

## บทที่ 2

### วารสารปริทรรศน์

#### 2.1 ขยะมูลฝอยชุมชน (Municipal Solid Waste)

ขยะมูลฝอยชุมชน หมายถึง ของเหลือทิ้งที่มีแหล่งกำเนิดมาจากชุมชนมีองค์ประกอบหลักสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนที่สำคัญ ได้แก่ ขยะอินทรีย์ที่เน่าเสียได้ง่าย และมีความชื้นสูง เช่น เศษอาหาร ผัก ผลไม้ ใบไม้ใบหญ้า เป็นต้น ขยะที่เผาไหม้ได้ ซึ่งได้แก่ ขยะอินทรีย์ที่ย่อยสลายช้า เช่น ไม้ ยาง หนัง กระดาษ และสารอินทรีย์สังเคราะห์ เช่น พลาสติก และวัสดุเฉื่อย ซึ่งก็คือ ส่วนที่ไม่เผาไหม้ เช่น หิน ทราาย แก้ว กระเบื้อง เป็นต้น

#### 2.2 องค์ประกอบและคุณสมบัติของขยะมูลฝอยชุมชน

องค์ประกอบและคุณสมบัติของขยะมูลฝอยชุมชนในประเทศจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพของภูมิอากาศ และพฤติกรรมทางเศรษฐกิจสังคม วิถีชีวิต ตลอดจนอุปนิสัยและแบบแผนในการบริโภคของแต่ละชุมชน โดยทั่วไปมีองค์ประกอบแตกต่างกันไป

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบเฉลี่ยของตัวอย่างขยะรวมในเทศบาลที่มีปริมาณขยะมากกว่า 100 ตัน/วัน และ 50-100 ตัน/วัน (กระทรวงพลังงาน ,2549)

องค์ประกอบ	ปริมาณขยะมากกว่า 100 ตัน/วัน	ปริมาณขยะ 50-100 ตัน/วัน
เศษอาหาร/ผัก/ผลไม้	53.49%	57.18%
พลาสติก	20.12%	19.40%
กระดาษ	8.95%	8.38%
แก้ว	5.02%	3.47%
โลหะ	1.80%	1.52%
อื่นๆ เช่น สารพิษ เป็นต้น	10.62%	10.05%

## 2.3 ปริมาณขยะมูลฝอยชุมชนทั่วประเทศ

ปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นทั้งหมดในปี พ.ศ.2546 (ไม่รวมกรุงเทพฯ 9,400 ตัน/วัน) มีปริมาณรวมประมาณ 32,591 ตัน/วัน ซึ่งปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้น พบว่าภาคกลาง-ตะวันตก มีปริมาณขยะเกิดขึ้นสูงสุดประมาณ 7,571 ตัน/วัน และภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีปริมาณขยะเกิดขึ้นต่ำสุดประมาณ 3,013 ตัน/วัน ดังตารางที่ 2.2 แยกตามภาค

ตารางที่ 2.2 ปริมาณขยะมูลฝอยชุมชนแบ่งตามภาค ปี พ.ศ.2546 (กระทรวงพลังงาน ,2549)

ภาค	จำนวนจังหวัด	ปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้น (ตัน/วัน)
ภาคกลาง-ตะวันตก	18	7,571
ภาคเหนือ	17	6,749
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	19	10,454
ภาคตะวันออก	7	3,013
ภาคใต้	14	4,804

## 2.4 เทคโนโลยีการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากขยะชุมชน (MSW Gasification)

### 2.4.1 การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากขยะชุมชน

กระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากขยะชุมชน (MSW gasification) เป็นกระบวนการทำให้ขยะมูลฝอยเป็นแก๊สโดยการทำปฏิกิริยาสันดาปแบบไม่สมบูรณ์ (partial combustion) กล่าวคือสารอินทรีย์ในขยะมูลฝอยจะทำปฏิกิริยากับอากาศหรือออกซิเจนในปริมาณจำกัด ทำให้เกิดแก๊สซึ่งมีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจนและมีเทน เรียกว่า producer gas ในกรณีที่ใช้อากาศเป็นแก๊สทำปฏิกิริยา แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะมีค่าความร้อนต่ำประมาณ 3-5 MJ/Nm<sup>3</sup> แต่ถ้าใช้ออกซิเจนเป็นแก๊สทำปฏิกิริยา แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะมีค่าความร้อนสูงกว่าคือ ประมาณ 15-20 MJ/Nm<sup>3</sup>

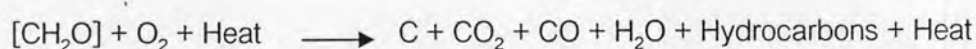
## 2.5 กระบวนการแกซีฟิเคชัน

### 2.5.1 นิยาม

กระบวนการแกซีฟิเคชัน เป็นกระบวนการที่ใช้ในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากเชื้อเพลิงแข็ง ประกอบไปด้วยกระบวนการสลายตัว (decomposition) และกระบวนการกลั่นสลาย (devolatilization) ของโมเลกุลสารอินทรีย์ในขยะมูลฝอยชุมชน ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1200-1400 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศที่ควบคุมปริมาณออกซิเจน เพื่อผลิตสารระเหยและถ่านชาร์ (char) ในขั้นตอนของกระบวนการกลั่นสลายหรือที่เรียกว่าไพโรไลซิส (pyrolysis) ซึ่งมวลจะสลายตัวด้วยความร้อนเกิดเป็นสารระเหย เช่น มีเทน และส่วนที่เหลือยังคงสภาพของแข็งอยู่ที่เรียกว่า ถ่านชาร์

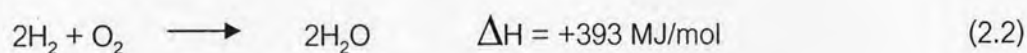
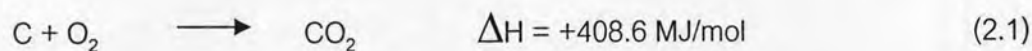
สารระเหยจะทำปฏิกิริยาสันดาปแบบไม่สมบูรณ์ต่อที่อุณหภูมิสูงหรือปฏิกิริยาทุติยภูมิ (secondary reaction) ในขณะที่ถ่านชาร์จะถูกแกซีฟายต่อโดยอากาศ ออกซิเจน หรือไอน้ำได้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถเขียนได้เป็น

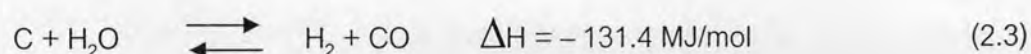


นอกจากนี้ยังมีปฏิกิริยาทุติยภูมิที่เกิดต่อเนื่อง ได้แก่

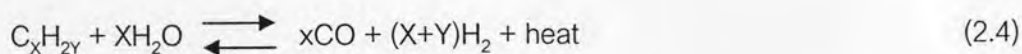
- ถ่านชาร์และไฮโดรเจนจะถูกออกซิไดซ์โดยอากาศ ซึ่งปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และเป็นปฏิกิริยาที่ให้ความร้อนในการอบขยะมูลฝอยชุมชนให้แห้ง เป็นการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นถึงอุณหภูมิทำปฏิกิริยาและทำหน้าที่เป็นแหล่งให้ความร้อนแก่ปฏิกิริยาอื่นๆ ด้วย



- ปฏิกิริยา water gas ซึ่งเป็นปฏิกิริยาเกิดขึ้นระหว่างถ่านชาร์กับไอน้ำเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน



- ปฏิกิริยาระหว่างสารไฮโดรคาร์บอนกับไอน้ำ เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน



- ปฏิกิริยา boudouard ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับถ่านชาร์เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน



- ปฏิกิริยา Water-Gas Shift ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน



- ปฏิกิริยา Methane formation ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน



ปฏิกิริยาที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จะเป็นตัวกำหนดองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งปัจจัยหลักที่จะกำหนดการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวคืออุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ เช่น ถ้า residence time ในบริเวณ hot zone ของเครื่องปฏิกรณ์น้อยเกินไป หรืออุณหภูมิต่ำเกินไป จะทำให้โมเลกุลขนาดกลางไม่เกิดการสั่นตាប់และจะหลุดออกไปเกิดการควบแน่นที่บริเวณ reduction zone เป็นน้ำมันชาร์

รูปแบบการใช้งานแก๊สเชื้อเพลิง (เช่น ให้ความร้อนโดยตรง ผลิตไฟฟ้า หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับยานพาหนะ) จะเป็นตัวกำหนดองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง การกำจัดปริมาณของน้ำมันชาร์และฝุ่นละอองในแก๊สเชื้อเพลิง ปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดสัดส่วนขององค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง คือ ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ สภาวะความดันและอุณหภูมิ และคุณลักษณะของขยะมูลฝอยชุมชน ซึ่งคุณลักษณะของขยะมูลฝอยชุมชนจะเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมทางด้าน

เคมีความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ในแง่ของประสิทธิภาพและระบบและคุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้สามารถนำไปเผาในกังหันแก๊ส เครื่องยนต์สันดาปภายในหรือหม้อน้ำ

## 2.5.2 ผลิตรภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแกซีฟิเคชัน

ในกระบวนการแกซีฟิเคชันประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือการไพโรไลซิสในขั้นตอนแรก ซึ่งจะมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการระเหยไอน้ำและสารระเหยรวมทั้งแก๊สต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นด้วย หลังจากนั้นจะเกิดขั้นตอนที่ 2 คือ กระบวนการแกซีฟิเคชัน โดยน้ำมันทาร์และชาร์จะเปลี่ยนไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น (Asadullah et al., 2003 and Davi et al., 2005) ผลิตรภัณฑ์หลักที่ได้มี 3 ประเภทคือ (ฉัตรชัย ธนศรีสุข, 2541)

### 2.5.2.1 ผลิตรภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง

มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเรียกว่า ถ่านชาร์ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือผลิตสารเคมีอื่นได้อีก เช่น ถ่านกัมมันต์ แนฟทาซีน แอนทราซีน และสารประกอบไซยาโนเจน เป็นต้น แต่ส่วนใหญ่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงไร้ควัน เช่น ถ่านไร้ควัน เพื่อใช้ในบ้านเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือกลางได้ดี เช่น เป็นเชื้อเพลิงให้หม้อไอน้ำ การเผาอิฐ การอบแห้ง ผลิตรภัณฑ์ทางการเกษตร โรงงานผลิตหินปูนและซีเมนต์ หรือใช้ในโรงงานถลุงเหล็กและทองแดง เพราะไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสภาพแวดล้อมจากกลิ่นหรือควันที่เกิดจากสารระเหยและสารประกอบพวกไนโตรเจนและกำมะถัน

### 2.5.2.2 ผลิตรภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

ประกอบด้วยน้ำและสารประกอบที่ละลายน้ำ อีกส่วนหนึ่งจะเป็นน้ำมันทาร์ องค์ประกอบของน้ำมันทาร์เป็นสารประกอบที่ซับซ้อนของไฮโดรคาร์บอน ที่มีโครงสร้างส่วนมากเป็นพวงแหวนแนฟทาซีนเชื่อมด้วยหมู่เอทีลีน โมเลกุลของน้ำมันทาร์มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนตั้งแต่  $C_5-C_6$  ประกอบเป็นโครงสร้างของสารเคมีต่าง ๆ อาจมีมากกว่า 200 ชนิด โดยอาจแบ่งออกได้ตามอุณหภูมิที่ใช้ในการกลั่นเป็น 5 ส่วน คือ

- น้ำมันเบา(light oil) ช่วงอุณหภูมิ <200 องศาเซลเซียส ได้แก่ เบนซิน เบนโซลดิบ โทลูอีน เอทิลเบนซีน ไซลีน

- น้ำมันช่วงกลาง (middle oil) ช่วงอุณหภูมิ 200 – 250 องศาเซลเซียส ได้แก่ ฟีนอล ไพรดีน
- น้ำมันช่วงหนัก (heavy oil) ช่วงอุณหภูมิ 250 – 300 องศาเซลเซียส ได้แก่ ไดเมทิล แนนทาลีน
- น้ำมันแอนทาซีน (anthracene) ช่วงอุณหภูมิ 300 – 350 องศาเซลเซียส ได้แก่ ฟลูออรีน ฟีนแอนทีน
- พิตช์ (pitch) ช่วงอุณหภูมิ >350 องศาเซลเซียส ได้แก่ น้ำมันหนักบางประเภทพวกไข (red wax) ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการกลั่น

#### สมบัติทางเคมีของน้ำมันทาร์

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพบว่าปริมาณน้ำมันทาร์ที่เกิดจากการเผาไหม้และองค์ประกอบของน้ำมันทาร์เกิดการเปลี่ยนแปลง พบว่าเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการสูงขึ้น ปริมาณออกซิเจนจะลดลง และสัดส่วนของ H/C อะตอมก็ลดลงเช่นกัน ซึ่งแสดงถึงการผันกลับของ highly oxygenate pyrolyzate ไปเป็น less oxygenate pyrolyzate และมีความคงที่ของอุณหภูมิมากกว่า (thermally highly aromatic structure stable) ซึ่งในที่สุดจะไม่มีออกซิเจน และคงเหลือแต่โครงสร้างที่เป็นอะโรมาติก

#### 2.5.2.3 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

เป็นของผสมระหว่างแก๊สอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนและแอมโมเนีย ส่วนแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ มีเทน อีเทน เอทิลีน เป็นต้น โดยแก๊สส่วนใหญ่จะเป็นไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้เพื่อให้ความร้อน หรือการผลิตไฟฟ้า

#### 2.5.3 แอร์แกซิฟิเคชัน (Air Gasification)

เป็นวิธีการที่ง่ายที่สุด ผลิตแก๊สเชื้อเพลิงพลังงานต่ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับการที่มีไนโตรเจนปริมาณเล็กน้อยเพียงใด ที่จะไปเจือจางแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ แก๊สเชื้อเพลิงดังกล่าวเหมาะสำหรับประเทศที่กำลังพัฒนา สามารถใช้ได้อย่างกว้างขวาง เพื่อจุดประสงค์ในการใช้ความร้อนในอุตสาหกรรม เครื่องมือควรมีการออกแบบใช้ในการเผาไหม้น้ำมันหรือแก๊สธรรมชาติที่ง่ายในการนำไปเปลี่ยนแปลงหรือแก้ไข ในการเดินเตาผลิตแก๊สและประสิทธิภาพทั้งหมดของการเปลี่ยนให้

ใกล้เคียงกับการเผาไหม้โดยตรง (direct combustion) ซึ่งมีประสิทธิภาพประมาณ 70-80% ถ้าใช้เครื่องมือที่ออกแบบดี สำหรับการผลิตไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ แก๊สเชื้อเพลิงจะใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ทั้งกังหันแก๊ส (gas turbine) และเครื่องกำเนิดไอน้ำ (steam generator)

#### 2.5.4 ออกซิแกซิฟิเคชัน (Oxygen Gasification)

เป็นกระบวนการที่ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ จะให้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีพลังงานสูงกว่าการใช้อากาศ แก๊สเชื้อเพลิงนี้ประกอบด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์กับไฮโดรเจนและมักเรียกว่า แก๊สสังเคราะห์ (synthesis gas) เพราะว่าแก๊สนี้สามารถให้ความร้อนหรือใช้สังเคราะห์เมทานอล แอมโมเนียและสารเคมีอื่นๆ อย่างไรก็ตามกระบวนการที่ใช้มีราคาสูง และยังต้องการสิ่งอำนวยความสะดวกในการแยกออกซิเจนจากอากาศ

#### 2.5.5 สตีมน้ำแกซิฟิเคชัน (Steam Gasification)

เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับไอน้ำ เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน แก๊สที่ได้ส่วนใหญ่ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน แก๊สเหล่านี้มีค่าความร้อนสูงพอที่จะนำมาทำแก๊สเชื้อเพลิง

#### 2.5.6 คาร์บอนออกซิแกซิฟิเคชัน (Carboxygasification)

เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน

#### 2.5.7 ไฮโดรแกซิฟิเคชัน (Hydrogasification)

เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจนโดยตรง เพื่อผลิตมีเทน เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และเกิดขี้เถ้าที่อุณหภูมิสูง ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือแก๊สมีเทน ซึ่งเป็นแก๊สที่มีค่าความร้อนสูงจึงเป็นแก๊สที่ต้องการให้เกิดในการแกซิฟายมาก แต่ว่าปฏิกิริยานี้เกิดน้อยมาก นอกจากจะมีการป้อนไฮโดรเจนซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำคัญของปฏิกิริยาเข้าไปเพิ่มเติม

### 2.5.8 ปฏิกิริยาชิฟท์ (Water-gas shift reaction)

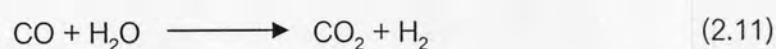
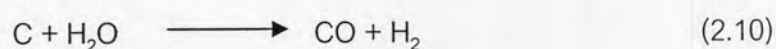
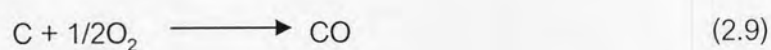
เป็นปฏิกิริยาย้อนกลับได้ของคาร์บอนมอนอกไซด์กับไอน้ำได้คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์

## 2.6 ระบบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

ในปัจจุบันกระบวนการแกซิฟิเคชันมีการทดลองอยู่ 3 ระบบ คือ

### 2.6.1 การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ (low heating value gas or low Btu gas)

แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อนประมาณ  $3.3\text{-}5.6 \text{ MJ/m}^3$  ( $90\text{-}150 \text{ Btu/SCF}$ ) เกิดจากการเผาไหม้บางส่วนของถ่านกับอากาศ โดยมากมักจะมีไอน้ำอยู่ด้วย ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นดังนี้



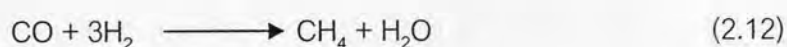
### 2.6.2 การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนปานกลาง (medium heating value gas or medium Btu gas)

แก๊สเชื้อเพลิงมีค่าความร้อนประมาณ  $9.3\text{-}20.5 \text{ MJ/m}^3$  ( $250\text{-}550 \text{ Btu/SCF}$ ) กระบวนการนี้ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ที่ได้จากการแยกออกจากอากาศ เพื่อใช้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (partial oxidation) การไม่มีไฮโดรเจนจะทำให้ค่าความร้อนสูงขึ้น



### 2.6.3 การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูง (high heating value gas or high Btu gas)

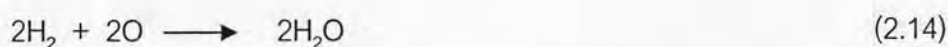
ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้เทียบเท่ากับ synthesis gas (SNG) ส่วนประกอบของแก๊สนี้มักเป็นมีเทนเกือบบริสุทธิ์ ซึ่งจาก medium Btu gas สามารถเปลี่ยนเป็น SNG ได้โดยกระบวนการมีเทนเนชัน (methanation) ที่อุณหภูมิต่ำ เกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเป็นแก๊สมีเทนและน้ำ ดังสมการ



### 2.7 กระบวนการแบบเบดนิ่ง (Fixed-bed gasifier)

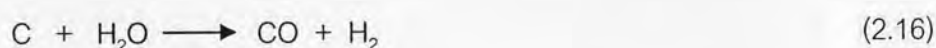
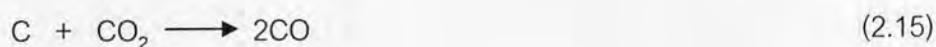
สำหรับเตาผลิตแก๊สแบบนี้ ภายในเตาจะมีตัวรองรับเชื้อเพลิงอยู่ จึงเปรียบเสมือนว่าเชื้อเพลิงนั้นอยู่กับที่ตลอดเวลา เมื่อเปรียบเทียบกับการไหลของอากาศ หรือออกซิเจนที่ป้อนเข้าไป ภายในเตาผลิตแก๊สแบบ fixed bed นั้นสามารถแบ่งออกเป็นบริเวณต่างๆ ได้ 4 บริเวณ โดยจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ปฏิกิริยา และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณ ซึ่งประกอบไปด้วย

- บริเวณเผาไหม้ (combustion zone) บริเวณนี้จะเป็นบริเวณที่เชื้อเพลิงสัมผัสกับสาร oxidant ที่ถูกป้อนเข้าไปในเตา ซึ่งสาร oxidant นี้ อาจจะเป็นอากาศ ออกซิเจน หรือออกซิเจนผสมกับไอน้ำ ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกันระหว่างออกซิเจนกับคาร์บอนและไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง ซึ่งทำให้ได้คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และไอน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ดังสมการ



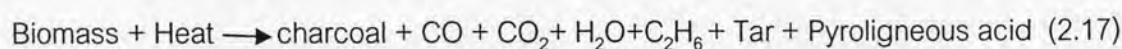
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยอุณหภูมิในบริเวณนี้จะอยู่ระหว่าง 900-1200 องศาเซลเซียส ความร้อนที่เกิดขึ้นในบริเวณเผาไหม้จะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาคูดความร้อนในบริเวณที่เกิดการรีดักชัน และไพโรไลซิส โดยผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากปฏิกิริยาในบริเวณนี้ คือ ความร้อนและเถ้า

- บริเวณที่เกิดการรีดักชัน (reduction zone) คาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากบริเวณที่เกิดการเผาไหม้จะไหลผ่านเข้าบริเวณที่เกิดการรีดักชัน ซึ่งจะเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นแก๊สที่เผาไหม้ไม่ได้ ให้เป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้ โดยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะไหลผ่านคาร์บอนที่ร้อนและเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังสมการ



อุณหภูมิในบริเวณนี้จะมีค่าอยู่ในช่วง 600-700 องศาเซลเซียส ในกรณีที่ต้องการเพิ่มปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์นั้น สามารถทำได้โดยการฉีดไอน้ำเข้าไป ซึ่งไอน้ำจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนได้คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น โดยจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส

- บริเวณที่เกิดการไพโรไลซิส (pyrolysis zone) ในบริเวณนี้จะเป็นบริเวณที่มีการสลายสารอินทรีย์ในเชื้อเพลิง โดยความร้อนที่ใช้ในบริเวณนี้เป็นความร้อนที่ได้จากบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ โดยอุณหภูมิในบริเวณนี้จะอยู่ระหว่าง 450-600 องศาเซลเซียส สารระเหยได้ที่ได้จากการสลายสารอินทรีย์นั้นจะประกอบไปด้วยเมทานอล กรดอะซีติก ทาร์ และแก๊สต่างๆซึ่งเป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้และเผาไหม้ไม่ได้ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน นอกจากนี้ยังได้ของแข็งซึ่งอยู่ในรูปของถ่านชาร์ ดังสมการ



- บริเวณอบแห้ง (drying zone) ในบริเวณนี้อุณหภูมิจะไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของสารระเหยต่างๆ โดยความร้อนที่ได้จากบริเวณที่เกิดไพโรไลซิสจะระเหยความชื้นที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงให้ออกมาในรูปของไอน้ำ โดยอุณหภูมิในบริเวณนี้จะอยู่ที่ประมาณ 100-135 องศาเซลเซียส

เตาผลิตแก๊สแบบนี้เมื่อแบ่งตามทิศทางการไหลของอากาศ เมื่อเทียบกับการไหลเวียนของเชื้อเพลิง จะสามารถแบ่งได้ 3 ชนิด คือ

### 2.7.1 Updraft Gasifier

เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้เป็นแบบที่ใช้เริ่มแรกและเป็นแบบที่ง่ายที่สุด เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าทางส่วนบนของเครื่องและอากาศจะถูกส่งผ่านตะแกรงเข้ามาทางด้านล่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ข) บริเวณเหนือตะแกรงขึ้นไปจะมีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงขึ้น ซึ่งเรียกบริเวณนี้ว่า combustion zone เมื่ออากาศผ่านเข้าไปบริเวณ combustion zone จะเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ แก๊สร้อนที่ผ่านมาจาก combustion zone จะมีอุณหภูมิสูงและถูกส่งผ่านไปยัง reduction zone ซึ่งเป็นโซนที่มีปริมาณคาร์บอนมากเพียงพอที่จะก่อให้เกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน หลังจากนั้นแก๊สที่ได้จะไหลเข้าสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในชั้นของเชื้อเพลิง และกลั่นสลายในช่วงอุณหภูมิ 200-500 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นแก๊สก็จะไหลเข้าสู่ชั้นของเชื้อเพลิงที่ขึ้น

เนื่องจากแก๊สยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่ จึงไประเหยน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงเหล่านั้น ทำให้แก๊สที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์มีอุณหภูมิต่ำลง สารระเหยและน้ำมันที่ที่เกิดขึ้นในช่วงการกลั่นสลายจะติดออกไปกับแก๊สเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้น ดังนั้นแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบ updraft gasifier จะมีปริมาณของน้ำมันที่มาก บางครั้งอาจถึง 20% ของน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสชีวมวล

แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบ updraft gasifier มีอุณหภูมิต่ำลงและมีปริมาณสารไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันที่มาก ทำให้มีค่าความร้อนมาก เป็นต้องมีหน่วยทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิงก่อนนำเชื้อเพลิงไปหมუნกัณฑ์แก๊ส ข้อดีหลักของเครื่องปฏิกรณ์แบบ updraft gasifier คือ ติดตั้งง่ายและมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูง

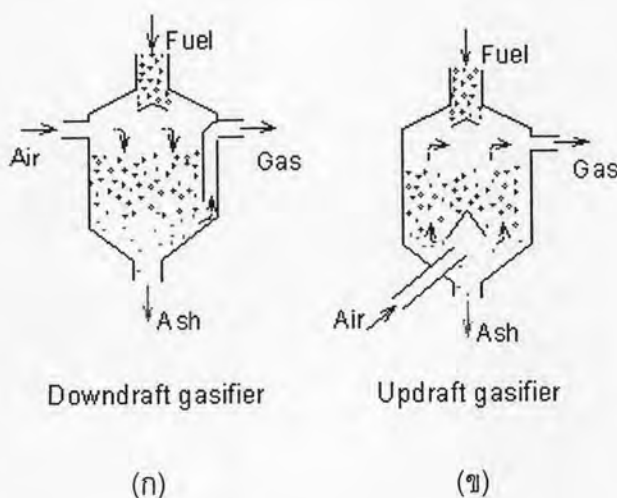
### 2.7.2 Downdraft Gasifier

เครื่องปฏิกรณ์ gasifier แบบนี้ออกแบบมาเพื่อขจัดน้ำมันที่ในแก๊สเชื้อเพลิงโดยเฉพาะ อากาศจะถูกดูดผ่านจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ก) ผ่านกลุ่มของหัวฉีดซึ่งเรียกว่า tuyers บริเวณหัวฉีดจะเป็นบริเวณของโซน combustion แก๊สที่ได้จากโซน combustion จะถูก reduced ในขณะที่ไหลลงสู่ด้านล่างและผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อนซึ่งอยู่เหนือตะแกรงเล็กน้อยขณะเดียวกันในชั้นของเชื้อเพลิงที่อยู่ทางด้านบนของโซน combustion จะมีปริมาณออกซิเจนน้อยมากทำให้เกิดการกลั่นสลาย และน้ำมันที่ที่เกิดจากการกลั่นสลายจะไหลผ่านชั้นคาร์บอนที่ร้อน ทำให้น้ำมันเกิดการแตกตัวเป็นแก๊ส ซึ่งการแตกตัวนี้จะเกิดอุณหภูมิต่ำในช่วงระหว่าง 800-1,000 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาดูดความ

ร้อนจะทำให้แก๊สที่ได้มีอุณหภูมิต่ำลง แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ปฏิกิริยาคายความร้อนจะทำให้แก๊สที่ได้มีอุณหภูมิสูงขึ้น แก๊สที่ผ่านโซน combustion จะมีส่วนประกอบของน้ำมันทาร์ลดลงเหลือน้อยกว่า 10% ของน้ำมันทาร์ที่ได้จาก updraft gasifier และแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะสะอาดกว่า

การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงโดยเครื่องปฏิกรณ์แบบ downdraft gasifier นี้ง่าย และมีความน่าเชื่อถือสำหรับเชื้อเพลิงที่ได้ (มีความชื้นต่ำกว่า 30%) เนื่องจากว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีปริมาณน้ำมันทาร์ต่ำ

เครื่องปฏิกรณ์แบบ downdraft gasifier จึงเหมาะกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีเครื่องยนต์สันดาปภายใน ที่มีขนาดกำลังการผลิตไม่เกิน 500 kg/h หรือ 500 kWe



รูปที่ 2.1 แสดงทิศทางการไหลของอากาศในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบ็ดนี้  
(อาณาณี เหลืองนฤมิตชัย, 2538)

## 2.8 การทำแก๊สให้สะอาด (Gas Cleaning)

การทำแก๊สเชื้อเพลิงที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ gasifier ให้สะอาดนับเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการนำแก๊สเชื้อเพลิงมาเผาไหม้ในกังหันแก๊ส เนื่องจากเป็นการกำจัดและป้องกันปัญหาด้านมลภาวะที่อาจเกิดขึ้น อีกทั้งยังเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบและลดปัญหาการเสียหายของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเนื่องจากการกัดกร่อนของแก๊สกรด หรือการสึกกร่อนด้วยอนุภาคของแข็ง

แก๊สเชื้อเพลิงที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ gasifier จะมีสารเจือปนดังแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งปริมาณของสารเจือปนนี้จะขึ้นอยู่กับกระบวนการแก๊สพิเคชันและคุณลักษณะของเชื้อเพลิงที่ใช้

ตารางที่ 2.3 สิ่งเจือปนในแก๊ส ปัญหาและกระบวนการทำแก๊สให้สะอาด  
(กระทรวงพลังงาน ,2549)

Contaminant	Examples	Problems	Cleanup method
Particulates	ash, char, fluid bed materials	Erosion	Filtration,scrubbing
Alkali metals	Sodium and potassium compounds	Hot corrosion	Cooling,condensation,filtration, adsorption
Fuel nitrogen	Mainly NH <sub>3</sub> and HCN	NO <sub>x</sub> formation	Scrubbing, SCRa
Tars	Refractory aromatics	Clog filters,difficult to burn, deposit internally	Tar cracking, Tar removal
Sulfur, chlorine	H <sub>2</sub> S, HCl	Corrosion, emissions	Lime or dolomite scrubbing or absorption

### 2.8.1 Hot Gas Cleanup for Particulate

ในแก๊สเชื้อเพลิงจะมีอนุภาคที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ที่มีขนาดเล็กมากซึ่งกำจัดออกได้ยากโดยไซโคลน มีรายงานว่าไม่สามารถลดปริมาณของอนุภาคให้น้อยกว่า 5-30 กรัมลูกบาศก์เมตรได้โดยใช้ไซโคลนประสิทธิภาพสูง แต่ควรใช้การกรองโดย sintered metal or ceramic filters

อย่างไรก็ตาม มีรายงานว่าในการทำความสะอาดแก๊สจากไม้ (wood-derived gas) เกิดการอุดตันของ filters เนื่องจากเขม่าซึ่งเกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อนของน้ำมันทาร์ ปัญหานี้แก้ได้โดยลดอุณหภูมิของแก๊สให้ต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียส และลดความเร็วของแก๊สที่ไหลผ่าน filters อย่างไรก็ตามเมื่อลดอุณหภูมิของแก๊สให้ต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส จะเกิดปัญหาของการควบแน่นของน้ำมันทาร์ ปัจจุบันมีการพัฒนาระบบการกรองที่เรียกว่า ceramic candle filters ซึ่งจะมีการติดตั้ง automatic pulsing เพื่อกำจัด accumulated filter cake ที่เกาะอยู่ที่ filter

## 2.8.2 Tar Cracking

ความเข้มข้นของน้ำมันทาร์ในแก๊สเชื้อเพลิงจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิที่แก๊สฟลายซึ่งความเข้มข้นของน้ำมันทาร์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณน้ำมันทาร์จะเป็นฟังก์ชันของชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ gasifier และสภาวะที่ดำเนินการนอกจากนี้ ปริมาณและคุณลักษณะของน้ำมันทาร์จะขึ้นกับเชื้อเพลิงด้วย มีรายงานว่าน้ำมันทาร์ที่ได้จากการแก๊สฟลายไม่มีปริมาณมากกว่าน้ำมันทาร์ที่ได้จากการแก๊สฟลายถ่านหิน ซึ่งน้ำมันทาร์นี้จะทำปฏิกิริยาต่อเกิดเป็นเขม่าซึ่งจะทำให้ filters อุดตัน

วิธีการกำจัดน้ำมันทาร์มี 2 วิธีหลักๆ ได้แก่

- catalytic cracking โดยการใช้โคโลไมต์หรือนิกเกิล
- thermal cracking โดยวิธี partial oxidation หรือ direct thermal contact

## 2.8.3 Catalytic cracking

มีรายงานว่ากำจัดน้ำมันทาร์โดยวิธี catalytic cracking มีประสิทธิภาพมาก โดยสามารถเปลี่ยนน้ำมันทาร์ได้มากกว่า 99% โดยใช้โคโลไมต์หรือตัวเร่งปฏิกิริยาประเภท nickel based ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 800-900 องศาเซลเซียส

ปัญหาเรื่อง catalyst deactivation ไม่ค่อยพบในตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ปัญหาที่พบส่วนใหญ่เป็นการเกาะของคาร์บอนบนตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสามารถ reactivate ได้โดยคาร์บอนบนตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกแก๊สฟลายเมื่ออุณหภูมิของเบดสูงขึ้น

## 2.8.4 Thermal Cracking

น้ำมันทาร์ที่ได้จากชีวมวลจะสลายตัวด้วยความร้อนยากกว่าน้ำมันทาร์ที่ได้จากถ่านหิน ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะกำจัดน้ำมันทาร์ด้วยวิธี thermal treatment อย่างเดียว มีหลายวิธีในการกำจัดน้ำมันทาร์โดย thermal cracking เช่น

1. เพิ่ม residence time ที่บริเวณ freeboard ในเครื่องปฏิกรณ์ gasifier แบบ fluid bed gasifier แต่วิธีนี้ได้ผลเพียงแค่บางส่วน
2. สัมผัสโดยตรงกับพื้นผิวที่ให้ความร้อน ซึ่งวิธีนี้ต้องใช้พลังงานในการให้ความร้อนพื้นผิว เป็นการลดประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ วิธีนี้ได้ผลเพียงแค่บางส่วนเช่นกัน

3. ออกซิเดชันบางส่วน (partial oxidation) โดยเติมอากาศหรือออกซิเจน วิธีนี้จะทำให้ปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพลดลงและเพิ่มค่าใช้จ่ายในการเติมออกซิเจน วิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,300 องศาเซลเซียส และเป็นระบบ oxygen gasification

### 2.8.5 Tar Removal

วิธี water scrubbing ถือได้ว่าเป็นวิธีกำจัดทางกายภาพที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นละออง น้ำมันทาร์และสิ่งเจือปนอื่นๆ แต่ในทางปฏิบัติพบว่ามีปัญหาในการกำจัดน้ำมันทาร์ โดยเฉพาะในแง่ของประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันทาร์ ในการกำจัดน้ำมันทาร์จำเป็นต้องใช้วิธีจับทางกายภาพให้น้ำมันทาร์รวมตัวกัน (agglomeration) หรือจับตัวกัน มากกว่าจะใช้เพียงการลดอุณหภูมิ เป็นที่ทราบกันดีว่าน้ำมันทาร์จากชีวมวลนั้นรวมตัวกันยาก และจำเป็นต้องใช้ระบบบำบัดที่ยุ่งยากซับซ้อนในการกำจัดให้ได้ถึง 90%

### 2.8.6 Alkali Metal Compounds

ในการแกชฟายชีวมวลอาจทำให้สารประกอบของโลหะอัลคาไลที่อยู่ในเชื้อเพลิงเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอแล้วหลุดลอยออกมาพร้อมกับแก๊สเชื้อเพลิง เมื่อไอของสารเหล่านี้มากระทบกับบริเวณภายในเครื่องจักรที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดควบแน่นของมัน จะทำให้เกิดการควบแน่นได้ ซึ่งทำให้โลหะเหล่านี้เกาะรวมตัวกันเป็นก้อน หากมีสารดังกล่าวเกาะอยู่ตามผิวของเครื่องจักร โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณใบจักรของกังหันแก๊ส จะก่อให้เกิดปัญหาการเสื่อมสภาพของเครื่องจักร ส่งผลให้ระบบโดยรวมล้มเหลวได้

ดังนั้นในการกำจัดสารประกอบของโลหะอัลคาไลนี้จำเป็นต้องลดอุณหภูมิของแก๊สเพื่อให้สารประกอบเหล่านี้ควบแน่นเป็นอนุภาคเสียก่อน แล้วกำจัดโดยเครื่องแยกอนุภาคอุณหภูมิสูงสุดที่สามารถควบแน่นสารประกอบของโลหะอัลคาไลคือ ประมาณ 600 องศาเซลเซียส นอกจากนี้สารประกอบของโลหะอัลคาไลจะทำลาย ceramic filters ที่อุณหภูมิสูงจึงต้องลดอุณหภูมิของแก๊สเชื้อเพลิงก่อนผ่านไปยัง hot gas filter ดังที่กล่าวข้างต้น สารประกอบของโลหะอัลคาไลจะทำให้เกิดปัญหาที่บริเวณใบจักรของกังหันแก๊ส ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัดและลดปริมาณของสารประกอบโลหะอัลคาไลให้ต่ำกว่า 0.1 PPM ก่อนเข้ากังหันแก๊ส

### 2.8.7 Fuel-Bound Nitrogen

50-80% ของไนโตรเจนในเชื้อเพลิงจะถูกเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียและสารประกอบของไนโตรเจน เช่น แก๊สไฮโดรเจนไซยาไนด์ระหว่างแก๊สฟาย ซึ่งสารประกอบเหล่านี้จะเปลี่ยนเป็นสารประกอบ  $\text{NO}_x$  ระหว่างการเผาไหม้อีกที ซึ่งสารเหล่านี้ที่อยู่ในแก๊สเชื้อเพลิงจะต้องผ่านอุปกรณ์ที่ดักจับอนุภาค วิธีการกำจัดสารประกอบ  $\text{NO}_x$  ประกอบไปด้วย

1. ลดการเกิด  $\text{NO}_x$  โดยจำกัดปริมาณไนโตรเจนในเชื้อเพลิง ซึ่งสามารถทำได้โดยเลือกใช้เชื้อเพลิงที่มีปริมาณไนโตรเจนน้อยหรือผสมเชื้อเพลิงให้ได้เชื้อเพลิงที่มีปริมาณไนโตรเจนน้อย
2. ใช้วิธี wet scrubbing กำจัดแอมโมเนียและสารประกอบไนโตรเจนที่สามารถละลายได้ แต่วิธีนี้จะทำให้สูญเสียความร้อนไปส่วนหนึ่งซึ่งทำให้ประสิทธิภาพต่ำ
3. ใช้เทคนิค low- $\text{NO}_x$  combustion เพื่อลดปริมาณการเกิด  $\text{NO}_x$  ให้น้อยที่สุด
4. ใช้วิธี selective catalytic reduction (SCR) ที่ทางออกของเครื่องยนต์หรือกังหันแก๊ส โดยทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียเพื่อเปลี่ยน  $\text{NO}_x$  ให้เป็นไนโตรเจนและน้ำ อย่างไรก็ตามวิธีนี้ต้องลงทุนสูง

### 2.8.8 Sulfur

โดยทั่วไปกำมะถันไม่ถือว่าเป็นปัญหาสำคัญ เนื่องจากในขณะมวลฝอยชุมชนมีปริมาณกำมะถันน้อยมาก อย่างไรก็ตาม ในคุณลักษณะของกังหันแก๊สกำหนดให้มีปริมาณของสารประกอบกำมะถันในแก๊สเชื้อเพลิงไม่เกิน 1 PPM ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัดสารประกอบกำมะถันก่อนผ่านแก๊สเชื้อเพลิงเข้ากังหันแก๊ส โดยทั่วไปสารประกอบกำมะถันในแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากขยะมวลฝอยชุมชนจะมีปริมาณน้อยกว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ผ่านเชื้อเพลิงเข้ากังหันแก๊ส โดยทั่วไปสารประกอบกำมะถันในแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากขยะฝอยชุมชนจะมีปริมาณน้อยกว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากเชื้อเพลิงฟอสซิล ดังนั้นกระบวนการกำจัดสารประกอบกำมะถันจึงไม่ยุ่งยากและแพงเท่ากับในกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงฟอสซิล ถ้าในกระบวนการมีหน่วย tar cracker โดยใช้โดโลไมต์ ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) โดโลไมต์นี้จะดูดซับสารประกอบกำมะถันในปริมาณที่มากได้ด้วย แต่ก็ไม่สามารถกำจัดให้อยู่ในปริมาณที่ต้องการได้หน่วยกำจัดสารประกอบกำมะถันประกอบด้วย hot fixed bed of zinc oxide ซึ่งหน่วยกำจัดสารประกอบกำมะถันนี้มีราคาไม่แพงมาก แต่มีปัญหาเรื่องการกำจัด zinc sulfide ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากหน่วยนี้



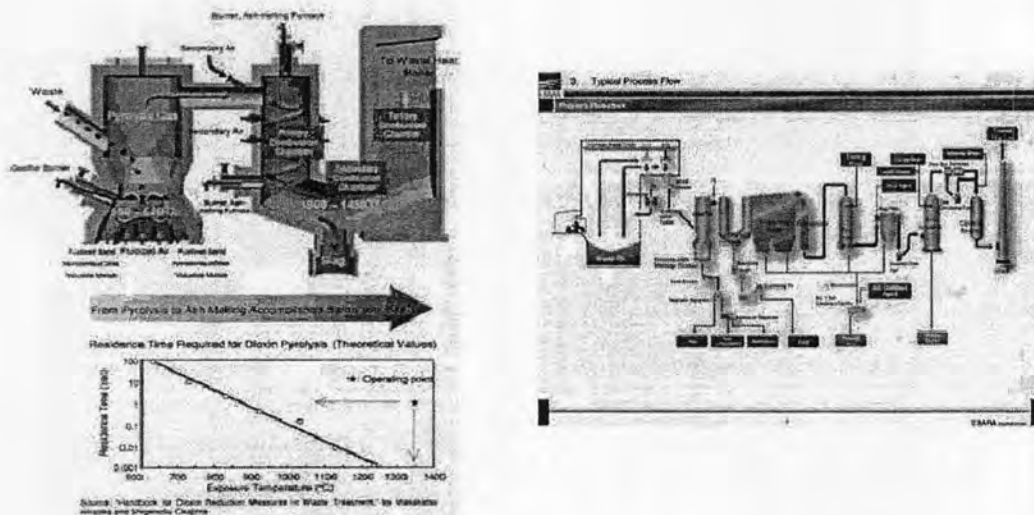
## 2.9 ตัวอย่างการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากขยะมูลฝอยชุมชน

### 2.9.1 บริษัท อีบารา คอร์ปอเรชั่น

บริษัท อีบารา คอร์ปอเรชั่น ก่อตั้งขึ้นเมื่อปี 1912 โดยเป็นบริษัทชั้นนำบริษัทหนึ่งของโลก ในการให้บริการเกี่ยวกับการผลิตเครื่องมือเครื่องใช้ทางชลศาสตร์ ผลิตภัณฑ์สำคัญได้แก่ ปั๊มน้ำ พัดลม คอมเพรสเซอร์ นอกจากนี้บริษัทยังได้ให้ความสำคัญของสังคมที่อยู่บนพื้นฐานสิ่งแวดล้อม ด้วยการให้ความสำคัญในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมอยู่ด้วยกันหลาย ประเภท เช่น ระบบ wind power generator, fuel cell, co-generation system, ระบบการควบคุมมลพิษ รวมถึงระบบเตาเผาขยะและระบบการเผาไหม้ในงานอุตสาหกรรม โดยยึดหลักสำคัญในความปลอดภัยของสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ ได้แก่ การวางระบบให้ปลอดภัยจาก dioxin

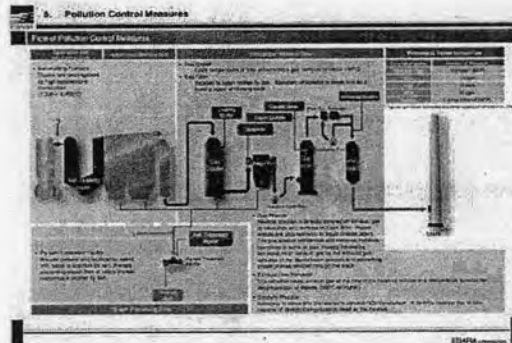
#### EBARA's Fluidized Bed Type Gasification and Ash-Melting System

เทคโนโลยีเตาเผาขยะมูลฝอยของ EBARA ซึ่งคณะทำงานได้เข้าไปศึกษาดูงานได้ผสม เทคโนโลยีเตาเผาขยะแบบ gasification ซึ่งทำงานแบบ fluidized bed เข้ากับระบบการหลอมซีเมนต์ โดยมีแผนผังแสดงการทำงานดังแสดงในรูปที่ 2.2



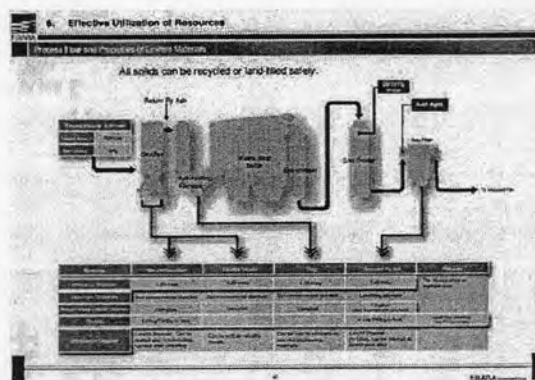
รูปที่ 2.2 ผังกระบวนการทำงานของระบบเตาเผา EBARA's fluidized bed type gasification and ash-melting system (กระทรวงพลังงาน ,2549)

จากรูปที่ 2.2 การทำงานของเตาเผาขยะมูลฝอยจะใช้หลักการของการทำให้เกิดแก๊ส (gasification) ชนิด fluidized bed แก๊สที่เกิดขึ้นจะไหลเข้าไปเผาไหม้ซ้ำในห้องเผาไหม้ที่สองที่อยู่ติดกัน และทำให้สามารถเพิ่มอุณหภูมิการเผาไหม้ได้สูงถึง 1,300 -1,450 องศาเซลเซียส จนหลอมเหลวกลายเป็น slag ก่อนจะไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่สาม จากการศึกษาพบว่า เมื่อปฏิบัติงานเตาเผาขยะด้วยอุณหภูมิที่สูงประมาณ 1,350 องศาเซลเซียส และเวลาที่แก๊สอยู่ในห้องเผาไหม้นานกว่า 1 วินาที จะสามารถทำลายสารไดออกซินที่เกิดขึ้น



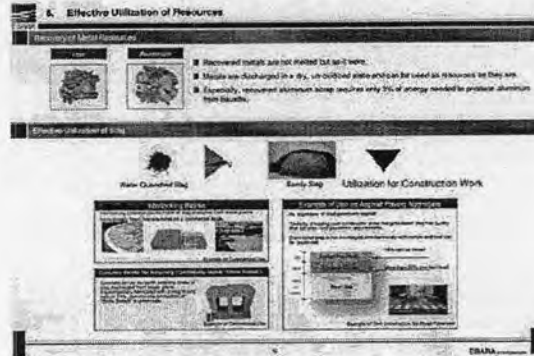
รูปที่ 2.3 ระบบควบคุมมลพิษอากาศจากระบบเตาเผาของ EBARA (กระทรวงพลังงาน ,2549)

ระบบควบคุมมลพิษอากาศจากระบบเตาเผาของ EBARA แสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งประกอบด้วย หลอดดูดอนุภาคน้ำ เครื่องกรองแบบถ่วงกรอง แก๊สสครับเบอร์ และ catalytic reactor ซึ่งสามารถใช้ในการควบคุมความเข้มข้นของฝุ่นละออง SO<sub>x</sub>, HCl, NO<sub>x</sub> และ dioxin ได้ในระดับที่เข้มงวดมากกว่ามาตรฐานการปล่อยมลพิษจากเตาเผาขยะมูลฝอยของประเทศญี่ปุ่น



รูปที่ 2.4 ของเสียที่เหลือจากการเผาขยะมูลฝอย (กระทรวงพลังงาน ,2549)

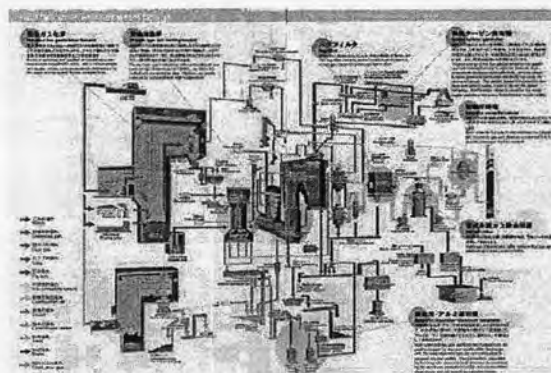
จากรูปที่ 2.4 ของเสียที่เหลือจากการเผาขยะมูลฝอยจะมีโลหะหนักในระดับที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่ยอมให้ปล่อยทิ้ง รวมทั้งได้ออกซิเจน และยังสามารถนำโลหะที่เหลือไปใช้ใหม่ ส่วน slag สามารถนำมาผสมกับวัสดุรองพื้นถนน หรือทำอิฐรูปทางเท้าได้ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การนำโลหะที่เหลือจากการเผาไหม้และ slag กลับไปใช้ใหม่ (กระทรวงพลังงาน ,2549)

## 2.9.2 โรงงานเตาเผาขยะมูลฝอยของเทศบาลเมือง Kawakuchi

เทศบาลเมือง Kawakuchi เป็นเขตเมืองที่ติดกับมหานครโตเกียว และมีประชากรอาศัยอยู่อย่างหนาแน่น เตาเผาขยะมูลฝอยของเมืองมีความสามารถในการเผาทำลายขยะมูลฝอยวันละ 420 ตัน (140 ตัน/วัน 3 ชุด) มีระบบคัดแยกขยะมูลฝอยก่อนเข้าสู่เตาเผา และความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 12 MW และใช้ในความร้อนแก่ recycling plaza facility ซึ่งเปิดให้สาธารณชนได้เข้ามาใช้บริการได้อย่างอิสระ



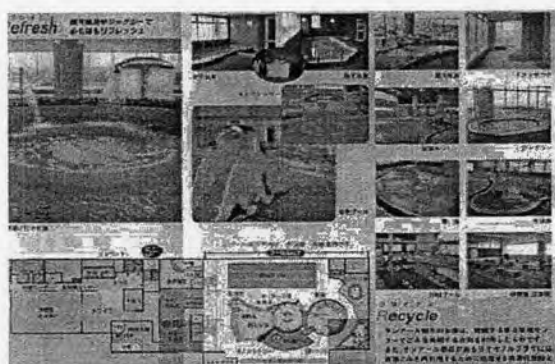
รูปที่ 2.6 แผนผังการทำงานของระบบเตาเผาเทศบาลเมือง Kawakuchi (กระทรวงพลังงาน ,2549)

จากรูปที่ 2.6 ขยะมูลฝอยจากแหล่งกำเนิดจะถ่ายทิ้งในบ่อพักขยะ นอกจากนี้ขี้เถ้าที่เหลือจากโรงงานเผาขยะมูลฝอยที่อยู่ใกล้เคียงก็จะนำมารวมกันบ่อพักเพื่อรอการเผาด้วยคอนกรีตปูจะจับขยะมูลฝอยและป้อนเข้าสู่เตาเผาขยะแบบ fluidized bed/gasification furnace และทำให้เกิดการเผาไหม้กำเนิดแก๊สเผาไหม้ ซึ่งจะไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่สองเพื่อทำการเผาไหม้ด้วยอุณหภูมิสูงและหลอมละลายขี้เถ้า แก๊สร้อนจะไหลผ่านเครื่องกำเนิดไอน้ำและไหลเข้าสู่ bag filter, wet scrubber, selective catalytic converter ก่อนปล่อยออกทางปล่องระบาย slag จะลำเลียงออกจากเตาเผา สำหรับน้ำเสียจะมีการบำบัดเพื่อปรับสภาพก่อนปล่อยออกสู่ภายนอก

การปฏิบัติงานของเตาเผาได้มีการประกันค่าความเข้มข้นของมลพิษที่ปล่อยออกจากโรงงาน โดยมีการตรวจวัดอย่างต่อเนื่องและแสดงผ่านจอบริเวณด้านหน้าของโรงงาน ค่าความเข้มข้นของมลพิษที่ประกันไว้เป็นดังนี้

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงค่าความเข้มข้นของมลพิษที่ประกันไว้ (กระทรวงพลังงาน ,2549)

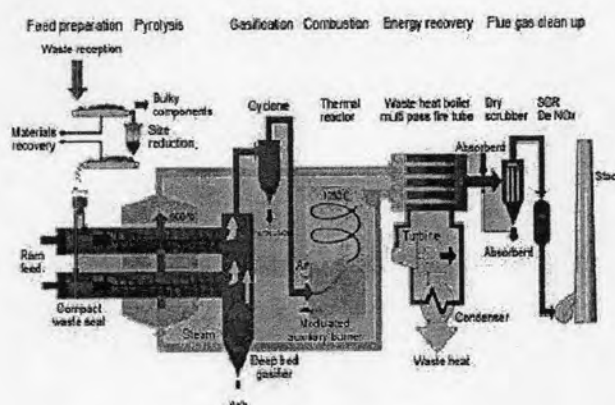
Item	Imposed Level
Dust	< 0.01 g/m <sup>3</sup> NTP
Hydrogen Chloride	< 10 ppm
Nitrogen Oxides	< 50 ppm
Sulfur Oxides	< 10 PPm
Dioxins	< 0.05 ng-TEQ/m <sup>3</sup> .NTP



รูปที่ 2.7 recycle plaza ซึ่งใช้ความร้อนจากโรงงานเผาขยะมูลฝอย (กระทรวงพลังงาน ,2549)

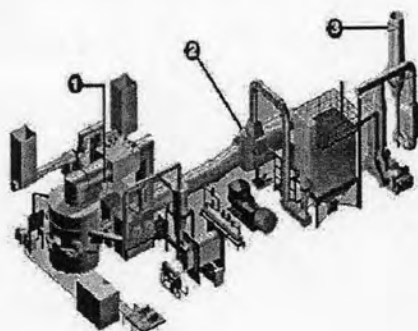
### 2.9.3 บริษัท Compact Power จำกัด

บริษัท compact power จำกัด ที่เมือง bristol ประเทศอังกฤษ ได้พัฒนาระบบ compact power process ขึ้นมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1990 โดยเริ่มจากการศึกษาการจัดการกากของเสียที่เกิดจากการบำบัดน้ำเสีย ที่ขนาด 360 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะระบบ gasification compact power (กระทรวงพลังงาน ,2549)

โรงกำจัดของเสียต้นแบบได้ถูกสร้างขึ้นที่เมือง Avonmouth มีความสามารถในการกำจัดของเสียต่างๆ เช่น กากตะกอนจากการกำจัดน้ำเสีย ขยะชุมชน ขยะติดเชื้อ ยางรถยนต์ และอื่นๆ โดยเฉพาะขยะชุมชน โรงกำจัดต้นแบบสามารถกำจัดได้จนถึง 8,000 ตันต่อปี ประสิทธิภาพของการผลิตพลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ 20% และประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำอยู่ที่ประมาณ 80% ที่ค่าความร้อนของขยะชุมชนที่ 10 MJ/kg

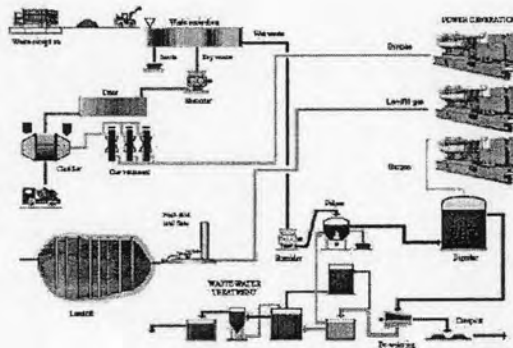


รูปที่ 2.9 องค์ประกอบสำคัญของระบบ gasification ของ compact power (กระทรวงพลังงาน ,2549)

จากรูปที่ 2.9 สามารถอธิบายขั้นตอนได้ดังนี้

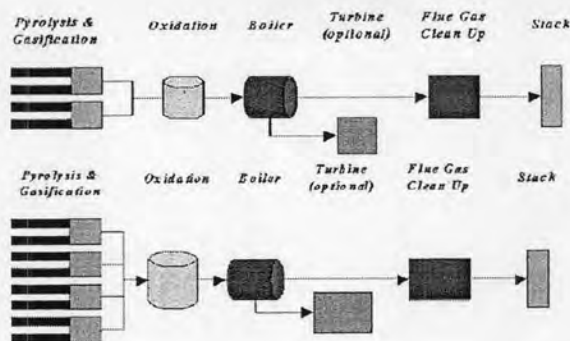
1. กระบวนการ pyrolysis และ gasification จะผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการผลิตพลังงานในกระบวนการต่อไป (oxidation)
2. แก๊สร้อนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ oxidation จะไหลเข้าสู่ steam boiler เพื่อผลิตไอน้ำ ซึ่งสามารถนำไปใช้เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าและ/หรือ ใช้ในกระบวนการความร้อนก็ได้
3. แก๊สที่เกิดขึ้นจะผ่านกระบวนการบำบัด ก่อนที่จะปล่อยสู่อากาศ

ทางบริษัทได้วางแผนการดำเนินการจะสร้างโรงกำจัดขยะชุมชนขนาด 60,000 ตันต่อปี ที่เมือง Dumfries ขนาด 500 ตันต่อวัน ที่เมืองบาห์ลี ประเทศอินโดนีเซียและที่ประเทศตุรกี โดยที่ทั้งสองประเทศนี้มีระบบการกำจัดแบบครบวงจร ซึ่งประกอบด้วย ระบบผลิตพลังงานจาก landfill gas biogas และแก๊สเชื้อเพลิง



รูปที่ 2.10 โรงกำจัดขยะชุมชนแบบครบวงจรของ compact power (กระทรวงพลังงาน, 2549)

จุดเด่นของระบบ compact power ก็คือระบบจะประกอบด้วยชิ้นส่วนที่มีลักษณะเป็นแบบ module ซึ่งทำให้มีความยืดหยุ่นในการรองรับปริมาณขยะชุมชน การเพิ่มความสามารถในการกำจัดขยะชุมชนมีมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 อุปกรณ์ในการรองรับปริมาณขยะชุมชนที่เพิ่มขึ้น (กระทรวงพลังงาน, 2549)

## 2.10 ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst)

คำว่า “ตัวเร่งปฏิกิริยา” มาจากภาษากรีก 2 คำ ได้แก่คำว่า คะตะ (cata) หมายถึง หัก (down) และไลซีน (lysein) หมายถึง แยกหรือแตก (spit or break) ดังนั้น “ตัวเร่งปฏิกิริยา” จึงหมายถึง ตัวที่ทำให้เกิดการแตกหักที่เกิดขึ้นบนโมเลกุล ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีมีหน้าที่เร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยา โดยทำงานอย่างมีประสิทธิภาพมากในการเลือกเร่งเฉพาะปฏิกิริยาที่ต้องการให้เกิด ในขณะที่เดียวกันก็ไม่ส่งเสริมปฏิกิริยาอื่นที่อาจเกิดขึ้นข้างเคียง การเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีมาใช้ยังคงต้องอาศัยวิธีการทดลองเป็นหลัก

ความว่องไว และความสามารถในการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีมีอิทธิพลโดยตรงจากลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของของแข็ง ได้มีความพยายามที่จะอธิบายถึงการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี โดยมองภาพว่าโมเลกุลของสารตั้งต้นที่ถูกเปลี่ยนสภาพไปมีพลังงานเพิ่มขึ้นหรือกลายเป็นสารผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยา (Intermediate) หลายทฤษฎีได้พยายามอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว ตัวอย่างเช่น ทฤษฎีสถานะทรานสิชัน (transition – state – theory) อธิบายว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีเป็นตัวช่วยลดพลังงานศักย์ขวางกั้น (potential energy barrier) ซึ่งสารตั้งต้นต้องมีเพื่อเปลี่ยนสารผลิตภัณฑ์ คือ ลดพลังงานการกระตุ้นของปฏิกิริยาต่ำลงนั่นเอง

### 2.10.1 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา

โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยสารหลายชนิด แต่พอจะแบ่งออกได้ดังนี้

### 2.10.1.1 สปีชีส์ที่ว่องไว (active species)

เป็นสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่แท้จริง ตัวเร่งปฏิกิริยาอาจประกอบด้วย active species ล้วนๆ แต่ในกรณีที่ active species เป็นสารที่มีราคาแพงหรือมีพื้นที่ผิวต่ำ จะนิยมใช้วิธีเคลือบ active species ลงบนตัวรองรับ

### 2.10.1.2 ตัวรองรับ (support)

มักจะเป็นสารที่มีราคาถูกและมีพื้นที่ผิวสูงหน้าที่หลักของ support คือการเพิ่มพื้นที่ผิวให้แก่ active species นอกจากนี้ในบางกรณีจะมี interaction กันระหว่าง support และ active species ซึ่งทำให้ active species มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น โดยทั่วไปจะเลือกใช้ support ที่เฉื่อยและไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ แต่ในบางกรณี support จะมีส่วนช่วยในการทำปฏิกิริยาด้วย เช่นในกรณีของ bi-functional catalyst

### 2.10.1.3 ตัวโปรโมเตอร์ (promoter)

เป็นสารที่ไม่ได้ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาโดยตรง แต่ช่วยให้ active species ทำหน้าที่ได้ดีขึ้น เช่นไปลดการ sintering และ fouling ลง

## 2.10.2 ตัวรองรับ (catalyst supports)

ตัวรองรับ คือ สารที่เฉื่อยที่ใช้สำหรับการกระจายตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาแพง เช่น โลหะ แพลทินัม สำหรับการใช้อยู่ที่อุณหภูมิสูงสุด หรือเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านเชิงกลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่อ่อน แต่อย่างไรก็ตามตัวรองรับอาจจะแสดงความว่องไวต่อการเร่งปฏิกิริยาด้วยขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยาและสภาวะของปฏิกิริยา และอาจจะทำปฏิกิริยาไปบางส่วนกับส่วนประกอบอื่นๆของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างกระบวนการผลิต เช่นเดียวกันตัวรองรับสามารถช่วยทำให้โครงสร้างที่ว่องไวต่อการเร่งปฏิกิริยามีความเสถียร

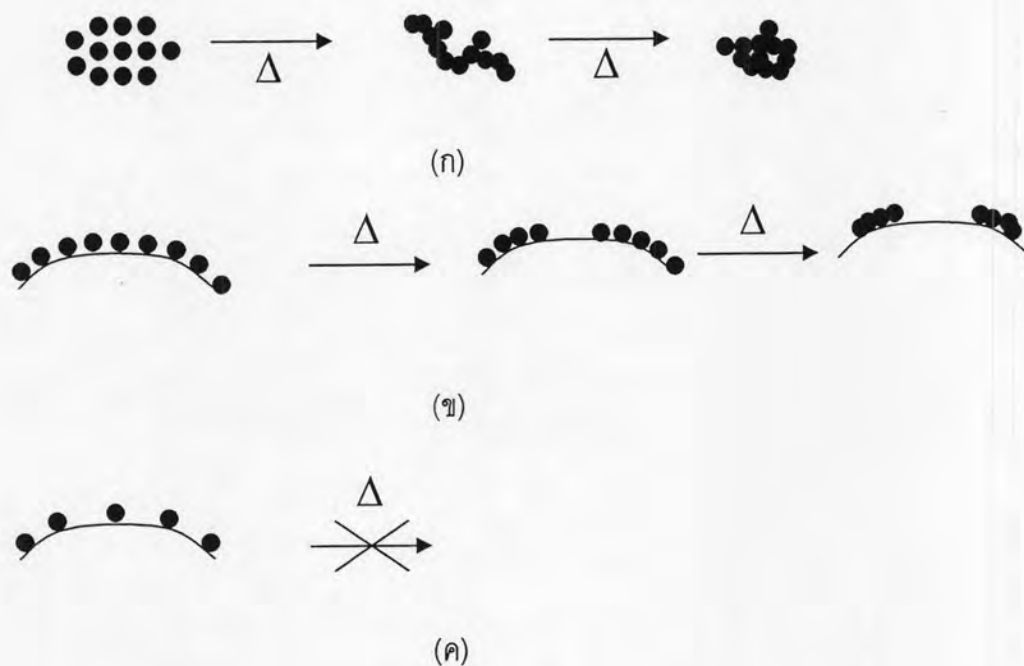
การเลือกตัวรองรับพิจารณาจากการมีลักษณะที่ต้องการของตัวรองรับ รวมทั้งผลทางด้านเคมีและสมบัติทางกายภาพก็มีความสำคัญ

- เฉื่อยต่อปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการ
- มีสมบัติเชิงกลที่ต้องการ ประกอบด้วย ทนต่อการขัดสี มีความแข็งแรง และทนต่อแรงกด



- เสียทรัพยากรใต้สภาวะของปฏิกิริยาและสภาวะที่ใช้เพื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ (regeneration)
- พื้นที่ผิว (ปกติต้องการพื้นที่ผิวสูง)
- มีรูพรุน ประกอบด้วย ขนาดรูพรุนเฉลี่ยและการกระจายของขนาดรูพรุน
- ราคาต่ำ

สิ่งที่สำคัญที่สุดของตัวรองรับนอกจากจะทำให้สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวของ active species แล้ว ในบางครั้งยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดการเกิดการหลอมรวมตัวกันของ active species ด้วย ซึ่งแสดงดังรูป ที่ 2.12



รูปที่ 2.12 บทบาทของตัวรองรับที่มีต่อการกระจายตัวของ active species: (ก) ไม่มีตัวรองรับ active species หลอมรวมตัวกันได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน (ข) active species ความเข้มข้นสูง บนพื้นผิวของตัวรองรับ ยังมีโอกาสที่จะหลอมรวมตัวกันที่อุณหภูมิสูง (ค) active species ความเข้มข้นต่ำบนพื้นผิวของตัวรองรับ โอกาสที่จะหลอมรวมตัวกันมีน้อย (ธรรร มงคลศรี)

### 2.10.2.1 โดโลไมต์ (Dolomite – $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ )

โดโลไมต์ประกอบด้วย  $\text{CaCO}_3$  ร้อยละ 54.35  $\text{MgCO}_3$  ร้อยละ 45.65 หรือ  $\text{MgO}$  ร้อยละ 21.7  $\text{CaO}$  ร้อยละ 30.4  $\text{CO}_2$  ร้อยละ 47.9 โดโลไมต์เป็นแร่เกิดจากตะกอนของ แคลเซียมและแมกนีเซียมทับถมกัน มีความแข็ง 2.5-4 ความถ่วงจำเพาะ 2.85

### 2.10.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะบนตัวรองรับ (metal supported catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารที่ช่วยเพิ่มอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่สนใจ โดยตัวเร่งปฏิกิริยามีผลช่วยเพิ่มอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเคมีไปข้างหน้า (forward rate) พร้อมกับกับเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาย้อนกลับ (reverse rate) ทำให้ปฏิกิริยาเคมีที่สนใจเข้าสู่สมดุลเคมี (chemical equilibrium) ได้เร็วขึ้นโดยไม่มีผลต่อสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ (thermodynamic) ของปฏิกิริยา เนื่องจากเป็นสมดุลเคมีเดียวกัน

ในอุตสาหกรรม ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ส่วนใหญ่พบอยู่ในรูปของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะบนตัวรองรับ ด้วยเหตุผลที่ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้มีข้อดีดังต่อไปนี้

1. เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถจัดหาหรือเตรียมขึ้นได้ง่าย และปลอดภัย
2. สามารถใช้ได้กับเครื่องปฏิกรณ์หลายชนิด และในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ตัวกลางเป็นของเหลวสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้โดยการกรอง
3. อนุภาคที่เป็นโลหะอยู่แยกกันอย่างเป็นอิสระเมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิสูง จึงไม่ทำให้อนุภาคโลหะรวมตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่
4. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ ตัวรองรับอาจเป็นตัวโปรโมเตอร์ (promoter) ได้อีกด้วย โดยส่วนข้อดีอื่นๆ ขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนั้นๆ และระบบของปฏิกิริยา ได้แก่ ธรรมชาติของโลหะ ชนิดของโปรโมเตอร์ และตัวพุง เป็นต้น

### 2.10.4 โลหะนิกเกิล

นิกเกิลเป็นธาตุที่อยู่ในหมู่เดียวกับโลหะโนเบล (nobel metal) เช่น พาราเดียม (Pd) และทองคำขาว (Pt) เป็นต้น นิกเกิลเป็นธาตุที่มีเลขอะตอม (atomic number) 28 น้ำหนักอะตอม (atomic weight) 58.69 ความหนาแน่น (density) 8.910 กรัม/มิลลิลิตร จุดหลอมเหลว (melting point) 1445 องศาเซลเซียส จุดเดือด (boiling point) 2900 องศาเซลเซียส อิเล็กตรอนเนกเกติวิตี (electron negativity) 1.8 oxidation state 2.3 การจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนคือ (Ar)  $3d^8 4s^2$  นิกเกิลในรูปที่เป็นก้อนของแข็งไม่สามารถติดไฟได้ แต่เมื่อทำให้เป็นเส้นลวดนิกเกิลจะสามารถติดไฟเองได้ ส่วนเม็ดขนาดเล็กของนิกเกิลจะสามารถที่จะติดไฟได้ด้วยตัวเองเมื่อสัมผัสอากาศ

### 2.10.5 ขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาวีธีพันธุ

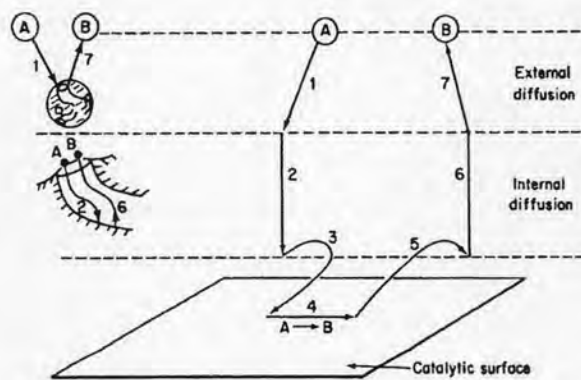
การเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาวีธีพันธุสามารถแบ่งออกได้เป็น 7 ขั้นตอน ดังนี้

1. การแพร่ของสารตั้งต้นจากของไหลผ่านชั้นฟิล์มมายังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

2. การแพร่ของสารตั้งต้นจากพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปตามรูพรุน
3. การดูดซับของสารตั้งต้นบนตำแหน่งที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยา (active site)
4. การเกิดปฏิกิริยาบนตำแหน่งที่ว่องไว
5. การหลุดของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นออกจากตำแหน่งที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยา
6. การแพร่ของผลิตภัณฑ์จากภายในรูพรุนออกมายังพื้นผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา
7. การแพร่ของผลิตภัณฑ์จากพื้นผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านชั้นฟิล์มกลับไปยังของไหลที่ไหลผ่าน

ขั้นตอนที่ 3, 4 และ 5 เป็นขั้นตอนที่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมี และอาจกล่าวได้ว่าเป็นขั้นตอนที่ต้องมีในการเกิดปฏิกิริยาเคมีด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

ส่วนขั้นตอนที่ 1, 2, 6 และ 7 นั้นเป็นขั้นตอนที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เป็นเพียงแค่ขั้นตอนของการแพร่ของสาร เมื่อใดก็ตามที่ขั้นตอนของการแพร่นี้ช้ากว่าขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาเคมี ปฏิกิริยาเคมีนั้นจะถูกควบคุมโดยกระบวนการแพร่ (diffusion limited or mass transport limited) เมื่อใดก็ตามที่อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาเคมีถูกควบคุมโดยการแพร่ แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยายังไม่ถูกใช้งานเต็มประสิทธิภาพ ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นฐานถูกแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นฐาน (วิโรจน์ บุญอำนาจวิทยา)

การควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยาเนื่องจากการแพร่ของสารนั้นเกิดได้ 2 ที่ด้วยกัน คือการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มจากของเหลวหรือแก๊สที่ไหลอยู่รอบๆ ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามายังพื้นผิวภายนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา (external mass transfer limitation) และการแพร่จากพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา (internal mass transfer limitation)

ความต้านทานการแพร่ของสารตั้งต้นจากของไหลที่ไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยามายังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ ถ้าหากของไหล

ไหลผ่านด้วยความเร็วสูง ชั้นฟิล์มที่ห่อหุ้มอยู่ก็จะบาง ทำให้สารตั้งต้นแพร่เข้าไปได้ง่ายขึ้นและทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ง่ายขึ้น แต่ถ้าของไหลไหลช้า ชั้นฟิล์มที่ห่อหุ้มอยู่ก็จะมีคความหนามาก ทำให้สารตั้งต้นแพร่เข้าไปยังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ลำบากปฏิกิริยาจะเกิดน้อยลง ตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกใช้งานไม่เต็มความสามารถ แต่ถ้าใช้ความเร็วที่สูงเกินไป เวลาที่สารตั้งต้นมีโอกาสสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาก็จะลดลง ปฏิกิริยาก็จะเกิดน้อยลง

ขั้นตอนการแพร่ของสารตั้งต้นจากพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปในรูพรุนจะไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของของไหลที่ไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราเร็วของขั้นตอนนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลของสารตั้งต้น ถ้าหากอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดใหญ่ โอกาสที่สารตั้งต้นจะแพร่เข้าไปถึงแกนกลางจะลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้น active sites ที่อยู่บริเวณตอนกลางจะไม่ถูกใช้งาน และถ้า active sites เหล่านี้เป็นโลหะมีค่า (เช่น Pt, Au, Ag) ก็จะเป็นการสิ้นเปลือง ดังนั้นในกรณีของปฏิกิริยาคายความร้อนหรืออนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดใหญ่ ตำแหน่งที่ว่องไว (active sites) จะอยู่เฉพาะบริเวณผิวนอกเท่านั้น การลดความต้านทานการแพร่ภายในรูพรุนทำได้โดยการทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดอนุภาคเล็ก

ขั้นตอนการดูดซับของสารตั้งต้นบน active sites เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของการเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ เพราะการเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์นั้น จำเป็นต้องมีการดูดซับของสารตั้งต้นอย่างน้อยหนึ่งชนิดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ในกรณีที่สารตั้งต้นมีมากกว่าหนึ่งชนิด จะเกิดการแข่งขันการดูดซับบนพื้นผิว ถ้าหากสารตั้งต้นตัวหนึ่งสามารถเกาะลงบนพื้นผิวได้ดีกว่าสารตั้งต้นอีกตัวหนึ่งมาก ปฏิกิริยาจะเกิดได้น้อยเพราะความเข้มข้นของสารตั้งต้นบนพื้นผิวของสารที่เกาะได้น้อยจะมีค่าต่ำ ที่สภาวะที่เหมาะสมปริมาณของสารตั้งต้นแต่ละตัวที่อยู่บนพื้นผิวควรมีปริมาณที่พอเหมาะ

#### 2.10.6 การดูดซับ (adsorption)

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งกับตัวสารตั้งต้นที่เป็นแก๊ส ในกรณีที่เป็นระบบของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (heterogeneous catalyst) โดยตัวเร่งปฏิกิริยานี้เรียกว่าตัวดูดซับ (adsorbent) และแก๊สเรียกว่าตัวถูกดูดซับ (adsorbate)

การดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ การดูดซับทางกายภาพ (physisorption) และการดูดซับทางเคมี (chemisorption) การดูดซับทั้ง 2 ชนิด มีความแตกต่างกันอย่างมากทั้งลักษณะความแข็งแรงของการดูดซับและจำนวนชั้นการดูดซับ แสดงดังตารางที่

ตารางที่ 2.5 ความแตกต่างของการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ

(วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ, 2534 :13)

ลักษณะ	การดูดซับทางเคมี	การดูดซับทางกายภาพ
เอนทาลปีของการดูดซับ ( $-\Delta H_{ads}$ ) (กิโลจูลต่อโมล)	400-800	8-20
พลังงานกระตุ้น (E)	มีค่าน้อย	มีค่าเป็นศูนย์
อุณหภูมิการดูดซับ	ขึ้นกับค่าพลังงานกระตุ้น โดยปกติมีค่าต่ำ	ขึ้นกับจุดเดือดของสาร โดยปกติมีค่าต่ำ
จำนวนชั้นการดูดซับ	ไม่เกิน 1 ชั้น	เกิน 1 ชั้นได้

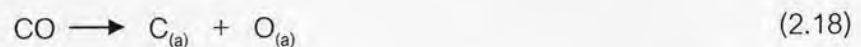
#### 2.10.6.1 การดูดซับทางกายภาพ

เป็นการดูดซับที่เกิดบนผิวของของแข็งเนื่องจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals forces) แรงนี้รวมถึงแรงดึงดูดระหว่างประจุ (electrostatic attraction) แรงดึงดูดที่เกิดจากแรงของความเป็นขั้วถาวร (dipole moment) ของโมเลกุล และรวมถึงแรงดึงดูดเนื่องจากการเหนี่ยวนำของโมเลกุลจนเกิดเป็นขั้ว จากการกระจายของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (electron density) ที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (non-polar atoms or molecules) เรียกแรงเหล่านี้ว่า แรงดึงดูดของขั้วเหนี่ยวนำ (induced dipolar attraction) แรงเหล่านี้เกิดขึ้นระหว่างอะตอมหรือโมเลกุล ทำให้เกิดแรงดึงดูดทางกายภาพตรงบริเวณผิว ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล ทำให้เกิดแรงดึงดูดทางกายภาพตรงบริเวณผิว ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเท่านั้น

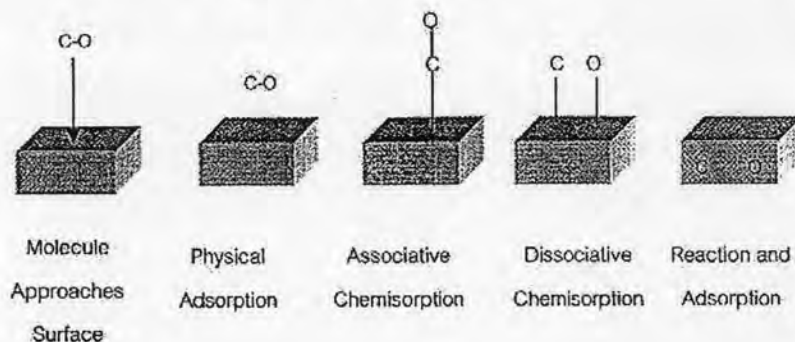
#### 2.10.6.2 การดูดซับทางเคมี

เป็นการดูดซับที่เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ โดยช่องว่างของอิเล็กตรอนอิสระที่ผิวสัมผัสของตัวดูดซับ จะดึงดูดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ ทำให้ตัวถูกดูดซับเกาะติดบนตัวดูดซับ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นการแทนที่ของโมเลกุล (rearrangement) โดยอิเล็กตรอน

การดูดซับทางเคมีสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด ตามลักษณะการเกาะของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ คือการดูดซับทางเคมีแบบรวมโมเลกุล (associative chemisorption) และการดูดซับทางเคมีแบบแยกโมเลกุล (dissociative chemisorption) แสดงดังรูปที่ 2.14 พิจารณาการดูดซับของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บนตัวพวยงแอลฟาอะลูมินา บนโลหะทองแดง และบนโลหะนิกเกิล พบว่าไม่เกิดพันธะเคมีขึ้นระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับแอลฟาอะลูมินา แต่เกิดการดูดซับทางกายภาพ เนื่องจากตัวพวยงอะลูมินาไม่สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้กับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แต่เกิดการดูดซับทางกายภาพขึ้นแทน พลังงานของการดูดซับระหว่างโมเลกุลแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับคาร์บอนมอนอกไซด์เหลวบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา เท่ากับพลังงานของการดูดซับทางกายภาพ โดยปรากฏการณ์นี้เกิดที่อุณหภูมิต่ำเท่านั้น การเกิดการดูดซับทางเคมีระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บนโลหะทองแดง เป็นการดูดซับทางเคมีแบบรวมโมเลกุล เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับโลหะทองแดงมีพลังงานมากกว่าพลังงานของการดูดซับทางกายภาพ แต่ไม่มากพอที่จะทำลายพันธะระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจน (C-O) ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ในกรณีการดูดซับระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บนโลหะนิกเกิล อันตรกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับโลหะมีมากพอที่จะทำให้พันธะระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจนแตกออก ดังสมการ



จากการเกิดการดูดซับทางเคมีแบบแตกโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บนนิกเกิลนำไปสู่การเตรียมมีเทนด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับแก๊สไฮโดรเจนดังสมการข้างล่าง



รูปที่ 2.14 การดูดซับลักษณะต่าง ๆ ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บนพื้นผิวของแข็งชนิดต่าง ๆ

(Spencer, M. S., 1989:31)

## 2.10.7 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะบนตัวรองรับ (preparation of supported metal catalysts)

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยามีด้วยกันหลายขั้นตอน สามารถแบ่งขั้นตอนการเตรียมได้ดังต่อไปนี้

1. การเตรียมสารตั้งต้นและ active phase การเตรียมสารตั้งต้นและ active phase ทำได้ด้วยกันหลายวิธี ที่สำคัญมีอยู่ 2 วิธีคือวิธีการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) และการเคลือบฝัง (impregnation) การเตรียมโดยวิธีการตกตะกอนร่วมนั้น active phase และ support precursor จะถูกผสมเข้าด้วยกันในรูปแบบสารละลาย จากนั้นจะทำการระเหยเอาตัวทำละลายออกเพื่อให้ของผสมตกตะกอนออกมา ข้อดีของวิธีนี้คือการกระจายตัวของ active phase เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ
2. การล้าง เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนที่เหลืออยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยา
3. การอบแห้ง โดยมากมักอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ประมาณ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ให้น้ำออกจากโครงสร้าง
4. การจัดรูปโดยรูปทรงที่นิยมใช้อาจเป็นเม็ดเล็กๆ (granule) ทรงกลม (sphere) เม็ดแบน (tablet) วงแหวน (ring) หรือทรงกระบอก (cylinder)
5. การเผาที่อุณหภูมิสูง มีเหตุผลหลายประการ คือ
  - เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนที่ไม่ต้องการ เช่น ตัวประสาน (binder) สารหล่อลื่น รวมทั้งอิมอนบวกและอิมอนลบที่ไม่เสถียรและระเหยได้ง่าย
  - อุณหภูมิที่ใช้ควรจะสูงพอเพื่อทำให้เกิดสภาพการเริ่มต้นของการรวมตัวของผลึก (incipient sintering) แต่ต้องไม่ให้เกิดการรวมตัวของผลึกด้วยความร้อนมากเกินไป (excessive sintering) ถ้าเกิดสภาพนี้แล้วจะลดความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากพื้นที่ผิวที่เป็นตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาลดลง และยังอาจเป็นสาเหตุจำกัดการแพร่กระจาย (diffusional limitation) อันเนื่องจากขนาดของรูพรุนเล็กลง

แต่สาเหตุที่สำคัญที่สุด คือ ต้องการเปลี่ยนรูปเกลือโลหะให้เป็นโลหะออกไซด์ โดยทั่วไปการเลือกอุณหภูมิเพื่อใช้ในการเผานั้นขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งอุณหภูมิของ reactor

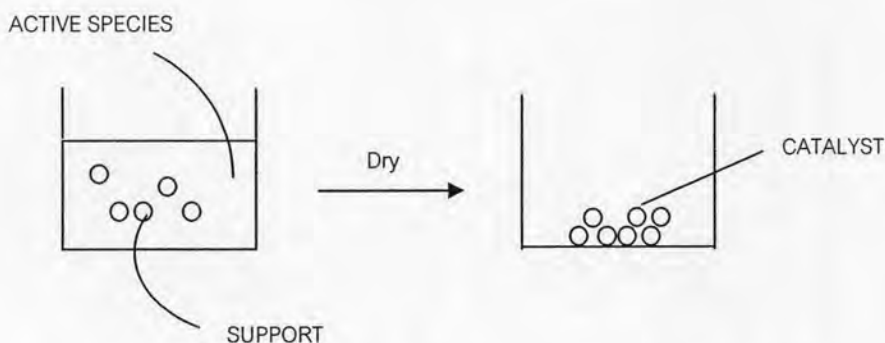
การเตรียมด้วยวิธีการเคลือบฝังเป็นวิธีที่ง่ายและใช้กันมากที่สุดในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ทำได้โดยการเติมตัวรองรับลงในสารละลายของเกลือโลหะ เกลือโลหะจะแพร่กระจายสู่ตัวรองรับ จากนั้นทำให้เกลือโลหะร้อนเพื่อให้เกลือโลหะที่อยู่บนตัวรองรับสลายตัวให้โลหะออกไซด์

เกาะบนตัว ข้อดีของวิธีการนี้คือสามารถควบคุมการกระจายตัวของเกลือโลหะให้อยู่เพียงแคผิว นอกหรือแพร่เข้าไปถึงภายในของตัวรองรับได้

### 2.10.7.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการเคลือบฝัง (impregnation)

วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ในวิธีการนี้จะนำเอาตัวรองรับซึ่งมักเป็นวัสดุที่มีรูพรุนมาสัมผัสกับสารละลายที่มี active species ละลายอยู่ วิธีการนี้ยังแบ่งย่อยลงไปอีก 2 วิธีคือ ชนิดเปียก (wet impregnation) และชนิดแห้ง (dry impregnation)

ในการเตรียมแบบ wet impregnation นั้น ตัวรองรับจะถูกแช่ลงในสารละลายที่เหมาะสมที่มี active species ละลายอยู่ ซึ่งโดยทั่วไปมักเป็นสารละลายของน้ำ จากนั้นจะค่อยๆ ทำการระเหยตัวทำละลายออกจนหมด เพื่อให้ active species ตกค้างอยู่บนตัวรองรับ แสดงดังรูปที่ 2.15 ในระหว่างการระเหยนี้อาจมีการควบคุมอุณหภูมิหรือปรับ pH ของสารละลายไปพร้อมกัน ข้อดีของวิธีการนี้คือตัวรองรับแต่ละตัวจะได้รับ active species สม่ำเสมอ แต่อาจมีปัญหากับการตกตะกอนที่ไม่พร้อมกันของเกลือของโลหะตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป อัตราส่วนของเกลือที่ตกตะกอนบนตัวรองรับมักจะแตกต่างไปจากสัดส่วนความเข้มข้นในสารละลาย



รูปที่ 2.15 แสดงการเตรียมด้วยวิธี wet impregnation (ธรรณ มงคลศรี)

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Anna Bjorklund และคณะ (2001) ศึกษาเกี่ยวกับการจัดการของเสียโดยรวม 2 เทคโนโลยีเข้าด้วยกัน ได้แก่ เทคโนโลยีการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากขยะ และเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับยานพาหนะ โดยวัตถุดิบและพลังงานจะผ่านระบบจัดการ 4 ส่วน คือ การเผา การฝังกลบ แกซิฟิเคชัน และแกซิฟิเคชันวัสดุใช้แล้ว พบว่า ในกระบวนการการผลิตแก๊สสังเคราะห์



จากขยะ จะได้แก๊สไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการเผาไหม้ซึ่งเป็นข้อดี เมื่อเปรียบเทียบกับกำมะถัน และด้านสิ่งแวดล้อมจะนำไฮโดรเจนจากระบวนการการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากขยะ ไปใช้เป็นเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับยานพาหนะ ซึ่งจะมีประสิทธิภาพมากกว่าระบบการขนส่งแบบเดิม

C.A. Sikalidis และ คณะ (2002) ศึกษากระบวนการทางความร้อนของ MSW และ วัสดุอื่น ๆ ที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ โดยทำการเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ของผสมในวัตถุดิบ ได้แก่ หินปูน ดินเหนียว ซิลิกา และเหล็กออกไซด์แห้ง โดย MSW ถูกแยกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่เป็น ดิน หิน เศษไม้ที่แตกหัก และวัสดุที่คล้ายแก้ว ซึ่งจะถูกทำให้แห้งใน rotary kiln ที่อุณหภูมิประมาณ 1100 องศาเซลเซียส ส่วนที่สองจะเป็นกระดาษ ไม้ พลาสติก หนัง เศษผ้า ไฟเบอร์ต่างๆ และวัตถุดิบต่างๆ ที่สามารถเผาไหม้ได้ โดยส่วนที่สองจะเผาถ่านหินเพื่อให้ความร้อนแก่ rotary kiln ปูนซีเมนต์ที่เผาแล้วจะถูกบดรวมกับยิปซัมเพื่อใช้ในการก่อสร้าง และจากการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์พบว่า MSW 500 ตัน สามารถผลิตปูนซีเมนต์ได้ 433 ตันต่อวัน

Changqing Dong และ คณะ (2002) ได้ทดลองผลิตพลังงานจาก MSW ร่วมกับถ่านหิน ใน 2 MWth ผ่านกระบวนการการเผาไหม้ ไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชัน ภายในเตาปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน โดยทำการศึกษาแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) ไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) ที่ถูกปล่อยออกมา โดยมีการทำ neural network ที่เป็นช่วงป้อนวัสดุ 3 ชั้น พบว่าปริมาณแก๊สมลพิษที่ปล่อยออกมามีค่าตรงกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

J.D. Murphy และ E. McKeogh (2004) ศึกษาการผลิตพลังงานจาก MSW ด้วย 4 เทคโนโลยี ได้แก่ การแปรรูปขยะมูลฝอยไปเป็นพลังงานความร้อนโดยใช้เตาเผา เทคโนโลยีการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากขยะ การผลิตแก๊สชีวภาพจากความร้อนและพลังงาน และการผลิตแก๊สชีวภาพเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในการขนส่ง ในกระบวนการการแปรรูปขยะมูลฝอยไปเป็นพลังงานความร้อนโดยใช้เตาเผา พบว่า โดยปกติกากของ MSW ที่เหลือจะนำไปเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และพลังงานความร้อน ซึ่งจะมีประสิทธิภาพ 20% และ 50% ตามลำดับ ซึ่งจะเป็นส่วนที่เป็นปัญหากับสิ่งแวดล้อมใน irish เทคโนโลยีการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากขยะจะไม่มีผลิตภัณฑ์ทางความร้อน แต่จะผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 34% ซึ่งมากกว่าการใช้เตาเผา และ greenhouse gas ต่อ kWh จะต่ำกว่า

C.H. Jung และ คณะ (2006) ศึกษาการไหลของโลหะในระบบการจัดการ MSW โดยวิเคราะห์สารประกอบของโลหะที่อยู่ภายในและความเข้มข้นของโลหะ พบว่าในส่วนของของเสียที่ไม่ถูกเผาไหม้จะมีปริมาณโลหะมาก และถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์จะมีปริมาณโลหะที่อยู่ภายในมากกว่าถ่านที่อยู่กันเตาเผา ส่วนการทดสอบน้ำที่ชะออกมา แสดงให้เห็นว่า แคดเมียม (Cd) และพาลาเดียม (Pd) ในถ่านชาร์และพาลาเดียมใน RDF มีปริมาณมากกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้สำหรับการฝังกลบในญี่ปุ่น และได้ตรวจสอบปริมาณของโลหะที่มีอยู่ในของเสียที่ป้อนเข้า โดยโลหะส่วนใหญ่ ยกเว้นโครเมียม (Cr) จะแปรตามอัตราส่วนของของเสีย ที่เป็นกระดาษ/สิ่งทอ/พลาสติก และของเสียที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้มีถึง 80% โดย Cr ประมาณ 30% จะมาจากหีบห่อที่เป็นพลาสติก

R. Xiao และคณะ (2007) ศึกษาผลของ equivalence ratio fluidization velocity และ ความสูงของเบดต่อองค์ประกอบของแก๊ส ผลิตภัณฑ์ที่ได้ และค่าความร้อน ในกระบวนการแกซิฟิเคชันของพอลิโพรพิลีนในเตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไรเซชัน พบว่า equivalence ratio จะมีผลต่ออุณหภูมิ โดยเมื่อเพิ่ม equivalence ratio จะทำให้แก๊สเชื้อเพลิงมีปริมาณเพิ่มขึ้น ทาร์และชาร์มีปริมาณลดลง ส่วน fluidization velocity และ ความสูงของเบดมีผลต่อกระบวนการแกซิฟิเคชันน้อย จากการทดลองแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 5.2-11.4 MJ/Nm<sup>3</sup> และมีทาร์ต่ำ

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่นำเสนอข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าการผลิตพลังงานจากขยะมูลฝอยในกระบวนการแกซิฟิเคชันจะให้แก๊สไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะแสดงถึงประสิทธิภาพในการเผาไหม้และเป็นข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับ การฝังกลบและยังมี greenhouse gas ต่อ kWh ต่ำ โดยงานวิจัยที่ผ่านมา มีการใช้ขยะพลาสติกเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินหรือชีวมวล ซึ่งพบว่าพลาสติกเป็นปัญหาหลักที่ทำให้แก๊สที่ได้มีทาร์ในปริมาณสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากขยะพลาสติก เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ และศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อ tar-gasification และผลของชนิดพลาสติกที่แตกต่างกัน ได้แก่ พอลิสไตรีน (PS) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิโพรพิลีน (PP) ในกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำและออกซิเจนในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง