5.6684+91.1874 = 121.8558 โมเลกุล

ส่วนประกอบโดยปริมาตรของผลิตผลจากการเผาไหม้คือ

CO_2: = (12)/(121.8558) = 0.09848

H_2O: = (13)/(121.8558) = 0.1067

O_2: = (5.6684)/(121.8558) = 0.04652

N_2: = (91.1874)/(121.8558) = 0.7483

ค่าคงที่ของก๊าซสำหรับผลผลิตจากการเผาไหม้คือ

$$R_{prod} = \frac{8314 \text{ J/kmole K}}{0.09848\times 44 + 0.1067\times 18 + 0.04652\times 32 + 0.7483\times 28}$$

$$= \frac{8314}{28.695} = 289.7 \text{ J/kmole K}$$

มวลโมเลกุลของผลิตผลจากการเผาไหม้คือ M_{prod} = 28.695 kg/kmole

ส่วนประกอบโดยมวลของผลิตผลจากการเผาไหม้คือ

CO_2: = (44/28.695)(0.09848) = 0.151

H_2O: = (18/28.695)(0.1067) = 0.06693

O_2: = (32/28.695)(0.04652) = 0.05188

N_2: = (28/28.695)(0.7483) = 0.7302

สมมติว่าค่าความร้อนจำเพาะสามารถคำนวณได้จากค่าอุณหภูมิเฉลี่ย 2200 K ซึ่ง ค่าความร้อนจำเพาะขององค์ประกอบคือ

สำหรับ CO_2: $c_p = 67.83\text{-}15\ 189\ T^{-1} + 1.82\times 10^6\ T^{-2}$

$= 67.83\text{-}15\ 189\ (2200)^{-1} + 1.82\times 10^6\ (2200)^{-2}$

= 61.3019 kJ/kmole K

สำหรับ H_2O: $c_p = 83.15\text{-}1863\ T^{-0.5} + 17\ 445\ T^{-1}$

$= 83.15\text{-}1863\ (2200)^{-0.5} + 17\ 445\ (2200)^{-1}$

= 51.3603 kJ/kmole K

สำหรับ O_2: $c_p = 48.212\text{-}536.8\ T^{-0.5} + 3559\ T^{-1}$

$= 48.212\text{-}536.8\ (2200)^{-0.5} + 3559\ (2200)^{-1}$

= 38.3851 kJ/kmole K

สำหรับ N_2: $c_p = 39.65\text{-}8071\ T^{-1} + 1.5\times 10^6\ T^{-2}$

$= 39.65\text{-}8071\ (2200)^{-1} + 1.5\times 10^6\ (2200)^{-2}$

= 36.2913 kJ/kmole K

ดังนั้นค่าความร้อนจำเพาะของผลผลิตจากการเผาไหม้คือ

$$c_{p,prod} = (0.151)\frac{61.3019}{44} + (0.06693)\frac{51.3603}{18} + (0.05188)\frac{38.3851}{32} + (0.7302)\frac{36.2913}{28}$$

$$= 0.21038 + 0.190975 + 0.062232 + 0.94643 = 1.41 \text{ kJ/kg K}$$

และ $c_{v,prod} = c_{p,prod} - R_{prod} = 1410 - 289.7 = 1120.3$ J/kg K

เนื่องจากกำหนดให้ $\varepsilon = 16$, F/A = 0.051, ดังนั้นเศษส่วนไอเสียตกค้างคือ

$$f = (1 + F/A)\frac{p_{ex}}{\varepsilon p_4} = (1 + 0.051)\frac{1.03 \text{ bar}}{(16)(4.413 \text{ bar})} = 0.01533$$

องค์ประกอบของส่วนผสมที่ถูกอัดที่สถานะ 1 คือ

ไอเสียตกค้าง $= f = 0.01533$ kg

อากาศ $= (1-f) = (1-0.01533) = 0.98467$ kg

มวลทั้งหมดของส่วนผสมที่ถูกอัด = 0.01533+0.98467 = 1.0 kg

ส่วนประกอบโดยปริมาตรของส่วนผสมที่ถูกอัดคือ

ไอเสียตกค้าง $= (0.01533)/(1.0) = 0.01533$

อากาศ $= (0.98467)/(1.0) = 0.98467$

มวลโมเลกุลของส่วนผสมที่ถูกอัดคือ

$$M_{mix} = \frac{1}{\frac{0.01533}{28.695} + \frac{0.98467}{28.96}} = 28.96 \text{ kg/kmole}$$

ดังนั้น ค่าคงที่ของก๊าซสำหรับส่วนผสมคือ

$$R_{mix} = \frac{8314 \text{ J/kmole K}}{28.96 \text{ kg/kmole}} = 287.09 \text{ J/kg K}$$

ซึ่งใกล้เคียงกับค่าคงที่ของก๊าซสำหรับอากาศมาก ดังนั้นจึงสมมติให้ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศและของไอเสียเป็น $c_p = 1.005$ kJ/kg K

สมการของเอนทัลปีก่อนและหลังการผสม (เมื่อ T_1 เป็นอุณหภูมิหลังการผสม) คือ

(0.01533+0.98467)(1.005 kJ/kg K)(T_1-273)

= (0.98467)(1.005 kJ/kg K)(323-273) + (0.01533)(1.005 kJ/kg K)(1200-273)

ซึ่งจะได้ $T_1 = 273 + 63 = 336$ K

ในกระบวนการอัด

$$p_2 = p_1\varepsilon^{1.36} = (0.9806 \text{ bar})\ (16^{1.36}) = 42.569 \text{ bar}$$

$$T_2 = T_1\ \varepsilon^{1.36-1} = (336 \text{ K})\ (16^{0.36}) = 912 \text{ K}$$

ในกระบวนการปริมาตรคงที่ 2-2′

$$\frac{p_2'}{p_2} = \frac{68.6}{42.569} = \frac{T_2'}{T_2}$$

$$T_2' = (912\ K)\ (68.6/42.569) = 1470\ K$$

ปริมาณความร้อนที่ให้โดยปริมาตรคงที่คือ

$$q_{in}' = (1\ kg/kg\ air)(1120.3\ J/kg\ K)(1470 - 912\ K)$$

$$= 625.127\ kJ/\text{ อากาศ } 1\ kg$$

ปริมาณความร้อนที่ให้ทั้งหมดคือ

$$q_{in} = [(0.051)(1 - 0.01533)kg/kg\ air](42\ 200\ kJ/kg)$$

$$= 2119.207\ kJ/\text{ อากาศ } 1\ kg$$

ดังนั้น ปริมาณความร้อนที่ให้โดยความดันคงที่คือ

$$q_{in}'' = 2119.207\text{-}625.127 = 1494.08\ kJ/\text{อากาศ } 1\ kg$$

หรือ (1494.08 kJ/อากาศ 1 kg)

$$= (1.051\ kg/\text{ อากาศ } 1\ kg)\ (1.41\ kJ/kg\ K)\ (T_3 - 1470\ K)$$

ดังนั้น $T_3 = 1008 + 1470 = 2478\ K$

(ค่าอุณหภูมิที่สมมติใช้ในการหาค่าความร้อนจำเพาะเป็น 2200 K นั้นอยู่ในกระบวนการเผาไหม้แบบปริมาตรคงที่ และมวลของเชื้อเพลิงไม่ได้นำเข้ามาคิดในกระบวนการเผาไหม้แบบปริมาตรคงที่)

จาก $\frac{v_3}{v_2'} = \frac{T_3}{T_2'}\frac{L_{prod}}{L_{mix}} = (2478/1470)(121.8558/116.3558) = 1.7654$

หรือ $v_3 = 1.7654 v_2'$

ในกระบวนการอัด จะได้

$$v_1 = \frac{(1\ kg/kg\ air)(287.09\ J/kg\ K)(336\ K)}{(0.9806 \times 10^5\ N/m^2)} = 0.9837\ m^3/\text{kg อากาศ}$$

$$v_2 = v_2' = \frac{0.9837}{16} = 0.06148\ m^3/\text{kg อากาศ}$$

ดังนั้น $v_3 = 1.7654(0.06148) = 0.1085\ m^3/\text{อากาศ } 1\ kg$

ในกระบวนการ 3-4, $\frac{T_4}{T_3} = (\frac{v_3}{v_4})^{1\,3-1} = (0.1103^{0\,3}) = 0.5161$

ดังนั้น $T_4 = 0.5161(2478\ K) = 1279\ K$

งานของกระบวนการ $2'$-3 คือ

$$w_{2'-3} = (1.051)(68.6 \times 10^5)(0.1085\text{-}0.06148) = 339.008\ kJ/\text{kg อากาศ}$$

งานของกระบวนการ 3-4 คือ

$$w_{3\ 4} = (1.051\ kg/\text{อากาศ } 1\ kg)(\ 289.7\ J/kg\ K)(2478\text{-}1279\ K)/(1.3\text{-}1)$$

$$= 1216.884\ kJ/\text{kg อากาศ}$$

ดังนั้น งานในการขยายตัวคือ

$$w_E = 339.008+1216.884 = 1555.892 \text{ kJ/อากาศ 1 kg}$$

งานในการอัดคือ

$$w_C = \frac{(1)(287.09)(336-912)}{1.36-1} = -459.344 \text{ kJ/อากาศ 1 kg}$$

ประสิทธิภาพความร้อนคือ

$$\eta_{tg} = \frac{1555.892-459.344}{(0.051\times 0.98467)(42\ \ 200)} = 0.5174$$ **ตอบ**

ความดันเฉลี่ยประสิทธิผลคือ

$$p_m = \frac{1555.892-459.344}{0.9837-0.06148} = 11.89 \text{ bar}$$ **ตอบ**

ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะคือ

$$sfc = \frac{3600}{0.5174\times 42\ \ 200} = 0.1649 \text{ kg/kWh}$$ **ตอบ**

การตรวจสอบค่าของอุณหภูมิและความดัน ทำได้ดังนี้

$$p_4 = p_3(v_3/v_4)^{1.3} = p_3(1.7654v_2/v_1)^{1.3} = (68.6 \text{ bar})\ (1.7654/16)^{1.3}$$

$$= 3.907 \text{ bar (ค่าที่สมมติคือ 4.413 bar)}$$

เอนทัลปีของส่วนผสมคือ

$$(1)\ (1.005)\ (T_1 - 273) = (0.98467)(1.005)(323\text{-}273)$$

$$+ (0.01533)(1.005)(\ 1279\text{-}273)$$

จะได้ $T_1 = 65 + 273 = 338$ K (ค่าที่สมมติคือ 336 K)

แบบฝึกหัด

1. จงวิเคราะห์วัฏจักรเชื้อเพลิงกับอากาศที่เผาไหม้แบบปริมาตรคงที่วัฏจักรหนึ่ง ซึ่งมีอัตราส่วนการอัดเป็น 7 เพื่อหาประสิทธิภาพความร้อน, ความดันเฉลี่ยประสิทธิผล, ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ, และความดันสูงสุดของวัฏจักร กำหนดให้ใช้ข้อมูลต่อไปนี้:

เชื้อเพลิงคือ C_8H_{17}, F/A = 0.0785, f = 0.037,

$p_1 = 0.961$ bar, $p_{ex} = 1.079$ bar, $T_1 = 346$ K

(อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในกระบวนการเผาไหม้สามารถคำนวณได้ตามวิธีในตัวอย่างที่ 7-5.1)

(ตอบ $\eta_t = 0.331$, mep = 12.06 bar, sfc = 0.248kg/kWh)

2. วัฏจักรเชื้อเพลิงกับอากาศวัฏจักรหนึ่งซึ่งใช้เชื้อเพลิงเป็น C_8H_{17}, F/A = 0.0785, ความดันและอุณหภูมิบรรยากาศเป็น 1.013 bar, 50^{O}C จงคำนวณหา f

และ T_1 ของส่วนผสมก่อนที่จะเกิดการอัด สำหรับอัตราส่วนการอัด 5 และ 9 (ข้อมูลอื่นๆสามารถเลือกใช้ได้จากค่าที่กำหนดไว้ในบทนี้)

(ตอบ $\varepsilon = 5$: $f = 0.053$, $T_1 = 369$ K; $\varepsilon = 9$: $f = 0.0292$, $T_1 = 338$ K)

3. วัฏจักรเชื้อเพลิงกับอากาศแบบจำกัดความดันวัฏจักรหนึ่งมีอัตราส่วนการอัดเป็น 18 และความดันสูงสุดของวัฏจักรเป็น 68.6 bar อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศในขณะรับภาระเต็มพิกัดคือ 0.051 โดยใช้อากาศในปริมาณที่มากกว่าอากาศที่ต้องการตามทฤษฎี 30% เชื้อเพลิงคือ $C_{12}H_{26}$, มีค่าความร้อน 42.2 MJ/kg ความดันที่ดูดเข้าเป็น 0.9806 bar ความดันไอเสียเป็น 1.03 bar และอุณหภูมิบรรยากาศเป็น 323 K จงคำนวณหาประสิทธิภาพความร้อน, ความดันเฉลี่ยประสิทธิผล, และความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของวัฏจักร (ในการคำนวณหา T_1 และ f ให้สมมติค่า $p_4 = 4.413$ bar, และ $T_4 = 1200$ K)

ภาคผนวก

ค่าความร้อนจำเพาะของผลผลิตจากการเผาไหม้ (มีหน่วยเป็น kJ/kmole K) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้:

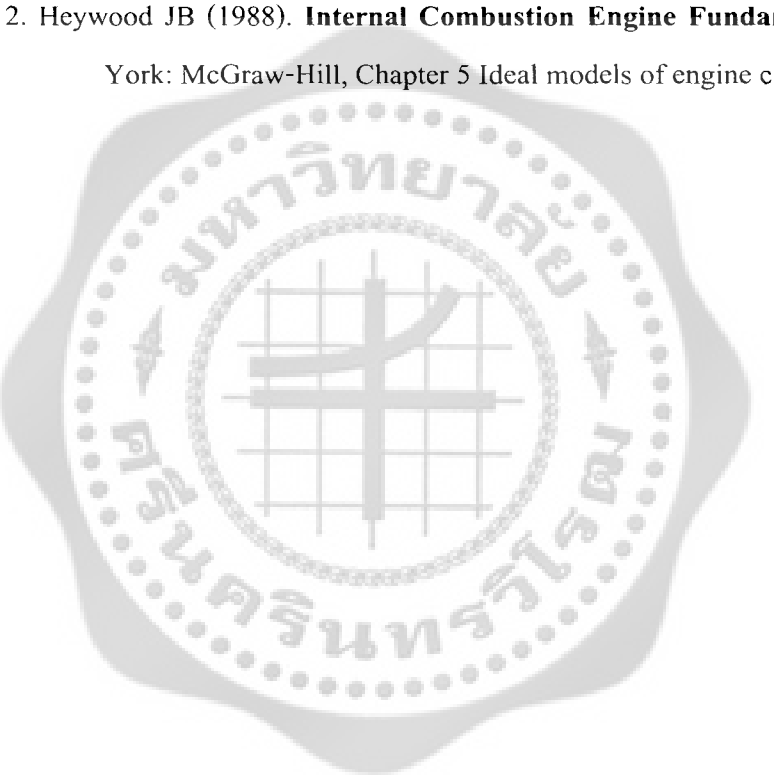
สำหรับ O_2:	$c_p = 48.212 - 536.8\,T^{-0.5} + 3559\,T^{-1}$	เมื่อ $300\ \text{K} \le T \le 2800\ \text{K}$
	$c_p = 48.212 - 536.8\,T^{-0.5} + 3559\,T^{-1}$ $+ 3.768 \times 10^{-4}\,(T-2222)$	เมื่อ $2800\ \text{K} \le T \le 5000\ \text{K}$
สำหรับ N_2:	$c_p = 39.65 - 8071\,T^{-1} + 1.5 \times 10^{6}\,T^{-2}$	เมื่อ $300\ \text{K} \le T \le 5000\ \text{K}$
สำหรับ H_2:	$c_p = 24.12 - 4.356 \times 10^{-3}\,T + 62.41\,T^{-0.5}$	เมื่อ $300\ \text{K} \le T \le 2200\ \text{K}$
	$c_p = 24.12 - 4.356 \times 10^{-3}\,T + 62.41\,T^{-0.5}$ $- 5.94 \times 10^{-4}\,(T-2222)$	เมื่อ $2200\ \text{K} \le T \le 5000\ \text{K}$
สำหรับ H_2O:	$c_p = 83.15 - 1863\,T^{-0.5} + 17\,445\,T^{-1}$	เมื่อ $300\ \text{K} \le T \le 3000\ \text{K}$
สำหรับ CO_2:	$c_p = 67.83 - 15\,189\,T^{-1} + 1.82 \times 10^{6}\,T^{-2}$	เมื่อ $300\ \text{K} \le T \le 3500\ \text{K}$
สำหรับ CO:	$c_p = 39.61 - 7652\,T^{-1} + 1.38 \times 10^{6}\,T^{-2}$	เมื่อ $300\ \text{K} \le T \le 5000\ \text{K}$
สำหรับ CH_4:	$c_p = 18.92 + 0.055\,T$	เมื่อ $300\ \text{K} \le T \le 830\ \text{K}$
สำหรับ C_2H_4:	$c_p = 17.71 + 0.0887\,T$	เมื่อ $200\ \text{K} \le T \le 650\ \text{K}$
สำหรับ C_2H_6:	$c_p = 16.79 - 0.123\,T$	เมื่อ $220\ \text{K} \le T \le 600\ \text{K}$
สำหรับ C_8H_{18}:	$c_p = 33.16 - 0.453\,T$	เมื่อ $220\ \text{K} \le T \le 600\ \text{K}$
สำหรับ $C_{12}H_{26}$:	$c_p = 36.34 - 0.670\,T$	เมื่อ $220\ \text{K} \le T \le 600\ \text{K}$

เอกสารอ้างอิง

1. Sen SP (1998). **Internal Combustion Engine Theory and Practice**, Delhi: Khanna Publishers, pp. 78-110.
2. Holman JP (1985). **Thermodynamics**, 3rd ed., Auckland: McGraw-Hill, pp. 64-65.

เอกสารที่แนะนำให้ศึกษาเพิ่มเติม

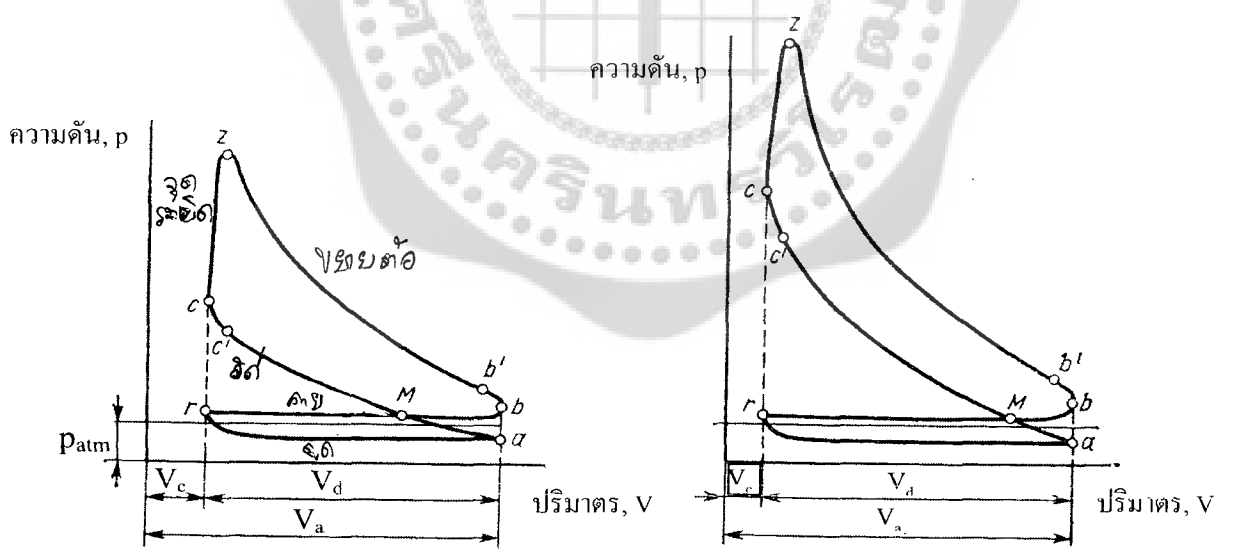
1. Sen SP (1998). **Internal Combustion Engine Theory and Practice**, Delhi: Khanna Publishers, Chapter 2 Theoretical cycles for engines.
2. Heywood JB (1988). **Internal Combustion Engine Fundamentals**, New York: McGraw-Hill, Chapter 5 Ideal models of engine cycles.



บทที่ 8
การวิเคราะห์วัฏจักรจริง

8-1 บทนำ

วัฏจักรที่แท้จริงของเครื่องยนต์นั้นแตกต่างจากวัฏจักรทางทฤษฎีที่กล่าวมาแล้วมาก ที่เป็นเช่นนั้นเพราะว่า เป็นไปไม่ได้ที่จะทำให้เกิดสภาวะตามวัฏจักรทางทฤษฎีขึ้นกับเครื่องยนต์จริง ยกตัวอย่างเช่น ในการพิจารณาวัฏจักรทางทฤษฎีนั้น ใช้สมมติฐานว่าส่วนประกอบและปริมาณของก๊าซอุดมคตินั้นไม่เปลี่ยนแปลง แต่ในความเป็นจริงนั้นปริมาณของก๊าซและส่วนประกอบทางเคมีเปลี่ยนแปลงไป หลังจากครบหนึ่งวัฏจักรจริงก๊าซไอเสียไม่ได้กลับคืนสู่สถานะเดิมของมันและไม่ได้คงอยู่ในกระบอกสูบ แต่ถูกระบายออกไปสู่บรรยากาศ เพื่อเหลือเนื้อที่ไว้ให้ไอดีที่จะบรรจุเข้ามาใหม่ เพราะฉะนั้นวัฏจักรจริงจึงเป็นวัฏจักรเปิด เนื่องจากอุณหภูมิและส่วนประกอบของก๊าซเปลี่ยนแปลงไปมาก ดังนั้นค่าความจุความร้อนของก๊าซในวัฏจักรจริงจึงไม่คงที่ นอกจากนี้ยังมีการสูญเสียทางความร้อนและการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานการไหลเกิดขึ้นในวัฏจักรจริงอีกด้วย



(a) เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน (b) เครื่องยนต์ดีเซล

รูปที่ 8-1.1 แผนภาพอินดิเคเตอร์แสดงวัฏจักรจริงของเครื่องยนต์สี่จังหวะ

รูปที่ 8-1.1 แสดงแผนภาพอินดิเคเตอร์ของวัฏจักรจริงของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนสี่จังหวะ (รูปที่ 8-1.1a) และเครื่องยนต์ดีเซลสี่จังหวะ (รูปที่ 8-1.1b)

วัฏจักรทั้งสองในรูปนั้นแตกต่างจากวัฏจักรทางทฤษฎีและประกอบด้วยกระบวนการที่ทับซ้อนอยู่กับกระบวนการหลักทางทฤษฎี ดังต่อไปนี้คือ กระบวนการการดูด (Admission) กระบวนการการอัด (Compression) กระบวนการการเผาไหม้ (Combustion) กระบวนการการขยายตัว (Expansion) และกระบวนการการคายไอเสีย (Exhaust)

กระบวนการดูดตามปกติเริ่มต้นใกล้เคียงกับศูนย์ตายบน (ก่อนสถานะ r) และสิ้นสุดใกล้เคียงกับสถานะ M กระบวนการอัดสิ้นสุดที่สถานะ c' (ที่ตำแหน่งที่เกิดการจุดระเบิด) กระบวนการเผาไหม้จึงเริ่มต้นต่อจากนั้นแล้วสิ้นสุดบนวิถีของการขยายตัว zb กระบวนการขยายตัวสิ้นสุดที่สถานะ b' (ตรงตำแหน่งที่ลิ้นไอเสียเปิด) และกระบวนการคายไอเสียตามปกตินั้นจะเกิดหลังศูนย์ตายบน (ผ่านสถานะ r ไปแล้ว)

งานกลที่เกิดจากก๊าซในกระบอกสูบระหว่างหนึ่งวัฏจักรสามารถหาได้จากความแตกต่างระหว่างพื้นที่ bczb กับ brab พื้นที่ bczb เป็นบวกและพื้นที่ brab เป็นลบเพราะว่าขนาดของพื้นที่ brab คืองานที่สูญเสียในการเอาชนะความต้านทานในระหว่างเกิดการคายไอเสียและการดูด

กระบวนการของวัฏจักรจริงแต่ละกระบวนการมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

8-2 กระบวนการดูด

การดูดหรือการบรรจุ (Charging) คือการเติมส่วนผสมที่เผาไหม้ได้ (ส่วนผสมไอดีสำหรับเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน) หรืออากาศ (สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล) เข้าไปในกระบอกสูบ ปริมาณของส่วนผสมที่เผาไหม้ได้หรืออากาศที่บรรจุเข้ากระบอกสูบนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆมากมาย ปัจจัยที่สำคัญคือ

(1) มีความต้านทานในระบบไอดีและระบบไอเสีย

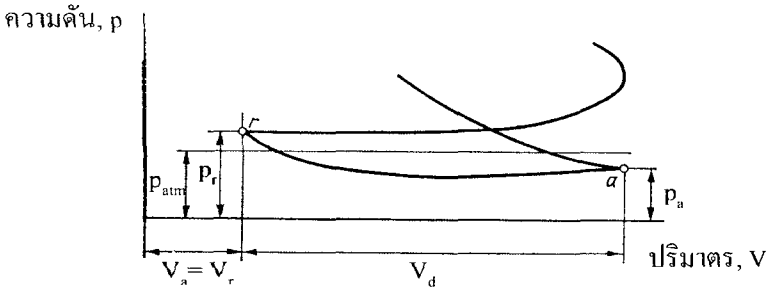
(2) ในกระบอกสูบมีไอเสียตกค้างอยู่จำนวนหนึ่งในขณะที่เริ่มการบรรจุไอดีเข้าไปใหม่

(3) การที่ไอดีได้รับความร้อนจากการสัมผัสกับชิ้นส่วนที่ร้อนกว่าของระบบไอดีและได้รับความร้อนจากการผสมกับไอเสียตกค้างจากวัฏจักรที่แล้ว

8-2.1 ความดันระหว่างการดูด

ภายในกระบอกสูบมีไอเสียตกค้างจำนวนหนึ่งอยู่แล้วก่อนที่ไอดีใหม่จะเข้าไปในกระบอกสูบ ของเครื่องยนต์สี่จังหวะ ไอเสียตกค้างนี้จะอยู่ในห้องเผา

ไหม้ซึ่งมีปริมาตรเป็น V_c (ดูรูปที่ 8-2.1) ความดัน p_r ของไอเสียตกค้างมีค่าสูงกว่าความดันบรรยากาศและอุณหภูมิของไอเสียตกค้างสูงกว่าอุณหภูมิของไอดีใหม่ดีกด้วย



รูปที่ 8-2.1 แผนภาพแสดงกระบวนการดูดและระบายไอเสียที่เกิดขึ้นในกระบอกสูบของเครื่องยนต์สี่จังหวะ

เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ออกจากศูนย์ตายบนไปสู่ศูนย์ตายล่าง ความดันของไอเสียตกค้าง p_r จะลดลงเท่ากับความดันบรรยากาศ p_{atm} หลังจากนั้นไอดีใหม่จะถูกบรรจุเข้ามาในกระบอกสูบ ในกรณีเช่นนี้ความต้านทานในระบบไอเสียจะทำให้ความดันของไอดีลดลงต่ำกว่าความดันบรรยากาศ

เครื่องยนต์สองจังหวะนั้นแตกต่างจากเครื่องยนต์สี่จังหวะ กระบวนการบรรจุไอดีที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์สองจังหวะนั้นเป็นผลมาจากการผลักดันไอดีเข้ากระบอกสูบในระหว่างการกวาดล้างไอเสีย (Scavenging)

ในระหว่างเกิดการดูด ความดันในกระบอกสูบมีค่าต่ำกว่าความดันบรรยากาศ จุดที่ความดันต่ำที่สุดอยู่ตรงที่กึ่งกลางช่วงชักของลูกสูบ โดยประมาณ คือจุดที่ความเร็วลูกสูบมีค่าสูงสุด เมื่อถึงปลายกระบวนการอัดค่าความดัน p_a สูงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่สถานะ a เนื่องจากมี Velocity head ที่เกิดขึ้นจากแรงเฉื่อยของไอดีที่เข้ามาในกระบอกสูบ

ความดันที่ลดลงเนื่องจากความต้านทานในระบบไอดีคือ

$$\Delta p_a = p_{atm} - p_a \qquad (8\text{-}2.1)$$

เมื่อ p_{atm} คือความดันบรรยากาศ (มีหน่วยเป็น N/m^2) และ p_a คือความดันที่สถานะ a (มีหน่วยเป็น N/m^2)

สำหรับเครื่องยนต์สี่จังหวะที่ไม่มีการอัดบรรจุ (Non-supercharging) ความดันที่ลดลง Δp_a มีค่าอยู่ในช่วง $\Delta p_a = (0.10 \text{ ถึง } 0.25)\, p_a$ (ตัวเลขค่าสูงเป็นค่าสำหรับเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนกับเครื่องยนต์ก๊าซ ตัวเลขค่าต่ำกว่าเป็นค่าสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล)

ในกรณีของเครื่องยนต์สี่จังหวะที่ใช้การอัดบรรจุไอดีเข้ากระบอกสูบด้วยเครื่องอัดบรรจุ (Supercharger) ด้วยความดัน p'_a ค่าของ Δp_a อยู่ระหว่าง $\Delta p_a = (0.05 \text{ ถึง } 0.10)\, p_a$

ดังนั้นความดันที่ปลายกระบวนการดูดจะคำนวณได้จาก

$$p_a = p_{atm} - \Delta p_a \qquad (8\text{-}2.2)$$

และ $$p_a = p'_a - \Delta p_a \qquad (8\text{-}2.3)$$

เนื่องจากความหนาแน่นของไอดี (ซึ่งหมายถึงมวลของไอดีด้วย) เพิ่มขึ้นเมื่อค่าของความดัน p_a มีค่าเพิ่มมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ในการออกแบบเครื่องยนต์จึงพยายามทำทุกอย่างเพื่อเพิ่มความดันในการดูด เช่น โดยการเพิ่มพื้นที่ของลิ้นไอดี, การขัดมันพื้นผิวภายในระบบไอดี, การลดความยาวและความคดเคี้ยวของท่อไอดี, การเลือกจังหวะการทำงานของลิ้นที่มีประสิทธิผล, การลดความดันในระบบไอเสีย, และด้วยวิธีอื่นๆอีกมากมาย

8-2.2 อุณหภูมิของก๊าซในการดูด

อุณหภูมิของไอดีจะเปลี่ยนแปลงไปในขณะที่ไอดีไหลเข้าสู่กระบอกสูบ ในเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนอุณหภูมิของไอดีลดลงเนื่องจากการกลายเป็นไอของน้ำมันเชื้อเพลิง ในขณะเดียวกันกับที่ไอดีไหลเข้าสู่กระบอกสูบไอดีจะร้อนขึ้นด้วยเนื่องจากไอดีสัมผัสกับส่วนที่ร้อนกว่าของเครื่องยนต์และผสมกับไอเสียตกค้าง สาเหตุเหล่านี้ทำให้อุณหภูมิของไอดีสูงขึ้นในระหว่างกระบวนการดูด

ระดับการร้อนเพิ่มขึ้นของไอดีแทนได้ด้วยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ΔT อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนี้ขึ้นอยู่กับภาระ, ความเร็วรอบของเพลาข้อเหวี่ยง, และสภาวะในการระบายความร้อนของเครื่องยนต์ ภาระที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของวัฏจักรสูงเพิ่มขึ้นตามมาด้วย ซึ่งจะส่งผลให้ ΔT มากขึ้น เมื่อความเร็วรอบของเพลาข้อเหวี่ยงเพิ่มขึ้น ΔT จะลดลง ดังที่ทราบกันดีแล้วว่าเมื่อไอดีร้อนขึ้นความหนาแน่นของไอดีจะลดลง มีผลให้ปริมาณไอดีหรืออากาศที่จะเข้าสู่กระบอกสูบลดน้อยลง ค่าของ ΔT สำหรับเครื่องยนต์ซึ่งเป็นข้อมูลเชิงประจักษ์คือ

เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน	$\Delta T = 10\text{-}40^{\circ}C$
เครื่องยนต์ดีเซล	$\Delta T = 10\text{-}20^{\circ}C$

ไอดีที่มีอุณหภูมิ $T_{atm} + \Delta T$ ผสมกับไอเสียตกค้างที่มีความดัน p_r ในกระบอกสูบแล้วร้อนขึ้นจนอุณหภูมิเป็น T_r ซึ่งมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของไอดีในตอนต้น

ปริมาณของไอเสียตกค้างตอนปลายของกระบวนการระบายไอเสียคำนวณได้จากสัมประสิทธิ์ไอเสียตกค้าง (Coefficient of residual gas) f ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณของไอเสียตกค้าง L_r กับปริมาณของไอดี L_{mix} ที่เข้าสู่กระบอกสูบในระหว่างกระบวนการดูด คือ

$$f = \frac{L_r}{L_{mix}} \qquad (8\text{-}2.4)$$

เมื่อ L_r และ L_{mix} มีหน่วยเป็น kmole

ค่าของ f จะสูงขึ้นเมื่อปริมาตรของห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้น นั่นคือเมื่ออัตราส่วนการอัด ε ลดลง และเมื่อความดัน p_r ของไอเสียตกค้างเพิ่มขึ้น

สำหรับเครื่องยนต์สี่จังหวะที่ในกระบอกสูบไม่มีการกวาดล้างไอเสียและทำงานโดยรับภาระเต็มพิกัด สัมประสิทธิ์ไอเสียตกค้าง f จะมีค่าอยู่ภายในขีดจำกัดต่อไปนี้

เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน	f = 0.06-0.12
เครื่องยนต์ดีเซล	f = 0.03-0.06

สำหรับเครื่องยนต์สองจังหวะ คุณภาพของการกวาดล้างไอเสียขึ้นอยู่กับระบบกวาดล้างไอเสียที่นำมาใช้ ซึ่งสัมประสิทธิ์ไอเสียตกค้าง f จะมีค่าอยู่ระหว่าง f = 0.03-0.40

การหาอุณหภูมิ T_a ของไอดีตรงปลายของกระบวนการดูดสามารถหาได้จากสมการการสมดุลพลังงานที่สถานะ a ของแผนภาพความดันกับปริมาตร คือ

$$L_{mix} M c'_p (T_{atm} + \Delta T) + L_r M c''_p T_r = (L_{mix} + L_r) M c_p T_a \qquad (8\text{-}2.5)$$

เมื่อ L_{mix} = จำนวน kmole ของไอดี

L_r = จำนวน kmole ของไอเสียตกค้าง

Mc'_p = ค่าความจุความร้อนเชิงโมลเฉลี่ย ที่ความดันคงที่ของไอดี (kJ/kmole K)

Mc''_p = ค่าความจุความร้อนเชิงโมลเฉลี่ยที่ความดันคงที่ของไอเสียตกค้าง (kJ/kmole K)

Mc_p = ค่าความจุความร้อนเชิงโมลเฉลี่ยที่ความดันคงที่ของส่วนผสมทำงาน (kJ/kmole K)

T_{atm} = อุณหภูมิของไอดีก่อนที่จะเข้าสู่กระบอกสูบ (K)

$T_{atm} + \Delta T$ = อุณหภูมิของไอดีเมื่อร้อนขึ้นหลังจากสัมผัสกับส่วนที่ร้อนของเครื่องยนต์ (K)

เนื่องจากปริมาณของไอเสียตกค้างมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณของส่วนผสมที่เผาไหม้ได้ ด้วยเหตุนี้ความแตกต่างของค่าความจุความร้อนจึงสามารถตัดทิ้งไปได้ ดังนั้นเมื่อหารสมการ (8-2.5) ด้วย L_{mix} จะได้

$$T_{atm} + \Delta T + \frac{L_r}{L_{mix}} T_r = \left(1 + \frac{L_r}{L_{mix}}\right) T_a \qquad (8\text{-}2.6)$$

แต่เนื่องจาก $\frac{L_r}{L_{mix}} = f$ ดังนั้นอุณหภูมิของไอดี T_a (มีหน่วยเป็น K) ตรงปลายของกระบวนการดูดคือ

$$T_a = \frac{T_{atm} + \Delta T + fT_r}{1 + f} \qquad (8\text{-}2.7)$$

จากสมการ (8-2.7) จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของไอดีตรงปลายของกระบวนการดูดเพิ่มขึ้นด้วยค่าของ ΔT และ f สมการ (8-2.7) นี้สามารถใช้ได้ทั้งเครื่องยนต์สองจังหวะและสี่จังหวะ

ค่าของอุณหภูมิ T_r และ T_a เป็นดังต่อไปนี้

	T_r (K)	T_a (K)
เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน	900-1100	340-400
เครื่องยนต์ดีเซล	700-900	310-360

8-2.3 ประสิทธิภาพการดูดไอดี

ปริมาณไอดีจริงที่บรรจุใหม่เข้าไปในกระบอกสูบที่ความดันและอุณหภูมิบรรยากาศจะน้อยกว่าปริมาณที่ควรจะเป็นเสมอ เนื่องจากไอดีได้รับความร้อนแล้วความหนาแน่นน้อยลง

ความสามารถในการบรรจุไอดีเข้ากระบอกสูบจะหาได้จากประสิทธิภาพการดูดไอดี (Charge efficiency) หรือประสิทธิภาพเชิงปริมาตร (Volumetric efficiency) η_V ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณไอดีที่บรรจุเข้ากระบอกสูบจริงกับปริมาตร V_d ที่ควรจะดูดได้ของกระบอกสูบที่ความดันและอุณหภูมิก่อนเข้าระบบไอดี คือ

$$\eta_V = \frac{m_{mix}}{m_{theo}} = \frac{L_{mix}}{L_{theo}} \qquad (8\text{-}2.8)$$

เมื่อ m_{mix} และ L_{mix} = ปริมาณของไอดีจริงที่เข้าไปในกระบอกสูบ (kg หรือ kmole)

m_{theo} และ L_{theo} = ปริมาณของไอดีที่ควรจะเข้าไปในปริมาตร V_d ของกระบอกสูบ (kg หรือ kmole)

จากคำนิยามของประสิทธิภาพ η_V , ไอดีที่อุณหภูมิ T_{atm} และความดัน p_{atm} จะเข้าไปในกระบอกสูบได้ในปริมาณเท่ากับ $\eta_V V_d$

โดยการใช้สมการของสถานะ, pV = 8314LT, จะสามารถคำนวณหาปริมาณไอดี L_{mix}, ปริมาณไอเสียตกค้าง L_r, และปริมาณส่วนผสม L_a ได้จาก

$$L_{mix} = \eta_V \frac{p_{atm} V_d}{8314 T_{atm}} \qquad (8\text{-}2.9)$$

$$L_r = \frac{p_r V_r}{8314 T_r} \qquad (8\text{-}2.10)$$

$$L_a = L_{mix} + L_r = \frac{p_a V_a}{8314 T_a} \qquad (8\text{-}2.11)$$

แทนสมการ (8-2.9) (8-2.10) และ (8-2.11) ลงในสมการ (8-2.5) แล้วไม่คิดความแตกต่างของค่าความจุความร้อนทั้งสามค่าจะได้

$$\eta_V \frac{p_{atm} V_d (T_{atm} + \Delta T)}{8314 T_{atm}} + \frac{p_r V_r T_r}{8314 T_r} = \frac{p_a V_a T_a}{8314 T_a} \qquad (8\text{-}2.12)$$

เมื่อความดันมีหน่วยเป็น N/m^2 ปริมาตรมีหน่วยเป็น m^3 และอุณหภูมิมีหน่วยเป็น K

เนื่องจาก $V_d = (\varepsilon - 1)V_c$ และ $V_r = V_c$, เมื่อแทนลงในสมการ (8-2.12) แล้วหารด้วย V_c จะได้

$$\eta_V \frac{p_{atm}(\varepsilon - 1)(T_{atm} + \Delta T)}{T_{atm}} + p_r = \varepsilon p_a \qquad (8\text{-}2.13)$$

ดังนั้นประสิทธิภาพการดูดสำหรับเครื่องยนต์สี่จังหวะ คือ

$$\eta_V = \frac{\varepsilon p_a - p_r}{(\varepsilon - 1)p_{atm}} \frac{T_{atm}}{T_{atm} + \Delta T} = \frac{1}{\varepsilon - 1}\left(\varepsilon \frac{p_a}{p_{atm}} - \frac{p_r}{p_{atm}}\right)\frac{T_{atm}}{T_{atm} + \Delta T} \qquad (8\text{-}2.14)$$

ในการสร้างสมการสำหรับประสิทธิภาพการดูดของเครื่องยนต์สองจังหวะ จะต้องนำความจริงที่ว่าช่องกวาดล้างไอเสีย (Scavenging ports) และช่องไอเสีย (Exhaust ports) มีตำแหน่งอยู่ในระหว่างระยะช่วงชักของลูกสูบมาพิจารณาด้วย

จากสมการ (8-2.14) จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการดูด η_V ขึ้นอยู่กับความดัน p_a ตรงปลายของกระบวนการดูดและความดัน p_r ตรงปลายกระบวนการคายไอเสีย, อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ΔT ของไอดี, และอัตราส่วนการอัด ε

สมการสำหรับประสิทธิภาพเชิงปริมาตรที่ใช้ได้ทั้งเครื่องยนต์สองจังหวะและสี่จังหวะคือ

$$\eta_v = \frac{\varepsilon p_a T_{atm}}{(\varepsilon - 1)(1 + f)p_{atm} T_a} \qquad (8\text{-}2.15)$$

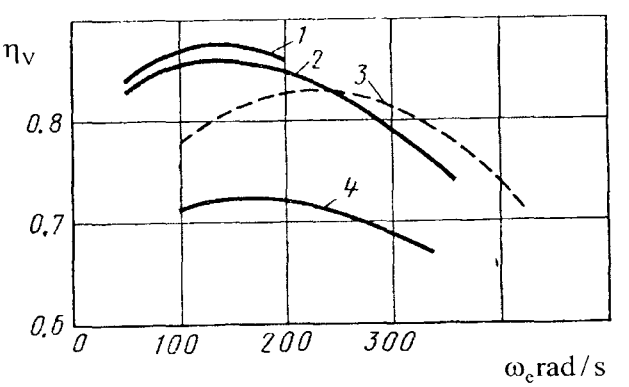
ความดัน p_a ตรงปลายของของกระบวนการดูดเป็นพารามิเตอร์พื้นฐานที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการดูด η_V ยกตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนแปลงค่าของความดัน p_a จำนวน 1 bar จะทำให้ประสิทธิภาพการดูด η_V เปลี่ยนแปลงไป 15-18% แต่การเปลี่ยนแปลงความดัน p_r ในจำนวนที่เท่ากันจะทำให้ประสิทธิภาพการดูด η_V เปลี่ยนแปลงเพียง 1-2% เท่านั้นเมื่อสภาวะอื่นๆเหมือนกัน

ค่าของ p_aขึ้นอยู่กับความต้านทานการไหลในระบบไอดี คือขึ้นอยู่กับค่าความดันตก (Pressure drop) Δp ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของความเร็วของส่วนผสมที่เผาไหม้ได้ อุณหภูมิที่ร้อนเพิ่มขึ้น ΔT ของไอดีส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูด η_V ลดลง ผลจากการทดสอบเครื่องยนต์แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนการอัด ε มีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพการดูด η_V

ขนาดของกระบอกสูบ, ลูกสูบ ตำแหน่งของลิ้น, การออกแบบของระบบไอดี, และจังหวะของลิ้นมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการดูด η_V ด้วย ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบโตขึ้นจะทำให้สามารถเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลิ้นได้ ลิ้นที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะมีผลทำให้ความเร็วของไอดีในระบบไอดีลดลง และทำให้ความต้านทานการไหลของระบบไอดีลดลงอีกด้วย

ขนาดของกระบอกสูบสามารถเพิ่มขึ้นได้ด้วยการใช้ช่วงชักที่สั้นลง ซึ่งเป็นกรณีสำหรับเครื่องยนต์ที่มีอัตราส่วนระหว่างระยะช่วงชักกับเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบน้อยกว่าหนึ่ง (S/D = 0.8-0.9) เครื่องยนต์แบบนี้จะมีความเร็วลูกสูบน้อยกว่าเครื่องยนต์ธรรมดา (S/D = 1) ด้วย

การออกแบบโดยให้ลิ้นอยู่บนหัวสูบ (Overhead valves) ทำให้สามารถลดลงจำนวนข้องอในท่อไอดีให้น้อยลงได้และเป็นไปได้ที่การบรรจุไอดีเข้ากระบอกสูบอย่างสม่ำเสมอจะเป็นไปอย่างมีประสิทธิผล โดยมีส่วนช่วยให้ความต้านทานในระบบไอดีลดน้อยลงด้วย



รูปที่ 8-2.2 เส้นโค้งของประสิทธิภาพการดูด η_V เทียบกับความเร็วเชิงมุม ω_e ของเพลาข้อเหวี่ยง

รูปที่ 8-2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการดูดเทียบกับความเร็วเชิงมุม ω_e ของเพลาข้อเหวี่ยง กราฟหมายเลข 1 เป็นของเครื่องยนต์ดีเซล ส่วนกราฟหมายเลข 2, 3 และ 4 เป็นของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน

จังหวะการทำงานของลิ้นซึ่งมักจะกำหนดจากข้อมูลเชิงประจักษ์เพื่อให้ได้ปริมาณไอดีสูงสุดในระหว่างช่วงความเร็วรอบของเพลาข้อเหวี่ยงที่แน่นอนช่วงหนึ่ง สำหรับเครื่องยนต์ของรถยนต์ซึ่งทำงานโดยความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงกว้าง จะต้องเลือกจังหวะการทำงานของลิ้นให้เหมาะสมกับการทำงานของเครื่องยนต์ในสภาวะต่างๆนั้นด้วย

ค่าของประสิทธิภาพการดูด η_V เมื่อพิจารณาจากความเร็วรอบซึ่งเครื่องยนต์จะให้กำลังสูงสุดเป็นดังนี้

เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน:	ที่ใช้ Side valves	$\eta_V = 0.70\text{-}0.75$
	ที่ใช้ Overhead valves	$\eta_V = 0.70\text{-}0.85$
เครื่องยนต์ดีเซล:		$\eta_V = 0.75\text{-}0.90$

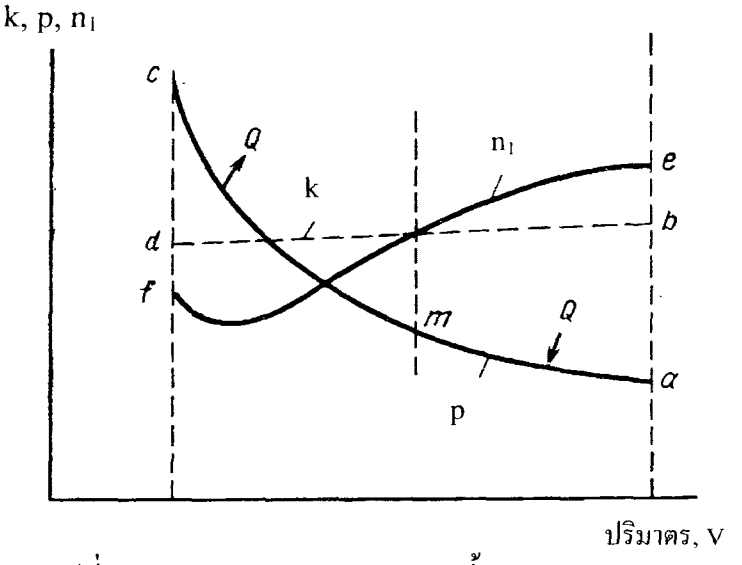
8-3 กระบวนการอัด

กระบวนการอัดเป็นการสร้างสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการจุดระเบิดและการเผาไหม้ส่วนผสมทำงาน และเพิ่มความแตกต่างของอุณหภูมิกับอัตราส่วนความดันของผลผลิตจากการเผาไหม้ในวัฏจักร กระบวนการอัดมีอิทธิพลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์

กระบวนการอัดในวัฏจักรจริงเกิดขึ้นในสภาวะที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างไอดีกับชิ้นส่วนที่ร้อนกว่าของเครื่องยนต์ ธรรมชาติที่ซับซ้อนของการแลกเปลี่ยนความร้อนนี้ไม่สามารถแสดงอย่างถูกต้องได้ด้วยสมการทางอุณหพลศาสตร์ง่ายๆ ด้วยเหตุนี้จึงสมมติให้กระบวนการอัดเกิดขึ้นแบบโพลี่โทรปิก (Polytropic) ด้วยเลขชี้กำลัง n_1 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่มีค่าคงที่ตลอดทั้งกระบวนการอัด

รูปที่ 8-3.1 แสดงเส้นโค้งของวิถีกระบวนการอัด (ac), เส้นโค้งของเลขชี้กำลังไอเซนโทรปิก k (bd), และเส้นโค้งของเลขชี้กำลังโพลี่โทรปิก n_1 (ef)

ตรงจุดเริ่มต้นของกระบวนการอัด อุณหภูมิของไอดีที่เข้ามาใหม่น้อยกว่าอุณหภูมิของชิ้นส่วนที่ล้อมรอบมาก เพราะฉะนั้นในช่วงแรกของกระบวนการอัด (วิถีส่วน am) เกิดขึ้นพร้อมกับการมีความร้อนจากชิ้นส่วนที่ร้อนกว่าถ่ายเทเข้าสู่ไอดี ในกรณีนี้เลขชี้กำลังโพลี่โทรปิกมีค่ามากกว่าเลขชี้กำลังไอเซนโทรปิก ($n_1 > k$)



รูปที่ 8-3.1 กระบวนการอัดและเลขชี้กำลัง k กับ n_l

ในการอัดช่วงต่อไป (วิถีส่วน mc) อุณหภูมิของไอดีเพิ่มมากกว่าอุณหภูมิของชิ้นส่วนที่อยู่โดยรอบ ความร้อนจึงถ่ายเทออกจากไอดีสู่ชิ้นส่วนที่ล้อมรอบ ในกรณีนี้เลขชี้กำลังโพลี่โทรปิกมีค่าน้อยกว่าเลขชี้กำลังไอเซนโทรปิก ($n_l < k$)

การถ่ายเทความร้อนระหว่างไอดีกับชิ้นส่วนที่ร้อนกว่าหรือเย็นกว่าตรงส่วนต่างๆของระบบไอดีที่กล่าวมาแล้วทั้งสองกรณีนี้อาจจะเกิดขึ้นพร้อมๆกันก็ได้ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเฉพาะจุดของแต่ละส่วนในระบบไอดี

จากข้อมูลเชิงประจักษ์พบว่าปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจากไอดีในวิถีส่วน mc มากกว่าปริมาณความร้อนที่ไอดีได้รับในวิถีส่วน am ด้วยเหตุนี้ ค่าเลขชี้กำลังโพลี่โทรปิกเฉลี่ย n_l จึงมีค่าน้อยกว่าเลขชี้กำลังไอเซนโทรปิก k เสมอ (เส้นโค้งของเลขชี้กำลังโพลี่โทรปิกในการอัดอยู่ใต้เส้นโค้งของเลขชี้กำลังไอเซนโทรปิก)

ค่าเลขชี้กำลังโพลี่โทรปิกเฉลี่ยในการอัด n_l สำหรับเครื่องยนต์ต่างๆ เป็นดังนี้

เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน	$n_l = 1.32\text{-}1.39$
เครื่องยนต์ก๊าซ	$n_l = 1.30\text{-}1.38$
เครื่องยนต์ดีเซล	$n_l = 1.36\text{-}1.40$

ค่าเลขชี้กำลังโพลี่โทรปิกในการอัดสามารถพิจารณาให้เท่ากับ

$$n_l = k \pm (0.02 - 0.03) \qquad (8\text{-}3.1)$$

โดยค่าของ k จะหาได้จาก

$$a + bT_a(\varepsilon^{k-1} + 1) = \frac{8314}{k-1} \qquad (8\text{-}3.2)$$

ค่าเลขชี้กำลังโพลี่โทรปิกเฉลี่ยของกระบวนการอัด n_1 ขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของเพลาข้อเหวี่ยง, ขนาดของกระบอกสูบ, อัตราการระบายความร้อน, รูปทรงของห้องเผาไหม้, และรูปลักษณะ (Feature) ทางการออกแบบของเครื่องยนต์ ความเร็วรอบของเพลาข้อเหวี่ยงจะสูงขึ้นเมื่อค่าเลขชี้กำลังโพลี่โทรปิกเฉลี่ยในการอัด n_1 สูงขึ้น แต่จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเฉลี่ยของกระบวนการอัดและอัตราการระบายความร้อนเพิ่มขึ้น ผลของภาระและอัตราส่วนการอัดที่มีต่อค่าเลขชี้กำลังโพลี่โทรปิกเฉลี่ยในการอัด n_1 นั้นน้อยจนสามารถตัดทิ้งไปได้

อัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนควรเป็นค่าที่ไม่สูงจนทำให้อุณหภูมิของส่วนผสมทำงานหลังการอัดสูงเกินอุณหภูมิที่สามารถเกิดการจุดระเบิดได้เอง (Self-ignition) ของเชื้อเพลิง อุณหภูมิตรงปลายของกระบวนการอัดอากาศของเครื่องยนต์ดีเซลควรจะสูงกว่าอุณหภูมิที่เกิดการจุดระเบิดได้เองของเชื้อเพลิง 200-300 $^{\circ}$C สิ่งนี้จะทำให้เกิดความไว้วางใจได้ในการเริ่มติดเครื่องและการเดินเครื่องได้เรียบภายใต้สภาวะของภาระต่างๆ

อัตราส่วนการอัด ε ของเครื่องยนต์เป็นดังต่อไปนี้

เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน	ε = 6-12
เครื่องยนต์ดีเซล	ε = 16-20

ความดันตรงปลายของกระบวนการอัด (ที่สถานะ c) สามารถหาได้จากสมการของกระบวนการโพลี่โทรปิก $pV^{n_1} = \text{const}$

สมการต่อไปนี้ใช้กับกระบวนการอัดแบบโพลี่โทรปิก คือ

$$p_a V_a^n = p_c V_c^{n_1} \qquad (8\text{-}3.3)$$

ดังนั้น
$$p_c = p_a\left(\frac{V_a}{V_c}\right)^{n_1} \qquad (8\text{-}3.4)$$

หรือ
$$p_c = p_a \varepsilon^{n_1} \qquad (8\text{-}3.5)$$

ค่าความดันตรงปลายของกระบวนการอัดมีค่าดังต่อไปนี้

เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน	p_c = 8-15 bar
เครื่องยนต์ดีเซล	p_c = 30-45 bar

อุณหภูมิตรงปลายของกระบวนการอัดจะหาได้จากสมการของกระบวนการโพลี่โทรปิก $TV^{n_1-1} = c$

สมการต่อไปนี้ใช้กับกระบวนการอัดแบบโพลี่โทรปิก คือ

$$T_a V_a^{n_1-1} = T_c V_c^{n_1-1} \quad (8\text{-}3.6)$$

ดังนั้น $$T_c = T_a \varepsilon^{n_1-1} \quad (8\text{-}3.7)$$

อุณหภูมิตรงปลายของกระบวนการอัดมีค่าดังนี้

เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน T_c = 600-750 K

เครื่องยนต์ดีเซล T_c = 750-900 K

ความดันและอุณหภูมิตรงปลายของกระบวนการอัดขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการอัด, ความเร็วรอบของเพลาข้อเหวี่ยง, จำนวนแหวนลูกสูบ, และระดับการสึกหรอของแหวนลูกสูบ

ค่าความจุความร้อนเชิงโมลของอากาศที่ปลายของกระบวนการอัดซึ่งอุณหภูมิเป็น T_c จะหาได้จาก

$$(Mc_v)_a = 19\,344 + 2.219\,T \quad (8\text{-}3.8)$$

รายละเอียดค่าความจุความร้อนเชิงโมลอยู่ในภาคผนวก

8-4 กระบวนการเผาไหม้

การเผาไหม้ของไอดีซึ่งก่อให้เกิดการขยายตัวของผลผลิตจากการเผาไหม้ตามมานั้นเป็นกระบวนการที่สำคัญของวัฏจักรเครื่องยนต์สันดาปภายใน ในระหว่างกระบวนการเผาไหม้ พลังงานเคมีของเชื้อเพลิงจะเปลี่ยนรูปไปเป็นความร้อน และส่วนหนึ่งของความร้อนนี้จะเปลี่ยนรูปไปเป็นงานกล

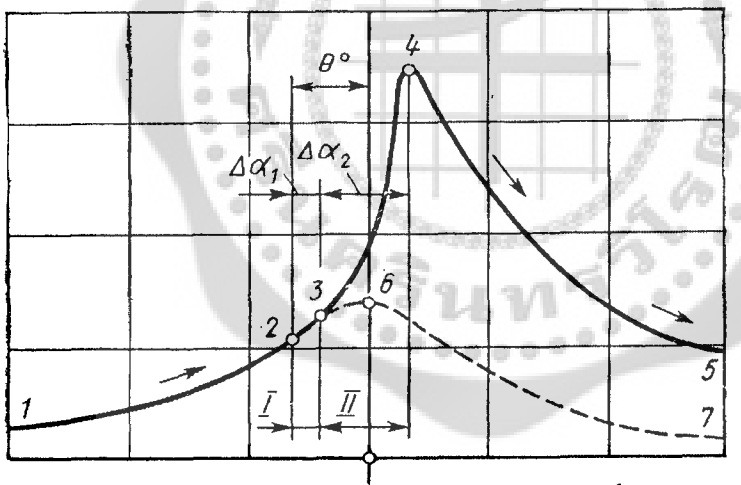
ธรรมชาติของกระบวนการเผาไหม้มีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อคุณลักษณะของกำลังกับประสิทธิภาพความร้อนและการสึกหรอของชิ้นส่วนหลักของเครื่องยนต์ เนื่องจากพฤติกรรมของกระบวนการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับปัจจัยจำนวนมาก และพฤติกรรมในเบื้องต้นนั้นขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมส่วนผสมไอดีกับวิธีการจุดระเบิด ด้วยเหตุนี้กระบวนการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนกับเครื่องยนต์ดีเซลจึงพิจารณาแยกออกจากกัน

8-4.1 การเผาไหม้ในเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน

กระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจริงในเครื่องยนต์สันดาปภายในที่กระบวนการเผาไหม้เกิดขึ้นด้วยการจุดประกายไฟไม่ได้เกิดขึ้นแบบปริมาตรคงที่ดังเช่นที่พิจารณาในวัฏจักรทางทฤษฎี แต่จะเริ่มต้นก่อนที่ลูกสูบจะเคลื่อนมาถึงศูนย์ตายบนและสิ้นสุดหลังจากลูกสูบผ่านศูนย์ตายบนไปแล้ว ดังนั้นกระบวนการเผาไหม้จึงเกิดขึ้นใกล้เคียงกับศูนย์ตายบนและจะสะดวกกว่าถ้าจะ

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความดันในกระบวนการนี้ด้วยแผนภาพความดันกับมุมหมุนของข้อเหวี่ยง φ (หรือเวลา) ที่แสดงไว้ในรูปที่ 8-4.1 วิถีที่เป็นเส้นประ (ส่วน 3-6-7) แสดงการเปลี่ยนแปลงความดันภายในกระบอกสูบเมื่อระบบจุดระเบิดถูกปิดไว้ไม่ให้เกิดการจุดระเบิด ความไม่สมมาตรระหว่างวิถีของกระบวนการอัด 1-6 กับวิถีของกระบวนการขยายตัว 6-7 เกิดขึ้นเนื่องจากการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับผนังกระบอกสูบและเนื่องจากมีการรั่วไหลของก๊าซบางส่วนผ่านช่องว่างระหว่างแหวนลูกสูบกับกระบอกสูบด้วย

กระบวนการเผาไหม้เริ่มต้นเมื่อประกายไฟฟ้ากระโดดข้ามเขี้ยวหัวเทียนซึ่งเป็นสถานะ 2 ในแผนภาพ โดยมีการจุดระเบิดล่วงหน้าเป็นมุม θ หลังจากประกายไฟฟ้ากระโดดข้ามเขี้ยวหัวเทียน ความดันในกระบอกสูบยังคงเท่ากับกรณีที่ระบบจุดระเบิดถูกปิดไว้ไม่ให้ทำงานช่วงหนึ่ง (วิถีส่วน 2-3) ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าปริมาณของไอดีที่เกิดการเผาไหม้ในช่วงนี้นั้นน้อยมากและความร้อนจากผลผลิตจากการเผาไหม้ถ่ายเทให้กับไอดีส่วนที่เหลือซึ่งยังไม่เผาไหม้และผนังห้องเผาไหม้กับหัวลูกสูบ (Piston crown) จากนั้นความดันในห้องเผาไหม้จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว (วิถีส่วน 3-4)



รูปที่ 8-4.1 แผนภาพความดันกับมุมหมุนของข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนสี่จังหวะ

เปลวสันดาปส่วนหน้า (Flame front) ไม่ได้หยุดการแพร่ออกไปลงในกระบอกสูบในขณะที่ความดันมีค่าสูงสุดเพราะว่าส่วนผสมที่เผาไหม้แล้วยังปลดปล่อยความร้อนออกมาไม่หมด แต่ยังเกิดการเผาไหม้เสริม (Afterburning) ต่อมาอีก การเผาไหม้เสริมในตอนหลังนี้เกิดขึ้นพร้อมกับการลดลงของความดัน

เนื่องจากปริมาตรของกระบอกสูบเพิ่มมากขึ้นเมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ไปสู่ศูนย์ตายล่าง ตามปกติการแผ่กระจายความร้อนเนื่องจากการเผาไหม้เสริมต่อมาในตอนหลังของส่วนผสมในกระบอกสูบมักจะพิจารณาโดยถือให้เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการขยายตัว

คุณลักษณะของกระบวนการเผาไหม้ในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ทั้งสามช่วงสามารถพิจารณาได้จากแผนภาพความดันกับมุมหมุนของข้อเหวี่ยงดังต่อไปนี้

ช่วง I เรียกว่าช่วงแรก (Initial phase) ของการเผาไหม้ ในช่วงนี้ Preflame oxidation ของเชื้อเพลิงเกิดขึ้นโดยอุณหภูมิสูงขึ้นเล็กน้อยโดยไม่มีผลต่อความดัน อัตราการเผาไหม้ในช่วงนี้ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับปัจจัยทางเคมี (คุณสมบัติของเชื้อเพลิงและส่วนประกอบของส่วนผสม)

ช่วงแรกที่อยู่ในแผนภาพความดันกับมุมหมุนของข้อเหวี่ยงเป็นมุมหมุน $\Delta\alpha_1$ และสถานะ 2 กับ 3 แสดงความดันที่เพิ่มขึ้นในช่วงล่าช้า (Delay period) ระยะเวลาในช่วงนี้ได้รับอิทธิพลจากสัมประสิทธิ์อากาศส่วนเกินกับสัมประสิทธิ์ไอเสียตกค้าง โครงสร้างโมเลกุลของเชื้อเพลิง, พลังงานจากแหล่งจุดระเบิด, อัตราส่วนการอัด, และภาระของเครื่องยนต์ ในระหว่างช่วงแรกของการเผาไหม้ ส่วนผสมที่อยู่ในกระบอกสูบประมาณ 6-8% ถูกเผาไหม้ การเผาไหม้ช่วงแรกใช้เวลาประมาณ 4-6% ของมุมหมุนของเพลาข้อเหวี่ยง

ช่วงที่สองของการเผาไหม้เรียกว่าช่วงการเผาไหม้ที่เห็นได้ชัดหรือช่วงการเผาไหม้ประสิทธิผล (Period of visible or effective combustion) ในระหว่างช่วงนี้ ส่วนผสมประมาณ 90% ถูกเผาไหม้และอัตราการเผาไหม้กับความดันในกระบอกสูบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ช่วงนี้เป็นมุมหมุนของเพลาข้อเหวี่ยงเท่ากับ $\Delta\alpha_2$ ช่วงนี้เริ่มต้นในขณะที่ความดันเริ่มที่จะเพิ่มขึ้น (สถานะ 3) และสิ้นสุดลงตรงขณะที่ความดันในกระบอกสูบมีค่าสูงสุด (สถานะ 4) การเผาไหม้ช่วงนี้จะเป็นเวลาเทียบเท่ากับการหมุนของเพลาข้อเหวี่ยง 20-30° และขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของส่วนผสม, อัตราส่วนการอัด, มุมจุดระเบิดล่วงหน้า, รูปทรงของห้องเผาไหม้, อัตราส่วนความปั่นป่วนของส่วนผสม (Mixture turbulence ratio), และภาระของเครื่องยนต์

จากแผนภาพความดันกับมุมหมุนของข้อเหวี่ยง ช่วงที่สองของการเผาไหม้สามารถประเมินได้จากอัตราการเพิ่มความดัน (Rate of pressure rise) ซึ่งเป็นความดันที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการหมุนของเพลาข้อเหวี่ยงหนึ่งองศา ค่าเฉลี่ยของอัตราการเพิ่มความดันเรียกว่า**ความแข็งแกร่ง** (Stiffness) ของ

กระบวนการเผาไหม้ ซึ่งหาได้จากอัตราส่วน $\Delta p / \Delta \alpha_2$ เมื่อ $\Delta p = p_4 - p_3$ คือ ความแตกต่างระหว่างความดันสูงสุดของวัฏจักร (สถานะ 4) กับความดันตรงสถานะเริ่มต้นของช่วงการเผาไหม้ประสิทธิผล (สถานะ 3) ส่วน $\Delta \alpha_2$ คือมุมของเพลาข้อเหวี่ยงที่หมุนไปซึ่งเทียบได้กับเวลาที่ใช้ไปในการเพิ่มความดัน Δp ช่วงการเผาไหม้ประสิทธิผล

สำหรับการเผาไหม้แบบปกติในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน ค่าเฉลี่ยของอัตราการเพิ่มความดันอยู่ระหว่าง 1.2-2.6 bar/deg ค่านี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการอัด, อัตราส่วนความปั่นป่วนของส่วนผสม, จังหวะการจุดระเบิด, และปัจจัยอื่นๆ

ถ้าอัตราส่วน $\Delta p / \Delta \alpha_2 <$ 1 bar/deg การเผาไหม้อาจจะเกิดขึ้นต่อเนื่องไปในกระบวนการขยายตัวด้วย สิ่งนี้จะทำให้ประสิทธิภาพความร้อนลดลง ถ้าอัตราส่วน $\Delta p / \Delta \alpha_2 > 0.26$ MN/m^2 deg การทำงานของเครื่องยนต์จะกลายเป็น **"แข็งแกร่ง"** (Stiff) นั่นคือการเพิ่มขึ้นของความดันรวดเร็วมากเกินไป สิ่งนี้จะไปเพิ่มภาระที่กระทำกับชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ ทำให้เกิดการสึกหรอสูงและบางครั้งอาจทำให้ชิ้นส่วนเสียหายได้

ข้อมูลเชิงประจักษ์แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ซึ่งแสดงถึงงาน (หรือกำลัง) สุทธิสูงสุดบนแผนภาพอินดิเคเตอร์จะได้จากการเกิดความดันสูงสุดของวัฏจักรตรงกับมุมหมุนของเพลาข้อเหวี่ยง 10-15° หลังศูนย์ตายบน

การเผาไหม้ช่วงที่สามเรียกว่าการเผาไหม้เสริมในตอนหลังของส่วนผสม (Afterburning of the mixture) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการขยายตัวไปตามวิถี 4-5 ช่วงที่สามในเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนนั้นสั้นและหาจุดสิ้นสุดของช่วงที่สามนี้ได้ยากมาก เพราะว่าในการหาจุดสิ้นสุดของช่วงที่สามจะต้องทราบช่วงที่เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของส่วนผสม ช่วงเวลาที่เกิดการเผาไหม้ช่วงที่สามขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของส่วนผสม, มุมจุดระเบิดล่วงหน้า, และอัตราส่วนความปั่นป่วนของส่วนผสม

เวลาในการเผาไหม้ส่วนผสม (เป็นวินาที) สามารถหาได้จาก

$$\tau_c = \frac{\pi \, \Delta\alpha}{180\omega_e} \qquad (8\text{-}4.1)$$

เมื่อ $\Delta\alpha$ = มุมหมุนของเพลาข้อเหวี่ยง (เป็นองศา)

ω_e = ความเร็วเชิงมุมของเพลาข้อเหวี่ยง เป็น rad/s

สำหรับเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน เวลาในการเผาไหม้ส่วนผสมอยู่ระหว่าง τ_c = 0.001-0.002 s

เวลาในการเผาไหม้ส่วนผสมในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ขึ้นอยู่กับความเร็วในการแพร่ของเปลวสันดาปส่วนหน้า (Flame front) หรือเรียกว่าอัตราการเผาไหม้ ในระหว่างกระบวนการเผาไหม้ช่วงต่างๆ อัตราการเผาไหม้ไม่คงที่แต่จะเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงที่ค่อนข้างกว้าง สำหรับเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนที่เกิดการเผาไหม้อย่างปกติ อัตราการเผาไหม้โดยเฉลี่ยมีค่าอยู่ระหว่าง 20-30 m/s

การคำนวณหาอัตราการเผาไหม้ยังสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างเส้นทางของเปลวสันดาป (Flame) (คือระยะทางจากเขี้ยวหัวเทียนถึงจุดที่ไกลที่สุดในห้องเผาไหม้) กับเวลาในขณะที่เริ่มการจุดระเบิดถึงในขณะที่ความดันถึงจุดสูงสุด

8-4.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการเผาไหม้

อัตราการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบกับอัตราส่วนความปั่นป่วนของส่วนผสม, อัตราส่วนการอัด, รูปทรงของห้องเผาไหม้, จังหวะการจุดระเบิด, ตำแหน่งของหัวเทียน, และภาระของเครื่องยนต์

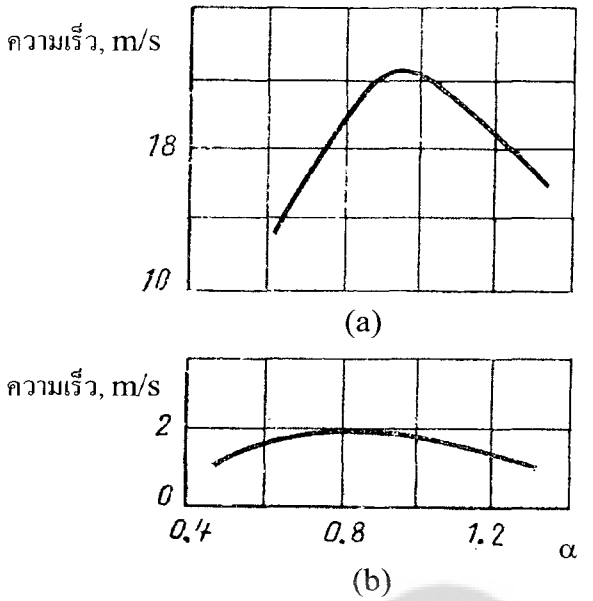
ส่วนประกอบของส่วนผสมซึ่งอธิบายได้ด้วยสัมประสิทธิ์อากาศส่วนเกินกับสัมประสิทธิ์ไอเสียตกค้างมีผลอย่างมากต่อกระบวนการเผาไหม้และอัตราการแพร่ของเปลวสันดาปส่วนหน้า

มีความสัมพันธ์ที่แน่นอนระหว่างปริมาณของเชื้อเพลิงกับอากาศในส่วนผสมซึ่งจะทำให้ส่วนผสมที่สามารถเผาไหม้ได้ในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนสามารถจุดระเบิดได้ ขอบเขตเหล่านี้เรียกว่าขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่างของความสามารถเผาไหม้ได้ (Combustibility)

ขีดจำกัดเหล่านี้มีค่าไม่คงที่สำหรับเชื้อเพลิงต่างๆ และมีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, ความดัน, และอัตราส่วนความปั่นป่วนของส่วนผสม ยกตัวอย่างเช่น ขีดจำกัดบนสำหรับน้ำมันก๊าซโซลีนในสภาวะปกติจะถูกจำกัดด้วยสัมประสิทธิ์อากาศที่อยู่ระหว่าง $\alpha = 0.3\text{-}0.5$ และขีดจำกัดล่างจะถูกจำกัดด้วยสัมประสิทธิ์อากาศที่อยู่ระหว่าง $\alpha = 1.2\text{-}1.3$

ค่าของขีดจำกัดของความสามารถเผาไหม้ได้จะกว้างขึ้นอีกเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิของส่วนผสมที่เผาไหม้ได้สูงขึ้น แต่ค่าของขีดจำกัดของความสามารถเผาไหม้ได้กลับแคบลงเมื่อความดันเพิ่มมากขึ้น

รูปที่ 8-4.2 a และ b เป็นกราฟที่เป็นผลจากการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการเผาไหม้ของส่วนผสมระหว่างน้ำมันก๊าซโซลีนกับอากาศในเครื่องยนต์กับในบอมบ์แคลอรีมิเตอร์นั้นขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์อากาศ



รูปที่ 8-4.2 การแปรผันของอัตราการเผาไหม้ของส่วนผสมระหว่างน้ำมันก๊าซโซลีนกับอากาศเทียบกับสัมประสิทธิ์อากาศ (a) ในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ และ (b) ในบอมบ์แคลอรีมิเตอร์

เส้นกราฟแสดงให้เห็นว่าอัตราการเผาไหม้จะมีค่าสูงสุดเมื่อสัมประสิทธิ์อากาศมีค่าอยู่ในช่วง $\alpha = 0.8\text{-}0.9$ ความเร็วในการแพร่ของเปลวสันดาปส่วนหน้าในกระบอกสูบซึ่งส่วนผสมมีความปั่นป่วนนั้นสูงกว่าในบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ซึ่งส่วนผสมไม่มีความปั่นป่วนถึง 8-12 เท่าตัว ถ้าสัมประสิทธิ์อากาศมีค่าอยู่ในช่วง $\alpha = 0.8\text{-}0.9$ เวลาที่ผ่านไปก่อนที่ความดันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วได้รับการพิสูจน์แล้วว่าจะต้องมีค่าน้อยที่สุดและช่วงการเผาไหม้ประสิทธิผลจะเกิดขึ้นใกล้เคียงกับศูนย์ตายบนถ้าเลือกจังหวะการจุดระเบิดได้อย่างถูกต้อง กรณีนี้ทำให้เกิดความดันจากการเผาไหม้สูงสุดและส่งผลให้เครื่องยนต์ผลิตกำลังสูงสุดด้วย แต่การประหยัดเชื้อเพลิงจะลดลง

เมื่อสัมประสิทธิ์อากาศเปลี่ยนแปลงไปจากค่าช่วงนี้ ซึ่งทำให้เกิดส่วนผสมหนาหรือบาง และอัตราการเผาไหม้ของส่วนผสมจะลดลง สิ่งนี้สามารถอธิบายได้จากการลดลงของอุณหภูมิปฏิกิริยา เนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ทางเคมีเมื่อเครื่องยนต์ทำงานด้วยส่วนผสมหนา และเนื่องจากจะต้องเสียความร้อนมากขึ้นในการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศส่วนเกินเมื่อเครื่องยนต์ทำงานด้วยส่วนผสมบาง

เครื่องยนต์ก๊าซโซลีนจะประหยัดเชื้อเพลิงมากที่สุดเมื่อสัมประสิทธิ์อากาศมีค่าอยู่ในช่วง $\alpha = 1.05\text{-}1.15$

เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น อัตราการเผาไหม้ก็จะเพิ่มขึ้นด้วยเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสูงมากขึ้น

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเริ่มต้นทำให้อัตราการเผาไหม้ของส่วนผสมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ถ้าส่วนผสมหนามากจะสังเกตเห็นผลในทางตรงกันข้าม นั่นคือ ความเร็วจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นเพิ่มมากขึ้น

การที่อัตราการเผาไหม้ของส่วนผสมขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการอัดสามารถอธิบายได้จากผลร่วมกันของอุณหภูมิเริ่มต้น, ความดันเริ่มต้น, และความดันของไอเสียตกค้าง อัตราส่วนการอัดที่สูงมากขึ้นจะเพิ่มอุณหภูมิกับความดันตรงสถานะสุดท้ายของกระบวนการอัดและลดปริมาณไอเสียตกค้างสัมพัทธ์ในส่วนผสมทำงาน ซึ่งจะทำให้อัตราการเผาไหม้เพิ่มมากขึ้น

รูปทรงของห้องเผาไหม้มีอิทธิพลต่ออัตราการเผาไหม้ด้วย เพราะว่ารูปทรงของห้องเผาไหม้จะควบคุมการระบายความร้อนสู่แหล่งอุณหภูมิต่ำและแสดงให้เห็นเส้นทางที่เปลวสันดาปเคลื่อนที่ผ่าน ถ้าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวของห้องเผาไหม้ต่อปริมาตรของห้องเผาไหม้มีค่าน้อย ความร้อนที่จะระบายออกไปผ่านผนังห้องเผาไหม้ก็น้อยลงด้วย ซึ่งมีผลให้ความร้อนที่ปลดปล่อยจากการเผาไหม้มีค่ามากขึ้นและเพิ่มอัตราการเผาไหม้ให้มากขึ้นอีกด้วย

มุมที่แสดงจังหวะการจุดระเบิดของส่วนผสมมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของกระบวนการเผาไหม้ด้วย เพื่อที่จะให้การเผาไหม้สิ้นสุดลงใกล้กับศูนย์ตายบนและได้การขยายตัวสูงสุดหลังจากส่วนผสมได้รับความร้อน ควรจะทำให้ส่วนผสมเกิดการจุดระเบิดล่วงหน้าก่อนที่ลูกสูบจะเคลื่อนที่ถึงศูนย์ตายบน นั่นคือ ตรงตำแหน่งที่สิ้นสุดกระบวนการอัด

ถ้าจังหวะการจุดระเบิดถูกตั้งไว้อย่างถูกต้อง ช่วงการเผาไหม้ประสิทธิผลจะสิ้นสุดตรงตำแหน่งที่เพลาข้อเหวี่ยงหมุนผ่านศูนย์ตายบนแล้ว 10-15° ในกรณีนี้การเผาไหม้เกิดขึ้นที่ปริมาตรน้อยที่สุดและงานสุทธิของวัฏจักรและประสิทธิภาพของวัฏจักรจะมีค่าสูงสุด

การเพิ่มขึ้นของความเร็วเชิงมุมของเพลาข้อเหวี่ยงมีผลให้อัตราการเผาไหม้เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากมีความปั่นป่วนมากขึ้น ในขณะเดียวกันความเร็วเชิงมุมที่สูงมากขึ้นจะทำให้มีเวลาสำหรับการเผาไหม้น้อยลงด้วย ข้อมูลเชิงประจักษ์ชี้ให้เห็นว่าถึงแม้ว่าอัตราการเผาไหม้จะเพิ่มขึ้น แต่มุมการจุดระเบิดล่วงหน้าก็ควรจะเพิ่มมากขึ้นด้วยเมื่อความเร็วเชิงมุมเพิ่มมากขึ้น

ถ้าส่วนผสมทำงานที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้มีอุณหภูมิและความดันสูงมาก สภาวะของการเผาไหม้ในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ของส่วนผสมนั้น

อาจจะผ่านจากสภาวะที่เกิดการเผาไหม้ตามปกติเข้าสู่สภาวะที่เกิดการเผาไหม้แบบระเบิดหรือเกิดการระเบิด (Detonation) ก็ได้

ตามปกติการเผาไหม้แบบระเบิดจะเกิดขึ้นโดยมีเสียงการน็อก (Knock) ที่ดัง, การมีความร้อนสูงมากเกินไป (Overheating) ของเครื่องยนต์, การมีไอเสียออกมาเป็นควันดำ, และเครื่องยนต์เดินไม่เรียบ เครื่องยนต์จะต้องไม่ทำงานในสภาวะนั้นเพราะว่าชิ้นส่วนของเครื่องยนต์จะเกิดการสึกหรอสูงหรืออาจจะเสียหายได้ การเดินเครื่องยนต์ในสภาวะที่เกิดการเผาไหม้แบบระเบิดต่อไปนานจะทำให้กำลังลดน้อยลงและสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมากขึ้น ลูกสูบอาจจะไหม้หรือเกิดหน้าข้าวตัง (Pitting) บนหน้าสัมผัสของลูกปืนตลับหรือรองลื่นข้อ (Journal bearing) ได้

การเผาไหม้แบบระเบิดเป็นผลมาจากการมี Active peroxide ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่เสถียรอย่างมากเกิดขึ้น นั่นคือเป็นผลผลิตชั้นต้นจากการรวมตัวกับออกซิเจนของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นจากผลของกิริยาภายในของ Active molecules ของออกซิเจนกับเชื้อเพลิง อัตราการเผาไหม้ของส่วนผสมในการเผาไหม้แบบระเบิดนั้นสูงถึงความเร็วของคลื่นระเบิด (Detonation wave) ซึ่งอยู่ระหว่าง 1500-2000 m/s

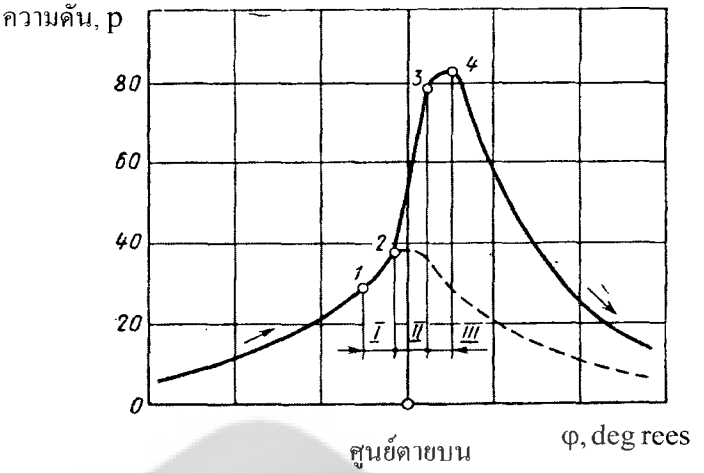
8-4.3 การเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซล

กระบวนการจุดระเบิดและเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลนั้นแตกต่างจากเครื่องยนต์ที่มีการเตรียมส่วนผสมภายนอกกระบอกสูบมาก และเกิดขึ้นในสภาวะที่ซับซ้อนกว่ามาก เนื่องจากภายในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ดีเซลมีแต่อากาศและไม่ได้มีการจัดเตรียมส่วนผสมทำงานไว้ก่อนที่จะเกิดการเผาไหม้

ในระหว่างที่เชื้อเพลิงถูกจัดเตรียมส่วนผสมเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ กระบวนการเผาไหม้สามารถแบ่งย่อยออกเป็นสี่ช่วง (ดูรูปที่ 8-4.3) เชื้อเพลิงส่วนใหญ่เกิดการเผาไหม้ในช่วงระหว่างการจัดเตรียมส่วนผสม เชื้อเพลิงส่วนที่เหลือจะเกิดการเผาไหม้ต่อเนื่องมาในช่วงต่อจากนั้น

กระบวนการเผาไหม้ช่วงแรก (วิถีช่วง I) เรียกว่าช่วง Ignition time delay ช่วงนี้เป็นช่วงเวลาตั้งแต่จังหวะที่เชื้อเพลิงถูกฉีดเข้าสู่กระบอกสูบ (จากสถานะ 1) จนถึงจังหวะที่ความดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (จนถึงสถานะ 2) ในระหว่างการเผาไหม้ช่วงแรกนี้ กระบวนการทางกายภาพและเคมีของการเตรียม

เชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ในทางปฏิบัติเกิดขึ้นโดยไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความดันเมื่อเปรียบเทียบกับวิถีของกระบวนการอัด (1-2)



รูปที่ 8-4.3 แผนภาพความดันกับมุมของข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ดีเซลสี่จังหวะ

ระยะเวลาของการเผาไหม้ช่วงแรกได้รับอิทธิพลจากคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเชื้อเพลิง, อุณหภูมิกับความดันของอากาศที่ถูกอัด, และอัตราส่วนความปั่นป่วนในกระบอกสูบ

ช่วงที่สอง (วิถีช่วง II) เป็นไปตามระดับการปลดปล่อยความร้อนจากการเผาไหม้และความดันที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (วิถีส่วน 2-3) การปลดปล่อยความร้อนจากการเผาไหม้เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าสู่กระบอกสูบในระหว่างช่วง Ignition time delay และเกิดขึ้นเนื่องจากเชื้อเพลิงที่เข้าสู่กระบอกสูบบางส่วนเกิดการเผาไหม้ด้วย การฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่กระบอกสูบอาจจะเกิดขึ้นต่อมาตลอดในระหว่างการเผาไหม้ช่วงที่สอง หรืออาจจะหยุดฉีดก่อนที่การเผาไหม้ช่วงที่สองจะสิ้นสุดลงก็ได้ อัตราการเพิ่มขึ้นของความดันในระหว่างการเผาไหม้ช่วงที่สองไม่ได้ขึ้นอยู่กับ Ignition time delay เท่านั้นแต่ยังขึ้นอยู่กับอัตราการฉีดเชื้อเพลิง (Delivery rate), คุณภาพของการเป็นฝอย (Atomization), และปริมาณของเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าไปอีกด้วย

ค่าเฉลี่ยของอัตราการเพิ่มความดันบนวิถีของกระบวนการเผาไหม้ (2-3) มีค่าเท่ากับ $\Delta p / \Delta \alpha$ เหมือนกับเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยประกายไฟฟ้า สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลที่ทำงานตามปกติ ข้อมูลเชิงประจักษ์แสดงให้เห็นว่าว่าค่าเฉลี่ยของอัตราการเพิ่มความดันในการเผาไหม้ช่วงที่สองไม่ควรมีค่าเกินกว่า $\Delta p / \Delta \alpha$ = 3-5 bar ต่อมุมหมุนของเพลาข้อเหวี่ยงหนึ่งองศา เครื่องยนต์ที่มีการทำงานอย่างแข็งแกร่งจะมีความดันจากการเผาไหม้สูงและเกิดการน็อกตามมาด้วย ซึ่ง

ไม่สามารถยอมให้เกิดขึ้นได้เพราะจะทำให้เกิดการสึกหรอสูงและอาจทำให้ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์เสียหายได้

เครื่องยนต์ดีเซลจะมีความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงน้อยที่สุดถ้าความดันของวัฏจักรมีค่าสูงสุดในขณะที่เพลาข้อเหวี่ยงหมุนผ่านศูนย์ตายบนไปแล้ว 6^{o}-10^{o}

พฤติกรรมของการเผาไหม้ช่วงที่สองได้รับอิทธิพลจาก Ignition time delay, การกระจายเชื้อเพลิงเข้าไปในห้องเผาไหม้, ปริมาณของเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าในระหว่างการเผาไหม้ช่วงแรก, และจากอัตราการฉีดเชื้อเพลิงกับปริมาณของเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าไปในการเผาไหม้ช่วงที่สองอีกด้วย

ช่วงที่สาม (วิถีช่วง III) เป็นช่วงของการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างต่อเนื่องที่มีค่าน้อย (Period of a minor continuous pressure change) (วิถีส่วน 3-4) ช่วงนี้จะสิ้นสุดลงในตำแหน่งมุมหมุนที่ความดันมีค่าสูงสุด ตามปกติการฉีดเชื้อเพลิงจะสิ้นสุดลงก่อนที่การเผาไหม้ช่วงที่สามจะเริ่มขึ้น

ระหว่างการเผาไหม้ช่วงที่สาม กระบวนการเผาไหม้มีอัตราการแพร่ความร้อนลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการเผาไหม้ช่วงที่สอง เนื่องจากความเข้มข้นของออกซิเจนลดลงและส่วนผสมที่เผาไหม้ได้เกิดการผสมกับผลผลิตจากการเผาไหม้ แต่ในช่วงนี้อุณหภูมิของก๊าซยังคงเพิ่มขึ้น

ระยะเวลาของการเผาไหม้ช่วงที่สามขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของเชื้อเพลิง, อัตราความปั่นป่วนของไอดี, และสัมประสิทธิ์อากาศส่วนเกิน

ถ้าการฉีดเชื้อเพลิงและกระบวนการเผาไหม้เกิดขึ้นในสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimum conditions) อุณหภูมิตรงปลายของกระบวนการเผาไหม้จะสูงถึงค่าสูงสุดเมื่อเพลาข้อเหวี่ยงหมุนเลยศูนย์ตายบนไปแล้ว 20-35^{o}

ช่วงที่สี่เป็นช่วงเวลาของการเผาไหม้เสริมตามหลัง (Afterburning time) และเริ่มต้นตรงจุดที่ความดันของวัฏจักรมีค่าสูงสุด การเผาไหม้เสริมตามหลังจะเกิดขึ้นในเครื่องยนต์ดีเซลทุกเครื่อง แต่ในเครื่องยนต์ความเร็วสูงการเผาไหม้เสริมตามหลังจะยาวนานกว่าเครื่องยนต์รอบช้า การเผาไหม้ช่วงที่สี่จะสิ้นสุดตรงจุดเริ่มต้นของกระบวนการขยายตัว

ระหว่างการขยายตัวถ้ามีการเผาไหม้เสริมตามหลังของเชื้อเพลิงเกิดขึ้นมากก็หมายความว่าจะต้องมีความร้อนจำนวนมากที่ถูกระบายทิ้งออกไปจากวัฏจักรซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพความร้อนของเครื่องยนต์ลดลง การสูญเสียความร้อนในช่วงที่สี่สามารถทำให้ลดน้อยลงได้ถ้าสามารถทำให้กระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นมีประสิทธิผลมากขึ้นโดยการเพิ่มความปั่นป่วนของไอดี การ

เพิ่มความปั่นป่วนของอากาศจะช่วยให้การจัดเตรียมส่วนผสมในปริมาตรห้องเผาไหม้ทั้งหมดดีขึ้น สิ่งนี้จะทำให้เกิดกระบวนการเผาไหม้ที่มีประสิทธิผล แต่ความปั่นป่วนเพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำให้เกิดการจัดเตรียมส่วนผสมที่มีคุณภาพดีได้ จะต้องเพิ่มสัมประสิทธิ์อากาศด้วย สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลสี่จังหวะ สัมประสิทธิ์อากาศจะอยู่ระหว่าง $\alpha = 1.3\text{-}1.7$

ระยะเวลาในการฉีดเชื้อเพลิงมีผลต่อกระบวนการเผาไหม้และคุณลักษณะของวัฏจักรมาก การฉีดเชื้อเพลิงในเวลาสั้นโดยอัตราการฉีดเชื้อเพลิงของวัฏจักรคงที่และมุมหมุนของเพลาข้อเหวี่ยงเท่ากันจะทำให้ได้ความร้อนที่ปลดปล่อยระหว่างการเผาไหม้มากและอัตราการเพิ่มความดันสูงกว่าการฉีดเชื้อเพลิงที่ยาวนาน

ในกรณีที่จังหวะการจุดระเบิดเป็นมุมล่วงหน้ามาก เชื้อเพลิงจะถูกส่งที่อุณหภูมิและความดันค่อนข้างต่ำ กรณีเช่นนี้จะเพิ่ม Ignition time delay กระบอกสูบจะมีเชื้อเพลิงสะสมอยู่มากในขณะที่ผ่านเข้าสู่จุดเริ่มต้นของช่วงที่สองและกระบวนการเผาไหม้จะเกิดขึ้นโดยความดันสูงสุดของวัฏจักรเพิ่มมากขึ้น นั่นคือการทำงานของเครื่องยนต์แข็งแกร่งเกินไป ถ้ามุมจุดระเบิดล่วงหน้าน้อยเชื้อเพลิงส่วนใหญ่จะเผาไหม้ในกระบวนการขยายตัว สิ่งนี้จะทำให้เครื่องยนต์ร้อนมากเกินไป (Overheat) ทำให้อุณหภูมิของไอเสียสูง ลดอัตราการเพิ่มความดันระหว่างการเผาไหม้ ทำให้กำลังและคุณลักษณะด้านการประหยัดเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ลดน้อยลง

การเพิ่มภาระของเครื่องยนต์ดีเซลจะทำให้สัมประสิทธิ์อากาศส่วนเกินลดลงเนื่องจากการฉีดเชื้อเพลิงเป็นจังหวะ (Cyclic delivery) จะเพิ่มขึ้นและปริมาณอากาศที่เข้าสู่กระบอกสูบยังคงมีค่าคงที่หรืออาจจะลดลงเล็กน้อยเพราะอากาศขยายตัวเมื่อมันร้อนขึ้น

ในขณะที่ทำงานโดยลิ้นเร่งเปิดเพียงบางส่วน เครื่องยนต์ดีเซลจะต่างจากเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนโดยจะมีความประหยัดเชื้อเพลิงมากขึ้น เพราะการลดภาระลงจะทำให้สัมประสิทธิ์อากาศส่วนเกินเพิ่มมากขึ้น

คุณลักษณะด้านการประหยัดเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซลสร้างปรับปรุงให้เพิ่มขึ้นได้โดยทำให้มุมการฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้าเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเร็วรอบของเพลาข้อเหวี่ยงสูงมากขึ้น

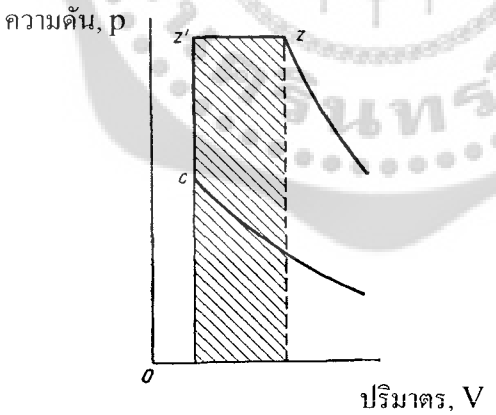
8-4.4 อุณหภูมิและความดันตรงปลายกระบวนการเผาไหม้

ความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาระหว่างกระบวนการเผาไหม้นอกจากจะทำให้พลังงานภายในของก๊าซเพิ่มมากขึ้นและทำให้เกิดงานกลแล้ว ความร้อนนี้บางส่วนยังถ่ายเทให้แหล่งอุณหภูมิต่ำอีกด้วยซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์

ปริมาณความร้อนที่แพร่ออกมาในกระบอกสูบมีค่าน้อยกว่าค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ถูกเผาไหม้ เพราะว่าการเผาไหม้เกิดขึ้นพร้อมกับมีการสูญเสียที่หลีกเลี่ยงไม่ได้เนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ทางเคมีและ**การแยกตัว** (Dissociation หรือ splitting) ของผลผลิตจากการเผาไหม้

เพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้น ตามปกติจะสมมติให้การเปลี่ยนแปลงความดันเหมือนกับในวัฏจักรทางทฤษฎี คือวัฏจักรผสมซึ่งมีการเผาไหม้เกิดขึ้นทั้งกระบวนการปริมาตรคงที่และความดันคงที่ ส่วนวัฏจักรที่มีการเผาไหม้อย่างรวดเร็วนั้นจะใช้วัฏจักรปริมาตรคงที่แทน

อุณหภูมิตรงปลายของกระบวนการเผาไหม้จะหาได้จากสมการการเผาไหม้ซึ่งเขียนขึ้นสำหรับเชื้อเพลิงจำนวน 1 kg ที่เข้ามาสู่เครื่องยนต์โดยเป็นการสมดุลความร้อนในกระบวนการเผาไหม้ส่วน $cz'z$ (ดูรูปที่ 8-4.4) หลักการในการสร้างสมการการเผาไหม้สำหรับวัฏจักรทั้งสองนั้นเหมือนกัน แต่สมการการเผาไหม้ที่ได้รับนั้นต่างกัน



รูปที่ 8-4.4 แผนภาพอินดิเคเตอร์ส่วนที่แสดงกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่โค้งมนของวัฏจักรผสม

ตามกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ สมการการเผาไหม้สำหรับวัฏจักรผสม (ส่วน $cz'z$ ในรูปที่ 8-4.4) สามารถเขียนในรูปแบบทั่วไปได้เป็น

$$\xi q_f = u_z - u_c + w_{z'z} \qquad (8\text{-}4.2)$$

เมื่อ ξ = สัมประสิทธิ์ของความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาใช้ประโยชน์ได้ (Active heat liberation) ซึ่งแสดงถึงความร้อนที่ใช้ไปในการเพิ่มพลังงานภายในของก๊าซในวิถีส่วน cz′z กับความร้อนส่วนที่เปลี่ยนไปเป็นงานกล

u_z = พลังงานภายในของผลผลิตจากการเผาไหม้ที่สถานะ z (kJ/kg)

u_c = พลังงานภายในของส่วนผสมทำงานที่สถานะ c (kJ/kg)

$w_{z'z}$ = งานที่ก๊าซกระทำในช่วง z′z (kJ/kg)

พลังงานภายในของผลผลิตจากการเผาไหม้ (ที่สถานะ z) และของส่วนผสมทำงาน (ที่สถานะ c) สามารถหาได้จาก

$$u_z = M c_{v\ prod} (L_{prod}+L_r) T_z \qquad (8\text{-}4.3)$$

$$u_c = M c_{v\ mix} (L_{mix}+L_r) T_c \qquad (8\text{-}4.4)$$

เมื่อ $M c_{v\ prod}$ และ $M c_{v\ mix}$ เป็นค่าความจุความร้อนเชิงโมล (มีหน่วยเป็น kJ/kmole K) ที่ปริมาตรคงที่ของผลผลิตการการเผาไหม้และส่วนผสมทำงานตามลำดับ

เนื่องจากปริมาณ L_r ของไอเสียตกค้างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของส่วนผสมที่เผาไหม้ได้ L_{mix} และสามารถสมมติให้ $M c_{v\ mix} = M c_v$ ได้ เมื่อ $M c_v$ คือค่าความจุความร้อนเชิงโมล (มีหน่วยเป็น kJ/kmole K) ที่ปริมาตรคงที่ของอากาศ

งานจากการขยายตัวของก๊าซ (เป็น kJ) ในช่วง z′z คือ

$$W_{z'z} = p_z V_z - p_{z'} v_{z'} \qquad (8\text{-}4.5)$$

เนื่องจาก $p_{z'} = \lambda p_c$ และ $V_{z'} = V_c$ สมการ (8-4.5) จะเขียนได้เป็น

$$W_{z'z} = p_z V_z - \lambda p_c V_c \qquad (8\text{-}4.6)$$

สมการสถานะของผลผลิตจากการเผาไหม้ที่สถานะ z และ c คือ

$$p_z V_z = 8314 (L_{prod}+L_r) T_z \qquad (8\text{-}4.7)$$

และ
$$p_c V_c = 8314 (L_{mix}+L_r) T_c \qquad (8\text{-}4.8)$$

แทนค่าของงานที่สถานะ z กับ c ลงในสมการ(8-4.6) จะได้

$$W_{z'z} = 8314 (M_{prod}+M_r) T_z - 8314\ \lambda\ (M_{mix}+M_r) T_c \qquad (8\text{-}4.9)$$

หลังจากแทนค่าของ U_z U_c และ $W_{z'z}$ ลงในสมการ (8-4.2) จะได้

$$\xi q_f = M c_{v\ prod}\ (L_{prod}+L_r) T_z - M c_{v\ mix}\ (L_{mix}+L_r) T_c$$
$$+8314 (L_{prod}+L_r) T_z - 8314\ \lambda (L_{mix}+L_r) T_c \qquad (8\text{-}4.10)$$

หารสมการ (8-4.10) ด้วย $(L_{mix}+L_r)$ แล้วจัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$\frac{\xi q_f}{L_{mix}+L_r}+(Mc_{v\ mix}+8314\lambda)\frac{L_{mix}+L_r}{L_{mix}+L_r}T_c=(Mc_{v\ prod}+8314)\frac{L_{prod}+L_r}{L_{mix}+L_r}T_z \qquad (8\text{-}4.11)$$

แต่ $$L_{mix}+L_r=L_{mix}\left(1+\frac{L_r}{L_{mix}}\right)=L_{mix}(1+f)$$

และอัตราส่วน $$\frac{L_{prod}+L_r}{L_{mix}+L_r}=\mu$$

แทนค่าความสัมพันธ์ทั้งสองกับค่าความจุความร้อน $Mc''_p = Mc''_v + 8314$ ลงในสมการ (8-4.11) สมการการเผาไหม้ขั้นสุดท้ายสำหรับวัฏจักรผสมจะเป็น

$$\frac{\xi q_f}{L_{mix}(1+f)}+(Mc_{v\ mix}+8314\lambda)T_c=\mu Mc_{p\ prod}T_z \qquad (8\text{-}4.12)$$

อุณหภูมิสูงสุดของวัฏจักรสำหรับเครื่องยนต์อัดระเบิด (ดีเซล) จะหาได้จากสมการ (8-4.12)

เนื่องจากงานของก๊าซ $W_{z'z}=0$ สำหรับวัฏจักรที่การเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงเกิดขึ้นที่ปริมาตรคงที่ (เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน) สมการการเผาไหม้จะง่ายขึ้นและเมื่อสมมติให้ $\alpha \geq 1$ สมการการเผาไหม้จะเป็น

$$\frac{\xi q_f}{L_{mix}(1+f)}+Mc_{v\ mix}T_c=\mu Mc_{p\ prod}T_z \qquad (8\text{-}4.13)$$

เครื่องยนต์ก๊าซโซลีนบางเครื่องอาจจะทำงานโดย $\alpha < 1$ และด้วยเหตุนี้การเผาไหม้จึงไม่สมบูรณ์เนื่องจากมีออกซิเจนไม่เพียงพอ ถ้าให้ Δq_f เป็นการสูญเสียความร้อนในการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 kg เนื่องจากมีออกซิเจนไม่เพียงพอเมื่อ $\alpha < 1$ เพราะฉะนั้น q_f ในสมการ (8-4.13) จะต้องถูกแทนที่ด้วยผลต่าง $(q_f - \Delta q_f)$

ค่าของ Δq_f (เป็น kJ/kg) สามารถหาได้จาก

$$\Delta q_f = 119\ 750\ (1-\alpha)\ L_{theo} \qquad (8\text{-}4.14)$$

ดังนั้นสมการการเผาไหม้สำหรับวัฏจักรปริมาตรคงที่โดย $\alpha < 1$ คือ

$$\frac{\xi(q_f-\Delta q_f)}{L_{mix}(1+f)}+Mc_{v\ mix}T_c=\mu Mc_{p\ prod.}T_z \qquad (8\text{-}4.15)$$

ปริมาณทั้งหลายในสมการ (8-4.12) ถึง (8-4.15) รู้ค่าทั้งหมด ยกเว้นอุณหภูมิสุดท้าย T_z ตรงปลายของกระบวนการเผาไหม้และค่าความจุความร้อนเชิงโมลเฉลี่ยของอากาศกับผลผลิตจากการเผาไหม้ Mc_v, Mc_v $c_{v\ prod}$ และ $Mc_{p\ prod}$ ซึ่งจะหาได้จากหนังสืออ้างอิงต่างๆ

เนื่องจาก

$$Mc_{v\ mix}=a_{mix}+b_{mix}T \qquad (8\text{-}4.16)$$

$$M c_{v\ prod} = a_{v\ prod} + b_{v\ prod} T \qquad (8\text{-}4.17)$$

$$M c_{p\ prod} = a_{p\ prod} + b_{p\ prod} T \qquad (8\text{-}4.18)$$

สมการการเผาไหม้สำหรับวัฏจักรผสมจะกลายเป็น

$$\frac{\xi q_f}{L_{mix}(1+f)} + (a + bT_c)T_c + 8314\lambda T_c = \mu(a_{p\ prod} + b_{p\ prod} T_z)T_z \qquad (8\text{-}4.19)$$

ในสมการ (8-4.19) ให้ $\mu b_{p\ prod}$ แทนด้วย A และให้ $\mu a_{p\ prod}$ แทนด้วย B ส่วนปริมาณที่รู้ค่าทั้งหมดทางด้านซ้ายมือแทนด้วย C สมการ (8-4.19) จะกลายเป็น

$$AT_z^2 + BT_z - C = 0 \qquad (8\text{-}4.20)$$

ดังนั้น

$$T_z = \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A} \qquad (8\text{-}4.21)$$

ด้วยวิธีเดียวกันนี้ สมการการเผาไหม้สำหรับเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนจะเป็น

$$\frac{\xi q_f}{L_{mix}(1+f)} + (a + bT_c)T_c = \mu(a_{v\ prod} + b_{v\ prod} T_z)T_z \qquad (8\text{-}4.22)$$

ในสมการ (8-4.22) ให้ $\mu b_{v\ prod}$ แทนด้วย A และให้ $\mu a_{v\ prod}$ แทนด้วย B ส่วนปริมาณที่รู้ค่าทั้งหมดทางด้านซ้ายมือแทนด้วย C สมการ (8-4.22) จะกลายเป็นสมการเดียวกันกับสมการ (8-4.20) สำหรับการใช้หาอุณหภูมิ T_z ตรงปลายของช่วงการเผาไหม้ประสิทธิผล

ความดันตรงปลายของกระบวนการเผาไหม้สามารถหาได้จากสมการของสถานะที่ปลายของกระบวนการการเผาไหม้ (สถานะ z) กับตรงปลายของกระบวนการดูด (สถานะ c) ร่วมกัน คือจากสมการ (8-4.7)

$$p_z V_z = 8314\ (L_{prod}+L_r)\ T_z$$

และจากสมการ (8-4.8)

$$p_c V_c = 8314\ (L_{mix}+L_r)\ T_c$$

หารสมการ (8-4.7) ด้วยสมการ (8-4.8) แล้วแทนค่า $\frac{L_{prod} + L_r}{L_{mix} + L_r} = \mu$, $\lambda = \frac{p_z}{p_c}$

และ $\rho = \frac{V_z}{V_c}$ ลงไป จะได้

$$\lambda = \frac{\mu}{\rho}\frac{T_z}{T_c} \qquad (8\text{-}4.23)$$

ดังนั้น ความดันที่ปลายของกระบวนการเผาไหม้ของวัฏจักรผสมจะเป็น

$$p_z = \lambda p_c = \frac{\mu}{\rho}\frac{T_z}{T_c} p_c \qquad (8\text{-}4.24)$$

และ ความดันที่ปลายของกระบวนการเผาไหม้ของวัฏจักรปริมาตรคงที่จะเป็น

$$p_z = \lambda p_c = \mu \frac{T_z}{T_c} p_c \qquad (8\text{-}4.25)$$

สัมประสิทธิ์ ξ ขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์, วิธีการเตรียมส่วนผสม, สภาวะในการระบายความร้อนห้องเผาไหม้, และการเผาไหม้เสริมในช่วงหลังบนวิถีของกระบวนการขยายตัว

ค่าสัมประสิทธิ์ ξ เมื่อเครื่องยนต์ทำงานภายใต้ภาระเต็มพิกัดเป็นดังต่อไปนี้

เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน	ξ = 0.85-0.95
เครื่องยนต์ก๊าซ	ξ = 0.80-0.85
เครื่องยนต์ดีเซล	ξ = 0.65-0.85

สัมประสิทธิ์ ξ ที่มีค่าต่ำแสดงว่ามีความร้อนที่ระบายออกสู่แหล่งอุณหภูมิต่ำมากและมีการเผาไหม้เสริมในช่วงหลังเกิดขึ้นมากในระหว่างกระบวนการขยายตัว

ในกรณีของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน ค่าสัมประสิทธิ์ ξ จะถูกเลือกโดยนำผลจากการแยกตัวของผลผลิตจากการเผาไหม้เข้ามาพิจารณาร่วมด้วย การแยกตัวของโมเลกุล CO_2 และ H_2O ที่มีอยู่ในผลผลิตจากการเผาไหม้เกิดขึ้นพร้อมกับการดูดซับ (Absorption) ความร้อน และการแยกตัวส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิกับความดัน โดยการแยกตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงมากขึ้นแต่การแยกตัวจะลดลงเมื่อความดันเพิ่มมากขึ้น

การแยกตัวที่เห็นได้ชัดจะเกิดขึ้นเมื่อสัมประสิทธิ์อากาศมีค่าเท่ากับ 1 โดยประมาณ และเมื่อใช้การอัดบรรจุแต่มีอุณหภูมิสูงกว่า 2300 K ระหว่างกระบวนการขยายตัว อุณหภูมิของก๊าซจะลดลงและความร้อนบางส่วนที่ใช้ไปกับการแยกตัวจะปลดปล่อยออกมาใหม่เนื่องจากการ Oxidation ของธาตุ (Elements) ต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการแยกตัว แต่ความร้อนนี้มีส่วนช่วยน้อยต่อกระบวนการทำงานของเครื่องยนต์

การคำนวณทางความร้อนของเครื่องยนต์ดีเซลหรือเครื่องยนต์ก๊าซจะไม่นำการแยกตัวเข้ามาคิด เพราะว่าเครื่องยนต์ดังกล่าวทำงานโดยมีสัมประสิทธิ์อากาศส่วนเกินสูง, อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ, และความดันในการเผาไหม้สูง

สัมประสิทธิ์การเพิ่มความดัน λ มีค่าดังต่อไปนี้

เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน	λ = 3-4
เครื่องยนต์ก๊าซ	λ = 3-5
เครื่องยนต์ดีเซล	λ = 1.2-1.4

ตัวเลขต่อไปนี้เป็นค่าของอุณหภูมิ และความดันของก๊าซตรงปลายของกระบวนการเผาไหม้เมื่อเครื่องยนต์ทำงานภายใต้ภาระเต็มพิกัด

	p_z (bar)	T_z (K)
เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน	30-50	2300-2700
เครื่องยนต์ก๊าซ	25-45	2200-2500
เครื่องยนต์ดีเซล	50-110	1800-2200

สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล ค่าอัตราส่วนการขยายตัว ρ มีค่าอยู่ระหว่าง ρ = 1.2-1.7

8-5 กระบวนการขยายตัว

ในระหว่างกระบวนการขยายตัว ความร้อนเปลี่ยนรูปไปเป็นงานกลที่นำไปใช้ให้เป็นประโยชน์ได้

กระบวนการขยายตัวในวัฏจักรทางทฤษฎีเกิดขึ้นแบบไอเซนโทรปิก แต่กระบวนการขยายตัวในวัฏจักรจริงนั้นแตกต่างออกไป กระบวนการขยายตัวในวัฏจักรจริงนั้นเกิดขึ้นโดยมีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับผนังกระบอกสูบ, ห้องเผาไหม้กับหัวลูกสูบ, และกับชิ้นส่วนอื่นๆ และมีการรั่วไหลของก๊าซผ่านช่องว่างต่างๆอีกด้วย นอกจากนี้ก๊าซยังได้รับความร้อนซึ่งเป็นผลมาจากการเผาไหม้เสริมในตอนหลัง ความร้อนที่ได้คืนกลับจากการแยกตัวของผลผลิตจากการเผาไหม้บางส่วน และการที่ค่าความจุความร้อนของก๊าซลดลงเนื่องจากอุณหภูมิลดลงในช่วงเกิดการขยายตัว เป็นผลให้กระบวนการที่แท้จริงของการขยายตัวของก๊าซเป็นแบบโพลี่โทรปิกโดยเลขชี้กำลังโพลี่โทรปิก n_2 มีค่าอยู่ระหว่าง n_2 = 1.15-1.30

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิระหว่างการเผาไหม้และการขยายตัวทำให้ค่าความจุความร้อนของก๊าซเพิ่มขึ้นและทำให้ค่าของเลขชี้กำลังโพลี่โทรปิก n_2 ลดลง การระบายความร้อนของเครื่องยนต์ในอัตราที่สูงขึ้นจะช่วยให้เลขชี้กำลังโพลี่โทรปิก n_2 เพิ่มขึ้น

ในการคำนวณหาความดันและอุณหภูมิตรงปลายกระบวนการขยายตัวในวัฏจักรปริมาตรคงที่จะสมมติให้การขยายตัวเกิดขึ้นจากศูนย์ตายบนถึงศูนย์

ตายล่าง สำหรับวัฏจักรผสมการขยายตัวเริ่มต้นจากปลายของกระบวนการให้ความร้อนโดยความดันคงที่ (สถานะ z) และสิ้นสุดที่ศูนย์ตายล่าง

จากสมการของกระบวนการโพลี่โทรปิก $p\,V^n = C$

$$p_b V_b^{n_2} = p_z V_z^{n_2} \qquad (8\text{-}5.1)$$

ใช้สมการนี้สำหรับหาความดันสุดท้ายของการขยายตัว ได้

$$p_b = p_z \left(\frac{V_z}{V_b} \right)^{n_2} \qquad (8\text{-}5.2)$$

คูณทั้งเศษและส่วนในวงเล็บด้วย V_c จะได้

$$p_b = p_z \left(\frac{V_z}{V_c} \frac{V_c}{V_b} \right)^{n_2} \qquad (8\text{-}5.3)$$

เนื่องจาก $V_b = V_a$, $\frac{V_z}{V_c} = \rho$ และ $\frac{V_c}{V_b} = \frac{1}{\varepsilon}$ ดังนั้น

$$p_b = p_z \left(\frac{\rho}{\varepsilon} \right)^{n_2} \qquad (8\text{-}5.4)$$

ใช้ความสัมพันธ์

$$\frac{V_b}{V_z} = \frac{V_a}{V_z} = \frac{\frac{V_a}{V_c}}{\frac{V_z}{V_c}} = \frac{\varepsilon}{\rho} = \delta \qquad (8\text{-}5.5)$$

ซึ่ง δ เป็นอัตราส่วนการขยายตัวช่วงต่อมา (Subsequent expansion ratio) สำหรับวัฏจักรผสมจะได้

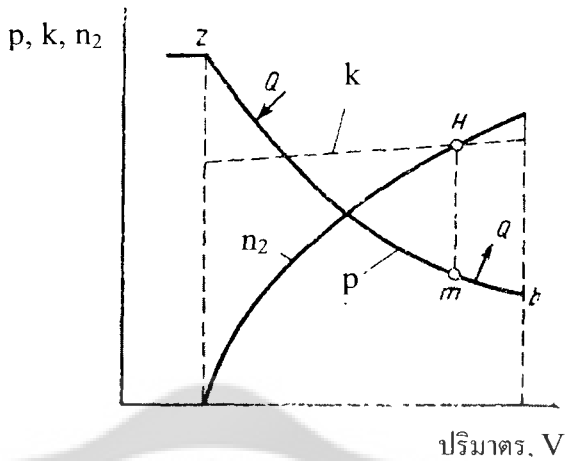
$$p_b = \frac{p_z}{\delta^{n_2}} \qquad (8\text{-}5.6)$$

สำหรับวัฏจักรปริมาตรคงที่ เนื่องจาก $V_z = V_c$, $\frac{V_b}{V_z} = \frac{V_a}{V_c} = \varepsilon = \delta$, และ $\rho = 1$ แทนค่าลงในสมการ (8-5.6) จะได้

$$p_b = \frac{p_z}{\varepsilon^{n_2}} \qquad (8\text{-}5.7)$$

ที่จุดเริ่มต้นของกระบวนการขยายตัว ความร้อนจำนวนมากที่ถ่ายเทเข้าสู่ก๊าซเนื่องจากการเผาไหม้เสริมต่อมาในภายหลังมากเกินกว่าปริมาณความร้อนที่ระบายออกสู่แหล่งอุณหภูมิต่ำ (สู่ผนังกระบอกสูบและหัวลูกสูบ) ได้ ด้วยเหตุนี้เลขชี้กำลังโพลี่โทรปิก n_2 (ดูรูปที่ 8-5.1) จึงน้อยกว่าเลขชี้กำลังไอเซนโทรปิก k (วิถีส่วน zm) เมื่อการเผาไหม้เสริมต่อมาในภายหลังลดลงวิถีโพลี่โทรปิกจะตัดกับวิถีไอเซนโทรปิกที่จุด H

เมื่อก๊าซขยายตัวต่อไปปริมาณความร้อนที่ระบายสู่ผนังต่างๆจะมีค่ามากกว่าปริมาณความร้อนที่ได้รับจากการเผาไหม้เสริมต่อมาในภายหลัง ค่าเลขชี้กำลังโพลี่โทรปิก n_2 จึงสูงขึ้น (วิถีส่วน mb)



รูปที่ 8-5.1 *เส้นโค้งของการขยายตัว (z-b), เลขชี้กำลังไอเซนโทรปิก k, และเลขชี้กำลังโพลี่โทรปิก n_2*

เนื่องจากยากมากที่จะนำผลจากปรากฏการณ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการขยายตัวมาพิจารณา จึงแทนวิถีของการขยายตัวจริงซึ่งเลขชี้กำลังโพลี่โทรปิก n_2 มีการเปลี่ยนแปลงค่าด้วยวิถีของการขยายตัวที่เลขชี้กำลังโพลี่โทรปิก n_2 มีค่าคงที่ เช่นเดียวกับกระบวนการอัด

ค่าเฉลี่ยของเลขชี้กำลังโพลี่โทรปิก n_2 มีค่าน้อยกว่าเลขชี้กำลังไอเซนโทรปิก k ด้วยเหตุนี้วิถีของการขยายตัวโพลี่โทรปิกจึงอยู่สูงกว่าวิถีของการขยายตัวไอเซนโทรปิก

ค่าเฉลี่ยของเลขชี้กำลังโพลี่โทรปิก n_2 มีดังต่อไปนี้

เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน	$n_2 = 1.25\text{-}1.33$
เครื่องยนต์ก๊าซ	$n_2 = 1.25\text{-}1.35$
เครื่องยนต์ดีเซล	$n_2 = 1.22\text{-}1.25$

มีปัจจัยจำนวนมากที่มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยของเลขชี้กำลังโพลี่โทรปิก n_2 ความเร็วรอบของเพลาข้อเหวี่ยงที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เลขชี้กำลังโพลี่โทรปิก n_2 ลดลง สิ่งนี้เป็นสาเหตุมาจากการเผาไหม้เสริมต่อมาในภายหลังในปริมาณมาก และการระบายความร้อนสู่ผนังกระบอกสูบและหัวลูกสูบ

อุณหภูมิตรงปลายของกระบวนการขยายตัวสามารถหาได้จากสมการของสถานะของกระบวนการโพลี่โทรปิก คือ

$$T_b V_b^{n_2-1} = T_z V_z^{n_2-1} \qquad (8\text{-}5.8)$$

แก้สมการนี้เพื่อหาค่าของอุณหภูมิ T_b จะได้

$$T_b = T_z \left(\frac{V_z}{V_b} \right)^{n_2-1} \qquad (8\text{-}5.9)$$

อุณหภูมิตรงปลายของกระบวนการขยายตัวสำหรับวัฏจักรผสมคือ

$$T_b = \frac{T_z}{\delta^{n_2-1}} \qquad (8\text{-}5.10)$$

อุณหภูมิตรงปลายของกระบวนการขยายตัวสำหรับวัฏจักรปริมาตรคงที่คือ

$$T_b = \frac{T_z}{\varepsilon^{n_2-1}} \qquad (8\text{-}5.11)$$

ตัวเลขต่อไปนี้เป็นค่าของอุณหภูมิและความดันของก๊าซตรงปลายของกระบวนการขยายตัว

	p_b (bar)	T_b (K)
เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟฟ้า	4-6	1300-1700
เครื่องยนต์ดีเซล	3-5	1000-1200

การที่ค่าของความดันและอุณหภูมิลดลงตรงปลายของกระบวนการขยายตัวของเครื่องยนต์ดีเซลสามารถอธิบายได้จากการมีอัตราส่วนการขยายตัวของก๊าซสูงขึ้นและอุณหภูมิที่ลดน้อยลงตรงจุดที่สิ้นสุดการเผาไหม้

8-6 กระบวนการคายไอเสีย

ความดัน p_r ของไอเสียตกค้างควรจะมีค่าน้อยที่สุดตรงปลายของจังหวะคายไอเสียและควรจะใช้พลังงานน้อยที่สุดในจังหวะนี้

ลิ้นไอเสียในเครื่องยนต์สมัยใหม่เปิดล่วงหน้ามากขึ้น สิ่งนี้จะลดพลังงานที่ต้องใช้ไปกับงานกลในการคายไอเสีย และทำให้การกวาดล้างไอเสียในกระบอกสูบดีขึ้น แต่การที่ลิ้นเปิดล่วงหน้ามากจะลดกำลังของเครื่องยนต์ลงเล็กน้อยเพราะว่าเหลือช่วงเวลาสำหรับการขยายตัวลดน้อยลง

ในระหว่างการคายไอเสีย ความดันของก๊าซที่เผาไหม้แล้วในกระบอกสูบจะไม่คงที่ เพราะเกิดการแกว่งอย่างยืดหยุ่น (Elastic oscillation) ขึ้นในระบบไอเสียที่เกิดจากธรรมชาติที่เป็นจังหวะ (Periodic nature) ในตัวของกระบวนการเอง เนื่องจากการแกว่ง (Oscillation) ของก๊าซในจังหวะคายไอเสียไม่สามารถ

คำนวณทางทฤษฎีได้ ดังนั้นความดันในกระบวนการคายไอเสียจึงมักจะให้มีค่าคงที่และมีค่าเท่ากับค่าความดันเฉลี่ยตลอดทั้งกระบวนการ

ความดันไอเสีย p_r (ในบทที่ 6 และ 7 ใช้เป็น p_{ex}) ขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของเพลาข้อเหวี่ยง, การออกแบบ, และขนาดของระบบไอเสีย ความดันไอเสีย p_r มีค่าอยู่ระหว่าง p_r = 1.05-1.2 bar

อุณหภูมิของไอเสียขึ้นอยู่กับปัจจัยเดียวกันกับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิที่ปลายของกระบวนการขยายตัว ไอเสียจะมีอุณหภูมิสูงสุดเมื่อส่วนผสมบาง คือสัมประสิทธิ์อากาศมีค่าอยู่ระหว่าง α = 1.05-1.15 โดยประมาณ ส่วนผสมที่บางมากกว่านี้จะมีผลให้อุณหภูมิไอเสียลดลงเพราะว่าอุณหภูมิสูงสุดของวัฏจักรลดน้อยลงแม้ว่าเวลาของกระบวนการเผาไหม้จะมากขึ้นก็ตาม

อุณหภูมิ T_r (เป็น K) ตรงปลายของจังหวะคายไอเสียเป็นดังนี้

เครื่องยนต์ก๊าซโซลีน	T_r = 900-1100 K
เครื่องยนต์ดีเซล	T_r = 700-900 K

ไอเสียยังคงมีพลังงานอยู่ในตัวมากซึ่งสามารถนำไปใช้ในการประหยัดเชื้อเพลิงได้ด้วยการนำไปขับกังหันก๊าซขนาดเล็กซึ่งเป็นต้นกำลังของเครื่องอัดบรรจุแบบแรงหวี่งหนีศูนย์กลาง

ไอเสียที่นำไปขับกังหันก๊าซของเครื่องอัดบรรจุจะทำให้ความต้านทานในระบบไอเสียเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความดัน p_r เพิ่มขึ้น แต่ความต้านทานที่เพิ่มมากขึ้นนี้จะถูกชดเชยอย่างสมบูรณ์ด้วยความดันในการอัดบรรจุที่เพิ่มมากขึ้น

ส่วนประกอบของไอเสียขึ้นอยู่กับคุณภาพของส่วนผสมทำงาน, วิธีเตรียมส่วนผสมกับวิธีทำให้ส่วนผสมจุดระเบิด, สภาวะการทำงาน, สถานะทางเทคโนโลยีของเครื่องยนต์, ฯลฯ ส่วนประกอบของไอเสียของเครื่องยนต์ที่พัฒนาการออกแบบเป็นอย่างดีและเครื่องยนต์ซึ่งมีการบำรุงรักษาที่ดีจะขึ้นอยู่กับปริมาณของออกซิเจนที่มีอยู่ในห้องเผาไหม้เป็นหลัก

นอกจากคาร์บอนไดออกไซด์, น้ำในสถานะเป็นไอ, และออกซิเจนแล้ว ไอเสียยังประกอบด้วยสารมลพิษ สารพิษหลักที่บ่งถึงความเป็นพิษของไอเสียคือคาร์บอนิกออกไซด์กับไนตริกออกไซด์และ Aldehydes

ปริมาณของคาร์บอนิกออกไซด์ในไอเสียจะมีค่าสูงสุดเมื่อเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนเดินเบาและเมื่อเดินเครื่องรับภาระน้อยและภาระสูงสุดก็มีค่าสูงสุด

ด้วย สภาวะเหล่านั้นตรงกับการทำงานโดยใช้ส่วนผสมหนา ($\alpha < 1$) ซึ่งจะเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงมาก

ปริมาณของคาร์บอนิกออกไซด์ในไอเสียของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนมักจะเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการปรับตั้งคาร์บูเรเตอร์และการตั้งจังหวะจุดระเบิดไม่ถูกต้อง, โดยการใช้น้ำมันที่มีค่าออกเทน (Octane number) ต่ำ, และเครื่องยนต์ที่มีการสึกหรอมาก (แหวนลูกสูบ ลูกสูบ และกระบอกสูบหลวม)

ไอเสียของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนประกอบด้วยคาร์บอนิกออกไซด์ในปริมาณ 0.02-1% โดยปริมาตร ควรระลึกไว้เสมอว่าเมื่อรถยนต์เคลื่อนที่ ไอเสียจะผสมกับอากาศที่อยู่รอบๆอย่างรวดเร็ว เป็นการป้องกันไม่ให้เกิดบริเวณที่มีก๊าซเข้มข้นเฉพาะจุด ไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลมีคาร์บอนิก ออกไซด์น้อยกว่าเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน 2-3 เท่าตัว สิ่งนี้เป็นผลมาจากการใช้สัมประสิทธิ์อากาศส่วนเกินสูงกว่าและการมีอุณหภูมิในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่า

ไอเสียของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนประกอบด้วยไนตริกออกไซด์ในปริมาณ 0.001-0.2% โดยปริมาตร อุณหภูมิที่เพิ่มมากขึ้นในการเผาไหม้และอัตราส่วนการอัดที่สูงขึ้นเป็นตัวเร่งการเกิดไนตริกออกไซด์ในเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน

วิธีการลดความเป็นพิษของไอเสียที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

ควรเดินเครื่องยนต์, อุปกรณ์, และระบบช่วยของเครื่องยนต์ (โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ระบบส่งเชื้อเพลิงและระบบจุดระเบิด) ให้อยู่ในสภาวะคงตัวตามหลักเกณฑ์การเดินเครื่องที่กำหนดไว้

ได้มีการพบว่าเมื่อฉีดน้ำมันใสเข้าไปในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ดีเซลจะเกิดคาร์บอนิก ออกไซด์และไนตริกออกไซด์น้อยกว่าที่เกิดในเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน สิ่งนี้อธิบายได้จากกระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นค่อนข้างช้าและลดอุณหภูมิของกระบวนการเผาไหม้ให้น้อยลง เครื่องยนต์ดีเซลที่ทำงานด้วยผลผลิตจากปิโตรเลียมได้ทั้งน้ำมันข้น (น้ำมันดีเซลและน้ำมันเตา) และน้ำมันใส (คือน้ำมันก๊าซโซลีน และอื่นๆ) เรียกว่าเป็นเครื่องยนต์เชื้อเพลิงหลายชนิด (Multi-fuel) เพราะฉะนั้นการใช้น้ำมันเบาในเครื่องยนต์ดีเซลจึงเป็นการลดมลพิษในไอเสีย มลพิษของไอเสียในเครื่องยนต์ที่มีการจุดระเบิดใน Pre-combustion chamber จะยิ่งลดน้อยลงไปอีก เพราะส่วนผสมจะเผาไหม้โดยมีสัมประสิทธิ์อากาศส่วนเกินสูงมากขึ้น การนำก๊าซเหลว (ส่วนผสมของโพรเพนกับบิว เทน) มาใช้กับเครื่องยนต์จะมีส่วนช่วยในการลดมลพิษจากไอเสียได้มากอีกด้วย

การใช้ Afterburner เป็นวิธีการลดมลพิษในไอเสียที่มีประสิทธิผลวิธีหนึ่ง Afterburner ที่ใช้มี Catalytic afterburner และ Flame afterburner

Catalytic afterburners จะติดตั้งอยู่ภายในตัวเรือนในบริเวณใกล้กับท่อไอเสีย แผ่น Catalyst บางๆทำจากโลหะผสมระหว่างทองคำขาวกับอลูมิเนียม, แวนาเดียม, หรือ โคบอลท์ออกไซด์ วางอยู่บนเซรามิกที่เป็นแท่ง, ลูกกลม, หรือตาข่าย ไอเสียไหลผ่าน Catalyst พร้อมกับอากาศที่ถูกดูดเข้ามาเพื่อให้แน่ใจว่าจะเกิดการ Afterburning ของสารมลพิษที่เผาไหม้ได้ที่อยู่ในไอเสีย

Flame afterburner นำมาใช้เพื่อลดมลพิษในไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล ในกรณีนี้ไอเสียจะถูกทำให้ร้อนขึ้นในห้องที่แยกเฉพาะด้วย Burner พิเศษที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิง อุณหภูมิที่สูงขึ้นของไอเสียจะช่วยส่งเสริมให้สารมลพิษเกิดการเผาไหม้

8-7 การหาค่าความดันเฉลี่ยหัวสูบด้วยวิธีของ Mazing และ Sineutsky

ในการหาสมการสำหรับค่าความดันเฉลี่ยหัวสูบในเครื่องยนต์ที่ใช้วัฏจักรผสมซึ่งกระบวนการอัดกับกระบวนการขยายตัวถูกสมมติให้มีเลขชี้กำลังโพลี่โทรปิกเป็น n_1 กับ n_2 นั้น สมการในรูปแบบทั่วไปสำหรับความดันเฉลี่ยประสิทธิผลหัวสูบคือ

$$p_{it} = \frac{W_{it}}{V_d} \qquad (8\text{-}7.1)$$

เมื่อ W_{it} คืองานหัวสูบของเครื่องยนต์ซึ่งเป็นพื้นที่ของแผนภาพอินดิเคเตอร์ทางทฤษฎี และ V_d คือปริมาตรกวาดของลูกสูบ

งานหัวสูบ W_{it} เท่ากับผลรวมทางพีชคณิตของงานระหว่างการเผาไหม้ W_{comb}, งานระหว่างการขยายตัว W_{exp}, และงานของการอัด W_{comp}

$$W_{it} = W_{comb} + W_{exp} - W_{comp} \qquad (8\text{-}7.2)$$

งานที่เป็นบวกระหว่างการเผาไหม้แบบความดันคงที่ (วิถี z′z) คือ

$$W_{comb} = p_z(V_z - V_c)$$

หรือ $$W_{comb} = p_z V_c (V_z/V_c - 1)$$

เนื่องจาก $p_z = \lambda p_c$, $\rho = V_z/V_c$

ดังนั้น $$W_{comb} = \lambda p_c V_c (\rho - 1) \qquad (8\text{-}7.3)$$

งานที่เป็นบวกระหว่างการขยายตัวแบบโพลี่โทรปิก (วิถี zb) คือ

$$W_{exp} = \frac{1}{n_2 - 1}(p_z V_z - p_b V_b) \qquad (8\text{-}7.4)$$

จากสมการของสถานะ สำหรับสถานะ b กับ z จะได้

$$\frac{p_b V_b}{p_z V_z} = \frac{T_b}{T_z}$$

และจากสมการของการขยายตัวแบบโพลี่โทรปิก

$$\frac{T_b}{T_z} = \frac{1}{\delta^{n_2-1}}$$

หลังจากแทนค่าและจัดรูปใหม่จะได้

$$W_{exp} = \frac{p_z V_z}{n_2 - 1}(1 - \frac{1}{\delta^{n_2-1}}) \qquad (8\text{-}7.5)$$

เนื่องจาก $p_z V_z = \lambda p_c \rho V_c$

ดังนั้น หลังจากแทนค่า จะได้

$$W_{exp} = \frac{1}{n_2 - 1}(1 - \frac{1}{\delta^{n_2 - 1}})\lambda\rho p_c V_c \qquad (8\text{-}7.6)$$

งานที่เป็นลบของการอัดแบบโพลี่โทรปิกคือ

$$W_{comp} = \frac{1}{n_1 - 1}(p_c V_c - p_a V_a) \qquad (8\text{-}7.7)$$

จากสมการของสถานะ สำหรับสถานะ a กับ c จะได้

$$\frac{p_a V_a}{p_c V_c} = \frac{T_a}{T_c}$$

และจากสมการของการอัดแบบโพลี่โทรปิก

$$\frac{T_a}{T_c} = \frac{1}{\varepsilon^{n_1-1}}$$

หลังจากแทนค่าและจัดรูปใหม่จะได้

$$W_{comp} = \frac{1}{n_1 - 1}(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_2-1}})p_c V_c \qquad (8\text{-}7.8)$$

รวมงานทั้งสามจะได้งานหัวสูบเป็น

$$W_{it} = \lambda p_c V_c(\rho - 1) + \frac{1}{n_2 - 1}(1 - \frac{1}{\delta^{n_2-1}})\lambda\rho p_c V_c - \frac{1}{n_1 - 1}(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_2-1}})p_c V_c \qquad (8\text{-}7.9)$$

เนื่องจาก $V_c = V_d/(\varepsilon - 1)$ ดังนั้น

$$W_{it} = \frac{p_c V_d}{\varepsilon - 1}[\lambda(\rho - 1) + \frac{1}{n_2 - 1}(1 - \frac{1}{\delta^{n_2-1}})\lambda\rho - \frac{1}{n_1 - 1}(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_2-1}})] \qquad (8\text{-}7.10)$$

จากสมการ (8-7.10) สำหรับความดันเฉลี่ยประสิทธิผลหัวสูบในรูปแบบทั่วไป ค่าความดันเฉลี่ยประสิทธิผลสำหรับวัฏจักรผสมจะเป็น

$$p_{it} = \frac{p_c}{\varepsilon - 1}[\lambda(\rho - 1) + \frac{1}{n_2 - 1}(1 - \frac{1}{\delta^{n_2-1}})\lambda\rho - \frac{1}{n_1 - 1}(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_2-1}})] \qquad (8\text{-}7.11)$$

สมการนี้สร้างขึ้นอย่างอิสระจากกันโดยศาสตราจารย์ E. K. Mazing และศาสตราจารย์ V. V. Sineutsky

สำหรับวัฏจักรความดันคงที่, $\lambda = 1$, เพราะฉะนั้น

$$p_{it} = \frac{p_c}{\varepsilon - 1}\left[(\rho - 1) + \frac{1}{n_2 - 1}\left(1 - \frac{1}{\delta^{n_2 - 1}}\right)\rho - \frac{1}{n_1 - 1}\left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_2 - 1}}\right)\right] \quad (8\text{-}7.12)$$

ในวัฏจักรปริมาตรคงที่ $\rho = 1$, เพราะฉะนั้น

$$p_{it} = \frac{p_c}{\varepsilon - 1}\left[\frac{1}{n_2 - 1}\left(1 - \frac{1}{\delta^{n_2 - 1}}\right)\lambda - \frac{1}{n_1 - 1}\left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_2 - 1}}\right)\right] \quad (8\text{-}7.13)$$

เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องสำหรับค่าความดันเฉลี่ยประสิทธิผลหัวสูบ จึงควรแก้ไขค่า p_{it} สำหรับความโค้งมนของแผนภาพอินดิเคเตอร์ที่แท้จริงด้วย ค่าความดันเฉลี่ยประสิทธิผลหัวสูบที่แก้ไขแล้วจึงมีค่าเป็น

$$p_i = \kappa\, p_{it} \quad (8\text{-}7.14)$$

เมื่อ $\kappa = 0.95\text{-}0.97$ คือค่าตัวประกอบแก้ไขสำหรับเครื่องยนต์สี่จังหวะ และ $\kappa = 0.96\text{-}0.98$ คือค่าตัวประกอบแก้ไขสำหรับเครื่องยนต์สองจังหวะ

ความดันเฉลี่ยประสิทธิผลในจังหวะดูดของเครื่องยนต์สี่จังหวะ $p_{i\,pump} = p_r - p_a$ ไม่ปรากฏในการคำนวณ p_i นี้ เนื่องจากงานในจังหวะนี้ถูกรวมไว้ในการสูญเสียทางกลของเครื่องยนต์แล้ว

ถ้าจะเอาผลจากงานที่กระทำโดยก๊าซในระหว่างกระบวนการดูดและระบายไอเสียเข้ามาคิดด้วย สำหรับเครื่องยนต์สี่จังหวะจะได้

$$p_i = \kappa\, p_{it} - p_{i\,pump} \quad (8\text{-}7.15)$$

ในกรณีของเครื่องยนต์สองจังหวะ สมการสำหรับความดันเฉลี่ยหัวสูบ (8-7.11), (8-7.12), และ (8-7.13) จะหมายถึงช่วงชักประสิทธิผลของลูกสูบและกำหนดให้เป็น p'_{it} ในขณะที่สมการสำหรับช่วงชักทั้งหมดเป็น

$$p_{it} = p'_{it}(1 - \nu) \quad (8\text{-}7.16)$$

เมื่อ ν คือส่วนที่สูญเสียของช่วงชักลูกสูบ

ค่าความดันเฉลี่ยหัวสูบ p_i สำหรับเครื่องยนต์ในขณะที่รับภาระเต็มพิกัดเป็นค่าดังในตารางที่ 8-7.1

ตารางที่ 8-7.1 ค่าความดันเฉลี่ยหัวสูบในขณะที่รับภาระเต็มพิกัด

เครื่องยนต์	ksc	bar
เครื่องยนต์ดีเซล:		
สี่จังหวะ, Airless injection, ไม่อัดบรรจุ	6.5-7.5	6.37-7.35
สี่จังหวะ, Airless injection, อัดบรรจุ	8.5-17	8.34-16.67
สองจังหวะ, Airless injection, with loop-flow scavenging	5.5-6.0	5.39-5.88
สองจังหวะ, Airless injection, with uni-flow scavenging	6.5-8.5	6.37-8.34
สองจังหวะ, Airless injection, with scavenging pressure from 2 to 6 atm abs.	9-18	8.83-17.65
สองจังหวะ, Air injection	6-6.5	5.88-6.37
สองจังหวะ, Double acting	5-5.5	4.9-5.39
เครื่องยนต์ Dual-fuel (gas-liquid)	6-6.5	5.88-6.37
เครื่องยนต์ที่ใช้คาร์บูเรเตอร์	7-11	6.86-10.79

ตัวอย่างที่ 8-7.1 จงทำการคำนวณทางความร้อนและหามิติพื้นฐานทางด้านขนาดความจุของกระบอกสูบสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลหกสูบสี่จังหวะแบบ Airless injection โดยกำหนดให้

กำลังเพลาของเครื่องยนต์ $P_b = 350$ hp (261.1 kW)

ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ $n = 500$ rpm

สัมประสิทธิ์อากาศ $\alpha = 2$

ความดันของการเผาไหม้ $p_z = 50$ atm abs. (50.65 bar)

อัตราส่วนการอัด $\varepsilon = 13$

วิธีทำ สมมติให้

อุณหภูมิบรรยากาศ $T_{atm} = 290$ K

ความดันบรรยากาศ $p_{atm} = 1.0$ atm abs. (1.013 bar)

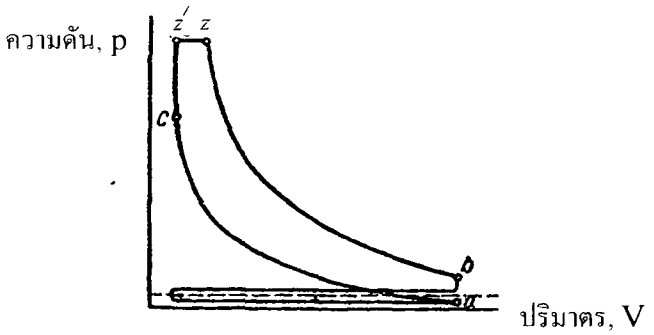
สัมประสิทธิ์ไอเสียตกค้าง $f = 0.047$

ส่วนประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิง $C = 86\%$, $H = 13\%$, $O_f = 1\%$

ค่าความร้อนค่าต่ำของเชื้อเพลิง $q_f = 42.29$ MJ/kg

ความดันเริ่มต้นของจังหวะอัด $p_a = 0.9$ atm abs. (0.9117 bar)

การคำนวณจะกระทำบนพื้นฐานของสถานะต่างๆในแผนภาพอินดิเคเตอร์ตามรูปที่ 8-7.1



รูปที่ 8-7.1 แผนภาพอินดิเคเตอร์ของเครื่องยนต์ดีเซลสี่จังหวะแบบ Airless injection

ที่สถานะ a (เริ่มต้นของจังหวะอัด) อุณหภูมิเริ่มต้นของการอัดจะหาได้จากสมการ (8-2.7)

$$T_a = \frac{T_{atm} + \Delta T + fT_r}{1+f} = \frac{290 + 17 + 0.047 \times 723}{1 + 0.047} = 325.7 \text{ K}$$

โดยสมมติว่าอุณหภูมิของไอเสียตกค้างเป็น T_r = 723 K และ ΔT = 17 °C และประสิทธิภาพในการบรรจุไอดีหาได้จากสมการ (8-2.15)

$$\eta_v = \frac{\varepsilon p_a T_{atm}}{(\varepsilon - 1)(1+f) p_{atm} T_a} = \frac{13}{(13-1)} \frac{1}{(1+0.047)} \frac{0.9 \times 290}{1 \times 325.7} = 0.829$$

ที่สถานะ c (สิ้นสุดการอัด) จากสมการ (8-3.2)

$$a + b T_a (\varepsilon^{k_1 - 1} + 1) = \frac{8314}{k_1 - 1}$$

โดยวิธีการทดลองแทนค่าจะได้ค่า k_1 = 1.378 และจากสมการ (8-3.8) ซึ่งทำให้

$$19344 + 2.219\,(325.6)(13^{0.378} + 1) \approx \frac{8314}{0.378}$$

สมมติให้ $n_1 \approx k_1 = 1.378$, ความดันหลังการอัดคือ

$$p_c = p_a \varepsilon^{n_1} = (0.90)(13^{1.378}) = 30.85 \text{ atm abs.}$$

อุณหภูมิหลังการอัดคือ

$$T_c = T_a \varepsilon^{n_1 - 1} = (325.7)(13^{1.378-1}) = 858.8 \text{ K}$$

ความดันหลังการเผาไหม้ถูกเลือกขึ้นโดยพิจารณาในแง่ความแข็งแรงของชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ (ในตัวอย่างนี้กำหนดให้ p_z = 50 atm abs) ดังนั้นอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของความดันคือ

$$\lambda = \frac{p_z}{p_c} = \frac{50}{30.85} = 1.62$$

ที่สถานะ z (สิ้นสุดการเผาไหม้แบบความดันคงที่) ปริมาณอากาศที่ต้องการทางทฤษฎีสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงจะหาได้จากสมการ (5-2.2) คือ

$$L_{theo} = \frac{1}{0.21}\left(\frac{C}{12}+\frac{H}{4}+\frac{O_f}{32}\right) = \frac{1}{0.21}\left(\frac{0.86}{12}+\frac{0.13}{4}+\frac{0.01}{32}\right)$$

$= 0.498$ kmole/kg เชื้อเพลิง

ปริมาณอากาศที่ใช้จริงคือ

$$L_{act} = \alpha\ L_{theo} = 2.0(0.498) = 0.996 \text{ kmole/kg เชื้อเพลิง } (= L_{mix})$$

การเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 kg จะทำให้เกิดผลผลิตจากการเผาไหม้ดังนี้

CO_2: $L_{CO_2} = \frac{C}{12} = \frac{0.86}{12} = 0.0717$ kmole

H_2O: $L_{H_2O} = \frac{H}{2} = \frac{0.13}{2} = 0.0650$ kmole

O_2: $L_{O_2} = 0.21(\alpha - 1)\ L_{theo} = 0.21(2.0\text{-}1)(0.498) = 0.1045$ kmole

N_2: $L_{N_2} = 0.79\alpha\ L_{theo} = 0.79(2.0)(0.498) = 0.787$ kmole

ปริมาณผลผลิตจากการเผาไหม้ทั้งหมดคือ

$$L_{prod} = 0.0717 + 0.0650 + 0.1045 + 0.787 = 1.0282 \text{ kmole/ kg เชื้อเพลิง}$$

สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงเชิงโมล จากสมการ (5-2.15) คือ

$$\mu_o = \frac{L_{prod}}{L_{mix}} = \frac{1.0282}{0.996} = 1.032$$

สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงเชิงโมลเมื่อคิดไอเสียตกค้างด้วย จากสมการ (5-2.18) คือ

$$\mu = \frac{\mu_o + f}{1+f} = \frac{1.032 + 0.047}{1.047} = 1.031$$

ปริมาณสัมพัทธ์ของส่วนประกอบผลผลิตจากการเผาไหม้คือ

$$\upsilon_{CO_2} = \frac{L_{CO_2}}{L_{prod}} = \frac{0.0717}{1.0282} = 0.0697,$$

$$\upsilon_{H_2O} = \frac{L_{H_2O}}{L_{prod}} = \frac{0.0650}{1.0282} = 0.0632$$

$$\upsilon_{N_2} = \frac{L_{N_2}}{L_{prod}} = \frac{0.7862}{1.0282} = 0.765,$$

$$\upsilon_{O_2} = \frac{L_{O_2}}{L_{prod}} = \frac{0.1045}{1.0282} = 0.102$$

ค่าความจุความร้อนเชิงโมลของไอเสียที่ปริมาตรคงที่ สมการ (5-2.25) คือ

$$M\ c_{v,\,prod} = a_{prod} + b_{prod}\ T_z = 20508 + 2.588\ T_z$$

เมื่อ $a_{prod} = \upsilon_{CO_2}\ a_{CO_2} + \upsilon_{H_2O}\ a_{H_2O} + \upsilon_{N_2}\ a_{N_2} + \upsilon_{O_2}\ a_{O_2}$

$= 0.0697(32\ 742) + 0.0632(24\ 243) + (0.765+0.102)(19\ 344)$

$= 20\ 586$

$b_{prod} = \upsilon_{CO_2}\ b_{CO_2} + \upsilon_{H_2O}\ b_{H_2O} + \upsilon_{N_2}\ b_{N_2} + \upsilon_{O_2}\ b_{O_2}$

$$= 0.0697(5.234) + 0.0632(4.689) + (0.765+0.102)(2.219)$$

$$= 2.585$$

ค่าความจุความร้อนเชิงโมลของไอเสียที่ความดันคงที่คือ

$$M\,c_{p.\,prod} = M\,c_{v.\,prod} + 8314 = a_{prod} + 8314 + b_{prod}\,T_z$$

$$= 28900 + 2.585\,T_z \text{ kJ/kmole K}$$

สมมติว่าสัมประสิทธิ์การใช้ประโยชน์ความร้อน $\xi = 0.824$, ดังนั้น หลังจากแทนค่าลงในสมการการเผาไหม้สำหรับวัฏจักรผสม สมการ (8-4.12)

$$\frac{\xi q_f}{\alpha L_{theo}(1+f)} + [(Mc_v)_a + 8314\lambda]T_c = \mu(Mc_p)_{prod}\,T_z$$

จะได้

$$\frac{0.824 \times 42290}{2 \times 0.498(1+0.047)} + [20067 + 8314 \times 1.62]858.8 = 1.031(28900 + 2.585T_z)T_z$$

หลังจากแก้สมการเพื่อหาค่าของ T_z จะได้

$$T_z = 1830 \text{ K}$$

อัตราส่วนการขยายตัวช่วงแรก คือ

$$\rho = \frac{\mu T_z}{\lambda T_c} = \frac{1.031}{1.62} \times \frac{1830}{860} = 1.356$$

ที่สถานะ b (สิ้นสุดการขยายตัว) อัตราส่วนการขยายตัวช่วงหลัง คือ

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\rho} = \frac{13}{1.356} = 9.59$$

ความดันและอุณหภูมิที่ปลายของกระบวนการขยายตัว คือ

$$p_b = \frac{p_z}{\delta^{n_2}} = \frac{50}{9.59^{1.30}} = 2.65 \text{ atm abs.}$$

เมื่อเลขชี้กำลังโพลีโทรปิกในการขยายตัว $n_2 = k_2 = 1.30$, ซึ่งได้หลังจากทำการคำนวณจาก

$$a_{prod} + b_{prod}\,T_z\left(1 + \frac{1}{\delta^{n_2-1}}\right) = \frac{8314}{n_2 - 1}$$

โดยเมื่อ $n_2 = 1.3$ จะทำให้ได้

$$20586 + 2.585(1830)\left(1 + \frac{1}{9.59^{0.3}}\right) \cong \frac{8314}{0.3}$$

และ $$T_b = \frac{T_z}{\delta^{n_2-1}} = \frac{1830}{9.59^{0.3}} = 928.8 \text{ K}$$

ค่าความดันเฉลี่ยหัวสูบที่ยังไม่ได้แก้ไขความโค้งมนของแผนภาพอินดิเคเตอร์ คือ

$$p_{ii} = \frac{p_c}{\varepsilon - 1}\left[\lambda(\rho - 1) + \frac{1}{n_2 - 1}\left(1 - \frac{1}{\delta^{n_2-1}}\right)\lambda\rho - \frac{1}{n_1 - 1}\left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_2-1}}\right)\right]$$

$$p_{it} = \frac{30.85}{13-1}[1.62(1.356\text{-}1)+\frac{1}{1.3-1}(1-\frac{1}{9.59^{0.3}})1.62\times1.356 - \frac{1}{1.378-1}(1-\frac{1}{13^{0.378}})]$$

$$= 6.5316 \text{ atm} = 6.616 \text{ bar}$$

ค่าความดันเฉลี่ยหัวสูบที่แก้ไขความโค้งมนของแผนภาพอินดิเคเตอร์แล้วคือ

$$p_i = \kappa\ p_{it} = 0.97(6.616) = 6.418 \text{ bar}$$

เมื่อ $\kappa = 0.97$ คือค่าตัวประกอบเพื่อแก้ไขให้ถูกต้องสำหรับความโค้งมนของแผนภาพอินดิเคเตอร์

ค่าความดันเฉลี่ยประสิทธิผลเพลา คือ

$$p_b = p_i\eta_m = 6.418(0.85) = 5.455 \text{ bar}$$

เมื่อประสิทธิภาพเชิงกล $\eta_m = 0.85$

หลังจากทำการคำนวณทางความร้อนจบแล้ว จะหามิติพื้นฐานที่แสดงขนาดของเครื่องยนต์คือความโตของกระบอกสูบ (d) และช่วงชักของลูกสูบ (l) ได้ดังนี้ (โดยสมมติให้ความเร็วของลูกสูบ C = 6 m/s)

$$d = \sqrt{\frac{16P_b}{\pi p_b Ck}} = \sqrt{\frac{16(261.1)}{\pi(5.455)(6)(6)}} = 0.2602 \text{ m} \approx 26 \text{ cm}$$

$$l = \frac{C}{2n} = \frac{6}{2(500/60)} = 0.36 \text{ m} = 36 \text{ cm}$$

ตอบ

แบบฝึกหัด

1. จงทำการคำนวณทางความร้อนของเครื่องยนต์ที่ใช้คาร์บูเรเตอร์สำหรับรถยนต์นั่งเครื่องหนึ่ง แล้วใช้ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณหามิติที่สำคัญของเครื่องยนต์และสมรรถนะที่คาดว่าเครื่องยนต์เครื่องนี้จะทำได้ โดยให้ใช้ข้อมูลขั้นต้นดังนี้: กำลังเพลา 75 kW @ 4800 rpm, จำนวนสูบ = 6, อัตราส่วนการอัด = 7.5, สัมประสิทธิ์อากาศ = 0.9, น้ำมันก๊าซโซลีนที่ใช้มี C = 0.855, H = 0.145, ให้ค่าความร้อนค่าต่ำเป็น 44 MJ/kg

2. จงทำการคำนวณทางความร้อนของเครื่องยนต์ดีเซลสำหรับรถบรรทุกเครื่องหนึ่ง โดยให้ใช้ข้อมูลขั้นต้นดังนี้: กำลังเพลา 160 kW @ 2400 rpm, จำนวนสูบ = 8, อัตราส่วนการอัด = 16.5, สัมประสิทธิ์อากาศ = 1.4, น้ำมันดีเซลที่ใช้มี C = 0.87, H = 0.126, $O_f = 0.004$, ให้ค่าความร้อนค่าต่ำเป็น 42 MJ/kg

3. จงทำการคำนวณทางความร้อนของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนสำหรับรถยนต์เครื่องหนึ่ง แล้วใช้ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณหามิติที่สำคัญของเครื่องยนต์และสมรรถนะที่คาดว่าเครื่องยนต์เครื่องนี้จะทำได้ โดยให้ใช้ข้อมูลขั้นต้นดังนี้: กำลังเพลา 80 kW @ 5200 rpm, จำนวนสูบ = 6, อัตราส่วนการอัด = 8.5, สัมประสิทธิ์อากาศ = 0.9, น้ำมันที่ใช้มี C = 0.855, H = 0.145, ให้ค่าความร้อนค่าต่ำเป็น 44 MJ/kg

ภาคผนวก

ค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซที่เป็นองค์ประกอบของผลผลิตจากการเผาไหม้ (มีหน่วยเป็น kJ/kmole K) สามารถคำนวณได้จากสมการเชิงประจักษ์ (ซึ่งเป็นผลงานของ N. M. Glagolev) ต่อไปนี้:

อุณหภูมิก๊าซตั้งแต่ 0 - T (เป็น K):

คาร์บอนไดออกไซด์:	$Mc_v = a + b\,T_a = 32\,742 + 5.234T$
น้ำในสถานะไอ:	$Mc_v = 24\,243 + 4.689T$
ไนโตรเจน, ออกซิเจน, อากาศ:	$Mc_v = 19\,344 + 2.219T$

อุณหภูมิก๊าซตั้งแต่ 0 - T (เป็น ^{o}C):

คาร์บอนไดออกไซด์:	$Mc_v = a + b\,T_a = 35\,590 + 5.234T$
น้ำในสถานะไอ:	$Mc_v = 25\,541 + 4.689T$
ไนโตรเจน, ออกซิเจน, อากาศ:	$Mc_v = 20\,558 + 2.219T$

เอกสารอ้างอิง

1. Arkhangelsky V, Khovakh M, Stepanov Y, Trusov V, Vikhert M and Voinov A (1976). **Motor Vehicle Engines**, Translated by Troitsky A and Lieb G, Moscow: Mir Publishers, pp. 76-190.
2. Arkhangelsky V, Khovakh M, Stepanov Y, Trusov V, Vikhert M and Voinov A (1979). **Motor Vehicle Engines**, Translated by Troitsky A and Samokhvalov M, Moscow: Mir Publishers, pp. 71-173.
3. Artamonov MD, Ilarionov VA and Morin MM (1976). **Motor Vehicles Fundamentals and Design**, Translated by Troitsky A, Moscow: Mir Publishers, pp. 25-52.

4. Petrovsky N (19xx). **Marine Internal Combustion engines**, Translated by Isakson HE, Moscow: Mir Publishers, pp. 27-56.

เอกสารที่แนะนำให้ศึกษาเพิ่มเติม

1. Arkhangelsky V, Khovakh M, Stepanov Y, Trusov V, Vikhert M and Voinov A (1976). **Motor Vehicle Engines**, Translated by Troitsky A and Lieb G, Moscow: Mir Publishers, Chapter 3 Actual cycles of engines.
2. Arkhangelsky V, Khovakh M, Stepanov Y, Trusov V, Vikhert M and Voinov A (1979). **Motor Vehicle Engines**, Translated by Troitsky A and Samokhvalov M, Moscow: Mir Publishers, Chapter 3 Actual cycles of engines.
3. Artamonov MD, Ilarionov VA and Morin MM (1976). **Motor Vehicles Fundamentals and Design**, Translated by Troitsky A, Moscow: Mir Publishers, Chapter III Actual cycles of internal-combustion engines.
4. Petrovsky N (19xx). **Marine Internal Combustion engines**, Translated by Isakson HE, Moscow: Mir Publishers, Chapter 11 Theory and calculation of actual engine cycle.
5. Heywood JB (1988). **Internal Combustion Engine Fundamentals**, New York: McGraw-Hill, Chapter 5 Ideal models of engine cycles.