

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 ชีวมวล (ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล, 2549)

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมมีผลผลิตทางการเกษตรหลากหลายชนิดเช่น ข้าว น้ำตาล มันสำปะหลัง ยางพาราและน้ำมันปาล์ม เป็นต้น ผลิตผลบางส่วนมีเหลือเพียงพอที่จะส่งออกไปยังต่างประเทศ สร้างรายได้ให้แก่ประเทศปีละหลายหมื่นล้านบาท จึงถือว่าประเทศไทยเป็นครัวของโลก อย่างไรก็ตามระหว่างการผลิตและการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรเหล่านี้ก่อให้เกิดชีวมวลหรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น เศษไม้ยางพารา แกลบ ฟางข้าว เหง้ามันสำปะหลัง และกากอ้อย เป็นต้น ชีวมวลบางส่วนถูกนำมาแปรรูปเป็นปุ๋ย วัสดุคืบ และเชื้อเพลิงบางส่วนถูกเผาทิ้งโดยเปล่าประโยชน์ เช่น ฟางข้าว ใบอ้อยยอดอ้อย และรากไม้ยางพารา เป็นต้น พลังงานชีวมวลที่เกิดขึ้นในแต่ละปีเทียบเท่าถ่านหินลิกไนท์ 54 ล้านตัน

ในพจนานุกรมของราชบัณฑิตยสถานไม่ได้ระบุความหมายชีวมวลไว้ ชีวมวลแปลมาจากศัพท์ภาษาอังกฤษว่า “ biomass “ ประกอบด้วยคำสองคำคือ ชีว และ มวล ชีวคือ สิ่งมีชีวิต เช่น มนุษย์ พืชและสัตว์ มวลคือ วัตถุสิ่งของต่างๆ ดังนั้นชีวมวลหมายถึงวัตถุ หรือสารที่ได้จากสิ่งมีชีวิต เช่น ข้าวสาร รำ แกลบ ฟางข้าวได้มาจากต้นข้าว และมูลสุกรได้มาจากการเลี้ยงสุกร เป็นต้น

อีกความหมายหนึ่งของชีวมวลคือ เป็นแหล่งกักเก็บพลังงาน เนื่องจากพืชต้องอาศัยแสงอาทิตย์ในการสังเคราะห์แสงและเจริญเติบโต จากนั้นแปรเปลี่ยนสภาพเป็นของแข็ง เช่น เศษไม้ ข้าวโพด และต้นอ้อย หรือแปรสภาพเป็นของเหลว เช่น น้ำยางพารา น้ำมันพืช ไบโอดีเซล และเอทานอล

จะเห็นว่าชีวมวลมีความหมายค่อนข้างกว้าง ชีวมวลบางชนิดเหมาะที่นำมาบริโภคมากกว่าเป็นพลังงานเพื่อให้มีความเข้าใจยิ่งขึ้น ได้นิยามความหมายชีวมวลในที่นี้ว่า “เศษวัสดุเหลือใช้จากการแปรรูปสินค้าทางการเกษตร หรือจากการเก็บเกี่ยว”

2.1.1 แหล่งกำเนิดของชีวมวล

ชีวมวลที่มาจากพืชนั้นถ้าจะแบ่งตามแหล่งที่มา สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ ประเภทแรก ชีวมวลที่หาได้ตามโรงงานแปรรูปสินค้าทางการเกษตร เช่น

1. แกลบได้จากโรงสีข้าว
2. ปีกไม้ เศษไม้และขี้เลื่อยได้จากโรงเลื่อยไม้ โรงงานเฟอร์นิเจอร์ไม้
3. ไยปาล์ม ทะลายเปล่าและกะลาปาล์มได้จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ
4. ชังข้าวโพดได้จากไซโลเก็บข้าวโพด
5. ชานอ้อยได้จากโรงงานน้ำตาล
6. เปลือกมันสำปะหลังได้จากโรงงานแป้งมัน
7. เปลือกไม้ยูคาลิปตัสได้จากโรงไม้สับ เป็นต้น

ชีวมวลประเภทนี้เป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมทั่วไปเนื่องจากรวบรวมได้ง่าย

ประเภทสอง ชีวมวลที่หาได้จากตามไร่ สวน และนาข้าว เช่น

8. ฟางข้าวอยู่ในนาข้าว
9. ปลายไม้ และรากไม้หรือตอไม้ยาพาราอยู่ในสวนยางพารา
10. ใบอ้อย และยอดอ้อยอยู่ในไร่อ้อย
11. เหง้ามันสำปะหลังอยู่ในไร่มันสำปะหลัง
12. ทางปาล์มหรือใบปาล์มอยู่ในสวนปาล์มน้ำมัน
13. ชังข้าวโพดได้จากไร่ข้าวโพด เป็นต้น

การนำชีวมวลประเภทนี้มาใช้งานต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บและรวบรวมเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ราคาต่อค่าความร้อนสูงกว่าประเภทแรก จึงถูกนำไปเป็นเชื้อเพลิงในสัดส่วนที่น้อยมาก ดังนั้นส่วนใหญ่ถูกเผาทิ้ง

ประเภทสาม ชีวมวลที่ปลูกใหม่เพื่อเป็นพลังงานโดยเฉพาะ เช่น การปลูกไม้โตเร็วเพื่อนำไม้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า วิธีการนี้ยังไม่เป็นที่นิยมในประเทศไทย เพราะไม่คุ้มต่อการลงทุน

2.1.2 ศักยภาพของชีวมวลในประเทศไทย

ตารางที่ 2.1 ได้ประเมินศักยภาพพลังงานชีวมวลที่เกิดขึ้นในแต่ละปี โดยอ้างอิงจากผลผลิตทางการเกษตรเฉลี่ยในแต่ละปี อัตราส่วนชีวมวลต่อผลผลิตโดยเฉลี่ย และค่าความร้อนที่ได้จากการวัดในสภาพสด หรือที่ระดับความชื้นที่ระบุ

ตารางที่ 2.1 พลังงานชีวมวลที่เกิดขึ้นในแต่ละปี

ผลผลิต		ชีวมวล	ความชื้น	ค่าความร้อนต่ำ เมกะจูล/กก.	อัตราส่วนชีวมวล		ปริมาณ ล้านตัน	พลังงาน กิกะจูล × 10 ⁶	
					ต่อผลผลิต ¹	ตัน/ไร่ ²			
ข้าวเปลือก	25	ล้านตัน	แกลบ	12.00%	13.52	21.00%		5.25	70.96
ข้าวเปลือก	25	ล้านตัน	ฟางข้าว	10.00%	12.33	49.00%		12.25	151.04
อ้อย	50	ล้านตัน	ชานอ้อย	50.73%	7.37	28.00%		14.00	103.15
อ้อย	50	ล้านตัน	ใบและยอด อ้อย	9.20%	15.48	17.00%		8.50	131.57
ไม้ยางพารา	0.25	ล้านไร่	ขี้เลื่อย	55.00%	6.57		3	0.75	4.93
ไม้ยางพารา	0.25	ล้านไร่	ปึกไม้	55.00%	6.57		12	3	19.71
ไม้ยางพารา	0.25	ล้านไร่	ปลายไม้	55.00%	6.57		12	3	19.71
ไม้ยางพารา	0.25	ล้านไร่	รากไม้	55.00%	6.57		5	1.25	8.21
ปาล์มน้ำมัน	5	ล้านตัน	ใยปาล์ม	38.50%	11.40	19.00%		0.95	10.83
ปาล์มน้ำมัน	5	ล้านตัน	กะลา ปาล์ม	12.00%	16.90	4.00%		0.20	3.38
ปาล์มน้ำมัน	5	ล้านตัน	ทะลาย เปล้าปาล์ม	58.60%	7.24	32.00%		1.60	11.58
ปาล์มน้ำมัน	5	ล้านตัน	หางปาล์ม	78.00%	1.76	141.00%		7.05	12.41
ปาล์มน้ำมัน	0.01	ล้านไร่	ลำต้น ปาล์ม	48.40%	7.54		10	0.1	0.75
มันสำปะหลัง	10	ล้านตัน	กากมัน สำปะหลัง	80.00%	1.47	37.00%		3.70	5.43
มันสำปะหลัง	10	ล้านตัน	เปลือกมัน สำปะหลัง	67.00%	1.49	0.06%		0.01	0.01
มันสำปะหลัง	17	ล้านตัน	เหง้ามัน สำปะหลัง	59.40%	5.49	20.00%		3.40	18.68
ข้าวโพด	5	ล้านตัน	ชังข้าวโพด	40.00%	9.62	24.00%		1.20	11.54
ข้าวโพด	5	ล้านตัน	ลำต้น ข้าวโพด	42.00%	9.83	82.00%		4.10	40.30
ไม้ยูคาลิปตัส	0.6	ล้านไร่	เปลือกไม้ ยูคาลิปตัส	63.00%	4.92		3	1.8	8.85
รวม									633
เทียบเท่าน้ำมันดิบ, KTOE									15,000

¹ เป็นข้อมูลจาก www.dede.go.th

² เป็นข้อมูลจากการสำรวจของศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล

ชีวมวลที่เกิดขึ้นในแต่ละปีนั้น บางส่วนได้ถูกนำมาใช้เป็นพลังงานแล้วดังนี้

1. กระบวนการผลิตของผู้ผลิตชีวมวลเอง

- 1.1 โรงงานน้ำตาลใช้ชานอ้อยประมาณร้อยละ 80 ของส่วนที่เกิดขึ้น เป็นเชื้อเพลิงผลิตไฟฟ้าและไอน้ำเพื่อกระบวนการผลิต คิดเป็นพลังงาน 82.50 ล้านกิกะจูล

- 1.2 โรงสีข้าว โรงสีไฟ และโรงสีข้าวหนึ่งใช้แกลบเป็นพลังงานในการอบข้าวเปลือก สีข้าวและสีข้าว คิดเป็นพลังงานรวม 21.30 ล้านกิกะจูล
- 1.3 โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบใช้ใยปาล์มประมาณร้อยละ 90 ของส่วนที่เกิดขึ้น เป็นเชื้อเพลิงผลิตไฟฟ้าและไอน้ำเพื่อกระบวนการผลิต คิดเป็นพลังงาน 9.75 ล้านกิกะจูล
- 1.4 โรงเลื่อยไม้ยางพาราใช้ปีกไม้ยางพาราประมาณร้อยละ 40 ของส่วนที่เกิดขึ้น เป็นเชื้อเพลิงอบไม้ยางพารา คิดเป็นพลังงาน 7.88 ล้านกิกะจูล
- 1.5 โรงงานผลิตเยื่อกระดาษใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัส และฝุ่นไม้ประมาณร้อยละ 50 ของส่วนที่เกิดขึ้น เป็นเชื้อเพลิงผลิตไฟฟ้าและไอน้ำเพื่อกระบวนการผลิต คิดเป็นพลังงาน 4.43 ล้านกิกะจูล

คิดเป็นพลังงานรวม 125.86 ล้านกิกะจูลหรือ 2,900 เทียบเท่าน้ำมันดิบ

2. โรงไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้แกลบ ชานอ้อย น้ำมันยางดำและเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ผลิตไฟฟ้าจ่ายเข้าระบบ คิดเป็นหน่วยไฟฟ้าเท่ากับ 1,764 ล้านกิโลวัตต์-ชั่วโมง. (สถิติปี 2548)
3. โรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ชีวมวลผลิตความร้อนเพื่อกระบวนการผลิตตัวอย่าง เช่น
 - ก. โรงงานแป้งมัน โรงงานผลิตผงชูรส และโรงงานผลิตน้ำมันพืชใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันเตา
 - ข. โรงงานผลิตถุงมือยางใช้เศษไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันเตา
 - ค. โรงงานปูนซีเมนต์ที่ใช้แกลบ และเศษไม้ยางพาราทดแทนถ่านหิน
 - ง. โรงงานปลาป่นและโรงงานผลิตปุ๋ยขาวใช้เศษไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิง
 - จ. โรงเผาอิฐที่ใช้แกลบและเศษไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิง เป็นต้น

สถิติการใช้พลังงานส่วนนี้ยังไม่มีตัวเลขที่แน่ชัด จากการสำรวจและประเมินเบื้องต้นของศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล คาดว่าอยู่ที่ 2,000 เทียบเท่าน้ำมันดิบ

4. ภาคที่อยู่อาศัย เช่น ฟืนและถ่านไม้ ถูกนำไปเป็นพลังงานในครัวเรือนตามชนบท ซึ่งยังไม่ทราบปริมาณที่แน่ชัด

ชีวมวลบางชนิดไม่เหมาะนำมาเป็นพลังงานเนื่องจากความชื้นค่อนข้างสูงเช่น กากและเปลือกมันสำปะหลัง ชีวมวลบางชนิดเหมาะนำไปเป็นเชื้อเพลิงได้ดีแต่อยู่ในท้องไร่ ท้องนา ต้องหาวิธีการจัดเก็บรวบรวมเพื่อให้ต้นทุนถูกที่สุด เช่น ฟางข้าว ใบอ้อยยอดอ้อย รากไม้ยางพาราและเห้งมันสำปะหลัง เป็นต้น

2.1.3 ประโยชน์ของชีวมวล

การนำชีวมวลมาเป็นเชื้อเพลิงมีข้อดีหลายประการคือ

1. การเผาไหม้สารทุกชนิดจะเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งล่องลอยไปในอากาศ และห่อหุ้มโลกไว้ เมื่อแสงอาทิตย์ส่องลงมาถึงโลก รังสีบางส่วนไม่สามารถสะท้อนกลับออกไปได้ ทำให้โลกร้อนขึ้น จึงเรียกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ว่าเป็นแก๊สเรือนกระจก³ แต่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาชีวมวลจะถูกหมุนเวียนกลับไปใช้โดยพืชเพื่อสังเคราะห์แสง ดังนั้นการเผาชีวมวลไม่ถือว่ก่อให้เกิดแก๊สเรือนกระจก
2. การไม่นำชีวมวลมาใช้ โดยปล่อยให้ย่อยสลายตามธรรมชาติ เช่น มูลสัตว์ จะเกิดแก๊สมีเทนซึ่งถือว่าเป็นแก๊สเรือนกระจกชนิดหนึ่ง และมีอันตรายกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 21 เท่า
3. ชีวมวลจะมีกำมะถัน หรือซัลเฟอร์ ไม่เกินร้อยละ 0.2 ดังนั้นการนำชีวมวลมาเผาไหม้ จะไม่สร้างปัญหาเรื่องฝนกรด (น้ำมันเตามีปริมาณกำมะถันประมาณร้อยละ 2 ส่วนถ่านหินมีปริมาณกำมะถันประมาณร้อยละ 0.3 – 3.8 ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหิน)
4. ขี้เถ้าของชีวมวลมีสภาพเป็นต่าง ดังนั้นเหมาะสมที่จะนำไปเพาะปลูกหรือปรับสภาพดินที่เป็นกรด แต่ขี้เถ้าจากการเผาถ่านหินจะมีสารโลหะหนักปนอยู่ ดังนั้นต้องนำไปฝังกลบอย่างถูกวิธี เช่น มีฝ้ายางรองรับด้านล่าง
5. ช่วยลดภาระในการกำจัด เช่น นำไปฝังกลบ และเผาทิ้ง เป็นต้น
6. ก่อให้เกิดการสร้างงานในท้องถิ่น ชุมชนมีรายได้เพิ่มขึ้น มีการประเมินว่าการนำชีวมวลในท้องถิ่นมาใช้ ทำให้เงินหมุนเวียนในระบบเพิ่มขึ้นถึง 7 เท่าและรายได้ประชาชาติสูงขึ้น กล่าวคือเมื่อชาวไร่ชาวนามีรายได้เพิ่มขึ้นจากชีวมวล จะนำเงินส่วนนี้ใช้จ่ายหมุนเวียนในท้องถิ่น เช่น จ้างคนเก็บและรวบรวมชีวมวล คนเหล่านี้จะนำเงินไปใช้จ่ายอีกทอดหนึ่ง เป็นอย่างนี้เรื่อยไป
7. ประหยัดเงินตราต่างประเทศเพราะไม่ต้องนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ เช่น น้ำมันเตา และถ่านหิน เป็นต้น

³แก๊สเรือนกระจกประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน แก๊สไนตรัสออกไซด์ แก๊สไฮโดรฟลูโอโรคาร์บอน แก๊สเปอร์ฟลูโอโรคาร์บอน และแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์

2.1.4 โครงสร้างทางกายภาพ

เชื้อเพลิงจะมีรูปร่างแตกต่างกันไปตามแต่ละชนิด เช่น น้ำมันดิบมีลักษณะเป็นของเหลว ถ่านหินมีลักษณะเป็นของแข็ง และแก๊สธรรมชาติมีลักษณะเป็นแก๊ส ส่วนชีวมวลจะมีลักษณะเป็นของแข็งซึ่งอาจถือได้ว่าอยู่ในประเภทเดียวกับถ่านหิน แต่รูปร่างจะแตกต่างกันไปขึ้นกับชนิดของชีวมวล นอกจากนี้ความชื้นและสิ่งเจือปนถือได้ว่าเป็นเอกลักษณ์เฉพาะของ ชีวมวลนั้นๆ

2.1.4.1 ขนาดและรูปร่าง

มีหลากหลายแล้วแต่ว่าเป็นชีวมวลของพืชชนิดใด เช่น แกลบมีขนาดเล็กไม่เกิน 1 เซนติเมตร ปีกไม้ที่ได้จากโรงเลื่อยไม้ยาวประมาณ 1 เมตร และขานอ้อยที่ได้จากโรงงานน้ำตาลจะมีสภาพเป็นเส้นยาว 10 – 20 เซนติเมตร เป็นต้น

2.1.4.2 ความชื้น

ชีวมวลในสภาพสดจะมีความชื้นสูง เช่น ไม้สดมีความชื้นประมาณร้อยละ 50 – 60 ทางปาล์มมีความชื้นประมาณร้อยละ 80 และขังข้าวโพดมีความชื้นประมาณร้อยละ 40 – 50 เป็นต้น แต่มีชีวมวลประมาณ 3 ชนิดที่มีความชื้นค่อนข้างต่ำ คือ

- แกลบ เนื่องจากกระบวนการสีข้าว ข้าวเปลือกถูกลดความชื้นลงเหลือร้อยละ 12-14 เพื่อป้องกันการแตกหักของข้าวสารขณะทำการสี ดังนั้นแกลบที่ได้จะมีความชื้นต่ำกว่าข้าวเปลือก
- ใบอ้อยยอดอ้อย มีความชื้นประมาณร้อยละ 10 เพราะอยู่ส่วนนอกของลำต้นที่รับแสงแดดตลอดเวลา
- กะลาปาล์ม มีความชื้นประมาณร้อยละ 12

2.1.4.3 สิ่งเจือปน

ชีวมวลจะมีสิ่งแปลกปลอมและเจือปนหลายอย่างเช่น เศษดิน หิน และคราบน้ำมันปาล์ม เป็นต้น สิ่งเจือปนที่ต้องระมัดระวังให้มากคือ คราบน้ำมันปาล์มที่ติดอยู่ในทะลายปาล์มและกะลาปาล์ม เพราะเมื่อคราบน้ำมันปาล์มถูกความร้อนถึง 800 องศาเซลเซียส จะกลายเป็นยางเหนียวเกาะติดในห้องเผาไหม้ เป็นผลให้หม้อไอน้ำมีประสิทธิภาพลดลง

2.1.5 โครงสร้างทางเคมี

การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีชีวมวลมี 2 แบบที่ต้องวิเคราะห์ คือ

2.1.5.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ

คือการวิเคราะห์หาโครงสร้าง องค์ประกอบของเชื้อเพลิง ประกอบด้วย

1. ความชื้น (moisture) คือความชื้นหรือน้ำ หมายถึง ปริมาณน้ำที่มีอยู่ชีวมวลส่วนมากจะมีความชื้นค่อนข้างสูง เพราะเป็นผลผลิตทางการเกษตร ถ้าต้องการนำชีวมวลเป็นพลังงานโดยการเผาไหม้ ความชื้นไม่ควรเกินร้อยละ 50
2. สารระเหย (volatile matter) คือส่วนที่เป็นสารระเหย
3. คาร์บอนคงตัว (fixed carbon) คือส่วนที่ให้ความร้อน ยังมีค่ามาก ค่าความร้อนยิ่งสูง
4. เถ้า (ash) คือขี้เถ้าหรือส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ ชีวมวลส่วนใหญ่มีสัดส่วนขี้เถ้าร้อยละ 10-16 โดยน้ำหนัก

2.1.5.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

เป็นการวิเคราะห์หาสัดส่วนของธาตุซึ่งประกอบด้วย 4 ธาตุหลัก คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน และธาตุอื่นๆ ที่มีสัดส่วนน้อยคือ กำมะถัน และคลอรีน

2.1.6 แกลบ

แกลบเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าวเปลือก มีรูปร่างเล็กยาวไม่เกิน 5 มิลลิเมตร และหนาไม่เกิน 2 มิลลิเมตร สีเหลือง มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 15 แกลบสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น

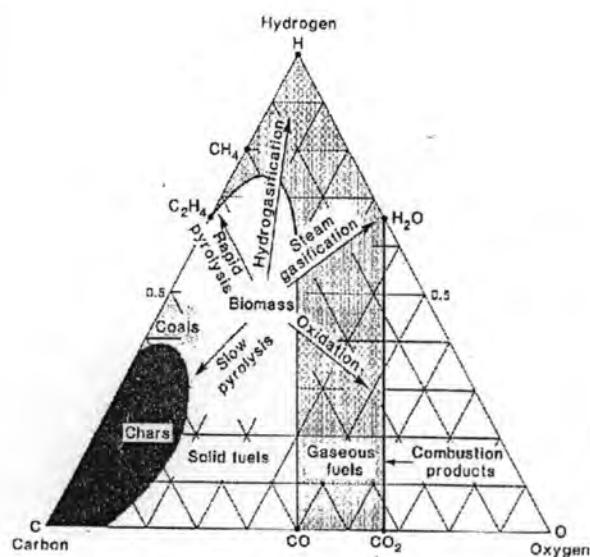
1. ผสมลงในดินเพื่อปรับสภาพดินก่อนเพาะปลูก
2. โปรยใต้โรงเลี้ยงไก่เพื่อรองรับมูลไก่ หรือการเลี้ยงสุกรแบบหลุม (หมูหลุม) ใช้แกลบผสมกับดินและจุลินทรีย์เพื่อเป็นสารตั้งต้นในการย่อยสลายมูลสุกร
3. นำไปเผาเป็นถ่านอัดแท่ง

4. เป็นเชื้อเพลิงสำหรับโรงสีข้าว กล่าวคือ นำมาเผาได้ความร้อนเพื่อลดความชื้นข้าวเปลือก และใช้ในโรงสีไฟ โรงสีข้าวหนึ่ง
5. เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตอิฐมอญ, โรงไฟฟ้า, โรงปูนซีเมนต์และโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อทดแทนน้ำมันเตา

แกลบเป็นเชื้อเพลิงที่ดีเพราะมีความชื้นต่ำและขนาดเล็ก ชี้้แกลบยังสามารถนำมาผสมกับดินเพื่อปลูกไม้ดอกไม้ประดับเจริญเติบโตดี นอกจากนี้ชี้้แกลบมีสัดส่วนของซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) มากกว่าร้อยละ 90 และถ้าสามารถควบคุมสมบัติให้ได้ตามที่ผู้ซื้อต่างประเทศกำหนดสามารถขายได้ในราคามากกว่า 4,000 บาท/ตัน แกลบมีจุดด้อยคือ มีปริมาณชี้้แกลบในสัดส่วนร้อยละ 16-18 โดยน้ำหนัก ซึ่งถือว่าค่อนข้างสูง ดังนั้นในการเผาไหม้ควรคำนึงถึงจุดนี้

2.2 หลักการแปรรูปชีวมวล

การแปรรูปชีวมวลให้เป็นแหล่งพลังงานที่มีประสิทธิภาพ กระทำได้โดยใช้เทคโนโลยีการแปรรูปทางความร้อน (thermal conversion technology) ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการคือ ไพโรไลซิส (pyrolysis), แกซิฟิเคชัน และการเผาไหม้ (combustion) โดยแผนภาพอธิบายกระบวนการเหล่านี้ไปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ แสดงดังกราฟสามเหลี่ยมรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของชีวมวล (Probstien and Hick, 1985)

2.3 กระบวนการแกซีฟิเคชัน

2.3.1 นิยาม

กระบวนการแกซีฟิเคชัน เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่ใช้เปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในรูปของแก๊สที่เผาไหม้ได้ โดยใช้เตาผลิตแก๊ส โดยมีการป้อน ออกซิเจน อากาศ หรือไอน้ำ ซึ่งใช้เป็นตัวออกซิไดซ์ ในปริมาณที่จำกัดเข้าสู่เตาผลิตแก๊ส แก๊สที่ผลิตได้จากกระบวนการผลิตแก๊สนั้นจะเรียกว่า "แก๊สผลิตภัณฑ์" ซึ่งประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ร้อยละ 20-30 แก๊สไฮโดรเจน ร้อยละ 5-15 แก๊สมีเทน ร้อยละ 2-4 แก๊สไนโตรเจน ร้อยละ 50-60 นอกจากนี้ยังได้ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 5-15 และไอน้ำ ร้อยละ 6-8

การผลิตแก๊สโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ นั้นจะทำให้แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ มีปริมาณของ N_2 ในปริมาณที่สูง ทำให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีค่าต่ำประมาณ 4-6 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร แต่ถ้าใช้ไอน้ำหรือออกซิเจน เป็นตัวออกซิไดซ์จะทำให้ได้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีปริมาณของ H_2 และ CO สูง ซึ่งทำให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าความร้อนสูงกว่าการใช้อากาศเป็นสารออกซิแดนท์ โดยมีค่าความร้อนประมาณ 10-20 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร

2.3.2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแกซีฟิเคชัน

การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้กระบวนการแกซีฟิเคชันนั้น จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการที่สำคัญ 2 กระบวนการ ซึ่งได้แก่ กระบวนการไพโรไลซิส และกระบวนการแกซีฟิเคชัน โดยการเกิดการไพโรไลซิสจะเป็นการทำให้องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลเกิดการสลายตัวกลายเป็นสารระเหยได้ การเกิดการไพโรไลซิสนี้จะรู้จักกันในอีกชื่อหนึ่งว่า "devolatilization" ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน โดยในขั้นนี้สารระเหยได้ ร้อยละ 75-90 จะอยู่ในรูปของแก๊สและของเหลวไฮโดรคาร์บอน ส่วนที่เหลือซึ่งเป็นสารที่ไม่สามารถระเหยได้นั้น จะอยู่ในรูปของถ่าน ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้มี 3 ประเภทคือ

2.3.2.1 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง

มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเรียกว่า ถ่านชาร์ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือผลิตสารเคมีอื่นได้อีก เช่น ถ่านกัมมันต์ แนฟทาลีน แอนทราซีน และสารประกอบไซยาโนเจน เป็นต้น แต่ส่วนใหญ่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงไร้ควัน เช่น ถ่านไร้ควัน เพื่อใช้ในบ้านเรือน และอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือกลางได้ดี เช่น เป็นเชื้อเพลิงให้หม้อไอน้ำ การเผาอิฐ การอบแห้ง ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โรงงานผลิตหินปูนและซีเมนต์ หรือใช้ในโรงงานถลุงเหล็ก และทองแดง

เพราะไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสภาพแวดล้อมจากกลิ่นหรือควันที่เกิดจากสารระเหย และสารประกอบพวกไนโตรเจน และกำมะถัน

2.3.2.2 ผลผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

ประกอบด้วยน้ำ และสารประกอบที่ละลายน้ำ อีกส่วนหนึ่งจะเป็นน้ำมันทาร์ องค์ประกอบของน้ำมันทาร์เป็นสารประกอบที่ซับซ้อนของไฮโดรคาร์บอน ที่มีโครงสร้างส่วนมากเป็นพวกวงแหวนแนพทาลินเชื่อมด้วยหมู่เอทีลีน 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 ไพริดีน
- น้ำมันช่วงหนัก (heavy oil) ช่วงอุณหภูมิ 250 – 300 องศาเซลเซียส ได้แก่ ไดเมทิล แนพทาลิน
- น้ำมันแอนทาซีน (anthracence) ช่วงอุณหภูมิ 300 – 350 องศาเซลเซียส ได้แก่ ฟลูออรีน ฟีนานทีน
- 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 ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบของน้ำมันทาร์กับอุณหภูมิแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบทางเคมีของ Biomass Tars (อาณาณี 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	Benzanthracenes
Guaiacols	Benzaldehydes	Benzanthracenes	Benzopyrenes
Syringols			226 MW PAHs
Complex- Phenolics			276 MW PAHs

2.3.2.3 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

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

2.3.3 ปฏิกริยาเผาไหม้พื้นฐาน (fundamental combustion reactions)

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างคาร์บอนกับอากาศและ/หรือไอน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ปฏิกริยาเหล่านี้มีการศึกษามานานแล้ว นับได้ว่าเป็นปฏิกิริยาพื้นฐานที่สามารถนำมาอธิบายกระบวนการเผาไหม้ต่างๆ ได้

ตารางที่ 2.3 ปฏิกิริยาการเผาไหม้พื้นฐาน (อาณาณี เหลืองนฤมิตชัย, 2538)

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

หมายเหตุ 1. ปฏิกิริยาการทดลองที่สภาวะ 1,200 องศาเซลวิน (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 ที่เกิดภายใต้ภาวะที่แก๊สฟาย มีการเรียกชื่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตามลักษณะของแก๊สที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น

ออกซิแกซิฟิเคชัน (oxygasification) เป็นการเผาไหม้คาร์บอนที่กำลังลุกแดงภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอหรือจำกัดออกซิเจน เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรืออากาศ เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยแก๊สที่เกิดขึ้นได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์

แกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ (steam gasification) เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับไอน้ำ เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน แก๊สที่ได้ส่วนใหญ่ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน แก๊สเหล่านี้มีค่าความร้อนสูงพอที่จะนำมาทำแก๊สเชื้อเพลิง

คาร์บอกซิแกซิฟิเคชัน (carboxygasification) เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน

ไฮโดรแกซิฟิเคชัน (hydrogasification) เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจนโดยตรง เพื่อผลิตมีเทน เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และเกิดขี้เถ้าที่อุณหภูมิสูง ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือแก๊สมีเทน ซึ่งเป็นแก๊สที่มีค่าความร้อนสูงจึงเป็นแก๊สที่ต้องการให้เกิดในการแกซิฟายมาก แต่ว่าปฏิกิริยานี้เกิดน้อยมาก นอกจากนี้จะมีการป้อนไฮโดรเจนซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำคัญของปฏิกิริยาเข้าไปเพิ่มเติม

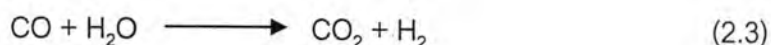
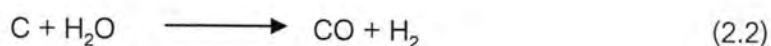
ปฏิกิริยาชิฟท์ (water-gas shift reaction) เป็นปฏิกิริยาย้อนกลับได้ของคาร์บอนมอนอกไซด์กับไอน้ำซึ่งแข่งขันกับปฏิกิริยาที่ 5 ดังตารางที่ 2.3 ได้คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์

2.4 ระบบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

ในปัจจุบันกระบวนการแกซิฟิเคชันมีการทดลองอยู่ 3 ระบบ คือ

2.4.1 การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ (low heating value gas or low Btu gas)

แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อนประมาณ 3.3-5.6 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร เกิดจากการเผาไหม้บางส่วนของถ่านกับอากาศ โดยมากมักจะมีไอน้ำอยู่ด้วย ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นดังนี้

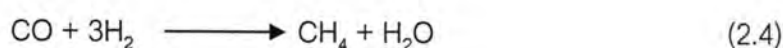


2.4.2 การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนปานกลาง (medium heating value gas or medium Btu gas)

แก๊สเชื้อเพลิงมีค่าความร้อนประมาณ 9.3-20.5 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร กระบวนการนี้ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ที่ได้จากการแยกออกจากอากาศ เพื่อใช้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (partial oxidation) การไม่มีไฮโดรเจนจะทำให้ค่าความร้อนสูงขึ้น

2.4.3 การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูง (high heating value gas or high Btu gas)

ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้เทียบเท่ากับ Substitute Natural Gas (SNG) ส่วนประกอบของแก๊สนี้มักเป็นมีเทนเกือบบริสุทธิ์ ซึ่งจาก medium Btu gas สามารถเปลี่ยนเป็น SNG ได้โดยกระบวนการมีเทนเนชัน (methanation) ที่อุณหภูมิต่ำ เกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเป็นแก๊สมีเทนและน้ำ ดังสมการ



2.5 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

คำว่า “เบดนิ่ง” ที่ใช้ในเครื่องแก๊สซิฟิเคชันคือเม็ดของแข็งจะพักอยู่บนตะแกรงรองรับ ปล่อยให้ของไหลไหลคดเคี้ยวผ่านไปตามช่องว่างที่มีอยู่ในเบด ซึ่งกระบวนการแบบเบดนิ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามทิศทางการไหลของอากาศ คือ การไหลแบบสวนทางกัน (updraft gasifier) และการไหลแบบทางเดียวกัน (downdraft gasifier) ดังแสดงในรูปที่ 2.2

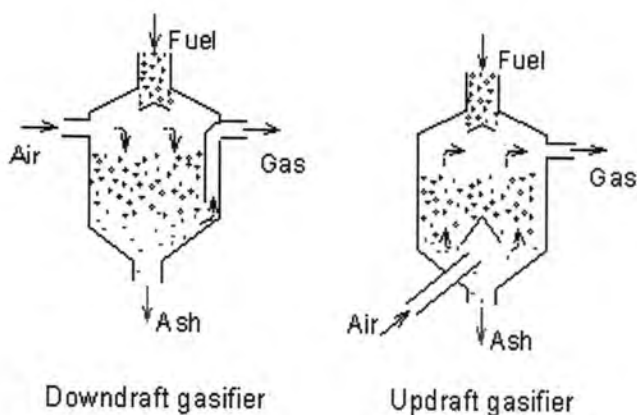
2.5.1 การไหลแบบสวนทางกัน

วัตถุดิบจะเข้าสู่เตาผลิตแก๊สโดยการนำเข้าทางด้านบนและจะเคลื่อนตัวตลอดเวลาในแนวของเตา ไอน้ำและอากาศที่เข้าทางด้านล่างจะเคลื่อนตัวขึ้นด้านบน บริเวณส่วนล่างของเบด คาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อจากช่วงนี้ปฏิกิริยาดูดความร้อนทั้งหลายก็เกิดขึ้น แก๊สร้อนจากปฏิกิริยาเหล่านี้ลอยตัวขึ้นผ่านเบดของคาร์บอน คาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้น โดยปฏิกิริยาของคาร์บอนไดออกไซด์กับคาร์บอน ซึ่งพอสรุปได้ว่า ขณะที่วัตถุเคลื่อนตัวลงมา สิ่งที่จะเกิดขึ้นคือ

- การ Drying เมื่อสัมผัสกับแก๊สร้อนที่ลอยตัวขึ้น
- การ Devolatilization สารระเหยในวัตถุดิบจะระเหยออกมาแตกตัวให้แก๊สไฮโดรเจน มีเทน และไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลหนักอื่นๆ ลอยปะปนไปกับแก๊สผลิตภัณฑ์
- เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนมีทั้งออกซิเดชันและรีดักชัน ส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาที่เหลือจะถูกปล่อยออกมาทางส่วนล่างของเบด

2.5.2 การไหลแบบทางเดียวกัน

กระบวนการการไหลแบบทางเดียวกันหลักการคล้ายกับการไหลแบบสวนทางกัน ต่างกันตรงที่วัตถุดิบจะเข้าสู่เตาผลิตแก๊สโดยการนำเข้าทางด้านบนและจะเคลื่อนตัวตลอดเวลาในแนวของเตา ไอน้ำและอากาศที่เข้าทางด้านบนจะเคลื่อนตัวลงด้านล่าง ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ออกทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาที่เหลือจะถูกปล่อยออกมาทางส่วนล่างของเบด ซึ่งระบบนี้ได้รับการพัฒนาโดยมีจุดมุ่งหมายที่เปลี่ยนน้ำมันทาร์ที่เกิดขึ้นในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงไปเป็นแก๊สที่มีความสำคัญมาก



รูปที่ 2.2 แสดงทิศทางการไหลของอากาศในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

(อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย, 2538)

2.6 ไฮโดรเจน

2.6.1 คุณสมบัติของไฮโดรเจน

ไฮโดรเจนเป็นธาตุที่เบาที่สุดและเป็นองค์ประกอบของน้ำที่เป็นปัจจัยที่สำคัญมากที่สุดของสิ่งมีชีวิตบนโลก เป็นโมเลกุลมีทั่วไปตามธรรมชาติ บรรยากาศในโลกรวมแก๊สไฮโดรเจนประมาณ 0.1 ส่วนในล้านส่วน (ppm) มีความแข็งแรงในการยึดโมเลกุล เท่ากับ 436 กิโลจูลต่อโมล ดังนั้นเมื่อต้องการให้ไฮโดรเจนโมเลกุลทำปฏิกิริยา จึงต้องใช้พลังงานเพื่อทำลายความแข็งแรงในการยึดโมเลกุลดังกล่าว เช่น เพิ่มอุณหภูมิ ใช้สารเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น ไฮโดรเจนอะตอมประกอบด้วยนิวเคลียสอยู่กลาง ภายในนิวเคลียส ประกอบด้วยโปรตอน และนิวตรอน และมีอิเล็กตรอนวิ่งรอบนอก เหมือนธาตุอื่นๆ ไฮโดรเจนมี 3 ไอโซโทปขึ้นกับจำนวนโปรตอน และจำนวนนิวตรอนที่ต่างกัน ดังนี้

1. ไฮโดรเจน (hydrogen) มีจำนวนโปรตอน 1 โปรตอน จำนวน 1 นิวตรอน มีน้ำหนักอะตอม เท่ากับ 1.0078

2. ดิวเทอเรียม (deuterium) มีจำนวนโปรตอน 2 โปรตอน จำนวน 1 นิวตรอน มีน้ำหนักอะตอม เท่ากับ 2.0141

3. ทริเทียม (tritium) มีจำนวนโปรตอน 3 โปรตอน จำนวน 1 นิวตรอน มีน้ำหนักอะตอม เท่ากับ 3.0161

ลักษณะทั่วไปของไฮโดรเจนทั้ง 3 สถานะ ไฮโดรเจนที่เป็นของแข็งไม่มีสี โครงสร้างผลึก 6 เหลี่ยม Molar Volume = 22.56 cm³/mol ไฮโดรเจนที่เป็นของเหลวไม่มีสี ค่าความหนืด (viscosity) ต่ำ เคลื่อนที่ได้เร็ว ไฮโดรเจนที่เป็นก๊าซ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นพิษ แก๊สไฮโดรเจน 1 ลิตร มีมวล 0.0898 กรัม

2.6.2 การผลิตแก๊สไฮโดรเจน

ในปัจจุบันแก๊สไฮโดรเจนสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบสองแหล่งหลักๆ คือ เชื้อเพลิงฟอสซิล จำพวกแก๊สธรรมชาติ ถ่านหิน น้ำมันดิบ และเชื้อเพลิงจากพลังงานหมุนเวียน เช่น ชีวมวล และน้ำ สำหรับเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนนั้น สามารถแบ่งได้เป็น 3 เทคโนโลยีหลักๆ ได้แก่

- กระบวนการความร้อนเคมี (thermo-chemical processes)
- กระบวนการไฟฟ้าเคมี (electrochemical processes)
- กระบวนการทางชีวเคมี (biochemical processes)

การผลิตแก๊สไฮโดรเจนสามารถทำได้หลายกระบวนการดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่กระบวนการที่ในปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยมากที่สุด และได้รับการคาดว่าจะสามารถใช้จริงในเชิงพาณิชย์ได้ง่ายที่สุด คือ กระบวนการความร้อนเคมี เช่น กระบวนการรีฟอร์มมิง ซึ่งแบ่งออกได้เป็นอีกหลายกระบวนการย่อยซึ่งขึ้นอยู่กับสารที่ใช้

กระบวนการรีฟอร์มมิงหลัก ๆ ที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย ได้แก่

1. กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (steam reforming) ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนสูง แต่เสียค่าใช้จ่ายน้อย จึงถูกนำมาใช้ในทางการค้าแล้ว โดยหลักการของกระบวนการนี้คือ การป้อนไอน้ำ เข้าสู่ระบบเพื่อทำปฏิกิริยากับสารไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในสถานะแก๊ส เช่น แก๊สธรรมชาติ แก๊สชีวภาพ และเอทานอล เป็นต้น โดยไฮโดรเจนจะถูกดึงออกจากไอน้ำ และสารไฮโดรคาร์บอน ส่วนออกซิเจนที่เหลือจากน้ำและคาร์บอนที่เหลือจากไฮโดรคาร์บอนจะรวมตัวกันเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

2. กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide reforming หรือ dry reforming) เป็นกระบวนการที่คล้ายคลึงกับกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ แต่จะต่างกันตรงที่ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นวัตถุดิบ ข้อดีของกระบวนการนี้คือช่วยลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นแก๊สเรือนกระจกในบรรยากาศ อีกทั้งยังควบคุมระบบการทำงานได้ง่ายกว่ากระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ แต่ข้อเสียคือ สัดส่วนของไฮโดรเจนที่ได้จากกระบวนการนี้จะต่ำกว่ากระบวนการแรก และตัวเร่งปฏิกิริยาจะเสื่อมสภาพเร็วกว่าเนื่องจากจะมีคาร์บอนจากคาร์บอนไดออกไซด์ไปเกาะอยู่ที่บริเวณผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

3. กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (partial oxidation) ซึ่งเป็นกระบวนการระหว่างสารไฮโดรคาร์บอนกับออกซิเจน กระบวนการนี้มีข้อได้เปรียบกว่าสองกระบวนการแรก ตรงที่ไม่จำเป็นต้องป้อนพลังงานจากภายนอก เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบคายความร้อน ทำให้เกิดพลังงานขึ้นภายในระบบ แต่ข้อจำกัดของกระบวนการนี้คือ ปริมาณออกซิเจนที่ป้อนเข้าสู่ระบบต้องไม่สูงจนเกินไปเนื่องจากออกซิเจนที่เหลือจากกระบวนการจะกลับมาทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนที่ผลิตได้ กลายเป็นน้ำ ทำให้สูญเสียผลผลิตไฮโดรเจน นอกจากนี้ ข้อจำกัดที่สำคัญอีกประการของการใช้กระบวนการนี้ในเชิงพาณิชย์คือ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการจะสูงกว่ากระบวนการรีฟอร์มมิงปกติ เนื่องจากต้องมีระบบแยกออกซิเจนจากอากาศก่อนป้อนเข้าสู่ระบบ เพราะหากไม่แยกออกซิเจนออก จะทำให้ปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่ผลิตได้ลดลงเนื่องจากอากาศมีปริมาณไนโตรเจนสูง

4. กระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำกับออกซิเดชันบางส่วน หรือที่เรียกกันว่า ออโตเทอร์มัลรีฟอร์มมิง (auto-thermal reforming) ซึ่งเป็นกระบวนการใหม่ที่นำข้อดีของกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วนมารวมกันโดยการป้อนทั้งน้ำและออกซิเจนเพื่อทำปฏิกิริยากับสารไฮโดรคาร์บอน ข้อดีของกระบวนการนี้คือ สามารถผลิตไฮโดรเจนได้ในอัตราส่วนที่มากกว่ากระบวนการออกซิเดชันบางส่วน และใช้พลังงานน้อยกว่ากระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ในปัจจุบันกระบวนการดังกล่าวกำลังเป็นที่นิยมและเริ่มมีการใช้งานจริงในเชิงพาณิชย์อย่างแพร่หลาย

2.6.3 การจัดเก็บแก๊สไฮโดรเจน

ไฮโดรเจนจะถูกกักเก็บได้ในถังในรูปแบบของของเหลว แก๊ส หรือของแข็งในรูปแบบสารประกอบเคมี การเก็บในรูปแบบดังเก็บจะมีปริมาณใหญ่ เนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนจะเบาและมีความหนาแน่นน้อยกว่าความดันบรรยากาศ เพื่อให้สามารถเก็บมวลไฮโดรเจนได้มากจึงต้องอัดไปที่ความดันสูงเพื่อลดปริมาตรของถังเก็บ

ตัวอย่างเช่น ถังมีปริมาตร 50 ลิตร มวล 65 กิโลกรัม ความดัน 200 บาร์ สามารถบรรจุ ไฮโดรเจนได้ปริมาตร 8.9 ลูกบาศก์เมตร คิดเป็นมวล 795 กรัม ความหนาแน่น 16 กรัมต่อลิตร หรือ 16 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หรืออัตราส่วนเชิงมวล 1.22 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักถัง จึงยังไม่เหมาะสมในการนำมาใช้กับรถยนต์ แต่ถ้าพัฒนาถังให้เก็บที่ความดัน 700 บาร์ จะเก็บพลังงานได้ 350 เมกกะจูล ซึ่งสามารถใช้กับรถยนต์ได้

การเก็บในรูปของเหลว จะต้องเก็บในถังความดันที่มีอุณหภูมิต่ำมากถึง -273 องศาเซลเซียส และมีปัญหาในการปล่อยแก๊สทิ้งเพื่อควบคุมความดันในถังเก็บ อีกทั้งต้องเสียค่าพลังงานไฟฟ้ามากในการทำให้อุณหภูมิต่ำซึ่งสูงถึงหนึ่งในสามของพลังงานไฮโดรเจน

การเก็บไว้ในท่อถ่านนาโน (carbon nanotube) โดยใช้ คุณสมบัติ การดูดซับทางกายภาพของถ่านซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันที่อุณหภูมิต่ำ 70 เคลวิน ความดัน 40 บาร์ จะเก็บไฮโดรเจนได้ประมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งอยู่ระหว่างการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อให้เก็บไฮโดรเจนได้มากขึ้นและนำมาใช้งานต่อไป

การเก็บในรูปสารประกอบเคมี โดยใช้โลหะไฮดรไรด์ ต้องคำนึงถึงน้ำหนักถังและอุณหภูมิที่เหมาะสม โลหะไฮดรไรด์สามารถเก็บไฮโดรเจนได้ประมาณร้อยละ 2-3 ของน้ำหนักถัง จึงเป็นปัญหาในเรื่องน้ำหนักถังเก็บ การบรรจุไฮโดรเจนเข้าถังเก็บต้องมีการระบายความร้อนออกจากถังเก็บ และในการจ่ายไฮโดรเจนออกจากถังเก็บก็ต้องให้ความร้อนกับโลหะไฮดรไรด์ถึงจะได้แก๊สไฮโดรเจนออกมาที่แต่ละสถานะของอุณหภูมิและความดัน การเก็บในรูปสารประกอบไฮดรไรด์ จำพวก โซเดียม โพแทสเซียม หรือลิเทียม โซเดียมไฮดรไรด์ (NaH) สามารถคายแก๊สไฮโดรเจน ด้วยการทำปฏิกิริยากับน้ำได้ สารประกอบโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และแก๊สไฮโดรเจน และในทางกลับกันเมื่อนำโซเดียมไฮดรอกไซด์มาให้ความร้อนก็จะได้โซเดียมไฮดรไรด์กับแก๊สออกซิเจนกลับมาใหม่ ดังนั้นโซเดียมไฮดรไรด์จึงเป็นพาหะพลังงาน ซึ่งสามารถอัดเม็ดและเคลือบผิวกันน้ำเพื่อสะดวกในการขนส่งโซเดียมไฮดรไรด์ สามารถเก็บไฮโดรเจนได้ประมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก

2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี (วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ, 2547)

ตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับการค้นพบในต้นศตวรรษที่ 19 เริ่มจากการค้นพบว่ากรดปริมาณน้อยๆ สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) หรือปฏิกิริยาย่อยสลายแป้ง และต่อมา ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) แสดงให้เห็นว่า แพลทินัมพูน (Pt-sponge) สามารถช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ต่อเอทานอล (ethanol) ที่มีสภาพเป็นไอ หลังจากนั้น เดอเบอโรเนอ (J.W. Döbereiner) ค้นพบว่าโลหะแพลทินัม (Pt) สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยา

ออกซิเดชันต่อแก๊สไฮโดรเจน อย่างไรก็ตามได้มีการนำเอาแพลทินัมพรมผสมดินใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างกว้างขวาง ซึ่งแพลทินัมพรมผสมดินนั้นนับว่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่มีตัวยึดเกาะหรือตัวรองรับ (support) ที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นครั้งแรก ลักษณะทั่วไปของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่มีตัวรองรับนั้น พบว่าตัวรองรับสามารถเป็นตัวสนับสนุนตัวเร่งปฏิกิริยาหรือเพิ่มความสามารในปฏิกิริยาให้สูงขึ้น ดังนั้นจึงมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่มีตัวรองรับเพิ่มมากขึ้นซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะเคลือบบนผิวของซีโอไลต์ (zeolite) ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวจึงไวต่อปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ในปี ค.ศ. 1831 เฟลลิปส์ (Peregrine Philips) ได้ทำการทดลองโดยใช้แพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ซึ่งต่อมาสารตัวนี้ได้กลายเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญสำหรับการผลิตกรดซัลฟูริกในทางอุตสาหกรรม ในปี ค.ศ. 1836 เบอริเซเลียส (J.J. Berzelius) ได้กล่าวถึงตัวเร่งปฏิกิริยาว่าเป็นพลังงานตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสามารถแยกส่วนต่างๆ ของสารประกอบโดยแรงทางเคมี

คำว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา มาจากภาษากรีกสองคำได้แก่คำว่า *คะตะ (cata)* หมายถึง การหัก (down) ส่วนไลซิสมาจากคำว่า *ไลไซน์ (lysein)* หมายถึง การแยกหรือการแตก (split or break) ดังนั้น "ตัวเร่งปฏิกิริยา" จึงมีความหมายว่า เป็นตัวที่ทำให้เกิดการแตกหักของแรงที่เกิดขึ้นบนโมเลกุล และเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นโมเลกุลขนาดเล็ก อย่างไรก็ตาม เบอริเซเลียสได้ให้คำจำกัดความของตัวเร่งปฏิกิริยาไว้อีกแง่หนึ่งว่า "ตัวเร่งปฏิกิริยา คือสารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเร่งโดยไม่เกิดการสูญเสียในกระบวนการ"

2.7.1 การจำแนกระบบที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาจำแนกได้ 3 ชนิด โดยพิจารณาจากเฟส (phase) ของตัวเร่งปฏิกิริยากับเฟสของสารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดแรกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีเฟสแตกต่างจากสารตั้งต้นหรือไม่รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันซึ่งเรียกว่า "ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์" (heterogeneous catalyst) ชนิดที่สองเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีขอบเขตของเฟส โดยเฟสของตัวเร่งปฏิกิริยากับเฟสของสารตั้งต้นสามารถรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งเรียกว่า "ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธุ์" (homogeneous catalyst) ส่วนชนิดที่สาม ได้แก่ เอนไซม์ (enzyme) อันเป็นสารประกอบโปรตีนซึ่งเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ปฏิกิริยาเลือกเฉพาะสูง สำหรับเอนไซม์นั้นเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาทางชีวเคมีเป็นส่วนใหญ่

ดังนั้นประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์จึงสามารถจำแนกตามชนิดของเฟสระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากับสารตั้งต้นดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ (วิทยา เรื่องพริวิสุทธิ, 2547)

ตัวเร่งปฏิกิริยา	สารตั้งต้น	ตัวอย่างปฏิกิริยาและตัวเร่งปฏิกิริยา
ของเหลว	แก๊ส	พอลิเมอไรเซชัน (polymerization) ของอัลคีน (alkene) โดยมีกรดฟอสฟอริก (phosphoric) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
ของแข็ง	ของเหลว	การสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) โดยมี Au เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
ของแข็ง	แก๊ส	การสังเคราะห์แอมโมเนีย โดยมีเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
ของแข็ง	ของเหลวผสมกับแก๊ส	ไฮโดรจีเนชัน (hydrogenation) ของสารประกอบไนโตร-เบนซีน (nitrobenzene) เพื่อทำให้เกิดสารประกอบอะนิลีน (aniline) โดยมี Pd เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การเกิดปฏิกิริยาเร่งชนิดเอกพันธุ์แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ (1) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแก๊ส ได้แก่ แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (2) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของเหลว ได้แก่ กรดและเบส ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการมิวทาโรเทชัน (mutarotation) ของน้ำตาลกลูโคส ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์นั้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่เป็นทั้งชนิดที่รวมเป็นเนื้อเดียวหรือชนิดไม่รวมเป็นเนื้อเดียว สาเหตุเนื่องจากเอนไซม์เป็นสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนที่มีขนาดใหญ่ โดยปกติแล้วเป็นสารประกอบโปรตีน ลักษณะของเอนไซม์จึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ก้ำกึ่งระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดรวมเป็นเนื้อเดียวกันและชนิดไม่เนื้อเดียว เอนไซม์จึงมีความแตกต่างไปจากตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดโดยสิ้นเชิง ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์จึงเป็นวิชาสำคัญที่รวมไว้ในวิชาชีวเคมี

ในการกล่าวถึงตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ ซึ่งส่วนมากมักเกี่ยวกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง โดยที่สารตั้งต้นเป็นแก๊ส หรือของเหลว หรือแก๊สรวมอยู่กับของเหลว ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งมีคุณสมบัติทางเคมีของผิว ซึ่งเกิดปฏิกิริยาจำเพาะตามธรรมชาติทางเคมีของสารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดของแข็ง ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้จึงมีบทบาทสำคัญยิ่งในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะกล่าวต่อไปในตารางที่ 2.5 แสดงถึงประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ประเภทที่เป็นของแข็ง โดยแบ่งตามชนิดของของแข็งหรือตามความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาอย่างไรก็ตามปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากับระบบของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ต้องไม่

เปลี่ยนแปลงธรรมชาติทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา ยกเว้นที่บริเวณผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้น การเปรียบเทียบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนผิวดังต้องเป็นปฏิกิริยาการดูดซับ (adsorption) เท่านั้น

ตารางที่ 2.5 การแบ่งประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ (วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ, 2547)

ประเภท	ปฏิกิริยา	ตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยา
โลหะ	ไฮโดรจีเนชัน ดีไฮโดรจีเนชัน (dehydrogenation) ไฮโดรจีโนไลซิส (hydrogenolysis) ออกซิเดชัน*	Fe, Ni, Pd, Pt, Ag
ออกไซด์และซัลไฟด์ ของสารกึ่งตัวนำ	ออกซิเดชัน ดีไฮโดรจีเนชัน ดีซัลฟูไรเซชัน (desulphurization) ไฮโดรจีเนชัน*	NiO, ZnO, MnO ₂ , Cr ₂ O ₃ , Bi ₂ O ₃ -MoO ₃ , WS ₂
ออกไซด์ของสารอนวนไฟฟ้า	ดีไฮเดรชัน (dehydration)	Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , MgO
กรด**	แคตริกัลอัลคิเลชัน	SiO ₂ -Al ₂ O ₃ , Zeolites

* ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้แต่ไม่คืน

** กรดที่เป็นของเหลว ได้แก่ H₃PO₄ และ H₂SO₄ ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันและไอโซเมอไรเซชัน (isomerization)

สำหรับข้อสังเกตที่ได้จากตารางที่ 2.5 อาจสรุปการเกิดปฏิกิริยาได้เป็นข้อๆ ดังนี้

1. โลหะทรานซิชันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีสำหรับปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับอะตอมไฮโดรเจนและสารประกอบไฮโดรคาร์บอน แต่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ดีสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชัน สาเหตุเนื่องจากโลหะส่วนใหญ่ถูกออกซิไดซ์ได้ ยกเว้นโลหะโนเบล (nobel) ซึ่งได้แก่ โลหะแพลเลเดียม (Pd), แพลทินัม (Pt), และ เงิน (Ag) ซึ่งโลหะโนเบลเหล่านี้ถูกออกซิไดซ์ได้ยาก ดังนั้นโลหะโนเบลจึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ไม่ดี

2. ออกไซด์ของโลหะหลายชนิด ส่วนมากทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน ยกเว้นสารประกอบคอปเปอร์โครไมต์ (CuCr₂O) สาเหตุเนื่องจากโลหะในสารประกอบออกไซด์ของโลหะชนิดนี้สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันและดีไฮโดรจีเนชันซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (reduction) ด้วยไฮโดรเจน สำหรับสารประกอบซัลไฟด์ของสารกึ่งตัวนำ

3. ออกไซด์ที่เป็นอะลูมินา (alumina) ซิลิกา (silica) และแมกนีเซีย (magnesia) สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยออกซิเจนได้แต่เกิดได้ไม่ดี สารประกอบเหล่านี้จึงเป็น

ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แย่มาก แต่จะเป็นสารประกอบดูดซับน้ำได้ดีมาก ดังนั้นสารประกอบออกไซด์เหล่านี้ จึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันที่ดี

4. กรดแก่และสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) เป็นสารประกอบที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการแตกตัว (cracking)

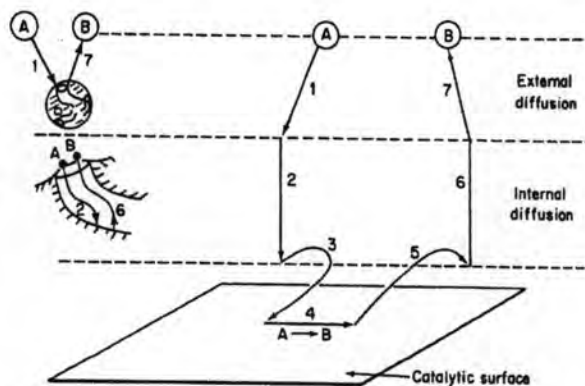
2.7.2 ขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาวិวิธพันธุ์

การเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 7 ขั้นตอน ดังนี้

1. การแพร่ของสารตั้งต้นจากของไหลผ่านชั้นฟิล์มมายังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา
2. การแพร่ของสารตั้งต้นจากพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปตามรูพรุน
3. การดูดซับของสารตั้งต้นบนตำแหน่งที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยา (active site)
4. การเกิดปฏิกิริยาบนตำแหน่งที่ว่องไว
5. การหลุดของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นออกจากตำแหน่งที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยา
6. การแพร่ของผลิตภัณฑ์จากภายในรูพรุนออกมาถึงพื้นผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา
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 ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ถูกแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (วิโรจน์ บุญอำนาจวิทยา, 2544)

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

ความต้านทานการแพร่ของสารตั้งต้นจากของไหลที่ไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยามายังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ ถ้าหากของไหลไหลผ่านด้วยความเร็วสูง ชั้นฟิล์มที่ห่อหุ้มอยู่ก็จะบาง ทำให้สารตั้งต้นแพร่เข้าไปได้ง่ายขึ้นและทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ง่ายขึ้น แต่ถ้าของไหลไหลช้า ชั้นฟิล์มที่ห่อหุ้มอยู่ก็จะมี ความหนา มาก ทำให้สารตั้งต้นแพร่เข้าไปยังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ลำบากปฏิกิริยาจะเกิดน้อยลง ตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกใช้งานไม่เต็มความสามารถ แต่ถ้าใช้ความเร็วที่สูงเกินไป เวลาที่สารตั้งต้นมีโอกาสสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาก็จะลดลง ปฏิกิริยาก็จะเกิดน้อยลง

ขั้นตอนการแพร่ของสารตั้งต้นจากพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปในรูพรุนจะไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของของไหลที่ไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราเร็วของขั้นตอนนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลของสารตั้งต้น ถ้าหากอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดใหญ่ โอกาสที่สารตั้งต้นจะแพร่เข้าไปถึงแกนกลางจะลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้น ตำแหน่งที่ว่องไว ที่อยู่บริเวณตอนกลางจะไม่ถูกใช้งาน และถ้าตำแหน่งที่ว่องไวเหล่านี้เป็นโลหะมีค่า เช่น Pt Au และ Ag ก็จะเป็นการสิ้นเปลือง ดังนั้นในกรณีของปฏิกิริยาคายความร้อนหรืออนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดใหญ่ ตำแหน่งที่ว่องไวจะอยู่เฉพาะบริเวณผิวนอกเท่านั้น การลดความต้านทานการแพร่ภายในรูพรุนทำได้โดยการทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดอนุภาคเล็ก

ขั้นตอนการดูดซับของสารตั้งต้นบน ตำแหน่งที่ว่องไวเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของการเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ เพราะการเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์นั้น จำเป็นต้องมีการดูดซับของสารตั้งต้นอย่างน้อยหนึ่งชนิดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ในกรณีที่

สารตั้งต้นมีมากกว่าหนึ่งชนิด จะเกิดการแข่งขันการดูดซับบนพื้นผิว ถ้าหากสารตั้งต้นตัวหนึ่งสามารถเกาะลงบนพื้นผิวได้ดีกว่าสารตั้งต้นอีกตัวหนึ่งมาก ปฏิริยาจะเกิดได้น้อยเพราะความเข้มข้นของสารตั้งต้นบนพื้นผิวของสารที่เกาะได้น้อยจะมีค่าต่ำ ที่สภาวะที่เหมาะสมปริมาณของสารตั้งต้นแต่ละตัวที่อยู่บนพื้นผิวควรมีปริมาณที่พอเหมาะ

2.7.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิริยาสำหรับใช้ในอุตสาหกรรม

สิ่งที่จำเป็นพื้นฐานของตัวเร่งปฏิริยาที่ทำให้เกิดปฏิริยาเร่งที่ตั้นั้น ต้องมีคุณสมบัติ 2 ประการ กล่าวคือ

1. ตัวเร่งปฏิริยาต้องสามารถทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ และมีอัตราเร็วของปฏิริยาที่สูงเพียงพอที่ยอมรับได้ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิและความดัน ณ ขณะทำการทดลอง อย่างไรก็ตามเงื่อนไขอุณหภูมิและความดันของการทดลองที่สภาวะไม่ปกตินั้นสามารถควบคุมได้ดีกว่าในอดีต เนื่องจากเทคโนโลยีทางเคมีในปัจจุบันมีความก้าวหน้ามากจนทำให้สามารถทำการทดลอง ณ อุณหภูมิสูงถึง 7600 เคลวิน และความดันสูงถึง 350 บรรยากาศ หรือเท่ากับ 35 เมกะปาสคาล ได้โดยไม่ยากนัก อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์หลายชนิดสามารถเกิดปฏิริยาเร่งได้ดี ณ อุณหภูมิและความดันต่ำ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการค้นคว้าเพื่อหาตัวเร่งปฏิริยาที่สามารถนำมาใช้ในงานตามเงื่อนไขแบบง่าย ๆ และธรรมดามากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ หากต้องเป็นตัวเร่งปฏิริยาตามเงื่อนไขที่ยุ่ยาก กล่าวคือภายใต้อุณหภูมิและความดันที่สูงมาก ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายจำนวนมากในการควบคุมสภาวะการทดลองที่ยุ่ยากดังกล่าว และมักทำให้เกิดปฏิริยาข้างเคียงที่ไม่พึงประสงค์ร่วมอยู่ด้วย โดยหลักการสำคัญของกระบวนการเร่งปฏิริยานั้น ปฏิริยาข้างเคียงต้องไม่เกิดขึ้น หรือเกิดขึ้นน้อยที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องไม่ทำให้เกิดปฏิริยาพิษต่อตัวเร่ง เช่น ปฏิริยาการเกิดคาร์บอนทำให้เกิดการเกาะติดผิวตัวเร่งปฏิริยา

2. ตัวเร่งปฏิริยาต้องคงทนต่อปฏิริยา สามารถใช้ได้ในช่วงเวลาที่ยาวนาน ตัวเร่งปฏิริยาบางชนิดอาจมีอายุการใช้งานได้หลายปีซึ่งมีราคาแพง แต่การเลือกใช้ตัวเร่งปฏิริยาที่มีอายุการใช้งานสั้นซึ่งราคาถูกนั้นทำให้ต้องเปลี่ยนตัวเร่งปฏิริยาบ่อยครั้ง ซึ่งอาจทำให้สิ้นเปลืองมากกว่าการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิริยาที่มีอายุการใช้งานยาวนาน

สาเหตุของการเสื่อมสภาพในการใช้งานของตัวเร่งปฏิริยาอาจเกิดจากปฏิริยา 2 แบบ คือ (1) ปฏิริยาผันกลับโดยสารเจือปนที่ปนอยู่กับสารตั้งต้น ทำให้เกิดปฏิริยาพิษต่อตัวเร่งปฏิริยา (2) ปฏิริยาการผันกลับของการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ (physical change) และการสึกกร่อนของพื้นที่ผิวอันเนื่องจากการเผาตามกระบวนการหลอมรวม (sintering) อย่างไรก็ตาม

ปฏิกิริยาผันกลับดังกล่าวอาจได้รับการแก้ไขได้โดยวิธีง่ายๆ เช่น การทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยไม่ต้องเอาตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากเครื่องปฏิกรณ์

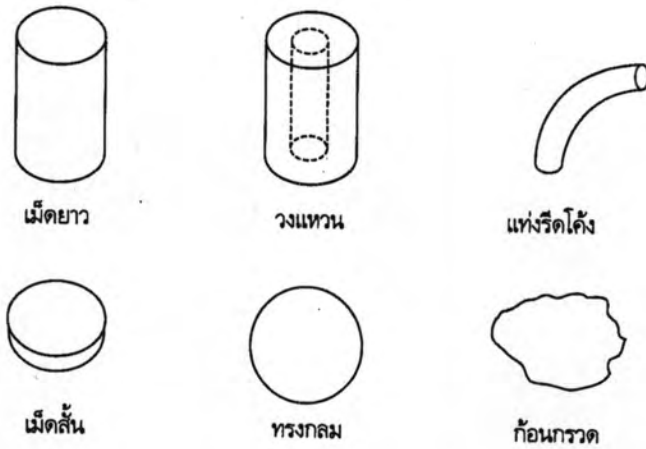
2.7.4 ระบบปฏิกิริยาเร่งและเครื่องปฏิกรณ์

โดยทั่วไประบบปฏิกิริยาเร่งมักแบ่งตามลักษณะและขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยา และประเภทของเครื่องปฏิกรณ์ อย่างไรก็ตามลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาต้องสอดคล้องกับระบบปฏิกิริยาและเครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้นประเภทเครื่องปฏิกรณ์จึงขึ้นกับระบบปฏิกิริยาดังแสดงในตารางที่ 2.6

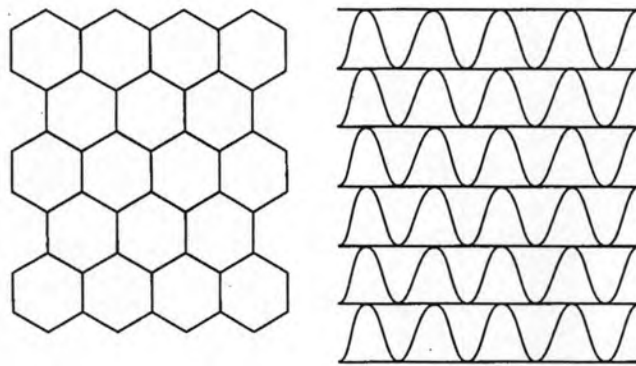
ตารางที่ 2.6 ระบบปฏิกิริยาเร่งแบ่งตามลักษณะทางกายภาพ และขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยา และประเภทของเครื่องปฏิกรณ์

ระบบปฏิกิริยา	ระบบเครื่องปฏิกรณ์	ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา
แก๊ส	เบดนิ่ง เบดเคลื่อนที่ (fluidized-bed)	อนุภาคชนิดหยาบ หรือ โครงสร้างแบบโมนอลิธิก (monolithic) อนุภาคชนิดละเอียด
แก๊สและของเหลว	เครื่องปฏิกรณ์แบบงวด (batch reactor) เครื่องปฏิกรณ์แนวตั้งชนิดฟองอากาศ (bubble column reactor) เครื่องปฏิกรณ์ชนิดถังคนแบบต่อเนื่อง (continuous stirred-tank reactor) เครื่องปฏิกรณ์แนวตั้งชนิดไหลช้า (trickle column reactor)	อนุภาคชนิดละเอียด อนุภาคชนิดละเอียด อนุภาคชนิดหยาบ อนุภาคชนิดหยาบ หรือ โครงสร้างแบบโมนอลิธิก

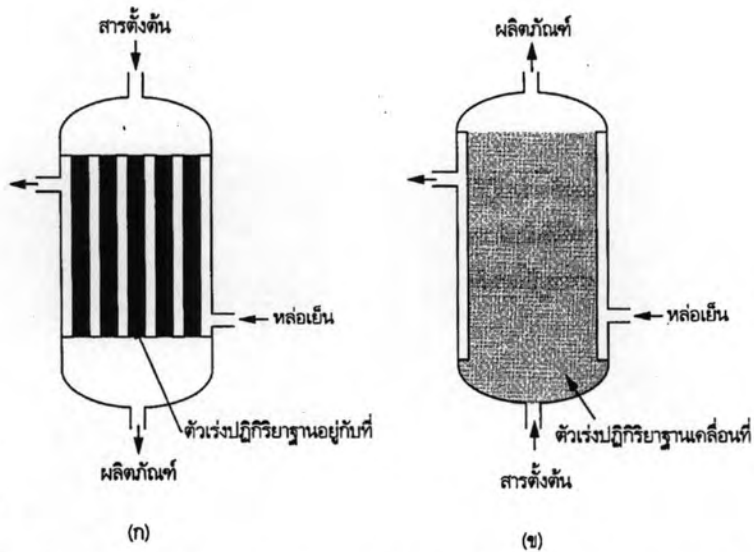
ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอนุภาคหยาบมีขนาดใหญ่และมักขึ้นรูปเป็นรูปร่างต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดโครงสร้างแบบโมนอลิธิกได้แสดงในรูปที่ 2.5 ส่วนเครื่องปฏิกรณ์เบดอยู่กับที่และเบดเคลื่อนที่ ได้แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอนุภาคหยาบที่มีรูปร่างต่างๆ



รูปที่ 2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดโครงสร้างแบบโมโนลิธิกหรือรังผึ้ง



รูปที่ 2.6 (ก) เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (ข) เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดเคลื่อนที่

2.7.5 โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดมีตัวรองรับ

จากความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการแพร่ของแก๊สพบว่า หากการแพร่ของแก๊สไม่มีข้อจำกัด จะทำให้อัตราเร็วของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ผิวของส่วนที่ไวต่อปฏิกิริยา ดังนั้นในการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาจึงจำเป็นต้องทำให้อนุภาคของสารที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ซึ่งเป็นการทำให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีมากขึ้น หรือทำให้สัดส่วนของอะตอมบนผิวมีจำนวนสูงสุด สัดส่วนนี้เรียกว่า ค่าการกระจายตัว หรือ ค่าสัดส่วนพื้นที่ผิว

สำหรับโลหะที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สำคัญ ได้แก่ โลหะโนเบิล หรือโลหะกลุ่ม 8 ซึ่งเป็นโลหะที่มีราคาแพง แต่มีความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสูง ตัวเร่งปฏิกิริยานี้ได้แก่ อนุภาคของแพลทินัม ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร โดยมีค่าการกระจายตัว 0.6 ซึ่งประกอบด้วยอะตอมของแพลทินัมจำนวน 230 อะตอมโดยประมาณ

ข้อดีหรือข้อได้เปรียบของตัวเร่งปฏิกิริยาของโลหะชนิดมีตัวรองรับได้แก่

1. เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถจัดการหรือเตรียมขึ้นได้ง่ายและปลอดภัย
2. สามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้กับเครื่องปฏิกรณ์หลายชนิด หากเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ตัวกลางเป็นของเหลวตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้สามารถนำมาใช้ได้อีกโดยวิธีการกรอง
3. อนุภาคที่เป็นโลหะสามารถถูกแยกจากกันได้เป็นอย่างดี โดยการกรองแบบซินเทอริง
4. ตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเตรียมขึ้นโดยการนำเอาตัวโปรโมเตอร์ (promoter) ไปต่อติดเข้ากับโลหะ

สำหรับข้อดีอื่นๆของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่มีตัวรองรับนั้นขึ้นกับสมบัติเฉพาะของระบบตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นธรรมชาติของโลหะและสารที่ใช้เป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทั่วไปนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่มีตัวรองรับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบมากในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมี

2.7.5.1 โพลีเอทิลีนคาร์บอนเนต

โพลีเอทิลีนเป็นธาตุที่อยู่ในหมู่ I ในตารางธาตุ มีเลขอะตอม (atomic number) 19 น้ำหนักอะตอม (atomic weight) 39.1 โพลีเอทิลีนคาร์บอนเนตมีความหนาแน่น (density) 2.29 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลว (melting point) 891 องศาเซลเซียส

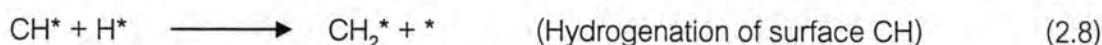
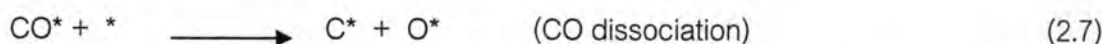
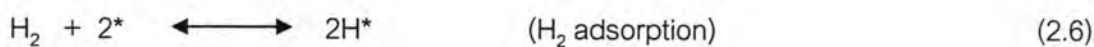
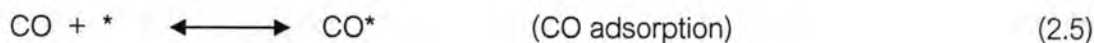
โพลีเอทิลีนถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวล โดยตัวเร่งปฏิกิริยาโพลีเอทิลีนที่อยู่ในรูปของโพลีเอทิลีนคาร์บอนเนตให้ผลการแกซิฟายได้ดี เนื่องจากโพลีเอทิลีนคาร์บอนเนตเป็นตัวเร่ง (active species) ที่มีความว่องไวมาก มี

อัตราการเร่งปฏิกิริยาสูง แต่โพแทสเซียมเกิดการรวมตัวกันเนื่องจากได้รับความร้อน และสูญเสีย โดยเกิดการระเหย (vaporization) ได้ง่ายในระหว่างการแก๊สฟายที่ช่วงอุณหภูมิสูง (Akyurtlu, 1995)

2.7.5.2 โลหะนิกเกิล

นิกเกิลเป็นธาตุที่อยู่ในหมู่เดียวกับกับโลหะโนเบล เช่น พาราเดียม (Pd) และ ทองคำขาว (Pt) เป็นต้น นิกเกิลเป็นธาตุที่มีเลขอะตอม 28 น้ำหนักอะตอม 58.69 ความหนาแน่น 8.910 กรัม/มิลลิลิตร จุดหลอมเหลว 1445 องศาเซลเซียส จุดเดือด (boiling point) 2900 องศาเซลเซียส อิเล็กตรอนเนกาทิวิตี (electron negativity) 1.8 สถานะออกซิเดชัน (oxidation state) 2.3 การจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนคือ (Ar) $3d^8 4s^2$ นิกเกิลในรูปที่เป็นก้อนของแข็งไม่สามารถติดไฟได้ แต่เมื่อทำให้เป็นเส้นลวดนิกเกิลจะสามารถติดไฟเองได้ ส่วนเม็ดขนาดเล็กของนิกเกิลจะสามารถที่จะติดไฟได้ด้วยตัวเองเมื่อสัมผัสอากาศ

โลหะนิกเกิลสามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ ในปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการเติมไฮโดรเจนหรือกำจัดไฮโดรเจน เช่น ในการศึกษาการเตรียมมีเทน จากคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อะลูมินา ซึ่งมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังนี้ (Rajiv and Robert, 1992)



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

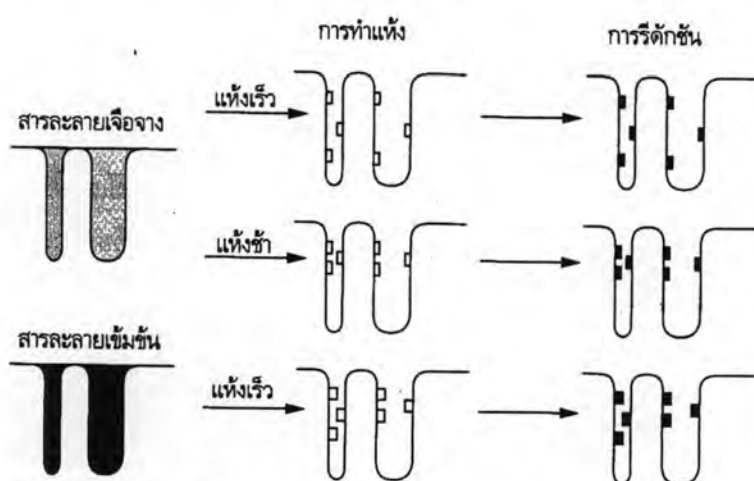
2.7.6 การเคลือบโลหะด้วยวิธีเคลือบฝัง

การเคลือบโลหะด้วยวิธีเคลือบฝัง เป็นการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่มีตัวรองรับ โดยทั่วไปแบ่งเป็นขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

- ขั้นตอนการเตรียมพื้นผิว (precursor) ของตัวรองรับ โดยการทำให้สะอาดด้วยสารละลายน้ำ ตัวรองรับได้แก่ สารประกอบอะลูมินา
- ขั้นตอนการทำแห้ง
- ขั้นตอนการตัดแต่งรูปร่างตัวรองรับ
- ขั้นตอนการฝังตัวโดยสารละลายเกลือของโลหะบนตัวรองรับ

- ขั้นตอนการทำแห้ง
- ขั้นตอนการทำแคลซิเนชัน (calcination) โดยการเผาเพื่อทำความสะอาด
- ขั้นตอนการทำปฏิกิริยารีดักชัน (reduction) เพื่อเปลี่ยนโลหะที่มีประจุให้เป็นโลหะที่เป็นกลางโดยทำปฏิกิริยาด้วยแก๊สไฮโดรเจนที่เจือจางด้วยแก๊สไนโตรเจน หรือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับการทำให้ปฏิกิริยารีดักชันแบบอ่อนๆ โดยทำปฏิกิริยาด้วยแก๊สไฮโดรเจนที่เจือจางด้วยไอแอลกอฮอล์

สำหรับขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีเคลือบฝังแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาในลักษณะเคลือบโลหะไปบนตัวรองรับ การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการฝังตัวนั้น โลหะและไอออนในสารละลายต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่ใช้เป็นตัวรองรับ ตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยานี้ ได้แก่ สารละลาย $[PtCl_6]^{2-}$ กับการใช้ซิลิกาเป็นตัวรองรับ การเตรียมเริ่มจากการเติมสารละลาย $[PtCl_6]^{2-}$ แทนที่โพรงของซิลิกา จากนั้นระเหยเอาตัวทำละลายที่มากเกินไปออกไป ผลึกขนาดเล็กของเกลือแพลทินัมจะเกาะติดกับผนังของซิลิกา หลังจากการทำปฏิกิริยารีดักชันโดยใช้แก๊สไฮโดรเจนที่ 470 เคลวิน ในที่สุดอนุภาคของโลหะเท่านั้นที่เกาะติดกับผนังโพรงของซิลิกา



รูปที่ 2.7 แสดงขั้นตอนการเตรียมโลหะตัวเร่งปฏิกิริยานี้ด้วยวิธีเคลือบฝัง โดยใช้สารละลายเจือจางและเข้มข้นของเกลือโลหะ

ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคโลหะนั้นขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ หากใช้โลหะที่มีความเข้มข้นสูงแนวโน้มจะทำให้เกิดอนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งใหญ่กว่าการใส่โลหะที่เป็นสารละลายเจือจาง พื้นที่ผิวของโพรงซึ่งเป็นพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเป็นสัดส่วนกับปริมาตรของโพรง ซึ่งปริมาตรของแต่ละโพรงมักมีขนาดไม่เท่ากัน

ขั้นตอนการทำให้แห้งมีความสำคัญมากต่อการกระจายตัวของโลหะบนผิวของตัวรองรับ หากการทำให้แห้งเป็นไปอย่างช้าๆ จะทำให้เกลือของโลหะถูกเคลื่อนย้ายมาอยู่บริเวณปากโพรง ซึ่งทำให้การกระจายตัวของโลหะบนผิวของตัวรองรับไม่สม่ำเสมอ แต่ถ้าต้องการให้เกิดการกระจายของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างสม่ำเสมอบนตั้งพวย จะต้องระเหยไล่ตัวทำละลายอย่างรวดเร็วในขั้นตอนของการทำแห้ง

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดตัวรองรับนั้น ขั้นตอนที่สำคัญที่สุดได้แก่ การทำปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งเป็นขั้นตอนการเปลี่ยนสารประกอบโลหะให้เป็นโลหะ และขั้นตอนก่อนหน้านี้นี้เป็นการทำแคลซิเนชัน ที่ทำให้ตัวรองรับเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์และทำให้ง่ายต่อการรีดักชันออกไซด์ของโลหะ โลหะโนเบิลส่วนใหญ่สามารถถูกรีดิวซ์ได้ง่าย และสามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันโดยสารละลายไฮดราซีน (hydrazine) ไฮดรอกซีลามีน (hydroxylamine) หรือฟอร์มเมตไอออน สำหรับสารประกอบคลอไรด์ของโลหะเหล่านี้สามารถรีดิวซ์ได้ด้วยแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งสามารถทำไปพร้อมๆ กับขั้นตอนของการทำแห้ง โดยใช้อุณหภูมิระหว่าง 370 และ 470 เคลวิน แต่การทำปฏิกิริยารีดักชันของสารประกอบอะมีนของโลหะเหล่านี้ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่ามาก สำหรับการหาลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีที่ง่าย และถูกที่สุด ซึ่งได้แก่ วิธีการดูดซับแก๊สไนโตรเจนออกซิเจน หรือแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ของโลหะเหล่านี้

2.8 โดโลไมต์ (ภักดี ทรงเจริญ และคณะ, 2547)

โดโลไมต์ หรือเรียกว่าแคลเซียมแมกนีเซียมคาร์บอเนต (calcium magnesium carbonate: $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) เป็นแร่โลหะชนิดหนึ่ง ซึ่งจะอยู่ร่วมกับแร่แคลไซต์ (CaCO_3) เสมอ และจัดเป็นหินคาร์บอเนต (carbonate rock) พบโดยทั่วไปในบริเวณที่มีหินชั้นหรือหินตะกอน และหินแปรในหินปูนโดโลมิติก (dolomitic limestone) หรือในหินอ่อนโดโลมิติก (dolomitic marble) แหล่งแร่โดโลไมต์ใหญ่ๆ ส่วนใหญ่จะเป็นการเกิดแบบทุติยภูมิ (secondary) ซึ่งเกิดจากหินปูนที่มีอยู่เดิมถูกแทนที่ด้วยธาตุแมกนีเซียม

สูตรเคมี $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

องค์ประกอบทางเคมี

CaCO_3 ร้อยละ 54.35

MgCO_3 ร้อยละ 45.56

หรือ MgO ร้อยละ 21.7

CaO ร้อยละ 30.4

CO_2 ร้อยละ 47.9

โดยปกติโดโลไมต์จะมีสัดส่วนของ CaCO_3 ต่อ MgCO_3 ประมาณ 1:1 มีธาตุเจือปนที่พบอยู่เสมอ คือ เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) โคบอลต์ (Co) ตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zn)

สมบัติทางเคมี

1. ทำปฏิกิริยาในกรดเกลือเจือจางที่อุณหภูมิละลายได้ดีเกิดปฏิกิริยาเป็นฟองเล็กๆ
2. เป็นผงละลายน้ำให้ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) 9.0 - 10.71

สมบัติทางกายภาพ

1. สีขาว สีเหลือง สีชมพู สีเทาอมน้ำตาล ผิวน้ำมันเหมือนแก้ว
2. ความแข็งตามมาตรฐานของ Mohs' scale ประมาณ 3.5 - 4
3. ไม่โปร่งใสและทึบแสง
4. สีผงสีขาว
5. ความถ่วงจำเพาะ 2.82 - 2.95
6. รูปผลึกอยู่ในรูปผลึกหกเหลี่ยม (hexagonal) ปกติพบอยู่ในรูปผลึกของ rhombohedral ที่มีผิวน้ำโค้ง
7. ความพรุน 8.6

แต่เนื่องจากแร่โดโลไมต์และแร่แคลไซต์จะเกาะเกี่ยวอยู่ร่วมกัน ถ้ามาดูรูปแบบทางเคมี $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ซึ่งถ้าแยกออกตามการจัดตัวตามสภาพทางเคมีก็จะได้แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และ แมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) นั่นเอง เมื่อจะแยกแร่โดโลไมต์ออกจากแร่แคลไซต์ ก็จะทำให้คุณสมบัติของการละลายด้วยกรดเกลือเจือจางและการย่อยมส

2.8.1 การกำเนิดของแร่โดโลไมต์

แร่โดโลไมต์อยู่ในรูปของสารประกอบแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เกิดจากผลของอนินทรีย์ (inorganic product) ที่เกิดขึ้นในเขตระดับน้ำทะเลขึ้นลงโซนร้อน (superheated) โดยมีการเกิดแบบ "diagenetic origin dolomite" หรืออาจเกิดเป็นผลึกเล็กๆ กระจัดกระจายอยู่ตามเขตน้ำลึกได้เช่นกันแต่พบน้อยมาก แต่ส่วนมากแมกนีเซียมจะอยู่ในสภาพสารละลายของของแข็ง (solid solution) เข้าไปอยู่ในผลึกของแร่แคลไซต์ (calcite)

แร่โดโลไมต์เกิดร่วมกับตะกอนคาร์บอนในโซนใกล้ๆกับระดับน้ำทะเลที่อยู่ในช่วงระดับน้ำสูงสุด และช่วงระดับต่ำสุด ตะกอนส่วนใหญ่เป็นพวกหินปูน (calcium carbonate : CaCO_3) ซึ่ง

จะทำให้แมกนีเซียม (Mg) ในน้ำทะเลได้มีโอกาสเข้าไปแทนที่แคลเซียม (Ca) แทรกสลับตามรอยต่อ (lattice) ของผลึกแคลไซต์ได้มาก และกลายมาเป็นแร่โดโลไมต์

สรุปได้ว่าแร่โดโลไมต์เกิดขึ้นได้ 2 วิธี

1. แร่โดโลไมต์เกิดจากผลึกเล็กๆ ของแคลเซียมคาร์บอเนต มีการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างโดยแคลเซียมถูกแทนที่ด้วยแมกนีเซียม ในขณะที่ตะกอนคาร์บอเนตเหล่านั้นกำลังอยู่ในกระบวนการที่จะกลายสภาพเป็นหิน (diagenetic replacement) ทำให้ผลึกเล็กๆ เหล่านี้กลายเป็นผลึกของแร่โดโลไมต์

2. แร่โดโลไมต์เกิดจากการที่แมกนีเซียม เข้ามาในสภาพเป็นตัวเชื่อมระหว่างเม็ดตะกอน (fringe cement) แล้วคงตกค้างอยู่ในช่องว่างระหว่างผลึกและตะกอนเหล่านั้นแล้วตกผลึกแข็งตัวกลายเป็นแมกนีเซียมคาร์บอเนตในกระบวนการของการเกิดโดโลมิไทเซชัน (dolomitization)

ซึ่งทั้งนี้ทั้งนั้นปัจจัยของสภาวะเหมาะสมของการเกิดแร่โดโลไมต์นั้น จะต้องมีความเข้มข้นของแมกนีเซียมในช่องว่างระหว่างตะกอน ความพรุน และความสามารถให้น้ำทะเลซึมผ่านได้ในชั้นตะกอนของผลึกหินปูน

2.8.2 แหล่งแร่

ในประเทศไทยนั้นพบอยู่ทั่วไปในทุกๆ ภาค ดังนี้

ภาคกลาง : พบที่ เขาแรด อ.ท่าม่วง เขาถ้ำ อ.เมือง เขาพุร้อน อ.เมือง

ต.วังดัง อ.เมือง จังหวัดกาญจนบุรี

เขาช่องพราน เขาขวาง เขาค่าง อ.โพธาราม จังหวัดราชบุรี

เขาผึ้ง เขาคับหอก เขาล้าน เขาทะลุ อ.จอมบึง จังหวัดราชบุรี

ภาคตะวันออก : พบที่ อ.เกาะสีชัง จังหวัดชลบุรี

ภาคเหนือ : พบที่ อ.ร่องวาง จังหวัดแพร่ อ.อุ้มผาง จังหวัดตาก

ภาคใต้ : พบที่ อ.ดอนสัก จังหวัดสุราษฎร์ธานี

อ.ขนอน จังหวัดนครศรีธรรมราช

อ.ย่านตาขาว จังหวัดตรัง

เขารักเกียรติ อ.รัตภูมิ จังหวัดสงขลา

ในต่างประเทศ : พบที่ สหรัฐอเมริกา อังกฤษ สเปน ฝรั่งเศส ไอร์แลนด์ นอร์เวย์ กรีซ สวิตเซอร์แลนด์และอินเดีย

2.8.3 ประโยชน์ของโคโลไมด์

ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเซรามิก อุตสาหกรรมแก้ว อุตสาหกรรมกระจก อุตสาหกรรมอลูมิเนียม ใช้ปรับสภาพความเป็นกรดต่างในดิน ปรับสภาพดินให้ร่วนซุย ปรับสภาพน้ำ ใช้ทำปุ๋ยเพื่อเพิ่มแร่ธาตุให้แก่พืชในอุตสาหกรรมการเกษตร

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mudge และคณะ (1985) ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของไม้ โดยใช้แอลคาไลน์คาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาขั้นต้น (primary catalysts) ซึ่งเตรียมด้วยวิธีเคลือบฝัง และผสม (dry mixing) กับชีวมวล โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา 4 ชนิด ที่ความเข้มข้นต่างกัน ที่อุณหภูมิ 550 650 และ 750 องศาเซลเซียส ผลการเร่งปฏิกิริยาสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ $K_2CO_3 > Na_2CO_3 > Na_3H(CO_3)_2 \cdot 2H_2O > Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ และพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝังจะมีคาร์บอนเกาะติดอยู่เพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลย เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีผสม และจากการศึกษาไม้ที่ผสมกับร้อยละ 17 โดยน้ำหนักของโพแทสเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีเคลือบฝัง และแกซีฟายที่ 750 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ พบว่าไม่ปรากฏน้ำมันทาร์ในแก๊สขาออก การใช้โพแทสเซียมคาร์บอเนตจะพบปัญหาในการดำเนินงานเพราะโพแทสเซียมคาร์บอเนตอาจเกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ทำให้พื้นที่ผิวลดลง ส่งผลให้การเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพต่ำลง ซึ่งการผสมไม้กับตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าจะเกิดการเกาะติดของคาร์บอนบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามาก เป็นสาเหตุทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมลง และการปรากฏของน้ำมันทาร์ในผลิตภัณฑ์แสดงว่าเกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา และจากการศึกษา K_2CO_3 และ Na_2CO_3 บนตัวรองรับอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาขั้นสอง (secondary catalysts) พบว่าผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ไม่สูงเมื่อชีวมวลผสมด้วยวิธีเคลือบฝัง กับตัวเร่งปฏิกิริยาโดยตรง และมีปริมาณมีเทนสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ตัวเร่งปฏิกิริยาแอลคาไลน์คาร์บอเนตมีความสามารถในการกระตุ้นปฏิกิริยาช่วงเริ่มต้นและจะเข้าสู่ภาวะคงตัว โดยพบว่าสามารถใช้ได้นานถึง 30 ชั่วโมง โดยไม่เกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเกิดการเกาะของคาร์บอนเล็กน้อยหรือไม่เกิดเลยบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

Hallen และคณะ (1988) ศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาแอลคาไลน์คาร์บอเนตในกระบวนการแกซีฟิเคชัน ด้วยไอน้ำ ตัวเร่งปฏิกิริยา Na_2CO_3 , K_2CO_3 หรือ $CsCO_3$ เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝัง หรือผสมกับชีวมวล ซึ่งในการศึกษานี้พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิสูงกว่า จะมีการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนไปเป็นแก๊สลดลงระหว่างช่วง

การระเหย ของกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของไม้ แต่อัตราและปริมาณทั้งหมดของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นในระหว่างช่วงการเกิดแกซิฟิเคชัน ซึ่งการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเพิ่มปริมาณชาร์ระหว่างช่วงในการเกิดการระเหย แต่ปริมาณชาร์จะลดลงระหว่างช่วงที่สองในการเกิดแกซิฟิเคชัน และพบว่าการใช้แอลคาไลน์คาร์บอนเนตสามารถเปลี่ยนแปลงคาร์บอนไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สได้มากขึ้น เนื่องจากช่วยลดปริมาณของเหลวหนืด (condensable liquids) ได้ นอกจากนี้ยังพบว่าผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนจากกระบวนการแกซิฟิเคชันไม่เกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาในการใช้ร่วมกับไอน้ำที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และพบว่า ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาซิฟท์ ส่วนการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงมีเทน เกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส เมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแอลคาไลน์ ซึ่งได้ผลการเรียงลำดับการเร่งปฏิกิริยาดังนี้ $\text{CsCO}_3 > \text{K}_2\text{CO}_3 > \text{Na}_2\text{CO}_3$

อนวรรตน์ เกตุคง (2547) ศึกษาวิธีการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากไม้ยูคาลิปตัส ภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง โดยศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนโดโลไมต์เพื่อช่วยในการแตกตัวของน้ำมันทาร์ และรีฟอร์มมิงมีเทน ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง 500-800 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล 0.01-0.07 กรัมต่อนาทีต่อกรัมของชีวมวล ร้อยละของนิกเกิลบนโดโลไมต์ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อชีวมวล โดยปริมาณไม้ยูคาลิปตัสที่ป้อนคือ 15 กรัม จากผลการวิจัยพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง คือ อัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล 0.01 กรัมต่อนาทีต่อกรัมของชีวมวล อุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 700 องศาเซลเซียส ร้อยละของนิกเกิลบนโดโลไมต์ คือ 9.32 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา คือ 1 กรัม นอกจากนี้เมื่อทำการแกซิฟิเคชันเปรียบเทียบระหว่างใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะพบองค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 42.75 เป็น ร้อยละ 56.45 และ ไฮโดรเจน มีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 41.23 เป็น ร้อยละ 45.26 อัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเท่ากับ 0.58

Srinakruang และคณะ (2005) ศึกษากระบวนการแกซิฟิเคชันของทาร์ด้วยไอน้ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนโดโลไมต์ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้จะแสดงความสามารถในการกระตุ้นและความเสถียรที่สูง ซึ่งทำการตรวจสอบโดยการใส่โทลูอีน เป็น model compound นอกจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนโดโลไมต์ยังมีประสิทธิภาพในแง่ของการเกิดการเกาะของคาร์บอนบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงเล็กน้อย ขณะที่ $\text{Ni/SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ และ $\text{Ni/Al}_2\text{O}_3$ จะมีคาร์บอนเกาะอยู่ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นจำนวนมาก และยังพบว่าอุณหภูมิในการแคลไซน์มีผลต่อคุณสมบัติและ

ความสามารถในการกระตุ้นของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับโดโลไมต์ ซึ่งอุณหภูมิในการแคลไซน์ที่ดีที่สุด เท่ากับ 500 องศาเซลเซียส

Hu และคณะ (2006) ศึกษากระบวนการแกซีฟิเคชันของ apricot stone โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา olivine และโดโลไมต์ เพื่อผลิตไฮโดรเจน ที่ความดันบรรยากาศในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนของไอน้ำต่อชีวมวล (S/B) ขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิในการแคลไซน์ของตัวเร่งปฏิกิริยา จากการศึกษาพบว่าความสามารถในการกระตุ้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการแคลไซน์จะมีความสามารถในการกระตุ้นที่ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ได้ผ่านการแคลไซน์ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ที่ผ่านการแคลไซน์จะให้ผลได้ของไฮโดรเจนเท่ากับ 130.9 กรัมไฮโดรเจนต่อกิโลกรัมชีวมวล ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 86.1 ของผลได้ปริมาณสัมพันธ์ (152 กรัมไฮโดรเจนต่อกิโลกรัมชีวมวล) ที่อุณหภูมิในการแคลไซน์ 850 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล เท่ากับ 0.8 และสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา olivine ที่ผ่านการแคลไซน์จะให้ผลได้ของไฮโดรเจนเท่ากับ 67.7 กรัมไฮโดรเจนต่อกิโลกรัมชีวมวล ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 44.5 ของผลได้ปริมาณสัมพันธ์ (152 กรัมไฮโดรเจนต่อกิโลกรัมชีวมวล) ที่อุณหภูมิในการแคลไซน์ 800 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล เท่ากับ 0.8 การแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีผลทำให้เฟลของ $(Mg,Fe)SiO_3$ หายไป และปรากฏเฟสของ Fe_2O_3 ขึ้น ในตัวเร่งปฏิกิริยาโอลิวิน ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์นั้น จะกำจัด CO_2 ออก ทำให้ได้ CaO-MgO เกิดขึ้นบนตัวเร่งปฏิกิริยา

Kimura และคณะ (2006) ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล-ซีเรียมบนอะลูมินา ซึ่งเตรียมด้วยวิธีเคลือบฝังร่วม (co-impregnation) และวิธีเคลือบฝังตามลำดับ (sequential impregnation) ในกระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวล จากการศึกษาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล-ซีเรียมบนอะลูมินา ซึ่งเตรียมด้วยวิธีเคลือบฝังร่วมจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนอะลูมินา และนิกเกิล-ซีเรียมบนอะลูมินา ที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝังตามลำดับ นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล-ซีเรียมบนอะลูมินา ซึ่งเตรียมด้วยวิธีเคลือบฝังร่วมจะให้ผลได้ของการเกิดโค้ก และทาร์ในปริมาณน้อย และให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สในปริมาณที่สูงอีกด้วย จากผลการวิจัยพบว่าแรงปฏิกิริยาระหว่าง นิกเกิลและซีเรียมออกไซด์ ซึ่งเตรียมด้วยวิธีฝังตัวร่วม จะแข็งแรงกว่าที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝังตามลำดับ และจากผลของประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา และการวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าแรงปฏิกิริยาระหว่างนิกเกิลและซีเรียมออกไซด์ มีบทบาทสำคัญมากต่อกระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวล

บุปผา พุทธสวัสดิ์ (2549) ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อกระบวนการแกซิฟิเคชันของชีวมวลด้วยไอน้ำ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ชีวมวลที่นำมาศึกษา ได้แก่ แกลบ ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ อุณหภูมิ อัตราการป้อนไอน้ำ ร้อยละของโพแทสเซียมในตัวเร่งปฏิกิริยา และชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ โพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกลบมาอะลูมินา นิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับแกลบมาอะลูมินา และโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับแกลบมาอะลูมินา ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี เพื่อศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาแอลคาไลน์ต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส จากผลการทดลองในกระบวนการแกซิฟิเคชัน พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับแกลบมาอะลูมินาช่วยเร่งปฏิกิริยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเมื่ออุณหภูมิ อัตราการป้อนไอน้ำและร้อยละของโพแทสเซียมในตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ร้อยละความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าสูงขึ้น ในขณะที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนแก๊สมีเทนมีค่าลดลงอย่างมาก ภาวะที่เหมาะสมในการทดลองคือ 800 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำเท่ากับ 0.15 มิลลิลิตรต่อนาที และร้อยละของโพแทสเซียมในตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 9 โดยผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีร้อยละความเข้มข้นของไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากับ 33.47 และ 30.88 ตามลำดับ

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่นำเสนอข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ในกระบวนการแกซิฟิเคชันจะช่วยในการเร่งปฏิกิริยาได้ดีขึ้น โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับโดโลไมต์นั้นจะช่วยในการแตกตัวของน้ำมันทาร์และเร่งปฏิกิริยาอาร์ฟอริงของมีเทน แต่ งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่ไม่ได้ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อทาร์จากชีวมวลจริง นอกจากนี้ยังพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ยังมีการป้องกันการเกาะติดของคาร์บอนบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี และสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาแอลคาไลน์นั้น พบว่า ช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาซิฟิที่ได้ดี ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากชีวมวล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ โดยใช้ทาร์ที่ได้จากการสลายตัวของชีวมวลจริง และทำการศึกษานหาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน และศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อผลิตแก๊ส ในกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของชีวมวล ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง