

## บทที่ 2

### ทฤษฎีการเผาไหม้

การเผาขยะมูลฝอยในเตา เป็นการเผามูลฝอยทั้งส่วนที่เป็น ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยผลสุดท้าย จากการเผามูลฝอยจะได้ แก๊สไอเสีย (flue gas) และเศษจากการเผาไหม้ (residue) การเผาที่มีประสิทธิภาพดี จะต้องไม่เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดและควบคุม แก๊สไอเสียเพราะแก๊สไอเสียประกอบด้วยอนุภาค (particulate) และแก๊สเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ ส่วนเศษจากการเผาไหม้ในเตาเผา คือ ขี้เถ้า และเศษมูลฝอยที่เผาไหม้ไม่หมด ในการสร้างเตาเผามูลฝอยต้องคำนึงถึง

1. วัตถุประสงค์ของการสร้างเตาเผา
  - 1.1 เพื่อกำจัดมูลฝอยเท่านั้น
  - 1.2 สร้างเตาเผามูลฝอยเพื่อศึกษาข้อมูลต่างๆ
2. ทฤษฎีการเผาไหม้
3. คุณสมบัติของมูลฝอย
4. ลักษณะและส่วนประกอบของเตาเผา
5. อัตราการป้อนมูลฝอย หรือปริมาณที่จะเผาในหนึ่งชั่วโมง
6. สถานที่ติดตั้ง
7. ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการก่อสร้าง

### ทฤษฎีการเผาไหม้

การเผาไหม้ คือการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่าง เชื้อเพลิง (เช่น น้ำมัน กระดาษ ไม้ ฯลฯ) กับออกซิเจน แล้วปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมา และได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ เขม่า แก๊สพิษที่เกิดจากกำมะถัน คือ กำมะถันออกไซด์ ( $SO_x$ ) ถ้าเชื้อเพลิงมีองค์ประกอบของกำมะถันปนอยู่ด้วย และแก๊สพิษที่เกิดจากไนโตรเจน คือ ไนโตรเจนออกไซด์ ( $NO_x$ ) ถ้าเชื้อเพลิงมีสารประกอบของไนโตรเจนอยู่ จำนวนไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้มีค่าน้อยมาก ดังนั้นการคำนวณเกี่ยวกับการเผาไหม้ อาจคิดได้ว่าไนโตรเจน ไม่ทำปฏิกิริยาใดๆกับออกซิเจนในระหว่างการเผาไหม้ มวลของธาตุแต่ละชนิดจะมีค่าคงที่ และการเผาไหม้แทนได้ด้วยสมการทางเคมี ดังนั้นในการแก้ ปัญหาการเผาไหม้จะต้องใช้กฎการอนุรักษ์ มวลของสารแต่ละชนิด

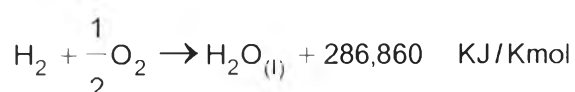
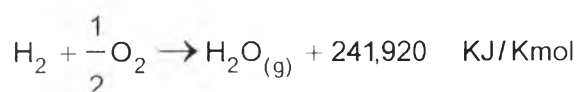
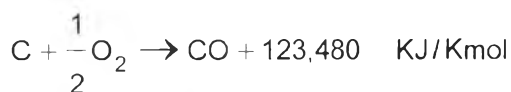
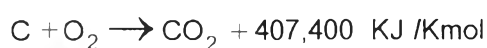
## เชื้อเพลิง

เชื้อเพลิง หมายถึง วัสดุ สาร หรือแก๊สใดๆที่สามารถเผาไหม้ แล้วปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมา เชื้อเพลิงที่พบบันมากประกอบด้วย ไฮโดรเจน และคาร์บอนเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ เชื้อเพลิงมีสถานะต่าง ๆ กันได้แก่

- 1 เชื้อเพลิงแข็ง ได้แก่ ฟืน ถ่านหิน ถ่านโค้ก ลิกไนต์ ชานอ้อย เป็นต้น
- 2 เชื้อเพลิงเหลว ได้แก่ น้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล น้ำมันเตา น้ำมันก๊าด เป็นต้น
- 3 เชื้อเพลิงแก๊ส ได้แก่ แก๊สธรรมชาติ แก๊สหุงต้มหรือ LPG เป็นต้น

## สมการเคมีพื้นฐานของการสันดาป

เมื่อเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบของไฮโดรเจน และคาร์บอน ทำปฏิกิริยาเคมีกับออกซิเจนแล้ว ไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงจะรวมตัวกับออกซิเจนกลายเป็นไอน้ำ ส่วนคาร์บอนจะรวมตัวกับออกซิเจนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และถ้าเชื้อเพลิงมีองค์ประกอบของซัลเฟอร์อยู่ด้วย ซัลเฟอร์จะรวมตัวกับออกซิเจนกลายเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ [5]



จากสมการข้างบนถ้าการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะได้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ หรือถ้าการเผาไหม้ไม่หมด (มีเขม่าควันดำ) จะมีคาร์บอนหลงเหลืออยู่ ความร้อนที่เกิดขึ้นจะน้อยกว่ากรณีที่คาร์บอนถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ นั่นคือ ได้คาร์บอนไดออกไซด์อย่างเดียว เพราะฉะนั้นในขบวนการเผาไหม้ควรที่จะมีจำนวนออกซิเจนเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแล้วให้น้ำที่เป็นของเหลวออกมาเรียกว่า ค่าความร้อนสูง (high or gross heating value) ส่วนความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแล้วให้น้ำที่เป็นไอออกมาเรียกว่า ค่าความร้อนต่ำ (low or net heating value)

## อากาศสำหรับการเผาไหม้

ในการเผาไหม้จำเป็นต้องใช้ออกซิเจนที่เพียงพอ เพื่อที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ โดยคาร์บอนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงจะถูกเผาไหม้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนจะถูกเผาไหม้กลายเป็นน้ำ และซัลเฟอร์จะถูกเผาไหม้กลายเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในความเป็นจริงเราจะไม่ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ (ราคาแพง) ในการเผาไหม้แต่จะใช้ออกซิเจนที่มีอยู่ในอากาศรอบๆตัวเรามาช่วยในการเผาไหม้ ดังนั้นแก๊สไอเสียที่ออกจากเตาเผาจึงมีองค์ประกอบของไนโตรเจนที่มีในอากาศออกมาในรูปออกไซด์ของไนโตรเจนปนออกมากับน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ความร้อน ออกไซด์ของซัลเฟอร์ ฯลฯ

อากาศเป็นสสารที่มีอยู่ทั่วไปและเป็นอิสระ อากาศประกอบด้วยแก๊สออกซิเจน 21% แก๊สไนโตรเจน 79% โดยโมเลกุล ดังนั้น 1 โมเลกุลของออกซิเจนที่เข้าไปในการเผาไหม้จะมีไนโตรเจนเข้าไป 3.76 โมเลกุล นั่นคือ



เพื่อง่ายแก่การคิด โดยสมมติว่าไนโตรเจนที่มีในอากาศที่เผาไหม้ประพฤติตัวเป็นแก๊สเฉื่อย โดยไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน

ตาราง 2.1 แสดงองค์ประกอบของแก๊สออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจนโดยปริมาตรและโดยมวล

องค์ประกอบ	%ขององค์ประกอบโดยปริมาตร	%ขององค์ประกอบโดยมวล
O <sub>2</sub>	21	23
N <sub>2</sub>	79	77
O <sub>2</sub> / N <sub>2</sub>	1:3.76	1:3.35

พารามิเตอร์ 2 ตัวที่มักพบกันบ่อยเพื่อแสดงจำนวนเชื้อเพลิงและอากาศในการเผาไหม้ในเตาเผาคือ อัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง และส่วนกลับ คืออัตราส่วนของเชื้อเพลิงต่ออากาศ อัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง เป็นอัตราส่วนของจำนวนอากาศที่ใช้ในปฏิกิริยาการเผาไหม้ ต่อจำนวนเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ อัตราส่วนนี้ถ้าเขียนให้อยู่ในรูปฐานมวลก็จะได้ว่าคือ มวลของอากาศหารด้วยมวลของเชื้อเพลิง

โดย

AF = อัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ **ฐานมวล**

$$AF = \frac{\text{มวลอากาศ}}{\text{มวลเชื้อเพลิง}} = \frac{(\text{โมเลกุลของอากาศ})(\text{น้ำหนักโมเลกุลของอากาศ})}{(\text{โมเลกุลของเชื้อเพลิง})(\text{น้ำหนักโมเลกุลของเชื้อเพลิง})}$$

ในการคำนวณเกี่ยวกับการเผาไหม้ ให้ใช้น้ำหนักโมเลกุลของอากาศเป็น 28.97 จำนวนอากาศที่น้อยที่สุดที่ให้ออกซิเจนเพียงพอต่อการเผาไหม้คาร์บอน ไฮโดรเจน และซัลเฟอร์ที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงให้สมบูรณ์เรียกว่า จำนวนอากาศทางทฤษฎี (theoretical amount of air) ส่วนอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักอากาศทางทฤษฎีกับน้ำหนักเชื้อเพลิง เรียกว่า stoichiometric ratio

ในความเป็นจริงเป็นการยากที่จะเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ โดยการป้อนอากาศในปริมาณทางทฤษฎี เพราะออกซิเจนจะไม่สามารถทำปฏิกิริยากับธาตุเหล่านั้น ทั้งหมด (คาร์บอน ไฮโดรเจน ซัลเฟอร์) ได้ทั่วถึงหรือเต็มที จึงมีออกซิเจนจำนวนหนึ่งเหลือออกไปกับแก๊สไอเสียที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์เช่น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นต้นดังนั้นจึงต้องใช้อากาศมากกว่าปริมาณความต้องการทางทฤษฎี โดยอากาศส่วนที่เกินไปนี้เรียกว่า ปริมาณอากาศส่วนเกิน (excess air) ซึ่ง มักจะบอกเป็น เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอากาศทางทฤษฎี

### เงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับการเผาไหม้ในเตาเผามูลฝอย

การเผาไหม้มูลฝอยเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นและเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์มวลและการอนุรักษ์พลังงาน แต่ประสิทธิภาพของการเผาไหม้จะดีหรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับจำนวนมูลฝอยที่ทำการเผาไหม้ว่าเผาไหม้หมดหรือไม่ ถ้ามูลฝอยที่ใส่เข้าไปในเตาเผาแล้วถูกเผาไหม้หมดก็แสดงว่าประสิทธิภาพในการเผาไหม้ดี การเผาไหม้ของมูลฝอยจะดีหรือไม่ขึ้นอาศัยหลัก 3T คือ เวลา (time) ความปั่นป่วน (turbulence) และอุณหภูมิ (temperature) มาใช้ในการพิจารณา ดังต่อไปนี้

1. เวลา (time) ต้องมีเวลาเพียงพอให้มูลฝอยเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ มูลฝอยแต่ละชนิดจะใช้เวลาไม่เท่ากันในการทำปฏิกิริยาทางเคมีกับอากาศ
2. ความปั่นป่วน (turbulence) ระหว่างปริมาณอากาศและมูลฝอยที่เหมาะสมจะทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์เป็นไปตามทฤษฎี แต่ถ้าเชื้อเพลิงกับออกซิเจนผสมเข้ากันได้ ไม่ดี จำเป็นต้องใช้อากาศมากกว่าตามทฤษฎี
3. อุณหภูมิ (temperature) จะต้องใช้อุณหภูมิให้เหมาะแก่การเผาไหม้ การรวมตัวกันทางเคมีของเชื้อเพลิงแข็งกับอากาศนั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิโดยตรง กับอุณหภูมิจุดติดไฟ (Ignition temperature)

ถ้าอุณหภูมิสูงไม่ถึงจุดติดไฟ มวลฝอยก็จะไม่ลุกไหม้ อุณหภูมิต่ำสุดที่สารจะติดไฟได้ในอากาศก็คือ  $400^{\circ}\text{C}$  สำหรับคาร์บอน  $580^{\circ}\text{C}$  สำหรับไฮโดรเจน และ  $610^{\circ}\text{C}$  สำหรับคาร์บอนมอนอกไซด์ ถ้าอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิจุดติดไฟมากๆ จะทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นรวดเร็วแต่อาจเกิดแก๊สไอเสียเพิ่มขึ้น เช่น ออกไซด์ของไนโตรเจน  $\text{NO}_x$

ดังนั้นในการเผาผลาญจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิของการเผาไหม้ของมวลฝอยให้เหมาะสมเพื่อไม่ให้เกิดมลภาวะ

### อุณหภูมิของการสันดาปและอุณหภูมิลวอะเดียเบติก

เมื่อพิจารณาห้องเผาไหม้ที่มีการไหลคงตัว เมื่อไม่มีงานเกิดขึ้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ ความร้อนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาเคมีของสารจะทำให้อุณหภูมิของการเผาไหม้มีค่าสูงสุดเมื่อมวลฝอยมีค่าเผาไหม้อย่างสมบูรณ์กับอากาศทางทฤษฎี โดยความร้อนที่เกิดขึ้นไม่มีการถ่ายเทความร้อนให้สิ่งแวดล้อม อุณหภูมิลวอะเดียเบติกของกระบวนการเผาไหม้แบบไหลคงตัวหาได้จากสมการ

$$H_P = H_R$$

$$\sum N_P (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ) = \sum N_R (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)$$

โดย  $H_P$  = เอนทาลปีของผลิตภัณฑ์ของการเผาไหม้ (products) , KJ

$H_R$  = เอนทาลปีของสารทำปฏิกิริยา (reactants) , KJ

$N_P$  = จำนวนโมเลกุลขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์

$N_R$  = จำนวนโมเลกุลขององค์ประกอบของสารที่ทำปฏิกิริยา

$\bar{h}_f^\circ$  = เอนทาลปีของการรวมตัวของสารที่  $25^{\circ}\text{C}$  , 1 atm

$\bar{h} - \bar{h}^\circ$  = การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีเมื่อเทียบกับอุณหภูมิตั้งที่  $25^{\circ}\text{C}$  , 1 atm

จากสมการค่าเอนทาลปีของสารที่ทำปฏิกิริยากัน สามารถหาได้จากตาราง เทอร์โมไดนามิกส์ ที่สภาวะนั้นๆ แต่ ค่าเอนทาลปีของสารผลิตภัณฑ์ ไม่สามารถหาได้โดยตรง เนื่องจากไม่ทราบค่าอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงใช้การสมมติค่าอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์แล้วนำไปหาค่าเอนทาลปีของผลิตภัณฑ์ถ้าทำให้สมการเป็นจริง ค่าอุณหภูมิที่สมมติไว้ก็จะถูกต้อง แต่ถ้าด้านซ้ายและด้านขวามือของสมการไม่เท่ากัน ก็แสดงว่าอุณหภูมิที่สมมติไว้ไม่ถูกต้อง ต้องสมมติค่าใหม่จนกว่าจะได้ค่าอุณหภูมิลวอะเดียเบติกที่ต้องการ

ในทางปฏิบัติอุณหภูมิของแก๊สในห้องเผาไหม้จะมีค่าต่ำกว่าเปลวอะเดียเบติกเนื่องจากการเผาไหม้อาจไม่สมบูรณ์ มีการสูญเสียความร้อนให้สิ่งแวดล้อม ดังนั้นถ้า ต้องการทราบอุณหภูมิของการเผาไหม้ที่สภาวะใดๆ ทำได้โดยการใช้เทอร์โมคัปเปิลวัด

### คุณสมบัติของมูลฝอย

คุณสมบัติของมูลฝอยทางด้านฟิสิกส์

1. ความหนาแน่น หมายถึง มวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของมูลฝอยโดยไม่มีการอัดและบีบ มูลฝอยให้ผิดไปจากธรรมชาติ
2. ส่วนประกอบของมูลฝอย หมายถึง มูลฝอยที่สามารถแยกออกได้เป็นประเภทต่างๆดังนี้ เช่น ผักและเศษอาหาร (garbage) กระดาษ (paper) ใบไม้และหญ้า (leave and grass) พลาสติก (plastic) ยาง (rubber) ผ้า (clothes) เลือ่วิธีการกำจัดมูลฝอย
3. ความชื้น (moisture content) คือ ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในมูลฝอยโดยธรรมชาติ

คุณสมบัติของมูลฝอยทางด้านเคมี ได้แก่การวิเคราะห์องค์ประกอบของมูลฝอย โดยทั่วไปประกอบด้วยองค์ประกอบหลักๆ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน กำมะถัน และซีเถ้า ดังแสดงในตารางแสดงองค์ประกอบทางเคมีของมูลฝอย

### ตารางที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของมูลฝอย [6]

Component	%by weight (dry basis)					
	Carbon	Hydrogen	Oxygen	Nitrogen	Sulfer	Ash
Food wastes	48.0	6.4	37.6	2.6	0.4	5.0
Paper	43.5	6.0	44.0	0.3	0.2	6.0
Cardboard	44.0	5.9	44.6	0.3	0.2	5.0
Plastic	60.0	7.2	22.8	-	-	10.0
Textiles	55.0	6.6	31.2	4.6	0.15	2.5
Rubber	78.0	10.0	-	2.0	-	10.0
Leather	60.0	8.0	11.6	10.0	0.4	10.0
Garden Trimmings	47.8	6.0	38.0	3.4	0.3	4.5
Wood	49.5	6.0	42.7	0.2	0.1	1.5
Dir, ashes, brick, etc.	26.3	3.0	2.0	0.5	0.2	68.0
Ripe tree leaves*	52.15	6.11	30.34	6.99	0.16	4.25

\*Mantell C.L. "Solid Waste Origin Collection Processing and Disposal", New York, John Wiley, 1975

## ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง คือ จำนวนพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาเมื่อเชื้อเพลิงถูกเผาอย่างสมบูรณ์ในกระบวนการไหลคงตัว และผลผลิตกลับมาอยู่ที่สภาวะของสารเริ่มต้น (reactants) ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับค่าสมบูรณ์ของเอนทาลปีของการสันดาปของเชื้อเพลิง  $h_c$

$$\text{ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง} = |h_c| \quad \text{kJ/Kg}_{\text{fuel}}$$

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับสถานะของน้ำในผลผลิต ค่าความร้อนสูง (HHV) ก็คือ ค่าความร้อนที่น้ำในผลผลิตมีสถานะเป็นของเหลว และค่าความร้อนต่ำ (LHV) ก็คือค่าความร้อนที่น้ำในผลผลิตมีสถานะเป็นไอ [7] ค่าทั้งสองมีความเกี่ยวข้องกันดังสมการ

$$\text{HHV} = \text{LHV} + (N h_{fg})$$

โดย  $N$  คือจำนวนโมเลกุลของน้ำในผลผลิต และ  $h_{fg}$  คือเอนทาลปีของการระเหยของน้ำที่  $25^\circ \text{C}$

HHV สำหรับมูลฝอยคาคเคเนได้โดยใช้สูตรของ Dulong [8] แต่ต้องทราบส่วนประกอบทางเคมีของมูลฝอย

$$\text{HHV} = 0.338C + 1.44\left(H - \frac{O}{8}\right) + 0.094S$$

โดย

HHV = ค่าความร้อนสูงของมูลฝอย , MJ/Kg

C = เปอร์เซ็นต์โดยมวลของคาร์บอนในมูลฝอย , %

H = เปอร์เซ็นต์โดยมวลของไฮโดรเจนในมูลฝอย , %

O = เปอร์เซ็นต์โดยมวลของออกซิเจนในมูลฝอย , %

S = เปอร์เซ็นต์โดยมวลของซัลเฟอร์ในมูลฝอย , %

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจะมีประโยชน์ในการพิจารณาถึงความเหมาะสมที่จะเอามาใช้งานในด้านต่าง ๆ และการออกแบบเตาเผาให้มีขนาดที่เหมาะสม

## การคำนวณการเผาไหม้

หมายถึง การคำนวณเชิงปริมาณ ก่อนและหลังการเผาไหม้ ตามสมการการสมดุล ทางเคมี จากองค์ประกอบที่เผาไหม้ได้ เช่น คาร์บอน ไฮโดรเจน กำมะถัน ที่มีอยู่ในมูลฝอยหรือในเชื้อเพลิง เพื่อที่จะหาปริมาณอากาศที่ต้องการใช้ในการเผาไหม้ และวิเคราะห์แก๊สไอเสีย

### ปริมาณอากาศทางทฤษฎี (theoretical air) [9]

$V_{ta}$  หมายถึง ปริมาณของอากาศทางทฤษฎีที่ต้องใช้เพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ .  
 $m_{air}^3 / Kg_{fuel}$  ที่ความดันบรรยากาศ

$$V_{ta} = \frac{1}{0.21} \left[ \frac{1}{12} (22.4m_C) + \frac{1}{2} (11.2) \left( m_H - \frac{m_O}{8} \right) + \frac{1}{32} (22.4m_S) \right]$$

$m_{ta}$  หมายถึง มวลของอากาศจำนวนน้อยที่สุดที่ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ .  $Kg_{air} / Kg_{fuel}$   
 คำนวณได้จากสมการ

$$m_{ta} = \frac{1}{0.232} \left[ \frac{1}{12} (32m_C) + \frac{1}{2} \left( \frac{32}{2} \right) \left( m_H - \frac{m_O}{8} \right) + \frac{1}{32} (32m_S) \right]$$

สมการข้างต้นเป็นการคำนวณหาปริมาณอากาศในหน่วยปริมาตร และหน่วยมวล โดยเทียบจากปริมาณของออกซิเจนที่ธาตุต่างๆใช้เพื่อให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นไปอย่างสมบูรณ์

### ปริมาณอากาศส่วนเกิน

โดยทั่วไปแล้วการเผาไหม้ จำเป็นจะต้องใช้ปริมาณอากาศในการเผาไหม้มากกว่าทางทฤษฎีดังนั้นปริมาณอากาศส่วนเกินหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

ปริมาณอากาศส่วนเกินโดยปริมาตร

$$\%EA = \left[ \frac{V_{aa} - V_{ta}}{V_{ta}} \right] \times 100$$

ปริมาณอากาศส่วนเกินโดยมวล

$$\%EA = \left[ \frac{m_{aa} - m_{ta}}{m_{ta}} \right] \times 100$$



%EA = เปอร์เซ็นต์ของอากาศส่วนเกิน

$m_{aa}$  = มวลอากาศที่ใช้จริง , Kg<sub>air</sub>/Kg<sub>fuel</sub>

$m_{ta}$  = มวลอากาศทางทฤษฎี , Kg<sub>air</sub>/Kg<sub>fuel</sub>

$V_{aa}$  = ปริมาณอากาศที่ใช้จริง , m<sup>3</sup><sub>air</sub>/Kg<sub>fuel</sub>

$V_{ta}$  = ปริมาณอากาศทางทฤษฎี , m<sup>3</sup><sub>air</sub>/Kg<sub>fuel</sub>

### การคำนวณและออกแบบอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ [10]

จากการออกแบบเตาเผามูลฝอยได้ใช้ orifice เป็นอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ และได้เลือกค่า  $Q_a$  ไว้ที่ประมาณ 14 m<sup>3</sup>/min เพื่อให้สามารถใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินได้มากกว่า 80%EA และเลือกใช้ท่อส่งอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 mm

$$Q_a = A V_a$$

$$A = \frac{\pi}{4} \left( \frac{4 \times 2.54}{100} \right)^2 = 8.1073 \times 10^{-3} \text{ , m}^2$$

$$Q_a = \left( 14 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right) \cdot \left( \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) = 0.233 \text{ , } \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$V_a = \frac{0.233}{8.1073 \times 10^{-3}} = 28.74 \text{ , } \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Re = \frac{\rho_a V_a D}{\mu_a}$$

$$\rho_a = 1.20 \text{ , } \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\mu_a = 18.17 \times 10^{-6} \text{ , } \frac{\text{N} \cdot \text{S}}{\text{m}}$$

$$D = 4(2.54)/100 = 0.1016 \text{ m}$$

$$\therefore Re = \frac{\left( 1.2 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) \cdot \left( 28.74 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \cdot (0.1016 \text{ m})}{\left( 18.17 \times 10^{-6} \frac{\text{N} \cdot \text{S}}{\text{m}} \right)} = 192844.29$$

จากมาตรฐาน ASME ที่ค่า Re เท่ากับ 192844.29 และที่  $\beta$  เท่ากับ 0.8 เลือกเปิดตาราง orifice taps (D . D/2 pressure tapping) สำหรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 4 นิ้ว จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การไหล K เท่ากับ 0.815 ดังนั้นจากสมการจะได้

$$Q_a = KA \sqrt{2 \frac{\rho_w}{\rho_a} g \Delta h_w}$$

$$A = \text{พื้นที่ของแผ่น orifice } \frac{\pi}{4} d^2$$

$$\beta = d/D$$

แทนค่าจะได้

$$\begin{aligned} Q_a &= 0.815 \cdot \frac{\pi}{4} (0.8 \times 0.1016)^2 m^2 \cdot \sqrt{2 \left( \frac{1000 \frac{Kg}{m^3}}{1.2 \frac{Kg}{m^3}} \right) \cdot \sqrt{9.81 \frac{m}{s^2}} \cdot \sqrt{\Delta h_w m}} \\ &= 4.228 \times 10^{-3} m^2 \cdot \sqrt{16350 \frac{m}{s^2}} \cdot \sqrt{\Delta h_w m} \\ &= 0.541 \cdot \sqrt{\Delta h_w} \cdot \frac{m^3}{s} \end{aligned}$$

$$Q_a^2 = 0.2923 \cdot \Delta h_w$$

$$\Delta h_w = Q_a^2 / 0.2923$$

$$\Delta h_w = Q_a^2 \times 100 / 0.2923, \text{ cm}$$

$$\Delta h_w = 342 Q_a^2, \text{ cm}$$

### การวิเคราะห์แก๊สไอเสียทางทฤษฎี

การเผาไหม้โดยใช้ปริมาณอากาศทางทฤษฎีนั้นถ้าเผาไหม้สมบูรณ์จะได้แก๊สไอเสียซึ่งประกอบด้วย  $CO_2, H_2O_{(g)}$  และ  $N_2$  และถ้าเชื้อเพลิงมีกำมะถันอยู่ด้วยก็จะมี  $SO_2$  รวมอยู่ในแก๊สไอเสีย ถ้าให้  $V_{tg}$  เป็นปริมาตรของแก๊สไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ทางทฤษฎีอย่างสมบูรณ์ มีหน่วยเป็น  $m^3$ ,  $m^3 \text{ flue gas}/Kg_{fuel}$

$$V_{tg} = (1-0.21)V_{ta} + \left(\frac{22.4}{12}\right)m_C + \left(\frac{22.4}{2}\right)m_H + \left(\frac{22.4}{32}\right)m_S + \left(\frac{22.4}{18}\right)m_{H_2O} + \left(\frac{22.4}{28}\right)m_N$$

$m_{ig}$  คือมวลของแก๊สไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้กับปริมาณอากาศทางทฤษฎี สามารถคำนวณหา  $m_{ig}$  ซึ่งมีหน่วยเป็น  $Kg_{flue\ gas}/Kg_{fuel}$  ได้ตามสมการ

$$m_{ig} = (1 - 0.232)m_{ta} + \left(\frac{44}{12}\right)m_C + \left(\frac{18}{2}\right)m_H + \left(\frac{64}{32}\right)m_S + m_{H_2O} + m_N$$

เนื่องจากการเผาไหม้มูลฝอยเรามีความจำเป็นต้องใช้ปริมาณอากาศส่วนเกิน ดังนั้นแก๊สไอเสียที่เกิดขึ้นจึงประกอบด้วย  $CO_2$   $H_2O$  (g)  $N_2$  และ  $O_2$  ซึ่งถ้าเชื้อเพลิงมีกำมะถันอยู่ด้วยก็จะมี  $SO_2$  อยู่ในแก๊สไอเสียด้วย เมื่อให้  $V_{ag}$  เป็นปริมาณแก๊สไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้โดยใช้ปริมาณอากาศส่วนเกิน มีหน่วยเป็น  $m^3_{flue\ gas}/Kg_{fuel}$

$$V_{ag} = (V_v - 1)V_{ta} + (1 - 0.21)V_{ta} + \left(\frac{22.4}{12}\right)m_C + \left(\frac{22.4}{2}\right)m_H + \left(\frac{22.4}{32}\right)m_S + \left(\frac{22.4}{18}\right)m_{H_2O} + \left(\frac{22.4}{28}\right)m_N$$

โดย  $V_v$  คือ อัตราส่วนของปริมาตรอากาศที่ใช้จริงต่อปริมาตรอากาศทางทฤษฎี ( $V_v = V_{aa} / V_{ta}$ )

$$m_{ag} = (m_m - 1)m_{ta} + (1 - 0.232)m_{ta} + \left(\frac{44}{12}\right)m_C + \left(\frac{18}{2}\right)m_H + \left(\frac{64}{32}\right)m_S + m_{H_2O} + m_N$$

$m_{ag}$  เป็นมวลแก๊สไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้โดยใช้ปริมาณอากาศส่วนเกิน มีหน่วยเป็น  $Kg_{flue\ gas} / Kg_{fuel}$  โดยที่  $m_m$  คืออัตราส่วนของมวลอากาศที่ใช้จริงต่อมวลอากาศทางทฤษฎี ( $m_m = m_{aa} / m_{ta}$ )

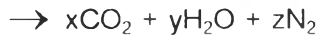
การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของ  $H_2O$  (g) ในแก๊สไอเสีย

จากข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีของมูลฝอยไปไม่มีค่าองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ดังนี้  $C = 52.15\%$   $H = 6.11\%$   $O_2 = 30.34\%$  และ  $N_2 = 6.99\%$  ซึ่งเป็น %By Mass แล้วทำเป็น Mole Fraction ดังแสดงใน ตารางที่ 2.3

**ตารางที่ 2.3** แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์โดยมวลของธาตุต่างๆ เป็น Mole Fraction

สาร	Kgmole/Kg <sub>ref</sub>	Mole Fraction
C	$0.5215/12 = 0.04346$	$0.04346/0.08598 = 0.50547$
H <sub>2</sub>	$0.0611/2 = 0.03055$	$0.03055/0.08598 = 0.35532$
O <sub>2</sub>	$0.3034/32 = 0.00948$	$0.00948/0.08598 = 0.11026$
N <sub>2</sub>	$0.0699/28 = 0.00249$	$0.00249/0.08598 = 0.02895$
รวม	0.08598	1.00000

จากสมการการเผาไหม้มูลฝอยใบไม้ที่ 0%EA



ฉะนั้นจะได้  $x = 0.50547$  และ  $y = 0.35532$

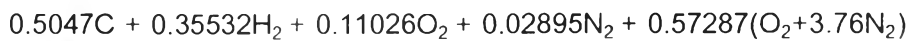
จาก  $0.11026+ath = x + (y/2)$

$$ath = 0.57287$$

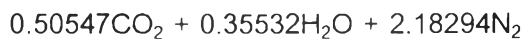
และ  $z = 0.02895 + ath(3.76)$

$$z = 2.18294$$

เพราะฉะนั้นจะได้สมการการเผาไหม้ของมูลฝอยที่ 0%EA ดังนี้



ดังนั้นแก๊สไอเสียประกอบด้วย



เพราะฉะนั้น

$$\text{ปริมาณน้ำที่อยู่ในแก๊สไอเสีย} = 0.35532 / (0.50547 + 0.35532 + 2.18294)$$

$$\text{ที่ 0\%EA} = 0.11674 = 11.6738 \%$$

แก๊สไอเสียที่ออกจากปล่อง (wet flue gas) มีแก๊สไอเสียแห้งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ

$$100 = \%CO_2 + \%N_2 + \%H_2O$$

$$100 - \%H_2O = \%CO_2 + \%N_2$$

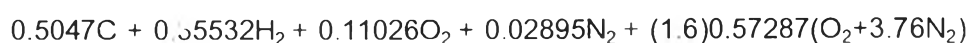
$$100 - 11.6738 = \%CO_2 + \%N_2$$

$$88.3262 = \%CO_2 + \%N_2$$

เพราะฉะนั้นในแก๊สไอเสียเปียกจะมีแก๊สไอเสียแห้งที่ 0%EA อยู่เท่ากับ

$$Q_{\text{dry flue gas}} = 0.883262 Q_{\text{wet flue gas}}$$

สมการการเผาไหม้มูลฝอยใบไม้ที่ 20%EA



เพราะฉะนั้น  $O_2$  ;  $0.11026 + (1.2)0.57287 = 0.50547 + (0.35532/2) + w$

$$w = 0.11457$$

ดังนั้นแก๊สไอเสียประกอบด้วย



เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณน้ำที่อยู่ในแก๊สไอเสีย} &= 0.35532 / (0.50547 + 0.35532 + 0.11457 + 3.47534) \\ \text{ที่ 20\%EA} &= 0.0798 \text{ หรือ } 7.98\% \end{aligned}$$

แก๊สไอเสียที่ออกจากปล่อง (wet flue gas) มีแก๊สไอเสียแห้งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ

$$100 = \%CO_2 + \%N_2 + \%H_2O + \%O_2$$

$$100 - \%H_2O = \%CO_2 + \%N_2 + \%O_2$$

$$100 - 7.98 = \%CO_2 + \%N_2 + \%O_2$$

$$92.02 = \%CO_2 + \%N_2 + \%O_2$$

เพราะฉะนั้นในแก๊สไอเสียเปียกจะมีแก๊สไอเสียแห้งที่ 20%EA อยู่เท่ากับ

$$Q_{\text{dry flue gas}} = 0.9202 Q_{\text{wet flue gas}}$$

**พลังงานความร้อน สมดุลพลังงาน และประสิทธิภาพเชิงความร้อน**

**สมดุลพลังงาน (Energy Balance)**

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$\dot{E}_{in}$  คือพลังงานขาเข้าได้แก่

$$Q_{in} = \text{พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้} , \text{ kW}$$

$\dot{E}_{out}$  คือพลังงานขาออกได้แก่

$$Q_{\text{flue gas}} = \text{พลังงานความร้อนจากแก๊สไอเสีย} , \text{ kW}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{unburn}} &= \text{พลังงานความร้อนของ unburn , kW} \\
 Q_{\text{stack}} &= \text{พลังงานความร้อนที่สูญเสียภายในปล่อง , kW} \\
 Q_{\text{cond}} &= \text{พลังงานความร้อนที่ผ่านผนังเตา , W} \\
 Q_{\text{abs}} &= \text{พลังงานความร้อนที่ดูดซับ , kW}
 \end{aligned}$$

1. พลังงานความร้อนจากการเผาผลาญ(ไบโอดีเซล)  $Q_{\text{in}}$  , kW

$$Q_{\text{in}} = m_{\text{ไบโอดีเซล}} \times \text{LHV}$$

$$m_{\text{ไบโอดีเซล}} = \text{อัตราการป้อนไบโอดีเซล , Kg/s}$$

$$\text{LHV} = \text{ค่าความร้อนต่ำของผลผลิต(ไบโอดีเซล) , KJ/Kg}$$

$$\text{LHV} = \text{HHV} - (9H+W) h_{\text{fg}25^{\circ}\text{C}}$$

$$\text{HHV} = \text{ค่าความร้อนสูงของผลผลิต(ไบโอดีเซล)หาได้จากสูตร Dulong , MJ/Kg}$$

$$H = \text{มวลไฮโดรเจนในผลผลิต}$$

$$W = \text{มวลของความชื้นในผลผลิต}$$

$$h_{\text{fg}25^{\circ}\text{C}} = \text{เอนทาลปีของการระเหยของน้ำที่ } 25^{\circ}\text{C} \text{ เท่ากับ } 2,442.3 \text{ , KJ/Kg}$$

2. พลังงานความร้อนจากแก๊สไอเสีย  $Q_{\text{flue gas}}$  , kW

$$Q_{\text{flue gas}} = \dot{m}_{\text{flue gas}} \bar{C}_{\text{pg}} (T_{\text{g7}} - T_{\text{a}})$$

$$\dot{m}_{\text{flue gas}} = \text{อัตราการไหลของแก๊สไอเสีย , Kg/s}$$

$$\bar{C}_{\text{pg}} = \text{ค่าความร้อนจำเพาะของแก๊สไอเสีย , KJ/Kg K}$$

$$T_{\text{a}} = \text{อุณหภูมิบรรยากาศนอกเตา , K}$$

$$T_{\text{g7}} = \text{อุณหภูมิของแก๊สไอเสียวัดที่ตำแหน่งปากทางออกของปล่อง , K}$$

$$\bar{C}_{\text{pg}} = \left[ C_{\text{pCO}_2} \frac{\% \text{CO}_2}{100} + C_{\text{pCO}} \frac{\% \text{CO}}{100} + C_{\text{pO}_2} \frac{\% \text{O}_2}{100} + C_{\text{pH}_2\text{O}} \frac{\% \text{H}_2\text{O}}{100} + C_{\text{pN}_2} \frac{\% \text{N}_2}{100} \right]$$

$\%CO_2$  = แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สไอเสียคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยมวล , %

$\%CO$  = แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สไอเสียคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยมวล , %

$\%O_2$  = แก๊สออกซิเจนในแก๊สไอเสียคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยมวล , %

$\%H_2O$  = ไอน้ำในแก๊สไอเสียคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยมวล , %

$\%N_2$  = แก๊สไนโตรเจนในแก๊สไอเสียคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยมวล , %

$C_{pCO_2}$  = ค่าความร้อนจำเพาะของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันคงที่ , KJ/Kg K

$C_{pCO}$  = ค่าความร้อนจำเพาะของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความดันคงที่ , KJ/Kg K

$C_{pO_2}$  = ค่าความร้อนจำเพาะของแก๊สออกซิเจนที่ความดันคงที่ , KJ/Kg K

$C_{pH_2O}$  = ค่าความร้อนจำเพาะของไอน้ำที่ความดันคงที่ , KJ/Kg K

$C_{pN_2}$  = ค่าความร้อนจำเพาะของแก๊สไนโตรเจนที่ความดันคงที่ , KJ/Kg K

3. พลังงานความร้อนของ unburn  $Q_{unburn}$  , kW

$$Q_{unburn} = \dot{m}_{C_{unburn}} \times HVC$$

$\dot{m}_{C_{unburn}}$  = มวลคาร์บอนของ unburn , Kg/s

$$\dot{m}_{C_{unburn}} = \dot{m}_C - \dot{m}_{CinCO} - \dot{m}_{CinCO_2}$$

HVC = ค่าความร้อนของคาร์บอน 33,700 , KJ/Kg

4. พลังงานความร้อนที่สูญเสียภายในปล่อง  $Q_{stack}$  , kW

$$Q_{stack} = \dot{m}_{flue\ gas} \bar{C}_{pg} (T_{g6} - T_{g7})$$

$\dot{m}_{flue\ gas}$  = อัตราการไหลของแก๊สไอเสีย , Kg/s

$\bar{C}_{pg}$  = ค่าความร้อนจำเพาะของแก๊สไอเสีย , KJ/Kg K

$T_{g6}$  = อุณหภูมิของแก๊สไอเสียวัดที่ตำแหน่งปากทางเข้าของปล่องไอเสีย , K

$T_{g7}$  = อุณหภูมิของแก๊สไอเสียวัดที่ตำแหน่งปากทางออกของปล่องไอเสีย , K

5. พลังงานความร้อนที่ผ่านผนังเตาเผา  $Q_{\text{cond}}$  [11] . W

$$Q_{\text{cond}} = \frac{(T_{\text{si}} - T_{\text{so}})A}{R}$$

$A$  = พื้นที่ของผนัง ,  $m^2$

$$R = \sum \left( \frac{L}{k} \right) , m^2 K/W$$

$L$  = ความยาว , m

$k$  = สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ,  $W/(m K)$

$T_{\text{si}} , T_{\text{so}}$  = อุณหภูมิผิวด้านใน และด้านนอกของเตาเผา , K

6. พลังงานความร้อนที่ดูดซับ,  $Q_{\text{abs}}$  , kW

$$Q_{\text{abs}} = M C_p \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

$M$  = มวลของผนัง , Kg

$C_p$  = ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุ , KJ/Kg K

$\Delta T$  = ผลต่างของอุณหภูมิที่ใช้คำนวณหา  $Q_{\text{abs}}$  , K

$\Delta t$  = ผลต่างของเวลาที่ใช้คำนวณหา  $Q_{\text{abs}}$  , sec

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน ( $\eta_{\text{th}}$ )

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (thermal efficiency)เป็นตัวบอกถึงสมรรถนะของเตาเผามูลฝอย โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผามูลฝอย คือ อัตราส่วนของปริมาณความร้อนที่ออกจากปล่องไปเสีย เทียบกับปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงหรือมูลฝอย ซึ่งหาได้จากสมการ

$$\eta_{\text{th}} = \left( \frac{Q_{\text{flue gas}}}{Q_{\text{LHV}}} \right) \times 100$$

เมื่อ

$\eta_{\text{th}}$  = ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผามูลฝอย , %

$Q_{\text{flue gas}}$  = ปริมาณความร้อนจากแก๊สไอเสียที่ปล่อยออกทางปล่องไอเสีย , kW

$Q_{\text{LHV}}$  = ค่าความร้อนต่ำของมูลฝอย , kW