บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ข้อได้เปรียบของการนำ LPG มาใช้กับเครื่องยนต์เอสไอคือ LPG เป็นเชื้อเพลิงก๊าซทำให้การผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ทำได้ง่าย, การจ่ายเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์หลายสูบค่อนข้างสม่ำเสมอ (distribution) ,มลพิษที่เกิดจากไอเสียน้อยกว่าแก๊สโซลีน [2,3,4,5,6,7] นอกจากนี้ LPG ยังมีความต้านทานการน็อคค่อนข้างสูง [8] สามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ที่มีอัตราส่วนกำลังการอัดที่สูงได้ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ LPG สูงกว่าเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์แก๊สโซลีน

เพื่อให้สามารถบรรลุข้อได้เปรียบดังกล่าวนั้น ต้องพิจารณาส่วนประกอบต่างๆ ในการนำ LPG มาใช้กับเครื่องยนต์เอสไอได้แก่ องค์ประกอบของเชื้อเพลิง, คุณสมบัติต่างๆ และเทคโนโลยีที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ เป็นต้น

2.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติของ LPG

2.1.1 องค์ประกอบของ LPG

LPG หรือ ก๊าซปิโตรเลียมเหลวหมายถึง ก๊าซไฮโดรคาร์บอนดังต่อไปนี้อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างผสมกันเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ โพรเพน (propane), โพรพีนหรือโพรพิลีน (propene or propylene), บิวเทน (butane)และ บิวทีนหรือบิวทิลีน (butene or butylene) อาจอยู่ในสภาพก๊าซหรือของเหลวก็ได้ [1] ในการทดสอบนี้เป็น commercial grade ซึ่งจำหน่ายทั่วไป

2.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพของ LPG

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ LPG เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงอื่นแสดงในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีขององค์ประกอบใน LPG เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงอื่นๆ [10,11,12]

Property	Gasoline	Propane	Butane	LPG	Methane	Hydrogen
1. Chemical Formula	C_4 to C_{12}	C_3H_8	C_4H_{10}	$C_{3.6}H_{9.2}$	CH_4	H_2
2. Molecular Weight	100—105	44.1	58.12	52.4	16.04	2.02
3. Specific gravity, 15 °C/15 °C	0.72—0.78	0.508	0.580	0.551	0.424	0.07
4. gaseous density, g/liters @ 15 °C	-	1.548	2.071	1.862	0.55	—

[1] มาตรฐานอุตสากรรมก๊าซปิโตรเลียมเหลว มอก.450-2528

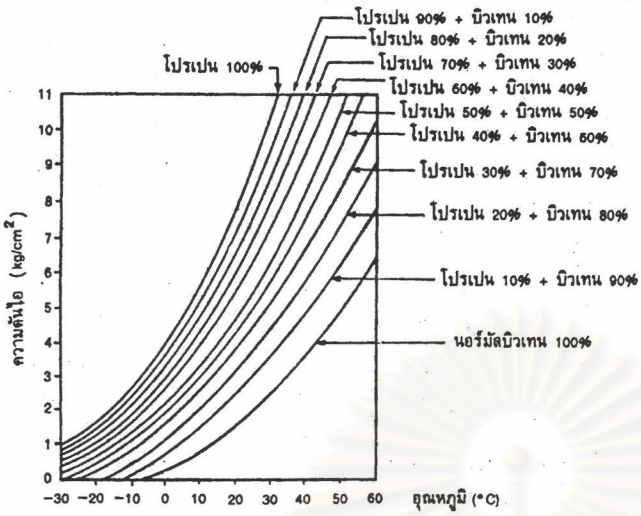
Property	Gasoline	Propane	Butane	LPG	Methane	Hydrogen
5. Boiling temperature, °C	27-225	-42.2	-0.5	-	-161.7	-2,367.8
6. Octane no.						
- Research octane no.	90—100	112	94	102	120	-
- Motor octane no.	81—90	97	89	92	120	-
- (R + M)/2	86—94	104	91	97	120	-
7. Autoignition temperature, °C	210-300	481	441	-	540	565-582
8. Flammability limits, volume %						
- Lower	1.4	2.1	1.8	1.9	5.3	4.1
- Higher	7.6	9.5	8.6	9.0	15	74
9. Latent heat, kJ/kg @ 15 °C	349	426	386	402	509	447
10. Heating Value						
- HHV, MJ/kg	43.8-47.4	50.0	49.1	49.5	54.9	142.0
- LHV, MJ/kg	42.9-44.2	46.0	45.3	45.6	49.5	120.0
11. Stoichiometric air/fuel, weight	14.7	15.7	15.5	15.6	17.2	34.3

2.1.2.1 ความถ่วงจำเพาะ

LPG มีค่าความถ่วงจำเพาะทั้งสถานะของเหลวและก๊าซ โดยในสภาพของเหลวจะเปรียบเทียบกับน้ำที่ 4°C พบว่า LPG ในสถานะของเหลวมีน้ำหนักเบากว่าน้ำ (น้ำมีความถ่วงจำเพาะเป็น 1, โพรเพนเหลวเป็น 0.508 และบิวเทนเหลวเป็น 0.584) ขณะที่ความถ่วงจำเพาะในสภาพก๊าซจะเปรียบเทียบกับอากาศที่ 0°C ความดัน 1 บรรยากาศ พบว่า LPG ในสถานะก๊าซมีน้ำหนักมากกว่าอากาศ (อากาศมีความถ่วงจำเพาะเป็น 1 ,โพรเพนเป็น 1.55 และบิวเทนเป็น 2.07) โดยที่ค่าความถ่วงจำเพาะสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามความดันและอุณหภูมิ

2.1.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมกับอุณหภูมิและความดันไอ

เนื่องจาก LPG มีจุดเดือดต่ำ ดังนั้นที่ความดันบรรยากาศ LPG จะอยู่ในสถานะก๊าซ และถูกอัดให้เป็นของเหลวภายใต้ความดัน ค่าความดันที่ทำให้ LPG เป็นของเหลวเรียกว่า ความดันไอ (vapor pressure) โดยทั่วไปสามารถถือได้ว่ามีค่าเท่ากับความดันของ LPG ที่อยู่ในถังเก็บ ปัจจัยที่มีผลต่อความดันไอของก๊าซคืออัตราส่วนผสมและอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 2-1 พบว่าปริมาณส่วนผสมของโพรเพนที่มากขึ้น ทำให้ค่าความดันไอสูงขึ้นด้วย เนื่องจากโพรเพนมีอุณหภูมิจุดเดือดต่ำกว่าบิวเทน สำหรับผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้นต้องใช้ค่าความดันไอที่สูงขึ้นในการทำให้ก๊าซกลายเป็นของเหลว แต่ในกรณีของปริมาตรของเหลวที่อยู่ในถังมากหรือน้อยจะไม่มีผลต่อความดันไอ ถ้าอุณหภูมิและส่วนผสมไม่เปลี่ยนแปลง



(a)

TABLE 2 APPROXIMATE VAPOR PRESSURE, PSIG

TEMPERATURE		PROPANE → TO → BUTANE						
°F	°C	100%	80/20	60/40	50/50	40/60	20/80	100%
-40	-40	3.6	—	—	—	—	—	—
-30	-34.4	8	4.5	—	—	—	—	—
-20	-28.9	13.5	9.2	4.9	1.9	—	—	—
-10	-23.3	20	16	9	6	3.5	—	—
0	-17.8	28	22	15	11	7.3	—	—
10	-12.2	37	29	20	17	13	3.4	—
20	-6.7	47	36	28	23	18	7.4	—
30	-1.1	58	45	35	29	24	13	—
40	4.4	72	58	44	37	32	18	3
50	10	86	69	53	46	40	24	6.9
60	15.6	102	80	65	56	49	30	12
70	21.1	127	95	78	68	59	38	17
80	26.7	140	125	90	80	70	46	23
90	32.2	165	140	112	95	82	56	29
100	37.8	196	168	137	123	100	69	36
110	43.3	220	185	165	148	130	80	45

(b)

รูปที่ 2-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ, อัตราส่วนผสมที่มีต่อความดันไอ [9]

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีขององค์ประกอบใน LPG แสดงดังตารางที่ 2-2

2.1.2.3 กลิ่น, สีและความเป็นพิษ

LPG บริสุทธิ์จะไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ดังนั้นเพื่อความปลอดภัย ผู้ผลิตจะเติมกลิ่นลงไป เมื่อเกิดการรั่วไหลขึ้นจะสามารถได้กลิ่น และเตรียมการป้องกันได้ คุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างคือ LPG เป็นตัวทำลายเช่นเดียวกับพวกน้ำมันระเหย จึงสามารถละลายอุปกรณ์ต่างๆ ที่ทำมาจากยางธรรมชาติ เช่นประเก็น หรือซีลยางได้ ดังนั้น อุปกรณ์ที่นำมาใช้งานกับ LPG ควรทำมาจากยางสังเคราะห์หรือวัตถุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับ LPG

2.1.3 คุณสมบัติการสันดาปของ LPG

2.1.3.1 ปริมาณสัมพันธ์ของการเผาไหม้

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างเชื้อเพลิงกับสารออกซิไดส์ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วคือออกซิเจนในอากาศ เมื่อเกิดการเผาไหม้ สารตั้งต้น (reactant) ที่ถูกออกซิไดส์ปล่อยความร้อนออกมา และเปลี่ยนไปเป็นสารผลิตภัณฑ์ (product) ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง reactant กับ product ได้จากสมการเคมี

การเผาไหม้ที่สมบูรณ์พอดี เรียกว่าการเผาไหม้ทางทฤษฎี (stoichiometric combustion) สำหรับเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนคือปฏิกิริยาทางเคมีที่มีออกซิเจนพอดีที่ออกซิไดส์คาร์บอนกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และออกซิไดส์ไฮโดรเจนกลายเป็นน้ำทั้งหมด สำหรับการเผาไหม้ทางทฤษฎีของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนใดๆ ที่มีสูตรเป็น C_aH_b กับอากาศสามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้

$$C_aH_b + \left(a+\frac{b}{4}\right)\left(O_2 + 3.773N_2\right) \rightarrow aCO_2 + \frac{b}{2}H_2O + 3.773\left(a+\frac{b}{4}\right)N_2$$

การคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างอากาศเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ของ LPG โดยทั่วไปกำหนดให้ LPG มีส่วนผสมระหว่างโพรเพนต่อบิวเทนในอัตราส่วน 40:60% โดยปริมาตรดังนั้น

มวลโมเลกุลของ LPG สามารถหาได้จากสมการ

$$M = \sum_i x_i M_i = (0.4 \times 44.1) + (0.6 \times 58.12) = 52.4$$

สามารถหาอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง และเชื้อเพลิงต่ออากาศที่ stiochiometric ได้ดังนี้

$$(0.4C_3H_8 + 0.6C_4H_{10}) + 5.75(O_2 + 3.773N_2) \rightarrow 3.5CO_2 + 4.5H_2O + 5.75(3.773N_2)$$

ดังนั้นอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงต่ออากาศ (equivalence ratio, ϕ) และอัตราส่วนสัมพัทธ์ของอากาศต่อเชื้อเพลิง (relative ratio, λ) หาได้จากสมการ

$$\left(A/F\right)_s = \left(F/A\right)_s^{-1} = \frac{m_a}{m_f} = \frac{5.75 \times 4.773 \times 28.97}{52.4} = 15.6$$

$$\left(F/A\right)_s = \frac{1}{15.6} = 0.064$$

ดังนั้น $\phi = \dfrac{\left(F/A\right)_{actual}}{\left(F/A\right)_s} = \dfrac{\left(F/A\right)_{actual}}{0.064}$ และ $\lambda = \dfrac{\left(A/F\right)_{actual}}{\left(A/F\right)_s} = \dfrac{\left(A/F\right)_{actual}}{15.6}$

2.1.3.2 Heat of combustion of LPG

ค่าความร้อนที่สภาวะปกติของเชื้อเพลิงก๊าซ LPG สามารถคำนวณได้โดยอาศัยค่าผลรวมของ heat of combustion ของสารตั้งต้น ลบด้วยผลรวมของ heat of combustion ของสารผลิตภัณฑ์ที่ stoichiometric ของ LPG ตามสมการการเผาไหม้ข้างต้น มีค่า HHV = 49.5 Mj/kg, LHV = 45.6 Mj/kg ดังรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.

นอกจากนี้ยังต้องพิจารณา ความร้อนในการสันดาปต่อหน่วยปริมาตรและน้ำหนักซึ่งมีผลต่อขนาดและน้ำหนักของถังบรรจุเชื้อเพลิงในยานยนต์ เพราะความร้อนในการสันดาปที่ได้จากอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ stoichiometric มีผลต่อกำลังเครื่องยนต์ที่ได้ออกมา

2.1.3.3 พิสัยการลุกไหม้และ Lean limit

เชื้อเพลิงที่จะเกิดการสันดาปได้นั้นต้องผสมกับอากาศในอัตราส่วนผสมที่พอเหมาะซึ่งอยู่ภายในช่วงของส่วนผสมเชื้อเพลิงกับอากาศที่สามารถลุกไหม้ได้ เรียกว่า พิสัยการลุกไหม้โดยแสดงค่าเป็นอัตราส่วนร้อยละ (%) ของปริมาตรก๊าซต่อปริมาตรอากาศ LPG มีค่า 1.9 ถึง 9.0 ดังแสดงในตารางที่ 2.1 เมื่อเปรียบเทียบกับแก๊สโซลีน (1.4-7.6) จะเห็นว่า LPG มีพิสัยการลุกไหม้มากกว่า

2.1.3.4 คุณสมบัติต้านทานการน็อค

คุณสมบัติในการต้านทานการน็อคเป็นคุณสมบัติสำคัญของเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์เอสไอ การวัดค่าเหล่านี้แตกต่างกันหลายวิธี สำหรับแก๊สโซลีนและเชื้อเพลิงเหลวโดยทั่วไปใช้ค่า research และ motor octane number (MON และ RON) ในการบอกคุณสมบัตินี้ แต่สำหรับเชื้อเพลิงก๊าซนั้น การใช้ค่า RON นี้ไม่เหมาะสมเนื่องจากค่าที่ได้ไม่แม่นยำพอดัง ASTM ได้กำหนดมาตรฐานที่ใช้ในการหาคุณสมบัติต้านทานการน็อคของ LPG เป็นวิธี MON แต่ไม่ได้กำหนดการหาโดยวิธี RON [8]

K. Boldt [13] พบว่าในการทดสอบเครื่องยนต์ LPG โดยทั่วไป จะนำค่า MON มาใช้ในการวิเคราะห์ความต้านทานการน็อค และพบว่า MON ต่ำสุดสำหรับ LPG ที่สามารถนำมาใช้ในเครื่องยนต์แก๊สโซลีนมีค่าเท่ากับ 85 เนื่องจากแก๊สโซลีนในปัจจุบันแบ่งเป็น premium grade ซึ่งมี MON เท่ากับ 85 (RON = 95) และ regular grade ซึ่งมี MON เท่ากับ 82 (RON = 91)

LPG มีคุณสมบัติต้านทานการน็อคดีกว่าแก๊สโซลีน โดยมีความสัมพันธ์กับปริมาณโพรเพนที่เป็นองค์ประกอบ เนื่องจากเครื่องยนต์ที่ใช้ LPG โดยทั่วไปถูกดัดแปลงมาจากเครื่องยนต์แก๊สโซลีนซึ่งมีอัตราส่วนการอัดต่ำ จึงไม่จำเป็นต้องมีสัดส่วนของโพรเพนผสมอยู่ใน LPG มาก นั่นคือปริมาณของโพรเพนใน LPG ขึ้นอยู่กับความต้องการออกเทนของเครื่องยนต์ที่ดัดแปลงมา นอกจากนี้ยังอยู่บนพื้นฐานของต้นทุนและประสิทธิภาพในการผลิตอีกด้วย [4,8]

ตาราง 2.3 แสดง MON สำหรับองค์ประกอบแต่ละชนิดใน LPG พบว่าโพรเพนและไอโซบิวเทนมี MON สูงกว่าความต้องการของเครื่องยนต์แก๊สโซลีน ,นอร์มอลบิวเทนมีค่าเทียบเท่ากับความต้องการ ขณะที่องค์ประกอบที่เป็น olefins (propene และ butene) มีค่าต่ำกว่าความต้องการ

ตารางที่ 2-2 แสดงค่า MON ขององค์ประกอบแต่ละชนิดใน LPG [8]

Gas component	MON (mass basis)
Propane	95.9
Propene	82.9
n-Butane	88.9
i-butane	97.1
butenes	76.8
Gasoline (premium)	85

2.2 ความสัมพันธ์ของ Wobbe index และ fuel metering

เนื่องจาก LPG เป็น commercial gases ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างส่วนผสมใน LPG (ส่วนใหญ่เป็นโพรเพนกับบิวเทน) มีค่าไม่คงที่ ทำให้มีผลต่อสมรรถนะและมลภาวะของไอเสีย

G. Wolff [14] แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของ fuel consumption ระหว่างส่วนผสม LPG ที่ต่างกัน พบว่าที่สัดส่วนโดยปริมาตรของโพรเพนต่อบิวเทนที่ 80:20 ดีกว่าที่สัดส่วน 70:30 ประมาณ 4%

พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับเชื้อเพลิงก๊าซคือ Wobbe index หรือ wobbe number ซึ่งเป็นการวัด interchangeability ของก๊าซโดยมีความสัมพันธ์กับการวัดเปรียบเทียบพลังงานความร้อนที่ไหลผ่านออริฟิส โดยก๊าซที่มีค่า wobbe index เท่ากันสามารถใช้ทดแทนกันได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนอัตราส่วนสารผสมเชื้อเพลิงกับอากาศ เมื่อกำหนดวิธีการจ่ายเชื้อเพลิงเหมือนกัน wobbe index ของเชื้อเพลิงต่างๆ สามารถคำนวณหาได้จากองค์ประกอบที่มีอยู่ในก๊าซ ดังสมการ

$$W = H/\sqrt{\rho}$$

เมื่อ H เป็นค่าความร้อนเชิงปริมาตรของก๊าซ และ ρ คือความถ่วงจำเพาะของก๊าซ

ค่า wobbe index เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความร้อนของปริมาณก๊าซที่ไหลผ่านออริฟิส เนื่องจากการ metering เชื้อเพลิงก๊าซใช้พื้นฐานของออริฟิส ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่า wobbe index ของเชื้อเพลิงจะเป็นสัดส่วนต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณพลังงานที่ไหลผ่าน (rate of energy flow) และยังมีผลต่ออัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศด้วย

C.S. Weaver [15] แสดงให้เห็นว่าการ variation ของ wobbe index ของเชื้อเพลิงก๊าซมีลักษณะเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลง ปริมาณพลังงานต่อปริมาตร (volumetric energy content) ของแก๊สโซลีน ค่า wobbe index ที่มีค่าต่ำลงทำให้อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงบางลง ขณะเดียวกัน ค่า wobbe index ที่มีค่าสูงขึ้นทำให้อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงหนาขึ้น ดังนั้นการ variation ของ wobbe index มีผลทั้งในแง่ของสมรรถนะของเครื่องยนต์และมลพิษของไอเสียที่ปล่อยออกมา ปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาระบบควบคุมการ metering แบบ closed loop control สำหรับควบคุมอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงเพื่อให้สามารถชดเชยค่า wobbe index ที่เปลี่ยนแปลงไปได้

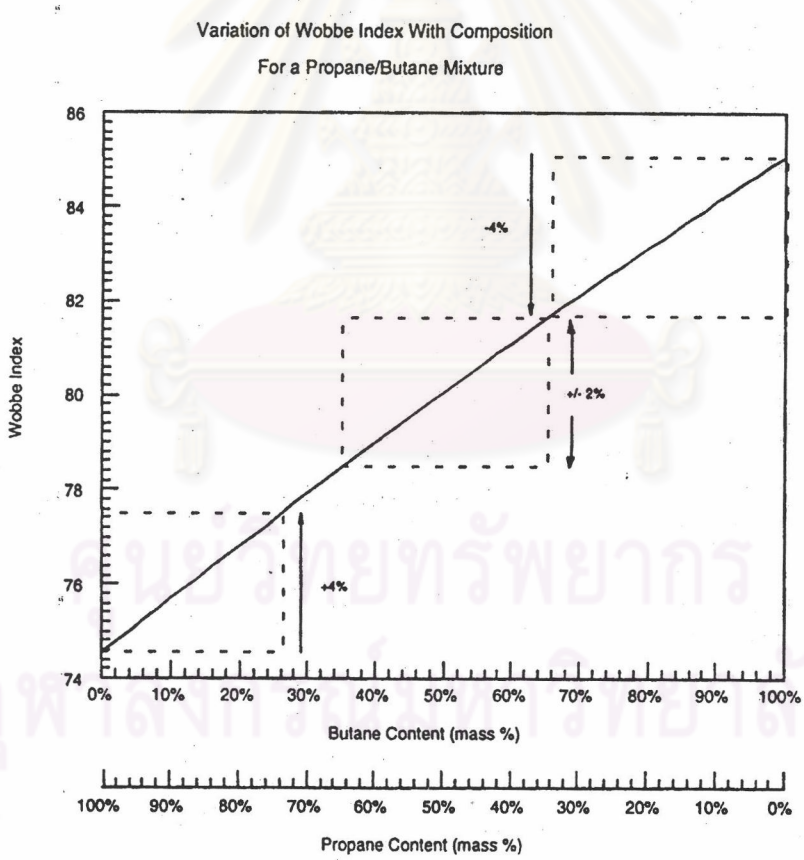
เมื่อพิจารณาถึงระดับของการ variation ของ wobbe index ที่ยอมรับได้สำหรับเครื่องยนต์ ต้องพิจารณาถึงระดับการ variation ของความหนาแน่นของแก๊สโซลีนที่ยอมรับได้ก่อน พิสัยความถ่วงจำเพาะของแก๊สโซลีนมีค่า 0.72-0.75 [8] นั่นคือมีพิสัยการ variation ประมาณ 4% หรือ $\pm$2% ของค่า nominal (0.735) ดังนั้นจึงใช้ค่านี้เป็นบรรทัดฐานในการพิสัยการ variation ของ wobbe index รูปที่ 2-2 แสดงค่า wobbe index ที่เปลี่ยนแปลงตามผลของ fuel composition สำหรับ LPG ที่มีส่วนผสมหลักของโพรเพนและบิวเทน กรอบสี่เหลี่ยมในรูปแสดงพิสัยที่ยอมรับในการ

variation ของ wobbe index สำหรับค่า nomial LPG composition 4 ค่า คือ 100% โพรเพน, 50% โพรเพนกับ 50 % บิวเทน, 40% โพรเพนกับ 60 % บิวเทน และ 100% บิวเทน ดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-3 แสดงค่าพิสัยของอัตราส่วนผสมระหว่างโพรเพนกับบิวเทนเมื่อกำหนด nominal

Nominal specification propane : butane	Lower range propane : butane	Higher range propane : butane
100% propane	100%: 0%	75%: 25%
50%: 50%	65%: 35%	35%: 65%
40%: 60%	55%: 45%	25%: 75%
100% butane	35%: 65%	0%: 100%

บรรทัดฐานนี้ใช้เพื่อควบคุมการ variation ของอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงได้อย่างเหมาะสม โดยที่ยังสามารถ significant flexibility ขององค์ประกอบ LPG [8]



รูปที่ 2-2 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของ LPG ที่มีต่อ wobbe index [8]

2.3. เทคโนโลยีที่ใช้กับเครื่องยนต์ LPG

เครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงก๊าซต้องการการควบคุมอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงที่แม่นยำเพื่อรักษาให้มีสมรรถนะและความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ดี และเกิดมลภาวะไอเสียน้อยที่สุด ในอดีตระบบ gaseous-fuel metering มีการทำงานโดยอาศัยกลไกของ mechanical เป็นหลักซึ่งมีลักษณะการทำงานเช่นเดียวกับคาร์บูเรเตอร์ที่ใช้งานกับแก๊สโซลีน ซึ่งมีอยู่สองชนิดคือ ชนิดเวนจูริคงที่ (fixed venturi) และชนิดเวนจูริแปรผัน (variable venturi) ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดต่อไป

R.A. Mengelkamp และ A.C. Hudson [1] ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ของระบบควบคุมการจ่ายเชื้อเพลิง LPG ชนิดคอดคอดคงที่ที่มีต่อสมรรถนะ (Performance) ของเครื่องยนต์ พบว่า มิกเซอร์ชนิดนี้ไม่สามารถให้อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงได้เหมาะสมกับเครื่องยนต์ตลอดทุกช่วงภาระของเครื่องยนต์

J. Klimstra [16] พบว่าระบบ metering ชนิดเวนจูริแปรผัน แม้จะให้สมรรถนะและประสิทธิภาพที่ดีแต่มีข้อผิดพลาดในการจ่ายเชื้อเพลิงเสมอ ซึ่งเกิดเนื่องจากการสึกหรอ, การทำงานที่อิสระ, คุณสมบัติที่ยืดหยุ่นของวัสดุ, การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเชื้อเพลิงและอากาศ, การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติและองค์ประกอบของเชื้อเพลิง เป็นต้น นอกจากนี้ระบบ mechanical metering ไม่สามารถใช้ได้กับ catalytic converter อีกด้วย

เนื่องจากเครื่องยนต์แก๊สโซลีนในปัจจุบันได้พัฒนาระบบควบคุมอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงเป็นระบบหัวฉีดที่อาศัยไมโครโพรเซสเซอร์ในการควบคุม ทำให้มีการพัฒนาระบบเชื้อเพลิงก๊าซเพื่อให้สามารถนำมาใช้งานร่วมกับเครื่องยนต์ดังกล่าวได้

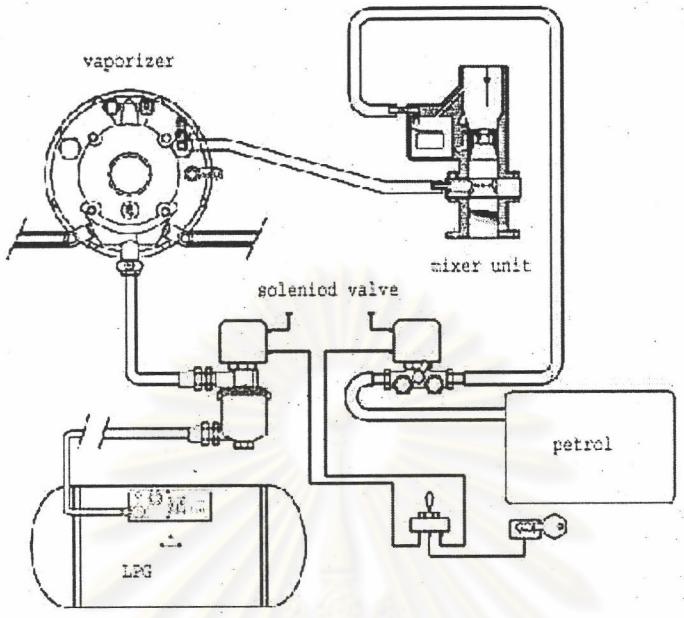
ดังนั้นการนำ LPG มาใช้งานกับเครื่องยนต์เอสไอซึ่งดัดแปลงมาจากเครื่องยนต์ที่ใช้แก๊สโซลีนเป็นเชื้อเพลิง จึงต้องคำนึงถึงเทคโนโลยีของเครื่องยนต์ที่นำมาดัดแปลงใช้ด้วย ในอดีตการนำ LPG มาใช้งานกับเครื่องยนต์เอสไออาศัยอุปกรณ์ควบคุมการจ่ายก๊าซ LPG เรียกว่า มิกเซอร์หรือคาร์บูเรเตอร์ก๊าซซึ่งทำงานในลักษณะเชิงกล [17] ซึ่งเหมาะสมกับเครื่องยนต์ที่มีระบบการควบคุมเชื้อเพลิงแบบคาร์บูเรชั่น แต่ในปัจจุบันเครื่องยนต์ส่วนใหญ่ได้พัฒนามาใช้ระบบหัวฉีด ควบคุมด้วยอิเล็กทรอนิคส์ในการจ่ายเชื้อเพลิง ดังนั้นเมื่อนำ LPG มาใช้จึงต้องอาศัยเทคโนโลยีที่สามารถใช้งานเข้ากันได้ (compatible) กับระบบควบคุมอิเล็กทรอนิคส์เดิมด้วย

B. Hollemans [4] ศึกษาเปรียบเทียบปริมาณไอเสียและเทคโนโลยีของผู้ผลิตที่ใช้ในการดัดแปลงเครื่องยนต์แก๊สโซลีนมาใช้กับ LPG โดยแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ (first to third generation) และยังสามารถพัฒนาเพื่อใช้งานต่อไปในอนาคตได้อีกดังนี้

2.3.1. ระบบ LPG carburetion (first generation)

ระบบคาร์บูเรเตอร์ LPG นี้เหมาะสำหรับพื้นที่ที่ไม่เคร่งครัดกับมาตรฐานมลพิษไอเสีย (emission standard) แสดงในรูปที่ 2-3 การทำงานอาศัยการควบคุมโดยระบบกลไก (mechanical

system) โดยทั่วไปการดัดแปลงทำให้เครื่องยนต์เป็นระบบ dual fuel สามารถใช้ทั้งแก๊สโซลีนและ LPG เป็นเชื้อเพลิงได้

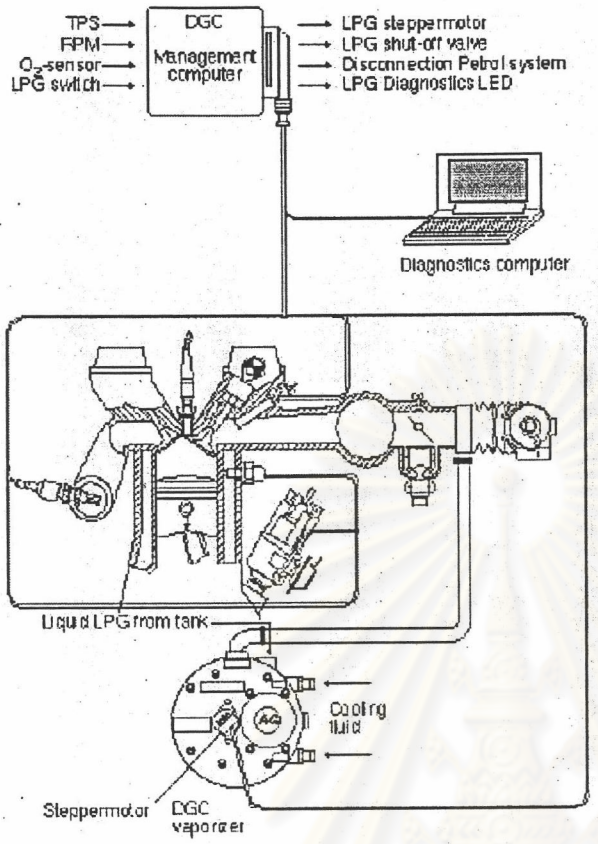


รูปที่ 2-3 แสดงส่วนประกอบของระบบคาร์บูเรชั่นใน first generation [17]

ส่วนประกอบของระบบคาร์บูเรเตอร์นี้ได้แก่ ถังเชื้อเพลิง, วาล์วนิรภัย (solenoid shut-off valve), เวเปอร์ไรเซอร์หรือเรกกูเรเตอร์ปรับความดัน (vaporizer/ pressure regulator) และ mixing unit สำหรับการทำงานของระบบเริ่มจาก LPG ในสภาวะของเหลวจากถังก๊าซไหลผ่านกรองเชื้อเพลิงและวาล์วนิรภัย เข้าเวเปอร์ไรเซอร์เพื่อลดความดัน ทำให้ LPG เหลวเปลี่ยนสถานะเป็นก๊าซที่มีความดันต่ำ และไหลไปตามท่อหลัก (main passage) และท่อเดินเบา (idle passage) ไปยังมิกเซอร์ (mixing unit) หรือคาร์บูเรเตอร์ก๊าซ ซึ่งทำหน้าที่ผสมก๊าซ LPG กับอากาศในอัตราส่วนที่เหมาะสมกับเครื่องยนต์ ก่อนจะถูกดูดเข้าสู่กระบอกสูบ แสดงดังรูปที่ 2-3

2.3.2. ระบบ LPG carburetion ควบคุมด้วยอุปกรณ์อิเลคโทรนิคส์ (second generation)

เนื่องจากมีความจำเป็นในการควบคุมมลพิษจากไอเสียให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ ทำให้ต้องพัฒนาอุปกรณ์ที่สามารถควบคุมปริมาณ LPG ให้แม่นยำมากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงมีการนำระบบการควบคุมแบบปิด (closed loop control) อาศัยไมโครโพรเซสเซอร์มาใช้งานควบคุมการทำงานของเวเปอร์ไรเซอร์กับมิกเซอร์ หลักการคือการป้อนข้อมูลรอบเครื่องยนต์ , ภาระของเครื่องยนต์ (manifold pressure หรือมวลอากาศที่นำเข้ามา) และระดับออกซิเจนในไอเสีย ให้กับ microprocessor ซึ่งทำหน้าที่ในการประมวลผลและควบคุมปริมาณ LPG ผ่านอุปกรณ์ควบคุมการไหลของ LPG ก่อนจ่ายเข้าไปในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ แสดงส่วนประกอบในรูปที่ 2-4



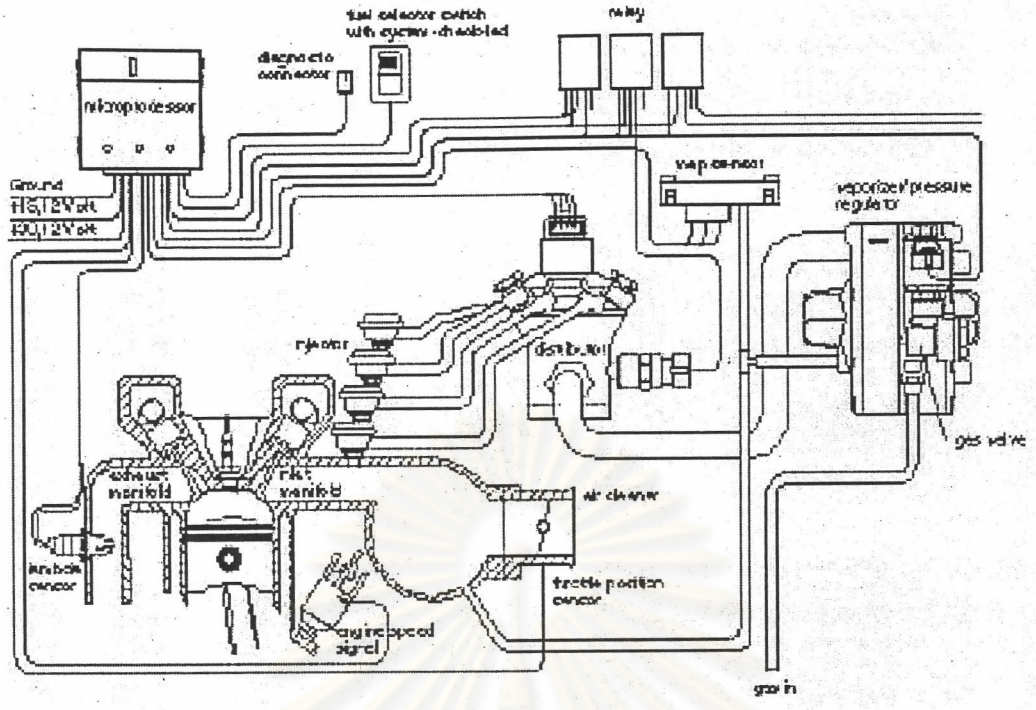
รูปที่ 2-4 แสดงส่วนประกอบของเครื่องยนต์ LPG ระบบคาร์บูเรชั่นควบคุมด้วยอิเล็กทรอนิคส์ใน second generation [4]

นอกจากนี้ ได้มีผู้ผลิตอุปกรณ์ที่ใช้ LPG กับเครื่องยนต์แก๊สโซลีนบางรายได้นำระบบควบคุมอิเลกโทรนิคส์ที่ซับซ้อนมากขึ้นมาใช้ ทำให้สามารถปรับแต่งการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมการจ่าย LPG เพื่อชดเชยปริมาณ LPG ในกรณีที่องค์ประกอบมีเปลี่ยนแปลงไป

2.3.3. ระบบการฉีด LPG (third generation)

การพัฒนาการในรูปแบบที่ 3 นี้ได้นำระบบควบคุมทางอิเลคโทรนิคส์ที่ซับซ้อนมากยิ่งขึ้นมาใช้ โดยอาจนำมา integrate กับระบบควบคุมของเครื่องยนต์แก๊สโซลีน โดยทั่วไปเป็นระบบ multiport injection ซึ่งเป็นการฉีด LPG ทั้งในรูปของเหลวหรือก๊าซ นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยระบบเรียนรู้ด้วยตัวเอง (self learning) และ unadjustable , มีไมโครโพรเซสเซอร์ควบคุมปริมาณการฉีดที่แม่นยำ

ดังนั้นต้องติดตั้งไมโครโพรเซสเซอร์ของ LPG เพิ่มเติมเข้าไปในระบบด้วย แสดงส่วนประกอบในรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 แสดงไดอะแกรมของเครื่องยนต์ระบบการฉีดไอ LPG แบบหลายจุด (multi-point dry gas injection system) [4]

เมื่อเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยระหว่างระบบต่างๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2-4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2-4 แสดงการเปรียบเทียบระบบการจ่ายเชื้อเพลิง LPG

ระบบเชื้อเพลิง	ข้อดี	ข้อเสีย
การคาร์บูเรชั่น (carburetion)	1. ราคาถูก 2. ติดตั้งง่าย	1. ลดประสิทธิภาพเชิงปริมาตร 2. ไม่เหมาะกับระบบควบคุมอิเล็กทรอนิคส์และการจ่ายเชื้อเพลิงไม่แม่นยำ 3. มีความผิดพลาดในการ distribution กับเครื่องยนต์หลายสูบ และมีปัญหาเนื่องจากการผสมของอากาศกับเชื้อเพลิง 4. มีอันตรายจาก back-fire ในระบบไอดี
การฉีดไอ LPG แบบจุดเดียว (single point vapor injection)	1. สามารถใช้งานได้กับระบบควบคุมอิเล็กทรอนิคส์ และมีความแม่นยำมากกว่าระบบคาร์บูเรชั่น 2. ไม่ซับซ้อนมากนัก	1. ลดประสิทธิภาพเชิงปริมาตร 2. เมื่ออุณหภูมิบรรยากาศต่ำต้องการความร้อนเพิ่มเพื่อใช้ในการระเหย LPG 3. มีความผิดพลาดในการ distribution กับเครื่องยนต์หลายสูบ 4. ต้องมีข้อมูลของความดันและอุณหภูมิของไอ LPG เพิ่มเติมเข้าไปฟังก์ชั่นการควบคุม
การฉีดของเหลว LPG แบบจุดเดียว (single point liquid injection)	1. ลดการสูญเสียของประสิทธิภาพเชิงปริมาตร 2. ลดอุณหภูมิอากาศเนื่องจากการระเหยของ LPG ในท่อร่วมไอดีและกระบอกสูบ 3. สามารถใช้งานร่วมกับระบบควบคุมอิเล็กทรอนิคส์และให้ความแม่นยำมากกว่าระบบคาร์บูเรชั่น	1. ต้องออกแบบระบบท่อจ่ายเชื้อเพลิงเพื่อรักษาให้ LPG อยู่ในสถานะของเหลว 2. ต้องเพิ่มแรงดันในถังเก็บสูงขึ้นเพื่อรักษาให้ LPG อยู่ในสถานะของเหลวเมื่ออุณหภูมิบรรยากาศเปลี่ยนแปลงไป หรือติดตั้งปั๊มในถังเก็บเพื่อเพิ่มแรงดันให้ LPG เหลวในกรณีที่มีท่อไหลกลับ 3. ต้องมีเครื่องทำความเย็นสำหรับเชื้อเพลิงเมื่ออุณหภูมิบรรยากาศสูง 4. มีความผิดพลาดในการ distribution กับเครื่องยนต์หลายสูบ
การฉีดไอ LPG แบบหลายจุด (multi-point vapor port injection)	2. สามารถใช้งานร่วมกับระบบควบคุมอิเล็กทรอนิคส์ในเครื่องยนต์ปัจจุบันการควบคุมแม่นยำกว่าระบบข้างต้น 3. การ distribution กับเครื่องยนต์หลายสูบดีกว่าระบบ single point	1. ลดประสิทธิภาพเชิงปริมาตร 2. เมื่ออุณหภูมิบรรยากาศต่ำต้องการความร้อนเพิ่มเพื่อใช้ในการระเหย LPG 3. เพิ่มจำนวนหัวฉีด 4. ต้องมีข้อมูลของความดันและอุณหภูมิของไอ LPG เพิ่มเติมเข้าไปฟังก์ชั่นการควบคุม

ระบบเชื้อเพลิง	ข้อดี	ข้อเสีย
การฉีด LPG เหลวแบบหลายจุด (multi-point liquid port injection)	1. ลดการสูญเสียในประสิทธิภาพเชิงปริมาตร 2. ลดอุณหภูมิอากาศเนื่องจากการระเหยของ LPG ในท่อร่วมไอดีและกระบอกสูบ 3. สามารถใช้งานร่วมกับระบบควบคุมอิเล็กทรอนิคส์ในเครื่องยนต์ปัจจุบันและมีความแม่นยำมากกว่าระบบข้างต้น 4. การ distribution กับเครื่องยนต์หลายสูบดีกว่าระบบ single point	1. ต้องออกแบบระบบท่อจ่ายเชื้อเพลิงเพื่อรักษาให้ LPG อยู่ในสถานะของเหลว 2. ต้องเพิ่มแรงดันในถังเก็บสูงขึ้นเพื่อรักษาให้ LPG อยู่ในสถานะของเหลวเมื่ออุณหภูมิบรรยากาศเปลี่ยนแปลงไป หรือติดตั้งปั๊มในถังเก็บเพื่อเพิ่มแรงดันให้ LPG เหลวในกรณีที่มีท่อไหลกลับ 3. ต้องมีเครื่องทำความเย็นสำหรับเชื้อเพลิงเมื่ออุณหภูมิบรรยากาศสูง 4. ต้องหลีกเลี่ยงการระเหยที่เข็มหัวฉีดทำให้ยากในการสตาร์ทเมื่อเครื่องยนต์ร้อนเนื่องจากปริมาณเชื้อเพลิงน้อยเกินไป 5. เพิ่มจำนวนหัวฉีด
การฉีดตรง (direct cylinder injection)	1-4. มีข้อดีเช่นเดียวกับระบบการฉีดของ LPG เหลวแบบหลายจุด 5. สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์โดยทำงานร่วมกับระบบการฉีดและระบบวาล์ว	1-4. มีข้อเสียเช่นเดียวกับระบบการฉีด LPG เหลวแบบหลายจุด 6. มีการระเหยของ LPG ในหัวฉีด

2.4 ข้อดีของการใช้ LPG ในเครื่องยนต์

1. ก๊าซไอเสีย (Emission)

LPG ไม่มีสารพิษจำพวกสารประกอบของตะกั่ว (lead) หรือสารประกอบจำพวกอัลดีไฮด์ (aldehydes) ซึ่งใช้เติมในแก๊สโซลีนเพื่อเพิ่มค่าอ็อกเทน และเนื่องจาก LPG มีปริมาณกำมะถันผสมอยู่น้อยทำให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์น้อยมาก นอกจากนี้การสันดาปเกิดขึ้นสม่ำเสมอ มีการแปรผันระหว่างวัฏจักรน้อย (cycle-to-cycle variation) คาร์บอนมอนนอกไซด์และไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นน้อย ทำให้ก๊าซไอเสียที่ออกมาค่อนข้างสะอาด [2,3,4,5,6,7]

2. กำลังที่ได้ (Power output)

เครื่องยนต์ LPG ส่วนใหญ่ทำงานที่ส่วนผสมบาง และปริมาตรของเชื้อเพลิงที่เข้าไปในเครื่องยนต์มากกว่าจึงเวลาที่ใช้ในการสันดาปส่วนผสมระหว่าง LPG กับอากาศในห้องเผาไหม้นานกว่าส่วนผสมของแก๊สโซลีนกับอากาศ นอกจากนี้ LPG ซึ่งถูกป้อนให้แก่เครื่องยนต์ในสภาพที่เป็น

ก๊าซอย่างสมบูรณ์จะเข้าแทนที่อากาศ ทำให้ประสิทธิภาพของการดูด (volumetric efficiency) ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเร็วสูงๆ

นอกจากนี้, แม้ว่าค่าความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักของ LPG สูงกว่าแก๊สโซลีนเล็กน้อย แต่ถ้าเปรียบเทียบค่าความร้อนต่อปริมาตรของส่วนผสมก๊าซกับอากาศ จะมีค่าน้อยกว่าแก๊สโซลีนดังนั้น ถ้านำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์เดียวกันภายใต้สภาวะการทำงานที่เหมือนกัน กำลังที่ได้ในกรณีที่ใช้ LPG จะต่ำกว่ากรณีที่ใช้แก๊สโซลีนประมาณ 5-10% [3,14,18,19,20]

ปัจจัยอื่นที่ทำให้กำลังของเครื่องยนต์ที่ใช้ LPG ต่ำกว่าแก๊สโซลีน คือ การนำ LPG ที่มีค่าออกเทนสูงมาใช้กับเครื่องยนต์แก๊สโซลีนซึ่งมีกำลังอัดต่ำนั่นคือไม่สามารถนำข้อดีส่วนนี้มาใช้ได้นอกจากนำไปใช้กับเครื่องยนต์ที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้เฉพาะกับ LPG ซึ่งค่าอัตราส่วนกำลังอัดที่เหมาะสมแสดงในตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2-5 แสดงการเปรียบอัตราส่วนกำลังอัดที่ critical กับเชื้อเพลิงก๊าซ [21]

fuel gas	Critical compression ratio
Methane (CH_4)	15.0 : 1
Ethane (C_2H_6)	14.0 : 1
Propane (C_3H_8)	12.0 : 1
Iso-Butane (C_4H_{10})	8.0 : 1
n-Butane (C_4H_{10})	6.4 : 1

3. น้ำมันเครื่อง (Engine oil)

โดยปกติยิ่งเครื่องยนต์ที่ใช้แก๊สโซลีนเมื่อทำงานมาก ความหนืดของน้ำมันเครื่องจะลดลง ปฏิกิริยาออกซิเดชันก็จะเพิ่มขึ้น น้ำมันเครื่องก็จะค่อยๆ เสื่อมคุณภาพลงไปเรื่อยๆ แต่การใช้ LPG กับเครื่องยนต์ 4 จังหวะนั้น LPG เข้าสู่ห้องสันดาปในลักษณะของก๊าซสมบูรณ์ (Dry gas) ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ จึงเกิดเขม่าคาร์บอนและตะกอนน้อย จึงทำให้น้ำมันเครื่องสกปรกเสียหายน้อย อายุการใช้งานของน้ำมันเครื่องยาวนานขึ้น [9] กรณีของเครื่องยนต์ 2 จังหวะจะป้อนน้ำมันหล่อลื่นเข้าไปผสมกับไอดีและเข้าสู่ห้องเผาไหม้ จึงไม่พบความแตกต่าง

4. การน็อคของเครื่องยนต์ (Knocking)

LPG มีค่าอ๊อกเทนค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับแก๊สโซลีน [8] ดังนั้นจึงสามารถใช้ LPG ในเครื่องยนต์ที่มีอัตราส่วนการอัดสูงได้ (Compression ratio) โดยไม่เกิดการน็อค

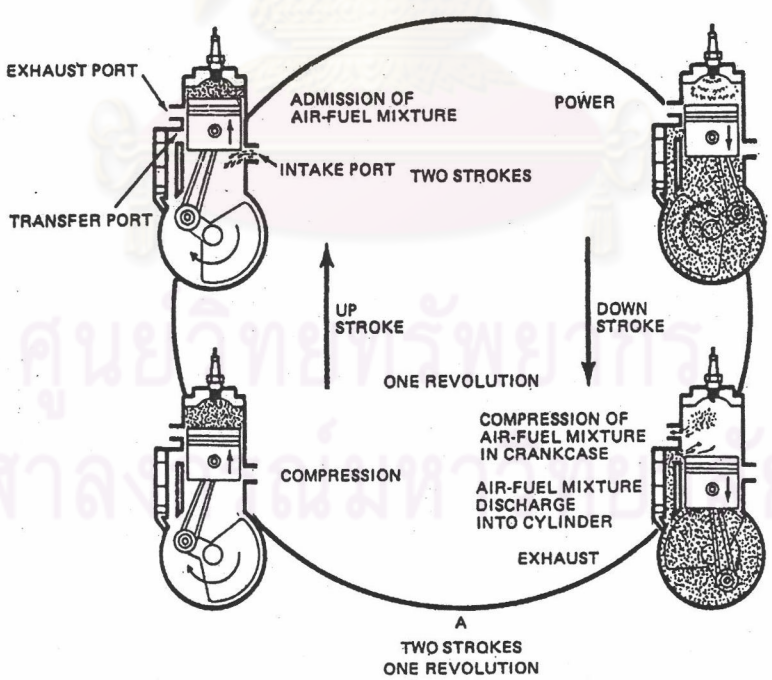
2.5 เครื่องยนต์สองจังหวะ

เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟสองจังหวะมีลักษณะการทำงานเช่นเดียวกับเครื่องยนต์สี่จังหวะ แต่สามารถให้กำลัง (working or expansion stroke) ออกมาทุกๆ จังหวะการเลื่อนลูกสูบขึ้นลงหรือเพลาข้อเหวี่ยงหมุนครบหนึ่งรอบเท่านั้น ขณะที่เครื่องยนต์สี่จังหวะนั้นในหนึ่งกลวัฏเพลาข้อเหวี่ยงต้องหมุนครบ 2 รอบ การทำงานของเครื่องยนต์สองจังหวะเริ่มจากการเคลื่อนที่ขึ้นของลูกสูบที่มีความสัมพันธ์กับห้องเพลาข้อเหวี่ยงซึ่งทำหน้าที่เป็นปั๊มให้เกิดการไหลวนของไอดีและไอเสียถ่ายเทในห้องสูบ

กระบวนการทำงานของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟแบบสองจังหวะ

1. การดูดและอัดในกระบอกสูบ (intake and compression in cylinder, BDC to TDC) พิจารณาการทำงานออกเป็น 2 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 2-6 คือ

- กระบวนการในห้องเพลาข้อเหวี่ยง : หลังจากที่หัวลูกสูบปิดช่องส่งถ่ายไอดี (inlet port) ความดันในห้องเพลาข้อเหวี่ยง (crankcase) จะลดลง เนื่องจากปริมาตรในห้องเพลาข้อเหวี่ยงเพิ่มขึ้น โดยจะต่ำกว่าความดันบรรยากาศประมาณ 0.2 — 0.4 บาร์ เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่เลยขอบล่างของช่องไอดี เหตุที่ความดันในห้องเพลาข้อเหวี่ยงต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ทำให้ส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงหรือไอดีไหลเข้าในห้องเพลาข้อเหวี่ยง เพื่อปั๊มเข้าบรรจุในกระบอกสูบในกลวัฏที่จะตามมา ซึ่งเรียกขั้นตอนนี้ว่า ขั้นตอนการเตรียมบรรจุสูบ (pre-induction phase)



รูปที่ 2-6 แสดงการทำงานของเครื่องยนต์สองจังหวะ [22]

- กระบวนการในห้องเผาไหม้ : ขณะที่ลูกสูบเริ่มเคลื่อนที่ขึ้น ช่องไอดีก็จะเปิด ทำให้ส่วนผสมของอากาศกับเชื้อเพลิงที่อยู่ในห้องเพลาข้อเหวี่ยงซึ่งมีความดันสูงไหลเข้าบรรจุในกระบอกสูบ

ซึ่งเป็นขั้นตอนของการใส่ (intake) ภายหลังที่ลูกสูบปิดชองไอเสีย (exhaust port) ก็เริ่มการอัด (compression) และส่วนผสมของอากาศกับเชื้อเพลิงเริ่มจุดระเบิดด้วยประกายไฟจากหัวเทียนก่อนที่ลูกสูบเคลื่อนที่ถึง TDC

2. จังหวะกำลัง, การอัดในห้องเพลาข้อเหวี่ยง และการกวาดไอเสีย (Power ,compression in crankcase and exhaust and scavenging in cylinder; TDC to BDC) แบ่งทำงานออกเป็น 2 ส่วนเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 2-6 คือ

- กระบวนการในห้องเผาไหม้ : เมื่อเกิดการเผาไหม้ ความดันในกระบอกสูบจะสูงมาก และดันให้ลูกสูบเคลื่อนที่ลง เป็นการจ่ายกำลัง (power) ของเครื่องยนต์ และก่อนที่ลูกสูบเคลื่อนที่ถึง BDC ช่องไอเสียจะถูกเปิดออกโดยหัวลูกสูบและตามด้วยช่องถ่ายไอดี ทำให้ไอเสียไหลออกจากห้องสูบ และในขณะเดียวกันไอดีที่ดันจากห้องเพลาข้อเหวี่ยง จะช่วยดันให้ไอเสียถ่ายเทออกจนหมด
- กระบวนการในห้องเพลาข้อเหวี่ยง : ภายหลังที่ลูกสูบเคลื่อนที่ลงจนกระโปรงลูกสูบปิดช่องไอดี ทำให้ไอดีในห้องเพลาข้อเหวี่ยงถูกอัดให้มีความดันสูงขึ้นประมาณ 0.5 — 0.6 บาร์จากความดันบรรยากาศ (pre-compression) เป็นการเริ่มต้นการอัดหรือเตรียมอัด ทำให้ไอดีมีความดันเพื่อบรรจุสูบและขับไล่ไอเสียในเวลาเดียวกัน

แม้ว่าเครื่องยนต์สองจังหวะจะให้จังหวะกำลังทุกรอบการหมุนของเพลาข้อเหวี่ยง ซึ่งตามหลักการแล้วถ้าขนาดเครื่องยนต์เท่ากับเครื่องยนต์สี่จังหวะ เครื่องยนต์สองจังหวะน่าจะให้กำลังเป็น 2 เท่าของเครื่องยนต์สี่จังหวะ แต่ในทางปฏิบัติแล้วไม่เป็นเช่นนั้น เนื่องจากการเติมไอดีเข้าในกระบอกสูบและไล่ไอเสียออกจากกระบอกสูบเกิดการสูญเสียจากการผสมกันของไอดีและไอเสีย และมีไอดีบางส่วนไหลออกจากกระบอกสูบในกระบวนการนี้ ดังนั้นกำลังที่ได้จึงไม่เป็นไปตามทฤษฎี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบและการทำงานของเครื่องยนต์

สมรรถนะหรือความสามารถในการทำงานของเครื่องยนต์ถูกกำหนดโดยพารามิเตอร์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

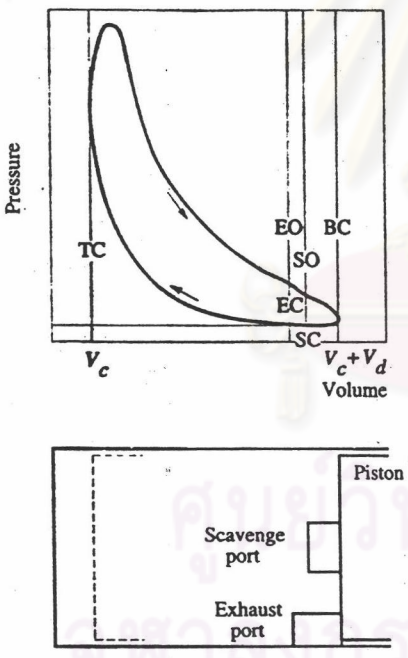
2.6.1 กำลัง (Power)

กำลังจากเครื่องยนต์เป็นค่าที่ใช้กำหนดสมรรถนะและกำหนดภาระที่เครื่องยนต์นำไปใช้งาน อยู่ในเทอมของกำลังเบรก (brake power, P_b) ถ้ามีแรงบิดที่ได้จากเพลาขับ T ความสัมพันธ์ของกำลังเบรกต่อแรงบิดและรอบการหมุน N หาได้จาก

$$P_b = 2\pi NT$$

งานที่ได้จากก๊าซถ่ายทอดสู่ลูกสูบในหนึ่งรอบการทำงานเรียกว่างานบ่งชี้ (indicated work per cycle) หาได้จากการอินทิเกรตโดยรอบกราฟระหว่างความดันและปริมาตรกระบอกสูบ (p-V diagram) ตลอดวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ดังรูปที่ 2-7 ดังนั้น

$$W_{c,i} = \oint pdV$$



รูปที่ 2-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันปริมาตรในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ SI สองจังหวะ [22]

กำลังบ่งชี้ (indicated power, P_i) เป็นกำลังที่ถ่ายทอดจากก๊าซภายในกระบอกสูบไปสู่ลูกสูบ ซึ่งหาได้จากงานบ่งชี้ต่อวัฏจักรการทำงานดังนั้น

$$P_i = \frac{n_c W_{c,i} N}{n_R}$$

โดยที่ n_C เป็นจำนวนลูกสูบและ n_R เป็นจำนวนรอบการหมุนของเพลาข้อเหวี่ยงที่ได้จังหวะกำลัง 1 จังหวะสำหรับเครื่องยนต์สองจังหวะ $n_R = 1$ และเครื่องยนต์สี่จังหวะ $n_R = 2$

ความแตกต่างระหว่างกำลังบ่งชี้กับกำลังเบรกคือกำลังเสียดทาน (friction power, P_f) ซึ่งเป็นผลจากการรวมของกำลังที่ใช้ในการนำไอดีเข้าและนำไอเสียออก, กำลังที่เอาชนะความเสียดทานของชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องยนต์ และกำลังที่ใช้ในการขับอุปกรณ์ต่างๆ ที่จำเป็นต่อการทำงานของเครื่องยนต์ดังนั้น

$$P_f = P_i - P_b$$

อัตราส่วนระหว่างกำลังเบรกกับกำลังบ่งชี้เรียกว่าประสิทธิภาพเชิงกล (mechanical efficiency, η_m)

$$\eta_m = \frac{P_b}{P_i} = 1 - \frac{P_f}{P_i}$$

ประสิทธิภาพเชิงกลขึ้นอยู่กับการออกแบบเครื่องยนต์, การหล่อลื่น, ความเร็วรอบ และตำแหน่งของลิ้นเร่งหรือภาระ ในทางปฏิบัติประสิทธิภาพเชิงกลจะมีค่าหลากหลายประมาณ 90% ที่ตำแหน่ง WOT ที่ความเร็วรอบต่ำๆ และมีค่าเป็นศูนย์ในขณะเดินเบา (idle)

2.6.2 ความดันยังผลเฉลี่ย (mean effective pressure)

ในขณะที่แรงบิดและกำลังใช้วัดความสามารถในการทำงานของเครื่องยนต์ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องยนต์ จึงมีการกำหนดการวัดสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบขึ้น โดยหาได้จากการหารงานต่อวัฏจักรด้วยปริมาตรการกระจัด (displacement volume) ต่อวัฏจักร ค่าที่ได้เรียกว่าความดันยังผลเฉลี่ย (mean effective pressure, mep)

$$mep = \frac{W_c}{V_d}$$

หน่วยของ mep เป็นหน่วยของความดัน นอกจากนี้ยังสามารถแสดงในเทอมของ imep และ bmep ได้สำหรับเทอมของกำลังและแรงบิดจากสมการ

$$mep = \frac{n_R P}{n_C V_d N} = \frac{2\pi n_R T}{n_C V_d}$$

mep สูงสุดของเครื่องยนต์แต่ละชนิดที่ถูกออกแบบอย่างดี มักจะมีค่าเกือบคงที่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงสามารถนำ bmep ที่กำหนดไว้นี้ไปใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จริงเพื่อประเมินว่าเครื่องยนต์นี้ได้ใช้ปริมาตรกระจัดได้อย่างมีประสิทธิภามากน้อยเพียงใด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6.3 การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะและประสิทธิภาพ

ในการทดสอบเครื่องยนต์ การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจะถูกวัดเป็นอัตราการไหลของมวลเชื้อเพลิง (m_f) ซึ่งเครื่องยนต์ขนาดใหญ่จะมีการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมาก ดังนั้นเพื่อให้สามารถนำไปใช้ในการเปรียบเทียบได้ จึงกำหนดในรูปแบบของการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (specific fuel consumption, sfc) เป็นอัตราการไหลของมวลเชื้อเพลิงต่อหน่วยกำลังที่ให้ออกมา และเป็นการวัดประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ในการใช้เชื้อเลิงเพื่อผลิตงานออกมา

$$sfc = \frac{\dot{m}_f}{P}$$

ค่า sfc ที่ต่ำบอกถึงการนำพลังงานไปใช้ได้ดี โดยทั่วไปแล้วจะคำนวณในรูปของการสิ้นเปลืองจำเพาะเบรก (brake specific fuel consumption, bsfc) คืออัตราการไหลของมวลเชื้อเพลิงต่อหน่วยกำลังเบรกที่ให้ออกมา

เพื่อความสะดวกในการใช้งาน ได้มีการกำหนดค่าที่ใช้วัดประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ในรูปของค่าที่ไม่มีหน่วยขึ้น คืออัตราส่วนระหว่างงานที่ได้ต่อวัฏจักรกับพลังงานของเชื้อเพลิงที่ใส่เข้าไปต่อวัฏจักร โดยพลังงานเชื้อเพลิงที่สามารถปล่อยออกมาจากการเผาไหม้จะหาได้จากมวลของเชื้อเพลิง ที่ส่งเข้าไปในเครื่องยนต์ต่อวัฏจักรคูณด้วยค่าความร้อนของเชื้อเพลิง อัตราส่วนนี้เรียกว่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิง (fuel conversion efficiency, η_f)

$$\eta_f = \frac{W_c}{m_f Q_{HV}} = \frac{P}{\dot{m}_f Q_{HV}}$$

โดย m_f เป็นมวลของเชื้อเพลิงที่ถูกนำเข้าต่อวัฏจักรและ Q_{HV} เป็นค่าความร้อนของเชื้อเพลิง สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะกับประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงดังนั้น

$$\eta_f = \frac{1}{sfc Q_{HV}}$$

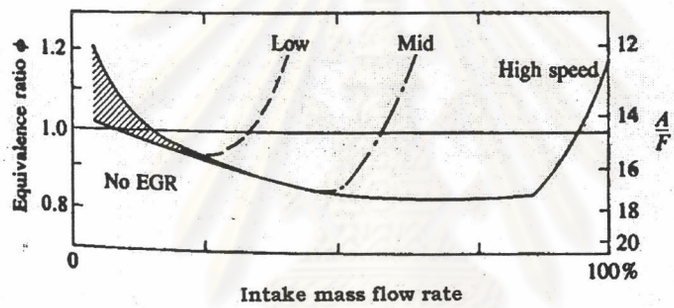
2.7 ส่วนผสมในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ (Spark-Ignition Engine Fuel Metering)

ตามหลักการแล้ว อัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟก็คืออัตราส่วนที่ให้กำลังที่ต้องการ ด้วยใช้การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงน้อยที่สุดและสามารถทำงานได้ราบเรียบและเชื่อถือได้ อัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงจะไม่คงที่ตลอดการทำงานขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง

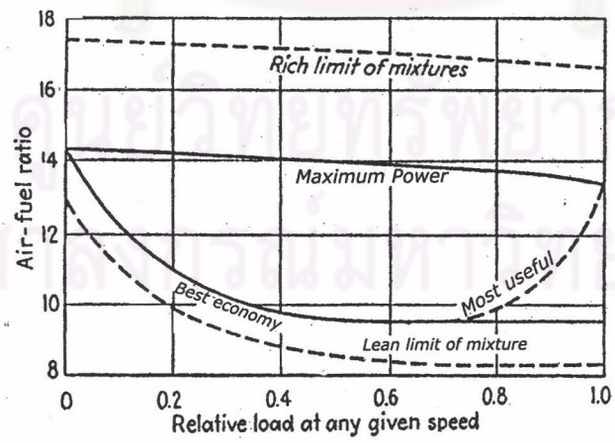
อัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศที่เหมาะสมนั้น จะขึ้นอยู่กับอัตราเร็วและภาระของเครื่องยนต์ โดยนิยมกำหนดสัดส่วนของเชื้อเพลิงและอากาศในรูปของอัตราส่วนสมมูลระหว่างเชื้อเพลิงต่ออากาศ (ϕ) ส่วนผสมที่ต้องการที่อัตราเร็วรอบหนึ่งๆ จะแตกต่างกันที่สภาพการทำงานที่

Full Load และ Part Load โดยการทำงานที่ Full Load ต้องการใช้อากาศที่เข้ามาให้หมดเพื่อให้ได้กำลังสูงสุด ซึ่งจะต้องใช้ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนหนาขึ้น แต่เมื่อภาระเป็น Part Load ต้องใช้เชื้อเพลิงให้ผลสูงสุดจึงสามารถใช้ส่วนผสมที่บางได้ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นเนื่องจากเหตุผล 3 ประการคือ

- งานของจังหวะขยายตัวเพิ่มขึ้นอันเป็นผลเนื่องมาจากคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิคส์ของ Burned gases เปลี่ยนแปลงไป
- Pumping work ลดลงเนื่องจากความดัน Intake เพิ่มขึ้นขณะที่ส่วนผสมบางลง ที่ความดันประสิทธิผลหนึ่งๆ (Mean Effective Pressure)
- การถ่ายเทความร้อนสู่ผนังกระบอกสูบลดลงเนื่องจากอุณหภูมิของก๊าซที่เผาไหม้แล้ว (Burned gas) ลดลง



(a)



(b)

รูปที่ 2-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมกับช่วงภาระและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ [23,24]

เมื่อลดภาระลงไปอีก ส่วนผสมบางจะไม่สามารถรักษาให้เครื่องยนต์ทำงานได้อย่างราบเรียบ ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการเจือจางของส่วนผสมกับก๊าซที่ค้างอยู่ในกระบอกสูบเพิ่มขึ้น ดังนั้นที่ภาระน้อยๆ จนถึงสภาวะเดินเบา (Idle condition) ส่วนผสมที่ต้องการจึงต้องเป็นส่วนผสมพอดีหรือส่วนผสมที่หนาเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 2-8 แสดงส่วนประกอบของส่วนผสมที่ต้องการตลอดช่วงภาระและอัตราเร็วของเครื่องยนต์ พบว่ามีส่วนผสมหนาหรือมีส่วนผสมใกล้ส่วนผสมพอดีที่ภาระน้อยและไม่มีภาระ (Idling) เมื่อภาระเพิ่มขึ้นส่วนผสมจะบางลง และเมื่อใกล้ตำแหน่งลิ้นเร่งเปิดเต็มที่ของแต่ละความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ส่วนผสมก็จะหนาขึ้น

2.8 การคาร์บูเรชั่นเชื้อเพลิง LPG (carburetion for LPG)

ปัจจัยสำคัญในการออกแบบกระบวนการคาร์บูเรชั่นสำหรับเครื่องยนต์ LPG คือ performance ของเครื่องยนต์ เนื่องจากส่วนใหญ่ LPG ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องยนต์แก๊สโซลีน ทำให้ไม่สามารถใช้ประโยชน์จากค่าออกเทนที่สูงกว่าแก๊สโซลีนในเครื่องยนต์ที่มีอัตราส่วนกำลังอัดสูงกว่าได้ นอกจากนี้การที่ LPG มีน้ำหนักโมเลกุลและค่าความร้อนที่ต่ำกว่าแก๊สโซลีน และ LPG ถูกนำเข้าเครื่องยนต์ในสถานะก๊าซ ทำให้ volumetric efficiency ของเครื่องยนต์ลดลง นั่นคือกำลังที่ให้ออกมาลดลงไปด้วย กระนั้นก็ตาม, การออกแบบระบบเชื้อเพลิงสามารถลด losses ที่เกิดขึ้นเหล่านี้ได้ (C.W. Coon, Jr., และ R.G. Abbott ,1973)[18]

กระบวนการคาร์บูเรชั่นเริ่มจากการรับเชื้อเพลิงและอากาศเข้ามา จนถึงการเริ่มกระบวนการเผาไหม้ในกระบอกสูบ โดยหน้าที่ของกระบวนการคาร์บูเรชั่นได้แก่ จัดเตรียมปริมาณอากาศกับเชื้อเพลิงที่เหมาะสมตามความต้องการของเครื่องยนต์ในแต่ละสภาวะการทำงาน และผสมเชื้อเพลิงกับอากาศและก๊าซตกค้าง (residual gas) ในกระบอกสูบเพื่อให้สารผสมในแต่ละกระบอกสูบเป็น homogeneous ขณะเริ่มการจุดระเบิด

ดังนั้นองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการคาร์บูเรชั่นได้แก่ คาร์บูเรเตอร์หรือมิกเซอร์, ท่อร่วมไอดี, วาล์วไอดี, กระบอกสูบและห้องเผาไหม้รวมไปถึงลักษณะของลูกสูบ

2.9 คาร์บูเรเตอร์หรือมิกเซอร์สำหรับ LPG (carburetor or mixer for LPG)

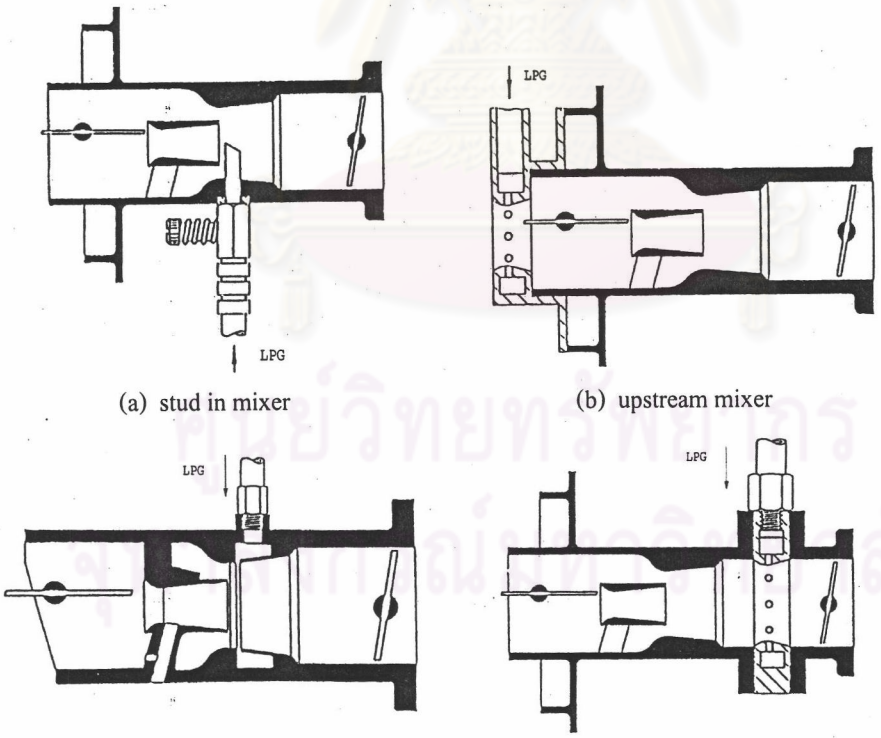
คาร์บูเรเตอร์หรือมิกเซอร์คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการควบคุมระบบเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ โดยการเตรียมส่วนผสมจากอากาศและเชื้อเพลิงให้เป็นไปตามความต้องการของเครื่องยนต์ตลอดช่วงการทำงาน รวมไปถึงการผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศให้เป็น homogeneous ดังนั้นจะเห็นว่าคาร์บูเรเตอร์ทำหน้าที่ในกระบวนการคาร์บูเรชั่นเกือบทั้งหมดยกเว้นในส่วน distribution และการผสมกับสารตกค้างในกระบอกสูบ แต่ในทางปฏิบัติแล้ว คาร์บูเรเตอร์ไม่สามารถทำหน้าที่ดังกล่าวได้สมบูรณ์จึงจำเป็นต้องทำงานร่วมกับส่วนประกอบอื่นๆ พร้อมกันด้วย

หลักการทำงานของคาร์บูเรเตอร์หรือมิกเซอร์ทั่วไปนั้น เริ่มจากอากาศไหลผ่านท่อที่เป็นเวนจูริ (Venturi) เกิดความแตกต่างของความดัน (depression) ขึ้นระหว่างทางเข้าและเวนจูริ (Throat) และนำไปใช้ในการควบคุมการไหลของเชื้อเพลิงสำหรับการไหลของอากาศในขณะนั้น ดังนั้นคาร์บูเรเตอร์ทั่วไปใช้การไหลของอากาศเป็นตัวแปรหลักในการควบคุมส่วนผสม โดยที่ความต้องการส่วนผสมที่สัมพันธ์กับอัตราการไหลของมวลอากาศตามความเร็วรอบต่างๆ แสดงดังรูป 2-8

วิธีควบคุมส่วนผสมของอากาศและเชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับการออกแบบคาร์บูเรเตอร์หรือมิกเซอร์ซึ่งแบ่งเป็น 2 คือระบบ fixed venturi และระบบ variable venturi หรือ air valve carburetor

2.9.1 คาร์บูเรเตอร์หรือมิกเซอร์ชนิดเวนจูริคงที่ (Fixed venturi)

คาร์บูเรเตอร์หรือมิกเซอร์ชนิด fixed venturi แสดงดังรูป 2-9 ประกอบด้วยวาล์วปีกผีเสื้อ (throttle) ใช้ควบคุมการไหลของอากาศที่ไหลผ่านท่อเวนจูริ (venturi) ที่มีขนาดคงที่ทำให้เกิดความแตกต่างของความดัน (depression) ขึ้นระหว่างทางเข้าและเวนจูริ (throat) และนำไปใช้ในการควบคุมการไหลของเชื้อเพลิงสำหรับการไหลของอากาศในขณะนั้น รูปที่ 2-9 แสดงชนิดของมิกเซอร์ชนิด fixed venturi ชนิดต่างๆ



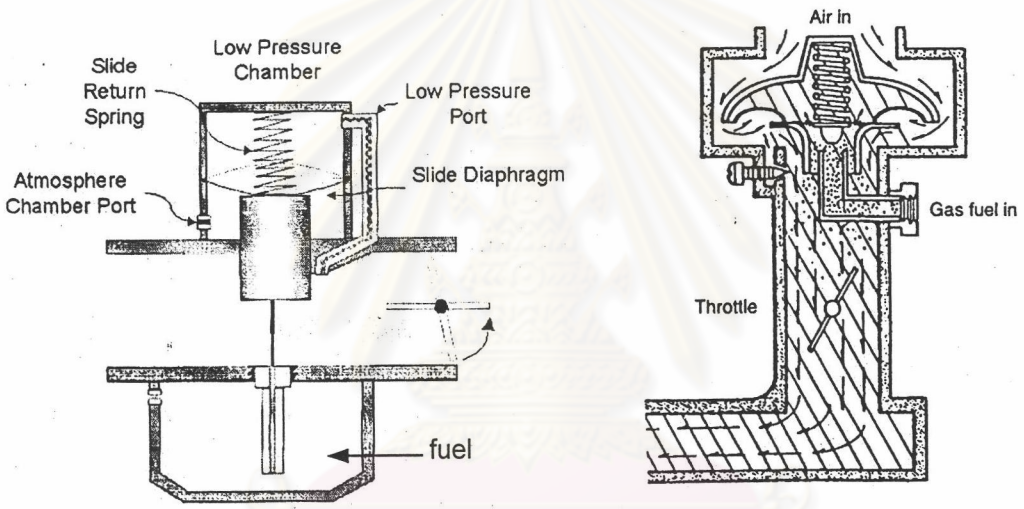
(a) stud in mixer (b) upstream mixer

(c) undercut air funnel mixer (d) downstream mixer

รูปที่ 2-9 แสดงรูปแบบและการติดตั้งคาร์บูเรเตอร์หรือมิกเซอร์ LPG ชนิด Fixed venturi [17]

2.9.2 คาร์บูเรเตอร์ก๊าซชนิด Variable venturi หรือ air valve carburetor

ส่วนประกอบหลักของคาร์บูเรเตอร์ชนิด Variable venturi คล้ายกับชนิด fixed venturi คือ ประกอบด้วยลิ้นปีกผีเสื้อและ Variable venturi แต่สามารถทำงานโดยการเปลี่ยนตำแหน่ง หรือเปลี่ยนขนาดพื้นที่ของ venturi และทำให้ความดันตกคร่อม (depression) และความเร็วบริเวณการจ่ายเชื้อเพลิง (fuel jet) คงที่เกือบตลอดเวลา (constant depression ,CD หรือ constant velocity, CV type) เมื่อมีการเพิ่มการไหลของอากาศที่ตำแหน่งของ air valve หนึ่งๆ จะมีผลทำให้ความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นชั่วขณะ ซึ่งความดันที่ตกคร่อมที่เพิ่มนี้จะเป็นสัญญาณควบคุมการทำงานของลูกสูบ (piston) หรือไดอะแฟรม (diaphragm) และเกิดแรงเลื่อนตำแหน่ง air valve จนความดันตกคร่อมกลับคืนสู่ค่าเดิม



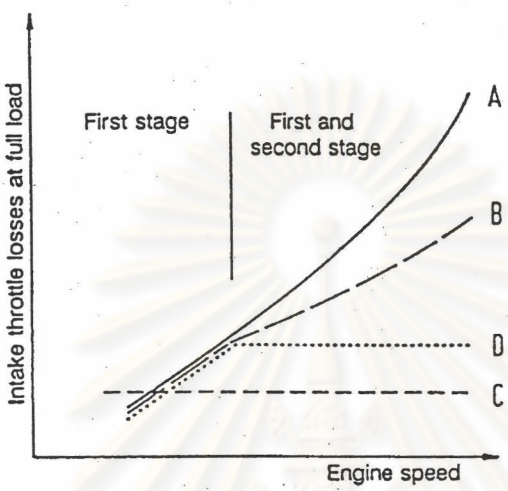
รูปที่ 2-10 แสดงส่วนประกอบของคาร์บูเรเตอร์ชนิด Variable venturi (a) ใช้กับเชื้อเพลิงเหลวและ (b) ใช้กับเชื้อเพลิงก๊าซ [25]

การเปลี่ยนตำแหน่งของ air valve คือการเปลี่ยนพื้นที่การไหล ทำให้พื้นที่ของการจ่ายเชื้อเพลิง (fuel jet area) ที่ควบคุมด้วย taper needle เปลี่ยนไปด้วย โดย taper needle จะติดอยู่กับ air valve และเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งพร้อมกับ air valve

C.W. Coon, Jr., และ R.G. Abbott [18] ศึกษาและทดสอบคุณสมบัติของคาร์บูเรเตอร์ชนิด air valve และหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบในรูปตัวแปร dimensionless group เพื่อให้สามารถจัดอยู่ในรูปของ linearization ได้ซึ่งพบว่า

- สามารถจ่ายเชื้อเพลิงได้สม่ำเสมอแม้ว่าการไหลของอากาศจะต่ำ เนื่องจากความดันตกคร่อม (depression) ถูกรักษาให้คงที่

- การเปิด air valve ที่ตำแหน่งต่างๆ ตั้งแต่ part load ถึง full load มีประสิทธิภาพเท่าๆ กัน ดังนั้นจึงใช้ระบบจ่ายเชื้อเพลิง (fuel jet) ระบบเดียว
- เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงที่สัมพันธ์ระหว่างพื้นที่การไหลของอากาศและเชื้อเพลิงจึงไม่จำเป็นต้องชดเชยด้วยการติดตั้งระบบ Air bleed



A..single-stage carburetor
B..two-stage (compound) carburetor with pneumatic second-stage control
C..constant-depression carburetor
D..two-stage (compound) carburetor with second stage designed as a constant-depression carburetor

รูปที่ 2-11 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพและการสูญเสียของคาร์บูเรเตอร์แต่ละชนิด [17]

- มีการหน่วงการยก air valve โดยใช้ damper ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มการไหลของอากาศ ทำให้ความดันตกคร่อม (depression) ที่ท่อจ่ายเชื้อเพลิงหลัก (main jet) เพิ่มขึ้นด้วย จึงมีผลให้ส่วนผสมหนาขึ้นชั่วขณะเมื่อมีการเร่งเครื่อง
- เชื้อเพลิงถูกส่งเข้าทางเดินของอากาศ (main air stream) ในบริเวณที่ความเร็วสูงที่สุด ทำให้เกิดการคลุกเคล้าของเชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพมากที่สุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย