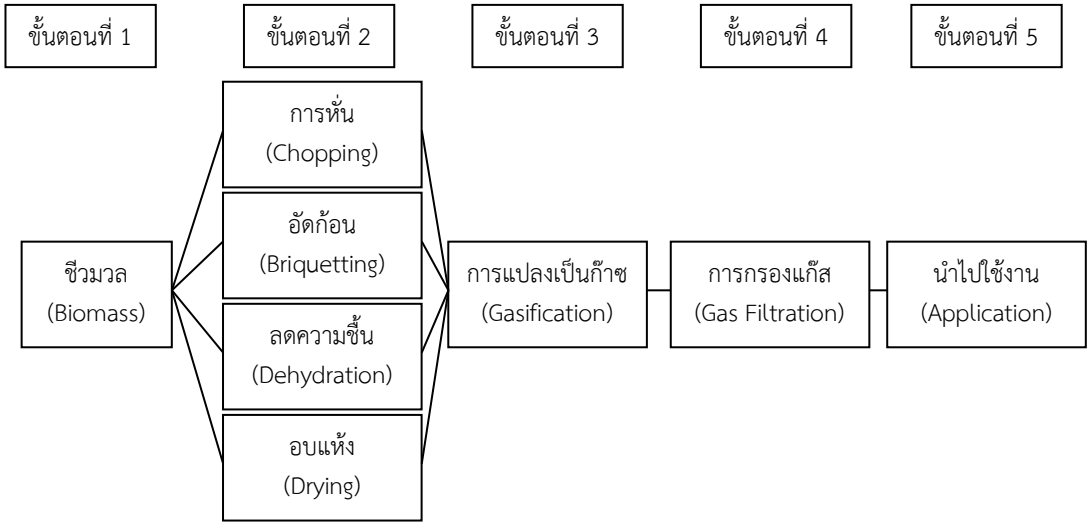
# บทที่ 2
# ทฤษฎี

## 2.1 ทฤษฎีการผลิตแก๊ส (Theory of Gasification)

กระบวนการผลิตแก๊ส (Gasification) คือ กระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงคาร์บอนไปเป็นคาร์บอนมอนออกไซด์โดยกระบวนการเคมีความร้อน สามารถเกิดขึ้นในบริเวณปิดที่มีอากาศน้อย กระบวนการแปลงเป็นแก๊สสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 1




**รูปที่ 2.1 แสดงแผนผังกระบวนการเกิดแก๊ส**

เชื้อเพลิงแข็งโดยปกติประกอบด้วยคาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H) และ ออกซิเจน (O) นอกจากนั้นยังมีไนโตรเจน (N) และกำมะถัน (S) ผสมอยู่ด้วย แต่มีปริมาณเพียงเล็กน้อยซึ่งจะไม่พิจารณา สำหรับในส่วนของเตาผลิตแก๊ส (Gasifier) เชื้อเพลิงแข็งจะถูกให้ความร้อนโดยการเผาไหม้เชื้อเพลิงบางส่วน ซึ่งได้เกิดเป็นแก๊สในขณะให้ความร้อน ในส่วนของการเผาไหม้สมบูรณ์จะทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ซึ่งได้จากส่วนประกอบของคาร์บอนและจากน้ำซึ่งมาจากไฮโดรเจนออกซิเจนจากเชื้อเพลิงจะมีส่วนร่วมในการเผาไหม้ด้วย ทำให้สามารถลดปริมาณอากาศได้ การเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) หรือ การเผาไหม้สามารถอธิบายโดยใช้สมการปฏิกิริยาเคมีได้ดังนี้

$C+O_2 \rightarrow CO_2 - 401.9$ kJ/kmol (1)

$$H+\frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O - 241.1 \text{ kJ/kmol} \quad (2)$$

สำหรับทุกเตาผลิตแก๊ส (Gasifier) แล้ว คาร์บอนไอออกไซด์ ($CO_2$) และน้ำ ($H_2O$) จะถูกเปลี่ยนให้เป็นแก๊สคาร์บอนมอนออกไซด์ (CO), แก๊สไฮโดรเจน ($H_2$) และ แก๊สมีเทน ($CH_4$) ซึ่งเป็นผลผลิตแก๊ส (Producer gas) หลักที่สามารถเผาไหม้ได้

ปฏิกิริยาที่สำคัญที่สุดที่เกิดขึ้นในส่วน Reduction zone ของเตาผลิตแก๊ส ซึ่งมีความแตกต่างของสารตั้งที่ที่เป็นของแข็งและแก๊ส สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$C+CO_2 \rightarrow 2CO + 164.9 \text{ kJ/kmol} \quad (3)$$
$$C+H_2O \rightarrow CO + H_2 + 122.6 \text{ kJ/kmol} \quad (4)$$
$$CO+H_2 \rightarrow CO + H_2O + 42.3 \text{ kJ/kmol} \quad (5)$$
$$C+2H_2 \rightarrow CH_4 + 0 \text{ kJ/kmol} \quad (6)$$
$$CO+3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O - 205.9 \text{ kJ/kmol} \quad (7)$$

เครื่องหมายลบที่แสดงถึงความร้อนที่เกินขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาและเครื่องหมายบอกคือความร้อนที่ต้องการสำหรับระบวนการเกิดปฏิกิริยาเคมี สมการที่ (3) และ (4) เป็นสมการหลักของปฏิกิริยารีดักชัน (Reaction of reduction) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยานี้ต้องการความร้อน ดังนั้นอุณหภูมิของแก๊สจะลดลงในช่วงที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน

สมการปฏิกิริยาเคมีที่ (5) เป็นสมการปฏิกิริยาสมดุลน้ำ-แก๊ส ซึ่งเป็นที่รู้จักกันแพร่หลายสำหรับอุณหภูมิในทางทฤษฎีแล้วอัตราส่วนของความเข้มข้นของผลผลิตคาร์บอนมอนออกไซด์ (CO) และไอน้ำ (Water vapor, $H_2O$) กับความเข้มข้นของผลผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) และไฮโดรเจน ($H_2$) ถูกกำหนดโดยค่าคงที่ของสมดุลปฏิกิริยาเคมีของน้ำ-แก๊ส (Water gas equilibrium constant, $K_{WE}$) ในทางปฏิบัติส่วนประกอบสมดุลของแก๊สจะเกิดขึ้นได้ในกรณีอัตราการเกิดปฏิกิริยาและเวลาของแต่ละปฏิกิริยามีค่าเพียงพอ

$$K_{WE} = \frac{(CO)(H_2O)}{(CO)(H_2)} \quad (8)$$

อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงตามอุณหภูมิที่ลดลง สำหรับกรณีของอัตราการเกิดปฏิกิริยาสมดุลน้ำ-แก๊ส จะเกิดช้ามากเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 700 °C ซึ่งถูกเรียกว่า แช่แข็ง (Frozen) นั้นคือส่วนประกอบของแก๊สยังคงไม่มีการเปลี่ยนแปลง ค่าคงที่สมดุล $K_{WE}$ สำหรับอุณหภูมิที่แตกต่างแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

**ตารางที่ 2.1** แสดงค่าคงที่ของสมดุลปฏิกิริยาเคมีของน้ำ-แก๊ส

| Temperature (°C) | $K_{WE}$ |
|---|---|
| 600 | 0.38 |
| 700 | 0.62 |
| 800 | 0.92 |
| 900 | 1.27 |
| 1000 | 1.60 |

**การประมาณส่วนประกอบของแก๊ส (Prediction of the gas composition)**

บทนำของหลักการสมดุลน้ำ-แก๊ส สร้างโอกาสในการคำนวณหาส่วนประกอบของแก๊สเชิงทฤษฎีจากเตาผลิตแก๊ส (Gasifier) เมื่ออยู่ในภาวะสมดุลที่อุณหภูมิต่างๆ กระบวนการเริ่มต้นหามาจากการสมดุลมวลของสี่องค์ประกอบหลับ (carbon, hydrogen, oxygen และ nitrogen) ทำการสมดุลพลังงานทั้งระบบ และสร้างความสัมพันธ์จากสมดุลน้ำ-แก๊ส สมมุติขั้นต่อไปว่าปริมาณของแก๊สมีเทนที่มีอยู่ในผลผลิตแก๊ส (Producer gas) ต่อหนึ่งกิโลกรัมของเชื้อเพลิงแห้งมีค่าคงที่ (อาจจะมีมากหรือน้อยกว่า ในกรณีที่เตาผลิตแก๊สอยู่ในสภาวะการทำงานปกติ) ชุดของความสัมพันธ์จะสามารถใช้คำนวณองค์ประกอบของแก๊สสำหรับหลากหลายของพารามิเตอร์ (เช่น ความชื้นของเชื้อเพลิง) และคุณลักษณะของระบบ ได้แก่ การสูญเสียความร้อนจากการพา, การแผ่รังสี และ ความร้อนสัมผัส เป็นต้น โดยปกติแล้วจะสอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการทดลอง

**ประสิทธิภาพของเตาผลิตแก๊ส (Gasifier Efficiency)**

ปัจจัยสำคัญในการหาการทำงานจริงทางเทคนิค รวมทั้งความเป็นไปได้เชิงเศรษฐกิจของการใช้งานระบบผลิตแก๊ส คือประสิทธิภาพของการผลิตแก๊ส (Gasification efficiency) ซึ่งนิยามที่เป็นที่ยอมรับในการหาประสิทธิภาพ กรณีนำไปใช้กับเครื่องยนต์ คือ

$$\eta_m = \frac{H_g Q_g}{H_s M_g} \times 100\% \qquad (9)$$

เมื่อ

$\eta_m$ คือ ประสิทธิภาพเชิงกลของการผลิตแก๊ส (%)

$H_g$ คือ ค่าความร้อนขั้นสูงของแก๊ส (kJ/m³),

$Q_g$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊ส (m³/s)

$H_s$ คือค่าความร้อนขั้นต่ำของเชื้อเพลิง fuel (kJ/kg)

$M_g$ คอ อัตราการบ้านเชื้อเพลิง (kg/s)

ถ้าใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้โดยตรง บางครั้งใช้สมการคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนดังนี้

$$\eta_{th} = \frac{(H_g Q_g) + (Q_g \rho_g C_p \Delta T)}{H_s M_s} \times 100\% \qquad (10)$$

เมื่อ

$\eta_{th}$ คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการผลิตแก๊ส (%)

$\rho_g$ คือ ความหนาแน่นของแก๊ส (kg/m³)

$C_p$ คือ ค่าความร้อนจำเพาะของแก๊ส (kJ/kg°K)

$\Delta T$ คือ อุณหภูมิแตกต่างระหว่างอุณหภูมิทางเข้าของแก๊สที่หัวเผา (burner) และเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้า

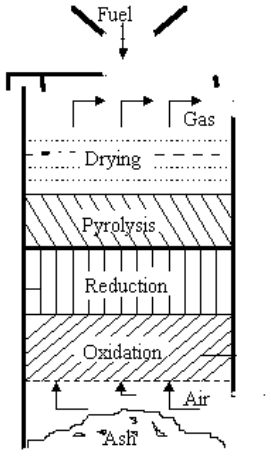
เตาผลิตแก๊ส

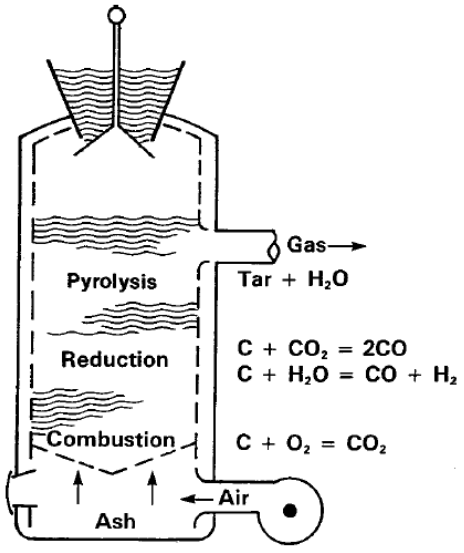
ประสิทธิภาพของเตาผลิตแก๊สขึ้นอยู่กับการออกแบบและคุณลักษณะของเชื้อเพลิงซึ่งมีค่าอยู่ระหว่า 60% ถึง 70% ในกรณีของการใช้งานทางความร้อน ค่า $\eta_{th}$ สามารถทำได้มากกว่า 93%

**2.2 ชนิดของเตาผลิตแก๊ส**

**1) Updraft Gasifier (counter flow)**

เป็นเตาผลิตแก๊สที่เริ่มใช้ตั้งแต่แรก เป็นแบบที่ง่ายที่สุด มีลักษณะดังรูปที่ 2 เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าทางด้านบนของเตา และอากาศจะถูกส่งผ่านตะแกรงเข้ามาทางด้านล่าง บริเวณเหนือตะแกรงขึ้นไปจะมีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเกิดขึ้นซึ่งบริเวณนี้เรียกว่า Combustion zone อากาศเมื่อผ่านเข้าไปใน Combustion zone จะเกิดปฏิกิริยาขึ้น จะได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ แก๊สที่ผ่านออกมาจาก Combustion zone จะมีอุณหภูมิสูง และจะเข้าไปสู่ Reduction zone เป็นบริเวณที่มีปริมาณคาร์บอนอยู่มากโดย ณ บริเวณนี้คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนทำให้เกิดคาร์บอนมอนนอกไซด์ และไฮโดรเจนหลังจากนั้นแก๊สที่ได้จะไหลเข้าสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในชั้นของชีวมวลที่ชั้นนั้น เนื่องจากแก๊สยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่จึงไประเหยน้ำที่อยู่ในชีวมวลเหล่านั้นทำให้แก๊สที่ออกจากเตาผลิตแก๊สที่อุณหภูมิต่ำลง



(a) (b)

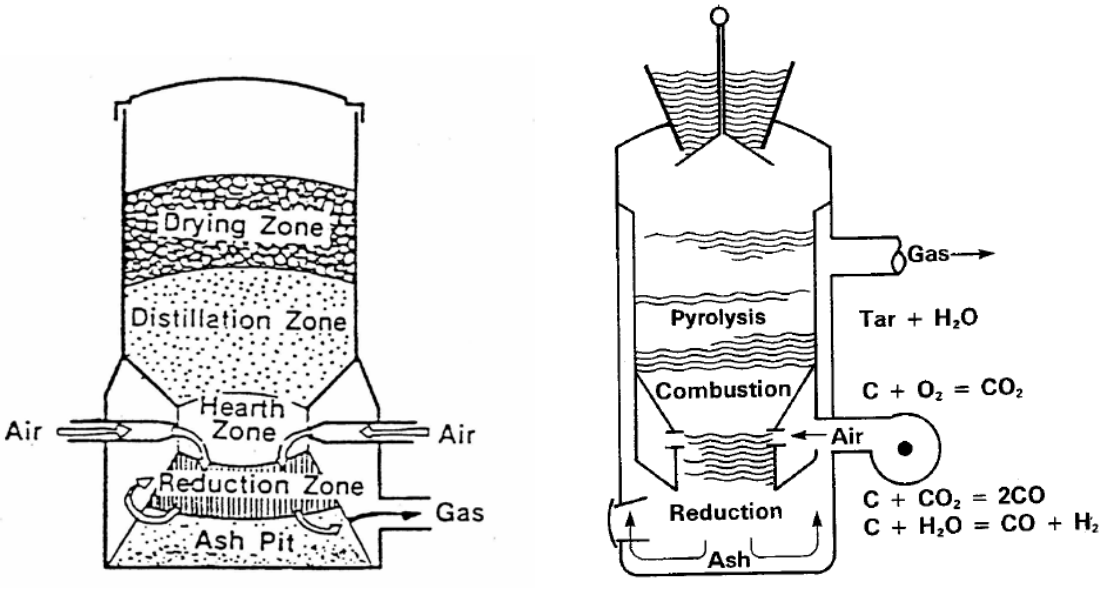
**รูปที่ 2.2 (a) เตาผลิตแก๊ส (b) แสดงแผนภาพการทำงานของเตาผลิตแก๊สแบบ Updraft Gasifier**

**ข้อดี คือ** เตาไม่สลับซับซ้อนเชื้อเพลิงเผาไหม้ได้มาก และแก๊สที่ออกมาจากเตาผลิตแก๊สอุณหภูมิไม่สูงมาก

**ข้อเสีย** คือ แก๊สที่ผลิตได้จะมีสารเคมีน้ำมันและน้ำมันดินปริมาณมากเกิดขึ้นใน Pyrolysis zone และกลั่นตัวเมื่ออยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ด้วยเหตุนี้แก๊สที่ได้เหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับหม้อน้ำหรือในการอบแห้ง ซึ่งแก๊สที่ได้จะถูกไปผสมกับอากาศและทำการเผาไหม้โดยตรงในห้องเผาไหม้เพื่อให้ความร้อนในกระบวนการที่ใช้ความร้อน เพราะน้ำมันดินที่เข้าไปกับแก๊สจะเกิดการเผาไหม้ให้ความร้อนออกมาได้เช่นกัน

**2) Downdraft Gasifier (หรือ Co-flow)**

Downdraft gasifier ดังแสดงในรูปที่ 4 ออกแบบขึ้นมาเพื่อขจัดน้ำมันดินในแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ โดยเฉพาะอากาศจะถูกดูดผ่านจากด้านบนลงสู่ด้านล่างโดยผ่านกลุ่มของหัวฉีด (Nozzle) ที่เรียกว่า ”Tuyers” บริเวณหัวฉีดจะเป็นบริเวณ Combustion zone จะถูกลดปริมาณลง ในขณะที่ไหลลงสู่ด้านล่างผ่านชั้นของคาร์บอนที่อยู่เหนือตะแกรงเล็กน้อย ซึ่งในขณะเดียวกันชั้นของชีวมวลที่อยู่ด้านบนของ Combustion zone เนื่องจากการมีปริมาณของออกซิเจนน้อยมากจะเกิดการกลั่นสลาย โดยไอของน้ำมันดินที่เกิดจากการกลั่นสลายไหลผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อน จึงทำให้น้ำมันดินเกิดการแตกตัวเป็นแก๊ส การแตกตัวจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ในช่วงระหว่าง 800 °C ถึง 1,000 °C ปฏิกิริยาดูดความร้อนทำให้แก๊สที่ได้มีอุณหภูมิสูงขึ้น แก๊สที่ผ่าน Combustion zone ใน Downdraft gasifier จะมีส่วนประกอบของน้ำมันดินและน้ำมันลดลงจนเหลือน้อยกว่า 10% เมื่อเทียบกับกรณีของ Updraft gasifier และแก๊สที่ได้สะอาดกว่า ทำให้ใช้จำนวนผ้ากรองน้อยลงเมื่อนำมาใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในซึ่งเป็นการนำ Downdraft gasifierไปใช้ที่สำคัญเนื่องจากแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จาก Updraft gasifier และ Downdraft gasifier มีความเร็วต่ำ และเถ้าที่อยู่บริเวณตะแกรง ดังนั้น จึงมีปริมาณเถ้าน้อยมากที่ติดออกมาพร้อมกับแก๊สเชื้อเพลิง



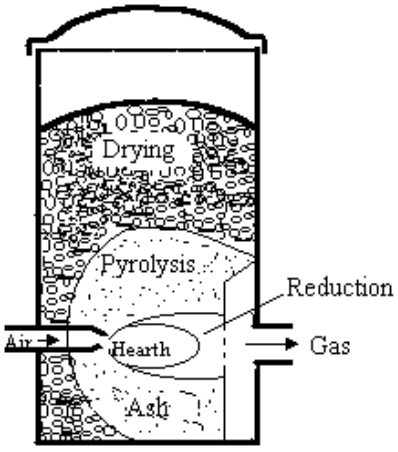
(a) (b)

**รูปที่ 2.3 (a) เตาผลิตแก๊สและ (b) แสดงแผนภาพทำงานของเตาผลิตแก๊สแบบ Downdraft Gasifier**

**3) Crossdraft Gasifier**

Crossdraft gasifier มีลักษณะดังรูปที่ 4 อากาศจะถูกดูดผ่านหัวฉีดซึ่งอยู่ในแนวราบไปที่ Combustion zone และถัดไปอีกจะเป็น Reduction zone แก๊สที่ออกจาก Reduction zone แล้วจะออกสู่ภายนอกเตาโดยจะไหลผ่านตะแกรงซึ่งอยู่ในแนวตั้งรอบๆ Combustion zone และ Reduction zone บริเวณ Pyrolysis zone น้ำมันและน้ำมันดินที่ได้จาก Pyrolysis zone จะไหลผ่าน Reduction zone ก่อนที่จะออกสู่ภายนอกทำให้น้ำมันดินและน้ำมันเกิดการแตกตัวเป็นแก๊สก่อนที่จะออกสู่ภายนอก เป็นผลให้แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีปริมาณน้ำมัน และน้ำมันดินต่ำ

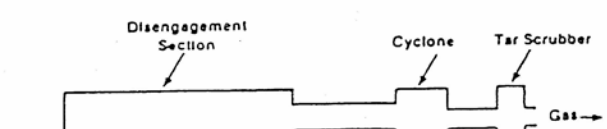
Crossdraft gasifier ได้รับการออกแบบให้ใช้กับยานพาหนะโดยเฉพาะ เนื่องจากว่ามีน้ำหนักเบา และมีผลตอบสนองอย่างรวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงต่อภาระ (Load) ที่ใช้อยู่เชื้อเพลิงที่เหมาะกับเตาผลิตแก๊สแบบนี้ ควรเป็นถ่านไม้ที่มีคุณภาพสูง




**รูปที่ 2.4 แสดงเตาผลิตแก๊สชนิด Crossdraft**

**4) Fluidized Bed Gasifier**

เตาผลิตแก๊สที่ได้กล่าวมาแล้วทั้ง 3 แบบในข้างต้น การทำงานจะขึ้นอยู่กับคุณภาพทางเคมีและทางฟิสิกส์ของเชื้อเพลิงเป็นอย่างมาก และปัญหาที่พบบ่อยๆ คือเรื่อง Slag ที่เกิดขึ้นมากเกินไปจึงทำให้เกิดการอุดตันในเตาผลิตแก๊ส เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว เตาผลิตแก๊สแบบ Fluidized-bed ดังแสดงในรูปที่ 5 จึงได้รับการพัฒนาขึ้น ในเตาผลิตแก๊สแบบนี้นั้นอากาศไหลผ่านชั้นของเชื้อเพลิงแข็งเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศขึ้นถึงค่าหนึ่งชิ้นเชื้อเพลิงที่วางอยู่จะเริ่มลอยตัวขึ้นมีลักษณะคล้ายของไหลในตอนเริ่มติดเตานั้น Bed จะได้รับความร้อนจากภายนอกจนอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดติด



ไฟของเชื้อเพลิงหลังจากนั้นเชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าไปอย่างสม่ำเสมอโดยการเผาไหม้จะเกิดขึ้นทั่วๆทั้งบริเวณเตา

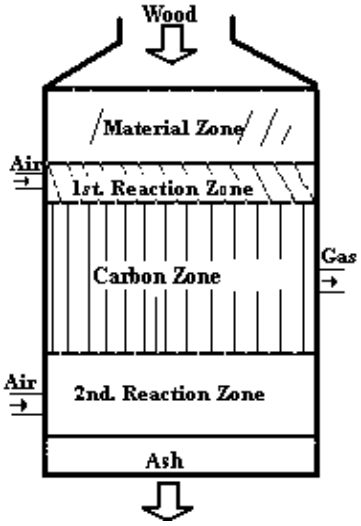
**รูปที่ 2.5 แสดงเตาผลิตแก๊สชนิด Fluidized bed**

โดยปกติภายในเตาแบบ Fluidized bed จะใส่วัสดุเฉื่อย (Inert material) เช่น ทราย หรือสารทำปฏิกิริยา (Reaction material) เช่น หินปูนบด (Limestone) เพื่อช่วยในการถ่ายเทความร้อน และช่วยในการทำความสะอาดแก๊สใน Fluidized bed ที่แท้จริงนั้นของแข็งถูกผสมกันอย่างรวดเร็ว และเกิดการถ่ายเทความร้อนอย่างสูงระหว่างทุกส่วนของ Bed ข้อได้เปรียบที่สำคัญของวิธีนี้คือ การควบคุมอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สแบบนี้จะทำได้ง่ายจึงสามารถรักษาอุณหภูมิให้ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของเถ้า ทำให้ไม่เกิดการจับตัวของ Slag ขึ้นได้จึงสามารถใช้เชื้อเพลิงที่มีเถ้ามาก ซึ่งถ้านำไปใช้เตาผลิตแก๊สแบบอื่นจะเกิดปัญหามาก

ข้อเสียของเตาผลิตแก๊ส เชื้อเพลิงที่ออกจากเตาจะมีปริมาณเถ้าและฝุ่นถ่านออกมาเนื่องจากความเร็วของอากาศภายในเตาสูงจึงต้องแยกออกโดยใช้ Cyclone หรือ Baghouses คุณสมบัติของเตาผลิตแก๊สแบบนี้ยังไม่เป็นที่รู้จักดีมีการอ้างกันว่าเตาผลิตแก๊สแบบนี้สามารถให้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีปริมาณน้ำมันดินต่ำ ถ่านที่ออกมาพร้อมกับแก๊สเชื้อเพลิงสามารถนำกลับไปสู่ในเตาได้ใหม่

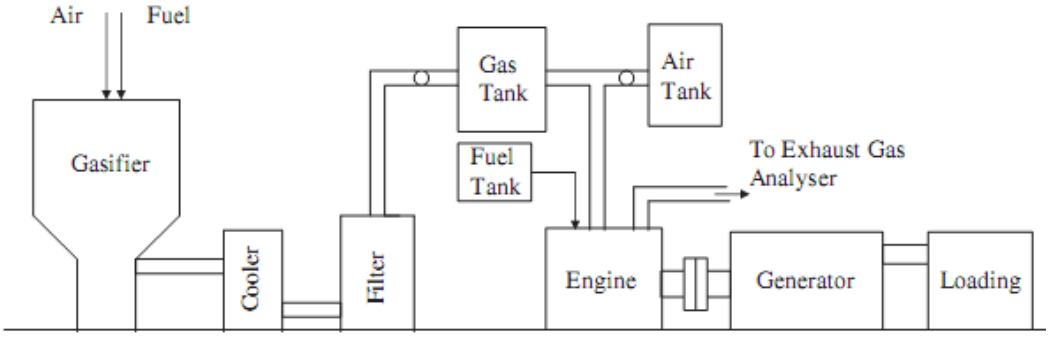
**5) Twin-fire gasifier**

เตาชนิดนี้จะเกิดปฏิกิริยา Reaction อยู่ 2 โซนดังรูปที่ 6 โดยอุณหภูมิของแก๊สที่ได้จะอยู่ในระหว่าง 460-520 ℃ ในกระบวนของเตานี้จะต้องใช้ความดันสูงโดยประมาณ 30 bar โดยเตาชนิดนี้แก๊สที่ได้ออกมาจะได้แก๊สสะอาด




รูปที่ 2.6 แสดงเตาผลิตแก๊สชนิด Twin-fire

ส่วนประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงใน Producer gas ที่ได้จากเตาผลิตแก๊สประกอบด้วย CO, $H_2$ และ $CH_4$ แก๊สที่ได้จากเตาต้องผ่านการระบายความร้อนและกรองดักจับฝุ่นและน้ำมันดินก่อนป้อนเข้าเครื่องยนต์ ดังแสดงในผังรูปที่ 7




**รูปที่ 2.7 แสดงการผลิตแก๊สชีวมวลป้อนเครื่องยนต์เพื่อผลิตไฟฟ้า**

## 2.3 เครื่องยนต์สันดาปภายในแบบ 4 จังหวะ

### 1) หลักการเบื้องต้นของเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบ 4 จังหวะ

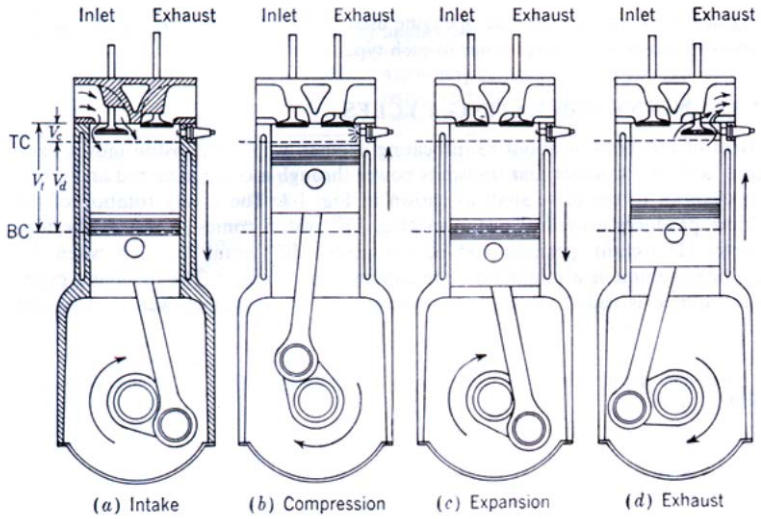
เครื่องยนต์สันดาปภายในแบบ 4 จังหวะเป็นเครื่องยนต์ที่มีลักษณะการทำงานโดยใช้เชื้อเพลิงและออกซิเจนจากอากาศผสมกันและส่งเข้ากระบอกสูบเพื่อให้เกิดการเผาไหม้หรือเรียกว่า “การสันดาป” ได้แก่ เครื่องยนต์ก๊าซโซลีนและเครื่องยนต์ดีเซล โดยเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนใช้ส่วนผสมของน้ำมันกับอากาศผสมกันก่อนแล้วจึงจุดระเบิดด้วยประกายไฟจากหัวเทียน ส่วนเครื่องยนต์ดีเซลต้องอัดอากาศให้ร้อนแล้วจึงฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปและเกิดการเผาไหม้ขึ้นในกระบอกสูบ (อุตสาห์ จิภากร และเชื้อชูคำ, 2539)

**2) วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบ 4 จังหวะ**

วัฏจักรการทำงานสี่จังหวะในแต่ละกระบอกสูบของเครื่องยนต์จะต้องใช้จังหวะการเคลื่อนที่ของลูกสูบ 4 จังหวะหรือ 2 รอบหมุนของเพลาข้อเหวี่ยงเพื่อให้ลำดับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นซึ่งได้จังหวะกำลัง 1 จังหวะนั้นสมบูรณ์หรือให้ครบ 1 วัฏจักรการทำงานดังรูปที่ 8

ก. จังหวะดูด (Intake stroke) หรือจังหวะเอาไอดีเข้า เริ่มต้นเมื่อลูกสูบอยู่ที่ศูนย์ตายบน (TDC) และสิ้นสุดเมื่อลูกสูบอยู่ที่ศูนย์ตายล่าง (BDC)

ข. จังหวะอัด (Compression stroke) สารผสมหรือเรียกว่าไอดีในกระบอกสูบถูกอัดให้มีปริมาตรลดลงโดยลูกสูบเคลื่อนที่จาก BC ไปยัง TC ในขณะที่วาล์วทั้งสองปิดอยู่ และเมื่อลูกสูบอยู่ที่ TC จะมีการจุดระเบิดจากประกายไฟจากหัวเทียนเกิดการเผาไหม้สารผสมอากาศกับเชื้อเพลิง ทำให้ความดันในกระบอกสูบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว




(ภาพจาก Heywood, B. J., 1988)

ค. จังหวะกำลังหรือจังหวะขยายตัว (Power stroke or expansion stroke) เริ่มต้นที่ลูกสูบอยู่ที่ TDC และสิ้นสุดเมื่อลูกสูบอยู่ที่ BDC โดยก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้สารผสมอากาศกับเชื้อเพลิงซึ่งมีอุณหภูมิและความดันสูงจะดันลูกสูบลงและทำให้เพลาข้อเหวี่ยงหมุน ในระหว่างนี้วาล์วไอดีและไอเสียทั้งสองยังปิดอยู่

ง. จังหวะคาย (Exhaust stroke) เริ่มต้นที่ลูกสูบอยู่ที่ BDC และวาล์วไอเสียเปิด ส่วนวาล์วไอดียังปิดอยู่ ก๊าซที่ขยายตัวแล้วถูกดันออกจากกระบอกสูบโดยลูกสูบเคลื่อนที่จาก BDC ไปยัง TDC [2]

**3) คุณสมบัติทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบ 4 จังหวะ**

- ความโตกระบอกสูบ (Bore), d คือความโตของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของกระบอกสูบ

- ระยะชัก (Stroke), $L$ คือระยะที่ลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้น-ลงภายในกระบอกสูบ

- จุดสูงสุดที่ลูกสูบเคลื่อนที่ไปถึง (Top dead center), TDC ในกรณีวางลูกสูบในแนวนอนจุดนี้เรียกว่า (inner dead center)

- จุดที่ลูกสูบเคลื่อนที่ลงมาต่ำสุด (Bottom dead center), BDC ในกรณีวางลูกสูบในแนวนอนจุดนี้เรียกว่า (Outer dead center)

- ปริมาตรอากาศ (Air Volume),$V_a$ คือ ปริมาตรอากาศทั้งหมดที่เครื่องยนต์ต้องการในแต่ละวัฏจักร

- ปริมาตรเชื้อเพลิง (Fuel Volume), $V_f$ คือ ปริมาตรเชื้อเพลิงทั้งหมดที่เครื่องยนต์ต้องการในแต่ละวัฏจักร

- ปริมาตรห้องเผาไหม้ (Clearance volume), $V_c$ คือ ปริมาตรภายในกระบอกสูบในขณะที่ลูกสูบอยู่จุดสูงสุด

- ปริมาตรระยะชัก (Swept volume หรือ Piston displacement), $V_{dc}$ คือ ปริมาตรที่อยู่ระหว่างจุดที่ลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้น-ลง หาได้จากสมการที่ (11)

$$V_{dc} = \frac{\pi d^2}{4} L \tag{11}$$

- ปริมาตรรวม (Total cylinder volume),$V_{tot}$ หาได้จากสมการที่ (12)

$$V_{tot} = V_d + V_C \tag{12}$$

- อัตราส่วนการอัด (Compression ratio ; $\varepsilon$) คือ อัตราส่วนของปริมาตรรวมต่อปริมาตรเมื่อลูกสูบอยู่ที่จุดสูงสุดหาได้จากสมการที่ (13)

$$\varepsilon = \frac{V_{tot}}{V_C} = \frac{V_d + V_C}{V_C} = 1 + \frac{V_d}{V_C} \tag{13}$$

- อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (Air-fuel ratio), AFR คือ มวลของอากาศต่อมวลของเชื้อเพลิงหาได้จากสมการที่ (14)

$$AFR = \frac{V_a}{V_f} \tag{14}$$

- อัตราส่วนอากาศส่วนเกิน (Excess air ratio; $\lambda$) คือ อัตราส่วนระหว่าง AFR ที่ใช้จริงต่อ AFR ในทางทฤษฎีหาได้จากสมการที่ (15) [3]

$$\lambda = \frac{AFR_{actual}}{AFR_{theory}} \qquad (15)$$

โดยที่ $\lambda = 1$ scoichiometric air/fuel ratio

$\lambda > 1$ air excess (mixture lean)

$\lambda < 1$ air shortage (mixture rich)

**4) เครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ (Biogas Engine)**

การใช้ก๊าซชีวภาพมาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในนั้นจะต้องปรับปรุงลักษณะบางประการของเครื่องยนต์เพื่อที่จะทำให้เครื่องยนต์นั้นๆ เหมาะสมแก่การใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงและสามารถทำงานได้ดีใกล้เคียงกันกับเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน โดยการดัดแปลงเครื่องยนต์เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง มีลักษณะการประยุกต์อยู่ 3 ลักษณะดังนี้

1. นำเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้น้ำมันดีเซลมาใช้ร่วมกับก๊าซชีวภาพหรือเรียกว่า ใช้เชื้อเพลิงคู่ (Gas-Diesel Engine or Dual fuel) โดยใช้ก๊าซชีวภาพผสมกับอากาศเป็นไอดีเข้าห้องเผาไหม้ ส่วนการจุดระเบิดยังใช้น้ำมันดีเซลฉีดเข้าห้องเผาไหม้ วิธีการแบบนี้เครื่องยนต์ต้องการใช้น้ำมันดีเซลเพื่อใช้ในการจุดระเบิดประมาณ 10-20% ของการใช้เครื่องยนต์ดีเซลปรกติ ดังนั้นจึงประหยัดน้ำมันได้ 80-90% และไม่ต้องดัดแปลงลักษณะการทำงานเครื่องยนต์ดีเซลแต่อย่างใด

2. นำเครื่องยนต์ดีเซลมาดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนแล้วจึงใช้กับก๊าซชีวภาพ (Modification of a Diesel Engine into a Gas Otto Engine) จากการจุดระเบิดของเครื่องยนต์ดีเซลที่อัดอากาศให้มีความดันและอุณหภูมิสูงจากนั้นฉีดน้ำมันดีเซลเข้าไปให้เกิดการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ เปลี่ยนมาเป็นอัดอากาศผสมก๊าซชีวภาพให้มีความดันและอุณหภูมิสูงจากนั้นจึงจุดระเบิดด้วยประกายไฟจากหัวเทียน วิธีการแบบนี้เครื่องยนต์ต้องได้รับการดัดแปลงโดยการเปลี่ยนอัตราส่วนการอัด (Compression ratio) ให้ได้ 10-12 และเปลี่ยนลักษณะการจุดระเบิดโดยการฉีดน้ำมันดีเซลมาเป็นจุดระเบิดด้วยประกายไฟจากหัวเทียน ตลอดจนเพิ่มอุปกรณ์ผสมอากาศกับก๊าซชีวภาพ (Carburetor) วิธีการแบบนี้จึงยุ่งยากมาก

3. นำเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนที่ใช้น้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิงมาใช้ก๊าซชีวภาพแทน (The Gas Otto Engine) วิธีการแบบนี้เครื่องยนต์ต้องได้รับการดัดแปลงโดยการเปลี่ยนอัตราส่วนการอัด (Compression ratio) ให้ได้ 10-12 เช่นกัน และต้องปรับปรุงคาร์บูเรเตอร์จากเดิมที่ผสมน้ำมันเบนซินกับอากาศมาเป็นผสมอากาศกับก๊าซชีวภาพเป็นไอดีแทน

อย่างไรก็ตามในการดัดแปลงเครื่องยนต์ดีเซลหรือก๊าซโซลีนมาเป็นเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพนั้นจะต้องปรับปรุงลักษณะบางประการของเครื่องยนต์นั้นๆ เพื่อให้ทำงานได้ดีกับการใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง โดยพิจารณาจากคุณสมบัติต่างๆ ที่ควรจะเป็นจากตารางที่ 3 [3]

โดยปกติเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบสี่จังหวะที่ใช้การจุดระเบิดด้วยประกายไฟจะมีอัตราส่วนการอัด ($\varepsilon$) ที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 8-12:1 และที่ใช้การจุดระเบิดด้วยการอัดจะมี

อัตราส่วนการอัด (ε) ที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 12-24:1 เพื่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่สมบูรณ์และไม่เกิดการน๊อค [4] ดังนั้นเมื่อต้องปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการอัด สำหรับกรณีที่ต้องเพิ่มอัตราส่วนการอัดมักจะเลือกใช้ประเก็นฝาสูบที่หนาขึ้น และสำหรับกรณีที่ต้องลดอัตราส่วนการอัดมักจะเลือกใช้ประเก็นฝาสูบที่บางลงและบางทีอาจจะต้องทำการเจียรไนฝาสูบให้บางลงแทนการเลือกใช้ประเก็นเนื่องจากไม่สามารถหาประเก็นฝาสูบที่บางเท่าที่ต้องการได้ ทั้งนี้สามารถคำนวณหาระยะการเพิ่มหรือลดอัตราส่วนการอัด (ความหนาของประเก็นฝาสูบ) ได้จากสมการที่ (16) [3]

$$\Delta h = \frac{4\,\Delta V}{\pi d^2} \tag{16}$$

โดยที่ $\Delta h$ คือ ระยะการเพิ่มหรือลดอัตราส่วนการอัด (ความหนาของประเก็นฝาสูบ) , (mm)

$\Delta V$ คือ ความแตกต่างของปริมาตรห้องเผาไหม้ขณะลูกสูบอยู่ตำแหน่งศูนย์ตายบน (TDC) ก่อนและหลังการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการอัด (ε), ($mm^3$)

$d$ คือ ความโตของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของกระบอกสูบ , (mm)

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific fuel consumption, sfc), กำลังงานจากเครื่องยนต์ (Power) และแรงบิด(Torque) จะเห็นได้ว่าขณะที่เครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงเป็นน้ำมันเบนซินและ/หรือใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงจะมีลักษณะทั้งสามประการที่คล้ายกันมาก ถ้าพิจารณาที่ความเร็ว 1,500 rpm เครื่องยนต์จะมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (sfc) สูง และจะลดลงเมื่อความเร็วสูงขึ้นและจะสูงขึ้นอีกที่ความเร็วมากกว่า 3,000 rpm และจะพบว่าการทำงานที่ความเร็วประมาณ 3,000 rpm จะมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (sfc) ที่ต่ำมาก ในขณะที่กำลังที่ได้ (Power) และแรงบิดที่ได้ (Torque) ค่อนข้างสูง

**5) การวิเคราะห์เพื่อหาประสิทธิภาพรวมของระบบและเครื่องยนต์**

การหาประสิทธิภาพของเครื่องยนต์และประสิทธิภาพรวมของระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ ซึ่งใช้วิธีการต่อกำลังเพลาตรงจากเครื่องยนต์เข้ากับเพลามอเตอร์เหนี่ยวนำ เมื่อเครื่องยนต์หมุนชนะความเร็วซิงโคนัสของมอเตอร์มอเตอร์ก็จะทำหน้าที่เป็นไดนาโม สามารถคำนวณเพื่อหาประสิทธิภาพรวมและประสิทธิภาพเครื่องยนต์ ได้ดังนี้

1. คำนวณอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง [3]

$$f_c = \frac{1}{\eta_{eng}} \times P_{match} \times \frac{1}{H_{u,act}} \times 3600 \tag{17}$$

เมื่อ $f_c$ คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง , ($m^3$/hr)

$\eta_{eng}$ คือ ประสิทธิภาพเครื่องยนต์ที่นำมาดัดแปลง , (ก๊าซโซลีน = 0.25)

$P_{match}$ คือ ขนาดกำลังที่ต้องการหรือผลิตได้ , (kW)

$H_{u,act}$ คือ ค่าความร้อนเชื้อเพลิง , ($kJ/m^3$)

2. คำนวณประสิทธิภาพรวมของระบบ จากสมการที่ (18)

$$\eta_{tot} = \left( \frac{P_{EL} \times 3600}{f_C \times H_{u,act}} \right) \times 100 \qquad (18)$$

เมื่อ $\eta_{tot}$ คือ ประสิทธิภาพรวมของระบบ , (%)

$P_{EL}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ , (kW)

3. คำนวณประสิทธิภาพเครื่องยนต์ จากสมการที่ (19)

$$\eta_{Eng} = \frac{\eta_{tot}}{\eta_{Motor}} = \frac{\text{Overall efficiency}}{\text{Motor efficiency}} \qquad (19)$$

เมื่อ $\eta_{Eng}$ คือ ประสิทธิภาพเครื่องยนต์ , (%)

$\eta_{Motor}$ คือ ประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำ $\div 100$ , (%)

**2.4 การสันดาป**

เครื่องยนต์สันดาปภายในซึ่งทำงานตามขบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ ได้พลังงานความร้อนจากการสันดาปเชื้อเพลิง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) ที่อาจจะอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ เมื่อเกิดการสันดาปจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น ในการสันดาปของเครื่องยนต์สันดาปภายใน เชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนซึ่งมีอยู่ในอากาศ และอากาศนอกจากจะมีออกซิเจนแล้วยังมีก๊าซอย่างอื่นอีก เช่น ไนโตรเจน อาร์กอน ฮีเลียม นีออน คริปตอน ซีนอน คาร์บอนไดออกไซด์ และละอองไอน้ำ แต่ส่วนประกอบหลักที่มีจำนวนมากได้แก่ ไนโตรเจน และออกซิเจน ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงถือว่าอากาศประกอบด้วยก๊าซสองชนิดนี้เท่านั้น

ออกซิเจนเป็นก๊าซที่ทำให้การสันดาปเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนไนโตรเจนเป็นก๊าซเฉื่อย และเป็นตัวทำให้ปฏิกิริยาของการสันดาปของเชื้อเพลิงช้าลง และยังเป็นตัวดูดเอาพลังงานบางส่วนในขณะสันดาปออกไป ทำให้อุณหภูมิของการสันดาปต่ำลง ดังนั้นในอากาศที่เข้าไปสันดาปกับเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์สันดาปภายในจะต้องวิเคราะห์จากออกซิเจนและไนโตรเจน โดยน้ำหนักของอากาศที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของสารเชื้อเพลิง และปริมาณของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ จะดูจากปริมาณของออกซิเจนที่มีอยู่ในอากาศ ซึ่งปริมาณของออกซิเจนในอากาศโดยปริมาตรและน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 3 [5]

**ตารางที่ 2.2** แสดงปริมาณออกซิเจนและไนโตรเจนที่มีอยู่ในอากาศสำหรับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์

| ส่วนประกอบ | สัญลักษณ์ | น้ำหนักโมเลกุล | ส่วนประกอบ |
|---|---|---|---|

| | | | โดยปริมาตร | โดยน้ำหนัก |
|---|---|---|---|---|
| ออกซิเจน | $O_2$ | 32 | 21 | 23.2 |
| ไนโตรเจน | $N_2$ | 28 | 79 | 76.8 |
| อากาศ | - | 28.95 | 100 | 100 |

**1) สมการการสันดาป**

สมการการสันดาป (Combustion Equation) คือ ขบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นจากการสันดาป โดยเขียนออกมาในรูปสมการ และหลังจากเขียนเป็นสมการแล้ว จะต้องพิจารณาว่าจำนวนอะตอมของส่วนประกอบต่าง ๆ ทางซ้ายมือเท่ากับทางขวามือหรือไม่ หากไม่จะต้องทำการสมดุลอะตอมของสมการเสียก่อน และสมการเคมีที่สมดุลนี้เรียกว่า“Complete Combustion Equation” หรือ “Stoichiometric Equation” เช่น การสันดาปของคาร์บอนมอนนอกไซด์และออกซิเจน ซึ่งจะได้คาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อการสันดาปเป็นไปอย่างสมบูรณ์ จะได้ดังสมการที่ (20) [5]

$$CO + O_2 = CO_2 \quad (20)$$

และเมื่อสมดุลสมการจะได้ดังสมการที่ (21)

$$2CO + O_2 = 2CO_2 \quad (21)$$

หรือการสันดาปสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น ก๊าซมีเทนกับออกซิเจน เมื่อการสันดาปเป็นไปอย่างสมบูรณ์จะได้ดังสมการที่ (22)

$$CH_4 + O_2 = CO_2 + H_2O \quad (22)$$

และเมื่อสมดุลสมการจะได้ดังสมการที่ (23)

$$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O \quad (23)$$

**2) การวิเคราะห์การสันดาปโดยมวลและปริมาตร**

การวิเคราะห์การสันดาปโดยมวลและปริมาตร (Combustion Analysis by Mass and by Volume) นั้น จุดประสงค์เพื่อต้องการทราบจำนวนอากาศที่ต้องการใช้สำหรับการสันดาปกับเชื้อเพลิง ซึ่งบางครั้งอาจวิเคราะห์โดยมวลหรือบางครั้งอาจวิเคราะห์โดยปริมาตร หรือวิเคราะห์ทั้ง 2 อย่าง แต่ในการวิเคราะห์ดังกล่าวจะต้องทราบน้ำหนักอะตอมและน้ำหนักโมเลกุล ดังตัวอย่างสารตามตารางที่ 2.3

**ตารางที่ 2.3** น้ำหนักอะตอมและน้ำหนักโมเลกุลของสารบางชนิด (สุเทพ ญาณวัฒน์, 2528)

| สาร | สัญลักษณ์ | น้ำหนักอะตอม | น้ำหนักโมเลกุล |
|---|---|---|---|

| | | | |
|---|---|---|---|
| ออกซิเจน | $O_2$ | 16 | 32 |
| ไนโตรเจน | $N_2$ | 14 | 28 |
| ไฮโดรเจน | $H_2$ | 1 | 2 |
| คาร์บอน | C | 12 | 12 |
| ซัลเฟอร์ | S | 32 | 32 |

การวิเคราะห์โดยมวล (Analysis by Mass) จะต้องพิจารณาโดยอาศัยอะตอมหรือโมเลกุลของสารเป็นหลัก ส่วนการวิเคราะห์โดยปริมาตร (Analysis by Volume)นั้น จากทฤษฎีของอาโวกาโด (Avogadro Hypothesis) กล่าวว่า “ก๊าซต่างชนิดกันที่มีปริมาตร, ความดัน และอุณหภูมิเดียวกัน จะมีจำนวนโมเลกุลเท่ากัน” จากทฤษฎีดังกล่าวสัดส่วนของโมเลกุลก็คือสัดส่วนของปริมาตรนั่นเอง หรือจำนวนโมเลกุลก็คือจำนวนปริมาตร ซึ่งยกตัวอย่างการวิเคราะห์โดยมวลหรือโดยน้ำหนักและการวิเคราะห์โดยปริมาตรดังต่อไปนี้ [5]

**ก) การสันดาปคาร์บอนมอนอกไซด์อย่างสมบูรณ์ (Complete Combustion of Carbon monoxide)**

<u>วิเคราะห์โดยมวล</u>

สมการการสันดาป ; $2CO + O_2 = 2CO_2$

สัดส่วนโดยมวล ; $2(12+16) + (2\times16) = 2(12+32)$

$56 + 32 = 88$

56 หารตลอดจะได้ $1 + \frac{4}{7} = 1\frac{4}{7}$

แทนค่าหน่วยมวลด้วย kg ลงในสมการจะได้

$$1 \text{ kg CO} + \frac{4}{7}\text{kg } O_2 = 1\frac{4}{7}\text{kg } CO_2$$

$\frac{4}{7}$ kg $O_2$ เป็น 23.20% ของอากาศ

$\therefore$ จำนวนอากาศที่ใช้ $= \frac{4}{7}\times\frac{1}{0.232} = 2.46$ kg

$\therefore$ จำนวนไนโตรเจน $= 2.46 - \frac{4}{7} = 1.89$ kg

ดังนั้นอากาศจำนวน 2.46 kg ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 kg โดยการสันดาปอย่างสมบูรณ์จะได้

$$1 \text{ kg CO} + 2.46 \text{ kg Air} = 1.57 \text{ kg } CO_2 + 1.89 \text{ kg } N_2$$

**<u>วิเคราะห์โดยปริมาตร</u>**

จากสมการการสันดาป ; $2CO + O_2 = 2CO_2$

สัดส่วนโดยปริมาตร ; $2 + 1 = 2$

2 หารตลอดจะได้ $1 + 0.5 = 1$

แทนค่าหน่วยปริมาตรด้วย $m^3$ จะได้

$$1\ m^3CO\ +\ 0.5\ m^3O_2\ =\ 1\ m^3CO_2$$

$0.5\ m^3O_2$ เป็น 21% ของอากาศที่ใช้

$\therefore$ จำนวนอากาศที่ใช้ $= \frac{0.5}{0.21} = 2.38\ m^3$

$\therefore$ จำนวนไนโตรเจน $= 2.38 - 0.5 = 1.88\ m^3$

ดังนั้นสมการการสันดาปอย่างสมบูรณ์ที่วิเคราะห์โดยปริมาตรจะได้

| $1\ m^3\ CO\ +\ 2.38\ m^3\ Air\ =\ 1\ m^3\ CO2\ +\ 1.88\ m^3\ N_2$ |
|---|

**ข) การสันดาปไฮโดรคาร์บอน (Combustion of Hydrocarbon)**

**การสันดาปมีเทนอย่างสมบูรณ์ (Complete Combustion of Methane)**

**<u>วิเคราะห์โดยมวล</u>**

สมการการสันดาป ; $CH_4\ +\ 2O_2\ =\ CO_2\ +\ 2H_2O$

สัดส่วนโดยมวล ; $(12 + 4) + (2\times 32) = (12 + 32) + 2(2 + 16)$

$16\ +\ 64\ =\ 44\ +\ 36$

16 หารตลอดจะได้ $1\ +\ 4\ =\ 2.75\ +\ 2.25$

แทนค่าหน่วยมวลด้วย kg ลงในสมการจะได้

$1\ kg\ CH_4\ +\ 4\ kg\ O_2\ =\ 2.75\ kg\ CO_2\ +\ 2.25\ kg\ H_2O$

$4\ kg\ O_2$ เป็นส่วนประกอบ 23.20% ของอากาศ

$\therefore$ จำนวนอากาศ $= \frac{4}{0.232} = 17.24\ kg$

$\therefore$ จำนวนไนโตรเจน $= 17.24 - 4 = 13.24\ kg$

**ดังนั้นสมการการสันดาปมีเทนอย่างสมบูรณ์จะได้**

| $1\ kg\ CH_4 + 4\ kg\ O_2 + 13.24\ kg\ N_2\ =\ 2.75\ kg\ CO_2\ +\ 2.25\ kg\ H_2O\ +\ 13.24\ kg\ N_2$<br>หรือ $1\ kg\ CH_4\ +\ 17.24\ kg\ Air\ =\ 2.76\ kg\ CO_2\ +\ 2.25\ kg\ H_2O\ +\ 13.24\ kg\ N_2$ |
|---|

สัดส่วนโดยปริมาตร ; $1\ +\ 2\ =\ 1\ +\ 2$

แทนค่าหน่วยปริมาตร $m^3$ ลงในสมการจะได้

$1\ m^3\ CH_4\ +\ 2\ O_2\ =\ 1\ m^3\ CO_2\ +\ 2\ m^3\ H_2O$

($2O_2$ เป็น Stoichiometric Volume of $O_2$)

พิจารณาจากสมการข้างบนจะเห็นว่า สมการซ้ายมือ = สมการทางขวามือ แสดงว่า $H_2O$ อยู่ในสภาวะไอน้ำ

$2\ m^3\ O_2$ เป็นส่วนประกอบ 21% ของอากาศ

$\therefore$ จำนวนอากาศ $= \frac{2}{0.21} = 9.52\ m^3$

= Stoichiometric volume of Air

∴ จำนวนไนโตรเจน = 9.52 - 2 = 7.52 $m^3$

ดังนั้นสมการการสันดาปมีเทนอย่างสมบูรณ์โดยวิเคราะห์จากปริมาตรจะได้

| $1\ m^3\ CH_4 + 9.52\ m^3\ Air = 1\ m^3\ CO_2 + 2\ m^3\ H_2O + 7.52\ m^3\ N_2$ |
|---|

**3) การผสมเชื้อเพลิง**

การผสมเชื้อเพลิง หมายถึง การผสมเชื้อเพลิงกับอากาศในอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อป้อนเข้ากระบอกสูบของเครื่องยนต์สันดาปภายในอย่างต่อเนื่อง โดยให้จำนวนส่วนผสมดังกล่าวเหมาะสมกับสภาพภาระความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ตลอดจนอุณหภูมิขณะที่เครื่องยนต์ทำงาน อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ผสมเชื้อเพลิงกับอากาศดังกล่าว เรียกว่า คาร์บูเรเตอร์ (Carburetor) โดยในการป้อนเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์มีองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ 2 ประการคือ

1. การใช้เชื้อเพลิงอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด ซึ่งหมายความว่า เชื้อเพลิงที่เข้าไปยังห้องเผาไหม้จะต้องเป็นฝอยละอองละเอียดจนสามารถคลุกเคล้ากับอากาศ และทำให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงเป็นไปอย่างสมบูรณ์

2. เชื้อเพลิงที่ป้อนจะต้องมีคุณภาพที่จะทำให้เครื่องยนต์ได้กำลังสูงสุด

องค์ประกอบที่สำคัญ 2 ประการดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้จะต้องขึ้นอยู่กับสิ่งสำคัญดังต่อไปนี้

ก. อัตราส่วนผสมของอากาศต่อเชื้อเพลิง กล่าวคือจำนวนน้ำหนักของอากาศที่ผสมกับน้ำมันเชื้อเพลิง 1 หน่วยน้ำหนัก เรียกว่า “อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (AFR)” โดยทางทฤษฎีแล้วอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงนี้ เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับชนิดส่วนประกอบของเชื้อเพลิงนั้นๆ อัตราส่วนนี้หาได้จากส่วนประกอบของเชื้อเพลิงทางเคมี

ข. ส่วนผสมหนาและส่วนผสมบางของอากาศ กล่าวคือในกรณีที่เครื่องยนต์ใช้น้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิงถ้าอากาศกับเชื้อเพลิงผสมกันในอัตรา 12.5-13:1 ถือว่าเป็นอัตราส่วนผสมที่พอดี ถ้าจำนวนอากาศน้อยกว่านั้นจะทำให้ส่วนผสมหนา (Rich mixture) ซึ่งทำให้เปลืองเชื้อเพลิงอย่างไรก็ตามส่วนผสมหนาก็อาจจะยอมให้ได้ ในกรณีที่เครื่องยนต์ต้องการกำลังเพิ่มขึ้น แต่ก็ไม่ควรต่ำกว่า 6 : 1 (อากาศ 6 ส่วน : เชื้อเพลิง 1 ส่วนโดยน้ำหนัก) และในทำนองเดียวกันถ้าจำนวนอากาศมากกว่านั้นจะทำให้ส่วนผสมบาง (lean mixture) ไม่เปลืองเชื้อเพลิง แต่กำลังจะตกซึ่งส่วนผสมบางนี้ก็ไม่ควรเกิน 20:1 (อากาศ 20 ส่วน : เชื้อเพลิง 1 ส่วนโดยน้ำหนัก) เพราะถ้าส่วนผสมเจือจางมากจะทำให้ลุกติดไฟได้ยาก ดังนั้นในการที่จะกำหนดว่าอัตราส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิงสำหรับเชื้อเพลิงใดจะถูกต้องนั้น จะเป็นไปตามสมการทางเคมีของการสันดาป [6]

ในการทำงานจริงของเครื่องยนต์ จะพบว่าสมรรถนะของเครื่องยนต์จะเปลี่ยนแปลงไปตามส่วนผสมของอากาศกับเชื้อเพลิง(AFR) โดยสมรรถนะของเครื่องยนต์ก๊าซและ/หรือเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนจะมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนผสมอากาศกับเชื้อเพลิง, แรงบิด และการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง โดยแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์ (Max Torque) จะได้รับเมื่ออัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิง(AFR) คงที่แน่นอน ซึ่งปกติอัตราส่วนผสมที่ให้กำลังสูงสุดสำหรับเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนจะอยู่ที่ประมาณ 12.5-13:1 เมื่อส่วนผสมของเชื้อเพลิงหนากว่าขณะได้รับกำลังสูงสุด กำลังของเครื่องยนต์ก็จะลดลงอย่าง

ช้าๆ และการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในทางตรงกันข้ามเมื่อส่วนผสมของเชื้อเพลิงบางลงกว่าขณะได้รับกำลังสูงสุด กำลังของเครื่องยนต์ก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว

และในการทำงานจริงของเครื่องยนต์สันดาปภายในนั้นไม่สามารถที่จะเผาไหม้เชื้อเพลิงได้อย่างสมบูรณ์ 100% ได้ ทั้งนี้เนื่องจากสภาวการณ์ต่างๆ ที่จะทำให้เครื่องยนต์สามารถทำงานอยู่ได้ อาทิเช่น ความต้องการส่วนผสมอากาศกับเชื้อเพลิงที่หนาขึ้นในขณะเริ่มติดเครื่องหรือเดินเบา ขณะสภาพภาระ (Load) ของเครื่องยนต์ที่สูง หรือในขณะทำงานที่ความเร็วรอบสูงสุด อีกประการหนึ่งในอากาศซึ่งเป็นส่วนผสมของเชื้อเพลิงในการสันดาปมีก๊าซไนโตรเจนอยู่ซึ่งจะเป็นตัวจำกัดการทำปฏิกิริยาของเชื้อเพลิงและออกซิเจน ถึงแม้ว่าจะมีการออกแบบห้องเผาไหม้ที่ดี ตลอดจนการทำให้อากาศมีการหมุนวนที่ดี หรือแม้กระทั่งการออกแบบให้เชื้อเพลิงมีการผสมกับอากาศในอัตราส่วนที่พอเหมาะแก่การสันดาปที่สมบูรณ์แล้วก็ตาม ดังนั้นในการที่จะออกแบบหรือควบคุมการสันดาปเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์สันดาปภายในให้สมบูรณ์ที่สุดจึงจำเป็นที่จะต้องทำการวิเคราะห์ไอเสียควบคู่ไปด้วย [5]

ปัจจัยในการวิเคราะห์ไอเสียนั้นก็ขึ้นอยู่กับอากาศที่ใช้และชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการสันดาป เช่น ถ้าอากาศมากไปก็จะทำให้ส่วนผสมบาง (Weak or lean mixture) ซึ่งหมายความว่าเชื้อเพลิงน้อยไป การสันดาปของไฮโดรเจนกับออกซิเจนจะทำให้เกิดน้ำ และการสันดาปของคาร์บอนกับออกซิเจนก็จะทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) และจะเหลือออกซิเจนบางส่วนปรากฏในผลิตผลของการสันดาป ในทางตรงกันข้ามถ้าอากาศน้อยเกินไป ส่วนผสมจะหนา (Rich mixture) เมื่อส่วนผสมหนาจะทำให้ไฮโดรเจนส่วนมากจะสันดาปกับออกซิเจนทำให้เกิดน้ำ ส่วนการสันดาปของคาร์บอนกับออกซิเจนเป็นไปอย่างไม่สมบูรณ์เพราะออกซิเจนไม่พอเพียงจึงทำให้เหลือคาร์บอนบางส่วนในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) และคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ซึ่งเป็นลักษณะของการสันดาปที่ไม่สมบูรณ์ ทั้งนี้ในการสันดาปเชื้อเพลิงที่ไม่สมบูรณ์ยังอาจก่อให้เกิดสารพิษอื่นๆ เช่น $NO_X$ และฝุ่นที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์, สภาพแวดล้อม และชั้นบรรยากาศโลก [6]

ในการหาประสิทธิภาพของการสันดาปของเชื้อเพลิงโดยทั่วไปจะกำหนดเอาปริมาณของคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) เป็นสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์เป็นก๊าซพิษที่เป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ, ระบบประสาทมนุษย์ เป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อม และชั้นบรรยากาศโลกอย่างร้ายแรง อีกทั้งยังเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse Effect) ซึ่งทำให้โลกร้อนขึ้น ถ้าปริมาณของคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) จากการวิเคราะห์ไอเสียมีมาก ก็แสดงว่าอากาศน้อยเกินไป และถ้าปริมาณของออกซิเจนปรากฏในผลิตผลของการสันดาปก็แสดงว่าอากาศมากเกินไป และเนื่องจากประสิทธิภาพของการสันดาปกำหนดโดยปริมาณของคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) และออกซิเจนในผลิตผลของการสันดาปโดยไม่มีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง จึงเรียกการสันดาปนี้ว่า “Dry flue exhaust gas” ดังนั้นในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการสันดาปจะเริ่มกระทำจากส่วนผสมที่บางมาก จนถึงส่วนผสมที่หนามาก ซึ่งผลจากการเคราะห์จะนำมาพล๊อตลงในกราฟเปอร์เซ็นต์กับอัตราส่วนผสมของอากาศกับเชื้อเพลิง