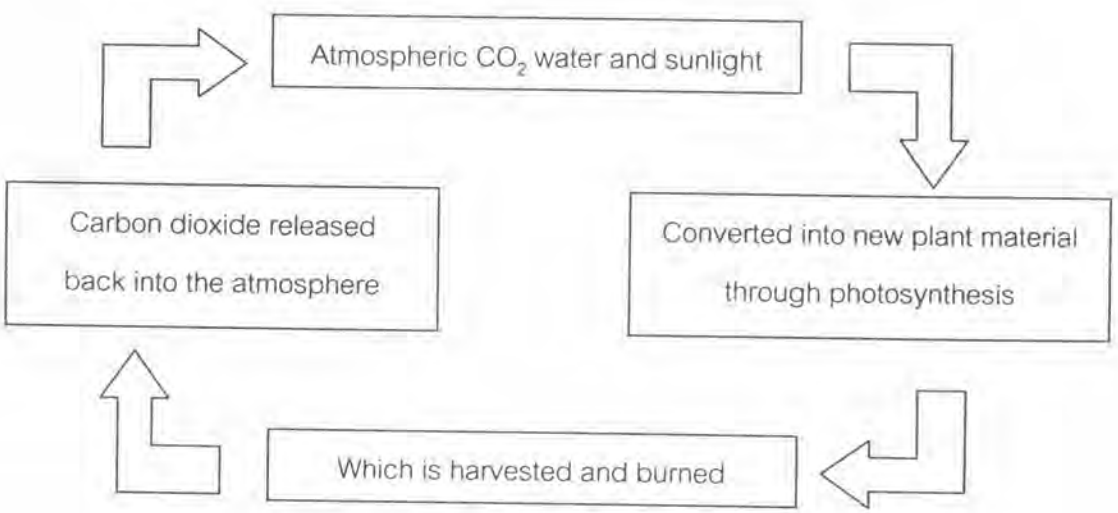
บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น แกลบ ได้จากการสีข้าวเปลือก ชานอ้อย ได้จากการผลิตน้ำตาลทรายเศษไม้ ได้จากการแปรรูปไม้ยางพาราหรือไม้ยูคาลิปตัสเป็นส่วนใหญ่ และบางส่วนได้จากสวนป่าที่ปลูกไว้ กากปาล์ม ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากผลปาล์มสด ซังข้าวโพด ได้จากการสีข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดออก เป็นต้น ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ เพราะในขั้นตอนของการเจริญเติบโตนั้น พืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำและเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ออกมา เป็นแป้งและน้ำตาล แล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆ ของพืช ดังนั้นเมื่อนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิงจะได้พลังงานออกมา

ชีวมวล มีอยู่ทั่วไปในประเทศไทย การนำชีวมวลมาใช้จึงช่วยลดการสูญเสียเงินตราต่างประเทศในการนำเข้าเชื้อเพลิงและสร้างรายได้ให้กับคนท้องถิ่น นอกจากนี้การผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสม จะไม่ก่อให้เกิดมลภาวะและไม่สร้างสภาวะเรือนกระจก เนื่องจากการปลูกทดแทนทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดการหมุนเวียนและไม่มีการปลดปล่อยเพิ่มเติม ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงแหล่งพลังงานหมุนเวียนของชีวมวล (Andy Ross)

2.1.1 การผลิตชีวมวลในประเทศไทย

ปัจจุบันประเทศไทยมีบทบาททางการเกษตรอุตสาหกรรม โดยการแปรรูปวัตถุดิบพืชผลการเกษตรเพิ่มมากขึ้นจึงก่อให้เกิดเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจำนวนมาก เช่น แกลบ ชานอ้อย และซังข้าวโพด เป็นต้น จากสถิติการเกษตรของประเทศไทย สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรและสหกรณ์ ในปีเพาะปลูก 2546/47 พบว่าปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรส่วนที่ยังไม่ได้ใช้เท่ากับ 42 ล้านตัน เทียบเท่ากับพลังงาน 604,822 เทราจูล (6.04×10^{17} จูล) ดังตารางที่ 2.1 โดยเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือชีวมวลเหล่านี้สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานทดแทนที่สำคัญของประเทศ

ตารางที่ 2.1 การประเมินศักยภาพพลังงานจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร, ปีเพาะปลูก 2546/47

ชนิด	วัสดุเหลือใช้	แฟกเตอร์ของการใช้เป็นพลังงาน	ปริมาณวัสดุเหลือใช้ที่ใช้เป็นพลังงาน (10^6 กก.)	แฟกเตอร์วัสดุเหลือใช้ที่ยังไม่มีการใช้	ปริมาณวัสดุเหลือใช้ที่ยังไม่มีการใช้ (10^6 กก.)	ค่าความร้อน (เมกะจูล/กก.)	พลังงาน (เทราจูล)
1. อ้อย	ชานอ้อย	0.793	12,344	0.207	3,222	14.40	46,401
	ส่วนยอดและใบ	0.000	0	0.986	15,929	17.39	277,006
2. ข้าว	แกลบ	0.507	2,819	0.493	2,741	14.27	39,112
	ฟาง (ส่วนบน)	0.000	0	0.684	7,391	10.24	75,679
3.ปาล์มน้ำมัน	ทะลายปาล์ม	0.030	42	0.584	814	17.86	14,535
	เส้นใยปาล์ม	0.858	411	0.134	64	17.62	1,130
	กะลาปาล์ม	0.588	94	0.037	6	18.46	109
	ก้าน	0.000	0	1.000	8,479	9.83	83,345
	ทะลายตัวผู้	0.000	0	1.000	759	16.33	12,389
4. มะพร้าว	เปลือก	0.289	146	0.595	302	16.23	4,894
	กะลามะพร้าว	0.413	93	0.378	85	17.93	1,518
	ทะลายมะพร้าว	0.144	10	0.843	58	15.40	891
	ทางมะพร้าว	0.159	50	0.809	255	16.00	4,077
5. มันสำปะหลัง	ลำต้น	0.000	0	0.407	683	18.42	12,577
6. ข้าวโพด	ซังข้าวโพด	0.193	226	0.670	784	18.04	14,142
7. ถั่วลิสง	เปลือก	0.000	0	1.000	45	12.66	564
8. ฝ้าย	ลำต้น	0.000	0	1.000	116	14.49	1,686
9. ถั่วเหลือง	ลำต้น, ใบ, เปลือก	0.007	6	0.760	646	19.44	12,551
10.ข้าวฟ่าง	ใบ, ต้น	0.118	21	0.648	115	19.23	2,215
รวมทั้งหมด							604,822

ที่มา : 1. "**แฟกเตอร์ของการใช้เป็นพลังงาน**" และ "**แฟกเตอร์วัสดุเหลือใช้ที่ยังไม่มีการนำไปใช้**" สำหรับใบและยอดอ้อย ฟางข้าว ต้นมันสำปะหลัง ซังข้าวโพด และวัสดุเหลือใช้จากถั่วเหลืองและข้าวฟ่าง : กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, การศึกษาพฤติกรรมและรูปแบบการใช้พลังงานในการเพาะปลูก, 2535.

2. "**แฟกเตอร์ของการใช้เป็นพลังงาน**" และ "**แฟกเตอร์วัสดุเหลือใช้ที่ยังไม่มีการนำไปใช้**" สำหรับชานอ้อย : Black & Veatch(Thailand), Thailand Biomass-Based Power Generation and Cogeneration within Small Rural Industries(Progress report),1999.

3. "**แฟกเตอร์ของการใช้เป็นพลังงาน**" และ"**แฟกเตอร์วัสดุเหลือใช้ที่ยังไม่มีการนำไปใช้**" สำหรับปาล์มน้ำมัน:กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, รายงานผลการสำรวจวัสดุเหลือใช้จากปาล์มน้ำมัน, 2538.

4. "**แฟกเตอร์ของการใช้เป็นพลังงาน**" และ "**แฟกเตอร์วัสดุเหลือใช้ที่ยังไม่มีการนำไปใช้**" สำหรับมะพร้าว:กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, รายงานผลการสำรวจวัสดุเหลือใช้จากมะพร้าว, 2537.

5. "**แฟกเตอร์ของการใช้เป็นพลังงาน**" สำหรับแกลบ : กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, รายงานพลังงานของประเทศไทย , 2544.

2.1.2 แกลบ

แกลบเป็นผลิตผลพลอยได้จากการสีข้าวเปลือก ประโยชน์ที่สำคัญของแกลบ คือ ใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ในหม้อไอน้ำเพื่อผลิตไอน้ำ ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคนิคการใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง เช่น การใช้แกลบในกระบวนการแกซิฟิเคชัน การอัดแกลบเป็นก้อนเชื้อเพลิง เป็นต้น

2.1.3 ส่วนประกอบของชีวมวล

องค์ประกอบของชีวมวลหรือสสารทั่วไป แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ

1. ความชื้น (Moisture)

ความชื้นหมายถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีความชื้นค่อนข้างสูง เพราะเป็นผลิตผลทางการเกษตร ถ้าต้องการแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงานโดยการเผาไหม้ ชีวมวลควรมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 50

2. ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible substance)

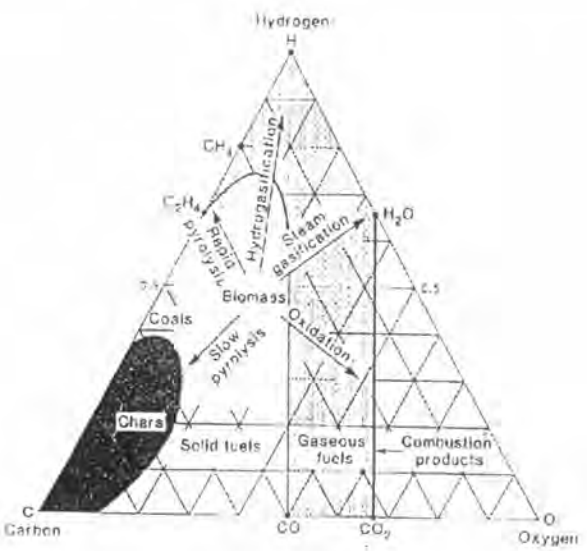
ส่วนที่เผาไหม้ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ สารระเหย (Volatiles matter) และคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) สารระเหย คือส่วนที่ลุกเผาไหม้ง่ายสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนในที่ที่ไม่มีอากาศ ดังนั้นชีวมวลที่มีค่าสารระเหยสูงแสดงว่าติดไฟได้ง่าย ส่วนคาร์บอนคงตัวเป็นของแข็งที่เป็นคาร์บอนที่เหลืออยู่

3. ขี้เถ้า (Ash)

ขี้เถ้าคือส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีขี้เถ้าประมาณร้อยละ 1-3 ยกเว้นแกลบและฟางข้าวจะมีสัดส่วนขี้เถ้าประมาณร้อยละ 10-20 ซึ่งจะมีปัญหาการเผาไหม้และกำจัดพอสมควร

2.2 หลักการแปรรูปชีวมวล

การแปรรูปชีวมวลให้เป็นแหล่งพลังงานที่มีประสิทธิภาพ กระทำได้โดยใช้เทคโนโลยีการแปรรูปทางความร้อน (Thermal conversion technology) ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการคือ ไพโรไลซิส (Pyrolysis), แกซิฟิเคชัน (Gasification) และการเผาไหม้ (Combustion) โดยแผนภาพอธิบายกระบวนการเหล่านี้ไปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ แสดงดังกราฟสามเหลี่ยมรูป 2.2



รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของชีวมวล (Probstien and Hick, 1985)

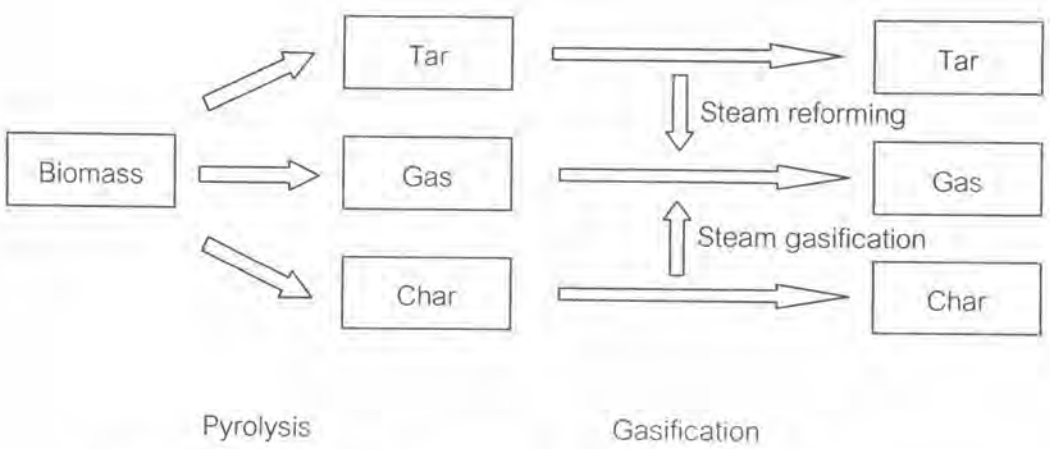
2.3 กระบวนการแกซิฟิเคชัน

2.3.1 นิยาม

กระบวนการแกซิฟิเคชัน เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดแก๊สโดยอาศัยการสันดาปเพียงบางส่วนของเชื้อเพลิง เช่น ถ่านหิน ไม้ ถ่านไม้ และชีวมวลอื่นๆ แก๊สที่ได้จากกระบวนการนี้เรียกว่า แก๊สชีวมวล (producer gas) ส่วนใหญ่ประกอบด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H_2) มีเทน (CH_4) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ นอกจากนี้ยังมีสารปนเปื้อน ได้แก่ น้ำมันทาร์ และ ซาร์ เป็นต้น

2.3.2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแกซิฟิเคชัน

ในกระบวนการแกซิฟิเคชันประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือการไพโรไลซิสของชีวมวลในขั้นตอนแรก ซึ่งจะมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการระเหยไปของน้ำและสารระเหยรวมทั้งแก๊สต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นด้วย หลังจากนั้นจะเกิดขั้นตอนที่ 2 คือ กระบวนการแกซิฟิเคชัน โดยน้ำมันทาร์และซาร์เปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น (Asadullah et al., 2003 and Davi et al., 2005) แสดงดังรูปที่ 2.3 ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้มี 3 ประเภทคือ (ฉัตรชัย ธนศรีสุข, 2541)



รูปที่ 2.3 แสดงกลไกการเกิดกระบวนการแกซิฟิเคชัน (Asadullah et al., 2004)

2.3.2.1 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง

มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเรียกว่า ถ่านชาร์ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือผลิตสารเคมีอื่นได้อีก เช่น ถ่านกัมมันต์ แนฟทาลีน แอนทราซีน และสารประกอบไซยาโนเจน เป็นต้น แต่ส่วนใหญ่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงไร้ควัน (ถ่านไร้ควัน) เพื่อใช้ในบ้านเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือกลางได้ดี เช่น เป็นเชื้อเพลิงให้หม้อไอน้ำ การเผาอิฐ การอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โรงงานผลิตหินปูนและซีเมนต์ หรือใช้ในโรงงานถลุงเหล็กและทองแดง เพราะไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสภาพแวดล้อมจากกลิ่นหรือควันที่เกิดจากสารระเหยและสารประกอบพวกไนโตรเจนและกำมะถัน

2.3.2.2 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

ประกอบด้วยน้ำและสารประกอบที่ละลายน้ำ อีกส่วนหนึ่งจะเป็นน้ำมันทาร์ องค์ประกอบของน้ำมันทาร์เป็นสารประกอบที่ซับซ้อนของไฮโดรคาร์บอน ที่มีโครงสร้างส่วนมากเป็นพวกวงแหวนแนพทาลีนเชื่อมด้วยหมู่เอทีลีน โมเลกุลของน้ำมันทาร์มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนตั้งแต่ C_5 –C_6 ประกอบเป็นโครงสร้างของสารเคมีต่าง ๆ อาจมีมากกว่า 200 ชนิด โดยอาจแบ่งออกได้ตามอุณหภูมิที่ใช้ในการกลั่นเป็น 5 ส่วน คือ

- น้ำมันเบา (light oil) ช่วงอุณหภูมิ <200 ^{o}C ได้แก่ เบนซิน เบนโซลดิบ โทลูอีน เอทิลเบนซีน ไซลีน
- น้ำมันช่วงกลาง (middle oil) ช่วงอุณหภูมิ 200 – 250 ^{o}C ได้แก่ ฟีนอล ไพริดีน
- น้ำมันช่วงหนัก (heavy oil) ช่วงอุณหภูมิ 250 – 300 ^{o}C ได้แก่ ไดเมททิล แนพทาลีน
- น้ำมันแอนทาซีน (anthracence) ช่วงอุณหภูมิ 300 – 350 ^{o}C ได้แก่ ฟลูออรีน ฟีแนพทีน
- พีทช์ (pitch) ช่วงอุณหภูมิ >350 ^{o}C ได้แก่ น้ำมันหนักบางประเภทพวกไข (red wax) ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการกลั่น

<u>สมบัติทางเคมีของน้ำมันทาร์</u>

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพบว่าปริมาณน้ำมันทาร์ที่เกิดจากการเผาไหม้และองค์ประกอบของน้ำมันทาร์เกิดการเปลี่ยนแปลง พบว่าเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการสูงขึ้น ปริมาณออกซิเจนจะลดลง และสัดส่วนของ H/C อะตอมก็ลดลงเช่นกัน ซึ่งแสดงถึงการผันกลับของ Highly Oxygenate Pyrolyzate ไปเป็น Less Oxygenate Pyrolyzate และมีความคงที่ทางอุณหภูมิมากกว่า (Thermally Highly Aromatic Structure Stable) ซึ่งในที่สุดจะไม่มีออกซิเจน และคงเหลือแต่

โครงสร้างที่เป็นอะโรมาติก ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบของน้ำมันทาร์กับอุณหภูมิแสดงดังตารางที่ 2.2

ข้อมูลในตารางที่ 2.2 ยืนยันผลของอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่างๆ จาก Highly Oxygenate Pyrolyzate เป็น Condense Aromatic โดยมีการตัดพันธะรอบๆ Aromatic Ring ออกเพื่อกำจัดโซ่ด้านข้างซึ่งมีกลุ่ม Carbonyl และ Methoxyl ทำให้เกิด Catechols

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบทางเคมีของ Biomass Tars (อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย, 2538)

Conventional Flash pyrolysis (400-500 °C)	Hi-Temperature Flash pyrolysis (600-650 °C)	Conventional Steam Gasification (700-800 °C)	Hi-Temperature Steam Gasification (900-1000 °C)
Acids	Benzenes	Naphthalenes	Naphthalene
Aldehydes	Phenols	Acenaphthalenes	Acenaphthalene
Ketones	Catechols	Fluorenes	Phenanthrene
Furans	Naphthalenes	Phenanthrenes	Fluoranthene
Alcohols	Biphenyls	Benzaldehydes	Pyrene
Complex-Oxygenates	Phenanthrenes	Phenols	Acephenanthrylene
Phenols	Benzofurans	Naphthofurans	
Guaiacols	Benzaldehydes	Benzanthracenes	Benzanthracenes
Syringols			Benzopyrenes
Complex-Phenolics			226 MW PAHs
			276 MW PAHs

2.3.2.3 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

เป็นของผสมระหว่างแก๊สอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยแก๊สอนินทรีย์ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนและแอมโมเนีย ส่วนแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ มีเทน อีเทน เอทิลีน เป็นต้น โดยแก๊สส่วนใหญ่จะเป็นแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้เพื่อให้ความร้อน หรือการผลิตไฟฟ้า

2.3.3 ปฏิกิริยาเผาไหม้พื้นฐาน (Fundamental Combustion Reactions)

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างคาร์บอนกับอากาศและ/หรือไอน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ปฏิกิริยาเหล่านี้มีการศึกษามานานแล้ว นับได้ว่าเป็นปฏิกิริยาพื้นฐานที่สามารถนำมาอธิบายกระบวนการเผาไหม้ต่างๆ ได้

ตารางที่ 2.3 ปฏิกิริยาการเผาไหม้พื้นฐาน (อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย, 2538)

ปฏิกิริยา	ลักษณะของปฏิกิริยา	ΔH (KJ/Kgmole)
1. $C + O_2 \longrightarrow CO_2$	-	408,632
2. $C + 1/2O_2 \longleftrightarrow CO$	-	123,092
3. $C + CO_2 \longleftrightarrow 2CO$	+	162,448
4. $CO + 1/2O_2 \longleftrightarrow CO_2$	-	285,540
5. $C + H_2O \longleftrightarrow CO + H_2$	+	118,905
6. $C + 2H_2O \longleftrightarrow CO_2 + 2H_2$	+	75,362
7. $C + 2H_2 \longleftrightarrow CH_4$	-	75,000
8. $CO + H_2O \longleftrightarrow CO_2 + H_2$	-	43,543

หมายเหตุ 1. ปฏิกิริยาการทดลองที่สภาวะ 1,200 องศาเคลวิน (1,700 องศาฟาเรนไฮท์ หรือ 927 องศาเซลเซียส) ความดัน 1 บรรยากาศ คาร์บอนที่ใช้เป็นสารมาตรฐาน อยู่ในรูปแกรไฟต์

2. เครื่องหมายลบ หมายถึง ปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic Reaction) เครื่องหมายบวก หมายถึง ปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic Reaction)

ปฏิกิริยาที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.3 ประกอบด้วยปฏิกิริยาหลักๆ ที่เกิดภายใต้ภาวะที่แกซิฟาย มีการเรียกชื่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตามลักษณะของแก๊สที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น

ออกซิแกซิฟิเคชัน (Oxygasification) เป็นการเผาไหม้คาร์บอนที่กำลังลุกแดงภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอหรือจำกัดออกซิเจน เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรืออากาศ เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยแก๊สที่เกิดขึ้นได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์

สตีมแกซิฟิเคชัน (Steam gasification) เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับไอน้ำ เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน แก๊สที่ได้ส่วนใหญ่ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน แก๊สเหล่านี้มีค่าความร้อนสูงพอที่จะนำมาทำแก๊สเชื้อเพลิง

คาร์บอกซีแกซิฟิเคชัน (Carboxygasification) เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน

ไฮโดรแกซิฟิเคชัน (Hydrogasification) เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจนโดยตรง เพื่อผลิตมีเทน เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และเกิดช้าลงที่อุณหภูมิสูง ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือแก๊สมีเทน ซึ่งเป็นแก๊สที่มีค่าความร้อนสูงจึงเป็นแก๊สที่ต้องการให้เกิดในการแกซิฟายมาก แต่ว่าปฏิกิริยานี้เกิดน้อยมาก นอกจากจะมีการป้อนไฮโดรเจนซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำคัญของปฏิกิริยาเข้าไปเพิ่มเติม

ปฏิกิริยาชิฟท์ (Water-gas shift reaction) เป็นปฏิกิริยาย้อนกลับได้ของคาร์บอนมอนอกไซด์กับไอน้ำซึ่งแข่งขันกับปฏิกิริยาที่ 5 ดังตารางที่ 2.3 ได้คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์

2.4 ระบบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

ในปัจจุบันกระบวนการการแกซิฟิเคชันมีการทดลองอยู่ 3 ระบบ คือ

2.4.1 การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value Gas or Low Btu Gas) แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อนประมาณ 3.3-5.6 MJ/m^3 (90-150 Btu/SCF) เกิดจากการเผาไหม้บางส่วนของถ่านกับอากาศ โดยมากมักจะมีไอน้ำอยู่ด้วย ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นดังนี้

$$C + 1/2O_2 \longrightarrow CO \qquad (2.1)$$

$$C + H_2O \longrightarrow CO + H_2 \qquad (2.2)$$

$$CO + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2 \qquad (2.3)$$

2.4.2 การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนปานกลาง (Medium Heating Value Gas or Medium Btu Gas) แก๊สเชื้อเพลิงมีค่าความร้อนประมาณ 9.3-20.5 MJ/m^3 (250-550 Btu/SCF) กระบวนการนี้ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ที่ได้จากการแยกออกจากอากาศ เพื่อใช้ในการเกิด

ปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Partial Oxidation) การไม่มีแก๊สไนโตรเจนจะทำให้ค่าความร้อนสูงขึ้น

2.4.3 การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูง (High Heating Value Gas or High Btu Gas) ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้เทียบเท่ากับ Synthesis Gas (SNG) ส่วนประกอบของแก๊สนี้มักเป็นมีเทนเกือบบริสุทธิ์ ซึ่งจาก Medium Btu Gas สามารถเปลี่ยนเป็น SNG ได้โดยกระบวนการเมธาเนชัน (Methanation) ที่อุณหภูมิต่ำ เกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเป็นแก๊สมีเทนและน้ำ ดังสมการ

$$CO + 3H_2 \longrightarrow CH_4 + H_2O \qquad (2.4)$$

2.5 กระบวนการแบบเบดนิ่ง (Fixed-bed Processes)

คำว่า "เบดนิ่ง" ที่ใช้ในเรื่องแกซิฟิเคชันคือเม็ดของแข็งจะพักอยู่บนตะแกรงรองรับปล่อยให้ของไหลไหลคดเคี้ยวผ่านไปตามช่องว่างที่มีอยู่ในเบด ซึ่งกระบวนการแบบเบดนิ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามทิศทางการไหลของอากาศ คือ การไหลแบบสวนทางกัน (Updraft gasifier) และการไหลแบบทางเดียวกัน (Downdraft gasifier) ดังแสดงในรูปที่ 2.4

2.5.1 การไหลแบบสวนทางกัน (Updraft gasifier)

วัตถุดิบจะเข้าสู่เตาผลิตแก๊สโดยการนำเข้าทางด้านบนและจะเคลื่อนตัวตลอดเวลาในแนวของเตา ไอน้ำและอากาศที่เข้าทางด้านล่างจะเคลื่อนตัวขึ้นด้านบน บริเวณส่วนล่างของเบดคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อจากช่วงนี้ปฏิกิริยาดูดความร้อนทั้งหลายก็เกิดขึ้น แก๊สร้อนจากปฏิกิริยาเหล่านี้ลอยตัวขึ้นผ่านเบดของคาร์บอน คาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้น โดยปฏิกิริยาของคาร์บอนไดออกไซด์กับคาร์บอน ซึ่งพอสรุปได้ว่าขณะที่วัตถุเคลื่อนตัวลงมา สิ่งที่จะเกิดขึ้นคือ

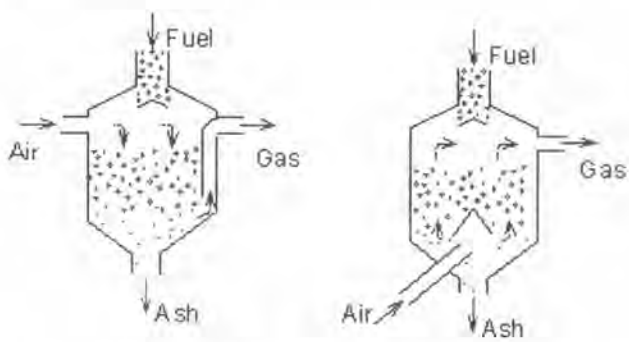
- การ Drying เมื่อสัมผัสกับแก๊สร้อนที่ลอยตัวขึ้น

- การ Devolatilization สารระเหยในวัตถุดิบจะระเหยออกมาแตกตัวให้แก๊สไฮโดรเจน มีเทน และไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลหนักอื่นๆ ลอยปะปนไปกับแก๊สผลิตภัณฑ์

- เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนมีทั้งออกซิเดชันและรีดักชัน ส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาที่เหลือจะถูกปล่อยออกมาทางส่วนล่างของเบด

2.5.2 การไหลแบบทางเดียวกัน (Downdraft gasifier)

กระบวนการการไหลแบบทางเดียวกันหลักการคล้ายกับการไหลแบบสวนทางกัน ต่างกันตรงที่วัตถุดิบจะเข้าสู่เตาผลิตแก๊สโดยการนำเข้าทางด้านบนและจะเคลื่อนตัวตลอดเวลาในแนวของเตา ไอน้ำและอากาศที่เข้าทางด้านบนจะเคลื่อนตัวลงด้านล่าง ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ออกทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาที่เหลือจะถูกปล่อยออกมาทางส่วนล่างของเบด ซึ่งระบบนี้ได้รับการพัฒนาโดยมีจุดมุ่งหมายที่เปลี่ยนน้ำมันทาร์ที่เกิดขึ้นในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงไปเป็นแก๊สที่มีความสำคัญมาก



รูปที่ 2.4 แสดงทิศทางการไหลของอากาศในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

(อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย, 2538)

2.6 ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี (Catalyst)

คำว่า "ตัวเร่งปฏิกิริยา" มาจากภาษากรีก 2 คำ ได้แก่คำว่า คะตะ (cata) หมายถึง หัก (down) และไลไซน์ (lysein) หมายถึง แยกหรือแตก (spit or break) ดังนั้น "ตัวเร่งปฏิกิริยา" จึงหมายถึง ตัวที่ทำให้เกิดการแตกหักที่เกิดขึ้นบนโมเลกุล ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีมีหน้าที่เร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยา โดยทำงานอย่างมีประโยชน์มากในการเลือกเร่งเฉพาะปฏิกิริยาที่ต้องการให้เกิด ในขณะเดียวกันก็ไม่ส่งเสริมปฏิกิริยาอื่นที่อาจเกิดขึ้นข้างเคียง การเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีมาใช้ยังคงต้องอาศัยวิธีการทดลองเป็นหลัก

ความว่องไว และความสามารถในการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีมีอิทธิพลโดยตรงจากลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของของแข็ง ได้มีความพยายามที่จะอธิบายถึงการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี โดยมองภาพว่าโมเลกุลของสารตั้งต้นที่ถูกเปลี่ยนสภาพไปมีพลังงานเพิ่มขึ้นหรือกลายเป็นสารผลิตผลระหว่างปฏิกิริยา (Intermediate) หลายทฤษฎีได้พยายามอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว ตัวอย่างเช่น ทฤษฎีสภาวะทรานสิชัน (Transition – State – Theory) อธิบายว่าตัว

เร่งปฏิกิริยาเคมีเป็นตัวช่วยลดพลังงานศักย์ขวางกั้น (Potential energy barrier) ซึ่งสารตั้งต้นต้องมีเพื่อเปลี่ยนสารผลิตผล คือ ลดพลังงานการกระตุ้นของปฏิกิริยาต่ำลงนั่นเอง

2.6.1 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา

โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยสารหลายชนิด แต่พอจะแบ่งออกได้ดังนี้

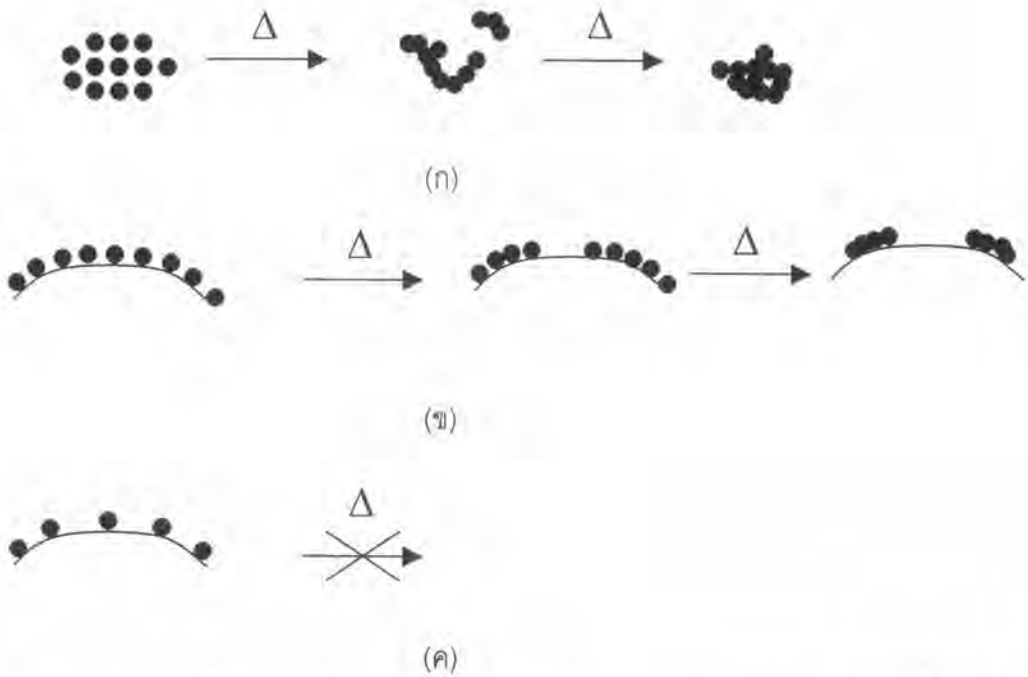
2.6.1.1 สปีชีส์ที่ว่องไว (Active species) ซึ่งเป็นสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่แท้จริง ตัวเร่งปฏิกิริยาอาจประกอบด้วย active species ล้วนๆ แต่ในกรณีที่ active species เป็นสารที่มีราคาแพงหรือมีพื้นที่ผิวต่ำ จะนิยมใช้วิธีเคลือบ active species ลงบนตัวรองรับ

2.6.1.2 ตัวรองรับ (support) มักจะเป็นสารที่มีราคาถูกและมีพื้นที่ผิวสูง หน้าที่หลักของ 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

2.6.1.3 ตัวโปรโมเตอร์ (promoter) เป็นสารที่ไม่ได้ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาโดยตรง แต่ช่วยให้ active species ทำหน้าที่ได้ดีขึ้น เช่นไปลดการ sintering และ fouling ลง

2.6.2 ตัวรองรับ (Catalyst supports)

เนื่องจากปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์นั้น จะเกิดขึ้นกับอะตอมหรือไอออนที่อยู่บนพื้นผิวของ active species เท่านั้น อะตอมหรือไอออนที่อยู่ลึกลงไปจะไม่มีโอกาสเข้ามาร่วมทำปฏิกิริยาด้วย ในกรณีที่ active species เป็นสารที่มีราคาแพงจึงต้องพยายามเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสารเหล่านี้ปรากฏบนพื้นผิวให้มากที่สุด วิธีหนึ่งที่ช่วยได้คือการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีขนาดเล็กมากๆ แต่วิธีการนี้ไม่สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวได้มากนัก นอกจากนี้เมื่อนำไปใช้งานในอุณหภูมิสูง อนุภาคเล็กๆ เหล่านี้มีแนวโน้มที่จะหลอมรวมตัวกัน อีกทางหนึ่งที่นิยมทำกันคือนำเอา active species ไปเคลือบลงบนวัสดุอื่นที่มีพื้นที่ผิวสูง (ซึ่งเรียกกันว่าตัวรองรับ – support) ซึ่งนอกจากจะทำให้สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวของ active species แล้ว ในบางครั้งยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของ active species ด้วยและลดการเกิดการหลอมรวมตัวกันของ active species ด้วย ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 บทบาทของตัวรองรับที่มีต่อการกระจายตัวของ active species: (ก) ไม่มีตัวรองรับ active species หลอมรวมตัวกันได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน (ข) active species ความเข้มข้นสูงบนพื้นผิวของตัวรองรับ ยังมีโอกาสที่จะหลอมรวมตัวกันที่อุณหภูมิสูง (ค) active species ความเข้มข้นต่ำบนพื้นผิวของตัวรองรับ โอกาสที่จะหลอมรวมตัวกันมีน้อย (ธราธร มงคลศรี)

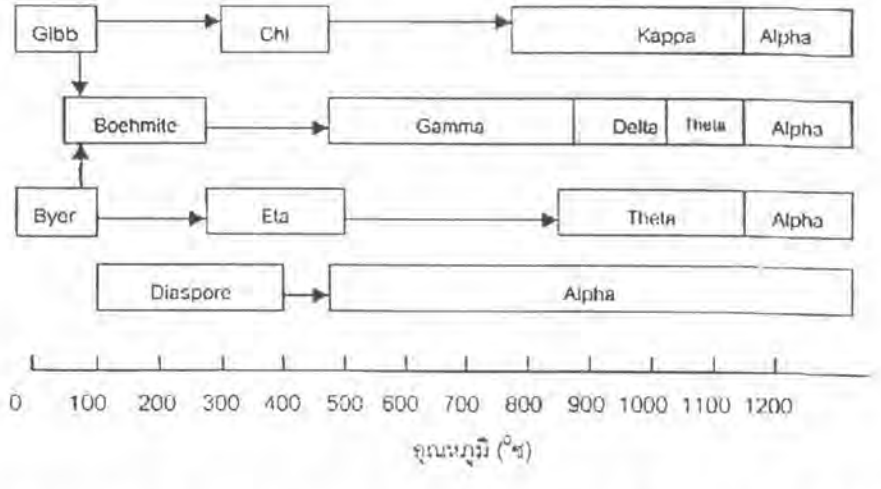
<u>การเลือกใช้ตัวรองรับ ขึ้นอยู่กับเกณฑ์หลายข้อ</u> เช่น

1. เฉื่อยต่อปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการ
2. คุณสมบัติทางกลและทางกายภาพตามต้องการ เช่น ความแข็ง ความทนทานต่อการกระแทก ความทนต่อแรงกดอัด ตัวอย่างเช่นถ้านำตัวเร่งปฏิกิริยาไปใช้ในฟลูอิไดซ์ ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะต้องทนต่อสภาวะการกระแทก การเสียดสี ฯลฯ ที่เกิดขึ้นในเบดได้ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่บรรจุในเบดนิ่งที่อยู่ทางตอนล่างของเบดจะต้องสามารถรับน้ำหนักของเบดและความดันลดที่เกิดขึ้นได้
3. เสถียรภาพภายใต้สภาวะการทำงานและสภาวะการ regenerate ซึ่งอาจเป็นช่วงที่ต้องเผชิญกับอุณหภูมิที่สูง ซึ่งตัวรองรับนั้นควรจะต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง
4. ความเป็นรูพรุน ขนาดของรูพรุน และการแจกแจงขนาดของรูพรุน ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับความสามารถในการแพร่ของสารตั้งต้นเข้าไปในตัวเร่งปฏิกิริยา
5. ราคา ซึ่งไม่ควรจะแพงเกินไป

2.6.2.1 แกมมาอะลูมินา (Alumina – Al_2O_3)

อะลูมินาเป็นตัวรองรับที่ถูกใช้งานมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากราคาไม่แพง มีโครงสร้างที่มีเสถียรภาพสูง (จุดหลอมเหลวสูงเกินกว่า 2000 องศาเซลเซียส) โครงสร้างที่สำคัญของอะลูมินาที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาคือเฟสแกมมาอะลูมินา (γ-Al_2O_3) ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างนี้มีพื้นที่ผิวสูงและมีเสถียรภาพในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง η-Al_2O_3 เป็นอีกโครงสร้างหนึ่งที่เคยได้รับความนิยม แต่ในปัจจุบันไม่ค่อยนิยมใช้กันเนื่องจากมีความเป็นกรดสูงกว่า γ-Al_2O_3 อย่างไรก็ตามมีปฏิกิริยาบางอย่างที่ต้องการสภาพที่เป็นกรดของตัวรองรับในการเกิดปฏิกิริยา ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยา reforming ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งปฏิกิริยาเริ่มแรกจะเกิดขึ้นบนโลหะ จากนั้น intermediate ที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนตัวมาทำปฏิกิริยาต่อบนพื้นผิวของตัวรองรับที่มีความเป็นกรด ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้จึงเรียกว่า Bifunctional catalyst ปัจจุบันการเพิ่มความเป็นกรดของ γ-Al_2O_3 ทำโดยการเติมไอออนเช่นคลอไรด์หรือฟลูออไรด์เข้าไปในโครงสร้าง

γ-Al_2O_3 เป็นโครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวสูง (ส่วนมากอยู่ในช่วง 250-300 m^2/g) แต่ถ้าได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิขึ้นไปสูงถึง 850 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นรูปแบบ δ และที่อุณหภูมิสูงเกินกว่า 1100 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นรูปแบบ θ และกลายเป็นรูปแบบ α ในที่สุด แสดงดังรูปที่ 2.6 ซึ่งในระหว่างนี้โครงสร้างจะเกิดการพังตัว เปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างที่มีรูพรุนกลายเป็นโครงสร้างที่หนาแน่นขึ้นและมีพื้นที่ผิวลดลง สำหรับปฏิกิริยาทั่วไปอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยามักจะไม่เกินช่วง 500-600 องศาเซลเซียส แต่ในช่วงระหว่างการ regenerate (เช่นการเผาโค้ก) ทิ้งอาจมีอุณหภูมิสูงผิดปรกติได้



รูปที่ 2.6 เส้นทางการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอะลูมินา กรอบสีเหลี่ยมแสดงช่วงที่เฟสต่างๆ คงอยู่ ส่วนลูกศรแสดงช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลง (ธราธร มงคลศรี)

การมีธาตุบางธาตุปนเปื้อนอยู่ในโครงสร้างของอะลูมินาอาจมีผลต่อการเปลี่ยนโครงสร้างของอะลูมินาเป็นอย่างมาก ตัวอย่างเช่นโซเดียมออกไซด์ Na_2O จะไปเร่งการเกิด sintering ของ γ-Al_2O_3 ให้เร็วขึ้น ซึ่งอัตราเร็วนี้จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Na_2O ที่มีอยู่ แต่สารบางตัวเช่น La_2O_3, CeO_2, BaO และ SiO_2 จะหน่วงการเกิด sintering ของ γ-Al_2O_3 ที่อุณหภูมิสูง จึงทำให้สามารถนำเอา γ-Al_2O_3 ไปใช้งานได้ในอุณหภูมิที่สูงขึ้น

2.6.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะบนตัวรองรับ (Metal Supported Catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารที่ช่วยเพิ่มอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่สนใจ โดยตัวเร่งปฏิกิริยามีผลช่วยเพิ่มอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเคมีไปข้างหน้า (Forward rate) พร้อมกันกับเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาย้อนกลับ (Reverse rate) ทำให้ปฏิกิริยาเคมีที่สนใจเข้าสู่สมดุลเคมี (Chemical Equilibrium) ได้เร็วขึ้นโดยไม่มีผลต่อสมบัติทางอุณหจลนศาสตร์ (Thermodynamic) ของปฏิกิริยา เนื่องจากเป็นสมดุลเคมีเดียวกัน

ในอุตสาหกรรม ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ส่วนใหญ่พบอยู่ในรูปของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะบนตัวรองรับ ด้วยเหตุผลที่ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้มีข้อดีดังต่อไปนี้

1. เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถจัดหาหรือเตรียมขึ้นได้ง่าย และปลอดภัย
2. สามารถใช้ได้กับเครื่องปฏิกรณ์หลายชนิด และในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ตัวกลางเป็นของเหลวสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้โดยการกรอง
3. อนุภาคที่เป็นโลหะอยู่แยกกันอย่างเป็นอิสระเมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิสูง จึงไม่ทำให้อนุภาคโลหะรวมตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่
4. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ ตัวรองรับอาจเป็นตัวโปรโมเตอร์ (Promoter) ได้อีกด้วย

โดยส่วนข้อดีอื่น ๆ ขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนั้น ๆ และระบบของปฏิกิริยา ได้แก่ ธรรมชาติของโลหะ ชนิดของโปรโมเตอร์ และตัวพยุง เป็นต้น

2.6.4 โพแทสเซียมคาร์บอเนต

โพแทสเซียมเป็นธาตุที่อยู่ในหมู่ I ในตารางธาตุ มีเลขอะตอม (Atomic Number) 19 น้ำหนักอะตอม (Atomic Weight) 39.1 โพแทสเซียมคาร์บอเนตมีความหนาแน่น (Density) 2.29 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลว (Melting Point) 891 องศาเซลเซียส

โพแทสเซียมถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวล โดยตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมที่อยู่ในรูปของโพแทสเซียมคาร์บอเนตให้ผลการแกซิฟายได้ดี เนื่อง

จากโพแทสเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่ง (active species) ที่มีความว่องไวมาก มีอัตราการเร่งปฏิกิริยาสูง แต่โพแทสเซียมเกิดการรวมตัวกันเนื่องจากได้รับความร้อน และสูญเสียโดยเกิดการระเหย (vaporization) ได้ง่ายในระหว่างการแกซิฟายที่ช่วงอุณหภูมิสูง (Akyurtlu, 1995)

2.6.5 โลหะนิกเกิล

นิกเกิลเป็นธาตุที่อยู่ในหมู่เดียวกันกับโลหะโนเบล (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 อิเล็กตอรนเน็กกะติวิตี (Electron Negativity) 1.8 Oxidation State 2.3 การจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนคือ (Ar) $3d^8$ $4s^2$ นิกเกิลในรูปที่เป็นก้อนของแข็งไม่สามารถติดไฟได้ แต่เมื่อทำให้เป็นเส้นลวดนิกเกิลจะสามารถติดไฟเองได้ ส่วนเม็ดขนาดเล็กของนิกเกิลจะสามารถที่จะติดไฟได้ด้วยตัวเองเมื่อสัมผัสอากาศ

โลหะนิกเกิลสามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ ในปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการเติมไฮโดรเจน หรือกำจัดไฮโดรเจน เช่น ในการศึกษาการเตรียมแก๊สมีเทน (Methanation) จากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อะลูมินา ซึ่งมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังนี้ (Yadav Rajiv and Rinker, G. Robert, 1992:507)

$CO + * \longleftrightarrow CO^*$ (CO adsorption) (2.5)

$H_2 + 2* \longleftrightarrow 2H^*$ (H_2 adsorption) (2.6)

$CO^* + * \longrightarrow C^* + O^*$ (CO dissociation) (2.7)

$CH^* + H^* \longrightarrow CH_2^* + *$ (Hydrogenation of surface CH) (2.8)

(* = vacant sites, CO^*, H^* = intermediates)

2.6.6 ขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

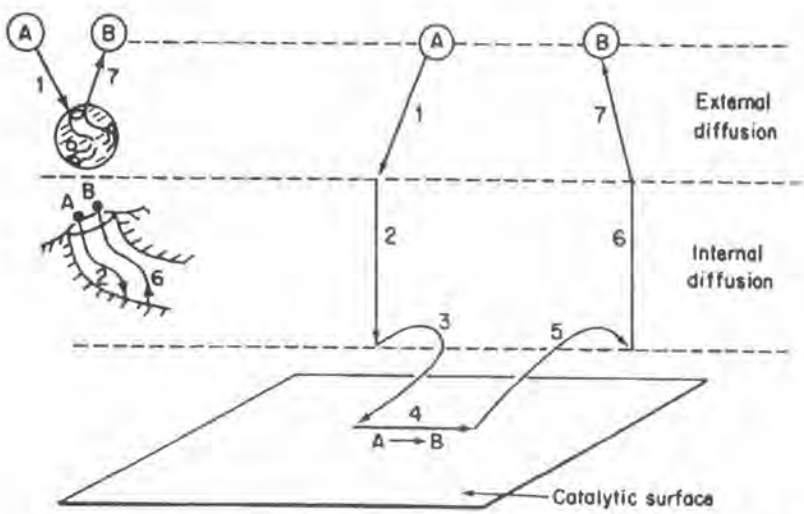
การเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 7 ขั้นตอน ดังนี้

1. การแพร่ของสารตั้งต้นจากของไหลผ่านชั้นฟิลม์มายังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา
2. การแพร่ของสารตั้งต้นจากพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปตามรูพรุน
3. การดูดซับของสารตั้งต้นบนตำแหน่งที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยา (active site)
4. การเกิดปฏิกิริยาบนตำแหน่งที่ว่องไว
5. การหลุดของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นออกจากตำแหน่งที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยา

6. การแพร่ของผลิตภัณฑ์จากภายในรูพรุนออกมายังพื้นผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา
7. การแพร่ของผลิตภัณฑ์จากพื้นผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านชั้นฟิลม์กลับไปยังของไหลที่ไหลผ่าน

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 ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ถูกแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา)

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

ความต้านทานการแพร่ของสารตั้งต้นจากของไหลที่ไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยามายังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นฟิลม์ที่ล้อมรอบตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ ถ้าหากของไหลไหลผ่านด้วยความเร็วสูง ชั้นฟิลม์ที่ห่อหุ้มอยู่ก็จะบาง ทำให้สารตั้งต้นแพร่เข้าไปได้ง่ายขึ้นและทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ง่ายขึ้น แต่ถ้าของไหลไหลช้า ชั้นฟิลม์ที่หุ้มอยู่ก็จะมีความหนามาก ทำให้สารตั้งต้นแพร่เข้าไปยังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ลำบากปฏิกิริยาจะเกิดน้อยลง ตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกใช้งานไม่เต็มความสามารถ แต่ถ้าใช้ความเร็วที่สูงเกินไป เวลาที่สารตั้งต้นมีโอกาสสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาก็จะลดลง ปฏิกิริยาก็จะเกิดน้อยลงด้วย

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 เพราะการเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์นั้นจำเป็นต้องมีการดูดซับของสารตั้งต้นอย่างน้อยหนึ่งชนิดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ในกรณีที่สารตั้งต้นมีมากกว่าหนึ่งชนิด จะเกิดการแข่งขันการดูดซับบนพื้นผิว ถ้าหากสารตั้งต้นตัวหนึ่งสามารถเกาะลงบนพื้นผิวได้ดีกว่าสารตั้งต้นอีกตัวหนึ่งมาก ปฏิกิริยาจะเกิดได้น้อยเพราะความเข้มข้นของสารตั้งต้นบนพื้นผิวของสารที่เกาะได้น้อยจะมีค่าต่ำ ที่สภาวะที่เหมาะสมปริมาณของสารตั้งต้นแต่ละตัวที่อยู่บนพื้นผิวควรมีปริมาณที่พอเหมาะ

2.6.7 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งกับตัวสารตั้งต้นที่เป็นแก๊ส ในกรณีที่เป็นระบบของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Catalyst) โดยตัวเร่งปฏิกิริยานี้เรียกว่าตัวดูดซับ (Adsorbent) และแก๊สเรียกว่าตัวถูกดูดซับ (Adsorbate)

การดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) การดูดซับทั้ง 2 ชนิด มีความแตกต่างกันอย่างมาก ทั้งลักษณะความแข็งแรงของการดูดซับและจำนวนชั้นการดูดซับ ซึ่งแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ความแตกต่างของการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ (วิทยา เรืองพรวิสุทธิ์, 2534 :13)

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

2.6.7.1 การดูดซับทางกายภาพ

เป็นการดูดซับที่เกิดบนผิวของของแข็งเนื่องจากแรงแวนเดอวาลส์ (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 ซึ่งเป็นเพียงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเท่านั้น

2.6.7.2 การดูดซับทางเคมี

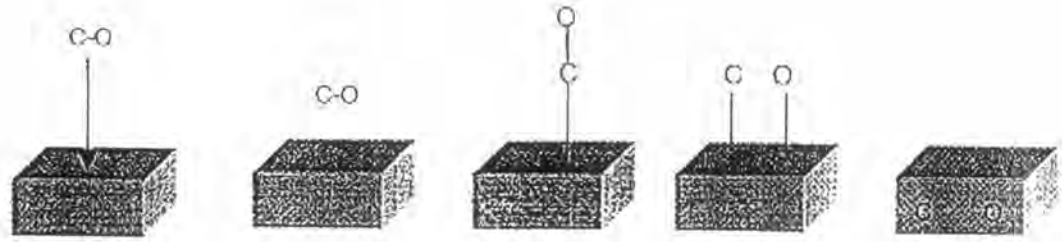
เป็นการดูดซับที่เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ โดยช่องว่างของอิเล็กตรอนอิสระที่ผิวสัมผัสของตัวดูดซับ จะดึงดูดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ ทำให้ตัวถูกดูดซับเกาะติดบนตัวดูดซับ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นการแทนที่ของโมเลกุล (Rearrangement) โดยอิเล็กตรอน

การดูดซับทางเคมีสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด ตามลักษณะการเกาะของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ คือการดูดซับทางเคมีแบบรวมโมเลกุล (Associative Chemisorption) และการดูดซับทางเคมีแบบแยกโมเลกุล (Dissociative Chemisorption) แสดงดังรูปที่ 2.8 พิจารณาการดูดซับของแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์บนตัวพยุงแอลฟาอะลูมินา บนโลหะทองแดง และบนโลหะนิกเกิล พบว่าไม่เกิดพันธะเคมีขึ้นขึ้นระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์กับแอลฟาอะลูมินา แต่เกิดการดูดซับทางกายภาพ เนื่องจากตัวพยุงอะลูมินาไม่สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้กับแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ พบว่าเกิดการดูดซับทางกายภาพขึ้นแทน พลังงานของการดูดซับระหว่างโมเลกุลแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์กับคาร์บอนมอนนอกไซด์เหลวบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา เท่ากับพลังงานของการดูดซับทางกายภาพ โดยปรากฏการณ์นี้เกิดที่อุณหภูมิต่ำเท่านั้น การเกิดการดูดซับทางเคมีระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์บนโลหะทองแดง เป็นการดูดซับทางเคมีแบบรวมโมเลกุล เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์กับโลหะทองแดงมีพลังงานมากกว่าพลังงานของการดูดซับทางกายภาพ แต่ไม่มากพอที่จะทำลายพันธะระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจน (C-O) ในแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ ในกรณีการดูดซับระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์บนโลหะนิกเกิล อันตรกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์กับโลหะมากพอพอที่แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะถูกทำให้พันธะของคาร์บอนกับออกซิเจนแตกออกดังสมการ

$$CO \longrightarrow C_{(a)} + O_{(a)} \qquad (2.9)$$

จากการเกิดการดูดซับทางเคมีแบบแตกโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์บนนิกเกิล นำไปสู่การเตรียมมีเทนด้วยแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์กับแก๊สไฮโดรเจนดังสมการข้างล่าง

$$CO + 3H_2 \longrightarrow CH_4 + H_2O \qquad (2.10)$$



รูปที่ 2.8 การดูดซับลักษณะต่าง ๆ ของแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์บนพื้นผิวของแข็งชนิดต่าง ๆ (Spencer, M. S., 1989:31)

2.6.8 **การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะบนตัวรองรับ** (Preparation of Supported Metal Catalysts)

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยามีด้วยกันหลายขั้นตอน สามารถแบ่งขั้นตอนการเตรียมได้ดังต่อไปนี้

1. การเตรียมสารตั้งต้นและ active phase
2. การล้าง
3. การอบแห้ง
4. การเผาให้เป็นเถ้า

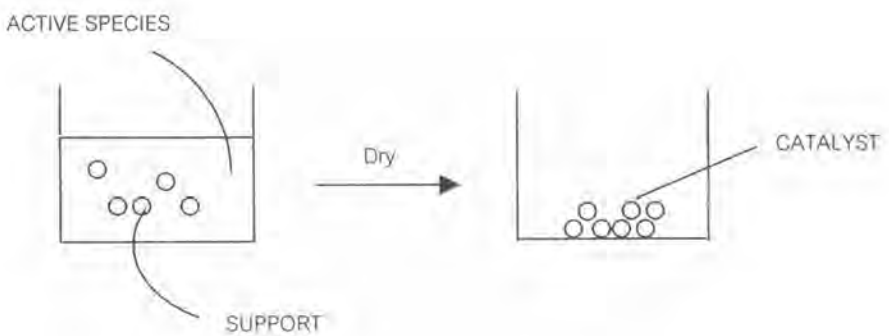
การเตรียมสารตั้งต้นและ active phase ทำได้ด้วยกันหลายวิธี ที่สำคัญมีอยู่ 2 วิธีคือวิธีการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) และการเคลือบฝัง (Impregnation) การเตรียมโดยวิธีการตกตะกอนร่วมนั้น active phase และ support precursor จะถูกผสมเข้าด้วยกันในรูปแบบสารละลาย จากนั้นจะทำการระเหยเอาตัวทำละลายออกเพื่อให้ของผสมตกตะกอนออกมา ข้อดีของวิธีนี้คือการกระจายตัวของ active phase เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ

การเตรียมด้วยวิธีการเคลือบฝังจัดว่าเป็นวิธีการที่ง่าย ในวิธีการนี้ตัวรองรับจะถูกแช่ลงไปในสารละลายที่มี active phase ละลายอยู่ หรือสารละลายที่มี active phase ละลายอยู่ถูกหยดลงไปบนตัวรองรับ จุดเด่นของวิธีการนี้คือสามารถควบคุมการกระจายตัวของ active phase ให้อยู่เพียงแค่ผิวนอกหรือแพร่เข้าไปถึงภายในของตัวรองรับได้

2.6.8.1 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 2.9 ในระหว่างการระเหยนี้อาจมีการควบคุมอุณหภูมิหรือปรับ pH ของสารละลายไปพร้อมกัน ข้อดีของวิธีการนี้คือตัวรองรับแต่ละตัวจะได้รับ active species สม่ำเสมอ แต่อาจมีปัญหาเกี่ยวกับการตกตะกอนที่ไม่พร้อมกันของเกลือของโลหะตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป อัตราส่วนของเกลือที่ตกตะกอนบนตัวรองรับมักจะแตกต่างไปจากสัดส่วนความเข้มข้นในสารละลาย



รูปที่ 2.9 แสดงการเตรียมด้วยวิธี wet impregnation (ธราธร มงคลศรี)

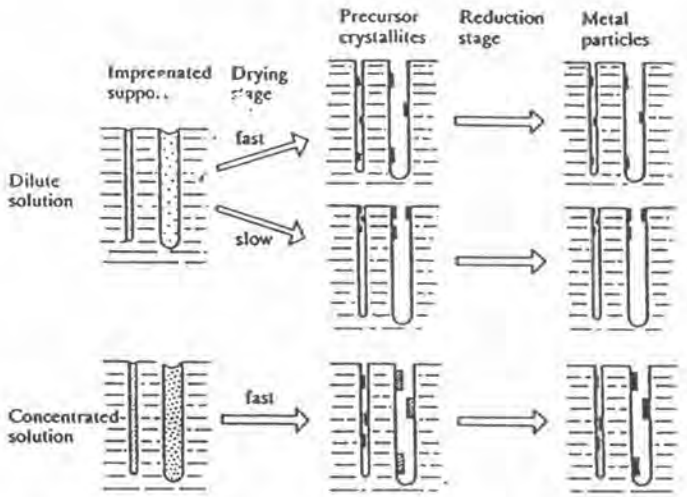
2.6.8.2 การล้าง

ขั้นตอนนี้เป็นการล้างเอาสารเคมีส่วนเกินและอนุภาคขนาดเล็กที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกวนออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น การล้างนี้ควรทำด้วยน้ำกลั่นหรือน้ำที่ปราศจากไอออนของโลหะ

2.6.8.3 การอบแห้ง

การอบแห้งเป็นการระเหยเอาตัวทำละลายที่ใช้ออกจนหมด นอกจากนี้ขั้นตอนการอบแห้งยังอาจใช้ควบคุมการกระจายตัวของ active species ได้ ถ้าหากการอบแห้งเป็นไปอย่างช้าๆ เกลือ

ของโลหะที่เติมลงไปจะมีโอกาสที่จะแพร่ออกมายังปากรูพรุน แต่ถ้าต้องการใช้ active species มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ ควรที่จะทำการอบแห้งอย่างรวดเร็ว อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งนี้ไม่สูงมาก เพียงแค่ระเหยเอาตัวทำละลายออกมาเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ผลของอัตราเร็วในการอบแห้งต่อการกระจายตัวของสปีชีส์ที่ว่องไว (ธราธร มงคลศรี)

2.6.8.4 **การเผาให้เป็นเถ้า** (Calcination)

การเผาให้เป็นเถ้าเป็นการเปลี่ยนองค์ประกอบของ active phase ให้อยู่ในรูปของออกไซด์ นอกจากนี้ยังอาจเป็นการเผาสารประกอบบางตัวที่ตกค้างอยู่หลังการอบแห้งให้หมดไปด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้งานในรูปแบบของโลหะมักจะเตรียมขึ้นในสภาพนี้ก่อน เพราะสภาพออกไซด์มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาต่ำในขณะที่สภาพที่เป็นโลหะจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศสูง ดังนั้นการเผาให้เป็นเถ้าจึงทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความปลอดภัยในการขนย้ายและบรรจุ

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mudge และคณะ (1985) ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไม้ โดยใช้แอลคาไลน์คาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาขั้นแรก (primary catalysts) ซึ่งเตรียมด้วยวิธีแบบแช่ (impregnation) และผสม (dry mixing) กับชีวมวล โดยนักวิจัยได้ศึกษาประสิทธิผลของตัวเร่งปฏิกิริยา 4 ชนิดและความเข้มข้นแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 550, 650 และ 750 องศาเซลเซียส ได้ผลการเรียงลำดับการเร่งปฏิกิริยาดังนี้ K_2CO_3 > Na_2CO_3 > $Na_3H(CO_3)_2.2H_2O$ > $Na_2B_4O_7.10H_2O$ และพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมแบบแช่มีปริมาณการเกาะของคาร์บอนเล็ก

น้อยหรือไม่มีเลยเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาผสม(dry mixing) และจากการศึกษาไม้ผสมกับ 17wt. % K_2CO_3 ด้วยวิธีแบบแช่ (impregnation) และแกซิฟายที่ 750 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ พบว่าน้ำมันทาร์ไม่ปรากฏในแก๊สขาออก ซึ่งโพแทสเซียมคาร์บอเนตจะพบปัญหาในบางการดำเนินงานเพราะโพแทสเซียมคาร์บอเนตอาจเกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้พื้นที่ผิวน้อยลง ส่งผลให้การเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพน้อยลง ซึ่งการผสม (dry mixing) ของไม้และตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าเกิดการเกาะของคาร์บอนบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามากเกินพอ เป็นสาเหตุทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมลง และการปรากฏของน้ำมันทาร์ในผลิตภัณฑ์แก๊สเป็นสัญญาณหนึ่งที่บอกว่าเกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ และจากการศึกษา K_2CO_3 และ Na_2CO_3 บนตัวรองรับอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาขั้นสอง (secondary catalysts) พบว่าผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ไม่สูงเมื่อชีวมวลผสมแบบแช่ (impregnation) กับตัวเร่งปฏิกิริยาโดยตรง และมีปริมาณมีเทนสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาแอลคาไลน์คาร์บอเนตช่วงเริ่มต้นสูงขึ้นและเข้าสู่สภาวะเสถียร และตัวเร่งปฏิกิริยาใช้ได้นานถึง 30 ชั่วโมง โดยไม่เกิดการเสื่อมสภาพ โดยเกิดการเกาะของคาร์บอนเล็กน้อยหรือไม่เกิดเลยบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

Hallen และคณะ (1988) ศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาแอลคาไลน์คาร์บอเนตในกระบวนการแกซิฟิเคชัน ด้วยไอน้ำ ตัวเร่งปฏิกิริยา Na_2CO_3, K_2CO_3 หรือ $CsCO_3$ เตรียมด้วยวิธีแบบแช่ (impregnation) หรือผสม (dry mixing) กับชีวมวล ซึ่งในการศึกษานี้พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิสูงกว่า จะมีการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนไปเป็นแก๊สลดลงระหว่างช่วงการระเหย (volatilization) ของกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไม้ แต่อัตราและปริมาณทั้งหมดของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นในระหว่างช่วงการเกิดแกซิฟิเคชัน ซึ่งการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเพิ่มปริมาณชาร์ระหว่างช่วงในการเกิดการระเหย (volatilization) แต่ปริมาณชาร์จะลดลงระหว่างช่วงที่สองในการเกิดแกซิฟิเคชัน และพบว่าการใช้แอลคาไลน์คาร์บอเนตสามารถเปลี่ยนแปลงคาร์บอนไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สได้มากขึ้น เนื่องจากช่วยลดปริมาณของเหลวหนืด (condensable liquids) ได้ นอกจากนี้ยังพบว่าผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนจากกระบวนการแกซิฟิเคชันไม่เกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาในการใช้ร่วมกับไอน้ำที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และพบว่า ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยา water-gas shift ส่วนการเกิดปฏิกิริยา ของ methane reforming เกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส เมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแอลคาไลน์ ซึ่งได้ผลการเรียงลำดับการเร่งปฏิกิริยาดังนี้ $CsCO_3 > K_2CO_3 > Na_2CO_3$

Encinar และคณะ (1998) ศึกษากระบวนการแกซิฟิเคชันของกากองุ่นและกากมะกอกภายใต้สภาวะการทดลองต่างๆ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ LiCl, NaCl, KCl, $AlCl_3.6H_2O$ และ $ZnCl_2$ ที่ 5 % แคทไอออน ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ในการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทุกตัวให้ผลเป็นที่น่าพอใจ ยกเว้น KCl ที่เพิ่มปริมาณชาร์และเศษส่วนแก๊ส และปริมาณของของเหลวลดลง ซึ่งผลที่ได้นี้เป็นที่แตกต่างกับการค้นพบของนักวิจัยรุ่นก่อนๆ ที่ว่าโพแทสเซียมในรูปของคาร์บอเนตมีการเร่งปฏิกิริยาสูงสามารถลดปริมาณของของเหลวได้ ซึ่งเป็นการเพิ่มผลิตภัณฑ์แก๊ส ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา Na, Al และ K ให้ผลิตภัณฑ์แก๊ส คือ คาร์บอนมอนอกไซด์เป็นส่วนใหญ่ ลิเทียมให้แก๊สไฮโดรเจนมากเป็นสองเท่าของปฏิกิริยาที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

Demirbas (2001) ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวลทั้ง 3 ชนิด คือ เปลือกมะกอก เปลือกของใยฝ้ายและของเสียจากชา และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวลทั้ง 3 ชนิด เพื่อผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ปริมาณมาก ที่อุณหภูมิ 770, 925, 975 และ 1025 เคลวิน พบว่าปริมาตรและผลิตภัณฑ์แก๊สทั้งหมดจากกระบวนการไพโรไลซิสทั้งแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งการใช้ 13 %$ZnCl_2$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของเปลือกมะกอก เปลือกของใยฝ้ายและของเสียจากชา ให้ผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจนมากที่สุด ที่อุณหภูมิ 1025 เคลวิน คือ 70.3, 59.9 และ 60.3% ตามลำดับ แต่ผลิตภัณฑ์แก๊สจากกระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้ $ZnCl_2$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงเมื่อมีผลิตภัณฑ์ของชาร์และของเหลวเพิ่มขึ้น ส่วนผลของตัวเร่งปฏิกิริยาพวก K_2CO_3 และ Na_2CO_3 บนกระบวนการไพโรไลซิสขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล โดย Na_2CO_3 เร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่า K_2CO_3 สำหรับเปลือกของใยฝ้ายและของเสียจากชา แต่ K_2CO_3 เร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่าสำหรับ เปลือกมะกอก

Franco และคณะ (2003) ศึกษาอิทธิพลของการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวลในเครื่องกำเนิดแก๊สแบบฟลูอิไดซ์เบดที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 700-900 องศาเซลเซียส โดยชีวมวลที่ใช้ในการทดลอง คือ สน ต้นโอ๊ก และยูคาลิปตัส พบว่าที่อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของไอน้ำกับชีวมวลเป็น 0.6-0.7 มวลต่อมวล ให้ผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจนมากและมีไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์น้อย โดยค่าความร้อนปานกลางอยู่ในช่วง 16-19 kJ/Nm^3 และพบว่าที่อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียสจะเกิดปฏิกิริยา water-gas shift ของต้นโอ๊กและยูคาลิปตัส ส่วนอุณหภูมิ 830-900 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยา Boudouard เด่นกว่าปฏิกิริยา water-gas shift ดังสมการ

$$CO + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2 \qquad \text{water-gas shift}$$

$$C + CO_2 \longrightarrow 2CO \qquad \text{Boudouard}$$

Lv และคณะ (2004) ศึกษากระบวนการแกซิฟิเคชันของชีวมวลโดยใช้อากาศและไอน้ำร่วมกันในเครื่องกำเนิดแก๊สแบบฟลูอิไดซ์เบด ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ อุณหภูมิ อัตราส่วนของไอน้ำกับชีวมวล (S/B) สัดส่วนอากาศต่างๆ กัน (equivalence ratio, ER) และขนาดอนุภาคของชีวมวล เพื่อหาผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ การย่อยสลายด้วยไอน้ำ (steam decomposition) ค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value, LHV) และประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอน โดยการทดลองที่สภาวะต่างๆ ให้ผลิตภัณฑ์แก๊สอยู่ในช่วง 1.43 ถึง 2.57 Nm^3/kg biomass และ ค่าความร้อนต่ำของแก๊สเชื้อเพลิงอยู่ระหว่าง 6741 ถึง 9143 kJ/Nm^3 และจากการศึกษาพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ได้แก๊สไฮโดรเจนสูงขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงมากเกินไปจะทำให้ได้ค่าความร้อนต่ำลง และพบว่าชีวมวลที่มีขนาดเล็กให้ผลิตภัณฑ์แก๊สและค่าความร้อนต่ำสูงขึ้น ซึ่งการศึกษานี้ยืนยันได้ว่าการใช้ไอน้ำในกระบวนการแกซิฟิเคชันให้แก๊สที่มีคุณภาพมากกว่าการใช้อากาศในกระบวนการแกซิฟิเคชัน

Hanaoka และคณะ (2005) ศึกษาผลของส่วนประกอบไม้ในกระบวนการแกซิฟิเคชันโดยใช้อากาศและไอน้ำในเครื่องกำเนิดแก๊สแบบ fixed bed ที่มีการป้อนทางด้านบนลงมา ทำที่ภาวะอุณหภูมิ 1173 เคลวิน และที่ความดันบรรยากาศ ชีวมวลที่ใช้ในการทดลอง คือ ต้นโอ๊ก เปลือกของต้นสน และองค์ประกอบของไม้ คือ เซลลูโลส ไซแลน และลิกนิน พบว่าการเปลี่ยนแปลงในเซลลูโลส ไซแลน และลิกนิน เป็น 97.9%, 92.2% และ 52.8% ของคาร์บอนเป็นตัวอ้างอิง ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์แก๊สในเซลลูโลสประกอบด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ 35.5 % mol คาร์บอนไดออกไซด์ 27 %mol และไฮโดรเจน 28.7 %mol ซึ่งองค์ประกอบของคาร์บอนมอนอกไซด์สูงกว่าคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซึ่งให้ผลเหมือนกับการใช้ต้นโอ๊ก จึงสามารถบอกได้ว่ามีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลัก แต่ในทางตรงกันข้าม ผลิตภัณฑ์แก๊สในไซแลน และลิกนินประกอบด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ 25 % mol คาร์บอนไดออกไซด์ 36 %mol และไฮโดรเจน 32 %mol ซึ่งองค์ประกอบของคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำกว่าคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซึ่งให้ผลเหมือนกับการใช้เปลือกของต้นสน จึงสามารถบอกได้ว่ามีลิกนินเป็นองค์ประกอบหลัก โดยผลเหล่านี้แสดงได้ว่าข้อมูลในการแกซิฟิเคชันในแต่ละองค์ประกอบสามารถทำนายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแกซิฟิเคชันของไม้โดยใช้อากาศและไอน้ำร่วมกันได้

ดังนั้นจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่นำมาเสนอไว้ข้างต้นสามารถนำมาสรุปประเด็นสำคัญได้ว่าการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ในกระบวนการแกซิฟิเคชันช่วยในการเร่งปฏิกิริยาได้ดีขึ้น โดยเฉพาะการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอัลคาไล โดยงานวิจัยที่ผ่านมาใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสัมผัสกับเชื้อเพลิงโดยตรง ทำให้ไม่สามารถแยกผลของ C-gasification และ tar-gasification ได้ชัดเจน ดังนั้นโครงการวิจัยนี้ทำการแยกส่วนของ C-gasification และ tar-gasification เพื่อศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อ tar-gasification และศึกษาผลของชนิดชีวมวลที่แตกต่างกัน ได้แก่ แกลบ ในกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวลที่ภาวะต่างๆ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง