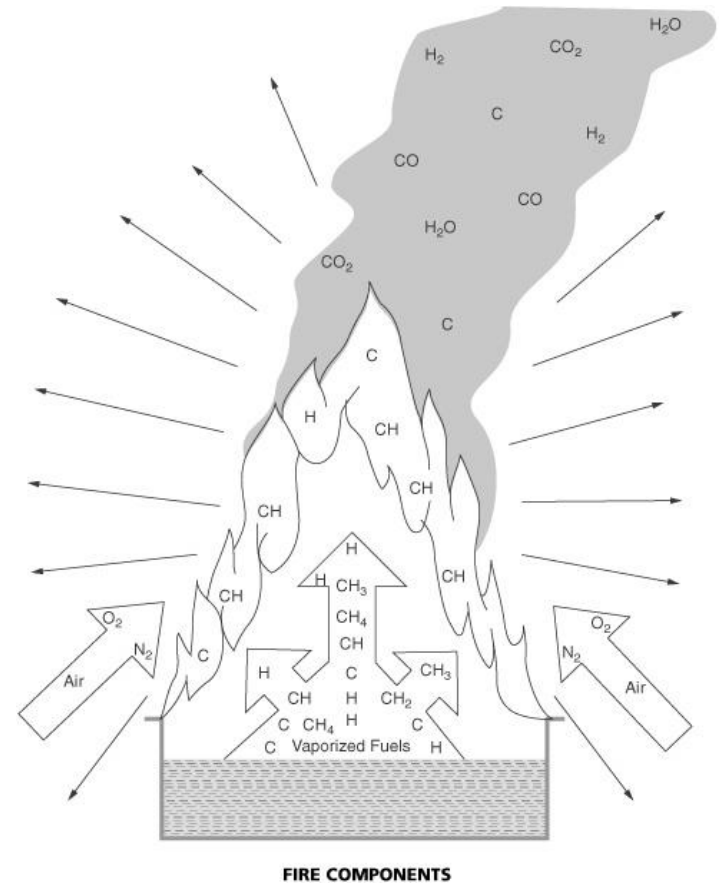


# วิทยาศาสตร์การเผาไหม้

## ปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้

- ปฏิกิริยาทางเคมีที่เชื้อเพลิงทำกับออกซิเจนในอากาศและปลดปล่อยความร้อนออกมา
- ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง (ตั้งแต่ 1,000 °C ไปโดยประมาณ)
- เกิดขึ้นเร็วมาก (ในช่วงเวลา 1  $\mu$ s - 10  $\mu$ s)
- เป็นปฏิกิริยาที่เป็นเอกพันธ์หรือเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous)

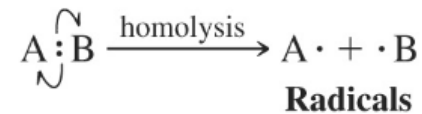


# วิทยาศาสตร์การเผาไหม้

## ปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้

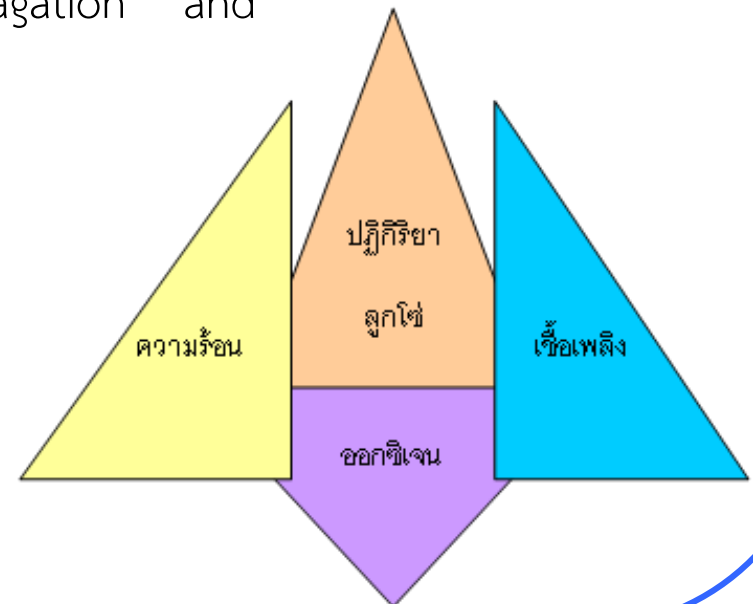
- ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction)

- active free radicals (chain initiation)



- intermediate radicals (chain propagation and consecutive)

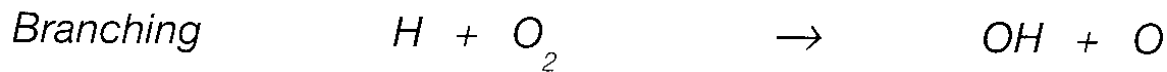
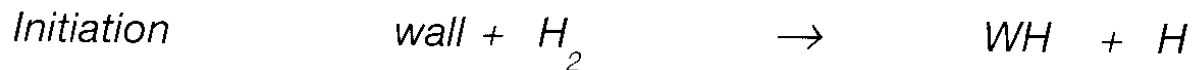
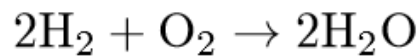
- chain termination



# วิทยาศาสตร์การเผาไหม้

## ตัวอย่างปฏิกิริยาการเผาไหม้ของไฮโดรเจน

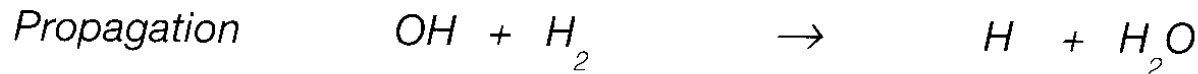
The overall reaction is:



$$k = 2.00 \times 10^{14} \exp(-8,455/T) \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$$



$$k = 2.126 \times 10^{14} \exp(-6,860/T) \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

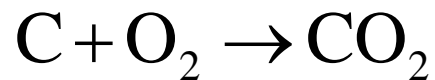


$$k = 5.94 \times 10^{14} \exp(-3,880/T) \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

# วิทยาศาสตร์การเผาไหม้

เกิดการเผาไหม้แล้ว สามารถเขียนปฏิกิริยารวม

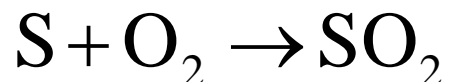
ถ้ามีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ จะเกิดปฏิกิริยา



ถ้ามีการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (บางส่วน) จะเกิดปฏิกิริยา



เชื้อเพลิงที่มีกำมะถันอยู่ด้วย จะเกิดปฏิกิริยา



# วิทยาศาสตร์การเผาไหม้

สถานะที่จำเป็นในการเริ่มปฏิกิริยา



# วิทยาศาสตร์การเผาไหม้

## พลังงานการจุดไฟ และ อุณหภูมิการจุดไฟ (Ignition Temperature)

Combustible	Formula	Temperature	
		°F	°C
Sulfur	S	470	245
Charcoal	C	650	345
Fixed carbon(bituminous coal)	C	765	405
Fixed carbon(subbituminous coal)	C	870	465
Fixed carbon(anthracite coal)	C	840-1115	450-600
Acetylene	$C_2H_2$	580-825	305-440
Ethane	$C_2H_6$	880-1165	470-630
Ethylene	$C_2H_4$	900-1020	480-550
Hydrogen	$H_2$	1065-1095	575-590
Methane	$CH_4$	1170-1380	630-765
Carbon monoxide	CO	1130-1215	610-665
Kerosene	-	490-560	255-295
Gasoline	-	500-800	260-425



# วิทยาศาสตร์การเผาไหม้

## ขีดจำกัดของการเกิดเปลวไฟ (Flammability limits, limits of flammability)

ปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่เป็นเนื้อเดียวกันสามารถเกิดได้ในช่วงความดันและอุณหภูมิที่กว้าง

- ถ้าส่วนผสมระหว่างแก๊สเชื้อเพลิงและอากาศเกิดปฏิกิริยาภายใต้ความดันสูง จะเป็นปฏิกิริยาที่มีความเร็วเหนือเสียง (supersonic reaction) เรียกว่าการระเบิด (detonation)
- ถ้าส่วนผสมระหว่างแก๊สเชื้อเพลิงและอากาศเกิดปฏิกิริยาที่ความดันบรรยากาศ หรือภายใต้ความดันต่ำ จะเกิดปฏิกิริยาที่มีความเร็วต่ำกว่าเสียง (subsonic reaction) เรียกว่าการเผาด้วยความร้อน (deflagration) แต่คำที่นิยมเรียกใช้คือ การเกิดเปลวไฟ (flames) เพราะที่ความดันปกติ แนวนหรือขอบของการเผาไหม้ปรากฏเป็นแสงสว่าง ที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า

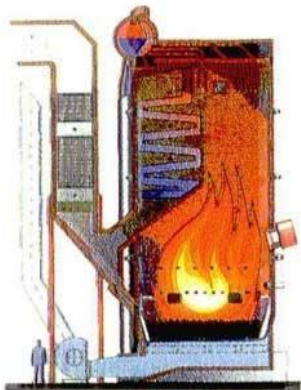
# วิทยาศาสตร์การเผาไหม้

**These are commonly used terms, but technically speaking these are different.**

1. **Ignition** refers to the process / phenomena of initiating the overall burning (burning used loosely here) process.



2 and 3. **Combustion and burning** are similar in the respect that both leads to the formation of new species as a result of chemical reaction in a irreversible process.



combustion technically refers to a  
- when the process is being done  
in "fixed" amount of air/oxygen.



Burning refers when the  
process has access to infinite  
amount of air/oxygen i.e.  
done in open.



# วิทยาศาสตร์การเผาไหม้

**These are commonly used terms, but technically speaking these are different.**

4. **Explosion** happens when rapid increase in volume takes place imparting momentum to the reaction particles with a production of a subsonic shock wave.



5. **Detonation** is similar to explosion with the difference lying in the fact that the rapid increase in volume is so high that production of supersonic shock wave takes place. (See the image carefully, you can see the wave arc in top)



# วิทยาศาสตร์การเผาไหม้

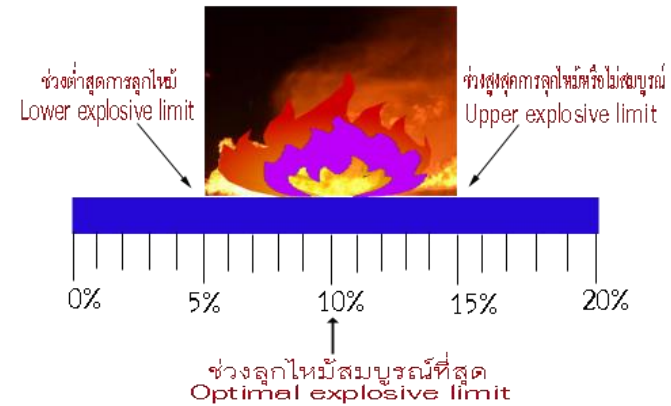
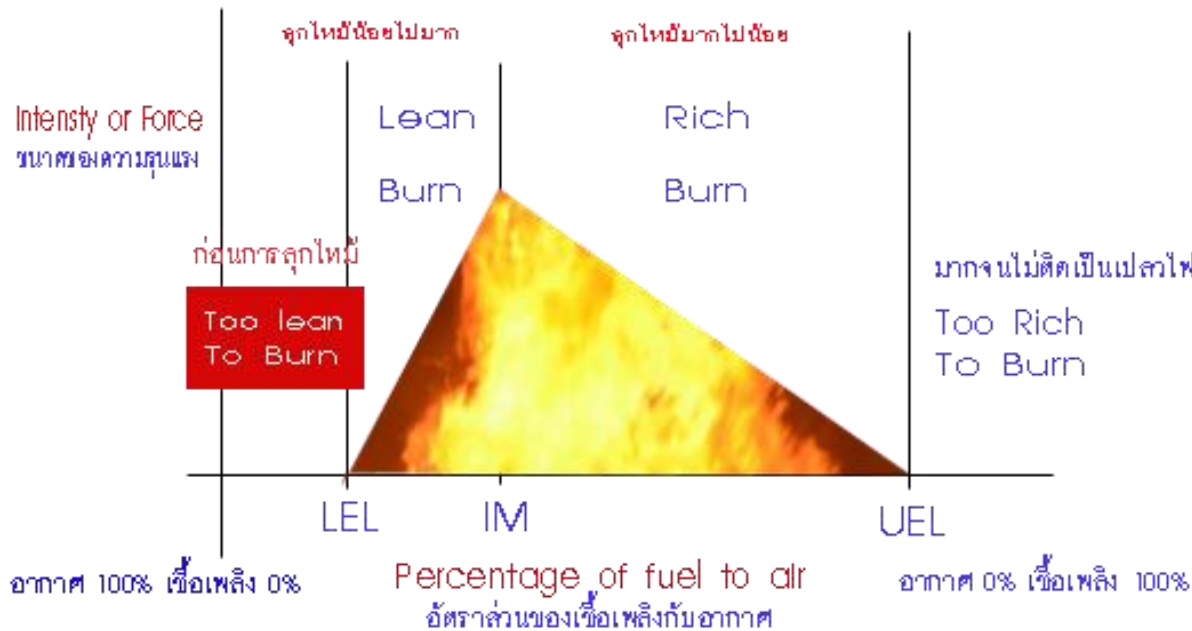
## เปลวไฟ (เป็นบริเวณที่เกิดการเผาไหม้)

การเกิดเปลวไฟต้องเริ่มจากส่วนผสมที่เหมาะสม ถ้าเริ่มจากเชื้อเพลิงอย่างเดียว การเผาไหม้จะเกิดขึ้นไม่ได้ ถ้าเริ่มจากอากาศหรือสารออกซิไดส์อย่างเดียว การเผาไหม้จะเกิดขึ้นไม่ได้เช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงมี ช่วง ส่วนผสมที่เหมาะสมที่เกิดเปลวไฟขึ้นได้ อยู่ระหว่างส่วนผสมที่มีเชื้อเพลิงเจือจางที่สุด (Lean mixture) ที่จะเกิดเปลวไฟได้ เรียกขีดจำกัดขั้นต่ำของการเกิดเปลวไฟ (lower limit of flammability) และส่วนผสมที่มีเชื้อเพลิงเข้มข้นที่สุด (rich mixture) ที่ยังคงเกิดเปลวไฟได้ เรียกว่าขีดจำกัดขั้นสูงของการเกิดเปลวไฟ (upper limit of flammability) ช่วงกว้างของส่วนผสมนี้เรียกว่า ขีดจำกัดของการเกิดเปลวไฟ (limits of flammability)

Full	leanest	Richest
	%	%
Acetone (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O)	3.10	11.15
Acetylene (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	2.50	80.00
Ammonia (NH <sub>3</sub> )	16.10	26.60
Benzene (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	1.41	7.10
Butane (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	1.86	8.41
Butyl (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O)	1.45	11.25
Butylene (C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> )	1.98	9.65
Carbon monoxide (CO)	12.50	74.20
Ethane (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	3.22	12.45
Ethyl (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O)	4.25	18.95
Ethylene (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	3.05	28.60
Heptane (C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> )	1.00	6.70
Hexane (C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> )	1.27	6.90
Hydrogen (H <sub>2</sub> )	4.00	74.20
Methane (CH <sub>4</sub> )	5.00	14.00
Methyl (CH <sub>4</sub> O)	7.10	36.50
Octane (C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> )	0.95	-
Pentane (C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> )	1.42	7.80
Propane (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	2.37	9.50
Propyl (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O)	2.15	13.50
Propylene (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> )	2.40	10.30
Propylene oxide (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O)	2.10	21.50
Toluene (C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> )	1.45	6.75

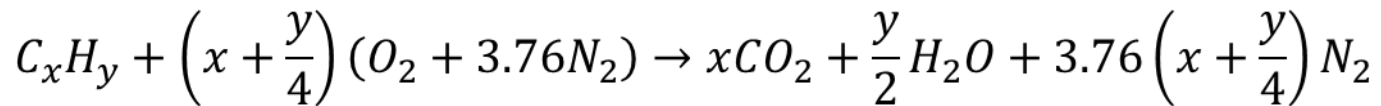
# วิทยาศาสตร์การเผาไหม้

## เปลวไฟ



# วิทยาศาสตร์การเผาไหม้

ปริมาณสารสัมพันธ์ของการเผาไหม้ (Stoichiometry)



อัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงที่สตอยคิโอเมตรี (A/F)<sub>stoich</sub>

อัตราส่วนเชิงมวลของอากาศและเชื้อเพลิงสำหรับปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สตอยคิโอเมตรี

$$(A/F)_{\text{stoich}} = \left( \frac{m_{\text{air}}}{m_{\text{fuel}}} \right)_{\text{stoich}} = \frac{4.76(x + y/4)}{1} \cdot \frac{MW_{\text{air}}}{MW_{\text{fuel}}}$$

# วิทยาศาสตร์การเผาไหม้

## อัตราส่วนสมมูล (Equivalence Ratio) ( $\phi$ )

$$\Phi = \frac{(A/F)_{\text{stoich}}}{(A/F)_{\text{actual}}} = \frac{(F/A)_{\text{actual}}}{(F/A)_{\text{stoich}}}$$

$\Phi > 1$  เป็นของผสมแบบ Fuel-rich

$\Phi < 1$  เป็นของผสมแบบ Fuel-lean

$\Phi = 1$  เป็นของผสมที่สตอยคิโอเมตรี

นอกจากนี้ ยังมีปริมาณอื่นๆ ที่สัมพันธ์กับอัตราส่วนสมมูล เช่น

$$\text{ร้อยละของอากาศที่สตอยคิโอเมตรี} = \frac{100\%}{\Phi}$$

$$\text{ร้อยละของอากาศเกิน หรือ \% Air Excess} = \frac{(1-\Phi)100\%}{\Phi}$$

# วิทยาศาสตร์การเผาไหม้

ตัวอย่าง ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซที่ทำงานที่ภาระเต็มที่ (Full load operation) ที่อัตราส่วนสมมูล  $\Phi = 0.286$  มีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ  $15.9 \text{ kg/s}$  โดยองค์ประกอบที่สมมูลของเชื้อเพลิงแสดงได้โดย  $C_{1.16}H_{4.32}$  (ก๊าซธรรมชาติ) จงหาอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง และอัตราส่วนของอากาศกับเชื้อเพลิงขณะที่เครื่องยนต์ดังกล่าวกำลังทำงาน

วิธีทำ จาก 
$$(A/F)_{stoich} = 4.76 \left( x + \frac{y}{4} \right) \cdot \frac{MW_{air}}{MW_{fuel}}$$

สำหรับเชื้อเพลิง  $C_{1.16}H_{4.32}$  จะได้  $x = 1.16, y = 4.32$

และ  $MW_{fuel} = (1.16 \times 12) + (4.32 \times 32) = 18.286 \text{ kg/kmol}$

แทนค่าลงไปจะได้  $(A/F)_{stoich} = 4.76 \left( 1.16 + \frac{4.32}{4} \right) \cdot \frac{28.85}{18.286} = 16.82$

# วิทยาศาสตร์การเผาไหม้

เนื่องจากอัตราส่วนสมมูล

$$\Phi = \frac{(A/F)_{\text{stoich}}}{(A/F)_{\text{actual}}}$$

เพราะฉะนั้น จะได้ว่า

$$(A/F)_{\text{actual}} = \frac{(A/F)_{\text{stoich}}}{\Phi} = \frac{16.82}{0.286} = 58.8$$

ตอบ

และเนื่องจาก

$$(A/F)_{\text{actual}} = \frac{\dot{m}_{\text{air}}}{\dot{m}_{\text{fuel}}}$$

จะได้

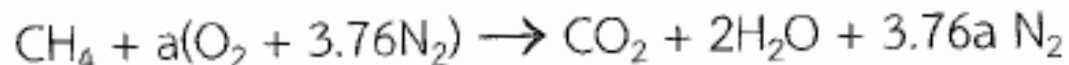
$$\dot{m}_{\text{fuel}} = \frac{\dot{m}_{\text{air}}}{(A/F)_{\text{actual}}} = \frac{15.9 \text{ kg/s}}{58.8} = 0.270 \text{ kg/s}$$

ตอบ

# วิทยาศาสตร์การเผาไหม้

**ตัวอย่าง** Boiler ที่ใช้ในอุตสาหกรรม ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ให้ก๊าซไอเสีย (Flue Gas) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของการเผาไหม้ ที่มีก๊าซออกซิเจนเป็นส่วนประกอบอยู่ 3% โดยโมล จงหาอัตราส่วนของอากาศและเชื้อเพลิง และอัตราส่วนสมมูล กำหนดให้ใช้สมบัติของก๊าซมีเทนแทนเชื้อเพลิง

**วิธีทำ** จากโจทย์กำหนดให้มี  $O_2(g)$  อยู่ในก๊าซไอเสีย 3% โดยโมล แสดงว่าใช้อากาศเกิน เราสามารถเขียนสมการเคมีได้เป็น



O-Atom Balance:  $2a = 2 + 2 + 2b \Rightarrow b = a - 2$



# วิทยาศาสตร์การเผาไหม้

เนื่องจาก  $O_2(g)$  อยู่ในก๊าซไอเสีย 3% โดยโมล ของของผสมในผลิตภัณฑ์

นั่นคือ

$$0.03 = \frac{N_{O_2}}{N_T} = \frac{a-2}{1+2+(a-2)+3.76a} = \frac{a-2}{4.76a+1}$$

แก้สมการได้

$$a = 2.368$$

เพราะฉะนั้น จะได้อัตราส่วนเชิงมวลของอากาศกับเชื้อเพลิงเป็น

$$(A/F)_{actual} = \frac{N_{air} \times MW_{air}}{N_{fuel} \times MW_{fuel}} = \frac{4.76 \times 2.368 \times 28.85}{1 \times 16.08} = 20.22$$

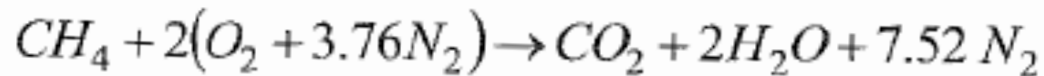
ตอบ

# วิทยาศาสตร์การเผาไหม้

และสำหรับอัตราส่วนสมมูล

$$\Phi = \frac{(A/F)_{stoich}}{(A/F)_{actual}}$$

จากสมการเคมีของการเผาไหม้ก๊าซมีเทนที่สตอยคิโอเมตริก



จะได้

$$(A/F)_{stoich} = \frac{N_{air} \times MW_{air}}{N_{fuel} \times MW_{fuel}} = \frac{4.76 \times 2 \times 28.85}{1 \times 16.08} = 17.08$$

เพราะฉะนั้น จะได้อัตราส่วนสมมูลของการเผาไหม้ดังกล่าวเป็น

$$\Phi = \frac{17.08}{20.22} = 0.84$$

# วิทยาศาสตร์การเผาไหม้

## พลังงานความร้อนของการเผาไหม้

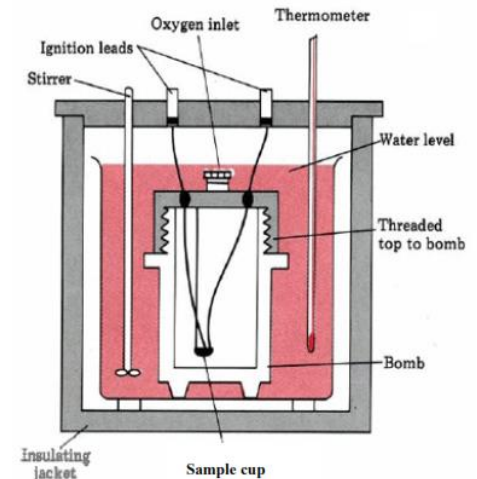
- ❑ ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction)
- ❑ คำนวนจากความร้อนของปฏิกิริยาที่สภาวะมาตรฐาน (Standard heat of reaction  $\Delta H_r^\circ$ )
- ❑ คำนวนจากความร้อนของการเกิด (ของสารใดๆ) ที่สภาวะมาตรฐาน (standard of formation  $\Delta H_f^\circ$ )
- ❑ ความร้อนของปฏิกิริยาที่สภาวะมาตรฐาน แสดงเป็นความร้อนของการเผาไหม้ที่สภาวะมาตรฐาน (standard heat of combustion  $\Delta H_c^\circ$ )
- ❑ ปฏิกิริยาคายความร้อน จึงมีค่าเป็นลบเสมอ ถ้ามีค่าบวก แสดงว่าสารนั้นไม่สามารถเผาไหม้ หรือถูกออกซิไดส์

# วิทยาศาสตร์การเผาไหม้

## ค่าความร้อน (heating value, potential energy)

- เนื่องจากเชื้อเพลิง ไม่ว่าจะเป็นน้ำมันและผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมเหลว หรือชีวมวล ไม่สามารถคำนวณจากความร้อนของปฏิกิริยาได้ จึงจำเป็นต้องทดลองโดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า บอมบ์ แคลอริมิเตอร์ (bomb calorimeter) สำหรับเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งและของเหลว
  - แคลอริมิเตอร์ที่มีน้ำไหลผ่าน (water flow calorimeter) สำหรับเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊ส
- 1) ความร้อนสูง (higher heating value, HHV) หรือค่าความร้อนทั้งหมด (gross heating value, GHV) ซึ่งรวมความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอน้ำด้วย
  - 2) ค่าความร้อนขั้นต่ำ (lower heating value, LHV)

$$\text{HHV} = \text{LHV} + n_{\text{H}_2\text{O}} \Delta H_{\text{vap}}^{25^\circ \text{C}}$$

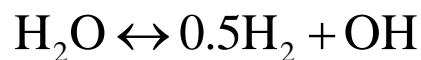


# วิทยาศาสตร์การเผาไหม้

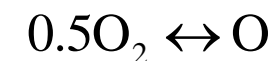
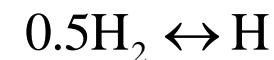
## อุณหภูมิเปลวไฟอะเดียเบติก (Adiabatic flame temperature)

แก๊สเผาไหม้ (flue gas) จะออกจากระบบด้วยกันทั้งหมดเป็นกระแสเดียวกัน อุณหภูมิของ flue gas ทั้งหมด จะสูงขึ้นเรียกว่า อุณหภูมิเปลวไฟ (Flame temperature) ถ้าปฏิกิริยาเผาไหม้กับออกซิเจน อากาศในปริมาณที่ต้องการตามทฤษฎีเกิดอย่างสมบูรณ์ และไม่มีการสูญเสียความร้อนออกจากระบบ อุณหภูมิของเปลวไฟสูงสุดอะเดียเบติก (Maximum adiabatic flame temperature) ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟที่เชื้อเพลิงชนิดหนึ่ง ๆ จะให้ได้

อุณหภูมิสูง



อุณหภูมิสูงยิ่งขึ้น



สูญเสียความร้อน



อุณหภูมิลดลง

แก๊ส	สูตร	ค่าความร้อนรวม บีทียู/ลูกบาศก์ฟุต,60 องศาฟาเรนไฮต์ ความดัน 30 นิ้วปรอท และอิ่มตัวด้วยไอน้ำ	อุณหภูมิเปลวไฟสูงสุด, องศาเซลเซียส เเผาไหม้กับอากาศแห้ง 25 องศาเซลเซียส		
			ตามทฤษฎีสมมติว่าการเผาไหม้สมบูรณ์	ตามการคำนวณให้เข้าสู่สภาวะสมดุล	ตามการทดลอง
Carbon monoxide	CO	316	2,342		
Hydrogen	H <sub>2</sub>	319	2,217		
Parafin:					
Methane	CH <sub>4</sub>	994	2,012	1,918	1,885
Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1,742	2,065	1,949	1,900
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2,479	2,356	1,967	1,930
n-Butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	3,215	2,084	1,973	1,905
Isobutane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	3,305			
n-Pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	3,949	2,087		
Isopentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	3,939			
Neopentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	3,924			
n-Hexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	4,680			
Olefins:					
Ethylene	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,576	2,250	2,072	1,980
Propylene	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	2,299	2,150	2,050	1,940
Butylene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	3,036	2,158	2,033	1,935
Isobutene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	3,015			
Amylene	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	3,770	2,204		
Aromatic:					
Benzene	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	3,687	2,211		
Toluene	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	4,409	2,187		
Xylene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	5,139			
Miscellaneous gases:					
Acetylene	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1,451	2,586		
Nahthalene	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	5,753			
Methyl alcohol	CH <sub>3</sub> OH	853			
Ethyl alcohol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	1,573			
Ammonia	NH <sub>3</sub>	434			
Hydrogen sulfide	H <sub>2</sub> S	636			

# หลักการกำหนดผลการเผาไหม้

## การวิเคราะห์เชื้อเพลิง

- สำหรับประเทศไทย ใช้มาตรฐานสหรัฐอเมริกาของ American Standard for Test and Materials (ASTM)
- สถาบันปิโตรเลียม (The Institute of Petroleum, IP)
- ของสหราชอาณาจักร (The British Standard, BS)
- ภายในประเทศโดยอ้างอิงมาตรฐานขององค์การมาตรฐานสากล (ISO) ที่ประเทศไทยเป็นสมาชิกมาตรฐานของประเทศใช้อักษรย่อว่า สมอ.



ระบบมาตรฐาน มอก.



# หลักการคำนวณการเผาไหม้

## แก๊สเชื้อเพลิง

แก๊สเชื้อเพลิงโดยทั่วไปไม่ว่าจะเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมหรือจากแหล่งเชื้อเพลิงอื่น เป็นแก๊สผสมระหว่างองค์ประกอบที่เป็นแก๊สเชื้อเพลิงและที่เป็นแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน และสารเฉื่อย เช่น น้ำ

- ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)
- ค่าความร้อน (heating value)
- การวิเคราะห์องค์ประกอบ (gas composition)



# หลักการคำนวณการเผาไหม้

## ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะของแก๊สเป็นอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของแก๊สนั้นกับของ **แก๊สอ้างอิงซึ่งคืออากาศ** ความหนาแน่นของของเหลวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดันมีผลน้อยมาก แต่ความหนาแน่นของแก๊สขึ้นอยู่กับทั้งอุณหภูมิ และความดัน จึงจำเป็นต้องระบุให้ชัดเจนดังนี้

$$sp - gr_{\text{gas}} = \frac{\rho_{\text{fuel}} @ 1 \text{ atm } 15.56^\circ \text{ C } (60^\circ \text{ F})}{\rho_{\text{air}} @ 1 \text{ atm } 15.56^\circ \text{ C } (60^\circ \text{ F})}$$

ถ้าถือว่าแก๊สประพฤติตัวเป็นแก๊สอุดมคติ (Ideal gas)

$$sp - gr_{\text{gas}} = \frac{\left[ \left( \frac{MW}{R} \right) \left( \frac{P}{T} \right) \right]_{\text{gas}}}{\left[ \left( \frac{MW}{R} \right) \left( \frac{P}{T} \right) \right]_{\text{air}}} = \frac{MW_{\text{gas}}}{MW_{\text{air}}}$$

# หลักการคำนวณการเผาไหม้

---

## ตัวอย่างที่ 1

The specific gravity of gaseous fuel is expressed as the density, or specific weight, of the fuel at 15.56 °C and 1 atm to that of air at 15.56 °C and 1 atm. For these conditions, determine

- 1) The density of methane,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{kg/m}^3$
- 2) The density of propane  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{kg/m}^3$
- 3) The specific gravity of methane.
- 4) The specific gravity of propane.

# หลักการคำนวณการเผาไหม้

## Solution

Basis: 1 m<sup>3</sup> of gas at 15.56°C, 1 atm

1. Density:

$$P = \rho \left( \frac{R}{MW} \right) T, \quad \rho = \left( \frac{MW}{R} \right) \frac{P}{T}$$

CH<sub>4</sub>:

$$a) \quad \rho = \frac{(16 \text{ kg/kg mol}) (101 \text{ kN/m}^2)}{(8.314 \text{ kN m/kg mol K}) (288.56 \text{ K})} = 6.736 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3 \quad \times \quad 0.6736 \text{ kg/m}^3$$

C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>:

$$b) \quad \rho = \frac{(44) (101)}{(8.314) (288.56)} = 1.852 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3 \quad \times \quad 1.852 \text{ kg/m}^3$$

2. Specific gravity of gases:

$$sp \text{ gr} \langle 15.56^\circ\text{C} \rangle = \frac{\rho_{\text{gas}} \langle 15.56^\circ\text{C}, 1 \text{ atm} \rangle}{\rho_{\text{air}} \langle 15.56^\circ\text{C}, 1 \text{ atm} \rangle} = \frac{MW_{\text{gas}}}{MW_{\text{air}}}$$

$$\rho_{\text{air}} = \frac{(28.97) (101)}{(8.314) (288.56)} = 1.22 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3 \quad \times \quad 1.22 \text{ kg/m}^3$$

$$c) \quad sp \text{ gr}_{\text{CH}_4} = \frac{6.736 \times 10^{-4}}{1.220 \times 10^{-3}} = \frac{16}{28.97} = 0.552$$

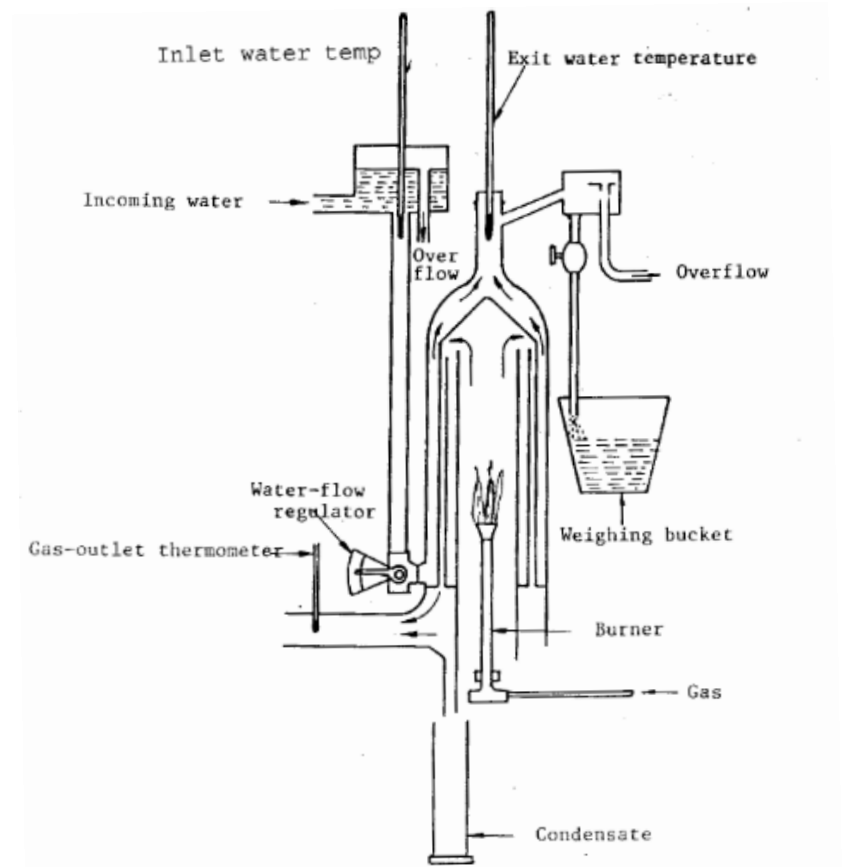
$$d) \quad sp \text{ gr}_{\text{C}_3\text{H}_8} = \frac{1.852 \times 10^{-3}}{1.220 \times 10^{-3}} = \frac{44}{28.97} = 1.519$$

Components in Dry Air	Volume Ratio compared to Dry Air	Molecular Mass - <i>M</i> (kg/kmol)	Molecular Mass in Air
Oxygen	0.2095	32.00	6.704
Nitrogen	0.7809	28.02	21.88
Carbon Dioxide	0.0003	44.01	0.013
Hydrogen	0.0000005	2.02	0
Argon	0.00933	39.94	0.373
Neon	0.000018	20.18	0
Helium	0.000005	4.00	0
Krypton	0.000001	83.8	0
Xenon	0.09 10 <sup>-6</sup>	131.29	0
Total Molecular Mass of Air			28.97

# หลักการคำนวณการเผาไหม้

## ค่าความร้อน

- ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงแสดงเป็นหน่วยความร้อนต่อปริมาตรหรือต่อโมล
- หน่วยที่นิยมใช้ได้แก่ หน่วยเดิมในระบบอังกฤษ คือ บีทียู/ลูกบาศก์ฟุต ( $\text{Btu}/\text{ft}^3$ )
- หน่วยในระบบ SI คือ กิโลแคลอรี หรือ เมกะจูล/ลูกบาศก์เมตร ( $\text{kcal}/\text{m}^3$  หรือ  $\text{MJ}/\text{m}^3$ )
- ต้องอ้างอิงอุณหภูมิและแรงดันเสมอ



# หลักการคำนวณการเผาไหม้

## การวิเคราะห์องค์ประกอบ

<https://www.youtube.com/watch?v=0m8bWKHmRMM>  
<https://www.youtube.com/watch?v=q0pM-k0SvOQ>

- ผลการวิเคราะห์มาใช้ในการคำนวณเกี่ยวกับการเผาไหม้ องค์ประกอบหลักที่สำคัญที่วิเคราะห์โดยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟ หรือวิธีอื่น ได้แก่ ไฮโดรคาร์บอนต่างๆ ไฮโดรเจน เป็นต้น นอกจากนี้มีองค์ประกอบเจือปนอยู่น้อย ได้แก่ ความชื้น ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น

$$\text{HHV}_{\text{gas\_mixture}} = \sum x_i \text{HHV}_i$$

$\text{HHV}_{\text{gas\_mixture}}$

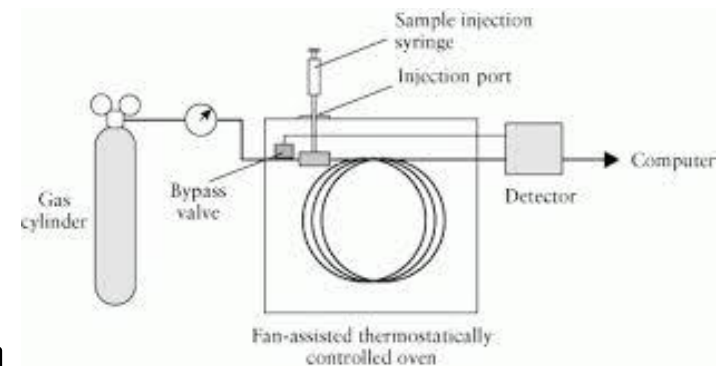
คือ ค่าความร้อนสูงของแก๊สเชื้อเพลิง

$x_i$

คือ เศษส่วนของโมลขององค์ประกอบ  $i$  ในเชื้อเพลิง

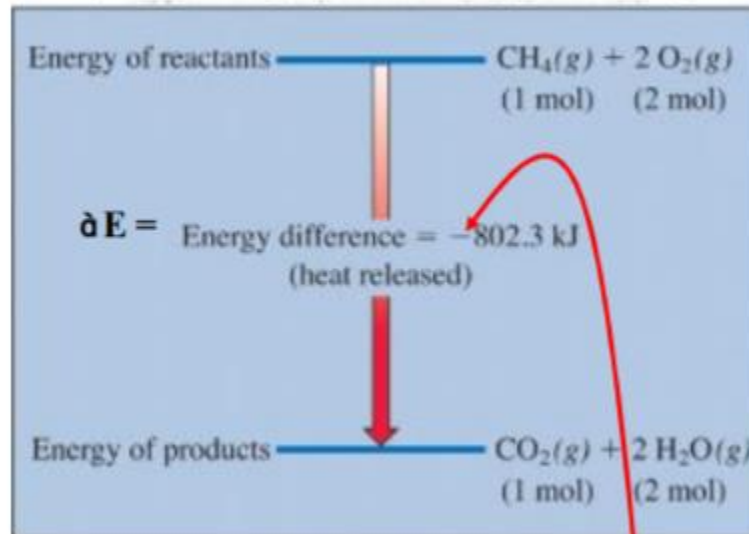
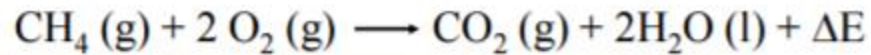
$\text{HHV}_i$

คือ ค่าความร้อนสูงขององค์ประกอบ  $i$  ในเชื้อเพลิง



# หลักการคำนวณการเผาไหม้

คำนวณจากความร้อนของการเกิดของผลผลิตและตัวทำปฏิกิริยา



**Exothermic  
reaction**

The products are lower in energy than the reactants.  
Exothermic reaction:  $\Delta\text{E}$  is a negative value.

# หลักการคำนวณการเผาไหม้

---

## คำนวณจากความร้อนของการเกิดของผลผลิตและตัวทำปฏิกิริยา

A natural gas has a volumetric analysis of 95% CH<sub>4</sub>, 3% C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, and 2% CO<sub>2</sub>, for conditions of 14.7 psia and 77°F, calculate

- 1) The higher heating value of the fuel, Btu/ft<sup>3</sup> of gas
- 2) The lower heating value of the fuel, Btu/ft<sup>3</sup> of gas

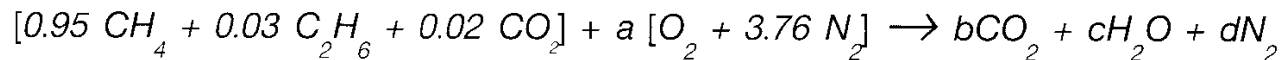
Note: 1 (cal / g) mol = 0.004184 (kJ / g) mol

# หลักการคำนวณการเผาไหม้

## Solution

Basis : 1 g mol natural gas

1. Stoichiometric equation:



Carbon atom balance:

$$0.95 + 0.06 + 0.02 = b = 1.03$$

Hydrogen atom balance:

$$(4)(0.95) + (6)(0.03) = 2c$$

$$c = 1.99$$

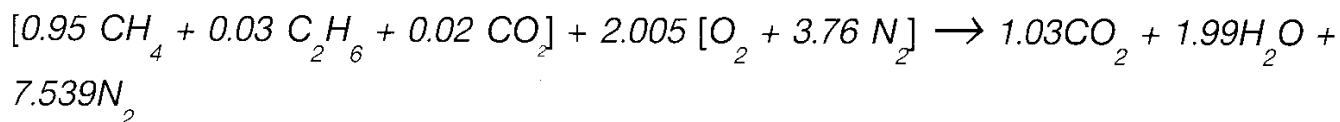
Oxygen atom balance:

$$(2)(0.02) + 2a = (2)(1.03) + 1.99$$

$$a = 2.005$$

Nitrogen atom balance:

$$d = 3.76a = (3.76)(2.005) = 7.539$$





# หลักการคำนวณการเผาไหม้

## Solution

2. Energy balance:

$$Q = \sum_{i=\text{prod}} N_i [\Delta H_f^\circ]_i - \sum_{i=\text{react}} N_i [\Delta H_f^\circ]_i$$

$$\text{or } Q = 1.03[\Delta H_f^\circ]_{\text{CO}_2} + 1.99[\Delta H_f^\circ]_{\text{H}_2\text{O}_l} - 0.095[\Delta H_f^\circ]_{\text{CH}_4} - 0.03[\Delta H_f^\circ]_{\text{C}_2\text{H}_6} - 0.02[\Delta H_f^\circ]_{\text{CO}_2}$$

Recall that the higher heating value assumes water in the products is a liquid.

From Appendix D (ภาคผนวก ง)

$$\begin{aligned}\Delta H_c^\circ &= [(1.03)(-94,054) + 1.99(-68,317)] - [0.95(-17,889) + 0.03(-20,236) + 0.02(-94,054)] \\ &= -213,340 \text{ cal/g mol}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{HHV} &= 213,340 \text{ cal/g mol} \\ &= (213,340 \text{ cal/g mol}) \left( 1,800 \frac{\text{Btu/lb mol}}{\text{cal/g mol}} \right) \\ &= 384.033 \text{ Btu/lb mol}\end{aligned}$$

# หลักการคำนวณการเผาไหม้

## Solution

3. Density

$$\rho = \frac{P}{RT} = \frac{(14.7 \text{ lbf/in}^2)(144 \text{ in}^2/\text{ft}^2)}{(1,545 \text{ ft lbf/lb mol } ^\circ\text{R})(537^\circ\text{R})} = 0.00255 \frac{\text{lbmol}}{\text{ft}^3}$$

4. Higher heating value, water as liquid in product:

$$HHV = (384.033 \text{ Btu/lbmol})(0.00255 \text{ lb mol / ft}^3)$$

$$\text{a) } HHV = 980 \text{ Btu/ft}^3$$

5. Lower heating value, water as vapor in product:

$$LHV = HHV - 1.99 h_{fg} (68^\circ\text{F})$$

$$LHV = + 384.033 \text{ Btu/lb mole fuel}$$

$$- \left( \frac{1.99 \text{ lb mole H}_2\text{O}}{\text{lb mole fuel}} \right) \left( 1,054 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm H}_2\text{O}} \right) \left( \frac{18 \text{ lbm}}{\text{lb mole H}_2\text{O}} \right)$$

$$= 346.279 \text{ Btu/lb mole}$$

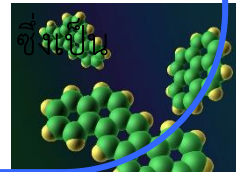
$$\text{b) } LHV = (346,279)(0.00255) = 880 \text{ Btu/ft}^3$$

# หลักการคำนวณการเผาไหม้

## เชื้อเพลิงเหลว

ส่วนผสมของไฮโดรคาร์บอน 4 กลุ่ม คือ พาราฟิน (parafin) โอลิฟิน (Olefin) แนปทีน (Naphthenes) และ อะโรมาติก (aromatic)

- **พาราฟิน** เป็นองค์ประกอบหลักที่พบทั้งในน้ำมันปิโตรเลียมและแก๊สธรรมชาติ ลักษณะสำคัญของไฮโดรคาร์บอนกลุ่มนี้คือ มีอัตราส่วนระหว่าง **H/C สูงที่สุด** ค่าความร้อนต่อมวลสูงที่สุด **ค่าความร้อนต่อปริมาตรต่ำสุด** ความหนาแน่นต่ำที่สุด **เผาไหม้สะอาด** เสถียรต่อการเก็บ
- **โอลิฟิน** พบน้อยในแหล่งธรรมชาติเนื่องจากไม่เสถียร แต่ได้จากหน่วยปฏิบัติการในกระบวนการกลั่นเพื่อทำให้น้ำมันพาราฟินหนักแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal cracking) เพื่อให้ได้ไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเล็กลง ลักษณะสำคัญของไฮโดรคาร์บอนกลุ่มนี้คือ อัตราส่วนระหว่าง H/C น้อยกว่ากลุ่มพาราฟิน **เผาไหม้สะอาดปานกลาง ไม่เสถียรทั้งขณะเกิดปฏิกิริยาและต่อการเก็บ** เกิดกากหรือยางเหนียวเมื่อสัมผัสกับออกซิเจน
- **แนปทีน** พบน้อยในแหล่งธรรมชาติ **มีสมบัติคล้ายโอลิฟินแต่มีความเสถียรมากกว่า** เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นวงแหวนอิมิตัว
- **อะโรมาติก** ไฮโดรคาร์บอนกลุ่มนี้มีลักษณะเฉพาะตัวเนื่องจาก **วงแหวนเบนซินเสถียรมาก** ทำให้มีสมบัติเฉพาะหลายประการ คือ โครงสร้างโมเลกุลกะทัดรัด เสถียรต่อการเก็บ **เผาไหม้ให้ควันมาก** ความหนาแน่นสูง ค่าความร้อนต่อปริมาตรสูงที่สุด ค่าความร้อนต่อมวลต่ำสุด แต่มี Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs สารก่อมะเร็ง



# หลักการคำนวณการเผาไหม้

สมบัติพื้นฐานและรายการที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณการเผาไหม้ ดุลมวลและพลังงานเท่านั้น ได้แก่

- ความถ่วงจำเพาะ เอ พี ไอ (API specific gravity)
- เส้นโค้งการกลั่น มาตรฐาน ASTM (ASTM distillation curve)
- จุดวาบไฟ (flash point)
- จุดหยุดไหลและจุดขุ่น (pour point and cloud point)
- ค่าความร้อน
- การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ
- สิ่งเจือปน (ash, water and sediment)

# หลักการคำนวณการเผาไหม้

## ค่าความถ่วงจำเพาะ เอ พี ไอ

The American Petroleum Institute

$$\text{API\_gravity} = \frac{141.5}{\text{sp gr} \left( \frac{60^\circ\text{F}}{60^\circ\text{F}} \right)} - 131.5$$

sp gr เป็นค่าความถ่วงจำเพาะเปรียบเทียบความหนาแน่นของน้ำมันกับน้ำ  
วัดอุณหภูมิ 60 °F (15.8 °C)

$$\text{API}^\circ(60) = [0.002(60 - \text{bserved}^\circ\text{F}) + 1][\text{observed API}]$$

น้ำมันที่มีความหนาแน่นสูงจะมีค่าความถ่วงจำเพาะ เอ พี ไอ ต่ำ และอาจมีค่าติดลบได้  
น้ำมันส่วนใหญ่มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำ จะมีค่าความถ่วงจำเพาะ เอ พี ไอ สูง

- **Light crude oil**

Any crude oil with API gravity of over 31.1 degrees falls into the light crude oil category.

- **Medium crude oil**

Oils with API gravity falling between 22.3 and 31.1 degrees are classed as medium crude oils.

- **Heavy crude oil**

Heavy crude oils have API gravity of under 22.3.

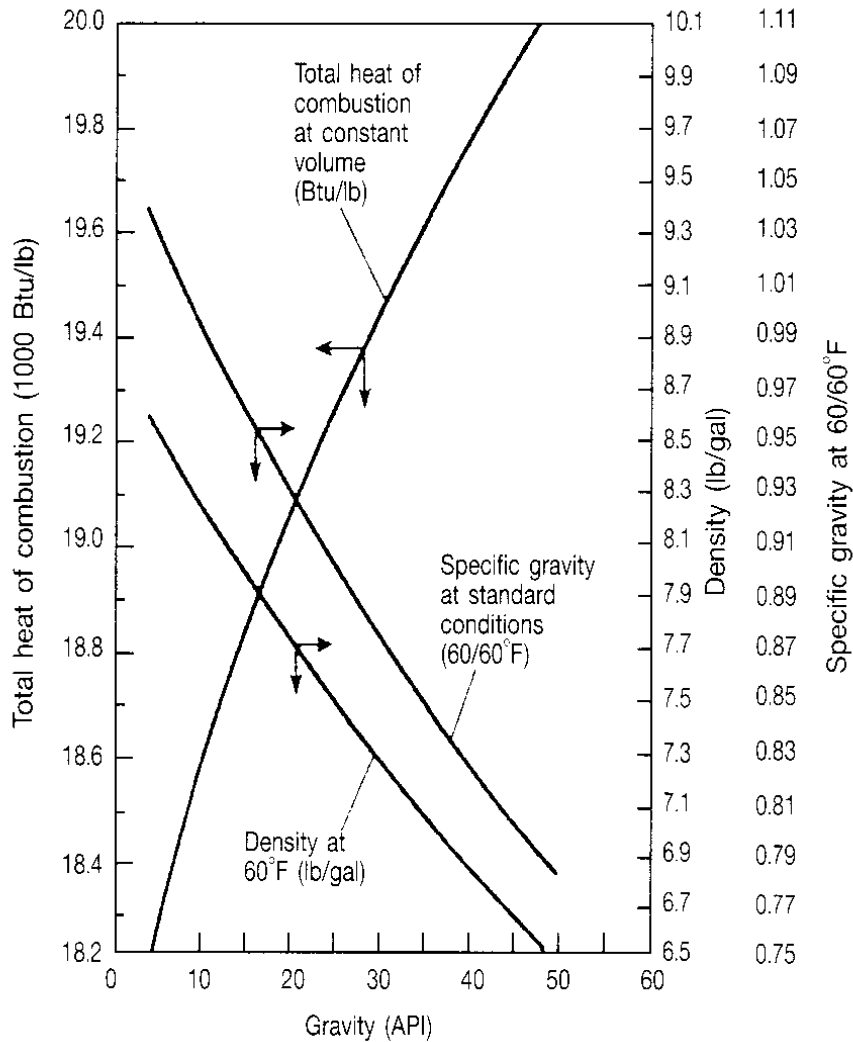
- **Extra heavy oil**

Extra heavy oils have API < 10.0

API gravity values of most petroleum liquids fall between 10 and 70 degrees.

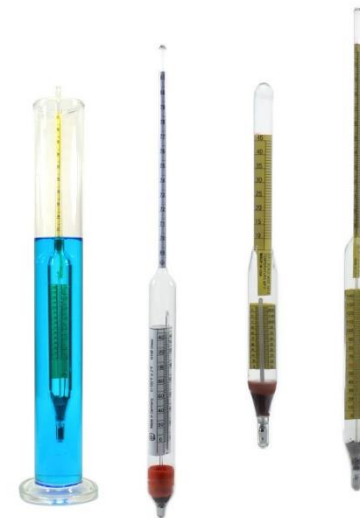


# หลักการคำนวณการเผาไหม้



เนื่องจากวัดค่า API ได้ง่าย (Hydrometer)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนและค่าถ่วงจำเพาะ API

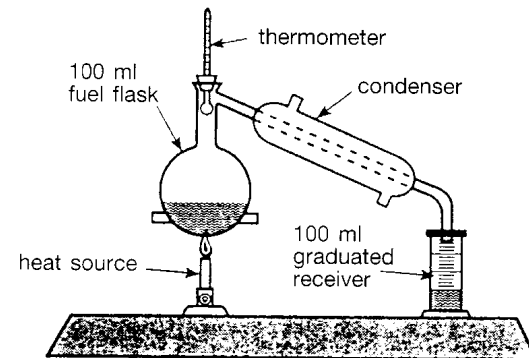
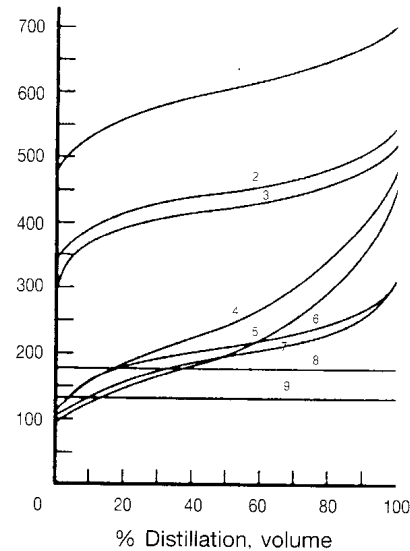


# หลักการคำนวณการเผาไหม้

## เส้นโค้งการกลั่น มาตรฐาน ASTM

ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ซึ่งเป็นสารผสมไฮโดรคาร์บอนหลายชนิดที่มีจุดเดือดแตกต่างกัน เมื่อนำมากลั่น เริ่มได้ของเหลวควบแน่นออกมาเป็นหยดแรก ที่อุณหภูมิจุดเดือดต่ำที่สุด จากนั้นขณะที่การกลั่นดำเนินไป อุณหภูมิจะเริ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจากจุดที่เริ่มได้ของเหลวหยดแรกจนถึงของเหลวหยดสุดท้าย

นำความสัมพันธ์ระหว่างจุดเดือด และร้อยละโดยปริมาตรที่กลั่นได้มาสร้างกราฟ จะได้เส้นโค้งเรียกว่าเส้นโค้งการกลั่น



“ความสามารถในการระเหย”



# หลักการคำนวณการเผาไหม้

## จุดวาบไฟ (Flash point)

เป็นอีกค่าหนึ่งที่บ่งชี้ถึงความสามารถในการระเหยเป็นไอของผลิตภัณฑ์น้ำมันปิโตรเลียมทดสอบได้สองวิธี โดยใช้ภาชนะปิดหรือเปิด เช่น Pensky - Marsten closed cup หรือ Cleveland open cup โดยให้ความร้อนแก่ภาชนะที่บรรจุตัวอย่าง ตามปริมาตรและสภาวะมาตรฐาน

**จุดวาบไฟ** คือ อุณหภูมิที่ต่ำที่สุด ที่สามารถทำให้เชื้อเพลิงคายไอออกมาผสมกับอากาศในอัตราส่วน ที่เหมาะสมถึงจุดที่มีค่าต่ำสุดถึงค่าสูงสุดของไอเชื้อเพลิง เมื่อมีประกายไฟก็จะเกิดการติดไฟ เป็นไฟวาบขึ้นและดับ

[https://www.youtube.com/watch?v=w\\_nVhkvPEpl](https://www.youtube.com/watch?v=w_nVhkvPEpl)

<https://www.youtube.com/watch?v=bZ5TOecenyc>



# หลักการคำนวณการเผาไหม้

## จุดหยุดไหลและจุดขุ่น

สมบัติทั้งสองนี้เกี่ยวข้องกับปริมาณไข (wax) ที่มีในน้ำมัน โดยเฉพาะน้ำมันหนัก เช่นน้ำมันเตา

- จุดหยุดไหลหมายถึง อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิที่น้ำมันเริ่มหยุดไหล 3 องศาเซลเซียส เมื่อทำให้เย็นตามสถานะและเครื่องมือมาตรฐาน ซึ่งสัมพันธ์กับการที่ไขเกิดเป็นผลึกใหญ่ขึ้นจำนวนมากและเริ่มแยกออกจากน้ำมัน
- จุดขุ่น หมายถึง อุณหภูมิที่เริ่มมองเห็นน้ำมันเป็นหมอกจางๆ (haze) เมื่อทำให้น้ำมันเย็นลงตามสถานะและเครื่องมือมาตรฐานเช่นเดียวกัน นั่นคือเกิดผลึกของไขขนาดเล็กมาก แฉวนลอยอยู่ทั่วในน้ำมัน จุดหยุดไหลจะอยู่สูงกว่าจุดขุ่นหลายองศา

<https://www.youtube.com/watch?v=dO5gq-WPlqg>

<https://www.youtube.com/watch?v=6pCNB4OjpYg&ebc=ANyPxKoAK-ia0oyvUyXE9ggvkpDM6lcljEEO75RiFQMygYcFfyCi0hvOMXpYv1OwmIER9ApToZCOk7pB9lqeKVtl2ooWNh2nsw&nohtml5=False>

# หลักการคำนวณการเผาไหม้

## ค่าความร้อน

สามารถวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเหลวโดยวิธีบอมบ์ แคลอริมิเตอร์ เช่นเดียวกับเชื้อเพลิงแข็ง ซึ่งรวมร้อยละการวิเคราะห์ของกำมะถันด้วย สำหรับน้ำมันเตายังสามารถประมาณค่าความร้อนได้จาก ความหนาแน่น (แปลงจากความถ่วงจำเพาะ เอ พี ไอ) ร้อยละน้ำ เถ้า และกำมะถันโดยใช้สูตรของดulong (Dulong's formula) ดังนี้

$$\text{LHV} = (46.428 - 8.792\rho_L^2 + 3.170\rho_L)(1 - \chi - y - s) + 9.4205 - 2.449\chi$$

เมื่อ	LHV	คือ ค่าความร้อนต่ำ เมกกะจูลต่อกิโลกรัม
	$\rho_L$	เป็นความหนาแน่น หน่วยเป็น กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
	$\chi$	เป็นเศษส่วนโดยมวลของน้ำ
	$y$	เป็นเศษส่วนโดยมวลของเถ้า
	$s$	เป็นเศษส่วนโดยมวลของกำมะถัน

# หลักการคำนวณการเผาไหม้

## การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

ในการคำนวณการเผาไหม้ จำเป็นต้องทราบการวิเคราะห์แบบแยกธาตุเพื่อทำการดุลมวล และดุลพลังงาน ตลอดจนหาประสิทธิภาพการเผาไหม้ หรือประสิทธิภาพของระบบ ธาตุที่สำคัญ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน

$$\text{HHV} = 0.339(\%C) + 1.256(\%H - \%O / 8) + 0.105(\%S), \quad \text{MJ / kg}$$

คือ ค่าความร้อนขั้นสูง เมกะจูลต่อกิโลกรัม

%C %H %O และ %S เป็นร้อยละโดยมวลของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และกำมะถัน ตามลำดับ

<https://www.youtube.com/watch?v=Y6-rk6L0SEU&nohtml5=False>

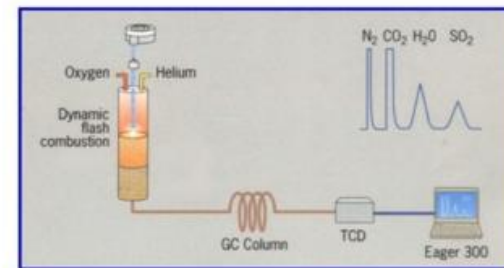
# หลักการคำนวณการเผาไหม้

## การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

### CHNS Determination

The result of the combustion is a mixture of gas composed of  $N_yO_x$  products,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $SO_2$  and possible excess of oxygen. This gas mixture passes through the reduction catalyst that eliminates any excess of oxygen and converts  $N_yO_x$  products into  $N_2$ . Gases carried forward by the helium flow are separated in a GC column located in the temperature-stable oven and detected by the highly sensitive Thermal Conductivity Detector (TCD).

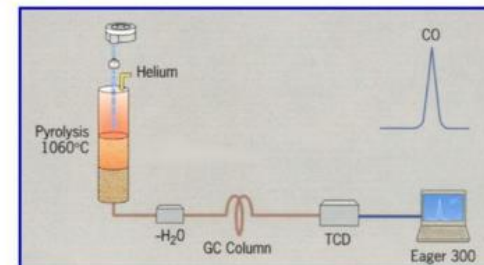
### CHNS Determination



### Oxygen Determination

Oxygen is determined by dynamic pyrolysis. Pyrolysis occurs in a quartz reactor at temperatures just under  $1060^\circ C$ . In this case silver capsules are used instead of tin. The sample, when dropped into the pyrolysis reactor, is converted into CO and hydrocarbons that flow through the catalytic at set conditions. Interfering gases are trapped and the gas stream of  $H_2$ ,  $N_2$ , and  $CO_2$  enters the GC column to be separated and detected by the TCD for oxygen determination ( $CO_2$ ).

### Oxygen Determination



$$O = 100 - (\%C + \%H + \%N + \%S + \%ash + \%moisture)$$

# หลักการคำนวณการเผาไหม้

## สิ่งเจือปน

สิ่งเจือปน ได้แก่ น้ำ และเถ้า หรือตะกอนที่เจือปนอยู่ในผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม โดยเฉพาะน้ำมันหนัก เช่น น้ำมันดีเซล น้ำมันเตา การวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่มีอยู่น้อยในน้ำมัน กระทำโดยสกัดน้ำออกด้วยตัวทำละลายแล้วกลั่นแยก ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณเถ้า กระทำโดยเผาตัวอย่างจนถูกออกซิไดส์ สมบูรณ์

# หลักการคำนวณการเผาไหม้

## ตัวอย่างที่ 3.3

The specific gravity of #2 diesel fuel measured at 60°F is found to be 32.5 API. For conditions of 75 °F, calculate

- (a) the specific gravity, API;                      (b) the density of the fuel, lbm/ft<sup>3</sup>;  
(c) the higher heating value of the fuel using Appendix E; and  
(d) the heating value using Figure 3.3

Solution:

1. Specific gravity, Equation (3.36):

$$API \langle 60 \rangle = 32.5$$

$$\text{a) } API \langle 75 \rangle = \frac{32.5}{[0.002(60-75)+1]} = 33.5$$

# หลักการคำนวณการเผาไหม้

2. Density, from Appendix E (ภาคผนวก จ), 33.5 API = 0.8576:

$$\rho_{fuel} \langle 75^{\circ}F \rangle = SG \times \rho_{H_2O} \langle 75^{\circ}F \rangle$$

From Appendix C (ภาคผนวก ค Steam Table)  $\rho_{H_2O} \langle 75^{\circ}F \rangle = 62.266 \text{ lbm/ft}^3$

b)  $\rho_{fuel} = (0.8576)(62.266) = 53.399 \text{ lbm/ft}^3$

3. HHV - from Appendix E (ภาคผนวก จ) and by interpolation

c)  $HHV = 19,520 + 0.5(40) = 19,540 \text{ Btu/lbm}$

4. HHV, Figure 3.3:

$API = 33.5$

d)  $HHV = 19,530 \text{ Btu/lbm}$



# หลักการคำนวณการเผาไหม้

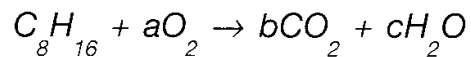
## ตัวอย่างที่ 3.4

Gasoline can be represented by the formula  $C_8H_{16}$ . Determine,

- AF (air : fuel) ratio and FA (fuel : air) ratio for the stoichiometric combustion of gasoline and air on a molar basis;
- repeat a on a mass basis; and
- calculate the gravimetric and mole fractions for the stoichiometric reactants of gasoline and air.

Solution:

- Stoichiometric reaction:

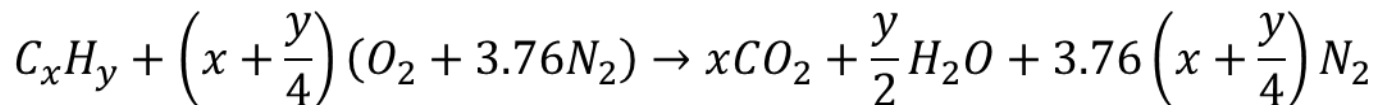


Carbon atom balance:  $b = 8$

Hydrogen atom balance:  $2c = 16$        $c = 8$

Oxygen atom balance:  $2a = 16 + 8$        $a = 12$

Or



# หลักการคำนวณการเผาไหม้

3. Mass AF ratio:

$$\text{b. AF} = \frac{(12)(4.76 \text{ moles air})(28.97 \text{ lbm / lb mol air})}{(1.0)(96+16) \text{ lbm fuel}} = 14.775$$

$$\text{FA} = (14.775)^{-1} = 0.0677$$

4. Fuel-air mole fraction analysis:

$$\begin{aligned} \text{c. } \bar{\chi}_{\text{C}_8\text{H}_{16}} &= \frac{1}{1.0+(12)(4.76)} = 0.0172 \text{ or } 1.72\% \\ \bar{\chi}_{\text{O}_2} &= \frac{12}{58.12} = 0.2065 \text{ or } 20.65\% \\ \bar{\chi}_{\text{N}_2} &= \frac{(12)(3.76)}{58.12} = 0.7763 \text{ or } 77.63\% \end{aligned}$$

# หลักการคำนวณการเผาไหม้

3. Fuel-air gravimetric analysis:

	$\bar{x}_i$	$MW_i$	$\bar{x}_i MW_i$	$mf_i$
$C_8H_{16}$	0.0175	112.0	1.9264	0.0636
$O_2$	0.2065	32.0	6.6080	0.2183
$N_2$	0.7763	28.0	21.7364	0.7181
Total	1.0000			1.0000
	$\frac{lb\ mol_i}{lb\ mol_{tot}}$	$\frac{lbm_i}{lb\ mol_i}$	$\frac{lbm_i}{lb\ mol_{tot}}$	$\frac{lbm_i}{lb\ mol_{tot}}$

$$MW = \sum \bar{x}_i MW_i = 30.271\ lbm/lb\ mol$$

# หลักการคำนวณการเผาไหม้

## เชื้อเพลิงแข็ง

เชื้อเพลิงแข็งที่มีความสำคัญที่สุดในอุตสาหกรรมคือ ถ่านหิน การวิเคราะห์ถ่านหินตลอดจนเชื้อเพลิงแข็งอื่นๆ ยากมากที่สุดในอุตสาหกรรม เพราะ มีองค์ประกอบทางเคมีที่ซับซ้อน ทั้งที่เป็นสารอินทรีย์ (ส่วนที่เป็นเชื้อเพลิง) และส่วนสารที่เป็นอนินทรีย์ (ส่วนที่เป็นสารเจือปนและความชื้น)

## การวิเคราะห์แบบประมาณ

เป็นการวิเคราะห์ที่กลุ่มองค์ประกอบในถ่านหินออกเป็น

- ความชื้น
- เถ้า
- สารระเหย
- คาร์บอนคงตัว

# หลักการคำนวณการเผาไหม้

## ความชื้น (Moisture, M)

เป็นน้ำหนักที่สูญหายไปหลังจากการอบถ่านหินบดละเอียดผ่านตะแกรง **ขนาด 250 ไมโครเมตร** ภายใต้สภาวะที่กำหนดอุณหภูมิ **104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชม.** น้ำส่วนที่เป็นความชื้น (inherent moisture) จะระเหยออกมา ส่วนน้ำที่เป็นส่วนประกอบทั้งอินทรีย์และอินทรีย์ (Coherent moisture) ยังคงอยู่ในถ่านหิน

เถ้า (Ash, A) เป็นน้ำหนักที่ยังคงอยู่หลังจากการเผาถ่านหินบดละเอียดผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร ภายใต้สภาวะออกซิไดส์ที่กำหนดที่อุณหภูมิ 700-750 องศาเซลเซียส เถ้า คือ ส่วนประกอบอินทรีย์ที่มีอยู่เดิมในถ่านหินที่ถูกออกซิไดส์จนสมบูรณ์

$$\% \text{mineral matter} = 1.08 (\% \text{ash}) + 0.55 (\% \text{S})$$

**Inerts**

# หลักการคำนวณการเผาไหม้

## สารระเหย (Volatile matter, VM)

เป็นน้ำหนักที่สูญหายไป (หักความชื้นออกแล้ว) หลังจากการอบถ่านหินบดละเอียดผ่านตะแกรง ขนาด 250 ไมโครเมตร ภายใต้สภาวะที่กำหนดที่อุณหภูมิ  $950 \pm 20$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที โดยไม่ให้สัมผัสกับอากาศเพื่อกลั่นสลายถ่านหินให้ส่วนที่ระเหยออกมาได้

## คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon, FC)

เป็นส่วนที่เสถียรของโครงสร้างโมเลกุลของถ่านหินประกอบด้วยคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ แต่ไม่ทั้งหมด ได้จากคำนวณผลต่าง คือ

$$\%FC = 100 - (\%M + \%A + \%VM)$$

**Combustibles**

# หลักการคำนวณการเผาไหม้

ค่าความร้อน (Heating value)

วัดโดยใช้วิธีบอมบ์ แคลอริมิเตอร์

$$\text{HHV} = 8,050C + 33,900H_a + 3,080S$$

Ultimate parameters

HHV	= ค่าความร้อนสูง (kcal/kg)
C	= เศษส่วนโดยมวลของคาร์บอน
Ha	= เศษส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนที่มีอยู่ (Ha = H - O/8)
S	= เศษส่วนโดยมวลของกำมะถัน

$$\text{HHV} = 71.38FC_{db} + 58.40VM_{db}$$

Proximate parameters

HHV	= ค่าความร้อนสูง (kcal/kg)
FC <sub>db</sub>	= ร้อยละคาร์บอนคงตัว ถ่านหินแห้ง
VM <sub>db</sub>	= ร้อยละสารละลาย ถ่านหินแห้ง

# หลักการคำนวณการเผาไหม้

The ultimate analysis of a coal as fired is reported to be as listed below.

As-fired constituent	Percentage	As-fired constituent	Percentage
C	72.8 % w/w	H <sub>2</sub> O	3.5 % w/w
H <sub>2</sub>	4.8 % w/w	S	2.2 % w/w
O <sub>2</sub>	6.2 % w/w	Ash	9.0 % w/w
N <sub>2</sub>	1.5 % w/w		

Calculate

- mole fraction of components, ashless basis:
- the higher heating value of the coal using DuLong's formula, kJ/kg fuel.



# หลักการคำนวณการเผาไหม้

**Basis** 1 kg fuel

Solution:

1. Mole fraction fuel sample, ashless

	$mf_i$	$MW_i$	$mf_i/MW_i$	$x_i$
C	0.8000	12.0	0.06667	0.6760
H	0.0527	2.0	0.02635	0.2672
O <sub>2</sub>	0.0681	32.0	0.002128	0.02158
N <sub>2</sub>	0.0165	28.0	0.000589	0.005972
H <sub>2</sub> O	0.0385	18.0	0.002139	0.02169
S	0.0242	32.0	0.000756	0.007665
	$\frac{kg_i}{kg_{tot}}$	$\frac{kg_i}{kg_{mol}}$	$\frac{kg_{mol_i}}{kg_{tot}}$	$\frac{kg_{mol_i}}{kg_{mol_{tot}}}$

# หลักการคำนวณการเผาไหม้

Where, for example, for carbon

$$mf_i = \frac{72.8}{100-9.0} = 0.8000 \quad \text{ashless}$$

$$\begin{aligned} \sum \left( \frac{mf}{MW} \right)_i &= 0.06667 + 0.02635 + 0.002128 + 0.000589 + 0.002139 + 0.000756 \\ &= 0.09863 \text{ kgmol/kg} \end{aligned}$$

$$\bar{x}_i = \frac{0.06667 \text{ kg mol}_i/\text{kg}_{\text{tot}}}{0.09863 \text{ kg mol}_{\text{tot}}/\text{kg}_{\text{tot}}} = 0.6760 \frac{\text{kg mol}_i}{\text{kg mol}_{\text{tot}}}$$

2. DuLong's formula: (สมการที่ 3.4)

$$HHV = 8,050C + 33,900 \left[ H - \frac{O}{8} \right] + 3,080S$$

$$\begin{aligned} \text{or } HHV &= 8,050 (0.728) + 33,900 [0.048 - (0.062/8)] + 3,080 (0.0222) \\ &= 7,285 \text{ kcal/kg} \\ &= 30,480 \text{ kJ/kg coal} \end{aligned}$$

# กระบวนการเผาไหม้

จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ สามารถหามวลหรือปริมาณสารตั้งต้น และสารผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ได้โดยใช้มวลสารสัมพันธ์ (stoichiometry) ของปฏิกิริยา

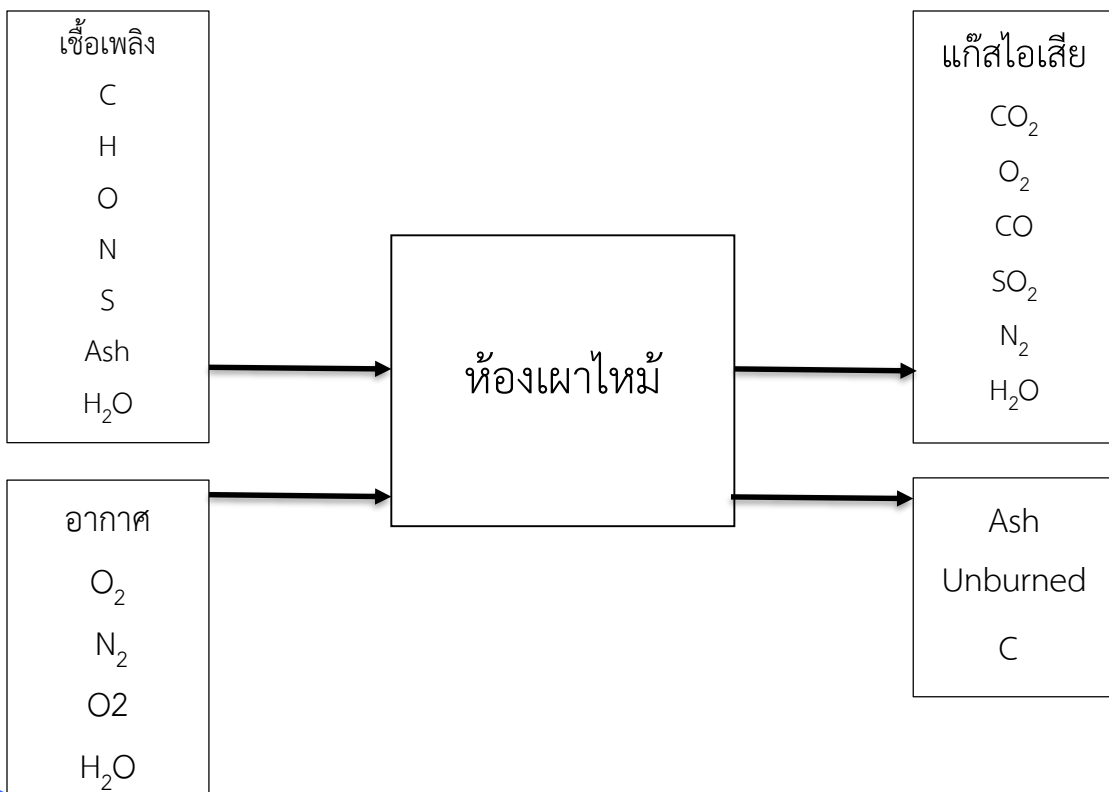


ในทางปฏิบัติการเผาไหม้ในอุตสาหกรรม หรือการใช้งานทั่วไปต้องการการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ด้วยเหตุผลหลายประการ คือ ต้องการประหยัดเชื้อเพลิง ต้องการความร้อนสูงสุดในการเผาไหม้ และไม่ต้องทำให้เกิดมลพิษที่เกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น จึงต้องใช้สภาวะที่อำนวยความสะดวกการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ให้สมบูรณ์มากที่สุด สภาวะอันหนึ่งคือ การใช้ปริมาณอากาศเกินพอ (Excess air) เพื่อให้โมเลกุลของเชื้อเพลิงหรือโมเลกุลที่มาจากการแตกตัวของเชื้อเพลิงมีโอกาสพบกับโมเลกุลของออกซิเจนมากขึ้น จากมวลสารสัมพันธ์ เมื่อทราบปริมาณอากาศที่ต้องการตามทฤษฎี แล้วสามารถคำนวณปริมาณอากาศเกินพอทันที

# กระบวนการเผาไหม้

## สมดุลมวลและสมดุลพลังงาน

มวลที่เข้า = มวลที่ออก + มวลที่สะสมอยู่ภายใน (สูญหายจากระบบ)



กระบวนการเผาไหม้ มีกระแสเข้า (Input stream) สองกระแส คือ เชื้อเพลิง และอากาศ และมีกระแสออก (Output stream) สองกระแส คือ แก๊สผลผลิตจากการเผาไหม้ หรือ ฟลูแก๊ส (Flue gas) และกากของแข็งหรือเถ้า (Cinder, ash) เฉพาะเมื่อใช้เชื้อเพลิงแข็งที่มีเถ้าเป็นองค์ประกอบ

# กระบวนการเผาไหม้

โดยทั่วไป มักทราบข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณ และการวิเคราะห์เชื้อเพลิง แต่ไม่ทราบปริมาณอากาศ และมักมีข้อมูลการวิเคราะห์แก๊สผลผลิตโดยการวัดด้วยเครื่องมือ เรียกว่า เครื่องวิเคราะห์ออร์ซาท ซึ่งสามารถวิเคราะห์แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ออกซิเจน และแก๊สไนโตรเจน (เป็นผลต่างจาก 100)

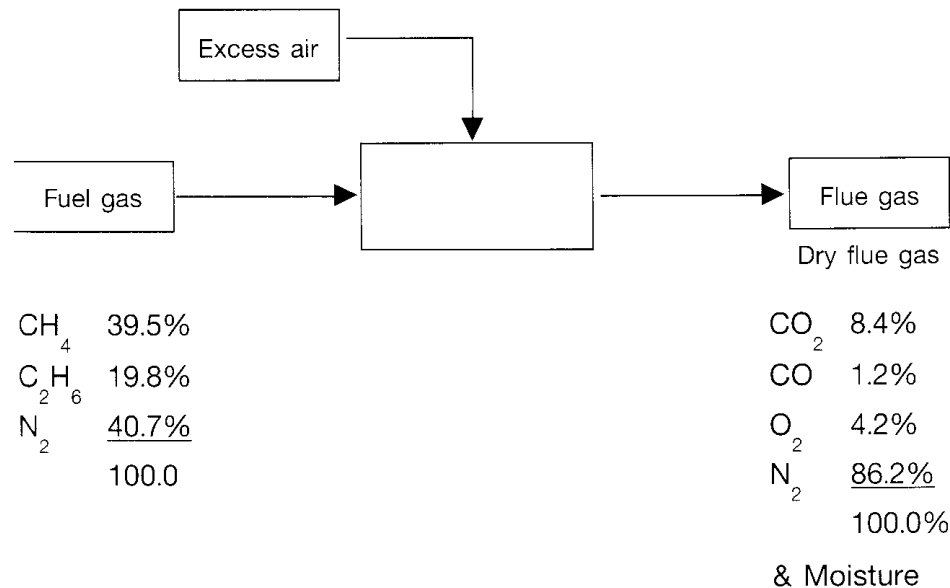


<https://www.youtube.com/watch?v=2cBtPN-aAkQ>

# กระบวนการเผาไหม้

A gaseous fuel consists of 39.5% methane, 19.8% ethane and 40.7%  $N_2$  is burned with excess air. The Orsat analysis of the flue gas is 8.4%  $CO_2$ , 1.2%  $CO$ , 4.2%  $O_2$  and rest  $N_2$ .

- Calculate the % excess air used.
- If the air enters with 60% relative humidity, show the complete material balance of the combustion based on 100 kg mole of gas.



# กระบวนการเผาไหม้

**Basis** 100 kgmoles of fuel gas

$$\text{kg. fuel} = (39.5) (16) + (19.8) (30) + (40.7) (28) = 2,365.6 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} \text{Total carbon in fuel} &= 39.5 + (2) (19.8) \\ &= 79.1 \text{ kg mol} \end{aligned}$$

$$\text{Total carbon in 100 moles dry flue gas} = 8.4 + 1.2 = 9.6 \text{ kg mol}$$

$$\begin{aligned} \text{Carbon atom balance: moles dry flue gas/100 kg mol fuel} &= (79.1) \left( \frac{100}{9.6} \right) \\ &= 823.96 \text{ kg mols} \end{aligned}$$

<i>i</i>	<i>kg moles</i>	<i>MW<sub>i</sub></i>	<i>kg</i>
CO <sub>2</sub>	69.21	44	3,045.2
CO	9.89	28	276.9
O <sub>2</sub>	34.61	32	1,107.5
N <sub>2</sub>	710.25	28.2	20,029.1
Total	823.96		24,458.7

# กระบวนการเผาไหม้

$$\begin{aligned} \text{N}_2 \text{ balance: kg moles N}_2 \text{ in excess air} &= 710.25 - 40.70 \text{ kg mol} \\ &= 669.55 \text{ kg mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{kg moles air in} &= 669.55 \left( \frac{100}{79} \right) \\ &= 847.53 \text{ kg mol} \\ &= 24,578.4 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\text{kg moles O}_2 \text{ in excess air} = 177.98 \text{ kg mol}$$

$$\text{kg moles O}_2 \text{ excess} = 34.61 - 0.5 (9.89) = 29.66 \text{ kg mol}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ excess} &= \frac{29.66}{177.98 - 29.66} \times 100 \\ &= 20.0 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{a) At 60\% RH; H}_2\text{O in excess air} &= (0.0212) (847.53) \\ &= 17.97 \text{ kg mol} = 323.5 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{O}_2 \text{ balance: O}_2 \text{ as H}_2\text{O} &= \text{O}_2 \text{ in} - \text{O}_2 \text{ in dry flue gas} \\ &= 177.98 - (69.21 + 4.95 + 34.61) \\ &= 69.21 \text{ kg mol} \end{aligned}$$



# กระบวนการเผาไหม้

$$\begin{aligned} \text{Therefore; H}_2\text{O} &= 138.42 \text{ kg mol} \\ \text{Total H}_2\text{O in flue gas} &= 138.42 + 17.97 = 156.39 \text{ kg mol} \\ &= 2,815.0 \text{ kg} \end{aligned}$$

Overall material balance

In	kg	Out	kg
fuel	2,365.6	dry flue gas	24,458.7
dry air	24,578.4	H <sub>2</sub> O	2,815.0
H <sub>2</sub> O	<u>323.5</u>		
Total	<u>27,267.5</u>	Total	<u>27,273.7</u>

# กระบวนการเผาไหม้

## ดุลพลังงาน (Energy balance)

พลังงานที่เพิ่มเข้าไป หรือดึงออกจากระบบ = พลังงานของกระแสเข้า-พลังงานของกระแสออก  
การเผาไหม้ส่วนใหญ่ในเตาเผา ไม่มีงาน ( $W = 0$ ) และไม่มีการสูญเสียความร้อน ( $Q = 0$ )

$$0 = \text{พลังงานของกระแสเข้า} - \text{พลังงานของกระแสออก}$$

จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ความร้อนออกมา ความร้อนของปฏิกิริยาการเผาไหม้ เป็นความร้อนที่เกิดขึ้นภายในระบบ

$$(\text{เอนทัลปีของกระแสเข้า} + \text{ความร้อนของปฏิกิริยาการเผาไหม้}) = \text{เอนทัลปีของกระแสออก}$$

$$\sum \Delta H_p = \sum \Delta H_R - \Delta H_{\text{reaction}, T_{\text{ref}}}$$

$$\sum \Delta H_p = \sum n_i \int C_{p_i} dT - \sum n_i \Delta H_{\text{tran}}$$

# กระบวนการเผาไหม้

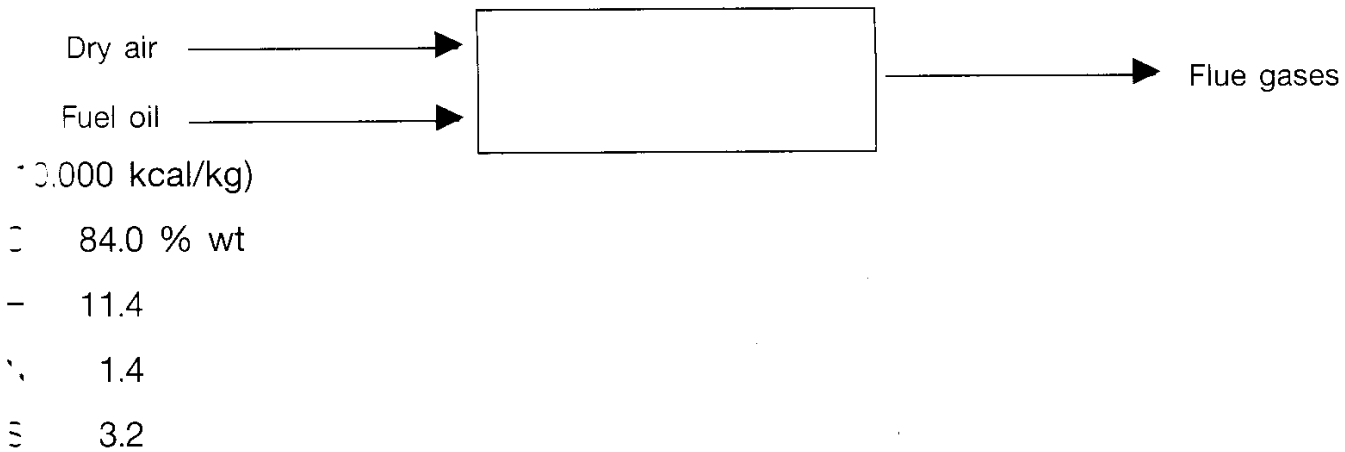
## ตัวอย่างที่ 3.7

A heavy fuel oil which analyses (in wt.%) C 84%, H 11.4%, N 1.4%, and S 3.2% is burned with dry air

- calculate the theoretical air in moles required to burn 100 kg of the oil,
- under a given set of conditions, the stack gas obtained by burning this oil with air is found to contain 3,500 ppm of  $\text{SO}_2$  on a dry basis. (1 ppm =  $10^{-6}$  kg per 1 kg) Calculate the % excess air which was used.
- under the conditions of b), this fuel oil is fired in a boiler to produce saturated steam at 150 psi. If all flue gases leave at  $300^\circ\text{C}$  and assuming 5% heat loss by radiation, determine the kg of steam produced per 100 kg of fuel oil

- Given
- 1) Dry air, fuel and feed water enter the boiler at  $25^\circ\text{C}$
  - 2) Heating value of fuel oil is  $10^4$  kcal/kg.
  - 3) Combustion is complete
  - 4) Average molecular weight of dry flue gas = 30.3

# กระบวนการเผาไหม้



**Basis** 100 kg oil

	kg	M.W	kg	moles	kg moles O <sub>2</sub> required	kg moles products			
						CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
C	84.0	12	7.00	7.00	7.00	-	-	-	
H	11.4	2	5.70	2.85	-	5.70	-	-	
N	1.4	28	0.05	-	-	-	-	0.05	
S	3.2	32	0.10	0.10	-	-	0.10	-	
Total	100.0				9.95	7.00	5.70	0.10	0.05

# กระบวนการเผาไหม้

$$\begin{aligned}
 \text{a. Theoretical air required} &= (9.95) \left( \frac{100}{21} \right) \\
 &= 4.738 \text{ kg mol} \\
 \text{c. In a given set of conditions; SO}_2 \text{ concentration} &= 3,500 \text{ ppm} \\
 &= 3.5 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{kg dry flue gas}} \\
 \text{Let } \chi &= \frac{\% \text{ excess air}}{100} \\
 \text{O}_2 \text{ in} &= (0.21) (1 + \chi) \text{ kg mol} \\
 \text{N}_2 \text{ in} &= (0.79) (1 + \chi) \text{ kg mol} \\
 \text{Total dry flue gas} &= \text{moles of } (\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2) \\
 &= 7.00 + 0.10 + 9.95 \chi + 37.43 (1 + \chi)
 \end{aligned}$$

# กระบวนการเผาไหม้

(neglecting  $N_2$  in fuel)

$$\begin{aligned} &= 44.53 + 47.38 \times \text{kg moles} \\ &= (44.53 + 47.38 \times) (30.3) \text{ kg} \\ \text{kg SO}_2 \text{ formed} &= (0.1) (64) = 6.4 \\ \therefore 3.5 \times 10^{-3} &= \frac{6.4}{(44.53+47.38 \times)(30.3)} \\ \chi &= 0.334 \\ \therefore \% \text{ excess air} &= 33.4 \end{aligned}$$

# กระบวนการเผาไหม้

b) อีกวิธีหนึ่ง

$$\frac{3500}{10^6} = \frac{0.35}{10^2 \text{ kg flue gas}}$$

$$\therefore \text{dry SO}_2 \text{ - free} = 100 - 0.35 = 99.65 \text{ kg}$$

$$\therefore \text{SO}_2 \text{ 6.4 kg in} = 6.4 \left( \frac{99.65}{0.35} \right) = 1,822.2 \text{ kg flue gas}$$

Dry SO<sub>2</sub> - free (0 % excess air)

	kg moles	MW	kg
CO <sub>2</sub>	7.00	44	308.0
O <sub>2</sub>	0.00	32	0.0
N <sub>2</sub>	37.43	28.2	1,055.5
Total			1,363.5

# กระบวนการเผาไหม้

---

$$\therefore \text{The difference is due to excess air} = 1,822.2 - 1,363.5$$

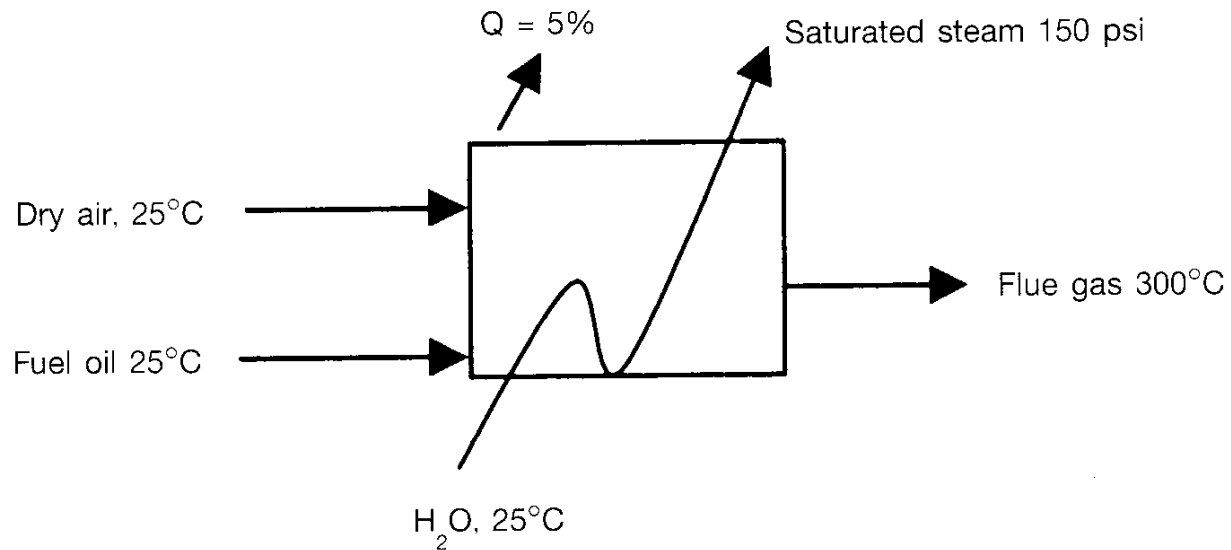
$$= 458.7 \text{ kg}$$

$$= \frac{458.7}{28.97} = 15.83 \text{ kg mol}$$

$$\therefore \% \text{ excess air} = \frac{15.83}{47.38} \times 100 = 33.4\%$$



# กระบวนการเผาไหม้



Energy balance: reference state; 25°C, water (liquid)

IN

- |                          |   |                   |      |             |
|--------------------------|---|-------------------|------|-------------|
| 1. HV. of fuel oil       | = | $100 \times 10^4$ | =    | $10^6$ kcal |
| 2. $H_{\text{fuel oil}}$ | = | 0                 |      |             |
| 3. $H_{\text{air}}$      | = | 0                 |      |             |
| Total                    | = | $10^6$            | kcal |             |

# กระบวนการเผาไหม้

OUT Combustion is complete

1)  $H_{\text{dry flue gases}}$

	kg moles	$C_{P_{\text{mean.}}} 300^{\circ}\text{C}$	$nC_{P_{\text{mean}}}$
$\text{CO}_2$	7.0	10.11	70.77
$\text{SO}_2$	0.1	10.62	1.06
$\text{O}_2$	3.32	7.29	24.20
$\text{N}_2$	49.93	7.04	351.50
Total	60.35		447.50

$$\therefore H_{\text{dfg}} = (447.53) (300-25) = 1.2307 \times 10^5 \text{ kcal}$$

# กระบวนการเผาไหม้

2)  $H_{H_2O \text{ in fg}}$

From Steam Table and by interpolation: [http://www2.spiraxsarco.com/esc/SH\\_Properties.aspx](http://www2.spiraxsarco.com/esc/SH_Properties.aspx)

$H_{\text{sup steam}}$  at 14.7 psia, 572 °F = 1,319.7 Btu/lb

$$H_{H_2O} = (5.70) (18) \left[ \left( \frac{1,319.7 - 45}{1.8} \right) \right] = 0.7266 \times 10^5 \text{ kcal}$$

3) Heat loss = (0.05) (10<sup>6</sup>) = 0.5 × 10<sup>5</sup> kcal

4) Heat utilized in producing steam = IN - OUT  
 = 10<sup>6</sup> - [(1.2307 + 0.7266 + 0.5) × 10<sup>5</sup>]  
 = 7.5427 × 10<sup>5</sup> kcal

From Steam Table;  $H_{\text{satd steam.}}$  (150+14.7) psia = 1,195.9 Btu/lb

∴ Heat required to produce 1 kg steam =  $\left[ \frac{(1,195.9) - 45}{1.8} \right] = 639.4 \text{ kcal}$

∴ kg steam produced/100 kg fuel ail. =  $\frac{7.5427 \times 10^5}{639.4}$

= 1,179.7 kg

# กระบวนการเผาไหม้

ประสิทธิภาพทางความร้อน (Thermal efficiency)

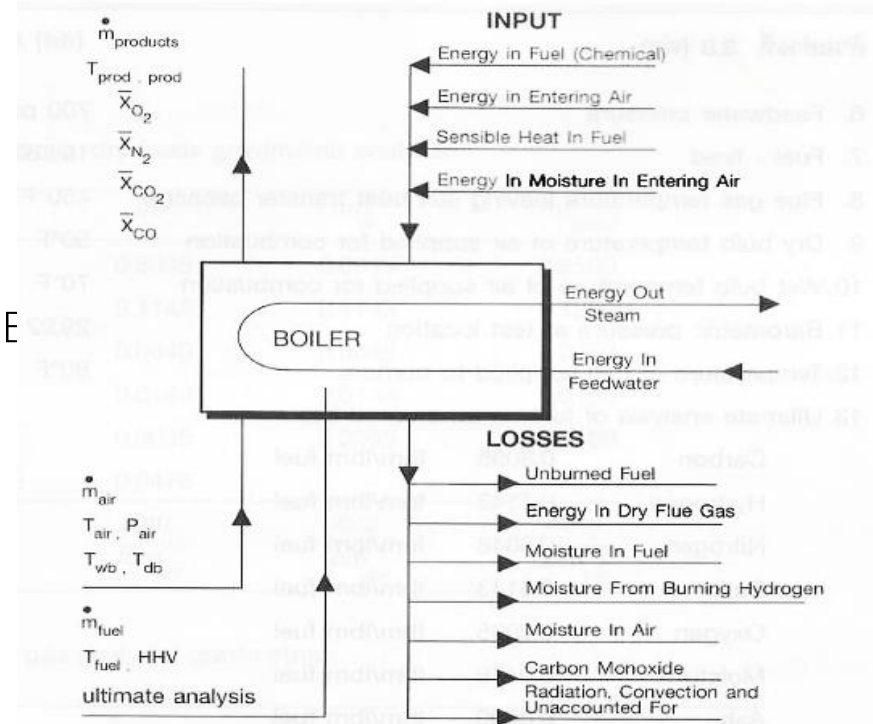
อัตราส่วนระหว่างปริมาณความร้อนที่นำไปใช้กับปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง (ค่าความร้อน)

$$\eta = \frac{\text{ความร้อนที่นำไปใช้} \times 100}{\text{ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง}}$$

การทำดุลพลังงานของหม้อไอน้ำ ตามมาตรฐาน ASME

$$\text{OUTPUT} = \text{INPUT} - \text{LOSSES}$$

$$\text{EFFICIENCY} = \frac{\text{OUTPUT}}{\text{INPUT}} = \frac{Q_b}{\text{HHV}}$$



# กระบวนการเผาไหม้

## Example

The following data were obtained during a standard boiler test:

1. Duration of test	1 hr
2. Steam delivered by boiler	200,000 lbm
3. Average steam temperature at superheater outlet	760 °F
4. Average steam pressure at superheater outlet	600 psia
5. Feedwater temperature	240 °F
6. Feedwater pressure	700 psia
7. Fuel fired	15,385 lbm
8. Flue gas temperature leaving last heat transfer passage	450 °F
9. Dry bulb temperature of air supplied for combustion	80 °F
10. Wet bulb temperature of air supplied for combustion	70 °F
11. Barometric pressure at test location	29.92 in Hg
12. Temperature of fuel supplied to burners	80 °F

# กระบวนการเผาไหม้

13. Ultimate analysis of fuel on an as-fired basis:

Carbon	0.8095	lbm/lbm fuel
Hydrogen	0.1143	lbm/lbm fuel
Nitrogen	0.0048	lbm/lbm fuel
Sulfur	0.0143	lbm/lbm fuel
Oxygen	0.0095	lbm/lbm fuel
Moisture	0.0476	lbm/lbm fuel
Ash	<u>0.0000</u>	lbm/lbm fuel
	1.0000	

14. Volume analysis of flue gases in percent (Orsat):

CO <sub>2</sub>	=	11.34%	O <sub>2</sub>	=	5.06%
CO	=	0.71%	N <sub>2</sub>	=	<u>82.89%</u>
					100%

15. Higher heating value of fuel is 19,500 Btu/lbm dry fuel.

Calculate an energy balance for the tested boiler.