

การผลิตแก๊สสังเคราะห์จากกลีเซอรอลดิบโดยการแปรสภาพ
ทางความร้อนจากการเหนี่ยวนำด้วยไมโครเวฟ

นางสาวศวดี สะวังจู

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2552
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SYNTHESIS GAS PRODUCTION FROM CRUDE GLYCEROL USING
MICROWAVE INDUCED THERMAL CONVERSION

Miss Yotwadee Hawangchu

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตแก๊สสังเคราะห์จากกลีเซอรอลดิบโดยการแปรสภาพ ทางความร้อนจากการเหนี่ยวนำด้วยไมโครเวฟ
โดย	นางสาวศศิตี ฮะวังจู
สาขาวิชา	วิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. ดวงเดือน อัจจงค์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเขียว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ดร. ดวงเดือน อัจจงค์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ภาวดี อังค์วัฒน์)

ยศวดี ฮะวังจู : การผลิตแก๊สสังเคราะห์จากกลีเซอรอลดิบโดยการแปรสภาพทางความร้อนจากการเหนี่ยวนำด้วยไมโครเวฟ. (SYNTHESIS GAS PRODUCTION FROM CRUDE GLYCEROL USING MICROWAVE INDUCED THERMAL CONVERSION) อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล. อาจารย์ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ดร.ดวงเดือน อางองค์, 155 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากกระบวนการแปรสภาพทางความร้อนกลีเซอรอลดิบภายในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาเกิดจากการเหนี่ยวนำของคลื่นไมโครเวฟร่วมกับเบดซิลิกอนคาร์ไบด์ โดยกลีเซอรอลดิบได้มาจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลภายในประเทศ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาซึ่งประกอบด้วยอัตราไหลแก๊สเข้ารวม อัตราส่วน $O_2/fuel$ อุณหภูมิ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ผลของการรีดิวซ์เบดตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฮโดรเจน และผลของการคืนสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา โดยพิจารณาสภาวะการเกิดปฏิกิริยาที่ให้ปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ ร้อยละการแปรสภาพของ C และ H ในวัตถุดิบเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน ค่าความร้อนต่ำ อัตราส่วนโดยโมลของ H_2/CO ที่มีค่าสูงสุด โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ร้อยละแก๊สผลิตภัณฑ์ TCD-NDIR analyzer ผลการทดลองพบว่าอัตราการไหลแก๊สเข้ารวมที่เหมาะสมเท่ากับ 1 ลิตร/นาที่ และให้ปริมาณแก๊สสังเคราะห์สูงสุดเท่ากับ 1.6 ลิตร/นาที่ ที่ $1250^\circ C$ และ $O_2/fuel$ ratio เท่ากับ 0.25 เมื่อเพิ่มอัตราส่วน $O_2/fuel$ พบว่าไม่มีผลต่อการผลิตแก๊สอย่างชัดเจน ผลจากการเพิ่มอุณหภูมิพบว่าตั้งแต่ $900^\circ C$ ขึ้นไป (440 วัตต์ขึ้นไป) สามารถแปรสภาพวัตถุดิบไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ได้อย่างสมบูรณ์ ในชุดการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าที่ 1%Ni/SiC ให้ผลการทดลองดีที่สุด ช่วยเพิ่มปริมาณแก๊สสังเคราะห์จากที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สภาวะเดียวกันได้ถึง 3.4 เท่า เพิ่มร้อยละการแปรสภาพของ C และ H ในวัตถุดิบเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ได้ 3.8 และ 4.6 เท่าตามลำดับ การทดลองแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 330 วัตต์ให้ปริมาณแก๊สสังเคราะห์สูงกว่าชุดการทดลองแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 880 วัตต์ในสภาวะเดียวกันถึง 1.8 เท่า การรีดิวซ์เบดตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฮโดรเจนและการคืนสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา ไม่มีผลอย่างชัดเจนต่อผลิตแก๊สที่เกิดขึ้น การให้ความร้อนด้วยวิธีนี้จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีศักยภาพในการแปรสภาพทางความร้อนกลีเซอรอลดิบให้ไปเป็นแก๊สสังเคราะห์ที่มีคุณภาพ ซึ่งไม่เพียงแต่จะเป็นการเพิ่มแหล่งพลังงานทางเลือกในการผลิตพลังงานสะอาดแล้วแต่ยังช่วยส่งเสริมการจัดการกลีเซอรอลดิบให้แก่อุตสาหกรรมผลิตไบโอดีเซลมีอีกด้วย

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....	ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2552.....	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5070601021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : CRUDE GLYCEROL/ MICROWAVE INDUCE/ THERMAL
CONVERSION/ Ni/SiC/ SYNTHESIS GAS

YOTWADEE HAWANGCHU :SYNTHESIS GAS PRODUCTION FROM CRUDE
GLYCEROL USING MICROWAVE INDUCED THERMAL CONVENSSION.
THESIS ADVISOR : ASST. PROF. VIBOON SRICHAROENCHAikul, Ph.D.
THESIS CO-ADVISOR : DUANGDUEN ATONG, Ph.D., 155 pp.

Production of synthesis gas from crude glycerol by thermal conversion reactions using microwave induced was studied here. Those reactions were carried out in a fixed bed quartz reactor. Silicon carbide was used as microwave absorber and became hot bed that reached the desired temperature by adjust the microwave power level. Glycerol was obtained from a local biodeisel manufacturer utilizing palm oil as raw material. The objectives were to suggest appropriate operating parameters including total inlet gas flowrate, O_2 /fuel ratio, temperature, amount of catalyst on support, catalyst pre-reduction and catalytic regeneration which would produce the highest syngas, C and H conversion to gas product, cold gas efficiency, LHV, and H_2/CO ratio. Gaseous product was quantified by TCD-NDIR analyzer. Result showed that the optimum total inlet gas flowrate of 1L/min which yielded the highest syngas as 1.6 L/min at 1250°C and 0.25 O_2 /fuel ratio. Temperature over 900°C or microwave power of more than 440 watts resulted in complete H and C conversion while the effect of O_2 /fuel ratio was insignificant. The 1%Ni/SiC was an optimum for catalytic reaction with 3.4 times higher syngas yield than non catalytic reaction as well as 3.8 and 4.6 times greater %C and %H conversions, respectively. The catalytic reaction at 330W produced 1.8 times higher syngas than non catalytic reaction at 880W. Effect of catalytic pre-reduction and regeneration was not conclusive. From these results, the microwave-induced heating method can be considered as an efficient option for conversion of glycerol waste into high quality of syngas that is not only increasing the alternative source of clean energy but also supporting the waste management of biodiesel production manufacture.

Department : Environmental Engineering Student's Signature

Field of Study : Environmental Engineering.. Advisor's Signature

Academic Year :2009..... Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ดร. ดวงเดือน อางองค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ความช่วยเหลือ และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ให้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเขียว ดร. ภาวดี ภาวดี อังคัวัฒนะ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์ ที่ได้กรุณาใช้เวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่กรุณาอบรมสั่งสอนและถ่ายทอดความรู้แก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุศาสตร์แห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนด้านอุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัย โดยมี ดร.ดวงเดือน อางองค์ คอยให้การดูแลเป็นอย่างดีเยี่ยมตลอดระยะเวลาที่ทำวิจัย ขอขอบคุณพี่ๆ ผู้ช่วยนักวิจัยของ ดร.ดวงเดือน ที่คอยช่วยเหลือให้คำแนะนำด้านเทคนิค

ขอบคุณเพื่อนๆ และน้องๆ ทั้งจากลูกศิษย์อาจารย์วิบูลย์ และลูกศิษย์อาจารย์อรรทัย (ห้องปฏิบัติการน้ำเสีย) สำหรับความช่วยเหลือและกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้ประสบความสำเร็จ

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัวและบุคคลอันเป็นที่รักยิ่ง ที่คอยดูแล ให้กำลังใจและสนับสนุนทุกอย่าง จนกระทั่งการทำวิจัยและวิทยานิพนธ์นี้ประสบความสำเร็จ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 การทบทวนเอกสาร.....	5
2.1 ก๊าซเซอรอลคิบ.....	5
2.1.1 ความเป็นมาของก๊าซเซอรอล.....	5
2.1.2 ลักษณะสมบัติของก๊าซเซอรอล.....	6
2.1.3 อุตสาหกรรมผลิตไบโอดีเซล.....	8
2.1.4 เทคโนโลยีการทำก๊าซเซอรอลให้บริสุทธิ์.....	9
2.1.5 ปริมาณก๊าซเซอรอลคิบภายในประเทศ.....	10
2.1.6 การใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ.....	11
2.1.7 ก๊าซเซอรอลจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....	11
2.2 กระบวนการแปรสภาพทางความร้อน	12
2.2.1 ปฏิกิริยาการเผาไหม้พื้นฐาน.....	14
2.2.2 ทฤษฎีกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิส	17
2.2.3 ประเภทเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ผลิตแก๊ส.....	25
2.2.4 แก๊สสังเคราะห์.....	32
2.2.5 การประยุกต์ใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	37
2.3 ไมโครเวฟ.....	44
2.3.1 พื้นฐานเทคโนโลยีไมโครเวฟ.....	44

2.3.2 การเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าของโมเลกุลในสนามไฟฟ้า.....	46
2.3.3 กลไกการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟ	47
2.3.4 ปฏิกิริยาระหว่างคลื่นไมโครเวฟและวัสดุ	48
2.3.5 การให้ความร้อนแบบทั่วไปและแบบคลื่นไมโครเวฟ	50
2.3.6 ข้อดีของไมโครเวฟ.....	51
2.3.7 ข้อจำกัดของไมโครเวฟ.....	53
2.3.8 การประยุกต์ใช้ในงานเคมีความร้อน.....	54
2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี.....	55
2.4.1 ประเภทตัวเร่งปฏิกิริยา.....	55
2.4.2 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	57
2.4.3 ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล.....	58
2.4.4 ตัวรองรับ	60
2.4.5 ปฏิกิริยาระหว่างนิกเกิลกับตัวรองรับ.....	60
2.4.6 ริดักชัน	61
2.5 ซิลิกอนคาร์ไบด์.....	61
2.5.1 คุณสมบัติของซิลิกอนคาร์ไบด์	61
2.5.2 ประเภทของซิลิกอนคาร์ไบด์และการใช้งาน.....	62
2.5.3 การประยุกต์ใช้ในงานที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา.....	63
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	63
2.6.1 การแปรสภาพชีวมวลเป็นแก๊สสังเคราะห์.....	63
2.6.2 การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในงานการเปลี่ยนแปลงทางเคมีด้วยความร้อน.....	67
2.5.3 การการผลิตแก๊สสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	69
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	71
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	72
3.1.1 การเตรียมกลีเซอรอลดิบที่ใช้ในงานวิจัย.....	72
3.1.2 การเตรียมเตาปฏิกรณ์พร้อมชั้นเบด.....	72
3.1.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SiC	72
3.1.4 การดำเนินการกระบวนการเคมีความร้อน.....	72
3.2 การเตรียมวัตถุดิบและเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	78
3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมกลีเซอรอลดิบ.....	78
3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมเตาปฏิกรณ์พร้อมชั้นเบด	78

3.2.3	ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	80
3.2.4	ขั้นตอนการเตรียมระบบก่อนดำเนินการทดลอง.....	80
3.3	ตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	82
3.3.1	อุณหภูมิ.....	82
3.3.2	ปริมาณออกซิไดซ์แก๊ส.....	82
3.3.3	ปริมาณร้อยละของนิเกิลบนซัลฟอนคาร์ไบด์.....	82
3.3.4	ตัวแปรในการทดลอง.....	82
3.4	ดำเนินงานวิจัย.....	83
3.4.1	ศึกษาลักษณะทางเคมีและสมบัติทางความร้อนของกลีเซอรอลดิบ.....	83
3.4.2	ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา.....	83
3.4.3	ศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	84
3.5	การวิเคราะห์ผลงานวิจัย.....	84
3.5.1	ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น.....	85
3.4.2	แก๊สผลิตภัณฑ์.....	85
3.4.3	ประสิทธิภาพด้านพลังงาน.....	85
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์.....	87
4.1	ลักษณะทางเคมี สมบัติทางความร้อนของกลีเซอรอลดิบ.....	89
4.1.1	ลักษณะทางเคมีของกลีเซอรอลดิบ.....	89
4.1.2	ผลของสิ่งเจือปนเนื่องจากกระบวนการผลิตไป โอดีเซล.....	89
4.2	การแปรสภาพทางความร้อนของกลีเซอรอลดิบ.....	96
4.2.1	Temperature profile ของซัลฟอนคาร์ไบด์เบด.....	96
4.2.2	ผลของอัตราแก๊สเข้ารวมและอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อเชื้อเพลิง.....	98
4.2.3	ผลของอุณหภูมิ.....	102
4.3	การแปรสภาพทางความร้อนของกลีเซอรอลดิบ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล.....	105
4.3.1	Temperature profile ของเบดตัวเร่งปฏิกิริยา.....	105
4.3.2	ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา.....	108
4.3.3	ผลของการรีดิวซ์เบดตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฮโดรเจน.....	114
4.3.4	ผลของกระบวนการคืนสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา.....	116
บทที่ 5	สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	121
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	121

	ญ
	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับเตาปฏิกรณ์.....	122
5.3 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการดำเนินปฏิกิริยา.....	123
รายการอ้างอิง.....	125
ภาคผนวก.....	130
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง.....	131
ภาคผนวก ข การเผยแพร่ผลงานวิจัย.....	152
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	155

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	สมบัติทางกายภาพของกลีเซอรอล..... 6
ตารางที่ 2.2	การคาดการณ์ปริมาณความต้องการใช้กลีเซอรอลภายในประเทศ..... 11
ตารางที่ 2.3	ปฏิกิริยาการเผาไหม้พื้นฐาน..... 15
ตารางที่ 2.4	ลักษณะที่สำคัญของเตาแก๊สซีฟาย 21
ตารางที่ 2.5	เปรียบเทียบลักษณะของแก๊สซีฟายเออร์ชนิดฟลูอิด ไคซ์เบด..... 32
ตารางที่ 2.6	อัตราส่วนของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการต่างๆ..... 33
ตารางที่ 2.7	วิธีการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยกระบวนการต่างๆ..... 36
ตารางที่ 2.8	การเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลโดยใช้วิธีทางชีวเคมีและการใช้พลังงานความร้อน..... 44
ตารางที่ 2.9	เปรียบเทียบกลไกการให้ความร้อนแบบทั่วไปและแบบใช้คลื่นไมโครเวฟ..... 51
ตารางที่ 2.10	เปรียบเทียบร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากรูปแบบการให้ความร้อนที่ต่างกัน..... 52
ตารางที่ 2.11	แสดงหน้าที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์แต่ละประเภท 56
ตารางที่ 2.12	ตัวรองรับชนิดต่างๆ ตามลักษณะพื้นที่ผิว..... 57
ตารางที่ 3.1	วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย..... 74
ตารางที่ 4.1	การเปรียบเทียบลักษณะทางเคมีของกลีเซอรอลดิบและชีวมวลชนิดอื่น..... 91
ตารางที่ 4.2	ผลของกลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบต่อผลิตภัณฑ์ในสถานะต่างๆ ที่เกิดขึ้น 92
ตารางที่ 4.3	ผลของระดับพลังงานไมโครเวฟต่อความร้อนที่เกิดขึ้นกับตัวรับไมโครเวฟต่างชนิด 98
ตารางที่ 4.4	ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้น โดยเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่สภาวะเดียวกัน 109
ตารางที่ 4.5	ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพด้านพลังงาน โดยเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่สภาวะเดียวกัน..... 110
ตารางที่ 4.6	แสดงภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของเบดตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณนิกเกิลต่างๆ 110
ตารางที่ 4.7	ผลของการรีดิวซ์เบดตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าผลิตภัณฑ์แก๊สและค่าความร้อนต่ำ โดยเทียบกับชุดการทดลองที่เบดตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ถูกรีดิวซ์ ที่สภาวะเดียวกัน..... 115
ตารางที่ 4.8	ผลของการรีดิวซ์เบดตัวเร่งปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพด้านพลังงาน โดยเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ถูกรีดิวซ์ ที่สภาวะเดียวกัน..... 117

ตารางที่ 4.9	ผลของการคืนสภาพเบดตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์และค่าความร้อนต่ำ โดยเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการคืนสภาพ ที่สภาวะเดียวกัน.....	117
ตารางที่ 4.10	ผลของการคืนสภาพเบดตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าการแปรสภาพจากวัตุดิบไปเป็นแก๊ส โดยเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการคืนสภาพ ที่สภาวะเดียวกัน	118
ตารางที่ 4.11	ภาพ SEM ของเบดตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังจากการดำเนินการทดลอง ที่อุณหภูมิ 600°C อัตราการไหลแก๊สเข้ารวมเท่ากับ 1 ลิตร/นาที ไม่เติมออกซิเจน.....	119

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	สูตรโครงสร้างของกลีเซอรอล..... 5
รูปที่ 2.2	กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้ผลิตไบโอดีเซล..... 9
รูปที่ 2.3	กระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน..... 12
รูปที่ 2.4	เทคโนโลยีพลังงานชีวมวล 13
รูปที่ 2.5	พลังงานเคมีในชีวมวลได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสง..... 13
รูปที่ 2.6	การใช้พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้เพื่อผลิตไอน้ำ..... 14
รูปที่ 2.7	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน..... 14
รูปที่ 2.8	การเปลี่ยนแปลงโดยใช้ความร้อนของชีวมวล 16
รูปที่ 2.9	ลำดับการเปลี่ยนแปลงของการแก๊สซิฟิเคชันโดยทั่วไป 18
รูปที่ 2.10	แก๊สซิฟายเออร์ชนิดแก๊สไหลขึ้น..... 27
รูปที่ 2.11	แก๊สซิฟายเออร์ชนิดแก๊สไหลลง 28
รูปที่ 2.12	แก๊สซิฟายเออร์ชนิดแก๊สไหลขวาง..... 29
รูปที่ 2.13	แก๊สซิฟายเออร์ชนิดฟลูอิดไคซ์แบบเบดแบบฟองอากาศ..... 30
รูปที่ 2.14	แก๊สซิฟายเออร์ชนิดฟลูอิดไคซ์แบบเบดแบบหมุนเวียน..... 31
รูปที่ 2.15	ผลิตภัณฑ์ขั้นตอนที่ได้จากการใช้แก๊สสังเคราะห์เป็นวัตถุดิบ..... 34
รูปที่ 2.16	การใช้แก๊สสังเคราะห์ในอุตสาหกรรมต่างๆ ทั่วโลกและปริมาณที่ถูกคาดการณ์ในปี ค.ศ. 2010..... 37
รูปที่ 2.17	ปริมาณการใช้แก๊สสังเคราะห์ทั่วโลกตั้งแต่ปี ค.ศ. 1952 ถึงปี ค.ศ. 2007 และปริมาณความต้องการแก๊สสังเคราะห์จากการคาดการณ์ในปี ค.ศ. 2010..... 38
รูปที่ 2.18	ความแตกต่างของมลพิษที่ปล่อยจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากวิธีการที่ต่างกัน..... 39
รูปที่ 2.19	โรงผลิตกระแสไฟฟ้าแบบ Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC)..... 40
รูปที่ 2.20	หลักการ Integrated Gasification Combined Cycle 41
รูปที่ 2.21	ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเพื่อการขนส่งที่ได้จากแก๊สสังเคราะห์..... 42
รูปที่ 2.22	หลักการเปลี่ยนชีวมวลเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในโรงกลั่นชีวมวล..... 43
รูปที่ 2.23	แสดงช่วงความถี่และระดับพลังงานของไมโครเวฟบนสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.. 45
รูปที่ 2.24	ความปั่นป่วนของโมเลกุลของสารมีขั้วภายใต้อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า..... 46
รูปที่ 2.25	แสดงการจัดเรียงตัวของโมเลกุลตามสนามไฟฟ้า..... 46

รูปที่ 2.26	แสดงการกลับตัวไปมาของโมเลกุลตามสนามไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว.....	47
รูปที่ 2.27	การเคลื่อนที่ของโมเลกุลในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบต่างๆ.....	48
รูปที่ 2.28	รูปแบบการให้ความร้อนโดยเตาไมโครเวฟและอ่างน้ำมันซึ่งเป็นเตาความร้อนทั่วไป..	49
รูปที่ 2.29	ปฏิกิริยาแบบต่างๆ ของคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อวัสดุ.....	50
รูปที่ 2.30	เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาระหว่างระบบที่มีและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา.....	55
รูปที่ 2.31	โครงสร้างของซิลิกอนคาร์ไบด์.....	61
รูปที่ 3.1	แสดงพื้นที่ส่วนต่างๆ และความสูงของเตาปฏิกรณ์ควอร์ท.....	73
รูปที่ 3.2	แผนผังกระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์โดยรวม.....	77
รูปที่ 3.3	ขั้นตอนการเตรียมกลีเซอรอลดิบ.....	79
รูปที่ 3.4	ขั้นตอนการเตรียมเตาปฏิกรณ์พร้อมชั้นเบด	79
รูปที่ 3.5	ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	80
รูปที่ 3.6	ขั้นตอนการตรวจวัดระดับอุณหภูมิของชั้นเบด	81
รูปที่ 3.7	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	86
รูปที่ 4.1	แผนผังการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	88
รูปที่ 4.2	การเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 1400°C อัตราแก๊สขาเข้ารวม 2 ลิตร/นาที่ และอัตราส่วนออกซิเจนต่อเชื้อเพลิงเท่ากับ 0.25	93
รูปที่ 4.3	ผลของอุณหภูมิ 1250°C และ 1400°C และอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อเชื้อเพลิงของกลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบ ที่อัตราการไหลแก๊สขาเข้ารวม 2 ลิตร/นาที่	95
รูปที่ 4.4	ผลของระดับพลังงานไมโครเวฟ 110-880 วัตต์ ต่อระดับอุณหภูมิของซิลิกอนคาร์ไบด์เบด.....	97
รูปที่ 4.5	ผลของอัตราแก๊สขาเข้ารวมและ O ₂ /fuel ratio ต่อปริมาณแก๊สสังเคราะห์ ร้อยละประสิทธิภาพเชิงความร้อน ค่าความร้อนต่ำ และอัตราส่วนโดยโมลของ H ₂ /CO ที่ 1250°C และ 1400 °C	100
รูปที่ 4.6	ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณแก๊สสังเคราะห์และ ค่า H ₂ /CO ratio ที่ได้จากการแปรผันระดับกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 110-880 วัตต์ อัตราไหลแก๊สขาเข้ารวมเท่ากับ 1 ลิตร/นาที่ ไม่เติมออกซิเจน.....	102
รูปที่ 4.7	ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์และ ค่าความร้อนต่ำ ที่ได้จากการแปรผันระดับกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 110-880 วัตต์ อัตราไหลแก๊สขาเข้ารวมเท่ากับ 1 ลิตร/นาที่ ไม่เติมออกซิเจน.....	103

รูปที่ 4.8	ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนในวัตถุดิบไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ และค่า cold gas efficiency ที่ได้จากการแปรผันระดับกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 110-880 วัตต์ อัตราไหล่แก๊สเข้ารวมเท่ากับ 1 ลิตร/นาที่ ไม่เติมออกซิเจน.....	104
รูปที่ 4.9	ผลของพลังงานไมโครเวฟตั้งแต่ 110-880 วัตต์ต่อระดับอุณหภูมิของเบคตัวเร่งปฏิกิริยา.....	106
รูปที่ 4.10	ผลของพลังงานไมโครเวฟ 110-660 วัตต์ ต่ออุณหภูมิของซิลิกอนคาร์ไบด์เบคและเบคตัวเร่งปฏิกิริยา และภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1000 เท่า โดยที่ a) เบคซิลิกอนคาร์ไบด์ และ b) เบคตัวเร่งปฏิกิริยา (10% Ni/SiC).....	107
รูปที่ 4.11	ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ ที่อุณหภูมิ 600°C อัตราไหล่แก๊สเข้ารวมเท่ากับ 1 ลิตร/นาที่ ไม่เติมออกซิเจน.....	108
รูปที่ 4.12	ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าร้อยละการแปรสภาพคาร์บอนและไฮโดรเจนในวัตถุดิบไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ และค่าร้อยละประสิทธิภาพเชิงความร้อน ที่ระดับอุณหภูมิ 600°C อัตราไหล่แก๊สเข้ารวมกับ 1 ลิตร/ นาที่ ไม่เติมออกซิเจน	119
รูปที่ 4.13	ผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อคุณภาพแก๊สสังเคราะห์ที่ได้โดยเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ระดับอุณหภูมิที่ต่างๆ อัตราการไหล่แก๊สเข้ารวมเท่ากับ 1 ลิตร/นาที่ ไม่เติมออกซิเจน.....	112
รูปที่ 4.14	ผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพด้านพลังงานโดยเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ระดับอุณหภูมิที่ต่างๆ อัตราการไหล่แก๊สเข้ารวมเท่ากับ 1 ลิตร/นาที่ ไม่เติมออกซิเจน.....	113
รูปที่ 4.15	ผลของการรีดิวซ์แบบตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์และค่าความร้อนที่อุณหภูมิ 600 °C อัตราการไหล่แก๊สเข้ารวมเท่ากับ 1 ลิตร/นาที่ ไม่เติมออกซิเจน.....	114
รูปที่ 4.16	ผลของการรีดิวซ์แบบตัวเร่งปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพด้านพลังงานที่อุณหภูมิ 600 °C อัตราการไหล่แก๊สเข้ารวมเท่ากับ 1 ลิตร/นาที่ ไม่เติมออกซิเจน.....	115
รูปที่ 4.17	ผลของการคืนสภาพเบคตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าร้อยละการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนในวัตถุดิบไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ และค่าร้อยละประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C อัตราการไหล่แก๊สเข้ารวมเท่ากับ 1 ลิตร/นาที่ ไม่เติมออกซิเจน.....	117
รูปที่ 4.18	ผลของการคืนสภาพเบคตัวเร่งปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพด้านพลังงานที่อุณหภูมิ 600°C อัตราการไหล่แก๊สเข้ารวมเท่ากับ 1 ลิตร/นาที่ ไม่เติมออกซิเจน.....	118

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญของโลก และเป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมปิโตรเคมีซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่ผลิตของใช้ในชีวิตประจำวันมากมาย แต่เนื่องจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดและใช้แล้วหมดไป (Non-renewable energy) อีกทั้งมลพิษที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงประเภทนี้ยังเป็นสาเหตุให้เกิดการทำลายสิ่งแวดล้อม ไบโอดีเซลเป็นพลังงานทางเลือกประเภทหนึ่งที่มีความนิยม เพราะสามารถใช้ในการเผาไหม้แทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้ รัฐบาลให้การสนับสนุนตั้งแต่แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่ 9 (พ.ศ.2545 - 2549) ถึงฉบับปัจจุบัน ส่งผลให้พื้นที่เพาะปลูกพืชพลังงานและโรงงานผลิตไบโอดีเซลมีเพิ่มขึ้น จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ได้เป็น ไบโอดีเซล (ผลิตภัณฑ์ในรูปของสารเอสเทอร์) ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมาก นอกจากนั้นยังได้กลีเซอรอลดิบเป็นผลพลอยได้ (By-product) ประมาณร้อยละ 10 ของปริมาณน้ำมันพืชที่ใช้ (The Glycerol Challenge, 2007) กลีเซอรอลดิบเมื่อผ่านนี้กระบวนการทำให้บริสุทธิ์ (Purification) จะได้เป็นกลีเซอรอลบริสุทธิ์สำหรับอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ยา อาหาร และเครื่องสำอาง เป็นต้น ซึ่งกระบวนการดังกล่าวมีขั้นตอนที่ซับซ้อนและมีการลงทุนสูง จึงอาจยังไม่เหมาะสมกับโรงงานขนาดเล็กถึงปานกลาง ยิ่งไปกว่านั้นการรวบรวมกลีเซอรอลต้องอาศัยต้นทุนค่อนข้างสูง โดยเฉพาะค่าขนส่ง ส่งผลต่อราคารับซื้อที่ต่ำและนำไปสู่ความไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ (Cost effectiveness) อย่างไรก็ตามการเผากลีเซอรอลดิบยังเป็นอีกทางเลือกหนึ่งแทนการเผาเชื้อเพลิงฟอสซิล แม้ว่าการเผากลีเซอรอลดิบจะได้พลังงานความร้อนไปผลิตไอน้ำ แต่ข้อเสียของการเผาไหม้คือประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานความร้อนต่ำ การจัดเก็บพลังงานความร้อนที่ได้เพื่อใช้ในเวลาและสถานที่อื่นทำได้ยาก และยังก่อให้เกิดมลภาวะจากสารประกอบออกไซด์ต่างๆ

จากคุณสมบัติทางความร้อนของกลีเซอรอลดิบและข้อเสียเปรียบของการเผาไหม้ดังกล่าว ทำให้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการแปรสภาพกลีเซอรอล โดยอาศัยกระบวนการแปรสภาพทางความร้อน (Thermal conversion) ได้แก่ การสลายตัวด้วยความร้อนแบบไร้ออกซิเจน (Pyrolysis) และการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงหรือแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) กระบวนการดังกล่าวต่างมีจุดประสงค์หลักเพื่อสลายชีวมวลให้กลายเป็นเชื้อเพลิงโดยให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ข้อดีของกระบวนการนี้คือ

สามารถกักเก็บเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นไว้ได้ ปฏิกริยาเกิดขึ้นเร็ว ใช้พื้นที่น้อย และไม่เกิดปัญหามลภาวะจากสารประกอบออกไซด์ต่างๆ ผลผลิตที่ได้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจนและมีเทน โดยเฉพาะไฮโดรเจนซึ่งเป็นส่วนช่วยสนับสนุนการพัฒนาและใช้พลังงานจากระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแนวโน้มว่าจะเป็นระบบการผลิตพลังงานที่สำคัญมากในอนาคต อีกทั้งยังสามารถเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงเหลว ที่สามารถนำไปทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงได้ เช่น น้ำมันดีเซลและน้ำมันเบนซินได้โดยตรง หรือใช้ร่วมกับแก๊สโซฮอล์หรือดีโซฮอล์เมื่อถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแอลกอฮอล์

รูปแบบการให้ความร้อนในงานวิจัยข้างต้นล้วนเป็นการให้ความร้อนแบบทั่วไป (Conventional heating) คือการใช้เตาเผาให้ความร้อนหรือใช้ขดลวดให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการสลายตัวของชีวมวล นอกจากนี้ยังมีการพัฒนารูปแบบการให้ความร้อนเพื่อให้ชีวมวลได้รับความร้อนอย่างทั่วถึงมากที่สุด เช่นการใช้รูปแบบฟลูอิดไดซ์ (Fluidize) โดยมีตัวกลางนำความร้อนเคลื่อนที่ได้คล้ายของไหลเนื่องจากแรงลมของแก๊สที่ถูกอัดเข้าไป เพื่อเพิ่มการกวนผสมและการสัมผัสระหว่างชีวมวลและตัวกลางนั้นๆ แต่มีข้อเสียคือแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ถูกเจือจางลงสิ้นเปลืองพลังงานและต้องหาวิธีกำจัดที่ไถ่ที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อไม่นานมานี้ได้มีงานวิจัยที่ใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นตัวทำให้ร้อน (Microwave heating) และจากการศึกษาพบว่าสามารถให้ผลิตภัณฑ์ในรูปแก๊สได้มากกว่าวิธีการให้ความร้อนแบบทั่วไป (Dominguez และคณะ, 2006) เนื่องจากลักษณะการให้ความร้อนของคลื่นไมโครเวฟเป็นไปอย่างทั่วถึง (volumetric heating) จึงเกิดการสลายชีวมวลได้มากกว่า เมื่อเทียบกับการให้ความร้อนแบบทั่วไป งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการนำกลีเซอรอลดิบที่ได้จากอุตสาหกรรมผลิตไบโอดีเซลมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ โดยใช้กระบวนการแปรสภาพทางความร้อนที่ใช้คลื่นไมโครเวฟเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนร่วมกับซิลิกอนคาร์ไบด์ ทั้งยังศึกษาผลของออกซิเจนที่เติมเข้าไป และผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลเพื่อลดพลังงานที่ใช้ วิธีนี้นอกจากจะลดการปล่อยของเสียในรูปออกไซด์ของซัลเฟอร์และไนโตรเจนแล้ว ยังช่วยเพิ่มแนวทางการจัดการ กลีเซอรอลดิบของอุตสาหกรรมผลิตไบโอดีเซลและสร้างรูปแบบการดำเนินงานที่ครบวงจร เพิ่มแหล่งวัตถุดิบเพื่อรองรับระบบเชื้อเพลิงในอนาคต และเป็นข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับการใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อแปรสภาพทางความร้อน ซึ่งจะได้เป็นฐานความรู้ในการพัฒนางานวิจัยด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนเพื่อแปรสภาพ ก๊าซเซอร์โคเนียมเป็นแก๊สสังเคราะห์ด้วยกระบวนการแปรสภาพทางความร้อน (Thermal conversion)
2. ศึกษาอัตราการไหลแก๊สเข้ารวมและอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อเชื้อเพลิงที่เหมาะสมในชุดการทดลองแบบไมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
3. ศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ การรีดิวซ์เบดตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนดำเนินการทดลอง และการคืนสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในชุดการทดลองแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองนำก๊าซเซอร์โคเนียมจากโรงงานผลิตไบโอดีเซลมาผ่านกระบวนการแปรสภาพทางความร้อน ได้แก่ กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันและกระบวนการการไพโรไลซิส โดยใช้พลังงานคลื่นไมโครเวฟร่วมกับซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนแก่ระบบ และในชุดการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เลือกใช้โลหะนิกเกิลที่ปริมาณต่างๆ ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และโรงงานต้นแบบของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ โดยมีขอบเขตของการวิจัยดังนี้

1. ปฏิกิริยาการแปรสภาพทางความร้อนก๊าซเซอร์โคเนียมเกิดภายในเตาปฏิกรณ์ควอร์ทซ์ซึ่งมีซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นเบด และเป็นตัวกลางเปลี่ยนพลังงานคลื่นไมโครเวฟเป็นความร้อนให้แก่ระบบ
2. ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนซิลิกอนคาร์ไบด์ (Ni/SiC) ซึ่งถูกเตรียมด้วยวิธีอิมเพกเนชัน (Impregnation)
3. ควบคุมอุณหภูมิขณะเกิดการแปรสภาพโดยการแปรผันระดับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ (วัตต์)
4. ใช้อากาศเป็นออกซิไดซิ่งแก๊ส และแก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สพา
5. ก๊าซเซอร์โคเนียมได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากโรงงานภายในประเทศ ซึ่งใช้น้ำมันปาล์มเป็นวัตถุดิบ
6. ศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 300 - 1400°C อัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อเชื้อเพลิงเท่ากับ 0 - 0.25 และปริมาณร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนซิลิกอนคาร์ไบด์เท่ากับร้อยละ 0.5 - 10

7. ทำการศึกษาผลิตภัณฑ์แก๊สในด้านต่างๆ จากข้อมูลร้อยละและปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ต่อนาที
8. ปริมาณน้ำมันนํ้าและซาร์ได้จากผลต่างของน้ำหนักเตาปฏิกรณ์ควอร์ทพร้อมเบดก่อนและหลังการทดลอง
9. ใช้ระยะเวลาทั้งหมด 25 นาทีต่อหนึ่งการทดลอง โดย 5 นาทีแรกเป็นการให้ความร้อนแก่ระบบก่อนดำเนินการทดลอง (Preheat) และอีก 20 นาทีในการเกิดปฏิกิริยาการแปรสภาพทางความร้อน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพิ่มแหล่งพลังงานทดแทนในรูปของแก๊สสังเคราะห์จากกลีเซอรอลดิบ ลดมลภาวะจากการเผาไหม้หรือฝังกลบสู่สิ่งแวดล้อม
2. ได้ข้อมูลเชิงเทคนิควิจัยและผลการวิจัยเกี่ยวกับการใช้พลังงานคลื่นไมโครเวฟในงานแปรสภาพทางความร้อนเพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ทั้งแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ใช้ และเป็นฐานข้อมูลในการพัฒนางานวิจัยด้านพลังงานทดแทนและสิ่งแวดล้อม
3. เพิ่มแนวทางการจัดการกลีเซอรอลดิบจากอุตสาหกรรมผลิตไบโอดีเซล

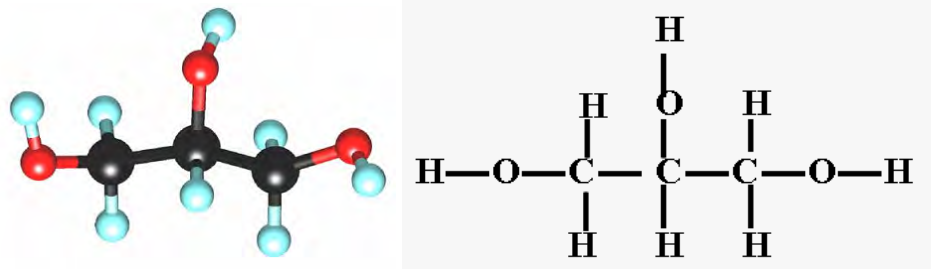
บทที่ 2

การทบทวนเอกสาร

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์หลักเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกลีเซอรอลดิบซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมาผลิตเป็นแก๊สสังเคราะห์ด้วยกระบวนการแปรสภาพทางความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเตาปฏิกรณ์ควอร์ทซึ่งอยู่ภายในเตาไมโครเวฟ โดยมีรายละเอียดทางทฤษฎีรวมถึงงานวิจัยที่สำคัญดังนี้

2.1 กลีเซอรอลดิบ (Crude glycerol)

กลีเซอรอล (Glycerol) หรือกลีเซอริน (Glycerin) หมายถึง สารจำพวกพอลิไฮดริคแอลกอฮอล์ (Polyhydric alcohol) ที่มีหมู่ไฮดรอกซี 3 หมู่ มีสูตรเคมี $C_3H_8O_3$ มีชื่อทางเคมีว่า 1,2,3- โพรเพนไตรออล (1,2,3- Propantrio) และมีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของกลีเซอรอล

(Government of Western Australia, Department of Agriculture and Food,, 2006)

2.1.1 ความเป็นมาของกลีเซอรอล (ณัฐกานต์, 2548)

ปี ค.ศ. 1779 กลีเซอรอลถูกค้นพบครั้งแรกโดย Scheele ในรูปของผลิตภัณฑ์ร่วม (Co-product) ที่ได้จากปฏิกิริยาการผลิตสบู่ (Saponification) ระหว่างน้ำมันมะกอกกับออกไซด์ของตะกั่ว (Lead oxide)

ปี ค.ศ. 1813 Chevreul พบว่ากลีเซอรอลเป็นส่วนประกอบของไขมัน โดยอยู่ในรูปของกลีเซอรอลเอสเทอร์ของกรดไขมันและถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมครั้งแรก

ปี ค.ศ. 1866 Nobel ผลิตระเบิดไดนาไมต์ในรูปไตรไนเตรตของกลีเซอรอลหรือไนโตรกลีเซอรอล

ปี ค.ศ. 1949 กลีเซอรอลถูกสังเคราะห์ขึ้นโดยใช้โพรพีนเป็นสารตั้งต้น และกลายเป็นอุตสาหกรรมการสังเคราะห์กลีเซอรอลที่มีความสำคัญ

ปัจจุบันกลีเซอรอลยังคงเป็นวัตถุดิบที่สำคัญของอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยา เครื่องสำอาง อาหาร ยาสูบ เป็นต้น นอกจากนี้ยังถูกนำไปใช้ในรูปของเชื้อเพลิง โดยการเผาไหม้โดยตรงแล้วนำพลังงานความร้อนที่ได้นั้น ไปต้มน้ำ งานวิจัยนี้เป็นการใช้ประโยชน์จากกลีเซอรอลซึ่งได้จากอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันไบโอดีเซล เพื่อผลิตเป็นแก๊สสังเคราะห์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมผลิตปุ๋ยและสารเคมี และยังสามารถใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าได้อีกด้วย

2.1.2 ลักษณะสมบัติของกลีเซอรอล

- สมบัติทางกายภาพ

กลีเซอรอลบริสุทธิ์เป็นของเหลว ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีพิษ และมีโครงสร้างคล้ายน้ำตาล ทำให้กลีเซอรอลมีรสหวาน และเนื่องจากในโมเลกุลมีพันธะไฮโดรเจนจึงทำให้กลีเซอรอลเป็นของเหลวหนืด สามารถละลายได้ดีกับน้ำ เมทานอล เอทานอล และไอโซเมอร์ของโพรพานอล บิวทานอล และเพนทานอล รวมทั้ง ฟีนอล ไกลคอล โพรเพนไดออล เอมีน และสารประกอบที่เป็นเฮเทอโรไซคลิกที่ประกอบด้วยอะตอมของไนโตรเจนในวงแหวน โดยที่กลีเซอรอลไม่สามารถละลายได้ในไฮโดรคาร์บอนรวมทั้งแอลกอฮอล์ที่มีโซ่ยาว น้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ รวมถึงตัวทำละลายจำพวก แอลกอฮอล์ เช่น คลอโรฟอร์ม ดังนั้นกลีเซอรอลจึงเป็นตัวทำละลายที่มีประโยชน์ต่อสารหลายชนิดทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ซึ่งมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมต่างๆ

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของกลีเซอรอล (ณัฐกานต์, 2548)

พารามิเตอร์	
Molecular weight	92.09 g
Melting point	18.0°C
Boiling point (101.3 kPa)	290.0°C
Density (20°C)	1.261 g/cm ³
Refractive index	1.4740
Dynamic viscosity (20°C)	1.410 Pa.s
Compressibility (28.5°C)	2.1x10 ⁻⁴ MPa ⁻¹
Gravity coefficient of thermal expansion (15-20°C)	0.000615 K ⁻¹
Surface tension (20°C)	63.4 mN/m

พารามิเตอร์	
Heat of formation	669 kJ/mol
Heat of combustion	1665 kJ/mol
Heat of vaporization (55°C)	88.2 kJ/mol
(195°C)	76.1 kJ/mol
Heat of fusion (18°C)	18.3 kJ/mol
Heat of solution (infinite dilution)	5.8 kJ/mol
Heat capacity (26°C)	2.41 kJ/mol
(-80°C)	1.91 kJ/mol
(-108°C)	0.91 kJ/mol
Thermal conductivity (0°C)	0.29 kJ/mol
Diffusion coefficient of water into glycerol (20°C)	$1.336 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$
Specific electrical conductivity (20°C)	0.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Relative dielectric constant (25°C)	42.48
Flash point	177°C
Fire point	204°C
Autoignition temperature	429°C

อย่างไรก็ตามกลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (Transesterification) มักจะพบสารเจือปน เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวได้แก่ โปรตีนที่สลายตัว ตัวเร่งปฏิกิริยา กรดไขมันหรือเอสเทอร์ และสบู่ ทำให้เมื่อถูกเผาแล้วได้เป็นพลังงานความร้อนออกมา ทั้งนี้ที่อุณหภูมิห้องกลีเซอรอลดิบจะคงรูปอยู่ในลักษณะขี้ผึ้ง (wax) เนื่องจากกลีเซอรอลเหลวที่ได้จากกระบวนการผลิตจะเปลี่ยนสภาพกลายเป็นของแข็งแข็งเมื่ออุณหภูมิเย็นลงและกลีเซอรอลที่ได้อาจมีน้ำปนอยู่เล็กน้อย เพราะในขั้นตอนการแยกไบโอดีเซลออกจากกลีเซอรอลจะใช้วิธีการนำน้ำมาชะล้างให้กลีเซอรอลละลายออกจากไบโอดีเซล

- สมบัติทางเคมี

กลีเซอรอลสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เหมือนกับแอลกอฮอล์ทั่วไป โดยที่หมู่ไฮดรอกซิลด้านนอกจะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าหมู่ไฮดรอกซิลตรงกลาง ภายใต้

สภาวะที่เป็นกลางหรือด่างกลีเซอรอลสามารถทนความร้อนได้ถึง 275 °C โดยไม่เกิด อะโครลีน ในทางตรงข้ามในสภาวะกรดเล็กน้อยพบว่าที่อุณหภูมิ 160 °C จะมีกลิ่นของอะโครลีน (อยู่ในช่วง 0.2 - 0.4 ppm) โดยที่อุณหภูมิ 200 °C อะโครลีนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นปฏิกิริยาของกลีเซอรอลจึงควรทำในสภาวะที่เป็นกลางหรือเป็นด่าง และที่อุณหภูมิห้องกลีเซอรอลจะดูดความชื้นอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้กลีเซอรอลยังถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายโดยที่อะตอมคาร์บอนด้านนอกจะถูกออกซิไดซ์เป็นหมู่คาร์บอกซิล และอะตอมคาร์บอนตรงกลางจะถูกออกซิไดซ์เป็นหมู่คาร์บอนิล

2.1.3 อุตสาหกรรมการผลิตกลีเซอรอล

โดยทั่วไปกลีเซอรอลดิบได้จากกระบวนการผลิตสบู่และกระบวนการผลิตกรดไขมัน แต่หากจะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการอุปโภคบริโภคของมนุษย์ต้องผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์มากยิ่งขึ้นก่อน กระบวนการผลิตกลีเซอรอลดิบมีรายละเอียดดังนี้

- อุตสาหกรรมการผลิตสบู่ (Soap-lye crude glycerol)

ในอุตสาหกรรมการผลิตสบู่จะใช้ไขมันหรือน้ำมันเป็นวัตถุดิบตั้งต้น มาผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นจึงให้ความร้อนโดยการผ่านไอน้ำลงไปเป็นเวลา 12 - 24 ชั่วโมง จากนั้นเติมโซเดียมคลอไรด์เพื่อแยกสบู่ออกจากสารละลาย โดยสบู่จะแยกชั้นอยู่ด้านบน ส่วนกลีเซอรอลจะอยู่ด้านล่างโดยรวมตัวอยู่กับน้ำเกลือและเบส จากนั้นสบู่จะถูกนำไปผสมกับน้ำหอมหรือสีแล้วทำให้เป็นก้อนเพื่อจำหน่าย ทั้งนี้จะได้กลีเซอรอลประมาณร้อยละ 80 เป็นผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้ (By-product) จากกระบวนการผลิตสบู่ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น เครื่องสำอาง พลาสติก และใช้เป็นสารให้รสหวานในอาหารหรือยา เป็นต้น

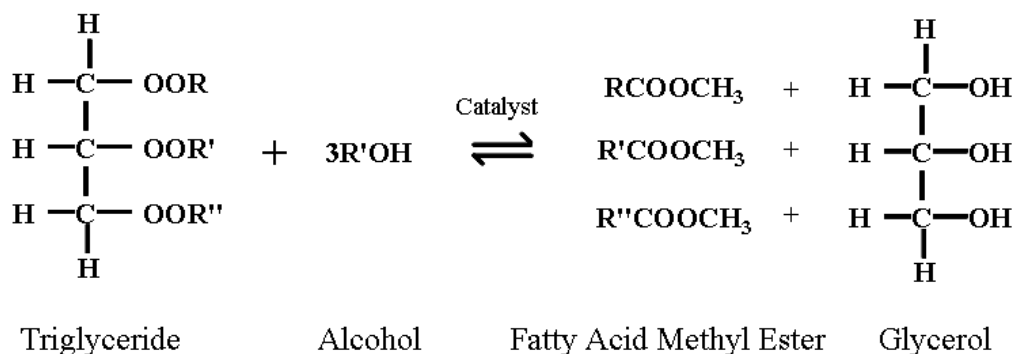
- อุตสาหกรรมการผลิตกรดไขมัน (Hydrolysis crude glycerol)

ส่วนใหญ่ของอุตสาหกรรมผลิตกรดไขมันจะเป็นกระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่องโดยกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ที่สภาวะความดันสูง ทำให้น้ำมันหรือไขมันถูกแยกด้วยน้ำได้เป็นกรดไขมันและกลีเซอรอล โดยพบว่ากลีเซอรอลดิบจะปนเปื้อนอยู่ประมาณร้อยละ 88-91 และส่วนที่เหลือเป็นเกลือของสารอินทรีย์ (Organic salt)

- อุตสาหกรรมการผลิตเอสเทอร์ (Fatty ester) หรือไบโอดีเซล

การผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (Transesterification) โดยมีไขมันหรือน้ำมัน (Triglyceride) เป็นสารตั้งต้น เข้าทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ (Methyl alcohol หรือ Ethyl alcohol) โดยมีสารเร่งปฏิกิริยาซึ่งนิยมใช้สารเบส เช่น

โซเดียมไฮดรอกไซด์ โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น (รูปที่ 2.2) ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือน้ำมัน ไขมัน ไอโอดีเซลและได้กลีเซอรอลดิบเป็นผลพลอยได้ ซึ่งจะพบว่ามีเกลือปนอยู่เล็กน้อยและมีสมบัติ โดยรวมคล้ายกับกลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการผลิตสบู่



รูปที่ 2.2 กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้ผลิตไบโอดีเซล

2.1.4 เทคโนโลยีการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์

เนื่องจากสารเจือปนตามที่ได้นำเสนอไปแล้วนั้นเป็นอุปสรรคต่อการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการอุปโภคบริโภค ซึ่งต้องการความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 97 ในขณะที่ความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลในตลาดอยู่ที่ประมาณร้อยละ 99.5 ทั้งนี้ในปัจจุบันกระบวนการทำกลีเซอรอลให้มีความบริสุทธิ์มากขึ้นยังมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนที่สูงประมาณ 400 ดอลลาร์สหรัฐต่อตันหรือประมาณ 1,200 บาทต่อตัน (Tyson และคณะ, 2004) ระดับความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลมีหลายประเภทเช่น ระดับ High gravity ระดับ The United States Pharmacopeia (USP) เป็นต้น ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของกลีเซอรอลที่มีใช้งานในปัจจุบัน อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมนิยมใช้ระดับความบริสุทธิ์เทียบเท่า USP

ในปัจจุบันเทคโนโลยีที่นิยมใช้ในการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ มี 2 วิธี คือ แบบทั่วไปและแบบแลกเปลี่ยนไอออน

วิธีการผลิตกลีเซอรอลบริสุทธิ์แบบทั่วไป (Conventional method)

กลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจะมีสารเจือปน เช่น เมทานอล ตัวเร่งปฏิกิริยา สบู่ ไขมัน น้ำมันบางส่วน และเอสเทอร์ ดังนั้นก่อนทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์จะต้องผ่านกระบวนการเตรียมกลีเซอรอลดิบ (Pretreatment) เสียก่อน โดยการใส่กรด-สารส้มหรือเฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric chloride) แล้วจึงผ่านกระบวนการระเหยน้ำออก (Evaporation) ถังกลั่น (Distillation) กำจัดกลิ่น (Deodorization) และกำจัดสี (Bleaching) ตามลำดับ

สารละลายกลีเซอรอลที่แยกออกมาจากน้ำมันไบโอดีเซล จะนำมาผ่านกระบวนการกำจัดสิ่งเจือปนออกโดยเริ่มที่กระบวนการทางเคมี ได้แก่ กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยเกลือ เพื่อกำจัดสิ่งเจือปน เช่น สบู่ โปรตีนที่สลายตัว กรดไขมัน หรือ เอสเทอร์ ฟูลเฟน และ เส้นใย จากนั้นทำตามกระบวนการทางกายภาพเพื่อกำจัดสิ่ง ได้แก่ การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์หรือแอกติเวทเคลย์ (Activated clay) เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนการเตรียม (Pretreatment) แล้วจึงนำกลีเซอรอลนั้นไปเข้ากระบวนการทำให้บริสุทธิ์ (Refining of glycerine) เทคโนโลยีที่ใช้ในกระบวนการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ ได้แก่ การแยกสารโดยการกลั่นลำดับส่วน (Distillation) แล้วจึงไปผ่านการฟอกขาวและการกำจัดกลิ่น (Bleaching and Deodorization)

วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-Exchange Resin)

เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ได้รับคามนิยมเนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อนและใช้พลังงานต่ำ เหมาะสำหรับกลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการผลิตกรดไขมันและจากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน คือสามารถใช้กับกลีเซอรอลที่มีเกลือและสบู่ปนอยู่ในปริมาณน้อย ดังนั้นถ้าในกรณีที่กลีเซอรอลดิบมีปริมาณเกลือสูง เช่น กลีเซอรอลที่มาจากกระบวนการผลิตสบู่ กลีเซอรอลดิบที่ได้จะต้องผ่านการกำจัดเกลือออกก่อน (Pretreatment)

กระบวนการทำให้บริสุทธิ์โดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนนั้น จะทำงานโดยใช้เรซินที่มีสมบัติเป็นเรซินไอออนประจุบวกชนิดแก่ (Strong cation resins) ไอออนที่เป็นประจุลบชนิดอ่อน (Weak anion resins) และไอออนประจุผสม (Strong cation-anionic resins) เปรียบเสมือนวัสดุที่ใช้กรอง (Prefiltered material) คือตัวกลาง กระบวนการนี้จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อสารที่ป้อนเข้ามีกลีเซอรอลประมาณร้อยละ 25 - 40

กลีเซอรอลที่ผ่านกระบวนการกำจัดสิ่งเจือปนด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน จะถูกป้อนเข้าสู่ระบบการระเหยน้ำออกเพื่อกำจัดน้ำโดยใช้ Multiple-effect evaporator เพื่อผลิตกลีเซอรอลที่มีความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 99 หลังจากนั้นจึงไปผ่านกระบวนการกำจัดสี (Decolorization) โดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เพื่อให้ได้กลีเซอรอลที่มีความบริสุทธิ์ตามต้องการ

2.1.5 ปริมาณกลีเซอรอลดิบภายในประเทศ

จากนโยบายของรัฐบาลที่สนับสนุนให้มีการใช้ไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น และความต้องการของผู้บริโภคที่มากขึ้น ส่งผลให้เกิดกลีเซอรอลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมหรือผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ทั้งนี้การผลิตในระดับอุตสาหกรรมนิยมใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันดังแสดงในรูปที่ 2.2 ปริมาณของกลีเซอรอลที่เกิดจากกระบวนการผลิตคิดเป็นร้อยละ 10 ของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ ดังนั้นในปี พ.ศ. 2555 คาดว่าจะมี

ความต้องการใช้ไบโอดีเซลถึง 8.5 ล้านลิตรต่อวัน แสดงให้เห็นว่าจะมีกลีเซอรอลเกิดขึ้นวันละประมาณ 900,000 ลิตรต่อวัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การคาดการณ์ปริมาณความต้องการใช้กลีเซอรอลภายในประเทศ

ปี พ.ศ.	2548	2549	2550	2551	2552	2553	2554	2555
ไบโอดีเซล	0.01	0.02	0.36	0.46	0.76	1.76	3.96	8.5
กลีเซอรอล	0.001	0.002	0.040	0.050	0.080	0.170	0.400	0.850

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน 2549 (หน่วย: ล้านลิตร/วัน)

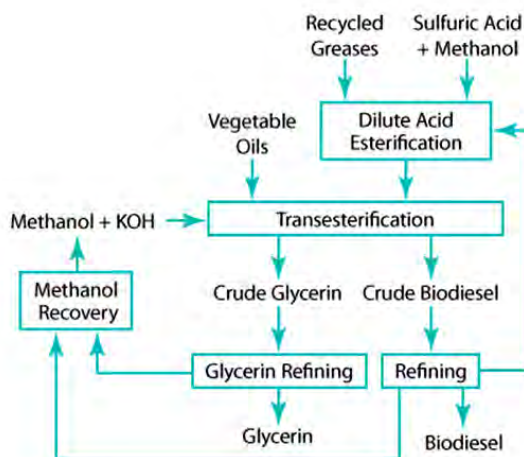
2.1.6 การใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ (ณัฐกานต์ และณรงค์ฤทธิ์, 2548)

จากลักษณะสมบัติของกลีเซอรอลที่สามารถดูดซับความชื้นจากอากาศได้ดี จึงถูกนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความนุ่มและความเป็นครีม ในทางการค้ามีการใช้กลีเซอรอลเป็นสารรักษาความชุ่มชื้น เป็นตัวเพิ่มสภาพพลาสติกชนิดที่ช่วยเก็บรักษาความอ่อนนุ่มและความเหนียว นอกจากนี้กลีเซอรอลยังถูกใช้ในผลิตภัณฑ์ในช่องปาก เช่น ยาสีฟัน เนื่องจากมีสมบัติในการเป็นดูดความชื้นและการระเหยต่ำจึงถูกใช้เพื่อป้องกันไม่ให้ยาสีฟันแข็งในหลอด กลีเซอรอลส่วนใหญ่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่มถูกใช้เป็นตัวทำละลายและเป็นสารดูดความชื้น โดยโมโนกลีเซอไรต์ที่ได้จากกลีเซอรอลถูกใช้เป็นสารอิมัลชันและสารเพิ่มความคงตัวในผลิตภัณฑ์ประเภท มายองเนส น้ำสลัด และลูกกวาด ยิ่งไปกว่านั้นในผลิตภัณฑ์ยาสูบและบุหรี่จะใช้กลีเซอรอลในการรักษาความชื้นให้กับใบยาสูบและใช้เป็นส่วนผสมในไส้กรอง ในอุตสาหกรรมยาใช้กลีเซอรอลเป็นสารให้ความหวานและเป็นสารให้ความนุ่ม ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางใช้เป็นสารอิมัลชัน

2.1.7 กลีเซอรอลจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลในระดับอุตสาหกรรมนิยมใช้กระบวนการที่เรียกว่า ทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน และร้อยละ 10 ของน้ำมันพืชหรือน้ำมันที่ใช้เป็นสารตั้งต้นของกระบวนการนี้จะถูกเปลี่ยนเป็นผลพลอยได้ (By product) คือกลีเซอรอล (Knothe et al., 2005) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งจะมีเกลือเจือปนอยู่เล็กน้อย และส่วนใหญ่จะถูกนำไปเป็นเชื้อเพลิง บางส่วนถูกขายต่อเพื่อใช้เป็นสารหล่อลื่นในโรงงาน หรือถูกนำไปผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์เพื่อนำไปเป็นวัตถุดิบให้กับอุตสาหกรรมยา อาหาร และเครื่องสำอาง ทั้งนี้ราคาซื้อขายขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของ

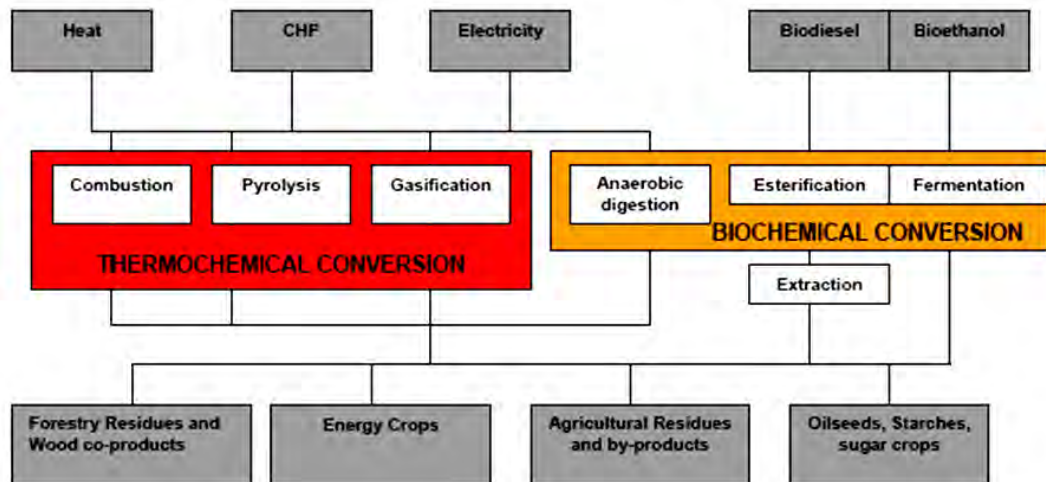
กลีเซอรอล นอกจากนี้สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยยังได้ทำงานวิจัยเพื่อเพิ่มมูลค่ากลีเซอรอลดิบจากกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล (พิสมัย เจนวนิชปัญจกุล, 2550) โดยกระบวนการชีวภาพคือใช้แบคทีเรีย *Enterobact radicincitans* เพราะเลี้ยงในอาหารที่มีกลีเซอรอลดิบอยู่ ทำให้ได้ 1,3-propanediol ซึ่งสามารถนำไปผลิตพลาสติกย่อยสลายได้และสามารถประยุกต์ใช้ในรูปแผ่นฟิล์มหรือเคลือบบนบรรจุภัณฑ์ได้



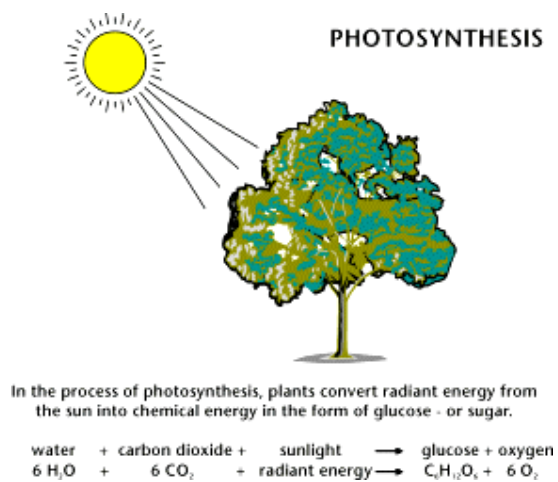
รูปที่ 2.3 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

2.2 กระบวนการแปรสภาพทางความร้อน (Thermal conversion)

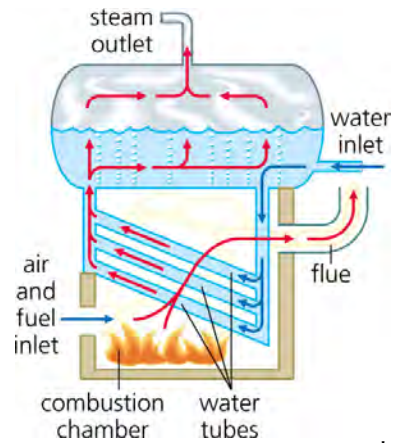
กระบวนการแปรสภาพทางความร้อนเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีพลังงานชีวมวล (รูปที่ 2.4) ซึ่งประกอบด้วย การเผาไหม้ (Combustion) การไพโรไลซิส (Pyrolysis) และการผลิตแก๊สหรือแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) โดยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากพลังงานเคมีที่ถูกกักเก็บไว้ในชีวมวลตามธรรมชาติ (รูปที่ 2.5) เช่น สารจำพวกเซลลูโลสในต้นไม้และพืช เป็นต้น ให้เป็นพลังงานรูปอื่น เช่น พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้โดยตรง (Direct combustion) เพื่อผลิตไอน้ำที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม (รูปที่ 2.6) พลังงานเชื้อเพลิงเพื่อใช้กับเครื่องยนต์ที่สันดาปภายใน หรือกระทั่งการใช้เพื่อเป็นวัตถุดิบพื้นฐานของอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมผลิตเอทานอล โดยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.7



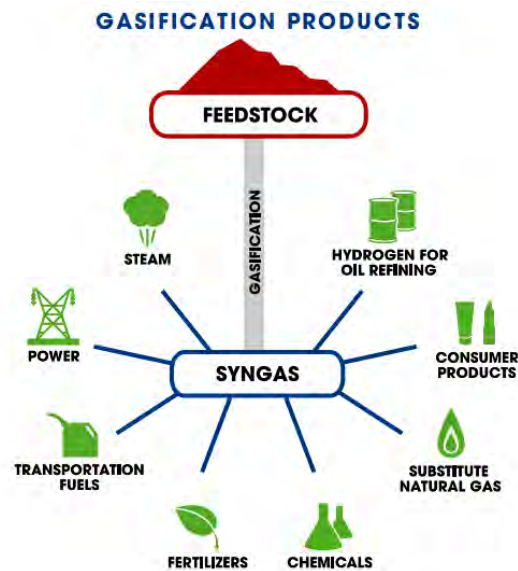
รูปที่ 2.4 เทคโนโลยีพลังงานชีวมวล (Scottish Government Research, 2006)



รูปที่ 2.5 พลังงานเคมีในชีวมวลได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสง
(Energy Information Administration, Annual Energy Review 2006)



รูปที่ 2.6 การใช้พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้เพื่อผลิตไอน้ำ



รูปที่ 2.7 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น (Gasification Technologies Council, 2008)

2.2.1 ปฏิบัติการเผาไหม้พื้นฐาน

ปฏิบัติการเผาไหม้พื้นฐานเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างคาร์บอนกับอากาศและหรือไอน้ำ ใช้เพื่ออธิบายกระบวนการเผาไหม้ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ปฏิกิริยาการเผาไหม้พื้นฐาน (สุพัตรา ชีวชนาคุปต์, 2546)

หมายเลข	ปฏิกิริยา	ลักษณะ ปฏิกิริยา	ΔH		
			Cal/gmole	kJ/kgmole	Btu/lbmole
2.1	$C + O_2 \longrightarrow CO_2$	-	94,410	408,632	169,938
2.2	$C + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow CO$	-	27,056	123,092	48,701
2.3	$C + CO_2 \longrightarrow 2CO$	+	40,298	162,448	72,536
2.4	$CO + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow CO_2$	-	67,355	285,540	121,239
2.5	$C + H_2O \longrightarrow CO + H_2$	+	32,454	118,905	58,917
2.6	$C + 2H_2O \longrightarrow CO_2 + 2H_2$	+	24,610	75,362	44,298
2.7	$CO + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2$	-	7,844	43,543	14,119

หมายเหตุ

1. ปฏิกิริยาทดลองที่สภาวะ 1,200 องศาเซลวิน (1,700 องศาฟาเรนไฮต์ 927 °C)

ความดัน 1 บรรยากาศ คาร์บอนที่ใช้เป็นมาตรฐานอยู่ในรูปแกรไฟต์

2. เครื่องหมายลบ หมายถึง ปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic Reaction)

เครื่องหมายบวก หมายถึง ปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic Reaction)

จากตารางที่ 2.3 อธิบายเพิ่มเติมได้ดังนี้

ปฏิกิริยาที่ 2.1 เป็นการเผาไหม้คาร์บอนในบริเวณที่มีคาร์บอนมากเกินไป เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์

ปฏิกิริยาที่ 2.2 เป็นการเผาไหม้คาร์บอนที่กำลังลุกแดงภายใต้ภาวะที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอ เกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์

ปฏิกิริยาที่ 2.3 เรียกว่า “Boudouard Reaction” เป็นปฏิกิริยาพื้นฐานของการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่มากเกินไป (Excess carbon) ในอนุภาคของแข็งเกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ ทั้งนี้มีการศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยา (Reactivity) ของเชื้อเพลิงต่างๆ พบว่าอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับธรรมชาติของเชื้อเพลิงและลักษณะเฉพาะของผิว (Surface characteristic) ของเชื้อเพลิง อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 950 °C เนื่องจากมีการแตกตัวของคาร์บอนเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของเชื้อเพลิงเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่านี้

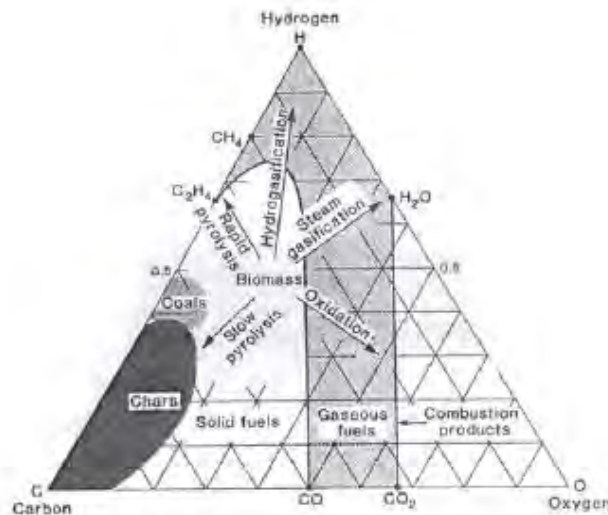
ปฏิกิริยาที่ 2.4 เป็นการรวมตัวกันของคาร์บอนมอนอกไซด์กับออกซิเจนที่เหลืออยู่ได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์

ปฏิกิริยาที่ 2.5 และ 2.6 เป็นการป้อนไอน้ำเข้าไปพร้อมกับอากาศ เกิดการแตกตัวของไอน้ำเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอน ปฏิกิริยาที่ 3.5 เราเรียกว่า Water Gasification

ปฏิกิริยาที่ 2.7 เป็นปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์กับไอน้ำ ได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮโดรเจน ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Water Gas หรือ Shift Reaction ปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ (Reversible) (Zhang และคณะ, 2005)

ความร้อนที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาคือความร้อนนั้นเป็นได้ทั้งความร้อนที่ให้โดยตรงและความร้อนที่ให้โดยอ้อม ทั้งนี้ในกรณีที่เป็นความร้อนที่ให้กับระบบโดยตรงโดยมีสารออกซิแดนท์ (Oxidant) หรือออกซิไดซิงแก๊สเป็นอากาศหรือออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับชีวมวลและเกิดการเผาไหม้ (Combustion) ทำให้มีการคายความร้อนออกมา ซึ่งร้อยละ 5 – 15 ของความร้อนนี้ถูกนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ในระบบของการผลิตแก๊สแบบให้ความร้อนโดยตรงนี้อุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ขึ้นกับอัตราการป้อนสารออกซิแดนท์ สำหรับการเผาไหม้หรือเซรามิกร้อนเป็นตัวกลาง และใช้อากาศหรือไอน้ำเป็นตัวทำให้เกิดการฟลูอิดไดซ์ เมื่อมีการป้อนเชื้อเพลิงเข้าไปภายในเตาปฏิกรณ์ แก๊สหรือเซรามิกที่ร้อนจัดจะเป็นตัวให้ความร้อนกับเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อทำให้เกิดการไพโรไลซิสต่อไป

อย่างไรก็ตามการแปรสภาพทางความร้อนเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สเชื้อเพลิงดังกล่าวแบ่งเป็นแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิส ดังแสดงในกราฟสามเหลี่ยมตามรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงโดยใช้ความร้อนของชีวมวล (Probstein and Hicks, 1982)

- Slow pyrolysis ให้ปริมาณถ่านชาร์อยู่ที่มุมของคาร์บอนขณะที่ rapid hydrolysis ให้ของเหลว และแก๊สมากกว่า และ hydrolysis ให้ปริมาณผลได้แก๊สสูงมาก และให้ของเหลวคุณภาพดี
- กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันให้แก๊สที่มีค่าความร้อนสูงประกอบไปด้วย CO , CH_4 และ H_2 (Gañan และคณะ, 2005)

- Combustion ต้องการ O_2 ได้ผลิตภัณฑ์ CO_2 , H_2O สำหรับชีวมวล กระบวนการและหลักการที่ใช้กับถ่านหินทั้งแก๊สซิฟิเคชัน และไพโรไลซิสสามารถใช้กับชีวมวล คุณสมบัติของสารชีวมวลที่แตกต่างกับถ่านหินในแง่เชื้อเพลิง คือ ชีวมวลจะให้ปริมาณความชื้น ออกซิเจน และไฮโดรเจนสูง ส่วนปริมาณเถ้า ซัลเฟอร์ และ ไนโตรเจนมีปริมาณต่ำ นั่นคือทำให้ปริมาณผลได้ของแก๊สและของเหลวสูง ส่วนปริมาณผลได้ซาร์ต่ำ แต่เนื่องจากมีปริมาณออกซิเจนสูงจึงต้องใช้ไฮโดรเจนมากในการเกิดน้ำที่อยู่ในเนื้อไม้ ดังนั้นจึงไม่ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนสูงตามต้องการ แต่ข้อดีของชีวมวล คือ มีเปอร์เซ็นต์ซัลเฟอร์ต่ำและให้ซาร์ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (Ryu และคณะ, 2006)

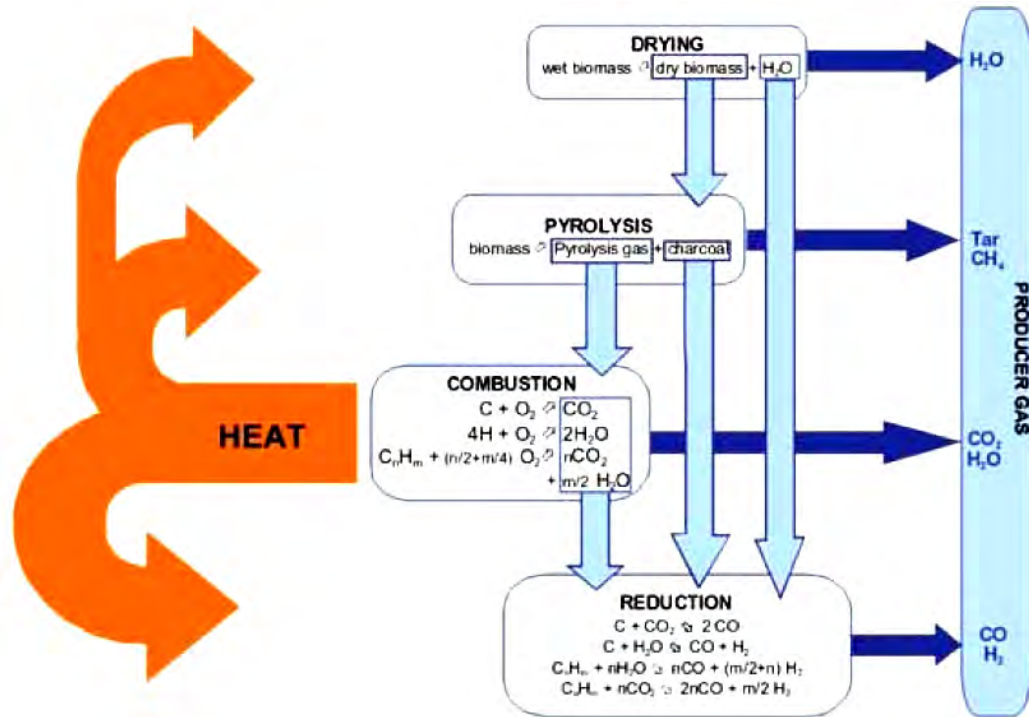
2.2.2 ทฤษฎีกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) และไพโรไลซิส (Pyrolysis)

2.2.2.1 ความหมายของแก๊สซิฟิเคชัน

แก๊สซิฟิเคชันหรือการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เป็นกระบวนการปรับเปลี่ยนสารใดๆ หรือชีวมวลจากสถานะของแข็งหรือของเหลวให้กลายเป็นแก๊ส ในความหมายที่กว้างกว่านั้นคือ การให้ความร้อนเพื่อระเหยซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีด้วย (Probstein and Hicks, 1982) แก๊สที่ได้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง เช่น ไฮโดรเจน (H_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และมีเทน (CH_4) เป็นต้น โดยมีตัวกลางของระบบนำความร้อนเข้าไปสลายพันธะเคมีของชีวมวลเหล่านั้นเรียกว่า ออกซิไดซิงแก๊ส ได้แก่ ไอน้ำ ออกซิเจน และอากาศ ทั้งนี้ในการเกิดปฏิกิริยาจะรวมขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด ตั้งแต่การเกิดการสลายตัวของวัตถุดิบภายใต้ความร้อนในขั้นต้น (Pyrolysis) ขึ้นตอนต่อๆ มาในการสร้างแก๊สจนกระทั่งถึงการปรับปรุงคุณภาพแก๊ส

2.2.2.2 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Watanabe และ Otaka, 2006)

ขั้นตอนสำคัญของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ได้แก่ การไพโรไลซิสคาร์บอนตามด้วยการแก๊สซิฟิเคชันถ่านซาร์ ซึ่งในบางกรณีอาจเกิดการแก๊สซิฟิเคชันน้ำมันดินได้อีกด้วย อุณหภูมิของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันอยู่ในช่วง 800 - 1000 °C ภายใต้ความดันตั้งแต่ระดับบรรยากาศขึ้นไป ระหว่างการแก๊สซิฟิเคชันจะเกิดปฏิกิริยาที่หลากหลายขึ้นพร้อมกันอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปจากเชื้อเพลิงแข็งไปเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส ทั้งนี้แต่ละลำดับขั้น การเปลี่ยนแปลงในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันนอกจากมีปฏิกิริยาที่สำคัญๆ แล้ว ยังมีแก๊สผลิตภัณฑ์ที่น่าสนใจเกิดขึ้นด้วย ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลำดับการเปลี่ยนแปลงของการแก๊สซิฟิเคชันโดยทั่วไป

(BTG Biomass Technology Group, 2007)

1) ไล่ความชื้น (Drying) เริ่มต้นที่ชีวมวลได้รับความร้อนจากระบบในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจนมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้น้ำซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญที่พบโดยทั่วไปในชีวมวลระเหยและกลายเป็นไอน้ำเมื่ออุณหภูมิของระบบสูงขึ้นเกินจุดเดือดของน้ำ ในขั้นตอนนี้จึงเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันซึ่งเป็นการทำให้ได้ชีวมวลที่แห้ง

2) ไพโรไลซิส (Pyrolysis) เมื่อชีวมวลถูกทำให้แห้งแล้วจะถูกนำเข้าสู่ขั้นตอนการผลิตแก๊สขั้นแรกโดยปฏิกิริยาไพโรไลซิส ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนเพื่อนำไปใช้ในการสลายองค์ประกอบต่างๆ ในชีวมวลภายใต้สภาวะที่มีอากาศหรือออกซิเจนอยู่น้อยมาก อย่างไรก็ตามระยะเวลาที่ใช้ในขั้นตอนนี้ถือว่าน้อยมาก ทำให้องค์ประกอบต่างๆ ในชีวมวล เช่น ลิกนิน เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส รวมถึงองค์ประกอบที่ระเหยได้อื่นๆ เกิดการสลายตัวและระเหยกลายเป็นแก๊ส เช่น CH₄, CO₂, ไอน้ำ, น้ำมันดิน, ถ่านชาร์ และโพลีไซคลิก อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAH) ส่วนของแข็งที่เหลืออยู่หลังจากการสลายตัวจะเป็นพวกคาร์บอน (Coke) และเถ้า ในช่วงแรกของปฏิกิริยาไพโรไลซิส แก๊สและไอน้ำจะถูกปล่อยออกมาตอนที่อุณหภูมิประมาณ 230 °C แต่การสลายตัวอย่างแท้จริงเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 400 - 800 °C ส่งผลให้สารที่ระเหยได้ถูกปล่อยมากขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น และเริ่มคงที่ที่อุณหภูมิ 800 °C ขึ้นไป ในขั้นตอนนี้ระดับอุณหภูมิเป็นปัจจัยกำหนดลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่

เกิดขึ้น กล่าวคือปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นของเหลวโดยส่วนใหญ่ ในทางกลับกันจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สโดยส่วนใหญ่ที่ระดับอุณหภูมิสูง จากความซับซ้อนของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทำให้บริเวณที่เกิดปฏิกิริยาจึงต่างกันออกไป ได้แก่ บริเวณพื้นที่ผิวโดยแก๊สบางตัวเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่ผิวของถ่านหินหรือแก๊สบางตัวอาจถูกดูด (Adsorption) อยู่ที่ผิวของถ่านชาร์ และทำปฏิกิริยากันเมื่อได้ผลผลิตจะคลายตัวออกจากผิวของผงถ่าน หรือบางปฏิกิริยาเกิดในสภาพแก๊สโดยตรง ดังสมการที่ 2.8

3) การเผาไหม้ (Combustion หรือ Oxidation) เป็นขั้นตอนหนึ่งของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยที่ชีวมวล ถ่านชาร์ และแก๊สผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนไพโรไลซิสจะเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในสภาวะที่ระบบมีออกซิเจนเพียงพอ รวมถึงการเข้าทำปฏิกิริยากับไอน้ำในกรณีที่มีการเติมไอน้ำเข้าไปในช่วงการเผาไหม้เพื่อเพิ่มสัดส่วนของ H และ C ในระบบ ช่วงการเผาไหม้นี้เป็นปฏิกิริยาที่ให้ความร้อนแก่ปฏิกิริยาอื่นที่เกิดขึ้นในระบบ เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาที่คายความร้อน ทั้งนี้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ในขั้นตอนนี้มีความใกล้เคียงกับปฏิกิริยาการเผาไหม้พื้นฐานที่เกิดขึ้นระหว่างคาร์บอนกับอากาศ หรือไอน้ำ ดังสมการต่อไปนี้

- Oxy-gasification สมการที่ 2.1, 2.3, 2.4, 2.9, 2.10, 2.11, 2.12 และ 2.13
- Steam gasification สมการที่ 2.5

สมการที่	ปฏิกิริยา
2.8	$C_mH_nO_o \longrightarrow aC(s) + bH_2O + cCH_4 + dCO + \text{Char} + H_2O + \text{Light hydrocarbon Tar}$
2.9	$C_mH_n + (m/2 + n/4) O_2 \longrightarrow mCO_2 + n/2H_2O$
2.10	$C_mH_n + m/2 O_2 \longrightarrow mCO + n/2H_2$
2.11	$\text{Volatile matter} + O_2 \longrightarrow CO_2 + H_2O$
2.12	$CH_4 + 1/2 O_2 \longleftrightarrow CO + 2H_2$
2.13	$H_2 + 1/2 O_2 \longrightarrow H_2O$
2.14	$C + 2H_2 \longrightarrow CH_4$
2.15	$CO_2 + 4H_2 \longleftrightarrow CH_4 + 2 H_2O$
2.16	$C_mH_n + m H_2O \longrightarrow mCO + (n/2 + m) H_2$
2.17	$C + H_2O \longleftrightarrow 1/2O_2 + 1/2 CH_4$
2.18	$CH_4 + H_2O \longleftrightarrow CO + 3H_2$
2.19	$CO + 3H_2 \longleftrightarrow CH_4 + H_2O$

4) แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification หรือ Reduction) ประกอบด้วยปฏิกิริยาที่ หลากหลายขึ้นอยู่กับสารหรือแก๊ส (Gasification agent) ที่ใส่เข้าไปในขั้นนี้เช่น O_2 อากาศ ไอน้ำ CO_2 หรือ H_2 โดยทั่วไปจะมีอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาตั้งแต่ $700\text{ }^{\circ}C$ ขึ้นไป ซึ่งเป็น การเกิดปฏิกิริยาระหว่างถ่านชาร์หรือโค้กกับ Gasification agent โดยใช้ความร้อนใน การเกิดปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดการสลายตัวไปเป็นแก๊ส เชื้อเพลิงหลักๆ เช่น H_2 , CO และ CO_2 ประกอบด้วยปฏิกิริยาเคมีที่สำคัญ ได้แก่

- Oxygenolysis คือการทำปฏิกิริยากับแก๊ส O_2 เพื่อเกิด CO และ CO_2 ใน บรรยากาศที่มีแก๊ส O_2 จำกัด เพราะอากาศที่ป้อนเข้าจากด้านล่างถูกใช้ในระหว่างการเผาไหม้ ดังสมการ ที่ 2.2 และ 2.3

- Hydrogenolysis คือปฏิกิริยากับ H_2 เพื่อให้เกิด CH_4 หรือปฏิกิริยาการเติม H_2 ดังสมการที่ 2.19, 2.14 และ 2.15

- Hydrolysis สมการที่ 2.16

- Water gas สมการที่ 2.5 และ 2.6

- Water-gas shift สมการที่ 2.7

- Steam reforming สมการที่ 2.18

2.2.2.3 ระบบของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (เบญจมาศ ปุຍอ็อก, 2547)

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบ ดังนี้

1) ไฮโดรแก๊สซิฟิเคชัน (Hydro gasification)

ใช้แก๊ส H_2 ทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงแข็ง ใช้ความร้อนและความดันสูงมาก ความดันในเตาสูงถึง 200 บรรยากาศ แก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็น CH_4 ค่าความร้อนของ แก๊สที่ได้เทียบเท่าแก๊สสังเคราะห์ (SNG) โดยผ่านกระบวนการเมทานชัน (Methanation) ที่ อุณหภูมิต่ำ ทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่าง CO และ H_2 เป็นแก๊ส CH_4 และน้ำ ดังปฏิกิริยาที่ 2.19

2) สตีมน้ำแก๊สซิฟิเคชัน (Steam gasification) หรือการแก๊สซิฟิเคชันแบบใช้ไอน้ำ เป็นการใช้น้ำทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงแข็ง อุณหภูมิและความดันในเตา สูงมากและต้องใช้ความร้อนจากภายนอกระบบเข้ามาช่วยให้อุณหภูมิจึงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน แก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้นประกอบด้วยแก๊ส CO , H_2 , CH_4 , CO_2 และ ไอน้ำ แก๊สสังเคราะห์ที่ได้มีค่าความร้อนประมาณ 3.3-3.5 เมกกะจูล ต่อลูกบาศก์เมตร (MJ/m^3) หรือเรียกว่าการผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่มีค่าความร้อนต่ำ

3) ออกซิเดทีฟแก๊สซิฟิเคชัน (Oxidative gasification)

ใช้แก๊สออกซิเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยา ได้มาจากการผ่านอากาศเข้าสู่เตาหรือ อาจใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ก็ได้ แก๊สสังเคราะห์ที่เกิดจากการใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์มี

ค่าความร้อนสูงกว่าแก๊สที่เกิดจากการใช้อากาศ เนื่องจากไม่มีแก๊สไนโตรเจนจะทำให้ค่าความร้อนสูงขึ้นองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ได้แก่ CO , H_2 , CH_4 , CO_2 และไอน้ำ การผลิตแก๊สสังเคราะห์วิธีนี้จะให้ค่าความร้อนประมาณ 9.3 - 20.5 เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร หรือเรียกว่าการผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่มีค่าความร้อนปานกลาง

2.2.2.4 ประเภทของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

ประเภทของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันอาจแบ่งตามลักษณะการให้ความร้อน หรือ ชนิดของตัวกลางในการแก๊สซิฟาย (Gasifying medium) เช่น ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งถือเป็นตัวแปรอิสระ (Independent characteristic) หรือแบ่งตามปฏิกิริยา อุณหภูมิ คุณสมบัติแก๊ส หรือกากของแข็งที่เหลือซึ่งจัดว่าเป็นตัวแปรตาม (Dependent characteristic) ดังตารางที่ 2.4

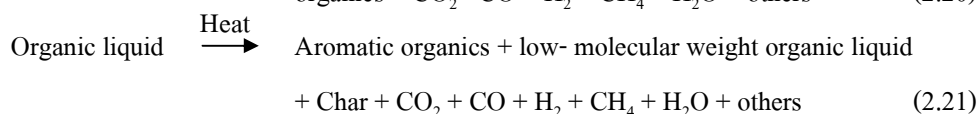
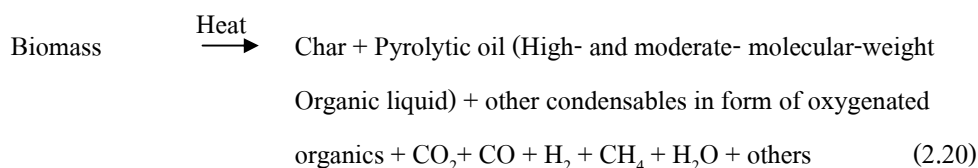
ตารางที่ 2.4 ลักษณะที่สำคัญของเตาแก๊สซิฟาย (สุพัตรา ชีวธนาคุปต์, 2546)

ตัวแปรอิสระ	ตัวแปรตาม
1. วิธีการให้ความร้อน (Method of supplying heat) <ul style="list-style-type: none"> - ทางตรง (Direct) - ทางอ้อม (Indirect) 	1. อุณหภูมิของปฏิกิริยา (Reaction Temperature) <ul style="list-style-type: none"> - สูง (High) - ปานกลาง (Medium) - ต่ำ (Low)
2. ตัวกลางในการแก๊สซิฟาย (Gasifying medium) <ul style="list-style-type: none"> - ไอน้ำกับอากาศหรือออกซิเจน - (Steam with air or O_2) - อากาศ (Air) - ไฮโดรเจนอย่างเดียวหรือกับไอน้ำ - (H_2 with or without steam) - ไอน้ำกับตัวเร่งปฏิกิริยา - (steam with catalyst) 	2. คุณสมบัติของแก๊สดิบที่ได้ (Raw gas properties) <ul style="list-style-type: none"> - ส่วนประกอบ (Composition) - อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ (H_2/CO ratio) - ปริมาณของน้ำมันดิบและน้ำมัน - (Tar and oil component) - ค่าความร้อน (CV)
3. ชนิดของเตาปฏิกิริยา (Reactor type) <ul style="list-style-type: none"> - Moving packed bed - Fluidized bed - Entrained flow - Molten media 	3. ของแข็งส่วนที่เหลือ (Solid residue) <ul style="list-style-type: none"> - ขี้เถ้า (Ash) - สแลก (Slag) - คาร์บอนที่ยังไม่เปลี่ยนรูป (Unconverted carbon)

2.2.2.5 ความหมายของกระบวนการไพโรไลซิส (สินีนาฏ รอดจิ้น, 2547)

ไพโรไลซิสหรือการกลั่นสลาย (Destructive distillation) เป็นกระบวนการสลายตัวทางความร้อน (Thermal degradation) ที่ไม่สมบูรณ์ในภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (ไม่มีการเติมไอน้ำ ไฮโดรเจน หรือคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์) ที่มีการถ่ายเทความร้อนโดยทางอ้อม ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของแข็งคือถ่านชาร์ ของเหลวที่ควบแน่นได้ ทาร์ และแก๊ส ปฏิกิริยาไพโรไลซิสต้องการความร้อนทั้งทางตรงจากการออกซิเดชันเพียงบางส่วน หรือจากปฏิกิริยาอื่นๆ ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ และทางอ้อม ซึ่งในปัจจุบันการสลายตัวทางความร้อนในภาวะที่มีออกซิเจนน้อยหรือในที่มีการถ่ายเทความร้อนให้เกิดการไพโรไลซิสโดยตรง จากการเผาไหม้บางส่วนของถ่านชาร์และแก๊ส เรียกได้ว่าเป็นกระบวนการไพโรไลซิส

เมื่อชีวมวลเกิดการสลายตัวทางความร้อนจะเกิดอนุกรมของปฏิกิริยาต่างๆ ได้แก่แก๊สที่มีพลังงานปานกลาง น้ำมันที่มีองค์ประกอบซับซ้อน และถ่านชาร์ ซึ่งปฏิกิริยาของกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวลแสดงได้ดังสมการที่ 2.20 และ 2.21



การไพโรไลซิสแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ การไพโรไลซิสแบบช้าและแบบเร็ว การไพโรไลซิสแบบช้าจะเกิดสมดุลในบริเวณช่วงแคบ โดยอัตราการให้ความร้อนจะช้าพอที่จะทำให้เกิดความสมดุลตามอุณหภูมิ ในกรณีนี้ปริมาณและการกระจายของผลิตภัณฑ์จะขึ้นอยู่กับแนวของอุณหภูมิเดิม (Temperature history) ส่วนการไพโรไลซิสแบบรวดเร็วจะไม่คำนึงถึงปฏิกิริยาที่เกิดในช่วงการให้ความร้อน แต่การไพโรไลซิสจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ของช่วงอุณหภูมิสุดท้าย

2.2.2.6 ผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ต่อการไพโรไลซิส (สินีนาฏ รอดจิ้น, 2547)

การไพโรไลซิสส่วนใหญ่จะสนใจถึงอัตราและปริมาณของสารระเหยที่ได้ การกระจายของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ รวมถึงภาวะในการทดลอง โดยตัวแปรทางเคมีที่สำคัญคือ ธาตุองค์ประกอบของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในชีวมวลที่มีสมบัติแตกต่างกันไป นอกจากนี้ตัวแปรพื้นฐานทางกายภาพที่สำคัญได้แก่ อุณหภูมิ เวลา อัตราการให้ความร้อน ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะมีผลกระทบต่อการไพโรไลซิสดังจะอธิบายต่อไปนี้ (ชูศักดิ์ โทกะนุทรานนท์, 2536)

- องค์ประกอบของชีวมวล

ชีวมวลเป็นวัสดุซับซ้อนไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะมีโครงสร้างและองค์ประกอบแตกต่างกันไปตามส่วนต่าง ๆ และชนิดของพืชนั้น สารเหล่านี้แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติทางความร้อนและก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ต่างกันไป โดยที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 °C จะมีการแตกตัวของพอลิแซคคาไรด์ที่สายเชื่อมกลูโคสิดิก (Glucosidic linkage) ทำให้ได้น้ำมันทาร์ที่ประกอบด้วยอนุพันธ์ของแอนไฮโดรซูการ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และถ่านชาร์จำนวนเล็กน้อย ในขณะที่ลิกนินส่วนใหญ่จะควบแน่นเป็นถ่านชาร์และสารประกอบฟีนอลบางส่วน ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของชีวมวลจะเป็นสิ่งกีดขวางการใช้ประโยชน์ทางเคมี เนื่องจากสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแต่ละองค์ประกอบจะได้น้อย ซึ่งจะมีผลกระทบต่อปริมาณถ่านชาร์และเชื้อเพลิงอื่นๆ ที่ได้จาก การไพโรไลซิสโดยตรง

อุณหภูมิในการไพโรไลซิส

ช่วงอุณหภูมิของการไพโรไลซิสจะมีผลกระทบต่อทั้งปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้ โดยการไพโรไลซิสแบ่งได้เป็น 3 ชั้น คือ ชั้นแรกที่อุณหภูมิระหว่าง 200 – 300 °C จะมีการปลดปล่อยสารระเหยเล็กน้อย และแก๊สที่ประกอบด้วยออกไซด์ของคาร์บอนและน้ำเป็นส่วนใหญ่ ชั้นที่สอง อุณหภูมิระหว่าง 300 – 500 °C จะมีการสลายตัวที่ปล่อยสารระเหยออกมาประมาณสามในสี่ของสารระเหยทั้งหมด ชั้นที่สาม อุณหภูมิระหว่าง 500 – 800 °C จะมีการไล่แก๊สออกอีกเป็นครั้งที่สอง พร้อมกับมีการเปลี่ยนแปลงของถ่านชาร์ รวมไปถึงการปลดปล่อยแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวกไฮโดรเจน

อัตราการให้ความร้อน

ผลกระทบของอัตราการให้ความร้อนเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิส แต่เดิมภาวะในการให้ความร้อนถูกแบ่งได้ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 20 °C ต่อวินาที ซึ่งเป็นช่วงที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยออกอย่างรวดเร็ว ดังนั้นอัตราการให้ความร้อนต่ำจะถูกนิยามให้มีผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับหรือน้อยกว่าค่าที่กำหนด และโดยทั่ว ๆ ไปอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะมีผลต่างของอุณหภูมิมากกว่า 103 – 105 °C ต่อวินาที การไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความร้อนต่ำจะได้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นถ่านชาร์ ส่วนการไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความร้อนสูง เซลลูโลสจะเปลี่ยนไปเป็นแก๊สที่มีสัดส่วนของพวกโอเลฟินสูงเป็นส่วนใหญ่ และได้ถ่านชาร์จำนวนน้อยมาก

2.2.2.7 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส (ฉัตรชัย ธนศรีสุข, 2541)

เมื่อชีวมวลผ่านกระบวนการไพโรไลซิส จะมีการสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากการระเหยไปของน้ำและสารระเหยรวมทั้งแก๊สต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นด้วย องค์ประกอบของสารอินทรีย์และอนินทรีย์เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งด้านกายภาพและเคมี ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นผลรวมของการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูก

วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี และเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้มี 3 ประเภทคือ

ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง

ถ่านชาร์เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือผลิตสารเคมีอื่นได้อีก เช่น ถ่านกัมมันต์ แนฟทาลีน แอนทราซีน และสารประกอบไซยาโนเจน แต่ส่วนใหญ่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงไร้ควัน เพื่อใช้ในบ้านเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือกลางได้ดี เช่น เป็นเชื้อเพลิงให้หม้อไอน้ำ การเผาอิฐ การอบแห้ง ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โรงงานผลิตหินปูนและซีเมนต์ หรือใช้ในโรงงานถลุงเหล็กและทองแดง เพราะไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสภาพแวดล้อมจากกลิ่นหรือควันจากพวกสารระเหยและสารประกอบพวกไนโตรเจนและกำมะถัน

ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

ประกอบด้วยน้ำและสารประกอบที่ละลายน้ำ อีกส่วนหนึ่งจะเป็นน้ำมันหาร์ องค์ประกอบของน้ำมันหาร์เป็นสารประกอบที่ซับซ้อนของไฮโดรคาร์บอน ที่มีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นพวกวงแหวนแนฟทาลีนเชื่อมด้วยหมู่เอทิลีน โมเลกุลของน้ำมันหาร์มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนตั้งแต่ C5 – C6 ประกอบเป็นโครงสร้างของสารเคมีต่าง ๆ อาจมีมากกว่า 200 ชนิด แบ่งออกได้ตามอุณหภูมิที่ใช้ในการกลั่นเป็น 5 ส่วน คือ

- 1) น้ำมันเบา (light oil) ช่วงอุณหภูมิ <math>< 200\text{ }^{\circ}\text{C}</math> ได้แก่ เบนซิน เบนโซลดิบ โทลูอิน เอทิล เบนซีน ไซลีน
- 2) น้ำมันช่วงกลาง (middle oil) ช่วงอุณหภูมิ $200 - 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ได้แก่ ฟีนอล ไพรดีน
- 3) น้ำมันช่วงหนัก (heavy oil) ช่วงอุณหภูมิ $250 - 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ได้แก่ ไดเมทิล แนฟทาลีน
- 4) น้ำมันแอนทราซีน (anthracence) ช่วงอุณหภูมิ $300 - 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ได้แก่ ฟลูออรีน ฟีนแอนทีน
- 5) พิตช์ (pitch) ช่วงอุณหภูมิ $> 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ได้แก่ น้ำมันหนัก บางประเภทพวกไข (red wax) ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการกลั่น

ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

เป็นของผสมระหว่างแก๊สอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และแอมโมเนีย ส่วนแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ มีเทน อีเทน เอทิลีน เป็นต้น โดยแก๊สส่วนใหญ่จะเป็นแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้

เพื่อให้ความร้อนหรือการผลิตไฟฟ้า แก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้คือ คาร์บอนไดออกไซด์ ในโตรเจน ออกซิเจน และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน นอกจากนี้ยังมีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์และแอมโมเนีย ในปริมาณเล็กน้อย

2.2.3 ประเภทเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ผลิตแก๊ส

โดยทั่วไปเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ผลิตแก๊สสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ แก๊สซิฟายเออร์ ชนิดตัวกลางนิ่งและแก๊สซิฟายเออร์ชนิดฟลูอิดไคซ์เบด

2.2.3.1 แก๊สซิฟายเออร์ชนิดตัวกลางนิ่ง (Fixed Bed)

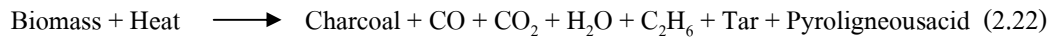
สำหรับแก๊สซิฟายเออร์ชนิดนี้ ภายในเตาจะมีตัวรองรับเชื้อเพลิงอยู่ จึงเปรียบเสมือนว่าเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นอยู่กับที่ตลอดเวลา เมื่อเปรียบเทียบกับการไหลของอากาศ หรือออกซิเจนที่ป้อนเข้าไป ภายในแก๊สซิฟายเออร์ชนิดตัวกลางนิ่งสามารถแบ่งออกเป็นบริเวณต่างๆ ได้ 4 บริเวณ โดยจะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ปฏิกริยา และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณ ซึ่งประกอบไปด้วย

- บริเวณเผาไหม้ (Combustion Zone หรือ Heat Zone) บริเวณนี้เป็นบริเวณที่เชื้อเพลิงชีวมวลมีการสัมผัสกับสารออกซิแดนท์ที่ถูกป้อนเข้าไปในเตา ซึ่งสารออกซิแดนท์นี้อาจเป็นอากาศ ออกซิเจน หรือออกซิเจนผสมกับไอน้ำ ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกันระหว่างออกซิเจนกับคาร์บอนและไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง ซึ่งทำให้ได้คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไอน้ำ (H_2O) ดังสมการที่ 2.1 และ 2.13 ทั้งนี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic Reaction) โดยมีอุณหภูมิในช่วง $900 - 1200^\circ\text{C}$ ความร้อนที่เกิดขึ้นในบริเวณเผาไหม้ นี้จะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาคูดความร้อนในบริเวณที่เกิดการรีดักชันและไพโรไลซิส โดยผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากปฏิกิริยาในบริเวณนี้คือความร้อนและเถ้า

- บริเวณที่เกิดการรีดักชัน (Reduction Zone) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ จะไหลผ่านคาร์บอนที่ร้อนและเกิด CO ดังสมการที่ 2.3 และ 2.5 โดยมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $600 - 700^\circ\text{C}$ Boudouard Reaction เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน (Endothermic Reaction) ในกรณีที่ต้องการเพิ่มปริมาณของ CO นั้น สามารถทำได้โดยการฉีดไอน้ำเข้าไป ซึ่งไอน้ำจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนได้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สไฮโดรเจน (H_2) เพิ่มขึ้น โดยเรียกปฏิกิริยานี้ว่า Water gas Reaction ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน และเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูงกว่า 800°C

- บริเวณที่เกิดการไพโรไลซิส (Pyrolysis Zone) เป็นบริเวณที่มีการสลายสารอินทรีย์ในเชื้อเพลิงชีวมวล โดยความร้อนที่ใช้ในบริเวณนี้เป็นความร้อนที่ได้จากบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ ซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $450 - 600^\circ\text{C}$ สารระเหยได้ที่ได้จากการสลายสารอินทรีย์นั้นจะ

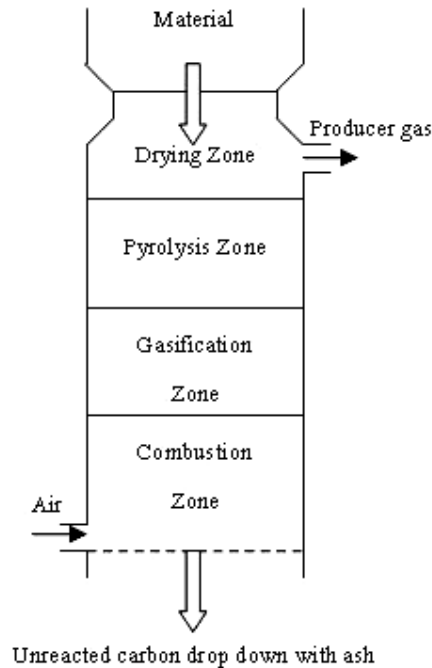
ประกอบไปด้วยเมทานอล กรดอะซิติก น้ำมันดิน (Tar) และแก๊สต่างๆ ซึ่งเป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้และเผาไหม้ไม่ได้ เช่น CO , CO_2 , H_2 , CH_4 นอกจากนี้ยังได้ของแข็งที่อยู่ในรูปของถ่าน ดังสมการที่ 2.22



- บริเวณไล่ความชื้นหรือบริเวณอบแห้ง (Drying Zone) ในบริเวณนี้อุณหภูมิไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของสารระเหยต่างๆ ความร้อนที่ได้จากบริเวณที่เกิดไพโรไลซิสจะระเหยความชื้นที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวลให้ออกมาในรูปของไอน้ำ โดยอุณหภูมิในบริเวณนี้มีค่าประมาณ $100 - 135^\circ\text{C}$

แก๊สซไฟเออร์ชนิดตัวกลางนี้แบ่งตามทิศทางการไหลของอากาศและเทียบกับการไหลเลื่อนของเชื้อเพลิงชีวมวลจะสามารถแบ่งได้ 3 ชนิด คือ

ก. แก๊สซไฟเออร์ชนิดแก๊สไหลขึ้น (Updraft Gasifiers) แก๊สซไฟเออร์ชนิดนี้เป็นแบบที่ง่ายและเก่าแก่ที่สุด โดยเชื้อเพลิงถูกป้อนเข้าสู่เตาทางด้านบน และมีตะแกรงรองรับชีวมวลอยู่ด้านล่างของเตา ในขณะที่เดียวกันอากาศหรือออกซิเจนจะถูกป้อนเข้าสู่เตาทางด้านล่างโดยผ่านตะแกรงขึ้นไปด้านบน ดังนั้นจึงสามารถเรียกเตาปฏิกรณ์ชนิดนี้ได้ชื่อหนึ่งตามทิศทางการไหลของอากาศหรือออกซิเจน ซึ่งมีทิศทางสวนกันกับการไหลของเชื้อเพลิงชีวมวลว่าเป็นแก๊สซไฟเออร์แบบ “Counter Current Flow Gasifier” แก๊สซไฟเออร์ชนิดอากาศไหลขึ้นนี้จะประกอบด้วย บริเวณของการเกิดปฏิกิริยาเรียงตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งเมื่อเรียงลำดับจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำจะสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้คือ บริเวณการเผาไหม้ บริเวณการเกิดรีดักชัน บริเวณการเกิดไพโรไลซิส และบริเวณการเกิดการอบแห้งหรือไล่ความชื้น โดยทั่วไปแก๊สซไฟเออร์ชนิดนี้จะถูกสร้างขึ้นเพื่อผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่เรียกว่า “แก๊สชีวมวล” เป็นผลิตภัณฑ์หลัก ส่วนถ่านและน้ำมันดินที่ได้เป็นผลิตภัณฑ์รอง

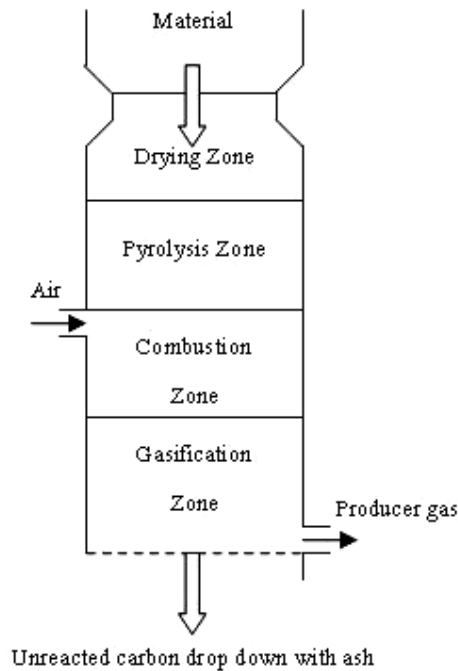


รูปที่ 2.10 แก๊สซิฟายเออร์ชนิดแก๊สไหลขึ้น (Updraft Gasifiers) (เบญจมาศ ปุຍ้ออก, 2547)

แก๊สซิฟายเออร์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงที่สุด เนื่องจากแก๊สร้อนที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านชั้นของเชื้อเพลิง ซึ่งความร้อนสัมผัสในแก๊สร้อนจะถูกถ่ายเทให้กับเชื้อเพลิง ทำให้อุณหภูมิของแก๊สที่ออกจากเตามีอุณหภูมิไม่สูงมากนัก โดยอุณหภูมิของแก๊สที่ออกจากเตาจะมีค่าประมาณ 100 - 300 °C ข้อดีของเตาชนิดนี้คือสามารถใช้กับชีวมวลที่มีความชื้นสูงๆ ได้ ซึ่งอาจสูงได้ถึงร้อยละ 50 และความดันตก (Pressure Drop) ในระบบไม่สูงมากนัก ในขณะที่ข้อเสียของเตาชนิดนี้คือแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะมีปริมาณของน้ำมันดินปนเป็นสูงมาก ประมาณร้อยละ 10 - 20 หรือประมาณ 50 mg/m³ ดังนั้นแก๊สซิฟายเออร์ชนิดนี้จึงจำเป็นต้องมีระบบในการทำความสะอาดแก๊สที่มีประสิทธิภาพสูงก่อนที่จะมีการนำแก๊สเชื้อเพลิงนี้ไปใช้ในการเดินเครื่องยนต์สันดาปภายใน ถ้าระบบทำความสะอาดแก๊สไม่มีประสิทธิภาพสูงเพียงพอจะก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันและสร้างความเสียหายให้แก่เครื่องยนต์ได้

ข. แก๊สซิฟายเออร์ชนิดแก๊สไหลลง (Downdraft Gasifiers) แก๊สซิฟายเออร์ชนิดนี้มีอีกชื่อหนึ่งว่า “Cocurrent-flow Gasifier” เนื่องจากทิศทางการไหลของอากาศหรือออกซิเจนที่ป้อนเข้าสู่เตาจะมีทิศทางเดียวกันกับการไหลของเชื้อเพลิง โดยเชื้อเพลิงชีวมวลจะถูกป้อนเข้าสู่ทางด้านบนของเตา ขณะที่อากาศจะถูกป้อนเข้าด้านข้างของเตาในบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะออกจากแก๊สซิฟายเออร์ทางด้านล่าง แก๊สซิฟายเออร์ชนิด

ไหลลงนี้ ส่วนล่างสุดจะเป็นบริเวณที่เกิดการรีดักชัน ถัดขึ้นมาคือบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ บริเวณที่เกิดการไพโรไลซิส และบริเวณรอบแห้งหรือไล่ความชื้น ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



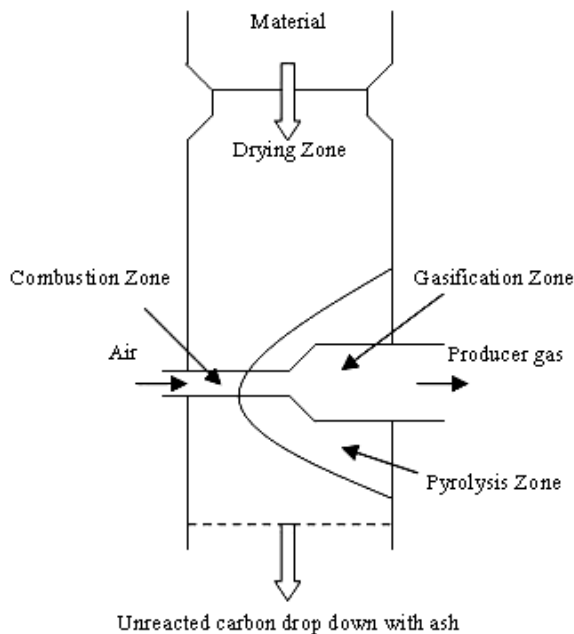
รูปที่ 2.11 แก๊สซิฟายเออร์ชนิดแก๊สไหลลง (Downdraft Gasifiers) (เบญจมาศ, 2547)

น้ำมันดินที่ได้จากการไพโรไลซิสจะผ่านบริเวณเผาไหม้ไปพร้อมกับแก๊สอื่นๆ ซึ่งจะถูกละลายตัวไปเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงมากของบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ จึงทำให้แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้นี้มีปริมาณของน้ำมันดินที่ปนเปื้อนอยู่ในปริมาณที่ต่ำมาก คือน้อยกว่า 1 mg/m^3 ซึ่งถือว่าเป็นข้อดีของเตาชนิดนี้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้วัสดุที่ไม่ผ่านการคาร์บอนไนซ์และยังเป็นระบบที่ให้แก๊สเชื้อเพลิงสม่ำเสมอดีกว่าระบบแก๊สซิฟายเออร์ชนิดแก๊สไหลขึ้น ในขณะที่ข้อเสียของเตาชนิดนี้ได้แก่ อุณหภูมิของแก๊สที่ออกจากเตามีค่าสูงประมาณ $600 - 800 \text{ }^\circ\text{C}$ จึงจำเป็นต้องมีระบบที่ช่วยในลดอุณหภูมิของแก๊สที่ได้ และแก๊สซิฟายเออร์ชนิดนี้ไม่เหมาะสมกับเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความชื้นสูงกว่าร้อยละ 20 อีกทั้งยังมีปริมาณเถ้าสูงเกินกว่าร้อยละ 6 เนื่องจากเถ้าอาจหลอมละลายติดกับคอกอด ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดการขัดขวางการไหลของเชื้อเพลิงและแก๊สได้ นอกจากนี้แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ยังมีปริมาณของเถ้าและฝุ่นละอองปนเปื้อนอยู่มาก

ค. แก๊สซิฟายเออร์ชนิดแก๊สไหลขวาง (Crossdraft Gasifiers)

แก๊สซิฟายเออร์ชนิดนี้เป็นแบบที่เล็กและเบาที่สุดใน 3 แบบ อากาศที่ป้อนเข้าไปในเตาจะไหลทิศทางขวางกับการไหลเลื่อนของเชื้อเพลิง ดังรูปที่ 2.12 บริเวณเผาไหม้และบริเวณที่เกิด

การรีดักชันจะอยู่ใกล้กันมาก ดังนั้นจึงสามารถผลิตแก๊สได้อย่างรวดเร็วและแปรผันได้ง่าย โดยปกติ บริเวณการเผาไหม้จะอยู่กึ่งกลางของเตาปฏิกรณ์ แต่ขอบเขตการไหม้อาจขยายกว้างขึ้นได้เมื่อ ความเร็วของอากาศสูงขึ้น



รูปที่ 2.12 แก๊สซิฟายเออร์ชนิดแก๊สไหลขวาง (Crossdraft Gasifiers) (เบญจมาศ ปุຍອອກ, 2547)

แก๊สที่ได้จากแก๊สซิฟายเออร์ชนิดนี้จะมีอุณหภูมิและสิ่งปนเปื้อนค่อนข้างสูง เตาแบบนี้จะสามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงได้เร็วกว่าอีกสองแบบ และอุณหภูมิภายในเตาจะไม่สูงมากนัก

2.2.3.2 แก๊สซิฟายเออร์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed)

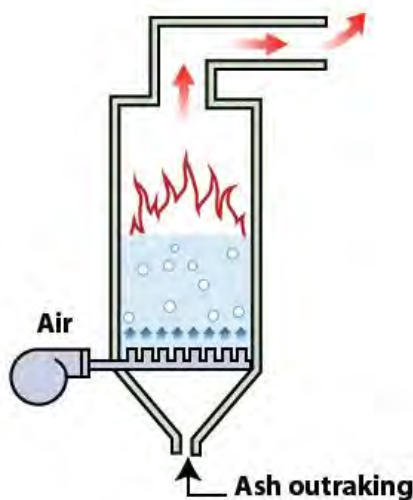
เตาปฏิกรณ์ชนิดนี้สามารถใช้ได้กับเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีคุณสมบัติบางอย่าง ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้กับแก๊สซิฟายเออร์แบบเบดนิ่ง กล่าวคือเตาชนิดนี้สามารถใช้ได้กับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงมากๆ ได้ รวมถึงสามารถใช้ได้กับเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นต่ำ ปริมาณของเถ้าสูง และอุณหภูมิการหลอมเหลวของเถ้าต่ำได้ โดยทั่วไปแล้วเตาชนิดนี้จะทำงานที่อุณหภูมิประมาณ 750 - 950 °C แก๊สซิฟายเออร์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดนี้ประกอบด้วยเบดที่ร้อน โดยทั่วไปจะใช้ทรายหรือเซรามิก เชื้อเพลิงชีวมวลจะถูกป้อนเข้าไปในเบดหรือถูกป้อนลงไปบนเบด และใช้อากาศหรือแก๊สในโตรเจนเป็นตัวกลางที่ทำให้เกิดการฟลูอิดไดซ์ โดยขึ้นอยู่กับขนาดและความหนาแน่นของเชื้อเพลิง ซึ่งจะมีผลกระทบต่อความเร็วของเบด โดยถ้าอนุภาคของเชื้อเพลิงเล็กจะทำให้ความเร็วของอากาศที่ใช้เพื่อให้เกิดการฟลูอิดไดซ์เบดจะน้อยลง สำหรับเตาปฏิกรณ์แก๊สแบบนี้ไม่สามารถแยก

ขั้นตอนในการเปลี่ยนแปลงชีวมวลออกเป็น 4 ขั้นตอนแบบแก๊สซิฟายเออร์แบบเบดนิ่งได้อย่างชัดเจน น้ำมันดินที่เกิดขึ้นจากการผลิตโดยใช้เตาชนิดนี้นั้นโดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 10 mg/m^3

แก๊สซิฟายเออร์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบด สามารถแบ่งได้ 3 ชนิดคือ

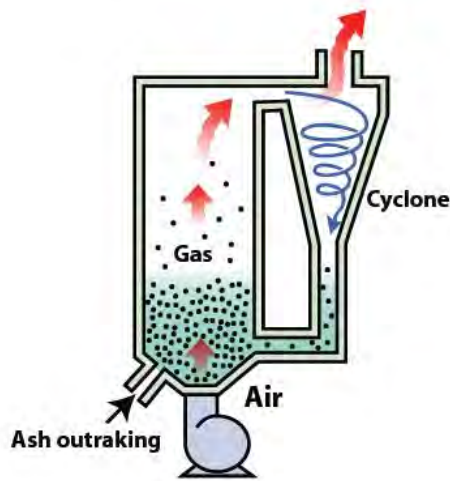
ก. แก๊สซิฟายเออร์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ (*Bubble Fluidized Bed Gasifier*) เมื่อความเร็วของอากาศที่ถูกป้อนเข้าไปในเตามีค่าต่ำ เบดที่อยู่ภายในเตาจะยังคงอยู่ในสภาพนิ่ง (*Fixed Bed*) แต่เมื่อความเร็วของอากาศสูงขึ้นจนมีค่าสูงกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์ (*Minimum Fluidizing Velocity*) อากาศจะเกิดการแทรกตัวผ่านเบด ทำให้เบดเกิดการขยายตัวมีลักษณะคล้ายฟอง โดยการขยายตัวของเบดนั้นจะน้อยเมื่อเทียบกับความสูงของเบดที่อยู่ในสภาพนิ่ง เมื่อเชื้อเพลิงถูกป้อนเข้าไปในแก๊สซิฟายเออร์ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากเบดไปยังอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลจะสูงมากประมาณ $400 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ซึ่งอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลจะถูกทำให้ร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้เกิดการไล่ความชื้นและการไพโรไลซิส (*Drying and Pyrolysis*) ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์หลักๆ คือ แก๊สต่างๆ น้ำมันดิน และถ่านชาร์

ปฏิกิริยาของแก๊สต่างๆ ที่เกิดในบริเวณที่เรียกว่า *Freeboard* เช่น ปฏิกิริยาการแตกพันธะ (*Cracking Reaction*) นั้น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในองค์ประกอบของแก๊สที่ได้ภายในแก๊สซิฟายเออร์อย่างต่อเนื่อง ผลผลิตบางอย่างที่ได้จากการไพโรไลซิสบางชนิดจะถูกทำให้เปลี่ยนไปในบริเวณที่เรียกว่า *Freeboard* โดยการเกิดปฏิกิริยาแตกพันธะ (*Cracking Reaction*) ซึ่งจะทำให้ห้องประกอบของแก๊สที่ออกจากเตาเกิดการเปลี่ยนแปลง แก๊สซิฟายเออร์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศโดยทั่วไปจะประกอบด้วยห้องเผาไหม้ (*Chamber*) ซึ่งอาจถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก (*Cylindrical*) หรือรูปทรงสี่เหลี่ยม (*Rectangular*) ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แก๊สซิฟายเออร์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ (*Bubble Fluidized Bed Gasifier*) (เบญจมาศ ปุ้ยอ็อก, 2547)

ข. แก๊สซิฟายเออร์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulateing Fluidized Bed Gasifier) ในกรณีความเร็วของอากาศถูกเพิ่มให้สูงขึ้นจนมีค่าเท่ากับความเร็วสุดท้ายของการฟลูอิดไดซ์ (Terminal Velocity) ของอนุภาคแล้ว การสูญเสียอนุภาคออกจากตัวเตาจะมีมากขึ้น พื้นผิวหน้าของเบดจะสังเกตเห็นได้ไม่ชัดเจน เนื่องจากเบดจะถูกพาให้เคลื่อนที่ตลอดความสูงของคอลัมน์ ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งจะทำให้มีของแข็งปนเปื้อนออกมาพร้อมกับแก๊สที่ผลิตได้เป็นจำนวนมาก จึงได้มีการออกแบบระบบเพื่อให้มีการนำเบดกลับเข้าไปในแก๊สซิฟายเออร์อีกครั้ง ซึ่งเบดที่ถูกนำกลับมาจะช่วยรักษาความสูงของเบดในเตา ในขณะที่อนุภาคของแข็งจะถูกนำกลับเข้ามาเพื่อให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปของคาร์บอน (Carbon Conversion Efficiency) สูงขึ้น ทั้งนี้แก๊สซิฟายเออร์ประเภทนี้จะเรียกว่าแก๊สซิฟายเออร์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยเตาปฏิกรณ์แก๊สชนิดนี้จะแตกต่างจากแก๊สซิฟายเออร์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศตรงที่ไม่สามารถแยกบริเวณที่มีอนุภาคของแข็งหนาแน่นกับบริเวณที่มีอนุภาคของแข็งเบาบางได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 2.14 แก๊สซิฟายเออร์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน
(Circulateing Fluidized Bed Gasifier) (เบญจมาศ ปุยอ็อก, 2547)

ข้อดีของแก๊สซิฟายเออร์แบบฟลูอิดไดซ์เบดเมื่อเทียบกับเบดอยู่นิ่งคือมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ มีการถ่ายเทความร้อนที่ทั่วถึงสม่ำเสมอภายในเบดจึงทำให้การเกิดปฏิกิริยาเป็นไปอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ เราสามารถเปรียบเทียบลักษณะของแก๊สซิฟายเออร์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดเมื่อเทียบกับเบดอยู่นิ่งได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบลักษณะของแก๊สซิฟายเออร์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบด (วสิน กาจนภู, 2545)

	Fixed Bed Downdraft	Fluidized Bed
Fuel : size (mm)	10-100	0-20
ash content (%wt)	< 6	< 25
Operating temperature (°C)	800-1400	750-950
Control	Simple	Average
Turn down ratio	4	3
Construction Material	Mild Steel + Refractory	Heat Resistant steel
Start-up time	Minutes	Hours
Tar Content (g/nm ³)	< 3	< 5
LHV (MJ/nm ³)	4.5	5.1

2.2.4 แก๊สสังเคราะห์ (วสิน กาจนภู, 2545)

แก๊สสังเคราะห์คือแก๊สผสมระหว่างแก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen) และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide) ซึ่งถือว่าเป็นองค์ประกอบหลักของแก๊สสังเคราะห์ (Gasification Technologies Council, 2008) ถูกใช้ในอุตสาหกรรมเคมีหลายประเภท แก๊สสังเคราะห์สามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งในรูปของแก๊สผสม หรือแยกไปเป็นแก๊สไฮโดรเจน หรือแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บริสุทธิ์ โดยการนำประโยชน์ในรูปของแก๊สผสมนั้นจะใช้ในกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล (Methanol) ไดมethylเอเธอร์ หรือใช้เป็นแก๊สรีดิวซ์ (Reducing Gas) ในการถลุงเหล็ก ส่วนในการแยกใช้จะใช้อย่างมากในกระบวนการกลั่นแยก การผลิตแอมโมเนีย และใช้เป็นวัตถุดิบในการทำสารเคมีหลายชนิดดังกล่าวในรายละเอียดต่อไป

กระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์

แก๊สสังเคราะห์โดยทั่วไปแล้วจะผลิตจากไฮโดรคาร์บอน เช่น แก๊สธรรมชาติ น้ำมัน ถ่านหิน และชีวมวล โดยวิธีการต่างๆ ได้แก่

- การรีฟอร์มแก๊สธรรมชาติหรือไฮโดรคาร์บอนเบาด้วยไอน้ำ หรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือทั้งไอน้ำ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
- การออกซิไดซ์บางส่วนของน้ำมันหนัก (Partial oxidation of heavy oil)
- การแก๊สซิฟิเคชันถ่านหินหรือถ่านโค้ก (Gasification of coal or coke)

วิธีการต่าง ๆ ข้างต้นจะให้สัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์แตกต่างกันไปซึ่งสามารถที่จะแสดงได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 อัตราส่วนของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการต่าง ๆ

Method of Manufacture	H ₂ /CO Ratio
Oxygen-coke-steam	0.6
Air-coke-steam	0.9
Oxygen-coal-steam	1
Oxygen-fuel oil-steam	1
Propane-steam	1.33
Methane-oxygen	1.7
Methane-oxygen-steam	2.3
Methane-steam	3.0-5.0

ที่มา : Larminie and Dicks (2000)

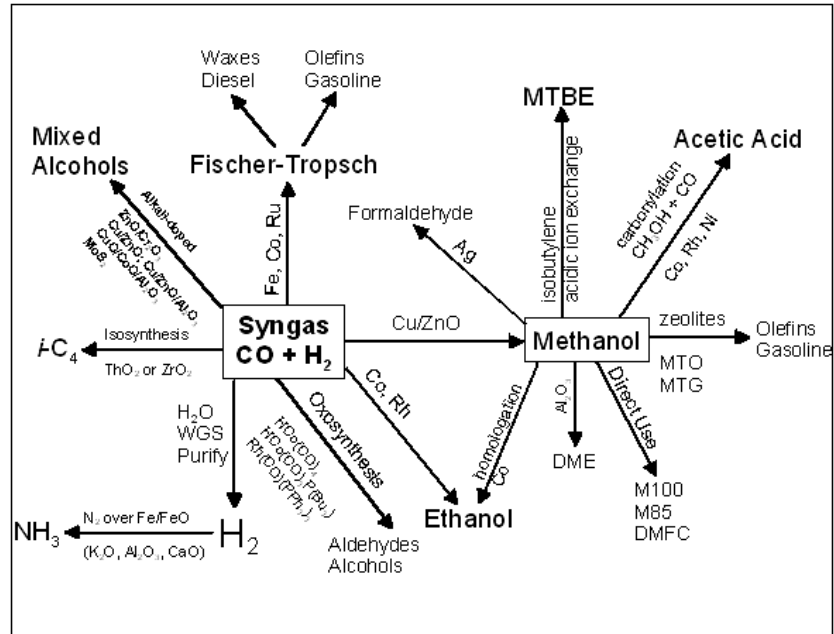
จากตารางที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าแก๊สสังเคราะห์ที่ได้นั้นจะมีสัดส่วนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนในสัดส่วนต่างๆ ขึ้นกับกระบวนการที่ใช้สังเคราะห์ระบบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

Ajay K. Dalia และคณะ วิจัยเรื่องการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากกลีเซอรอลแห่งมหาวิทยาลัย Saskatchewan ประเทศแคนาดาพบว่ากลีเซอรอลสามารถเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าได้ เช่น แก๊สสังเคราะห์ (ร้อยละ 93 โดยโมล) และแก๊สที่มีค่าความร้อนปานกลาง ทั้งนี้การเติมน้ำลงไปช่วยเพิ่มให้เกิดการผลิตแก๊สไฮโดรเจนมากขึ้น โดยมีปฏิกิริยา Water-gas shift เป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในการผลิตไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลโดยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิส ยิ่งไปกว่านั้นยังพบว่าอะตอมคาร์บอนในกลีเซอรอลสามารถเปลี่ยนเป็นแก๊สซิฟิเคชันมีความเฉพาะเจาะจงสูงในการผลิตแก๊สสังเคราะห์และยังสามารถทำปฏิกิริยาที่ระดับอุณหภูมิไม่สูงมากได้ด้วย

การนำแก๊สสังเคราะห์ไปใช้ประโยชน์

1) การใช้ประโยชน์ในรูปแก๊สสังเคราะห์

ผลิตภัณฑ์ขั้นตอน (Primary product) ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้แก๊สสังเคราะห์เป็นวัตถุดิบ แสดงไว้ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ผลลัพธ์ขั้นต้นที่ได้จากการใช้แก๊สสังเคราะห์เป็นวัตถุดิบ (National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy, 2003)

แก๊สสังเคราะห์เป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตสารเคมีอินทรีย์อื่นๆ ได้อย่างมากมาย ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารพวกปิโตรเคมี ในตอนต้นของทศวรรษที่ 1920 นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันได้ค้นพบว่าแก๊สสังเคราะห์สามารถเปลี่ยนไปเป็นเมทานอลได้เป็นอย่างดีโดยใช้ซิงค์โครเมียมออกไซด์ (Zinc-Chromium Oxide) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบแอลเคน (Alkanes) ได้ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโคบอลต์ที่มีเหล็กเป็นโปรโมเตอร์และตัวรองรับ ปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแก๊สสังเคราะห์ให้เป็นแอลเคนและแอลกอฮอล์เป็นที่รู้จักกันทั่วโลกคือปฏิกิริยาฟิชเชอร์-ทรอปส์ (Fischer-Tropsch reaction) โดยจุดประสงค์ของปฏิกิริยานี้เพื่อผลิตเชื้อเพลิงเหลว (Liquid Fuel) ซึ่งเป็นสารแอลเคนที่มีโมเลกุลสูง สำหรับการผลิตเมทานอลนั้นนอกจากจะนำไปใช้ประโยชน์โดยตรงแล้ว ยังนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารปิโตรเคมีอื่นๆ ได้อีกมากมาย เช่น ฟอร์มัลดีไฮด์, กรดแอซิดิก, เมทิลคลอไรด์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวเติม (Additive) ในแก๊สโซลีนในรูปของ Methyltertiary butyl ether (MTBE) ยิ่งไปกว่านั้นแก๊สสังเคราะห์ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าแร่เหล็กที่ขุดได้จากเหมืองในตอนแรกจะเป็นเหล็กออกไซด์ เมื่อสัมผัสกับแก๊สสังเคราะห์ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะทำหน้าที่เป็นแก๊สรีดิวซ์ (Reducing Gas) ซึ่งพร้อมจะถูกนำไปผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อให้ได้เป็นเหล็กกล้าตามต้องการ

2) การใช้ประโยชน์ในรูปของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

นอกจากการใช้ประโยชน์แก๊สสังเคราะห์ในลักษณะรวมแล้ว ยังสามารถแยกแต่ละแก๊สมาใช้ประโยชน์ในการสังเคราะห์สารเคมีตัวอื่นๆ ได้อีก จึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงประโยชน์ของแก๊สแต่ละชนิด แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นแก๊สพิษที่ติดไฟได้ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น เกิดขึ้นได้จากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย โดยการแยกออกจากแก๊สสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีการดูดซับด้วยทองแดงหลอมเหลว ส่วนใหญ่แล้วแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะนำไปใช้ในปฏิกิริยาพื้นฐานที่สำคัญ 2 ปฏิกิริยา คือ คาร์บอนิลเลชัน (Carbonylation) และไฮโดรฟอร์มิเลชัน (Hydroformylation) สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรฟอร์มิเลชันนั้น อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ปฏิกิริยาออกโซ (Oxo Reaction) (สุพัตรา ชิวธนาคุปต์, 2546) ในกระบวนการโอเลฟินคาร์บอนิลเลชัน โดยทำปฏิกิริยากับน้ำ แอลกอฮอล์ เอมีน และกรดคาร์บอกซิลิก โดยใช้โลหะกลุ่ม VIII เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้สารประกอบตัวใหม่ที่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีได้ เช่น การผลิตกรดอะคริลิก (Acrylic acid) โดยใช้อะเซทิลีนทำปฏิกิริยากับน้ำและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้ $\text{Ni}(\text{CO})_4$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 °C ความดัน 30 บาร์ จะได้ปริมาณของกรดอะคริลิกมากกว่าร้อยละ 90 ดังปฏิกิริยาที่ 2.23



ในการผลิตกรดอะคริลิกจากเอทิลีน สามารถทำได้โดยกระบวนการไฮดรอกซีคาร์บอนิลเลชัน (Hydroxycarbonylation) โดยใช้นิกเกิลโพรพิเนต (Nickel propionate) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 270 ถึง 320 °C ความดัน 200 ถึง 300 บาร์จะได้กรดโพรพิโนอิกมากกว่าร้อยละ 90 ดังปฏิกิริยาที่ 2.24



นอกจากนี้ยังสามารถนำแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรม การผลิตกรดฟอร์มิก และกรดโพรพิโนอิกด้วยปฏิกิริยาไฮโดรฟอร์มิเลชัน หรือในอุตสาหกรรมการผลิตอัลดีไฮด์ต่างๆ

3) การใช้ประโยชน์ในรูปของแก๊สไฮโดรเจน

กระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนมีอยู่มากมาย โดยใช้วัตถุดิบเริ่มต้นต่างๆ กัน ขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์และปริมาณแก๊สที่ต้องการผลิต ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ด้วย เช่น ราคาและความเหมาะสม วิธีการผลิตแก๊สไฮโดรเจนอย่างง่ายคือการแยกสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย เช่น การแยกน้ำเกลือด้วยไฟฟ้า (Electrolysis of an aqueous solution) นอกจากนี้ยังสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้โดยการผ่านไอน้ำไปบนเหล็กสปองจ์ ที่อุณหภูมิประมาณ 650 °C และความดันบรรยากาศ นอกจากนี้ในปัจจุบันพบว่าแก๊สไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จาก

โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานนิวเคลียร์ ส่วนในอุตสาหกรรมที่มีการใช้แก๊สไฮโดรเจน เป็นสารตั้งต้นนั้นนิยมใช้กระบวนการรีฟอร์มมิง (สุพัตรา ชิวธนาคุปต์, 2546) ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 วิธีการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยกระบวนการต่าง ๆ

Method	Temp	Pressure	Catalyst	Remarks
1. Electrolysis of Brine	-	-	-	This method is employed where 100 – 500 tons/annum of gas are required
2. Reaction of steam with spongy iron	650 °C	atmospheric pressure	-	-
3. Reaction of natural gas with steam	900 °C	-	Ni catalyst promoted by magnesia or alumina	-

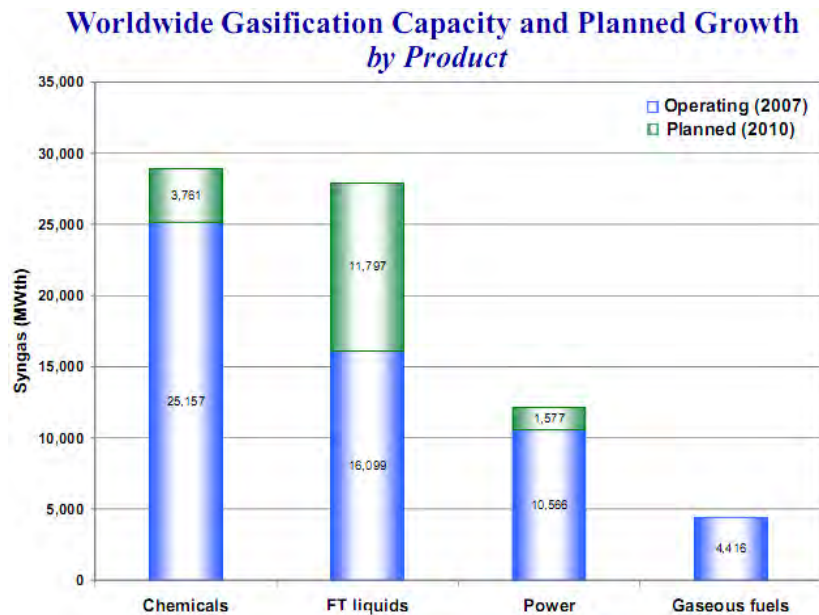
ที่มา : วสิน กาญจนภู (2545)

ในปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์แก๊สไฮโดรเจนในกระบวนการต่างๆ เช่น การสังเคราะห์แอมโมเนีย นิยมใช้กระบวนการฮาเบอร์ (Haber process) โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิห้อง และจากหลักของ เลอ ชาตอร์ลิแยร์ (Le Chatelier's Principal) พบว่าควรทำที่ความดันสูงและอุณหภูมิต่ำๆ และยังมีการใช้โปรโมเตอร์เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_4) ร่วมกับออกไซด์ของโลหะอื่นๆ ในการเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้มีค่าร้อยละการเปลี่ยนที่สูงขึ้น

การนำแก๊สไฮโดรเจนไปใช้ในอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมจะใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำมันและผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีอื่นๆ โดยใช้กระบวนการไฮโดรซัลฟูไรซิง (Hydro-sulfurizing) และกระบวนการไฮโดรแครกกิง (Hydrocracking) และในปัจจุบันได้มีการนำแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิงไปใช้เป็นสารตั้งต้นในเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell) ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งต้องมีการกำจัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ให้มีปริมาณต่ำกว่า 10 ppm

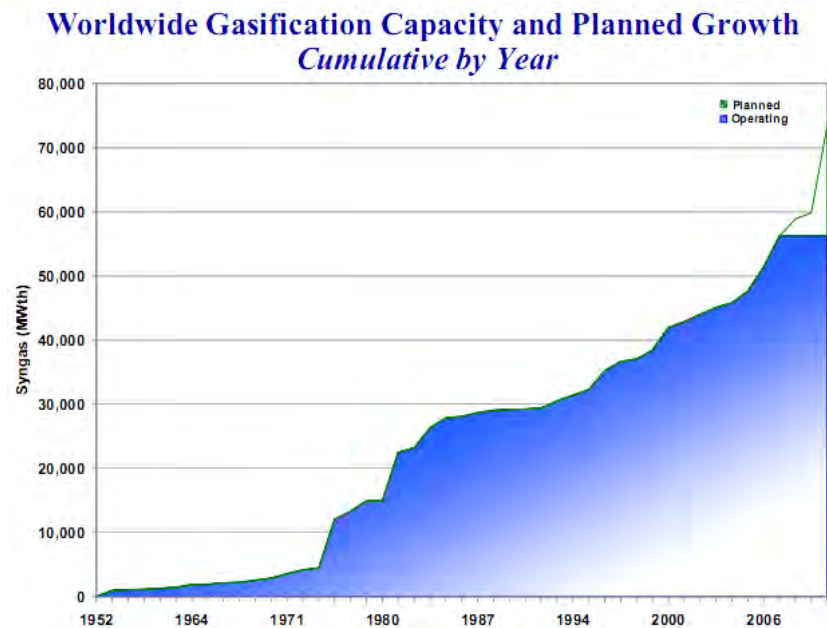
2.2.5 การประยุกต์ใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification Technology Council, 2008)

ในขั้นตอนของอุตสาหกรรมการผลิตแก๊สสังเคราะห์โดยใช้วัตถุดิบใดๆ ที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน เช่น ถ่านหิน ปิโตรเลียม ชีวมวล เป็นต้น มาผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันแล้วได้เป็นแก๊สสังเคราะห์จะถูกนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า หรือนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสารเคมี ปุ๋ย เชื้อเพลิงเหลว ไฮโดรเจน หรือ Substitute nature gas (SNG) ดังนั้นกระบวนการนี้จึงเป็นที่ยอมรับระดับภาคพาณิชย์และเป็นมีความต้องการสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การใช้แก๊สสังเคราะห์ในอุตสาหกรรมต่างๆ ทั่วโลกและปริมาณที่ถูกคาดการณ์ในปี ค.ศ. 2010 (Gasification World Database 2007, NETL U.S. DOE 2007)

ทั้งนี้กว่า 35 ปีที่อุตสาหกรรมผลิตกระแสไฟฟ้าเลือกใช้วิธีนี้ และมากกว่า 50 ปีที่วิธีนี้ถูกใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสารเคมี โรงกลั่นน้ำมันและผลิตปุ๋ย ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีโรงงานที่ใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเพื่อการผลิตมากกว่า 140 โรงทั่วโลก และมากกว่า 420 เตาแก๊สซิฟายเออร์ที่ถูกใช้งานอยู่ นอกจากนี้ยังถูกใช้ในการอุตสาหกรรมทรายน้ำมันในแคนาดาอีกด้วย รูปที่ 2.17 แสดงให้เห็นถึงความต้องการแก๊สสังเคราะห์ที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง



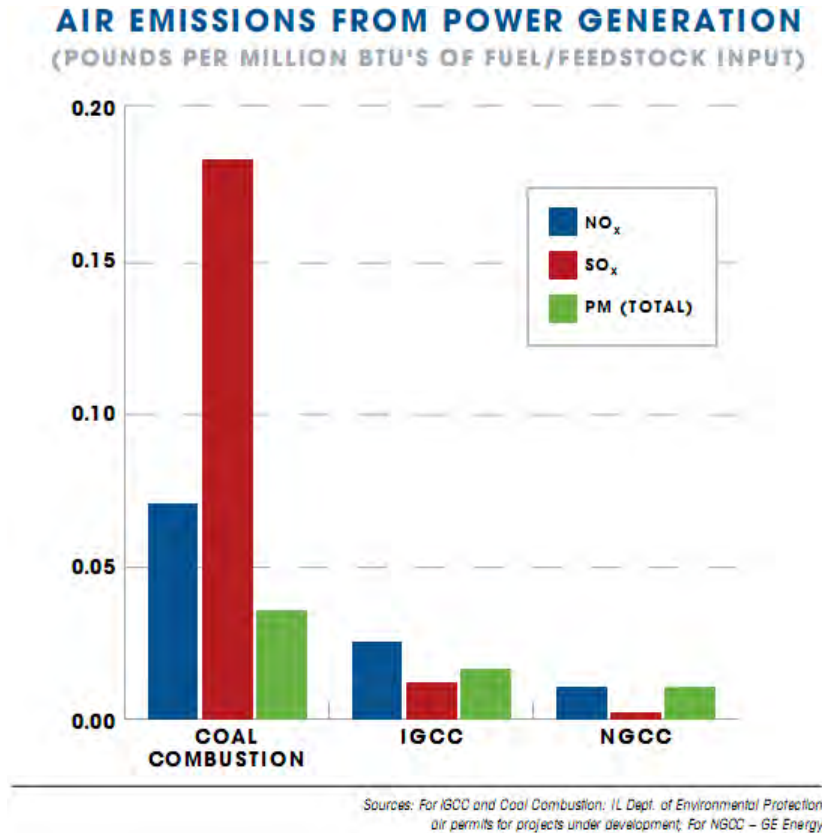
รูปที่ 2.17 ปริมาณการใช้แก๊สสังเคราะห์ทั่วโลกตั้งแต่ปี ค.ศ. 1952 ถึงปี ค.ศ. 2007 และปริมาณความต้องการแก๊สสังเคราะห์จากการคาดการณ์ในปี ค.ศ. 2010 (Gasification World Database 2007, NETL U.S. DOE 2007)

2.2.5.1 อุตสาหกรรมผลิตสารเคมีและปุ๋ย

เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันถูกใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสารเคมีตั้งแต่ปี 1950 โดยทั่วไปกระบวนการนี้จะถูกใช้เพื่อผลิตเมทานอล ซึ่งจะถูกใช้เป็นส่วนตั้งต้นในการผลิตสารเคมีตัวอื่น เช่น แอมโมเนียและยูเรีย ซึ่งทั้งสองตัวนี้คือสารตั้งต้นในการผลิตปุ๋ยจำพวกไนโตรเจนนั่นเอง นอกจากนี้โรงงานที่ใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันทั่วโลกเป็นโรงงานผลิตสารเคมีและปุ๋ย

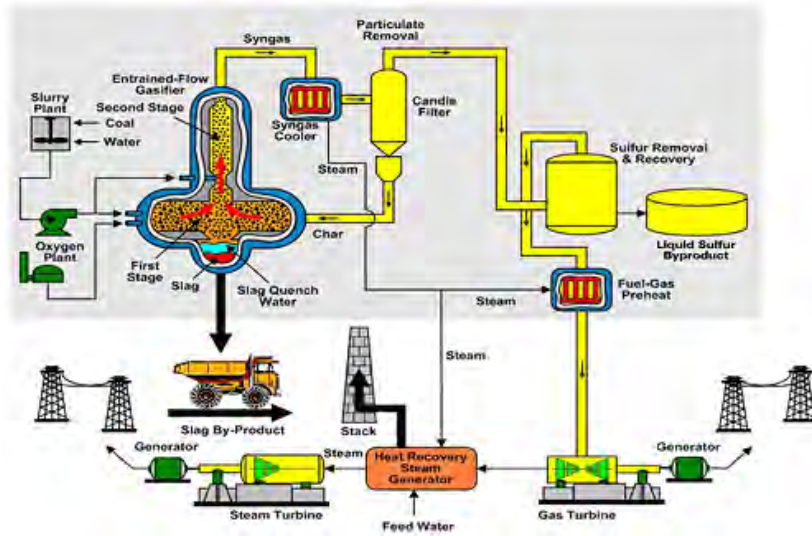
2.2.5.2 โรงผลิตกระแสไฟฟ้า

มีผลการศึกษายืนยันว่าวิธีการที่ใช้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าแบบใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันไม่สร้างมลภาวะทางอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งต่างจากวิธีผลิตที่ใช้กระบวนการเผาไหม้โดยตรง (Combustion) ทั้งนี้เนื่องจากสารมลพิษต่างๆ ในแก๊สสังเคราะห์ถูกกำจัดออกก่อนที่จะนำแก๊สสังเคราะห์มาเผาเพื่อหมุนกังหัน ในทางตรงกันข้ามเทคโนโลยีการเผาไหม้โดยตรงจะทำการดักสารมลพิษต่างๆ หลังจากไอเสียจากการเผาเคลื่อนที่ผ่านหม้อต้มไอน้ำหรือเครื่องผลิตไอน้ำ ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นระบบที่มีการลงทุนสูง เช่น Bag house และ/หรือ scrubber



รูปที่ 2.18 ความแตกต่างของมลพิษที่ปล่อยจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากวิธีการที่ต่างกัน (Gasification Technologies Council, 2008)

โรงไฟฟ้าแบบ Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) ดังรูปที่ 2.19 เป็นการรวมกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเข้ากับรูปแบบการผลิตกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่า Combine cycle หรือ Gas Turbine-Steam Combined Cycle (รูปที่ 2.20) ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงประกอบด้วย กังหันไอน้ำและกังหันแก๊สอย่างละหนึ่งตัวหรือมากกว่านั้น ทั้งนี้แก๊สสังเคราะห์ที่สะอาดแล้วจะถูกเผาที่กังหันแก๊สเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยความร้อนที่เหลือจากกระบวนการดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ผลิตไอน้ำ และส่งไปยังกังหันไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นได้อีก ปัจจุบัน โรงไฟฟ้าที่ใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้านี้ ทั่วโลกแล้วสามารถผลิตได้ถึง 4,107 เมกกะวัตต์ (World Gasification Database, Gasification Technologies Council, 2007)

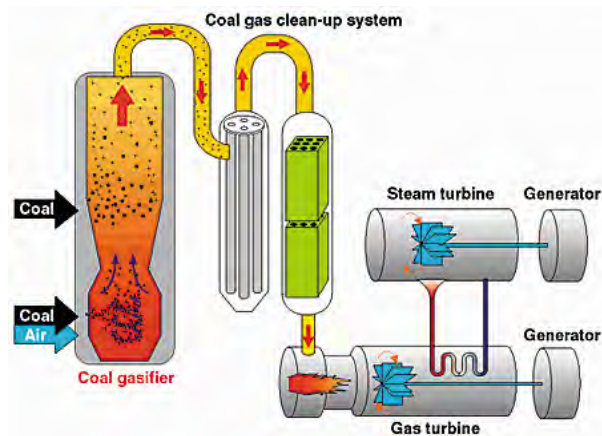


รูปที่ 2.19 โรงผลิตกระแสไฟฟ้าแบบ Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC)

(NETL U.S. DOE, 2008)

2.2.5.3 อุตสาหกรรมกลั่นน้ำมัน

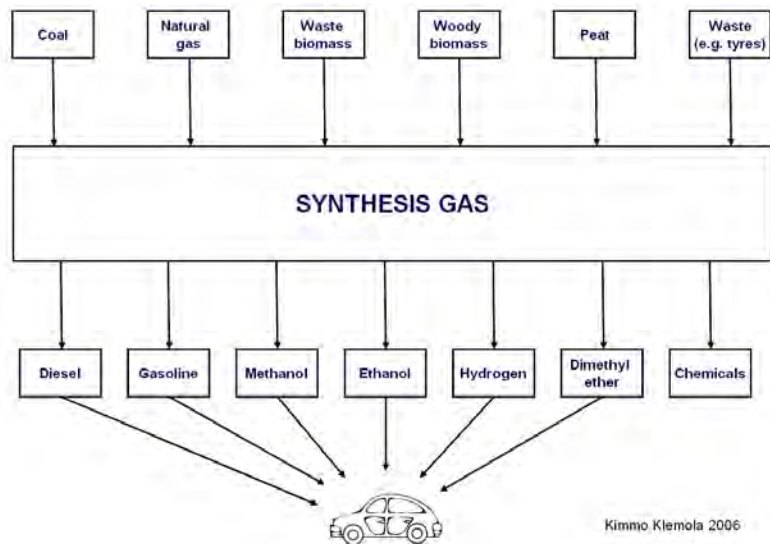
ไฮโดรเจนนับว่าเป็นหนึ่งในองค์ประกอบหลักของแก๊สสังเคราะห์ ถูกใช้เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนออกจากแก๊สโซลีน น้ำมันดีเซลและเชื้อเพลิงของเครื่องบินไอพ่น (Jet fuel) ในประเทศอเมริกา และยังถูกใช้ในการปรับสภาพน้ำมันดิบ ซึ่งที่ผ่านมามีแก๊สธรรมชาติถูกใช้ในกระบวนการกลั่นน้ำมันโดยใช้แก๊สธรรมชาตินี้เป็นสารตั้งต้นผลิตไฮโดรเจน แต่ปัจจุบันราคาแก๊สธรรมชาติสูงขึ้น โรงกลั่นน้ำมันจึงต้องใช้สารตั้งต้นอื่นทดแทนเพื่อการผลิตไฮโดรเจน ดังนั้นโรงกลั่นน้ำมันจึงอาศัยกระบวนการ แก๊สซิฟิเคชันนี้ผลิตไฮโดรเจนจากของเหลือทิ้งจากกระบวนการ เช่น ปิโตรเลียมโค้ก (Petroleum coke) ยางมะตอย (Asphalts) น้ำมันดิน (Tar) และของเสียที่มีน้ำมัน ซึ่งนอกจากจะผลิตไฮโดรเจนได้แล้ว ยังสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าและไอน้ำร้อนเพื่อใช้ในโรงกลั่นได้อีกด้วย



รูปที่ 2.20 หลักการ Integrated Gasification Combined Cycle (Central Research Institute of Electric Power Industry, 2008)

2.2.5.4 เชื้อเพลิงภาคการขนส่ง

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นรากฐานการผลิตเชื้อเพลิงเพื่อการคมนาคมขนส่ง โดยสามารถเปลี่ยนจากถ่านหิน วัสดุในสถานะของแข็ง และแก๊สธรรมชาติไปเป็นแก๊สโซลีน เชื้อเพลิงเครื่องบินไอพ่น เชื้อเพลิงอุลตราคลีนดีเซล (Ultra-clean diesel fuel) แนพทา (Naphtha) และน้ำมันสังเคราะห์ (Synthesis oils) ดังรูปที่ 3.20 กระบวนการดังกล่าวแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยเริ่มที่แก๊สสังเคราะห์จะถูกนำไปผ่านกระบวนการเดิม ที่เรียกว่าปฏิกิริยาฟิชเชอร์ ทรอปส์ช (Fischer-Tropsch: FT) เพื่อเปลี่ยนสารตั้งต้นเหล่านั้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมเหลว ซึ่งวิธีการนี้ถูกใช้โดยประเทศเยอรมันตั้งแต่ช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 และถูกใช้ในประเทศแอฟริกาได้มาเป็น 10 ปีแล้ว ปัจจุบันประเทศมาเลเซียและกลุ่มประเทศตะวันออกกลางได้ใช้แก๊สธรรมชาติเป็นสารตั้งต้นของกระบวนการนี้ ขั้นตอนมาเรียกว่าเมทานอลแก๊สโซลีน (Methanol to Gasoline: MTG) โดยแก๊สสังเคราะห์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นเมทานอลก่อนแล้วเมทานอลนั้นจะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สโซลีน โดยให้เมทานอลเกิดปฏิกิริยาบนชั้นเบดที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) โรงงาน MTG ในประเทศนิวซีแลนด์ประสบความสำเร็จในการใช้งานตั้งแต่ปีค.ศ. 1980 จนถึงต้นปีค.ศ. 1990 ยิ่งไปกว่านั้นสำหรับวิธีการดังกล่าวกำลังจะถูกใช้โดยประเทศจีนและสหรัฐอเมริกาอีกด้วย



รูปที่ 2.21 ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเพื่อการขนส่งที่ได้จากแก๊สสังเคราะห์

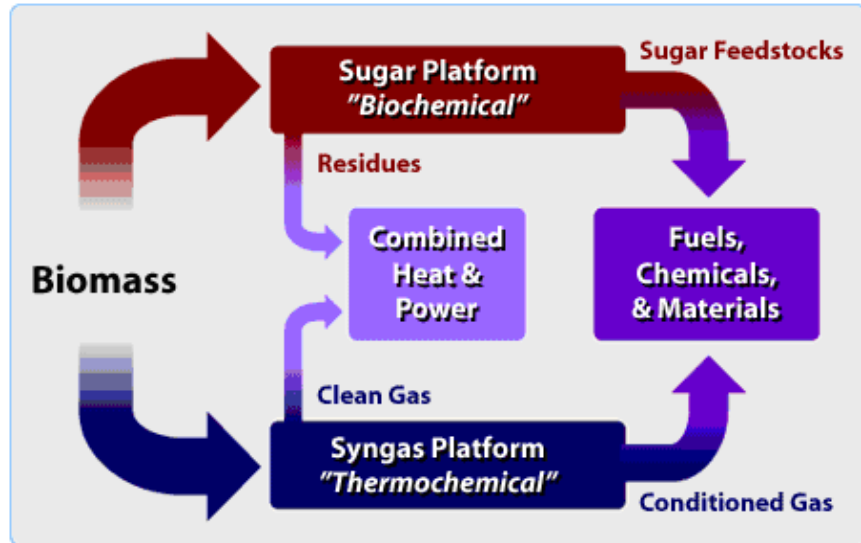
2.2.5.5 สารทดแทนแก๊สธรรมชาติ (Substitute natural gas: SNG)

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันถูกใช้เพื่อผลิต SNG จากถ่านหิน โดยอาศัยปฏิกิริยาเมทานเนชัน (Methanation) โดยแก๊สสังเคราะห์ที่ได้ซึ่งส่วนใหญ่เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน จะถูกเปลี่ยนเป็นมีเทน (CH_4) เนื่องจากลักษณะสมบัติทางเคมีที่คล้ายกันกับแก๊สธรรมชาติ SNG จึงถูกใช้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า สารเคมีและปุ๋ย รวมถึงใช้เพื่อให้ความอบอุ่นภายในบ้านและอาคารทำธุรกิจด้วย

2.2.5.6 โรงกลั่นชีวภาพ (Biorefinery)

ปัจจุบันได้มีแนวคิดเกี่ยวกับกระบวนการผลิตที่ให้ผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย (Co-production) คล้ายกับการกลั่นน้ำมันที่ให้ผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างและหลากหลาย เช่น ได้น้ำมันเบนซิน น้ำมันหล่อลื่น น้ำมันเตา เป็นต้น ซึ่งการกลั่นน้ำมันนั้นเป็นการย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน แต่แนวคิดแบบไบโอรีฟายเนอรี (Biorefinery) หรือโรงกลั่นชีวภาพเป็นการย่อยสลายชีวมวลให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย เช่น เชื้อเพลิง พลังงาน และเคมีภัณฑ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.21 เป็นแนวคิดการสร้างโรงงานไบโอรีฟายเนอรีของ NREL (National Renewable Energy Laboratory, USA.) ที่อาศัยเทคโนโลยีการแปรสภาพชีวมวล 2 แบบ คือแบบชีวเคมี (Biochemical conversion process) ซึ่งอยู่ในส่วนของ “Sugar platform” โดยใช้น้ำตาลซึ่งได้จากชีวมวลมาหมัก เพื่อได้เป็นผลิตภัณฑ์และส่วนที่เหลือจะเข้าสู่กระบวนการผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมต่อไป (CHP) ในส่วนของการแปรสภาพด้วยความร้อนหรือกระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermochemical conversion process) ซึ่งอยู่ในส่วนของ “Syngas platform” โดยอาศัย

กระบวนการแยกสลายพันธะด้วยความร้อน คือกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิส ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้สามารถเป็นได้ทั้งผลิตภัณฑ์และวัตถุดิบให้แก่ระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนต่อไป



รูปที่ 2.22 หลักการเปลี่ยนชีวมวลเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในโรงกลั่นชีวภาพ (NREL U.S. DOE, 2008)

ปัจจุบันกระบวนการเคมีความร้อนได้รับความสนใจ เนื่องจากสามารถใช้ได้กับ วัตถุดิบที่หลากหลายกว่ากระบวนการชีวเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 การเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล โดยใช้วิธีทางชีวเคมีและการใช้พลังงานความร้อน (ชนิดา, 2550)

วัตถุประสงค์		วิธีทางชีวเคมี	วิธีการใช้พลังงานความร้อน
เชื้อเพลิง	สารเติมแต่ง	✓	✓
	แอลกอฮอล์	✓	✓
	ถ่านชาร์		✓
	ดีเซล		✓
	กระแสไฟฟ้า		✓
	น้ำมันเตา		✓
	แก๊ส	✓	✓
	เบนซิน		✓
	ไฮโดรเจน	✓	✓
สารเคมี	อะซิโตน	✓	
	บิวทานอล	✓	
	เอทานอล	✓	✓
	สารปรับปรุงดิน	✓	✓
	สารแต่งเติม	✓	✓
	ไฮโดรเจน	✓	✓
	มีเทน	✓	✓
	เรซิน		✓
	สารอื่น ๆ ที่มีลักษณะเฉพาะ		✓

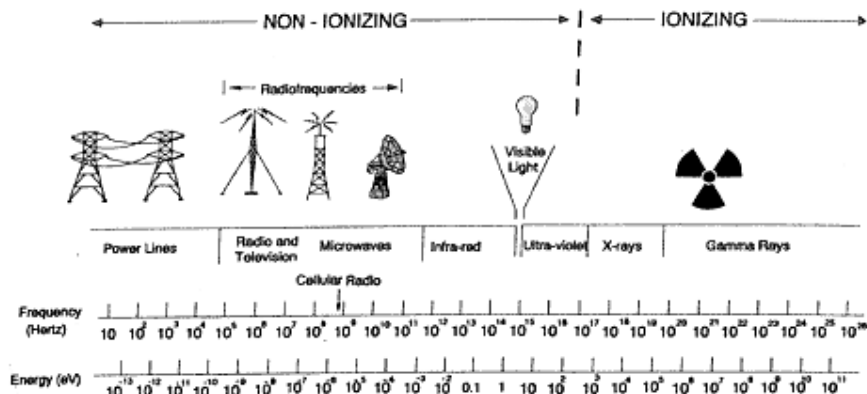
หมายเหตุ: ✓ คือผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการแปรรูปที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล

2.3 ไมโครเวฟ

2.3.1 พื้นฐานเทคโนโลยีไมโครเวฟ (D.E. Clark and D.C. Folz, 2005)

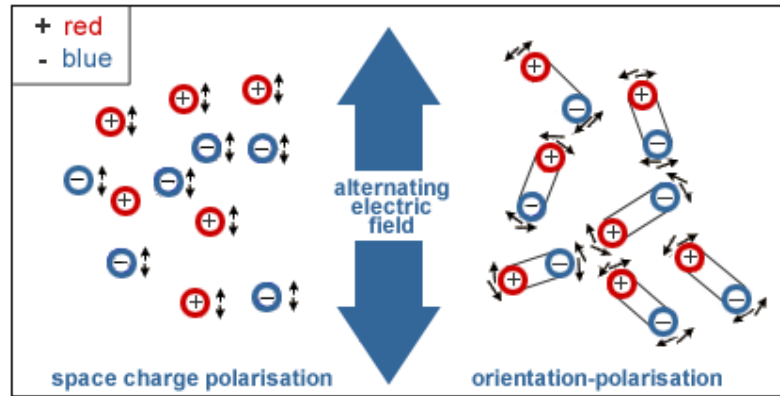
คลื่นไมโครเวฟมีค่าความถี่ในช่วง 300 MHz ถึง 300 GHz และมีความยาวคลื่นในช่วง 1 เมตรถึง 1 มิลลิเมตร เป็นคลื่นที่อยู่ระหว่างคลื่นความถี่วิทยุ (RF) และคลื่นอินฟราเรด (IR) บน Electromagnetic spectrum (EM) ดังรูปที่ 3.22 มีความสามารถในการสะท้อนกลับ ส่งผ่าน และหรือดูดซับได้ พลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับด้วยวัสดุใดก็ตาม จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนในวัสดุนั้น และเป็นผลให้ตัวดูดซับมีอุณหภูมิสูงขึ้น ปฏิกิริยาเหล่านี้เกิดขึ้นได้กับสาร ทั้ง 3

สถานะได้แก่ แก๊ส ของเหลว และของแข็ง โดยทำให้สสารนั้นๆ ร้อนขึ้นได้ ทั้งนี้ภายใต้สภาวะที่แน่นอน แก๊สจะถูกกระตุ้นโดยคลื่นไมโครเวฟก่อให้เกิดพลาสมาซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อกระบวนการอีกด้วย



รูปที่ 2.23 แสดงช่วงความถี่และระดับพลังงานของไมโครเวฟบนสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic spectrum) (CWA, 2005)

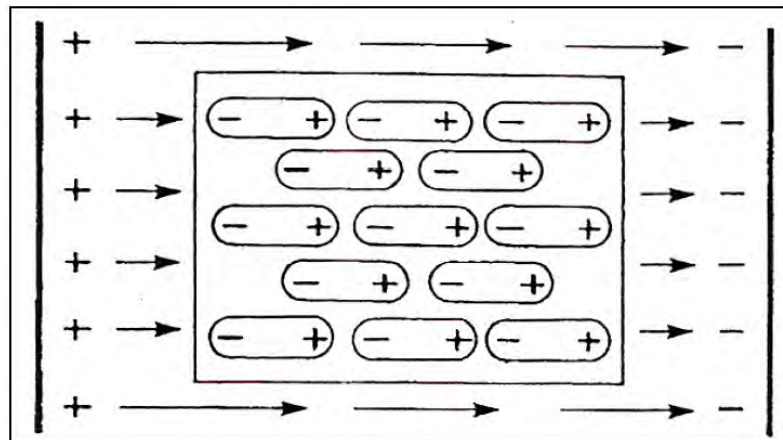
การทำให้ร้อนด้วยไมโครเวฟถูกกำหนดโดยข้อตกลงระหว่างประเทศว่าให้ใช้ที่ความถี่ประมาณ 900 MHz (3.33 เซนติเมตร) และที่ 2.45 GHz (12.2 เซนติเมตร) เพื่อป้องกันการเข้าแทรกแซงกับความถี่อื่นที่ถูกใช้งานในด้านต่างๆ เช่น คลื่นความถี่เพื่อใช้สื่อสารทางโทรศัพท์ (Soongprasit, 2006) กลไกพื้นฐานของการทำให้ร้อนด้วยไมโครเวฟ (Microwave heating) จะเกี่ยวข้องกับความปั่นป่วนของโมเลกุลที่มีขั้วหรือการที่อะตอมที่มีประจุไฟฟ้าเกิดการแกว่งไปมาภายใต้อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลให้เกิดการสร้างสนามไฟฟ้าที่ทำให้อนุภาคเหล่านั้นพยายามปรับตัวหรือจัดเรียงตัวเองให้เข้ากับทิศทางของแรงที่ส่งมา ดังรูปที่ 2.23 แต่อย่างไรก็ตามการเคลื่อนไหวของอนุภาคเหล่านี้จะถูกต้านด้วยแรงอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคและแรงต้านไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนที่แบบสุ่มจนเกิดเป็นความร้อน



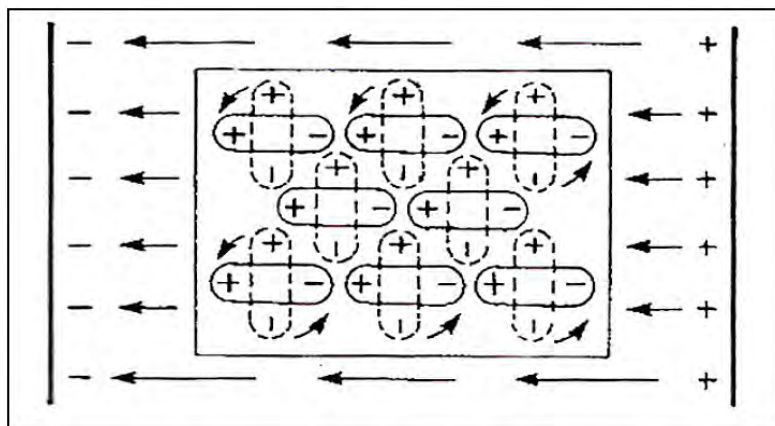
รูปที่ 2.24 ความปั่นป่วนของโมเลกุลของสารมีขั้วภายใต้อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า

2.3.2 การเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าของโมเลกุลในสนามไฟฟ้า (สุรพล สุธีระเวชช์, 2541)

สสารทุกชนิดประกอบด้วยอะตอม และหลายๆ อะตอมประกอบกันเป็นโมเลกุล โดยทั่วไปแล้วโมเลกุลของสสารจะไม่เป็นกลางทางไฟฟ้า เมื่อให้สนามไฟฟ้าซึ่งมีทั้งขั้วบวกและลบแก่โมเลกุลของสสารจะเกิดการเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลเหล่านั้นตามสนามไฟฟ้า โดยข้างที่มีขั้วบวกจะหันไปทางข้างที่มีขั้วลบของสนามไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.24 และ 2.25 เมื่อพิจารณาโมเลกุลของสสารในการกลับตัวไปตามความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ เช่น เมื่อใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ 2,450 MHz พบว่าโมเลกุลจะกลับตัวในช่วงคลื่นไมโครเวฟช่วงบวกเข้ามา 2,450 ล้านครั้งต่อวินาที และเมื่อช่วงลบไมโครเวฟเข้ามาโมเลกุลจะกลับตัวอีกครั้งเป็นจำนวน 2,450 ล้านครั้งต่อวินาที เมื่อรวมจำนวนครั้งที่โมเลกุลกลับตัวแล้วเท่ากับ 4,900 ครั้งต่อวินาที ทำให้เกิดการชนกัน เสียดสีกัน และเกิดความฝืด จนกระทั่งเกิดเป็นความร้อน และเนื่องจากโมเลกุลอยู่ภายในสสาร ความร้อนจึงเริ่มที่ระดับโมเลกุลแล้วจึงส่งความร้อนนั้นออกมาภายนอก



รูปที่ 2.25 แสดงการจัดเรียงตัวของโมเลกุลตามสนามไฟฟ้า (สุรพล สุธีระเวชช์, 2541)



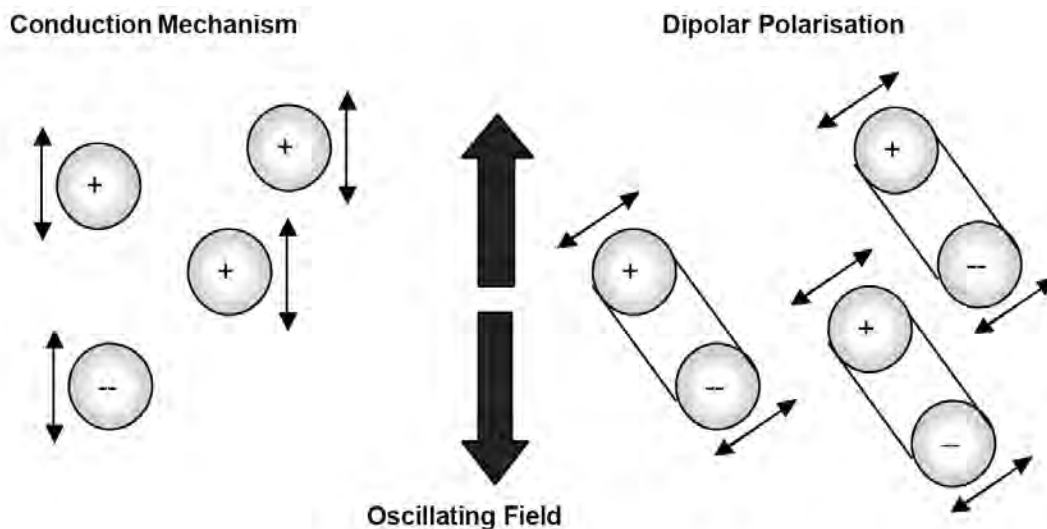
รูปที่ 2.26 แสดงการกลับตัวไปมาของโมเลกุลตามสนามไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว (สุรพล สุธีระเวชช์, 2541)

2.3.3 กลไกการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟ (Evalueserve, 2005)

ไมโครเวฟสามารถใช้เป็นแหล่งให้ความร้อนแก่วัสดุได้ โดยเมื่อไมโครเวฟทะลุผ่านเข้าไปในวัสดุไดอิเล็กทริก (dielectric material) หรือวัสดุที่ต้องการทำให้ร้อนแล้ว วัสดุที่สามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟไว้ได้จะเกิดความร้อนขึ้นภายในปริมาตรของวัสดุนั้น โดยการนำของไอออน (ion conduction) และ/หรือการหมุนของสารประกอบที่มีสองขั้ว ดังรูปที่ 2.26 ทั้งนี้การนำของไอออนเป็นการเคลื่อนที่ในสารละลาย เมื่อมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากระทำ ทำให้มีการต่อต้านการเคลื่อนที่ดังกล่าว เนื่องจากแรงเสียดทานก่อให้เกิดความร้อนขึ้นภายในวัสดุ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.3.3.1 Dipolar Polarisation

เป็นขั้นตอนการให้ความร้อนแก่โมเลกุลมีขั้ว โดยโมเลกุลจะพยายามสั้นตามการสั้นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แต่ด้วยแรงระหว่างโมเลกุลและแรงเฉื่อยทำให้โมเลกุลเกิดการเคลื่อนที่แบบสุ่มจนทำให้เกิดความร้อน สิ่งสำคัญของกลไกนี้คือ ช่วงความถี่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำให้โมเลกุลเกิดการสั้นจะต้องมีค่าเพียงพอที่จะทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล ถ้าความถี่มีค่าสูงเกินไปจะทำให้แรงระหว่างโมเลกุลไปหยุดการเคลื่อนไหวของโมเลกุลก่อนที่มันจะเคลื่อนที่ไปตามสนาม หรือถ้าความถี่มีค่าต่ำเกินไปทำให้โมเลกุลมีเวลาเพียงพอที่จะเรียงตัวเองให้สามารถเคลื่อนตามสนามได้โดยไม่เกิดการเคลื่อนที่แบบสุ่ม



รูปที่ 2.27 การเคลื่อนที่ของโมเลกุลในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบต่างๆ (Pueschner GmbH, 2005)

2.3.3.2 Conduction mechanism

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้ไอเล็กตรอนหรือไอออนในตัวนำไฟฟ้าเกิดการสั่นจนกลายเป็นกระแสไฟฟ้า ซึ่งส่งผลให้เกิดค่าความต้านทานไฟฟ้าภายในทำให้ตัวนำร้อน ข้อจำกัดของวิธีการนี้คือ ไม่เหมาะสำหรับวัสดุที่มีสภาพการนำไฟฟ้าสูง

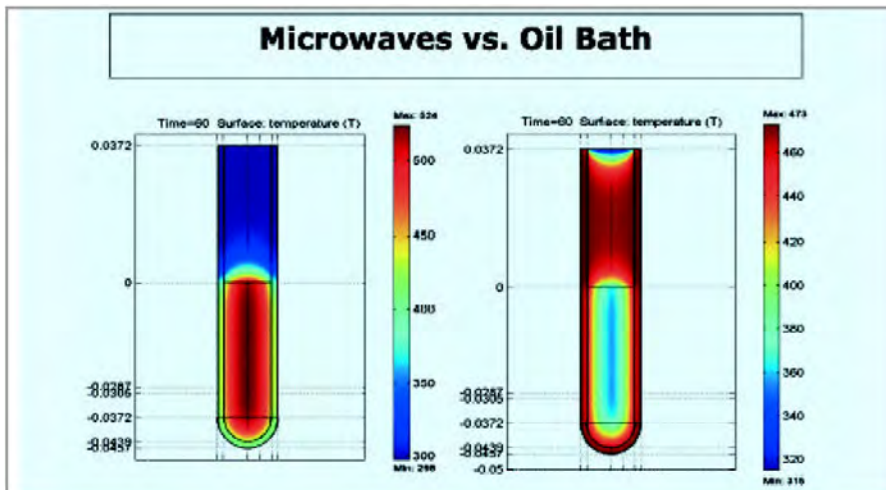
2.3.3.3 Interfacial Polarization

วิธีการนี้เป็นการรวมเอาวิธี Conduction และวิธี Dipolar Polarisation เข้าด้วยกัน เพื่อใช้งานในระบบที่ตัวอย่างเป็นวัสดุนำไฟฟ้ากระจายตัวอยู่ในวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า เช่น การกระจายตัวของโลหะในกัมมะถัน กัมมะถันไม่ตอบสนองต่อไมโครเวฟ ส่วนโลหะจะสะท้อนพลังงานของไมโครเวฟ แต่เมื่อนำสารทั้งสองมารวมกันจะกลายเป็นวัสดุที่ดูดกลืนไมโครเวฟได้เป็นอย่างดี โดยโลหะจะต้องอยู่ในรูปผง ตัวอย่างจะดูดกลืนและทำให้เกิดความร้อนได้ด้วยวิธีการ Dipolar Polarisation กัมมะถันที่อยู่รอบๆ ผงโลหะจะประพุดิวเสมือนเป็นตัวทำลายสำหรับโมเลกุลมีขั้ว และต้านการเคลื่อนที่ของไอออนด้วยแรงที่มีค่าเท่ากับอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล ทำให้ไอออนเกิดการเคลื่อนที่แบบสุ่มจนเกิดความร้อนขึ้น

2.3.4 ปฏิกริยาระหว่างคลื่นไมโครเวฟและวัสดุ (Willard H. Sutton, 2005)

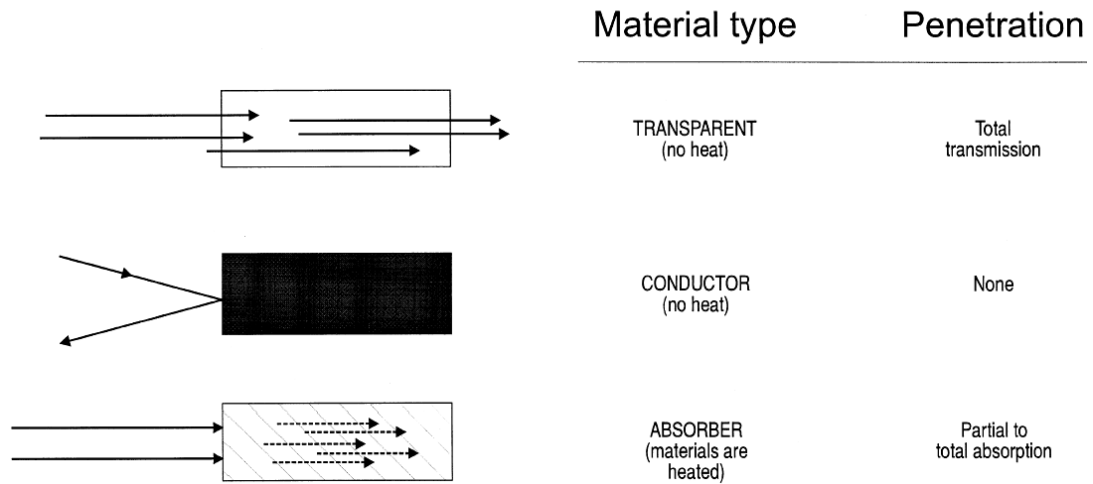
การให้ความร้อนโดยคลื่นไมโครเวฟจะแตกต่างจากวิธีให้ความร้อนแบบทั่วไป ความร้อนจากการใช้คลื่นไมโครเวฟจะเกิดขึ้นจากภายในวัสดุแทนที่จะเกิดจากแหล่งให้ความร้อนภายนอก ความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นมีผลทั้งปริมาณจากภายในทำให้ระดับความร้อน (Thermal gradient) และทิศทางการเกิดความร้อน (heat flow) กลับกันกับการให้ความร้อนแบบทั่วไป ดังรูปที่ 2.27 รูปขวามือเป็นการให้ความร้อนแบบทั่วไป (Conventional heating) โดยใช้อ่างน้ำมันเป็น

ตัวแทน พบว่าความร้อนเกิดขึ้นที่ผนังอ่างก่อนแล้วตัวทำละลายจึงร้อน นอกจากนี้ยังพบว่าระดับอุณหภูมิของผนังอ่างน้ำมันและสารละลายมีค่าต่างกัน ซึ่งไม่เหมือนกับทำให้ความร้อนแบบไมโครเวฟในรูปช้ำยมือ โดยพบว่ามึเพียงสารละลายและอนุภาคที่ละลายอยู่เท่านั้นที่ถูกกระตุ้น ซึ่งเป็นผลมาจากกาที่สารละลายถูกให้ความร้อนอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นคลื่นไมโครเวฟจึงสามารถทำให้สารทั้งเล็กและใหญ่ร้อนได้อย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ (มีประสิทธิภาพในการกำจัดส่วนประกอบที่เป็นสารระเหยได้จากวัสดุที่มีความหนา เช่น พันธ์ะต่างๆ ความชื้น เป็นต้น)



รูปที่ 2.28 รูปแบบการให้ความร้อนโดยเตาไมโครเวฟ (ด้านช้ำยมือ) และอ่างน้ำมันซึ่งเป็นเตาความร้อนทั่วไป (ด้านขวามือ) (Biotage AB, 2005)

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถส่งผ่าน ดูดซับ หรือสะท้อนได้ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้นๆ จากรูปที่ 2.29 โลหะเป็นวัสดุที่คลื่นไมโครเวฟผ่านไม่ได้ จึงกลายเป็นวัสดุสะท้อนคลื่นไมโครเวฟได้อย่างดี



รูปที่ 2.29 ปฏิกริยาแบบต่างๆ ของคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อวัสดุ (KaZi E. Haque, 1998)

จากรูปที่ 2.29 จะเห็นว่าวัสดุที่ต่างชนิดกันจะมีการตอบสนองต่อคลื่นไมโครเวฟที่ต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทดังนี้ (Evalueserve, 2005)

- วัสดุที่คลื่นไมโครเวฟทะลุผ่านได้ เป็นวัสดุจำพวกฉนวนความร้อน (Insulator) โดยทั่วไปถูกใช้ในเตาไมโครเวฟเพื่อช่วยให้วัสดุใดๆ ถูกทำให้ร้อนด้วยเตาไมโครเวฟนั้น เช่น วัสดุที่ทำมาจากพอลิเอทิลีน (polyethylene) พอลิสไตรีน (polystyrene) เทฟลอน (Teflon) แก้วโบโรซิลิเกต (borosilicate) และซัลเฟอร์ เป็นต้น

- วัสดุที่คลื่นไมโครเวฟสะท้อนกลับ เป็นวัสดุจำพวกตัวนำ (Conductor) ถูกใช้ทำเป็นเวฟไกด์ (waveguide) ของเตาไมโครเวฟ ได้แก่ พวกโลหะ เช่นทองแดง

- วัสดุที่คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านได้เพียงบางส่วนและถูกดูดซับไว้บางส่วน เป็นวัสดุที่สามารถดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟไว้ได้อย่างง่ายดาย ถูกจัดเป็นวัสดุจำพวกที่มีการนำไฟฟ้าต่ำ เช่น น้ำ คอนกรีตเหลว และสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย เป็นต้น

2.3.5 การให้ความร้อนแบบทั่วไปและแบบคลื่นไมโครเวฟ

จากที่ได้กล่าวถึงกลไกของไมโครเวฟที่ทำให้สารนั้นๆ ร้อนได้ โดยเป็นความร้อนที่เกิดจากภายในสารนั้นก่อน คือระดับโมเลกุล แล้วจึงส่งความร้อนนั้นออกมา ซึ่งเป็นกลไกการให้ความร้อนแก่วัสดุใดๆ ที่ตรงกันข้ามกับการให้ความร้อนแบบทั่วไปที่เป็นการให้ความร้อนจากด้านนอกบริเวณผิวของวัสดุ แล้วความร้อนนั้นจะเข้าไปในวัสดุ ทั้งนี้กระบวนการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟมีข้อดีกว่ากระบวนการให้ความร้อนแบบทั่วไป (Conventional heating) หลายประการ ซึ่งการให้ความร้อนแบบทั่วไปนั้นเป็นการให้ความร้อนผ่านบริเวณพื้นผิวด้านนอกและอุณหภูมิ

ภายนอกนี้เองที่เป็นตัวควบคุมระบบการให้ความร้อนรูปแบบนี้ ซึ่งถูกจำกัดด้วยลักษณะสมบัติทางกายภาพของวัสดุต่างๆ เช่น ความหนาแน่น ความจุความร้อน และการนำความร้อน รวมถึงการแพร่กระจายความร้อนของวัสดุใดๆ (Thermal diffusivity) คือค่าอัตราส่วนระหว่างค่าการนำความร้อน (heat conduction) ต่อค่าความร้อนทั้งปริมาตร (volumetric heat) เป็นต้น ความแตกต่างของการให้ความร้อนทั้งสองแบบ (รูปที่ 2.28) ถูกสรุปไว้ในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 เปรียบเทียบกลไกการให้ความร้อนแบบทั่วไปและแบบใช้คลื่นไมโครเวฟ

การให้ความร้อนแบบทั่วไป	การให้ความร้อนโดยคลื่นไมโครเวฟ
<p><u>แหล่งความร้อน</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Gas burner - Electric resistance element 	<p><u>แหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Magnetrons - Traveling wave tube - 25 transmission line
<p><u>กลไกการส่งผ่านความร้อน</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - จากแหล่งความร้อนถึงบริเวณพื้นผิวหน้า <p>การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน</p> <ul style="list-style-type: none"> - จากบริเวณพื้นผิวหน้าไปยังศูนย์กลาง <p>การนำความร้อน</p>	<p><u>กลไก</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - ความร้อนเกิดขึ้นด้านใน - วัสดุที่รับคลื่นไมโครเวฟจะมีอุณหภูมิสูงกว่าสิ่งต่างๆ โดยรอบ - สูญเสียความร้อนจากบริเวณพื้นผิวด้านหน้า <p>โดยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน</p>
<p><u>บริเวณพื้นผิวหน้ามีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณศูนย์กลาง</u></p>	<p><u>บริเวณศูนย์กลางมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณพื้นผิวหน้า</u></p>

จากตารางข้างต้นพบว่าการให้ความร้อนแบบทั่วไปมีข้อจำกัด เนื่องจากลักษณะสมบัติทางกายภาพของวัสดุ เช่น ความหนาแน่น ความจุความร้อน และการนำความร้อน เป็นต้น ในขณะที่คลื่นไมโครเวฟสามารถทำให้ความร้อนกระจายอย่างทั่วถึง ซึ่งทำให้ง่ายต่อการควบคุมระดับอุณหภูมิที่จะทำให้วัสดุนั้นร้อน จากข้อได้เปรียบนี้ทำให้กระบวนการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟจึงได้รับความสนใจมากในปัจจุบัน

2.3.6 ข้อดีของไมโครเวฟ (Evalueserve, 2005)

คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานความร้อนที่ทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยสามารถเร่งความเร็วของปฏิกิริยาได้ รวมถึงสามารถให้ผลผลิตที่มากกว่าและสม่ำเสมอกว่า อีกทั้งยังเป็นการให้ความร้อนแบบเจาะจง ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ช้าๆ

อย่างมากมาย และยังช่วยพัฒนาแนวทางการสังเคราะห์ที่สะอาดกว่าและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าด้วย

2.3.6.1 เพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา

เปรียบเทียบกับวิธีการให้ความร้อนทั่วๆ ไป การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 10 - 1,000 เท่า ความร้อนที่ได้มีประสิทธิภาพสูงช่วยในเรื่องของการประหยัดพลังงาน เพราะไมโครเวฟจะทำให้ตัวอย่างร้อนเท่านั้น ไม่ทำให้ส่วนประกอบอื่นๆ ของตัวร้อน จึงไม่มีการสูญเสียพลังงานไปในส่วนนี้

2.3.6.2 ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยามากขึ้น

การแผ่รังสีของไมโครเวฟจะให้ค่าผลิตภัณฑ์ ที่สูงกว่าวิธีการให้ความร้อนแบบอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยาเดียวกันแต่ใช้วิธีในการให้ความร้อนที่ต่างกันส่งผลให้ได้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่มากกว่าในกรณีที่ใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานความร้อน

ตารางที่ 2.10 เปรียบเทียบร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากรูปแบบการให้ความร้อนที่ต่างกัน

REACTION	CONVENTIONAL	MICROWAVE
Synthesis of fluorescein	70	82
Condensation of benzoine with urea	70	73
Biginelli reaction	70	75
Synthesis of aspirin	85	92

Source: Milestone s.r.l

2.3.6.3 การให้ความร้อนได้อย่างทั่วถึง

การให้ความร้อนทั่วๆ ไปนั้น ผนังของอ่างน้ำมันจะถูกทำให้ร้อนก่อนตัวทำละลาย ทำให้ความร้อนกระจายตัวในอ่างน้ำมัน ส่งผลให้อุณหภูมิของอ่างและตัวทำละลายมีความแตกต่างกัน แต่การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจะมีเพียงตัวทำละลายและอนุภาคที่ถูกละลายเท่านั้นที่ถูกกระตุ้น จากคุณสมบัติข้อนี้ทำให้สามารถวางขวดบรรจุสารที่ตำแหน่งใดก็ได้ภายในเตา

2.3.6.4 การให้ความร้อนได้อย่างเฉพาะเจาะจง

การให้ความร้อนที่เฉพาะเจาะจงแก่ตัวอย่างนั้นมีพื้นฐานมาจากหลักที่ว่า สารต่างชนิดกันจะมีการตอบสนองไมโครเวฟที่ต่างกัน สารบางประเภทจะยินยอมให้ไมโครเวฟทะลุผ่าน ในขณะที่บางประเภทจะถูกกั้น เช่น ในการผลิตโลหะซัลไฟด์ การให้ความร้อนทั่วๆ ไปจะใช้ระยะเวลาหลายสัปดาห์ ถ้ามีการเร่งการให้ความร้อนอย่างทันทีอาจทำให้กัมมันตระเบิดได้

ในขณะที่การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ตัวกำมะถันจะไม่คุดกลืนไมโครเวฟ แต่ตัวโลหะจะได้รับความร้อน ดังนั้นปฏิกิริยาสามารถสิ้นสุดได้อย่างรวดเร็วโดยไม่ทำให้เกิดการระเบิด

2.3.6.5 กระบวนการทางเคมีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะสะอาดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพราะไมโครเวฟจะให้ความร้อนแก่วัสดุโดยตรง ดังนั้นสารที่ใช้แล้วจึงสามารถลดปริมาณลงหรือกำจัดออกได้ และช่วยลดความไม่บริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาที่มีการเติมสารที่มีความเป็นพิษลงไป

2.3.6.6 เกิดปฏิกิริยาทางเคมีซ้ำใหม่ได้

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถทำซ้ำใหม่ได้มากกว่าวิธีการให้ความร้อนแบบอื่น เพราะการให้ความร้อนมีความเป็นรูปแบบและมีการควบคุมตัวแปรต่างๆ ได้ดีกว่า และสามารถตรวจวัดอุณหภูมิของปฏิกิริยาเคมีได้ง่าย

2.3.7 ข้อจำกัดของไมโครเวฟ

2.3.7.1 ข้อจำกัดด้านเครื่องมือ

ข้อจำกัดของเครื่องมือ ได้แก่ จะสามารถให้ความร้อนได้เฉพาะตัวอย่างที่มีการคุดกลืนไมโครเวฟเท่านั้น ปริมาณของสารที่เครื่องมือสามารถรองรับได้ในตอนนี้ยังอยู่ในระดับกรัมเท่านั้น จึงเป็นโจทย์สำคัญให้ผู้ผลิตทำการพัฒนาเครื่องมือให้สามารถนำไปใช้งานในระดับอุตสาหกรรมใหญ่ๆ ได้

2.3.7.2 ความปลอดภัยในการใช้งาน

แม้ว่าผู้ผลิตจะมีการป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นด้วยวิธีการต่างๆ แล้ว แต่ก็ยังไม่สามารถควบคุมปฏิกิริยาที่อาจเกิดการระเบิดของสารระเหยภายใต้เงื่อนไขความร้อนยิ่งยวดได้ หรืออย่างในปฏิกิริยาของกรดซัลฟิวริกอาจไปทำลายขวดบรรจุสารที่ทำจากพอลิเมอร์ด้วยอุณหภูมิของปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นถึง 300 °C ในระยะเวลาอันสั้น

2.3.7.3 ความเสี่ยงต่อสุขภาพ

การใช้งานไมโครเวฟอาจส่งผลต่อร่างกายได้ โดยในช่วงความถี่ต่ำ ไมโครเวฟจะสามารถทะลุผ่านชั้นผิวหนัง ส่วนในช่วงความถี่สูงจะทะลุผ่านอวัยวะต่างๆ ซึ่งร่างกายที่ได้รับไมโครเวฟเป็นระยะเวลานานอาจทำให้เนื้อเยื่อและเซลล์ของร่างกายตายและไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่ได้ หรืออาจจะไปทำลายสายดีเอ็นเอได้

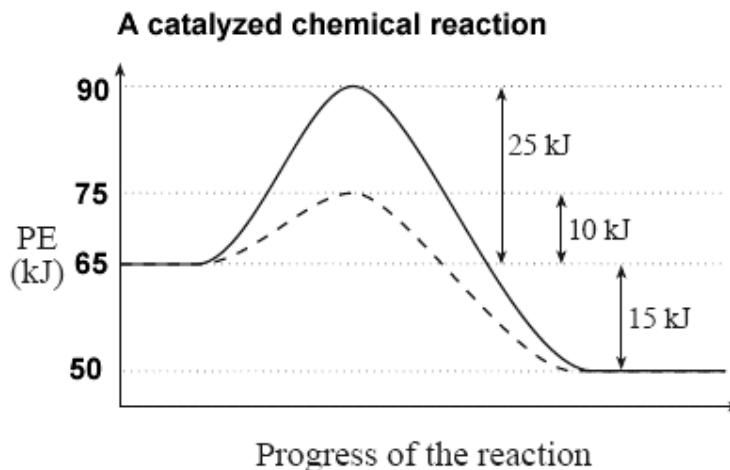
2.3.8 การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในงานเคมีความร้อน (Thermochemical conversion)

วัสดุที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน (Non-homogeneous materials) อาจไม่สามารถทำให้ร้อนได้อย่างสม่ำเสมอ กล่าวคือบางส่วนของวัสดุร้อนเร็วกว่าส่วนอื่น (Soongprasit, 2006) ปรากฏการณ์นี้มักจะทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นหมดไป ทั้งนี้สภาวะดังกล่าวสามารถทำให้น้อยลงได้โดยรักษาสภาพตัวอย่างให้อยู่ในสภาวะที่เป็นของผสมหรือเป็นสภาวะแบบฟลูอิดไคซ์ (Fluidized) ประสิทธิภาพการทำให้ร้อนด้วยไมโครเวฟต่อวัสดุกึ่งตัวนำ (Semiconductor material) ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิตั้งต้น ในความเป็นจริงแล้ววัสดุที่ต้องการทำให้ร้อน (dielectric) จะมีปฏิกิริยาตอบสนองต่อการทำให้ร้อนด้วยไมโครเวฟที่ระดับสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติ (Critical temperature) นอกจากนี้ความสามารถของการทำให้ร้อนด้วยไมโครเวฟยังขึ้นอยู่กับขนาดของวัสดุอีกด้วย เช่น โลหะขนาดเล็กละเอียดสามารถทำให้ร้อนด้วยไมโครเวฟได้ โดยกระบวนการไมโครอาร์คกิ้ง (Microarching process) นอกจากนี้วัสดุที่ต้องการทำให้ร้อนถูกทำให้ร้อนได้ด้วยวัสดุรับคลื่นไมโครเวฟ เช่น แม่เหล็ก ซิลิกอนคาร์ไบด์ หรือคาร์บอน การใส่วัสดุเหล่านั้นเพื่อเป็นตัวรับพลังงานคลื่นไมโครเวฟแล้วเปลี่ยนเป็นเป็นพลังงานความร้อนก่อน แล้วจึงส่งความร้อนนั้นไปสู่วัสดุจนวนต่อไป ดังเช่นงานวิจัยของ Domínguez และคณะในปี 2006 ที่ทำการเปรียบเทียบผลของการไพโรไลซิสเปลือกเมล็ดกาแฟด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบทั่วไปและแบบไมโครเวฟพบว่าชีวมวลไม่มีคุณสมบัติรับคลื่นไมโครเวฟ จึงจำเป็นต้องใส่ถ่านลงไปเพื่อเป็นตัวรับคลื่นไมโครเวฟ แต่ทั้งนี้ต้องใส่ในรูปของผสมระหว่างตัวอย่างกับถ่าน เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยที่ใช้วัสดุที่ไม่สามารถรับคลื่นไมโครเวฟได้โดยตรงจำเป็นต้องอาศัยตัวกลางเปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟเป็นพลังงานความร้อนตามที่ได้อธิบายมาแล้ว

2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี (Catalyst)

คำว่าตัวเร่งปฏิกิริยามาจากภาษากรีก 2 คำ คือคำว่าคะตะ (Cata) หมายถึงหัก (down) และคำว่าไลไซน์ (lysein) หมายถึงแยกหรือแตกออก (split or break) ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงหมายถึงตัวที่ทำให้เกิดการแตกหักของแรงที่เกิดขึ้นบนโมเลกุล ความหมายที่ขอมอบกันทั่วไปของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ “A substance that increases the rate at which a chemical system approaches equilibrium, without being consumed in the process” หรือก็คือสารที่เพิ่มอัตราการวิ่งเข้าหาจุดสมดุลของระบบปฏิกิริยาเคมีที่ตัวมันเองไม่ถูกใช้ในกระบวนการ

การใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยามีเป้าหมายเพื่อลดพลังงานกระตุ้น (Activation energy) ให้ต่ำลง โดยสร้างเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาใหม่ที่ต้องการพลังงานกระตุ้นน้อยกว่าเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาระหว่างระบบที่มีและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Saskatchewan Learning, 2006)

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา (Activity) สูงไม่สามารถบอกได้ว่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีได้เสมอไป เนื่องจากต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของระบบ เช่นบางปฏิกิริยามีการคายความร้อนสูงทำให้การควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ทำได้ยาก อีกทั้งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีทั้งเป็นที่ต้องการและไม่ต้องการ ดังนั้นจึงต้องมีการคำนวณหาค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา คำนวณได้จากปริมาณสารตั้งต้นที่เปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์นั้นๆ ต่อปริมาณสารตั้งต้นที่เปลี่ยนไปทั้งหมด ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีต้องได้ค่าสูง แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไปได้ระดับหนึ่งอาจเกิดการเปลี่ยนสภาพ เรียกว่าการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst deactivation) ซึ่งมีสาเหตุจากปฏิกิริยาข้างเคียงที่เกิดขึ้น การเปลี่ยนแปลงพลังงานในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาหรือสภาวะที่ใช้ในการทดลองเอง ทั้งหมดที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าการเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีนั้นไม่เพียงแต่พิจารณาความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาและค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการแล้ว ยังต้องคำนึงถึงเสถียรภาพ (Stability) ของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย เสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาหมายถึง ความสามารถในการรักษาความว่องไวในการทำปฏิกิริยาและค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้อยู่ในระดับสูงได้เป็นเวลานาน

2.4.1 ประเภทตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีเป็นสารช่วยควบคุมอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาโดยไม่ถูกใช้ไปในทางปฏิกิริยาเคมี แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.4.1.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะเดียวกับสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปจะอยู่ในสถานะของเหลว

2.4.1.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalyst) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้สถานะต่างกับสารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นของแข็ง ส่วนสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์จะอยู่ในรูปแก๊สหรือของเหลว ซึ่งนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรม เนื่องจากทนความร้อนและแรงกระแทกได้ดี การเก็บรักษาและการนำไปใช้งานง่ายกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์ เพราะไม่ต้องอาศัยตัวทำละลาย นอกจากนี้ยังสามารถแยกออกจากสารผลิตภัณฑ์ได้ง่าย ทำให้มีค่าใช้จ่ายต่ำ

ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์นั้นยังสามารถแบ่งออกเป็นประเภทย่อยๆ ได้อีก 2 ประเภท คือ กลุ่มของซีโอไลต์ (zeolite) หรือ โมเลกุลาร์ซีฟ (molecular sieve) และกลุ่มที่สองคือพวกที่ไม่ใช่ซีโอไลต์ ซึ่งยังสามารถแยกออกได้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะและตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นออกไซด์ ซัลไฟด์ ฯลฯ ของโลหะต่างๆ ซึ่งโลหะที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นเกือบทั้งหมดเป็นโลหะทรานซิชัน ซึ่งจัดว่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สำคัญสำหรับปฏิกิริยาที่มีไฮโดรเจน และไฮโดรคาร์บอนเข้ามาเกี่ยวข้อง ทั้งนี้เพราะโลหะเหล่านี้สามารถดูดซับสารตั้งต้นเหล่านี้ไว้บนผิวได้โดยหน้าที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์แต่ละประเภทถูกแสดงในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 แสดงหน้าที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์แต่ละประเภท (Bond G.C. 1987)

Class	Functions	Example
Metals	Hydrogenation Dehydrogenation Hydrogenolysis (Oxidation)	Fe, Ni Pd, Ag Pt
Semiconducting oxides And sulphides	Oxidation Dehydrogenation Desulphurization (Hydrogenation)	NiO, ZnO, MnO ₂ , Cr ₂ O ₃ , Bi ₂ O ₃ -MoO ₃ , WS ₂
Insulator	Dehydration	Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , MgO
Oxides Acids	Polymerization Isomerization Cracking Alkylation	H ₃ PO ₄ , H ₂ SO ₄ , SiO ₂ -Al ₂ O ₃ , Zeolite

2.4.2 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยสารหลายชนิดสามารถจำแนกได้ดังนี้

2.4.2.1 Active species เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีบทบาทในการเร่งปฏิกิริยาอย่างแท้จริง ปฏิกิริยาอาจประกอบด้วย active species เพียงอย่างเดียว แต่ในกรณีที่ active species เป็นสารที่มีราคาแพงหรือมีพื้นที่ต่ำ จะนิยมใช้วิธีเคลือบ active species ลงบนตัวรองรับ

2.4.2.2 ตัวรองรับ (Support) มักเป็นสารที่มีราคาไม่แพงและมีพื้นที่ผิวสูง โดยมีหน้าที่หลักในการเพิ่มพื้นที่ผิวให้แก่ active species นอกจากนี้หากเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างตัวรองรับและ active species แล้วจะทำให้ active species มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น โดยทั่วไปจะเลือกใช้ตัวรองรับที่เฉื่อยและไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ ในขณะที่ตัวรองรับบางประเภทจะมีส่วนช่วยในการทำปฏิกิริยาได้

โดยทั่วไปแล้วปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีวิวัฒนาการเกิดขึ้นกับอะตอมหรือไอออนที่อยู่บนพื้นผิวของ active species เท่านั้น ทั้งนี้อะตอมหรือไอออนที่อยู่ลึกลงไปจะไม่ได้สัมผัสของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งในกรณีที่ active species เป็นสารที่มีราคาแพง การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจึงต้องคำนึงถึงพื้นที่ผิวสุดท้ายของ active species คือปรากฏบนพื้นผิวให้มากที่สุด แนวทางหนึ่งคือการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีขนาดเล็กมากๆ แต่เมื่อใช้งานจริงพบว่าในงานที่ใช้อุณหภูมิสูงจะกลายเป็นโอกาสให้อนุภาคเล็กๆ เหล่านั้นหลอมรวมกัน ส่งผลให้พื้นที่ผิวลดลง อีกทางเลือกหนึ่งที่เป็นที่นิยมคือการนำ active species ไปเคลือบลงบนวัสดุอื่นที่มีพื้นที่ผิวมาก เรียกว่าตัวรองรับ (Support) ซึ่งนอกจากจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของ active species แล้ว ในบางกรณียังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของ active species ได้อีกด้วย ต่อมาได้มีการค้นพบว่าตัวรองรับมีส่วนร่วมในการทำปฏิกิริยาและมีส่วนช่วยให้ active species มีความเสถียรบนพื้นผิวในระหว่างการใช้งาน ตัวรองรับที่เป็นที่นิยมมากที่สุดคือสารประกอบออกไซด์อนินทรีย์ต่างๆ ซึ่งมีคุณสมบัติของตัวรองรับแบ่งตามลักษณะพื้นที่ผิว ดังตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 ตัวรองรับชนิดต่างๆ ตามลักษณะพื้นที่ผิว (ลาวัลย์ เชียร์ถาวร, 2535)

Low surface area < 1 m ² /g	Essentially	Ground glass
	Non-porous	Alundum (-Al ₂ O ₃) Silicon carbide
	Porous	Kieselguhr Pumice

High surface > 1m ² /g	Essentially	Natural silica-alumina
	Non-porous	Carbon black Titania Zinc oxide
	Porous	Natural clay Synthesis silica-alumina Alumina Magnesia Activated carbon Silica Asbestos

ปัจจัยในการเลือกใช้ตัวรองรับ ได้แก่

- มีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการ
- สมบัติเชิงกลและทางกายภาพตามต้องการ เช่น ความแข็ง ความทนทานต่อการกระแทก ความทนต่อแรงกดอัด เป็นต้น
- เสถียรภาพภายใต้สภาวะการทำงาน
- พื้นที่ผิวมาก
- ความเป็นรูพรุน ขนาดของรูพรุน และการแจกแจงขนาดของรูพรุน
- ราคาไม่แพง

มีตัวรองรับหลายชนิดที่ในอุตสาหกรรม แต่ที่เป็นที่นิยมได้แก่ อะลูมินา ถ่านกัมมันต์ แมกนีเซีย และไททาเนีย

2.4.2.3 โพรโมเตอร์ (Promoter) เป็นสารที่ไม่เกี่ยวข้องกับการเร่งปฏิกิริยาโดยตรง แต่ทำหน้าที่ช่วยให้ active species ทำงานได้ดีขึ้น เช่น ลดการเกิดการหลอมรวมตัวกันของโลหะ (Sintering) และลดการปนเปื้อน (Fouling) ลง

2.4.3 ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล (อนันต์ เศรษฐพฤทธิ, 2548)

2.4.3.1 การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลในปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่ง

โดยทั่วไปแล้วงานวิจัยที่เกี่ยวกับการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ จะกระทำที่ระดับอุณหภูมิสูง ซึ่งทำให้เกิดปัญหา เช่น ความปลอดภัย อย่างไรก็ตามหลังจากมีการค้นพบตัวเร่งปฏิกิริยาและได้นำมาใช้ในกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำแล้ว พบว่าโลหะแทรนซิชันหมู่ VIII B ในตารางธาตุ เช่น นิกเกิล โรเดียม รูทีเนียม โคบอลต์ และแพลทินัม มีความว่องไวในการทำ

ปฏิกิริยาฟอรัมมิ่งด้วยไอน้ำ ทำให้ได้รับความสนใจ แต่นิกเกิลมีปัญหาเรื่องการเกิดคาร์บอน ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดการเสื่อมสภาพ นอกจากนี้ยังเกิดปัญหาจากการหลอมรวมกันของโลหะในตัวเร่งปฏิกิริยาที่สภาวะอุณหภูมิสูง ทั้งนี้แนวทางการแก้ไขปัญหасสามารถทำได้โดย เติมโปรโมเตอร์ซึ่งจะช่วยปรับปรุงสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาหรือเลือกใช้ตัวรองรับที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม นิกเกิลเป็นโลหะที่ได้รับความสนใจมากที่สุด เนื่องจากราคาไม่สูงมากทำให้เกิดความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์

2.4.3.2 พื้นที่ผิวของนิกเกิล (nickel surface)

พื้นที่ผิวของนิกเกิลมีความสำคัญต่อความว่องไวเชิงปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล การกระจายของอิเล็กตรอนของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเซรามิก ($\text{Ni/MgAl}_2\text{O}_3$) ที่มีพื้นที่ผิว (S_{BET}) ประมาณ 1 ตารางเมตรต่อกรัม ผลึคนิกเกิลมีขนาด 15 – 150 นาโนเมตร มีการกระจายผลึกต่ำกว่าร้อยละ 0.5 แต่ในกรณีที่มีพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาสูงขึ้น เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา (Ni/MgO) มีพื้นที่ผิวประมาณ 17 ตารางเมตรต่อกรัม ผลึคนิกเกิลมีขนาด 20 – 25 นาโนเมตร การกระจายของผลึกอยู่ในช่วงร้อยละ 2 - 5 แต่ผลึกของนิกเกิลต่ำกว่า 5 นาโนเมตร การกระจายของผลึกอาจมีค่าถึงร้อยละ 10

ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของพื้นที่ของนิกเกิล

1. ปริมาณนิกเกิลบนตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อเพิ่มปริมาณนิกเกิลจะทำให้พื้นที่ผิวของนิกเกิลมากขึ้น และจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มมากขึ้นไปเรื่อยๆ
2. การทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาอว่องไวเชิงอุตสาหกรรม (Activation) ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่ถูกใช้ในอุตสาหกรรมสามารถทำให้ว่องไวเชิงปฏิกิริยาได้หลายวิธี โดยการเติมสารรีดิวซ์ (Reducing agent) ต่างกัน เช่น ใช้ไฮโดรเจนหรือแอมโมเนียเพียงอย่างเดียว หรือเติมไนโตรเจนหรือเติมไอน้ำ ซึ่งวิธีการรีดักชันที่ต่างกันมีผลทำให้พื้นที่ผิวของนิกเกิลและร้อยละของนิกเกิลที่ถูกรีดิวซ์ต่างกัน ปฏิกิริยาเป็นตามสมการ 2.25



3. การรวมตัวของนิกเกิลเนื่องจากความร้อน (Sintering) การรวมตัวของผลึคนิกเกิลเนื่องจากความร้อนทำให้พื้นที่ผิวของนิกเกิลลดลงเนื่องจากการกระจายตัวลดลง ส่งผลให้ความว่องไวเชิงปฏิกิริยาลดลงด้วย จากการศึกษาพบว่านิกเกิลรวมตัวกันเนื่องจากความร้อนก็ต่อเมื่ออุณหภูมิที่ใช้สูงกว่าอุณหภูมิแอมแมน (อุณหภูมิ ณ จุดหลอมเหลวมีหน่วยเป็นองศาสัมบูรณ์) เมื่ออุณหภูมิแอมแมนของนิกเกิลประมาณ 600 °C แต่พบว่าการเคลื่อนที่ของนิกเกิลเริ่มเห็นได้ที่อุณหภูมิยึดติดประมาณ 300 °C

2.4.4 ตัวรองรับ (Support)

ตัวรองรับส่วนใหญ่ใช้ทั้งอะลูมินา ซิลิกา และแมกนีเซียม การเปลี่ยนแปลงสภาพของตัวรองรับที่อุณหภูมิสูง โดยเฉพาะถ้าในระบบมีความดันย่อยของไอน้ำสูงจะสามารถทำลายคุณสมบัติที่มีของตัวรองรับ โดยทั่วไปมักมีการเติมพวกอัลคาไลน์ที่ทำหน้าที่เป็นโปรโมเตอร์ (Promoter) ลงไปในตัวรองรับด้วย เพื่อกำจัดการเกิดคาร์บอนสะสมบนตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้แอลคาไลน์อาจทำปฏิกิริยากับตัวรองรับ เช่น อะลูมินา โดยทำให้ความแข็งแรงของตัวรองรับลดลง

2.4.4.1 ตัวรองรับที่เป็นซิลิกา (SiO₂) มีข้อเสียที่สามารถระเหยเป็นซิลิกาเตตระไฮดรอกไซด์ (Si(OH)₄) ที่อุณหภูมิและความดันย่อยของไอน้ำสูงได้ ด้วยเหตุนี้ความนิยมใช้ซิลิกาจึงหมดไป

2.4.4.2 ตัวรองรับที่มีแมกนีเซียม (MgO) เป็นองค์ประกอบ แมกนีเซียมจะช่วยเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับที่สามารถทนอุณหภูมิสูงได้ แต่มีข้อเสียคือ แมกนีเซียมมีความว่องไวต่อไอน้ำที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ตามสมการที่ 2.26



ปฏิกิริยานี้สามารถทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาแตกได้ เพราะเกิดการขยายตัวของปริมาตรตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งค่าความดันย่อยของไอน้ำที่สภาวะสมดุลของปฏิกิริยานี้จะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ

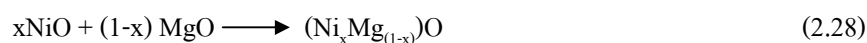
2.4.4.3 อะลูมินา (Al₂O₃) เป็นตัวรองรับที่ถูกใช้งานมากที่สุด เนื่องจากมีราคาไม่แพง โครงสร้างที่มีเสถียรภาพสูง (จุดหลอมเหลวมากกว่า 2000°C) และสามารถเตรียมให้มีขนาดรูพรุนและการกระจายตัวของรูพรุนต่างๆ ได้ อะลูมินาที่มีขายทั่วไปจะมีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 100 - 600 ตารางเมตรต่อกรัม ไปจนถึงโครงสร้างที่ไม่มีรูพรุน

2.4.5 ปฏิกิริยาระหว่างนิกเกิลกับตัวรองรับ

ในสภาวะที่อุณหภูมิสูงกว่านิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถทำปฏิกิริยากับตัวรองรับ เช่น อะลูมินา โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการ 2.27



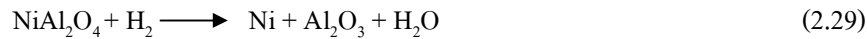
โดยทั่วไปนิกเกิลอะลูมิเนตเกิดขึ้นได้โดยอุณหภูมิต้องสูงกว่า 700 °C เช่นเดียวกับนิกเกิลออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมออกไซด์ได้ในกรณีที่ตัวรองรับมีแมกนีเซียมออกไซด์ผสมอยู่ด้วย ดังสมการที่ 2.28



ที่อุณหภูมิสูงจะมีสีเขียว เพราะเกิดระนาบของสารละลายของแข็ง (Solid solution) และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความเป็นผลึกลดลง

2.4.6 รีดักชัน

ในกรณีที่จะทำปฏิกิริยารีดักชันนิกเกิลอะลูมิเนียมจะต้องทำในภาวะที่รุนแรงกว่า นิกเกิลออกไซด์ ผลลัพธ์ที่ได้คือการรวมตัวกันของผลึกเนื่องจากความร้อนอย่างมาก โดยปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังสมการ 2.29



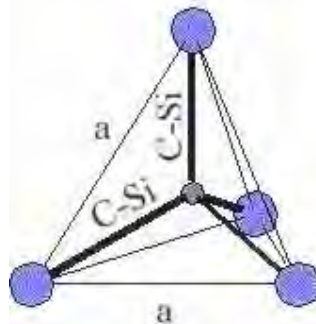
รูปของอะลูมินาหลังจากนิกเกิลอะลูมิเนียมเตกกิริวซ์ มักเป็นแกมมา (γ) หรือเดลตา (δ)-อะลูมินา ซึ่งในที่สุดจะเปลี่ยนเป็นแอลฟา (α)-อะลูมินา

2.5 ซิลิกอนคาร์ไบด์

ซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide; SiC) มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 40.07 มีความหนาแน่นเท่ากับ 3.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และไม่ได้เป็นสารที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ กล่าวคือเป็นสารที่ได้จากการสังเคราะห์ซึ่งผลิตจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างส่วนผสมของถ่านโค้ก (coke) ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอน (C) และทรายซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกา (SiO_2) โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นภายในเตาเผาไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูง การผลิตเชิงอุตสาหกรรมได้เริ่มเมื่อปลายศตวรรษที่ 19

2.5.1 คุณสมบัติของซิลิกอนคาร์ไบด์ (สุรพันธ์ บริสุทธี, 2536)

องค์ประกอบสำคัญในการผลิตคือ ทรายที่มีคุณภาพดี (SiO 99.5%) ถ่านโค้กปิโตรเลียมชนิดมีกำมะถันต่ำ และกระแสไฟฟ้าซึ่งได้จากการใช้แท่งแกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้า (electrode) เมื่อเตาไฟฟ้าทำงานจะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแท่งแกรไฟต์ ทำให้อุณหภูมิในเตาสูงถึง 2400°C ในเวลา 36 ชั่วโมง ที่ระดับอุณหภูมิดังกล่าวคาร์บอนกับซิลิกาสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกันได้อย่างสมบูรณ์และเกิดเป็นซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.30 จะเห็นว่าเป็นการสร้างพันธะที่มี 4 มุม (Tetragonal bonding) ของคาร์บอนถึง 4 ตัว ซึ่งเป็นอีกเหตุผลสนับสนุนคุณสมบัติของซิลิกอนคาร์ไบด์ในเรื่องของความแข็งซึ่งมีความใกล้เคียงกับเพชร



รูปที่ 2.31 โครงสร้างของซิลิกอนคาร์ไบด์ (www.ifm.liu.se/matephys/, 2005)

ซิลิกอนคาร์ไบด์มีความแข็งเท่ากับ 9 - 10 โมห์ มีสภาพนำความร้อน (Thermal conductivity) สูงคือเท่ากับ 700 บีทียู/นิ้ว/ตารางฟุต/ชั่วโมง/องศาฟาเรนไฮต์ มีค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) เท่ากับ 410 จิกะปาสคาล มีจุดหลอมเหลวที่ 4,892 ฟาเรนไฮต์ (2,700 °C) ซิลิกอนคาร์ไบด์มีความคงตัวสูง คือมีความต้านทานต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูง และไม่เกิดปฏิกิริยากับกรด แต่อาจเกิดปฏิกิริยากับสารจำพวกอัลคาไลและหมู่ธาตุแฮโรเจนได้ที่ระดับอุณหภูมิสูงมาก เนื่องจากความทนทานต่อการสึกกร่อนนี้จึงสามารถนำไปใช้ในงานตัดหรือแต่งพื้นผิวหน้าที่ไม่เรียบให้เรียบได้ วัสดุที่ใช้ในการผลิตได้แก่ ซิลิกาและปิโตรเลียม โคลก ซึ่งเมื่อสิ้นสุดการทำปฏิกิริยาแล้วจะถูกนำไปผ่านกระบวนการทางเคมีต่อหรือไม่ขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งานต่อตามมาตรฐานยุโรป (The European F.E.P.A)

2.5.2 ประเภทของซิลิกอนคาร์ไบด์และการใช้งาน

ซิลิกอนคาร์ไบด์แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

1) ซิลิกอนคาร์ไบด์สีเขียว มี 2 ชนิด

1.1) ชนิดสีเขียวอ่อน (Light green) มีความบริสุทธิ์ 99.8%

1.2) ชนิดสีเขียวเข้ม (Dark green) มีความบริสุทธิ์ 99.5%

ซิลิกอนคาร์ไบด์สีเขียวนี้ถูกใช้ในอุตสาหกรรมทำลวดให้ความร้อน (Heating element)

2) ซิลิกอนคาร์ไบด์สีดำ มีความบริสุทธิ์ 99.0% ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมสารขัดถู (Abrasive) และวัสดุทนไฟ

3) ซิลิกอนคาร์ไบด์สีเทา มีความบริสุทธิ์ 99.0% ถูกใช้ในอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟบางชนิดและด้านโลหะการ

สัดส่วนการใช้ประโยชน์จากซิลิกอนคาร์ไบด์แบ่งเป็นร้อยละ 33 ใช้ในด้านโลหะ ร้อยละ 50 ใช้ในอุตสาหกรรมสารขัดถู ส่วนที่เหลือในประโยชน์ด้านวัสดุทนไฟหรืออุตสาหกรรมเซรามิก และด้วยคุณสมบัติที่น่าสนใจของซิลิกอนคาร์ไบด์ เช่น มีสภาพนำความร้อนสูง มีความสามารถต่อต้านการเปลี่ยนแปลงความร้อนอย่างเฉียบพลัน มีความแข็งแรงขณะมีอุณหภูมิสูง (Hot strength) และมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อนต่ำ ดังนั้นจึงถูกนำไปใช้ประโยชน์สำหรับงานประเภทเตาเผา (Kiln furniture) ซีเมนต์และเบ้าหลอม เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถสังเคราะห์ซิลิกอนคาร์ไบด์แบบมีความโปร่งพรุน (Foamed) ซึ่งจะแตกตัวที่อุณหภูมิ 2,200 °C โดยไม่หลอม หากใช้กระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์จะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น 500 °C ซิลิกอนคาร์ไบด์ดังกล่าวถูกใช้ประโยชน์ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เตาเผาอุณหภูมิสูง ใช้เป็นฉนวนและใช้ประโยชน์ในการผลิตจรวด เป็นต้น

2.5.3 การประยุกต์ใช้ในงานที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Keller และคณะ, 2005)

ซิลิกอนคาร์ไบด์ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในงานที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีของตัวรองรับ ได้แก่ มีค่าความนำไฟฟ้าสูง (High thermal conductivity) มีความต้านทานต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูง (High resistance toward oxidation) มีความแข็งแรงทางกายภาพสูง (High mechanism strength) และมีความเฉื่อยในการเกิดปฏิกิริยา (Chemical inertness) ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นคุณสมบัติที่ซิลิกอนคาร์ไบด์มีอยู่ โดยเมื่อพิจารณาตัวรองรับที่เคยใช้ เช่น ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูง อะลูมินา และสารจำพวกออกไซด์ พบว่ามีข้อจำกัดที่ทำให้เกิดความเสียหายต่องานที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น

- มีความคงทนเชิงกลต่ำ (Low mechanical stability) ทำให้เกิดการแตกหักบริเวณพื้นผิวของตัวรองรับหรือทำให้เกิดความเสียหายแก่ตัวเร่งปฏิกิริยาได้
- มีความทนทานต่ออุณหภูมิต่ำ (Low thermal stability) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกับตัวรองรับเอง และนำไปสู่การเกิดฮอตสปอต (Hot spot) ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาหรือเกิดสถานะที่ไม่ต้องการในการทดลองนั้นๆ ขึ้น
- เกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างตัวรองรับกับของผสม หรือเกิดกับตัวมันเองในบริเวณที่ถูกกระตุ้น นำไปสู่การเกิดสารประกอบใหม่ๆ เป็นผลให้สูญเสียบริเวณแอคทีฟ (Active phase) และตามด้วยการสูญเสียปฏิกิริยาเร่งในการทดลองนั้นๆ

จากปัญหาข้างต้นทำให้ซิลิกอนคาร์ไบด์ได้รับความสนใจถึงระดับอุตสาหกรรม ถึงแม้ว่าการใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นตัวรองรับจะมีข้อจำกัดในเรื่องของพื้นที่ผิว เนื่องจากซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ผลิตออกมานั้นอยู่ในรูปผง (Powder) ทำให้มีปัญหาเนื่องจากรูปร่างและขนาดพื้นผิว อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันได้รับการพัฒนาโดยปรับปรุงกระบวนการเตรียมการผลิต และกระบวนการสังเคราะห์ให้ซิลิกอนคาร์ไบด์มีพื้นที่ผิวมากขึ้น

ในด้านงานการทำให้อุ่นด้วยไมโครเวฟ (Microwave Encyclopedia, 2005) ซิลิกอนคาร์ไบด์จัดเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric substance) ซึ่งสามารถรับพลังงานคลื่นไมโครเวฟได้ โดยมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant; ϵ_r) เท่ากับ 10.8 (Microwave encyclopedia, 2007) ค่าดิสซิเพชันแฟกเตอร์ (Dissipation factor; $\tan\delta$) เท่ากับ 0.003 และมีค่าความร้อนจำเพาะ (Specific heat) เท่ากับ 0.69 จูล/กรัม/องศาเซลเซียส

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 การแปรสภาพชีวมวลเป็นแก๊สสังเคราะห์

สิทธิศักดิ์ อุปรวิงศ์ (2535) ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ของเตาไพโรไลซิสแบบไหลขึ้น เตาที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ใช้ขดลวดไฟฟ้าให้ความร้อนแก่ชีวมวลแทนการเผาไหม้เชื้อเพลิง เพื่อไม่ให้รบกวนการศึกษาในขั้นปฏิกิริยาไพโรไลซิสและขั้นปฏิกิริยา

รีคักชัน ภายในเตาที่มีสภาพอับอากาศ (ไร้ออกซิเจน) โดยการให้แก๊สอาร์กอนเข้าแทนที่ ชีวมวลที่ใช้ได้แก่ แกลบและขี้เลื่อยอัด ผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิของเตาเพิ่มขึ้น ผลผลิตก๊าซที่เป็นแก๊สเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้น แต่น้ำมันดินและถ่านถ่านชาร์ลดลง อีกทั้งค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนปริมาณแก๊สเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นถ้าความหนาของชั้นชีวมวลเพิ่มขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่ารูปทรงของเตาไฟโรไลซิสแบบพอมสูงน่าจะให้ผลดีกว่ารูปทรงเตาแบบอ้วนเตี้ย

อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย (2538) ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของการผลิตแก๊สชีวมวลจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้เครื่องกำเนิดแก๊สแบบเบดนิ่งโดยใช้แกลบ โดยศึกษาปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 650 - 900 °C ที่ความดันบรรยากาศ และค่าอัตราการไหลของอากาศ 0.12 ถึง 0.32 ลูกบาศก์เมตร/นาที่ ผลการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สชีวมวลในเครื่องกำเนิดแก๊สแบบเบดนิ่ง คือ ที่อุณหภูมิของการทดลอง 850 °C และอัตราการไหลของอากาศ 0.2 ลูกบาศก์เมตร/นาที่ แก๊สชีวมวลที่ได้มีปริมาณร้อยละโดยปริมาตรของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 8.46 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละโดยปริมาตร 5.12 แก๊สไฮโดรเจนร้อยละโดยปริมาตร 7.78 และแก๊สมีเทนร้อยละโดยปริมาตร 0.83 ค่าความร้อนของแก๊สชีวมวล 671.79 กิโลแคลอรี/ลูกบาศก์เมตร

Turn และคณะ (1998) ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจากชีวมวล โดยใช้ขี้เลื่อยเป็นวัตถุดิบ ทำการทดลองโดยป้อนวัตถุดิบเข้าเตาปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยการให้ระบบสกรู กำหนดค่าอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนกับเชื้อเพลิง (Equivalence Ratio) เท่ากับ 0 - 0.37 ใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 750 - 950 °C และป้อนไอน้ำเข้าสู่ระบบด้วยอัตราส่วนของไอน้ำต่อเชื้อเพลิงเท่ากับ 1.1 - 4.7 พบว่าการทดลองที่สภาวะ Equivalence Ratio เท่ากับ 0 อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 850 °C และใช้อัตราส่วนไอน้ำต่อเชื้อเพลิงเท่ากับ 0.17 จะมีค่าการผลิตไฮโดรเจนที่สูงที่สุดในการศึกษาคือ 165 กรัมต่อปริมาณการป้อนวัตถุดิบ 1 กิโลกรัม

Chen และคณะ (2003) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิสและแก๊สซิฟิเคชันของชีวมวลในการผลิตแก๊สในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ซึ่งมีความสูง 750 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร ชีวมวลที่ใช้ศึกษาคือฟางข้าวและขี้เลื่อยไม้สน อุณหภูมิในการทดลองคือ 500 ถึง 950 °C จากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นผลผลิตก๊าซแก๊สจะเพิ่มขึ้น ส่วนถ่านชาร์และน้ำมันดินจะลดลง และเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาของสารระเหยมากขึ้นพบว่าจะมีแก๊สผลิตเพิ่มขึ้น

วิฑูรย์ อบรม และคณะ (2549) ศึกษาการวัดปริมาณแก๊สชีววมวลในระบบ แก๊สซิฟิเคชัน ทดลองโดยใช้เตาผลิตแก๊สชีววมวลแบบอากาศไหลเข้าจากด้านล่างสู่ด้านบน ไหลเข้าจากด้านบนสู่ด้านล่าง และไหลเข้าตรงกลางและออกตรงกลาง การศึกษาจะพิจารณาถึง ปริมาณแก๊สมีเทนและคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมที่ผ่านในระบบ ปริมาณความชื้นของแกลบ และลักษณะการเผาไหม้ในเตาแต่ละรูปแบบ เตาที่สร้างขึ้น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 48 เซนติเมตร สูง 78 เซนติเมตร มีห้องเผาไหม้เป็นรูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร และสูง 30 เซนติเมตร ผนังทำด้วยซิเมนต์ทนไฟ ผลของการทดลองในการเปลี่ยนตัวแปร ปริมาณความเร็วลมในระบบ และปริมาณความชื้นของแกลบ พบว่าเตาแบบอากาศไหลเข้าจากด้านล่างสู่ด้านบนให้ปริมาณมีเทนสูงที่สุด และเตาแบบอากาศไหลเข้าตรงกลางและออกตรงกลางให้ปริมาณมีเทนน้อยที่สุด ปริมาณอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตา ประมาณ 710 °C ซึ่งในการทดลองนี้ใช้แกลบที่มีความชื้นที่ร้อยละ 50 และร้อยละ 25 เป็นวัสดุในการเผาไหม้ จากการทดลองพบว่าเตาที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สคือเตาแบบอากาศไหลเข้าจากด้านล่างสู่ด้านบนที่มีความเร็วอากาศ 1.8 เมตรต่อวินาที ความชื้นแกลบร้อยละ 50 ได้มีเทนอยู่ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 2.5

Wu และคณะ (2006) ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนสำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็น เชลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนจากเศษไม้เหลือใช้ด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันและเทคโนโลยีรีฟอร์มมิ่ง ทดลองโดยใช้เศษไม้ที่เหลือจากการสร้างอาคารบ้านเรือนเป็นวัตถุดิบตั้งต้น ทดลองที่อุณหภูมิ 750-950 °C และใช้อัตราส่วนไอน้ำต่อเชื้อเพลิงเท่ากับ 0-0.44 Equivalence Ratio เท่ากับ 0-0.57 พบว่าสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้สูงสุดคือ 54 vol.%

Yang และคณะ (2006) ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของโยปาล์ม กะลาปาล์ม และทะเลปาล์ม โดยใช้เตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการ คือ อุณหภูมิ residences time และตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้อุณหภูมิในการทดลองที่ 500 – 900 °C โดยอุณหภูมิ 900 °C จะได้ผลิตภัณฑ์แก๊สสูงที่สุด โดยได้แก๊สไฮโดรเจนร้อยละ 33.49 แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 41.33 แก๊สมีเทนร้อยละ 11.92 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 10.78 แก๊สอะเซทิลีนร้อยละ 2.42 และแก๊สอีเทนร้อยละ 0.02 และที่ residences time 9 วินาที เป็นเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการให้ผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจน (10.40 กรัม/กิโลกรัมของชีววมวล) และผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ เช่น นิกเกิล อะลูมิเนียมออกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนต โพแทสเซียมคาร์บอเนต พบว่านิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีที่สุด โดยได้แก๊สไฮโดรเจน 29.78 กรัม/กิโลกรัมของชีววมวล

ชนิดา มฤคทัต (2550) ศึกษาการแปรสภาพกากสบู่ดำโดยกระบวนการไพโรไลซิสแบบขั้นเบดนิ่ง ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้จะศึกษาปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแปรสภาพกากสบู่ดำด้วยกระบวนการไพโรไลซิส โดยใช้เตาปฏิกรณ์ควอตซ์แบบขั้นเบดนิ่ง ใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สพา อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองคือ 500, 700 และ 900 °C วิเคราะห์แก๊สที่ได้ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 900 °C จะมีปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นมากที่สุด และจากการนำน้ำมันดินที่เกิดขึ้นไปวิเคราะห์พบว่าประกอบด้วยกรดไขมันที่สำคัญ 4 ชนิด คือ ปาล์มมิติก สเตริลลิก โอลิสิก และไลโนเลอิก

Xiao และคณะ (2007) ศึกษากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของโพรลิวินในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันแบบฟลูอิดไดซ์ ทดลองที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 690-950 °C อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 1.8-3.9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการป้อนอากาศ 6-12 N m³/h Equivalence Ratio เท่ากับ 0.2-0.5 ผลการศึกษาพบว่าสามารถผลิตแก๊สที่มีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 5.2-11.4 MJ/N m³

Slimm และคณะ (2008) ศึกษาความเป็นไปได้ในการทำสตีมรีฟอร์มมิ่งกลีเซอรอล ซึ่งมีเมทานอลและสารเป็นจำพวกไขมันเป็นสิ่งเจือปนหลักจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเพื่อผลิตเป็นแก๊สไฮโดรเจน โดยใช้แพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในการทดลองได้นำกลีเซอรอลมาเจือจางกับน้ำตามอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน (steam/carbon ratio) ที่ต้องการ แล้วป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ ทั้งนี้ใช้แพลทินัมเท่ากับ 3 กรัม เตาปฏิกรณ์มีปริมาตรเท่ากับ 4.8 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีอัตราไหลแก๊สรวมสูงสุดถึง 60 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าที่ระดับอุณหภูมิสูงสุดที่ทดลองซึ่งเท่ากับ 880 °C อัตราการป้อนกลีเซอรอลเท่ากับ 0.12 โมลต่อนาที พร้อมๆ กับแพลทินัม 1 กิโลกรัม และใช้อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 2.5 ให้ผลการทดลองดีที่สุด และการทดลองนี้ยังชี้ให้เห็นว่าการนำกลีเซอรอลมาผลิตเป็นแก๊สสังเคราะห์มีความคุ้มทุนมากกว่าการนำไปผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์

Skoulou และคณะ (2008) ศึกษาแก๊สซิฟิเคชันเมล็ดของผลโอลีฟและเศษไม้จากต้นโอลีฟ โดยใช้อุณหภูมิในช่วง 750-950 °C และแปรค่าอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงในช่วง 0.14-0.42 ภายใต้อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ ในแต่ละชุดการทดลององค์ประกอบหลักๆ ของแก๊สที่ได้คือ CO, CO₂, H₂ and CH₄ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการแก๊สซิฟิเคชันด้วยอากาศที่ 950 °C จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมากที่สุด ปริมาณแก๊สสังเคราะห์จะมากขึ้นตามระดับอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ ในขณะที่ CO₂, CH₄ ไฮโดรคาร์บอนตัวเล็กๆ และน้ำมันทาร์จะเกิดตรงกันข้าม การเพิ่มอัตราส่วนระหว่างแก๊สต่อเชื้อเพลิงจะมีผลต่อการลดปริมาณการผลิตแก๊สสังเคราะห์ และจะทำให้ได้แก๊สที่มีค่า heating value ที่ต่ำ ในขณะที่น้ำมันทาร์จะถูกสลายได้ดี

Valliyappan (2008) ศึกษาการไพโรไลซิสและแก๊สซิฟิเคชันแบบใช้ไอน้ำของ ก๊าซเซอรอลที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ โดยกำหนดอัตราการไหล ของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 30 ถึง 70 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราส่วนของไอน้ำต่อก๊าซเซอรอลเท่ากับ 0:100 และ 50:50 อุณหภูมิ 650 ถึง 800 °C อัตราการป้อนก๊าซเซอรอลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์เท่ากับ 5.4 กรัมต่อชั่วโมง ทดลองที่ความดันบรรยากาศและใช้เตาปฏิกรณ์แบบอากาศไหลเข้าจากด้านบนสู่ ด้านล่าง เตาปฏิกรณ์มีความยาวเท่ากับ 55 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 10.5 มิลลิเมตร พบว่าอุณหภูมิและอัตราการไหลของแก๊สมีผลต่อปริมาณการเปลี่ยนก๊าซเซอรอล ไปเป็นผลิตภัณฑ์ กล่าวคือ เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สพบว่าปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์และถ่านชาร์ จะมีปริมาณลดลง แต่น้ำมันดินจะมีปริมาณมากขึ้น แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิพบว่าปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ และถ่านชาร์จะเพิ่มมากขึ้น ส่วนน้ำมันดินจะมีปริมาณลดลง ซึ่งจากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 800 °C และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 50 มิลลิลิตรต่อนาที จะได้ปริมาณ แก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากับ 1.05

2.6.2 การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในงานการเปลี่ยนแปลงทางเคมีด้วยความร้อน

Dominguez และคณะ (2006) ศึกษาการไพโรไลซิสเปลือกกาแฟโดยเปรียบเทียบ ปริมาณและลักษณะสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวิธีการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน คือ การให้ ความร้อนแบบทั่วไป (conventional pyrolysis) โดยใช้เตาหลอมไฟฟ้า และวิธีใช้คลื่นไมโครเวฟ (microwave pyrolysis) โดยใช้เตาไมโครเวฟ ระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองได้แก่ 500, 800 และ 1000 องศา พบว่าสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ในสถานะแก๊สมีปริมาณมากกว่าสถานะอื่น ที่ระดับ อุณหภูมิเดียวกันพบว่าวิธีแบบใช้คลื่นไมโครเวฟให้แก๊สมากกว่าแบบใช้เตาหลอมไฟฟ้า ผลิตภัณฑ์ ที่เป็นน้ำมันของไมโครเวฟจะมีปริมาณน้อยกว่า ปริมาณแก๊สสังเคราะห์จากไมโครเวฟมากกว่า คือ MWP มี H₂ และ CO เป็นองค์ประกอบอยู่มากกว่า 40% และ 72% โดยปริมาตรตามลำดับ ในขณะที่ CP มี H₂ และ CO เป็นองค์ประกอบอยู่มากกว่า 30% และ 53% โดยปริมาตรตามลำดับ

Wang และคณะ (2007) ศึกษาความแตกต่างในการทำไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟ และเตาความร้อน โดยใช้ระบบฟลูอิดไดซ์เบด ใช้ตัวอย่างชีวมวล 3 ประเภท ได้แก่ จี๊เลื้อย เปลือกถั่วลิสง และซังข้าวโพด การทำให้แห้งด้วยไมโครเวฟจะใช้ระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟที่ 200, 400, 600 และ 800 วัตต์ ส่วนการทำให้แห้งด้วยเตาความร้อนจะใช้ที่ระดับอุณหภูมิ 105 °C จากการศึกษพบว่า การให้ความร้อนด้วยเตาไมโครเวฟมีผลต่อการระเหยน้ำอย่างมาก คือสามารถ ระเหยน้ำออกได้อย่างรวดเร็ว การระเหยน้ำนี้สิ้นสุดภายในระยะเวลา 6 นาที เมื่อใช้พลังงานคลื่น ไมโครเวฟที่ 600 วัตต์ เมื่อเทียบกับเตาความร้อนพบว่าใช้เวลาถึง 40 นาที จากนั้นนำชีวมวลเข้าสู่ กระบวนการไพโรไลซิสด้วยเตาไมโครเวฟ (ใช้ชีวมวลที่ระเหยน้ำออกที่ 600 วัตต์ 6 นาที เป็น

ตัวแทน) และเตาความร้อนที่อุณหภูมิเดียวกันคือ 500 °C วิเคราะห์ลักษณะสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟพบว่า เป็นผลิตภัณฑ์ถ่านและน้ำมันมาก ในขณะที่ผลิตภัณฑ์แก๊สน้อย เมื่อเทียบกับการให้ความร้อนโดยเตาความร้อน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ใช้ต่ำเกินไป และใช้ residence time ต่ำ คือประมาณ 1 วินาที นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากไมโครเวฟยังมี CO₂ ที่สูงกว่า แต่มีองค์ประกอบอินทรีย์ในถ่านชาร์น้อยกว่า ในขณะที่เดียวกันน้ำมันที่ได้จากการใช้ไมโครเวฟมีความหนืดและค่าความร้อนสูงกว่า เนื่องจากน้ำในชีวมวลถูกระเหยออกไปมาก ทำให้น้ำหนักของโมเลกุลเฉลี่ยสูงขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการใช้ไมโครเวฟทำให้เกิดปฏิกิริยาแบบทุติยภูมิของสารที่ระเหยได้ (volatile) ระหว่างที่ทำไพโรไลซิส ลักษณะของน้ำมันที่มีค่าความร้อนสูงและมีองค์ประกอบของน้ำต่ำทำให้ช่วยเพิ่มศักยภาพของผลิตภัณฑ์ในการนำไปใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิง ดังนั้นการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมและให้ผลดีในการระเหยน้ำออกจากชีวมวลก่อนเข้าสู่กระบวนการฟาสต์ไพโรไลซิส (fast pyrolysis) ต่อไป

Huang และคณะ (2008) ศึกษาการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากฟางข้าวโดยใช้เตาไมโครเวฟแบบซิงเกิลโหมด ความถี่ 2.45 GHz ที่ระดับพลังงาน 400-500 วัตต์ หลอดทดลองทำจากควอartz มีความยาว 40 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 5 เซนติเมตร ทดลองโดยใช้ตัวอย่าง 3-5 กรัม ใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สพาด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 50 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อภายในหลอดทดลองอยู่ในสภาวะขาดออกซิเจนแล้ว จึงเปิดเครื่องไมโครเวฟและปรับระดับพลังงานไปตามที่ต้องการ เมื่อสิ้นสุดการทดลองจึงปิดเครื่องไมโครเวฟและปิดแก๊สพา ผลการทดลองพบว่าระดับพลังงานไมโครเวฟและขนาดตัวอย่างมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา ที่ระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟต่ำให้ผลเป็นที่น่าพอใจ แต่ตัวอย่างต้องมีขนาดเล็กมาก โดยที่ประมาณครึ่งหนึ่งของตัวอย่างถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่มีไฮโดรเจนสูง ซึ่งประกอบด้วย H₂ 55% โดยปริมาตร CO₂ 17% โดยปริมาตร CO 13% โดยปริมาตร และ CH₄ 10% โดยปริมาตร

Fidalgo และคณะ (2008) ศึกษาการผลิตแก๊สมีเทนจากถ่านกัมมันต์ด้วยปฏิกิริยาดรายรีฟอร์มมิง (dry reforming) ในงานวิจัยนี้ถ่านกัมมันต์ถูกใช้เป็นที่ตั้งคะตะลิสต์และตัวรับคลื่นไมโครเวฟ ในการทดลองเบื้องต้นทำการเปรียบเทียบระหว่างการให้ความร้อนด้วยเตาไมโครเวฟและเตาให้ความร้อนพบว่าทั้งสองวิธีสามารถเปลี่ยน CO₂ เป็น CH₄ ได้ แต่ไมโครเวฟให้ผลการทดลองดีกว่า คือ สามารถเปลี่ยนรูปของ CH₄ และ CO₂ ได้ ดังนั้นการทดลองนี้จึงศึกษาต่อถึงสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะอัตราส่วนระหว่าง H₂ ต่อ CO ที่มากที่สุด โดยแปรผันตัวแปรต่างๆ สำหรับระดับอุณหภูมิที่ใช้พบว่าช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 700 ถึง 800 °C ซึ่งเชื่อว่าเป็นช่วงอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการรวมกันระหว่างปฏิกิริยาการสลายตัวของ CH₄ และปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของ CO₂ คาร์บอนที่เกิดจากการสลายตัวของ CH₄ ถูกแก๊สซิฟายโดย CO₂

ทำให้บริเวณการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง สรุปได้ว่าไมโครเวฟช่วยให้เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ CO_2 ไปเป็น CH_4 ได้ดีกว่าเตาให้ความร้อน เนื่องจากการใช้ไมโครเวฟทำให้เกิดปฏิกิริยาแบบ heterogeneous catalytic ยิ่งมี CO_2 มากก็ยิ่งเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนรูปมาก และทำให้อัตราส่วนระหว่าง H_2 ต่อ CO น้อยลง

2.6.3 การผลิตแก๊สสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

สุพัตรา ชีวชนาคกุล (2546) ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจากชีวมวลที่อุณหภูมิ 550 - 800 °C งานวิจัยนี้ทดลองใช้ไม้ยูคาลิปตัส 15 กรัม โดยมีการป้อนไอน้ำที่อัตราการป้อนคือ 0.15 - 2.10 กรัม/ชั่วโมง/กรัมของชีวมวล โดยศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ 1:1 โดยประมาณ พบว่าภาวะที่เหมาะสมคือ อัตราการป้อนไอน้ำ 0.15 กรัม/ชั่วโมง/กรัมของชีวมวล และอุณหภูมิ 550 °C ได้แก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 1:1.612 และเมื่อใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ที่อัตราการป้อนไอน้ำ 0.15 กรัม/ชั่วโมง/กรัมของชีวมวล ที่อุณหภูมิ 550 °C พบว่าแก๊สสังเคราะห์ที่ได้มีอัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 0.96

Sun และคณะ(2005) ศึกษาการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากมีเทนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนซิลิกอนคาร์ไบด์ (Ni/SiC) ในเตาปฏิกรณ์ควอร์ทแบบเบดนิ่ง โดยเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจากวิธีแช่แบบเปียก (Impregnation) ซึ่งแช่ซิลิกอนคาร์ไบด์ในสารละลายนิกเกิลในเตรท แล้วนำไประเหยน้ำออกที่ 100 °C และนำไปเผา (Calcinations) ที่ 700°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แปรผันร้อยละของนิกเกิลบนตัวซิลิกอนคาร์ไบด์เป็น 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก จากนั้นรีดิวซ์ด้วยแก๊สไฮโดรเจนที่ 350°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนใช้งาน ระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง 500-750°C ผลการทดลองพบว่าที่ปริมาณนิกเกิลบนซิลิกอนคาร์ไบด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และที่ระดับอุณหภูมิสูงสุดจะมีระดับการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด คือมีการเปลี่ยนรูปของมีเทนไปเป็นแก๊สสังเคราะห์ได้มากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบผลของการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนใช้พบว่าไม่มีความแตกต่างระหว่างผลการทดลองที่ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกรีดิวซ์และไม่ถูกรีดิวซ์ ร้อยละการเปลี่ยนรูปของแก๊สมีเทนเท่ากับ 75 และเนื่องจากความคงตัวของซิลิกอนคาร์ไบด์ ทำให้การรีเจนเนอเรชันเป็นไปได้ง่ายโดยการเผาที่ 750°C เป็นเวลา 20 นาที ซึ่งการเสื่อมของตัวเร่งปฏิกิริยานี้เนื่องจากการทับถมกันของคาร์บอนบนบริเวณแอคทีฟของนิกเกิล แต่อย่างไรก็ตามพบว่าที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของนิกเกิลบนซิลิกอนคาร์ไบด์สามารถใช้ได้อย่างต่อเนื่องถึง 100 ชั่วโมง ที่ระดับอุณหภูมิเท่ากับ 750°C ซึ่งถือว่าเป็นระดับอุณหภูมิสูงสุด

Liu และคณะ (2008) ศึกษาการผลิตแก๊สสังเคราะห์ด้วยการรีฟอร์มมิ่งคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้นิกเกิลบนซัลโฟนิกคาร์ไบด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาใช้วิธีแช่แบบเปียก (Impregnation) โดยหลังจากแช่ซัลโฟนิกคาร์ไบด์ในสารละลายนิกเกิลไนเตรดแล้ว นำไประเหยน้ำที่ระดับอุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และนำไปเผา (Calcined) 650°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ก่อนการทดลองนำตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการรีดิวซ์ที่ 700°C ที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 20 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง ในขั้นตอนการทดลองใช้ระดับอุณหภูมิเท่ากับ 750°C และแปรผันร้อยละของนิกเกิลบนซัลโฟนิกคาร์ไบด์เท่ากับ 1, 3, 5, 7 และ 9 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองพบว่าที่ปริมาณร้อยละนิกเกิลที่ 1, 3, 5 และ 7 จะมีระดับการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณนิกเกิล แต่เมื่อเพิ่มสูงกว่าร้อยละ 7 พบว่าระดับการเกิดปฏิกิริยาที่ได้ลดลง เนื่องจากพบว่าการกระจายตัวของอนุภาคนิกเกิลบนพื้นผิวซัลโฟนิกคาร์ไบด์ลดลงและโลหะนิกเกิลยังมีพื้นที่ผิวลดลงอีกด้วย

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากกลีเซอรอลดิบโดยใช้เทคโนโลยีพลังงานชีวมวล เฉพาะด้านการเปลี่ยนแปลงเคมีความร้อน ได้แก่ กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis process) และกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification process) แบบเหนียวนำด้วยไมโครเวฟ โดยทำการศึกษาผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ทั้งในด้านปริมาณและประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Cold gas efficiency) ศึกษาคุณภาพของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากค่าความร้อนต่ำ และอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ (H_2/CO) และศึกษาประสิทธิภาพด้านพลังงานจากการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนในวัตถุดิบไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ และค่าร้อยละประสิทธิภาพเชิงความร้อน (% cold gas efficiency) โดยมีขั้นตอนการศึกษาและวิธีการทดลองดังนี้

1. วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย
2. การเตรียมวัตถุดิบและเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย
3. ตัวแปรที่ทำการศึกษา
4. การดำเนินงานวิจัย แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

- 4.1 ศึกษาลักษณะทางเคมีและสมบัติทางความร้อนของกลีเซอรอลดิบและศึกษาผลของสิ่งเจือปนจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์
- 4.2 ศึกษาผลของอัตราไหลแก๊สเข้ารวม อัตราส่วนออกซิเจนต่อเชื้อเพลิง และระดับอุณหภูมิ ต่อการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยความร้อนเพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์
- 4.3 ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น
5. การวิเคราะห์ผลงานวิจัย
 - 5.1 ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น: ผลิตภัณฑ์แก๊ส (ลิตร/นาทีก) และร้อยละประสิทธิภาพเชิงความร้อน (% Cold gas efficiency)
 - 5.2 คุณภาพของแก๊สผลิตภัณฑ์: ค่าความร้อนต่ำ (LHV) และค่าอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ (H_2/CO)
 - 5.3 ประสิทธิภาพด้านพลังงาน: ร้อยละการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนในวัตถุดิบไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ และร้อยละประสิทธิภาพเชิงความร้อน (% Cold gas efficiency)

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 การเตรียมกลีเซอรอลดิบที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุ

1. กลีเซอรอลดิบจากโรงงาน AI Energy

อุปกรณ์

- | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| 1. ตะแกรงร่อนขนาด 20 เมสซ์ | 3. เครื่องทำความร้อน (Hot plate) |
| 2. บีกเกอร์ขนาด 100-500 มิลลิลิตร | 4. เครื่องชั่งสาร |
| จำนวน 3-4 ใบ | |

3.1.2 การเตรียมเตาปฏิกรณ์พร้อมชั้นเบด

วัสดุ

- | | |
|------------------------------------|-------------------------|
| 1. ซิลิกอนคาร์ไบด์ (ขนาด 16 เมสซ์) | 2. เม็ดเซรามิก 4-5 เม็ด |
|------------------------------------|-------------------------|

อุปกรณ์

- | | |
|----------------------------------|-------------------|
| 1. เตาปฏิกรณ์ควอร์ต (รูปที่ 3.1) | 2. เครื่องชั่งสาร |
| 3. เตาระเหยน้ำ | 4. เตาเผา |

3.1.3 การเตรียมเบดตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SiC

วัสดุ

- | | |
|------------------------------------|---|
| 1. ซิลิกอนคาร์ไบด์ (ขนาด 16 เมสซ์) | 2. สาร $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ |
| | 3. แก๊สไฮโดรเจน |

อุปกรณ์

- | | |
|--|-----------------------------------|
| 1. เครื่องชั่งสารแบบละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) | 5. แท่งแก้ว |
| 2. บีกเกอร์ | 6. ถ้วยเผา (Crucible) |
| 3. น้ำกลั่น | 7. เตาระเหยน้ำ |
| 4. ซ้อนตักสาร | 8. เตาเผา |
| | 9. ตู้ควบคุมความชื้น (Dessicator) |

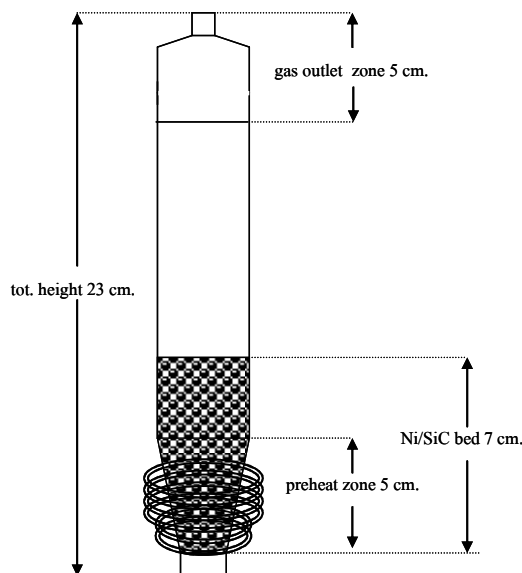
3.1.4 การดำเนินกระบวนการเคมีความร้อน

วัสดุ

1. กลีเซอรอลดิบ
2. แก๊สไนโตรเจน 99.99%
3. อากาศ

อุปกรณ์

1. เตาปฏิกรณ์ควอร์ทพร้อมชั้นเบด (ซิลิกอนคาร์ไบด์เบดและเบดตัวเร่งปฏิกิริยา)
2. เตาไมโครเวฟ ยี่ห้อ Panasonic's Straight Microwave Oven รุ่น NN-S674MF
3. ปั๊มสูบน้ำแบบรีดสาย (Peristaltic pump)
4. อุปกรณ์วัดอัตราการไหลแก๊สขาเข้า (Rotameter)
5. เครื่องทำความร้อน (Hot plate)
6. เครื่องชั่งสาร
7. เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดเค (Thermocouple type K) และเครื่องแปลงสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิ้ลเพื่อแสดงผล (Recorder)
8. ชุดอุปกรณ์วัดอัตราการไหลแก๊สผลิตภัณฑ์ (Bubble flow)
9. เครื่องวิเคราะห์หรรอยละแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยา (CO , CO_2 , C_xH_y และ H_2 analyzer) ยี่ห้อ MRU GmbH รุ่น SWG-200 (MRU GmbH model SWG 200⁻¹) ใช้เทคนิค NDIR ในการวิเคราะห์ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรคาร์บอน ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนจะใช้เทคนิค Gas chromatography โดยใช้ TCD เป็นดีเทคเตอร์
10. สายซิลิโคนขนาดต่างๆ
11. อุปกรณ์สกัดน้ำมันดินออกจากแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ (Condensers)
12. นาฬิกาจับเวลา



รูปที่ 3.1 แสดงพื้นที่ส่วนต่างๆ และความสูงของเตาปฏิกรณ์ควอร์ท

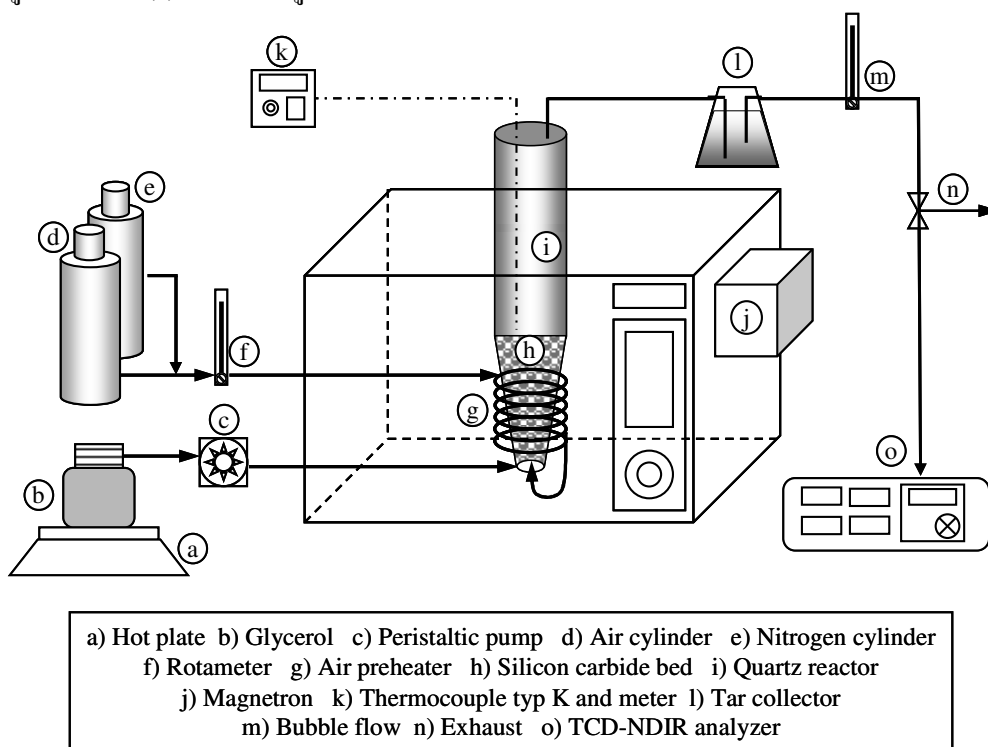
ตารางที่ 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ชื่อวัสดุ/อุปกรณ์	การใช้งาน/ทำงาน	รูป
กลีเซอรอลดิบ (crude glycerol)	เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์	
เครื่องชั่งสาร รุ่น SK-5001WP	ใช้ชั่งน้ำหนักกลีเซอรอล เตาปฏิกรณ์ ควอร์ต และสายซิลิโคนที่ใช้ป้อนวัตถุดิบ เข้าระบบทั้งก่อนและหลังการทดลอง	
ตะแกรงร้อน 20 เมสซ์	กรองกลีเซอรอลดิบเพื่อแยกวัสดุเจือปน ออก	
เครื่องให้ความร้อน (hot plate)	ทำให้กลีเซอรอลดิบอยู่ในสภาวะ ของเหลวได้ตลอดการทดลอง	
เตาปฏิกรณ์ควอร์ต (reactor)	กระบวนการแปรสภาพทางความร้อน ระหว่างกลีเซอรอลดิบและออกซิโดซิ่ง แก๊สจะเกิดขึ้นภายในนี้	
ซิลิกอนคาร์ไบด์ ขนาด 16 เมสซ์	รับพลังงานคลื่นไมโครเวฟเปลี่ยนเป็น พลังงานความร้อน เพื่อให้ความร้อนแก่ กลีเซอรอลดิบ	
เม็ดเซรามิกกรองชั้น เบด (Ceramic ball)	รองรับชั้นซิลิกอนคาร์ไบด์เบด	

ชื่อวัสดุ/อุปกรณ์	การใช้งาน/ทำงาน	รูป
เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค และเครื่องแสดงผล	ใช้ตรวจวัดอุณหภูมิในชั้นเบคและกליเซอรอลคิบที่เหลว	
ถังอากาศและถังไนโตรเจน (air and nitrogen cylinders)	ออกซิเจน ในถังอากาศเป็นออกซิไดซิ่งแก๊ส (oxidizing gas) แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สพา (carrier gas)	
ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	ใช้คลือบบนซิลิกอนคาร์ไบด์เบคเพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยาการผลิตแก๊สสังเคราะห์	
ปั๊มสูบน้ำแบบรีดสาย (peristaltic pump)	สูบกליเซอรอลคิบป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์	
อุปกรณ์วัดอัตราการไหลแก๊สเข้า (rotameter)	ควบคุมอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนและอากาศเข้าสู่ระบบ	
ชุดอุปกรณ์วัดอัตราการไหลแก๊สผลิตภัณฑ์แบบฟองอากาศ (Bubble flowmeter)	ตรวจวัดปริมาตรแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น	
เครื่องวิเคราะห์ร้อยละแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยา	รายงานร้อยละองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ ได้แก่ CO , CO_2 , H_2 และ C_xH_y อย่างต่อเนื่องตลอดการทดลอง	

ชื่อวัสดุ/อุปกรณ์	การใช้งาน/ทำงาน	รูป
เตาไมโครเวฟ	เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานคลื่นไมโครเวฟ	
ถังแก๊สไฮโดรเจน	รีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยา	
ตู้อบแห้ง	เพื่อทำการระเหยน้ำในขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	
เตาเผาอุณหภูมิสูง	เผาตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากระเหยน้ำแล้ว	
เครื่องชั่งสารแบบละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)	ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	
สายซิลิโคนขนาดต่างๆ	เป็นอุปกรณ์เพื่อนำสารต่างๆ เข้าสู่ระบบการทดลอง	
อุปกรณ์สกัดน้ำมันทาร์ออกจากแก๊สผลิตภัณฑ์ (Condensers)	ดักจับน้ำมันทาร์ที่เกิดขึ้นเพื่อไม่ให้มีสิ่งแปลกปลอมเข้าสู่เครื่องวิเคราะห์แก๊สได้	
ตู้ควบคุมความชื้น (dessicator)	ใช้เก็บตัวเร่งปฏิกิริยา (Ni/SiC) ชั่วคราวก่อนการทดลอง	
นาฬิกาจับเวลา	จับเวลาเพื่อหาอัตราการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์	

หลักการดำเนินงานโดยรวมของระบบการเปลี่ยนแปลงเคมีความร้อนและการวิเคราะห์ผลมีดังนี้ แมกเนตรอน (j) ของเตาไมโครเวฟเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานคลื่นไมโครเวฟเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนแก่ชั้นซิลิกอนคาร์ไบด์เบด (h) ซึ่งสามารถตรวจวัดระดับอุณหภูมิได้โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลเปิดชนิดเค (k) เมื่อกลีเซอรอลดิบ (b) ถูกป้อนเข้าสู่ด้านล่างของเตาปฏิกรณ์ควอร์ตซ์ (i) โดยปั๊มสุบน้ำแบบบริดสาย (c) ในขณะที่อากาศ (d) และแก๊สไนโตรเจน (e) ถูกผสมกันตามอัตราส่วนที่กำหนดป้อนเข้าสู่ด้านล่างของเตาปฏิกรณ์ ณ ตำแหน่งใกล้เคียงกับทางเข้าของกลีเซอรอล โดยมีเครื่องวัดอัตราไหลแก๊สแก๊สขาเข้า (f) ควบคุมปริมาณแก๊สทั้งหมดที่เข้าระบบ แก๊สขาเข้าทั้งหมดจะผ่านส่วนที่ให้ความร้อนแก่แก๊ส (g) โดยแก๊สนั้นจะได้รับความร้อนจากชั้นซิลิกอนคาร์ไบด์เบดก่อนที่จะเข้าสู่ด้านล่างของเตาปฏิกรณ์ จากนั้นกลีเซอรอลและออกซิไดซิงแก๊สจะเคลื่อนเข้าสู่ภายในเตาปฏิกรณ์ควอร์ตซ์แล้วได้รับความร้อนจากชั้นเบดจึงเกิดปฏิกิริยาการสลายพันธะ โดยความร้อน (Thermal cracking) ได้เป็นแก๊สผลิตภัณฑ์เคลื่อนสู่ด้านบนของเตาปฏิกรณ์ (i) ผ่านอุปกรณ์สกัดน้ำมันดินออกจากแก๊สผลิตภัณฑ์ (l) เข้าสู่อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊สผลิตภัณฑ์ (m) จากนั้นแก๊สผลิตภัณฑ์บางส่วนจะถูกดึงเข้าสู่เครื่องวิเคราะห์แก๊ส (o) ส่วนที่เหลือจะถูกระบายทิ้ง (n) ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนผังกระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์โดยรวม

3.2 การเตรียมวัตถุดิบและเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมกลีเซอรอลดิบ

กลีเซอรอลดิบจากโรงงานผลิตไบโอดีเซลมีลักษณะทางกายภาพเป็นของกึ่งแข็งคล้ายขี้ผึ้งที่อุณหภูมิห้อง ในการทำการทดลองจึงต้องให้ความร้อนเพื่อให้กลีเซอรอลดิบอยู่ในสภาพที่เป็นของเหลวชั้นพอให้เครื่องสูบน้ำแบบรีดสายสูบน้ำเข้าสู่ระบบการทดลองได้ แต่ทั้งนี้เนื่องจากอาจมีวัสดุใดๆ เจือปนอยู่ในกลีเซอรอลดิบจึงต้องกรองกลีเซอรอลดิบที่อยู่ในสถานะของเหลวนั้นก่อน แล้วจึงนำกลีเซอรอลดิบที่พร้อมทดลองเทใส่บีกเกอร์ นำไปชั่งน้ำหนัก บันทึกผลและให้ความร้อนตลอดการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.2

3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมเตาปฏิกรณ์พร้อมชั้นเบด

- เตาปฏิกรณ์ควอร์ต

เตาปฏิกรณ์ควอร์ตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบออกเป็น 2 ส่วน (รูปที่ 3.1) คือ ส่วนที่ให้ความร้อนแก่แก๊ส (Preheat) ซึ่งเป็นท่อควอร์ตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร พันแบบรอบด้านต่างของเตาปฏิกรณ์ประมาณ 4-50 รอบ และมีช่องเปิดให้แก๊สนั้นเข้าสู่ด้านล่างสุดของชั้นเบด โดยเป็นตำแหน่งเดียวกันกับทางเข้าของกลีเซอรอล อีกส่วนหนึ่งเป็นที่เกิดปฏิกิริยาระหว่างกลีเซอรอลดิบและออกซิโดซิงค์แก๊ส คือบริเวณตัวเตาทั้งหมดซึ่งมีความสูงตั้งแต่ทางเข้ากลีเซอรอลดิบจนถึงทางออกของแก๊สผลิตภัณฑ์เท่ากับ 23 เซนติเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2.2 เซนติเมตร ในส่วนนี้เองที่ใช้บรรจุวัสดุรองชั้นเบดและซิลิกอนคาร์ไบด์จำนวน 40 กรัม ก่อนทำการทดลองทุกครั้งเตาปฏิกรณ์นี้ต้องอยู่ในสภาพที่สะอาด และแห้งสนิท

- ซิลิกอนคาร์ไบด์เบด

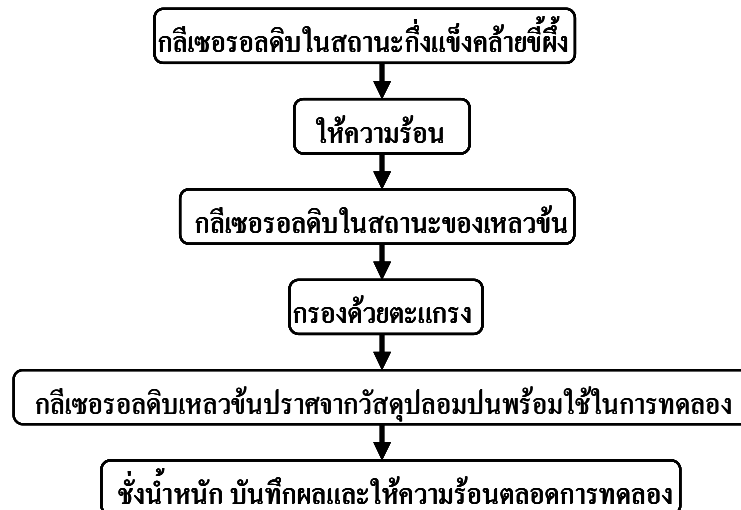
เนื่องจากซิลิกอนคาร์ไบด์มีคุณสมบัติในการรับพลังงานคลื่นไมโครเวฟได้ จึงถูกใช้เป็นชั้นตัวกลางในการเปลี่ยนพลังงานคลื่นไมโครเวฟเป็นพลังงานความร้อน ทุกการทดลองจะถูกใช้จำนวน 40 กรัม ทั้งนี้ในการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิลิกอนคาร์ไบด์จะถูกใช้ 20 กรัม อีก 20 กรัมจะเป็นซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ถูกเคลือบด้วยนิกเกิล (Ni/SiC)

- เม็ดเซรามิกรองชั้นเบด

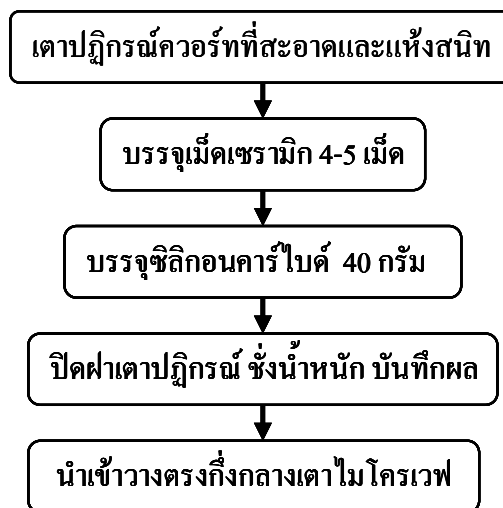
ทุกการทดลองจะใช้เม็ดเซรามิกเป็นชั้นรองรับซิลิกอนคาร์ไบด์เบด เพื่อป้องกันไม่ให้ซิลิกอนคาร์ไบด์เข้าไปอุดตันทางเข้าของกลีเซอรอลดิบ เม็ดเซรามิกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5 เซนติเมตร ยาว 0.5 เซนติเมตร ใช้ผงเซรามิกและซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นอัตราส่วน 1 ต่อ 1 ผสมกันโดยใช้น้ำประมาณ 3 ลูกบาศก์เซนติเมตร ผสมให้เข้ากันแล้วเทใส่หลอดพลาสติกที่ใช้เป็นต้นแบบ ทิ้งไว้ 1 คืน เมื่อแห้งแล้วตัดพลาสติกนั้นทิ้ง จะได้เม็ดเซรามิกที่พร้อมใช้งาน

- เตาปฏิกรณ์พร้อมชั้นซิลิกอนคาร์ไบด์เบด

เม็ดเซรามิก 4-5 เม็ดถูกใส่ลงไปในเตาปฏิกรณ์ควอร์ตที่สะอาดและแห้งสนิท เม็ดเซรามิกเหล่านี้จะเรียงตัวกันบริเวณทางเข้าของกลีเซอรอลดิบและออกซิไดซิ่งแก๊ส จากนั้นบรรจุซิลิกอนคาร์ไบด์ 40 กรัม ปิดฝาเตาแล้วซังน้ำหนักรับ บันทึกรผล แล้วนำเข้าวางตรงกึ่งกลางเตาไมโครเวฟต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.4



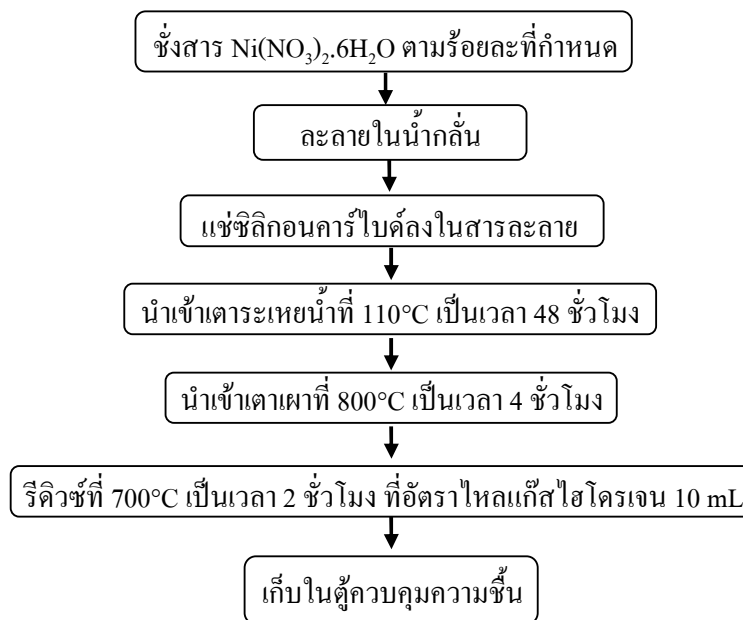
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมกลีเซอรอลดิบที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมเตาปฏิกรณ์พร้อมชั้นเบด

3.2.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา (ดัดแปลงจากงานวิจัยของ Liu และคณะ, 2008)

ซังสาร $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ตามร้อยละที่กำหนดด้วยเครื่องซังสารแบบละเอียด นำไปละลายในน้ำกลั่น เมื่อได้สารละลายนิกเกิลในเตรทแล้ว นำซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เตรียมไว้แช่ลงในสารละลายนั้นโดยให้ท่วมซิลิกอนคาร์ไบด์ทั้งหมด จากนั้นนำเข้าสู่เตาระเหยน้ำ ทำการตั้งอุณหภูมิเตาเท่ากับ 110°C ทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดแล้วจึงนำเข้าสู่เตาเผาที่ 800°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำไปรีดิวซ์ โดยใช้เตาหลอมไฟฟ้าที่ตั้งอุณหภูมิเท่ากับ 700°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พร้อมกับป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่อัตราการไหล 10 มิลลิลิตร/นาที่ เมื่อดำเนินการครบเวลาจึงนำเข้าสู่ตู้ควบคุมความชื้นเพื่อรอนำไปใช้ในการทดลองต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา (Ni/SiC)

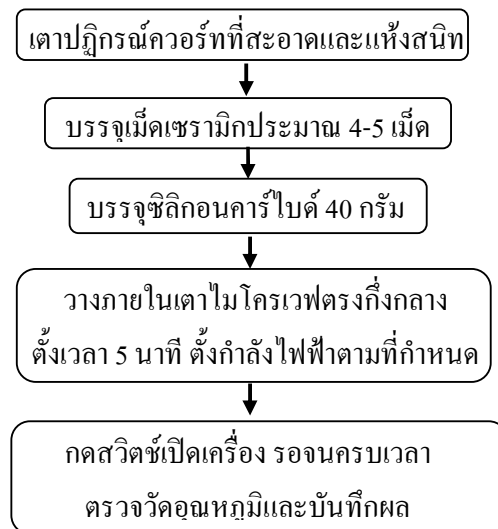
3.2.4 ขั้นตอนการเตรียมระบบก่อนดำเนินการทดลอง

หลังจากนำเตาปฏิกรณ์ควอร์ทซ์พร้อมชั้นซิลิกอนคาร์ไบด์เบดวางไว้ตรงกึ่งกลางในเตาไมโครเวฟแล้ว ทำการต่อท่อนำกลีเซอรอล ออกซิไดซิ่งแก๊ส และแก๊สผลิตภัณฑ์ รวมถึงตรวจวัดระดับอุณหภูมิของแต่ละระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟ ดังขั้นตอนต่อไปนี้

ตรวจวัดระดับอุณหภูมิของชั้นเบด

หลังจากบรรจุซิลิกอนคาร์ไบด์จำนวน 40 กรัมแล้ว นำเข้าเตาไมโครเวฟโดยตรวจสอบว่าอยู่ตรงกึ่งกลางของเตาไมโครเวฟซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกันกับทางออกของแก๊สผลิตภัณฑ์ กดสวิทช์เปิดเตาไมโครเวฟ ตั้งกำลังไฟฟ้าไว้ที่ 110 วัตต์ ใช้เวลา 5 นาที เมื่อครบเวลาแล้ว

ใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดเคตรวจวัด อ่านค่าและบันทึกผล ทำเช่นเดียวกันนี้ที่กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 220, 330, 440, 550, 660, 770 และ 880 วัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการตรวจวัดระดับอุณหภูมิของชิ้นเบด

ระบบป้อนแก๊ส

ต่อท่อซิลิโคนเข้ากับท่อควอร์ทที่พื้นแนบด้านล่างของเตาปฏิกรณ์ซึ่งเป็นทางเข้าของแก๊ส แล้วลากท่อดังกล่าวออกทางด้านล่างของเตาไมโครเวฟ โดยขนานกันกับท่อป้อนกลีเซอรอล ทำการต่อเข้ากับสามทางร่วม (Union TEE) เพื่อรับแก๊สที่ผสมแล้วระหว่างออกซิโดซิงแก๊สและแก๊สพาหรือเป็นท่อเดียวจากถังแก๊สไนโตรเจนในกรณีเป็นการทดลองไพโรไลซิส

ระบบป้อนกลีเซอรอล

ต่อท่อซิลิโคนเข้าทางท่อควอร์ทด้านล่างของเตาปฏิกรณ์ซึ่งเป็นทางเข้าของกลีเซอรอล แล้วลากท่อดังกล่าวออกทางด้านล่างของเตาไมโครเวฟโดยขนานกันกับท่อป้อนแก๊ส เพื่อนำมาต่อกับเครื่องสูบน้ำแบบรีดสายที่ถูกตั้งค่าให้ทำการป้อนกลีเซอรอลคิบที่อัตรา 1 กรัม/นาที โดยสูบน้ำจากบีกเกอร์ที่ใส่กลีเซอรอลคิบเหลวที่ได้รับความร้อนจากเครื่องทำความร้อนตลอดการทดลอง

ระบบนำแก๊สผลิตภัณฑ์

ต่อท่อซิลิโคนเข้ากับฝาของเตาปฏิกรณ์ ลากท่อออกทางด้านบนของเตาไมโครเวฟ ต่อเข้ากับอุปกรณ์สกัดน้ำมันดิน แล้วต่อเข้ากับเครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊สผลิตภัณฑ์ (Bubble flow) โดยที่แก๊สส่วนหนึ่งจะถูกเครื่องวิเคราะห์แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไหลเข้าไปเพื่อวิเคราะห์

ร้อยละของแก๊สผลิตภัณฑ์ ส่วนที่เหลือจะถูกระบายทิ้งในระบบกำจัดแก๊สของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

ในงานวิจัยนี้มีตัวแปรควบคุมคือระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมดต่อหนึ่งการทดลองเท่ากับ 20 นาที อัตราการป้อนกลีเซอรอลดิบ 1 กรัม/นาที ปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เป็นเบดเท่ากับ 40 กรัม และเพื่อให้เกิดแก๊สผลิตภัณฑ์สูงสุดโดยเฉพาะแก๊สสังเคราะห์และให้ผลิตภัณฑ์ถ่านซาร์น้อยที่สุด การออกแบบการทดลองจึงมีตัวแปรอิสระที่เป็นปัจจัยสำคัญต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์ ดังนี้

3.3.1 อุณหภูมิ (Temperature)

คือระดับพลังงานความร้อนที่ได้จากการเปลี่ยนรูปพลังงานไมโครเวฟโดยซิลิกอนคาร์ไบด์เบด ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับคลื่นคลื่นไมโครเวฟ (Microwave receptor) โดยระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟที่ต่างกันเป็นตัวควบคุมให้ระดับความร้อนที่เกิดขึ้นต่างกัน ออกแบบการทดลองเป็นช่วงอุณหภูมิ คือใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 300-1400°C ซึ่งที่ระดับอุณหภูมิเหล่านั้นจะแปรผันตามระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟตั้งแต่ 110-880 วัตต์

3.3.2 ปริมาณออกซิไดซิงแก๊ส (Oxidizing gas)

คือปริมาณออกซิเจนที่เข้าทำปฏิกิริยากับกลีเซอรอล โดยใช้ในรูปของอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อเชื้อเพลิง ($O_2/fuel$ ratio) ออกแบบการทดลองเป็น 4 ค่าจากสมการสตอยชิโอเมตรี ได้แก่ 0.03, 0.07, 0.13 และ 0.25

3.3.3 ปริมาณร้อยละของนิเกิลบนซิลิกอนคาร์ไบด์

คือปริมาณของสารนิเกิลที่ต้องการให้เคลือบอยู่บนตัวรองรับ (Support) ซึ่งในงานวิจัยนี้คือซิลิกอนคาร์ไบด์เบด เพื่อใช้ในชุดการทดลองที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ออกแบบการทดลองเป็น 4 ค่า ได้แก่ ร้อยละ 0.5, 1.0, 5.0, และ 10 ของตัวรองรับ ทำได้โดยผันแปรปริมาณสาร $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ เท่ากับ 0.4952, 0.9903, 4.9516, และ 9.9033 กรัม ตามลำดับ

3.4 ดำเนินงานวิจัย

การทดลองการเปลี่ยนแปลงเคมีความร้อนของกลีเซอรอลดิบด้วยไมโครเวฟนี้ มีการดำเนินงานหลักๆ คือ การศึกษาลักษณะทางเคมีของกลีเซอรอลดิบ ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ต่อ

การเกิดปฏิกิริยาการผลิตแก๊สสังเคราะห์ และศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์

3.4.1 ศึกษาลักษณะทางเคมีและสมบัติทางความร้อนของกลีเซอรอลดิบ

- การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ได้แก่ ความชื้น (moisture) สารระเหยได้ (volatile matter) คาร์บอนคงตัว (fixed carbon) และเถ้า (Ash) ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM E871, D1102, E872 และด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA)
- การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ได้แก่ คาร์บอน(C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) ซัลเฟอร์ (S) และออกซิเจน (O) ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHNS/O Analyzer (Perkin Elmer PE2400 Series II)
- การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน ได้แก่ ค่าความร้อน (Lower heating value: LHV) วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Automatic Bomb Calorimeter; Leco model AC-350

3.4.2 ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

เป็นการผลของอัตราการไหลแก๊สเข้ารวม เท่ากับ 1 และ 2 ลิตร/ นาที อัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อเชื้อเพลิง 4 ค่า ได้แก่ 0.03, 0.07, 0.13 และ 0.25 หลังการทดลองทำการวิเคราะห์แก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น และชั่งน้ำหนักเตาปฏิกรณ์ควอเตอร์พร้อมชั้นเบดเพื่อหาปริมาณน้ำมันาร์และถ่านซาร์ที่เกิดขึ้น ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- ขั้นตอนการเดินระบบ

หลังจากติดตั้งอุปกรณ์และจัดเตรียมระบบการทดลองเรียบร้อยแล้ว ทำการดำเนินปฏิกิริยา เก็บผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

เริ่มเดินระบบ

หลังจากบรรจุซิลิกอนคาร์ไบด์และนำเข้าวางตรงกึ่งกลางเตาไมโครเวฟตามขั้นตอนการเตรียมระบบก่อนการทดลองแล้ว ป้อนแก๊สเข้าระบบตามอัตราส่วนออกซิเจนต่อเชื้อเพลิงที่กำหนดเพื่อไล่อากาศภายในเตาปฏิกรณ์ควอเตอร์ออกก่อนประมาณ 30 วินาที แล้วจึงกดสวิตช์เปิดเตาไมโครเวฟ ตั้งค่าพลังงานไมโครเวฟเพื่อให้ได้ระดับอุณหภูมิตามที่กำหนด ตั้งเวลา 25 นาที โดย 5 นาทีแรกเป็นการทำให้ชั้นเบดร้อนก่อน (Preheat) เมื่อครบ 5 นาทีแล้วจึงกดปุ่มเปิดเครื่องสูบลีเซอรอลที่อัตราการไหล 1 กรัม/นาที เพื่อป้อนวัตถุดิบให้แก่ระบบเป็นเวลา 20 นาที จนเมื่อครบเวลาจึงหยุดป้อนลีเซอรอล ปิดควาล์วแก๊ส และรอจนกระทั่งเห็นว่าชั้นเบดไม่ร้อนแดงแล้วจึงดำเนินการต่อไป

หยุดเดินระบบ

เมื่อสังเกตว่าชั้นเบดไม่ร้อนแดงแล้ว ให้เปิดฝาเตาไมโครเวฟเล็กน้อยเพื่อระบาย อากาศร้อนภายในออก ในขณะที่รอให้ระดับอุณหภูมิของระบบลดลงอยู่นั้น ทำการชั่งน้ำหนัก กลี เซอรอลที่เหลือในภาชนะ ชั่งน้ำหนักท่อซิลิโคนที่ใช้ป้อนกลีเซอรอล และชั่งน้ำหนักเตาปฏิกรณ์ค วอร์ทพร้อมชั้นเบดหลังการทดลอง และทำการบันทึกผล

- ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ผลการทดลอง

แก๊สผลิตภัณฑ์

ระหว่างดำเนินการทดลองคือเวลาที่ 5 ถึงเวลาที่ 25 แก๊สที่เกิดขึ้นจะถูกวิเคราะห์ ร้อยละองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่องโดยเครื่องวิเคราะห์แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก ปฏิริยา (CO, CO₂, C_xH_y, and H₂ analyzer) ทำการบันทึกค่าที่แสดงบนหน้าจอของเครื่องทุกๆ 1 นาที จะได้เป็นร้อยละของแก๊ส CO₂, CO, H₂ และ C_xH_y เฉลี่ยต่อหนึ่งการทดลอง เพื่อใช้คำนวณ ปริมาณแก๊สแต่ละชนิดต่อไป

ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นตรวจวัดโดยชุดอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊สผลิตภัณฑ์ (Bubble flow) จะได้เป็นปริมาตรแก๊สรวม ทำการวัดทุกๆ 2 นาที เมื่อนำไปคำนวณกับร้อยละของ แก๊สแต่ละตัว จะได้เป็นปริมาตรของแก๊สแต่ละชนิดของการทดลองนั้นๆ เพื่อใช้วิเคราะห์ด้าน คุณภาพและประสิทธิภาพด้านพลังงานต่อไป

ผลิตภัณฑ์น้ำมันทาร์และถ่านชาร์

ผลต่างของน้ำหนักเตาปฏิกรณ์ควอร์ทก่อนและหลังการทดลองเป็นค่าน้ำหนัก น้ำมันดินและถ่านชาร์ที่เกิดขึ้น

3.4.3 ศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

เพื่อศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล โดยนำไป เคลือบบนผิวของซิลิกอนคาร์ไบด์ ใช้จำนวน 20 กรัม/การทดลอง โดยผสมกับซิลิกอนคาร์ไบด์ปกติอีก 20 กรัม ทำให้ปริมาณเบดเท่ากับ 40 กรัมเท่าเดิม จากนั้นทำการแปรผันปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโดยแปร ผันร้อยละของนิกเกิลในเตรทที่จะเคลือบบนผิวของซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นร้อยละ 0.5, 1, 5, และ 10 ของ ตัวรองรับ แล้วดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา (รูปที่ 3.7)

3.5 การวิเคราะห์ผลงานวิจัย

ในการศึกษาผลของอัตราการไหลแก๊สขาเข้ารวม อัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อเชื้อเพลิง ระดับอุณหภูมิ และค่าร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาจะแบ่งการวิเคราะห์

ออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ปริมาณผลิตภัณฑ์ คุณภาพของผลิตภัณฑ์ และประสิทธิภาพด้านพลังงาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.5.1 ปริมาณผลิตภัณฑ์

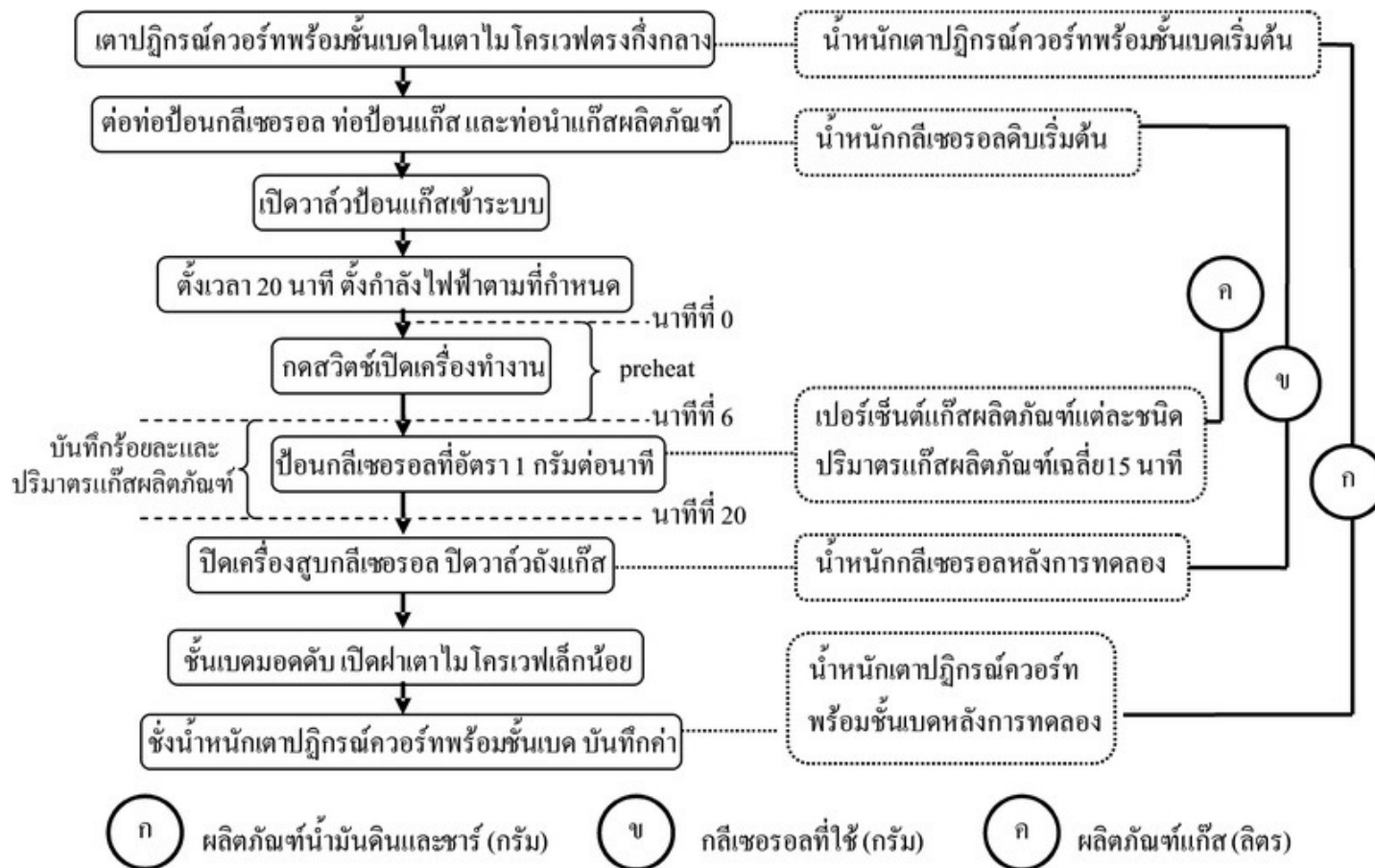
ผลิตภัณฑ์จากการทดลองนี้มีทั้งถ่านชาร์ น้ำมันทาร์ และแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยปริมาณถ่านชาร์และน้ำมันดินได้จากการหาความต่างของน้ำหนักของเตาปฏิกรณ์ควอร์ทพร้อมเบดทั้งก่อนและหลังการทดลอง ส่วนปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ทำการวัดด้วยอุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Bubble flow) โดยอ่านปริมาตรแก๊สที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์วัดอัตราการไหลนั้นต่อเวลา เพื่อนำไปคำนวณร่วมกับร้อยละของแก๊สผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด จะได้เป็นปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์นั้นๆ ต่อนาที และเนื่องจากเครื่องสูบลูกสูบโรลถูกตั้งค่าให้ป้อนกลีเซอรอลคิบด้วยอัตรา 1 กรัม/นาที ทำให้ทราบว่าปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อ 1 นาทีนี้ คือได้จากวัตถุดิบ 1 กรัมนั่นเอง นอกจากนี้ยังคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Cold gas efficiency) ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ให้ความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยา

3.5.2 คุณภาพแก๊สผลิตภัณฑ์

คุณภาพแก๊สสังเคราะห์ที่ได้ พิจารณาจากค่าความร้อนต่ำ (LHV) และค่าอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการนำแก๊สสังเคราะห์ที่ได้นี้ไปใช้ต่อในด้านใด เช่น หากต้องการนำไปเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมัน อุตสาหกรรมผลิตปุ๋ย หรืออุตสาหกรรมผลิตเมทานอล ต้องพิจารณาที่ค่าอัตราส่วน H_2/CO แต่หากนำไปเพื่อใช้ในการเผาไหม้แทนการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ต้องพิจารณาที่ค่าความร้อนต่ำที่ได้เป็นต้น โดยค่าอัตราส่วน H_2/CO ต้องมีค่าเข้าใกล้ 1.0 และค่า LHV ต้องมีค่าอยู่ในช่วง 3.4-6.0 เมกกะจูล/ลูกบาศก์เมตร ซึ่งจัดเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ (Low Btu Gas)

3.5.3 ประสิทธิภาพด้านพลังงาน

ปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นสามารถนำไปใช้เพื่อคำนวณหาร้อยละการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนในวัตถุดิบที่เปลี่ยนไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ (%Total conversion) และคำนวณหาร้อยละประสิทธิภาพเชิงความร้อน (% Cold gas efficiency) โดยต้องมีค่าเข้าใกล้ 100 ซึ่งจะบอกได้ว่าที่สภาวะนั้นๆ สามารถแปรสภาพวัตถุดิบไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ได้ดีหรือไม่



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนดำเนินการทดลองและวิเคราะห์ผล

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งความร้อนให้กับปฏิกิริยาการแปรสภาพทางความร้อนของกลีเซอรอลดิบ ภายในเตาปฏิกรณ์ควอร์ตซ์มีซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นชั้นเบด ในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ (Synthesis gas: H_2+CO) ระดับอุณหภูมิจะถูกควบคุมด้วยระดับพลังงานไมโครเวฟ แปรผันอัตราการไหลแก๊สขาเข้ารวม (Total input gas flowrate) และแปรผันปริมาณออกซิเจนจากอัตราส่วนออกซิเจนต่อเชื้อเพลิง ($O_2/fuel$ ratio) จากนั้นจึงเลือกสภาวะที่มีประสิทธิภาพด้านพลังงานน้อยกว่าร้อยละ 100 เพื่อทำการทดลองโดยการแปรผันปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลต่อไป ดังรูปที่ 4.1

ผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งความร้อนและศึกษาสภาวะที่ให้ร้อยละการแปรสภาพของคาร์บอนและเหมาะสมต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์ ถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนได้แก่

ส่วนที่ 1 ศึกษาลักษณะทางเคมีและสมบัติทางความร้อนของร้อนกลีเซอรอลดิบ โดยการ

1) วิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) เพื่อหาความชื้น สารระเหยได้ คาร์บอนคงตัว และเถ้า

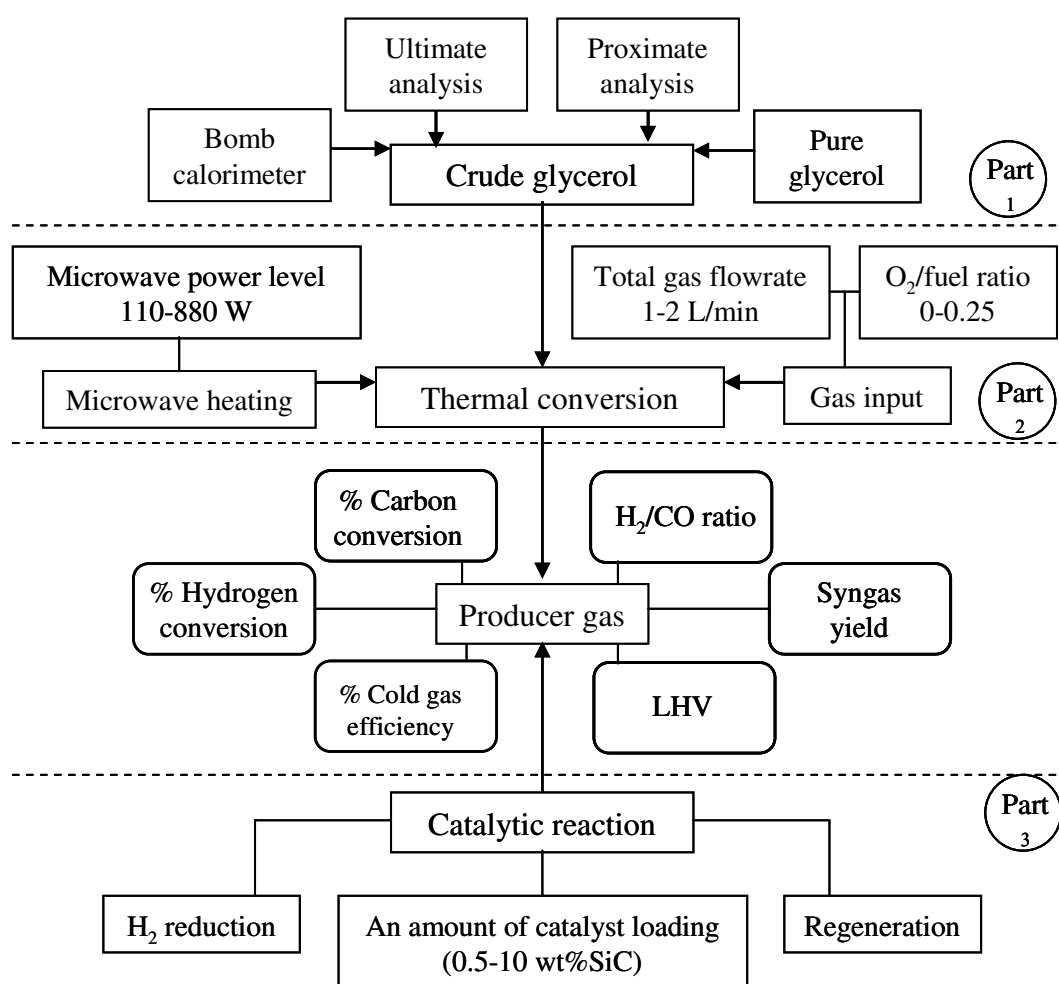
2) วิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ด้วยเครื่อง CHNS/O analyzer (Perkin Elmer PE2400 Series II) เพื่อหาธาตุองค์ประกอบคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์และออกซิเจน

3) วิเคราะห์สมบัติทางความร้อน ด้วยเครื่อง Automatic Bomb Calorimeter (Leco model AC-350) เพื่อหาค่าความร้อนต่ำ (Lower heating value: LHV)

ทั้งยังทำการทดลองเบื้องต้นเปรียบเทียบการผลิตแก๊สสังเคราะห์ระหว่างกลีเซอรอลดิบและกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (Analytical grade glycerol: pure glycerol) เพื่อศึกษาผลของสิ่งเจือปนจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์

ส่วนที่ 2 ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนร่วมกับซิลิกอนคาร์ไบด์ เพื่อแปรสภาพกลีเซอรอลดิบให้เป็นแก๊สสังเคราะห์ โดยศึกษาผลของอัตราการไหลแก๊สขาเข้ารวม อัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อเชื้อเพลิง และระดับอุณหภูมิ ต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ คุณภาพแก๊สผลิตภัณฑ์ และประสิทธิภาพด้านพลังงาน และเลือกสภาวะที่ให้ค่าประสิทธิภาพด้านพลังงานต่ำกว่าร้อยละ 100 เพื่อทำการทดลองในชุดการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อไป

ส่วนที่ 3 ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนร่วมกับซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ถูกเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล (catalyst bed: เบดตัวเร่งปฏิกิริยา) โดยใช้สถานะที่ได้จากการทดลองส่วนที่ 2 เป็นตัวแปรควบคุม แล้วทำการแปรผันร้อยละของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล เพื่อหาสถานะที่ให้ปริมาณแก๊สสังเคราะห์สูงที่สุด มีค่าอัตราส่วน H_2/CO และค่า LHV ตามที่ระบุไว้ข้างต้น และให้ค่าประสิทธิภาพด้านพลังงานสูงสุด โดยคำนึงถึงพลังงานไมโครเวฟที่ใช้ซึ่งต้องใช้พลังงานไมโครเวฟน้อยที่สุดด้วย อีกทั้งยังศึกษาผลของการรีดิวซ์เบดตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฮโดรเจน (pre-reduced the catalyst bed) และผลของกระบวนการคืนสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst regeneration)



รูปที่ 4.1 แผนผังการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะทางเคมี สมบัติทางความร้อนของกลีเซอรอลดิบ

4.1.1 ลักษณะทางเคมีของกลีเซอรอลดิบ

ผลการวิเคราะห์แบบประมาณไม่พบสารระเหยได้และคาร์บอนคงตัวเพราะเกิดการถูกติดไฟ ในส่วนของค่าความชื้นและปริมาณเถ้า ตรวจวัดได้เท่ากับร้อยละ 13.56 และร้อยละ 2.43 ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ความชื้นและปริมาณเถ้าของชีวมวลที่เหมาะสมต่อการเป็นวัตถุดิบเพื่อการเผาไหม้ซึ่งมีค่าไม่ควรเกินร้อยละ 50 และร้อยละ 3 ตามลำดับ จึงกล่าวได้ว่ากลีเซอรอลดิบเป็นชีวมวลที่มีศักยภาพในการเป็นวัตถุดิบเพื่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์ เพราะนอกจากจะไม่ก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัดเถ้าจากกระบวนการแปรสภาพทางความร้อนแล้ว ความชื้นหรือน้ำที่มีอยู่ยังเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยในการเร่งปฏิกิริยาการผลิตแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สสังเคราะห์ได้อีกด้วย

ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุไม่พบธาตุไนโตรเจน พบเฉพาะธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ซัลเฟอร์และออกซิเจน ที่เป็นองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์หรือแก๊สเชื้อเพลิง เท่ากับร้อยละ 36.40, 8.76, 0.66 และ 54.17 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับชีวมวลประเภทอื่นดังตารางที่ 4.1 จึงสามารถสรุปได้ว่ากลีเซอรอลดิบมีความเหมาะสมในการเป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตเป็นแก๊สสังเคราะห์ เพราะนอกจากจะพบธาตุพื้นฐานของแก๊สเชื้อเพลิงในปริมาณที่สูงแล้ว ยังพบธาตุซัลเฟอร์ที่น้อยมากและไม่พบธาตุไนโตรเจนเลย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากกลีเซอรอลดิบนี้ จะไม่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศเนื่องจาก SO_x และ NO_x

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนพบว่ามีความร้อนต่ำ (LHV) เท่ากับ 18.13 เมกะจูล/กิโลกรัม ค่าความร้อนนี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการให้ความร้อนของวัตถุดิบ ซึ่งเมื่อเทียบกับชีวมวลประเภทอื่นแล้วพบว่ากลีเซอรอลดิบมีค่าความร้อนค่อนข้างสูง (ตารางที่ 4.1)

4.1.2 ผลของสิ่งเจือปนเนื่องจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

สิ่งเจือปนในกลีเซอรอลดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เป็นทั้งสารเคมีที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ แอลกอฮอล์ ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นสารที่มีอยู่ในวัตถุดิบโดยธรรมชาติ ได้แก่ กรดไขมัน (fatty acid) และสิ่งที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการผลิต ได้แก่ สบู่ น้ำ และไบโอดีเซลส่วนที่ถูกระบาย สิ่งเจือปนเหล่านี้เป็นความแตกต่างระหว่างกลีเซอรอลดิบและกลีเซอรอลบริสุทธิ์ ในการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของสิ่งเจือปนต่างๆ นั้น จึงใช้กลีเซอรอลที่แตกต่างกัน ดังนี้

กลีเซอรอลบริสุทธิ์ (Analytical grade glycerol)

เป็นกลีเซอรอลที่ผ่านกระบวนการกำจัดสิ่งเจือปนต่างๆ ออก รวมถึงสีที่มากับวัตถุดิบ ในงานวิจัยนี้กลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่ใช้ประกอบด้วยกลีเซอรอลประมาณร้อยละ 85 อีกร้อยละ 15 เป็นน้ำ

กลีเซอรอลดิบ (Crude glycerol)

เป็นกลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้ปาล์มน้ำมันเป็นวัตถุดิบในการผลิต ผ่านปฏิกิริยาทรานเอสเตอริฟิเคชัน ได้เป็นไบโอดีเซลและกลีเซอรอลดิบ ซึ่งในขั้นตอนการล้างกลีเซอรอลดิบนี้เอง สิ่งเจือปนต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างดำเนินการปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันปาล์มกับแอลกอฮอล์ จะถูกล้างไหลลงมารวมอยู่ในชั้นของกลีเซอรอลดิบ ทำให้กลีเซอรอลดิบประกอบด้วยสารเคมีที่ใช้และที่ที่ได้จากปฏิกิริยา รวมถึงวัตถุดิบตั้งต้นต่างๆ

เพื่อศึกษาถึงผลของสิ่งเจือปนในกลีเซอรอลดิบ การทดลองดำเนินการที่อุณหภูมิ 1250°C และ 1400°C อัตราการไหลแก๊สเข้ารวม (Total inlet gas flowrate: TF) เท่ากับ 2 ลิตร/นาที และแปรผันอัตราส่วนออกซิเจนต่อเชื้อเพลิง (O_2/fuel ratio) เท่ากับ 0.03-0.25 ได้ผลการทดลองดังนี้

4.1.2.1 ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น

กลีเซอรอลบริสุทธิ์ให้ผลิตภัณฑ์ในรูปแก๊สและของเหลว ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเตาปฏิกรณ์ค่อนข้างคงที่ การดำเนินการทดลองเป็นไปได้โดยง่ายเนื่องจากไม่เกิดการอุดตันบริเวณทางเข้า และเมื่อสิ้นสุดการทดลองในแต่ละชุดการทดลองไม่พบคาร์บอนในชั้นเบด และเบดไม่จับตัวเป็นก้อน

เนื่องจากกลีเซอรอลดิบมีลักษณะคล้ายขี้ผึ้งที่อุณหภูมิห้อง จึงต้องให้ความร้อนเพื่อให้อยู่ในสภาพของเหลวในขณะที่ทำการป้อนเข้าสู่ระบบ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเตาปฏิกรณ์เห็นได้อย่างชัดเจนว่าแตกต่างจากกลีเซอรอลบริสุทธิ์ กล่าวคือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเตาปฏิกรณ์ค่อนข้างปั่นป่วน มีแรงดันจากแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นภายในเตาปฏิกรณ์ หลังการทดลองจะพบว่าภายในเตาปฏิกรณ์มีสีเปลี่ยนไปเนื่องจากน้ำมันทาร์และเกิดการอุดตันบริเวณทางเข้าสู่ชั้นเบดของแก๊สขาเข้าและวัตถุดิบ เป็นเหตุให้ชุดการทดลองนั้นล้มเหลวได้ง่าย อย่างไรก็ตามเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่ามือน้ำมันทาร์เกิดขึ้นบริเวณท่อนำแก๊สขาออกเล็กน้อย บริเวณด้านล่างของชั้นเบดภายในเตาปฏิกรณ์ซึ่งเป็นตำแหน่งที่กลีเซอรอลดิบพบกับแก๊สขาเข้า (ออกซิไดซิงแก๊สและแก๊สพา) มีเถ้าปนอยู่ในชั้นเบดเล็กน้อย เบดจับตัวเป็นก้อนสูงประมาณ 2-3 เซนติเมตรเหนือตำแหน่งที่พบเถ้า นั่น เบดที่จับตัวเป็นก้อนน้ำมีสีเทาปนสีดำของถ่านชาร์ ความแตกต่างระหว่างกลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบนี้ชี้ให้เห็นว่าสิ่งเจือปนจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมีผลบางอย่างต่อการเกิดปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามถ่านชาร์และน้ำมันทาร์ที่เกิดขึ้นนั้น มีปริมาณน้อยมากในแต่ละการทดลองจนไม่สามารถตรวจวัดได้ อาจเนื่องมาจากด้วยสถานะตั้งต้นของกลีเซอรอลดิบที่เป็นของเหลว ทำให้การเกิดถ่านชาร์ต่ำ

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบลักษณะทางเคมีของกาลีเซอรอลดิบและชีวมวลชนิดอื่น

ชีวมวล	วิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				วิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					สมบัติทางความร้อน (เมกกะจูล/กิโลกรัม)
	ความชื้น	สารระเหยได้	คาร์บอนคงตัว	เถ้า	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน	ซัลเฟอร์	ออกซิเจน	ค่าความร้อน
กาลีเซอรอลดิบ	13.56	ลูกติดไฟ	-	2.43	36.40	8.76	0.00	0.67	54.17	18.13
แกลบ	12.00	56.46	18.88	12.65	37.48	4.41	0.17	0.04	33.28	13.52
ฟางข้าว	10.00	60.70	18.90	10.39	38.17	5.02	0.58	0.09	35.28	12.33
ชานอ้อย	50.73	41.98	5.86	1.43	21.33	3.06	0.12	0.03	23.29	7.37
ไยปาล์ม	38.50	42.68	14.39	4.42	30.82	3.74	0.84	0.08	21.61	11.40
กะลาปาล์ม	12.00	68.20	16.30	3.50	44.44	5.01	0.28	0.02	34.70	16.90
น้ำยางค้ำ*	81.40	11.00	0.40	7.20	31.80	3.70	0.50	1.80	55.00	11.40

ที่มา: มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม (<http://efe.or.th>)

* เอชณะ จริยาจิรวัฒนา, 2550

ตารางที่ 4.2 ผลของกลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบต่อผลิตภัณฑ์ในสถานะต่างๆ ที่เกิดขึ้น

วัตถุดิบ / ผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์แก๊ส	ผลิตภัณฑ์ของเหลว	ผลิตภัณฑ์ของแข็ง
กลีเซอรอลบริสุทธิ์	✓	✓	-
กลีเซอรอลดิบ	✓	✓*	✓*

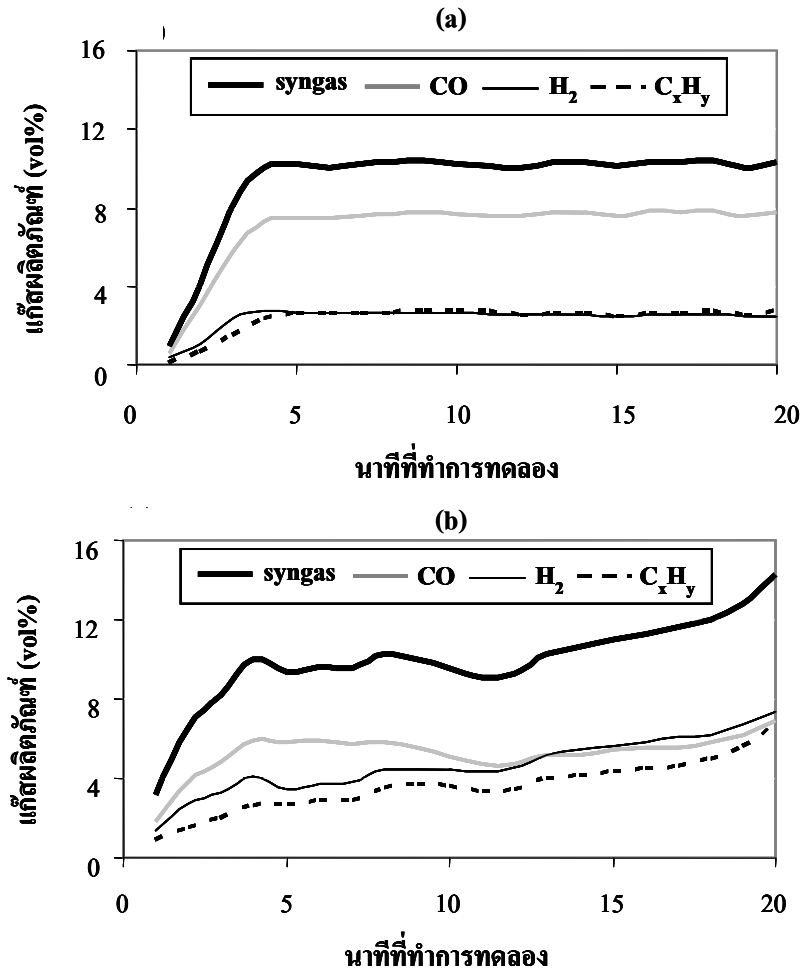
หมายเหตุ: ✓ พบผลิตภัณฑ์นั้นๆ

- ไม่พบผลิตภัณฑ์นั้นๆ

✓* พบผลิตภัณฑ์นั้นๆ แต่น้อยมาก ไม่สามารถตรวจวัดได้

4.1.2.2 รูปแบบการผลิตแก๊ส

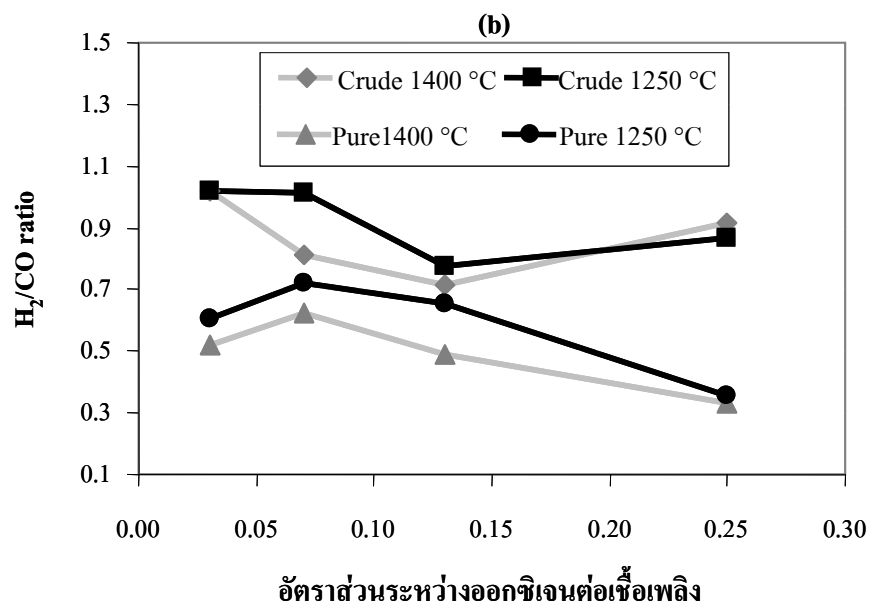
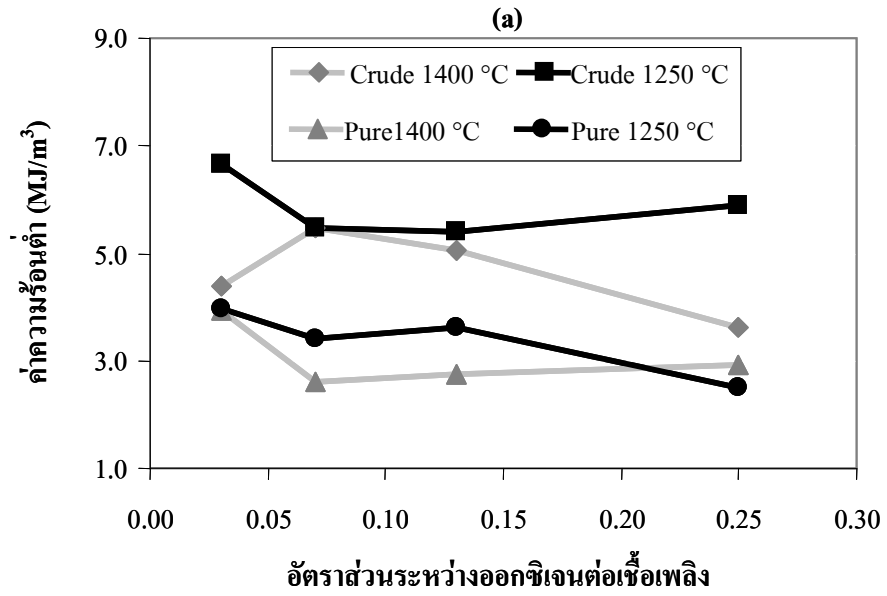
จากที่ได้กล่าวถึงความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นระหว่างกลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบ ทำให้ทราบว่าสิ่งเจือปนในกลีเซอรอลดิบมีผลต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเตาปฏิกรณ์ โดยมีรูปแบบการเกิดแก๊สต่อณาดังรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นตัวอย่างการทดลองที่แสดงให้เห็นถึงการผลิตแก๊สของวัตถุดิบทั้งสองชนิด ที่สภาวะเดียวกัน คือที่อุณหภูมิ 1400°C อัตราแก๊สขาเข้ารวม (TF) 2 ลิตร/นาที่ และอัตราส่วนออกซิเจนต่อเชื้อเพลิง ($O_2/fuel$ ratio) เท่ากับ 0.25 จากภาพจะเห็นได้ว่าภายในนาที่ที่ 2-3 การเกิดแก๊สมีค่าค่อนข้างสูง จนกระทั่งประมาณนาที่ที่ 5 การเกิดแก๊สจะค่อนข้างคงที่ โดยเฉพาะกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (รูปที่ 4.2 (a)) ให้รูปแบบการเกิดแก๊สคงที่สม่ำเสมอ ในขณะที่รูปที่ 4.2 (b) จะเห็นได้ว่าการเกิดแก๊สมีแนวโน้มที่สูงขึ้น นั่นอาจเนื่องมาจากถ่านชาร์และน้ำมันชาร์ที่สะสมตัวภายในชั้นเบด จึงเป็นผลให้ปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้เพิ่มสูงขึ้นจากการเกิด Tar reforming และ Char reforming (ดังสมการที่ 4.6-4.9) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าสิ่งเจือปนที่มีอยู่ในกลีเซอรอลดิบมีผลช่วยให้เกิดแก๊สสังเคราะห์มากขึ้น

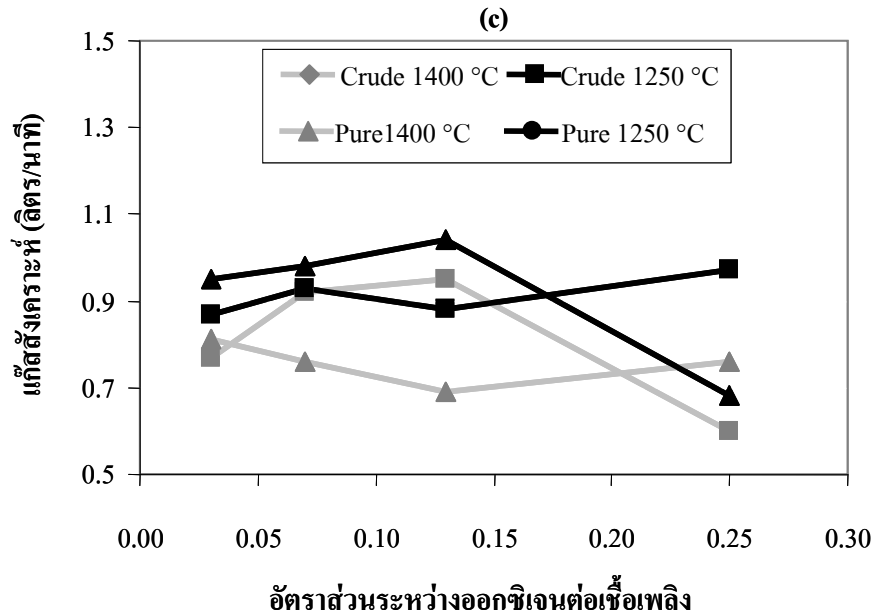


รูปที่ 4.2 การเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 1400°C อัตราแก๊สขาเข้ารวม 2 ลิตร/นาที และอัตราส่วนออกซิเจนต่อเชื้อเพลิงเท่ากับ 0.25 ของ (a) ก๊าซเซอร์อลบรีสุทซ์ และ (b) ก๊าซเซอร์อลดิบ

4.1.2.3 แก๊สผลิตภัณฑ์

จากสภาวะการทดลองข้างต้น ผลการทดลองอยู่ในภาคผนวก ก ค่า LHV ค่าอัตราส่วนโดย โมลของ H₂/CO และปริมาณแก๊สสังเคราะห์ เป็นดังรูปที่ 4.3





รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิ 1250°C และ 1400°C และอัตราส่วนออกซิเจนต่อเชื้อเพลิงของ กลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบ ที่อัตราการไหลแก๊สเข้ารวม 2 ลิตร/นาที่ (a) ค่า ความร้อนต่ำ (b) อัตราส่วนโดยโมลของ H_2/CO และ (c) ปริมาณแก๊สสังเคราะห์

จากรูปที่ 4.3 (a) เป็นค่าความร้อนต่ำ (LHV) ของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ จะเห็นว่า กลีเซอรอลบริสุทธิ์มีค่า LHV อยู่ในช่วง 2.0-4.0 MJ/m^3 ในขณะที่กลีเซอรอลดิบมีค่า LHV อยู่ใน ช่วง 2.0-6.7 MJ/m^3 นอกจากนี้ยังพบว่าที่อัตราส่วน $O_2/fuel$ เท่ากับ 0.03 อุณหภูมิเท่ากับ 1250°C เป็นสถานะที่ให้ค่า LHV ค่อนข้างสูง โดยที่สภาวะดังกล่าวกลีเซอรอลดิบให้ค่า LHV สูงสุด เท่ากับ 6.66 MJ/m^3 และสภาวะดังกล่าวกลีเซอรอลบริสุทธิ์ให้ค่าสูงสุดเท่ากับ 3.96 MJ/m^3 ซึ่งน้อยกว่ากลีเซอรอลดิบร้อยละ 40 จะสังเกตเห็นได้ว่าที่ $O_2/fuel$ ratio และที่อุณหภูมิที่ค่าต่างๆ จะได้ผลการทดลองที่มีแนวโน้มที่ดีกว่า เช่นเดียวกับกับ H_2/CO ratio (รูปที่ 4.2 (b)) ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.02 ที่ $O_2/fuel$ ratio เท่ากับ 0.03 ทั้งที่ 1250°C และ 1400°C ในขณะที่กลีเซอรอลบริสุทธิ์มีค่าสูงสุด เท่ากับ 0.72 ที่อัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อเชื้อเพลิงเท่ากับ 0.07 ที่ 1250°C ซึ่งน้อยกว่า กลีเซอรอลดิบประมาณร้อยละ 30 ในส่วนของแก๊สสังเคราะห์ (รูปที่ 4.2 (c)) ที่ระดับอุณหภูมิ 1250°C ยังคงเป็นสถานะที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด โดยกลีเซอรอลบริสุทธิ์ให้ปริมาณแก๊สสังเคราะห์เท่ากับ 0.81 ลิตร/นาที่ ที่ $O_2/fuel$ ratio เท่ากับ 0.13 ในขณะที่กลีเซอรอลดิบให้ปริมาณ แก๊สสังเคราะห์เท่ากับ 0.97 ลิตร/นาที่ที่ $O_2/fuel$ ratio เท่ากับ 0.25

จากผลการทดลองเบื้องต้นพบว่าแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกลีเซอรอลดิบเป็นแก๊สที่มี คุณภาพดีกว่า กล่าวคือมีค่า LHV และค่าอัตราส่วน H_2/CO ที่สูงกว่า อาจเนื่องมาจากกลีเซอรอลดิบ

มีสิ่งเจือปนที่ประกอบด้วยธาตุพื้นฐาน C H และ O จึงทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีความร้อน ได้แก่ CO, H₂ และ C_xH_y ที่ได้จากกลีเซอรอลดิบมีมากกว่าชุดการทดลองที่ใช้กลีเซอรอลบริสุทธิ์ ดังนั้นเมื่อนำมาคิดค่าความร้อนค่าและค่าอัตราส่วน H₂/CO ของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกลีเซอรอลดิบจึงได้ค่าสูงกว่า

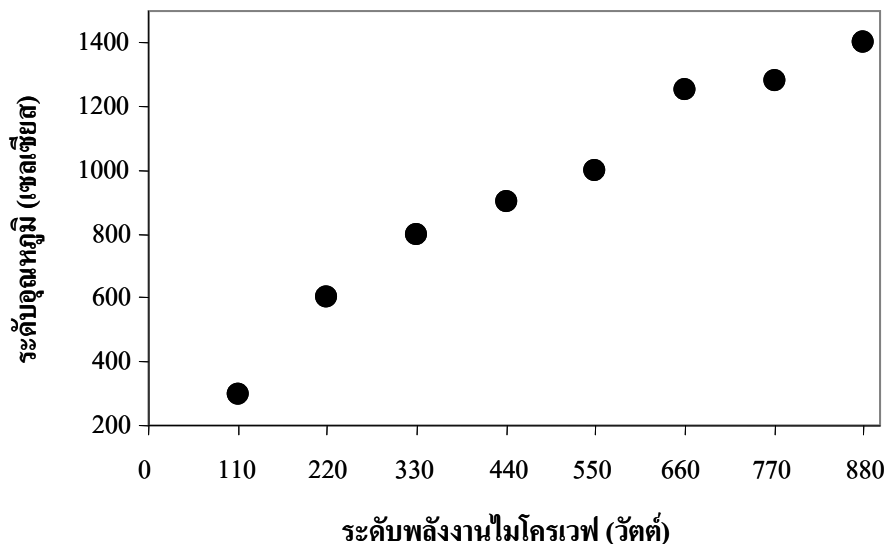
จากการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างกลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบจะพบความแตกต่าง แม้ว่ากลีเซอรอลบริสุทธิ์สามารถสลายตัวได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย (Valliyappan และคณะ, 2005) ได้แก่ H₂, CO, CO₂, CH₄, ethylene, acetaldehyde, acetic acid, acetone, methanol, ethanol, น้ำ และชาร์ แต่สิ่งที่กลีเซอรอลดิบมีมากกว่ากลีเซอรอลบริสุทธิ์คือสิ่งเจือปนต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งล้วนเป็นสารอินทรีย์ที่มีธาตุประกอบพื้นฐานเป็น C H และ O อีกทั้งจากงานวิจัยของ Dou และคณะ, (2009) ที่ทำการศึกษาการไพโรไลซิสกลีเซอรอลดิบได้สรุปว่าน้ำและเมทานอลที่เจือปนในกลีเซอรอลดิบสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับกลีเซอรอลได้ ดังนั้นน้ำและกลีเซอรอลที่มีอยู่จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาเร่งในการไพโรไลซิส เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Valliyappan และคณะ, (2008) ที่ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบระหว่างกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (ประกอบด้วยกลีเซอรอลบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 99.5) และกลีเซอรอลดิบ (ประกอบด้วยกลีเซอรอลร้อยละ 60, เมทานอลร้อยละ 31, น้ำร้อยละ 7.5 และ KOH ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก) พบว่ามีผลการทดลองต่างกันเพียงเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากองค์ประกอบของวัตถุดิบที่ต่างกัน โดยใช้อัตราการป้อนวัตถุดิบเท่ากับ 0.09 กรัม/นาที ที่ 800°C และมีอัตราส่วนไอน้ำต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 50:50 พบว่าได้ผลิตภัณฑ์เพียงสองชนิด คือแก๊สเท่ากับร้อยละ 94 และ 91.1 และชาร์เท่ากับร้อยละ 6.9 และ 8.9 โดยน้ำหนัก สำหรับกลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบตามลำดับ ทั้งนี้การเติมไอน้ำเข้าไปไม่มีผลอย่างชัดเจนต่อผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้น

จากการทดลองนี้สรุปได้ว่าสิ่งเจือปนในกลีเซอรอลดิบสามารถช่วยเพิ่มปริมาณแก๊สสังเคราะห์และแก๊สที่ได้นั้นมีคุณภาพดีขึ้น ดังนั้นนอกจากวิธีการให้ความร้อนนี้จะสามารถผลิตแก๊สสังเคราะห์ได้แล้ว วัตถุดิบที่เลือกใช้ในการทดลองยังมีศักยภาพในการผลิตเป็นแก๊สสังเคราะห์อีกด้วย

4.2 การแปรสภาพทางความร้อนของกลีเซอรอลดิบ

4.2.1 Temperature profile ของซิลิกอนคาร์ไบด์เบด

ซิลิกอนคาร์ไบด์ 40 กรัมถูกใช้เป็นตัวรับพลังงานคลื่นไมโครเวฟเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน โดยระยะเวลาที่ใช้ในการรับคลื่นไมโครเวฟเท่ากับ 5 นาที ผลการทดลองทำให้ทราบถึงอุณหภูมิตั้งต้นของปฏิกิริยา ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลของระดับพลังงานไมโครเวฟ 110-880 วัตต์ ต่อระดับอุณหภูมิของซิลิกอนคาร์ไบด์เบด

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าระดับอุณหภูมิแปรผันโดยตรงกับพลังงานไมโครเวฟที่ให้ เนื่องจากไอออนอิสระบนซิลิกอนคาร์ไบด์ถูกกระทำจากคลื่นไมโครเวฟ ยังมีพลังงานคลื่นไมโครเวฟมาก ไอออนเหล่านั้นยังถูกกระทำมาก ส่งผลให้ความร้อนที่เกิดจากการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงกระทำของคลื่นไมโครเวฟมากขึ้นไปด้วย เช่นเดียวกับกับงานวิจัยของ Huang และคณะ, (2008) ที่ทำการทดลองผลิตแก๊สสังเคราะห์จากฟางข้าวด้วยไมโครเวฟ โดยใช้ฟางข้าวที่ขนาดต่างๆ จำนวน 3 กรัมเป็นตัวรับพลังงานไมโครเวฟ ซึ่งแม้ว่าฟางข้าวจะไม่สามารถเปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟเป็นพลังงานความร้อนได้โดยตรงเหมือนซิลิกอนคาร์ไบด์ แต่เนื่องจากความชื้นที่มีอยู่ในวัตถุดิบ และคุณสมบัติของน้ำที่สามารถรับพลังงานไมโครเวฟได้ ความร้อนจึงเกิดจากน้ำที่มีอยู่ในวัตถุดิบนั้น ในส่วนของระดับพลังงานไมโครเวฟต่อความร้อนที่เกิดขึ้นพบว่า พลังงานไมโครเวฟที่มากกว่าจะให้ความร้อนสูงกว่าและเกิดความร้อนได้รวดเร็วกว่า ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองหาความร้อนเนื่องจากพลังงานไมโครเวฟตั้งแต่ 50-500 วัตต์ แต่ในที่นี้ขออนุญาตนำเสนอผลการทดลองเพียงบางระดับพลังงานไมโครเวฟ ดังตารางที่ 4.3 เพื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยในครั้งนี้

Dominguez และคณะ, (2006) ได้ทำการทดลองผลิตแก๊สสังเคราะห์จากเปลือกกาแฟ โดยใช้ถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสเปลือกกาแฟที่อุณหภูมิ 1000°C จำนวน 3 กรัมเป็นตัวรับพลังงานไมโครเวฟ โดยปนเข้ากับเปลือกกาแฟจำนวน 15 กรัม ในงานวิจัยนี้ต้องการความร้อน 3 ระดับ คือ 500°C 800°C และ 1000°C ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลของระดับพลังงานไมโครเวฟต่อความร้อนที่เกิดขึ้นกับตัวรับไมโครเวฟต่างชนิด

งานวิจัย	Huang et al. (2008)		Dominguez et al. (2006)		งานวิจัยนี้	
ตัวรับคลื่น	ฟางข้าว 3 กรัม		ซาร์เปลือกกาแฟ 3 กรัม		SiC 40 กรัม	
พลังงานไมโครเวฟ (วัตต์)/อุณหภูมิ (°C)	วัตต์	°C	วัตต์	°C	วัตต์	°C
	100	72	130	500	110	300
	300	272	270	800	300	800
	400	415	420	1000	440	900

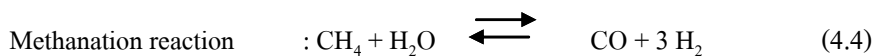
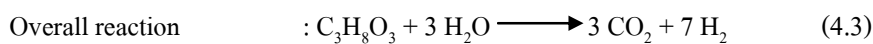
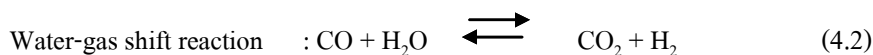
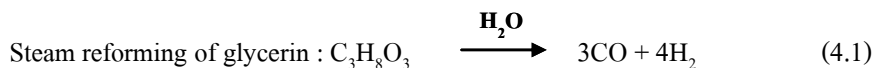
4.2.2 ผลของอัตราแก๊สขาเข้ารวมและอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อเชื้อเพลิง

เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลแก๊สขาเข้ารวม (TF) และปริมาณออกซิเจนต่อปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ คุณภาพแก๊สผลิตภัณฑ์และประสิทธิภาพด้านพลังงาน การดำเนินปฏิกิริยาจึงทำการทดลองที่ TF เท่ากับ 1 และ 2 ลิตร/นาที่ ซึ่งเท่ากับระยะเวลาที่ใช้ในการสลายตัว (residence time) ประมาณ 2 และ 1 วินาที ตามลำดับ และปริมาณออกซิเจนที่ $O_2/fuel$ ratio เท่ากับ 0-0.25 โดยดำเนินปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 1250°C (660 วัตต์) และ 1400°C (880 วัตต์) ผลการทดลองดังรูปที่ 4.5

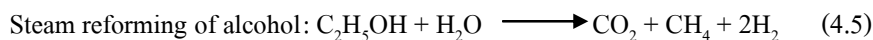
จากรูปที่ 4.5 (a) ในชุดการทดลองที่ TF เท่ากับ 2 ลิตร/นาที่ ให้ปริมาณแก๊สสังเคราะห์ในช่วง 0.4-1.0 ลิตร/นาที่ ในขณะที่ชุดการทดลองที่ TF เท่ากับ 1 ลิตร/นาที่ ให้ปริมาณแก๊สสังเคราะห์ในช่วง 0.6-1.6 ลิตร/นาที่ ปริมาณแก๊สสังเคราะห์สูงสุดที่ได้จาก TF 2 และ 1 ลิตร/นาที่ ที่สภาวะ 1250°C และ $O_2/fuel$ ratio เท่ากับ 0.25 เท่ากับ 0.97 ลิตร/นาที่ และ 1.60 ลิตร/นาที่ ตามลำดับ จะเห็นว่าที่ TF เท่ากับ 1 ลิตร/นาที่ ให้ปริมาณแก๊สสังเคราะห์สูงกว่าที่ TF เท่ากับ 2 ลิตร/นาที่ถึงร้อยละ 40 ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากชุดการทดลองที่ใช้ TF เท่ากับ 2 ลิตร/นาที่ มี residence time เพียง 1 วินาที ซึ่งอาจไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาระหว่างออกซิโดซิงแก๊สและไอน้ำกับสาร volatile ที่มีอยู่ในวัตถุดิบ ด้วยเหตุผลดังกล่าว ผลของการเพิ่มปริมาณออกซิเจนจึงเห็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับปริมาณแก๊สสังเคราะห์ได้ชัดเจนกว่าในชุดการทดลองที่ TF เท่ากับ 1 ลิตร/นาที่

จากผลการทดลองข้างต้นทำให้ทราบว่า ปริมาณออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น มีผลไม่ชัดเจนกับผลการทดลอง กล่าวคือมีการเปลี่ยนแปลงในชุดการทดลองที่ใช้ TF 1 ลิตร/นาที่ แต่ไม่สามารถระบุได้ว่าเมื่อให้ออกซิเจนมากกว่า จะได้ปริมาณแก๊สสังเคราะห์ที่มากกว่า หรือได้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีคุณภาพดีกว่า จากงานวิจัยของ Yoon และคณะ, (2010) ที่ได้ทดลองทำการแก๊สซิฟิเคชันกลีเซอรอลดิบที่อุณหภูมิ 950-1050°C และใช้ excess air ratio เท่ากับ 0.17-0.32 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศเข้าสู่ระบบปริมาณแก๊สสังเคราะห์ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นกัน จึงอาจกล่าวได้ว่าออกซิเจนจากภายนอกที่ให้กับปฏิกิริยานั้น ไม่มีผลต่อปริมาณแก๊สสังเคราะห์อย่างชัดเจนหรืออย่างน่าสนใจ ทั้งนี้

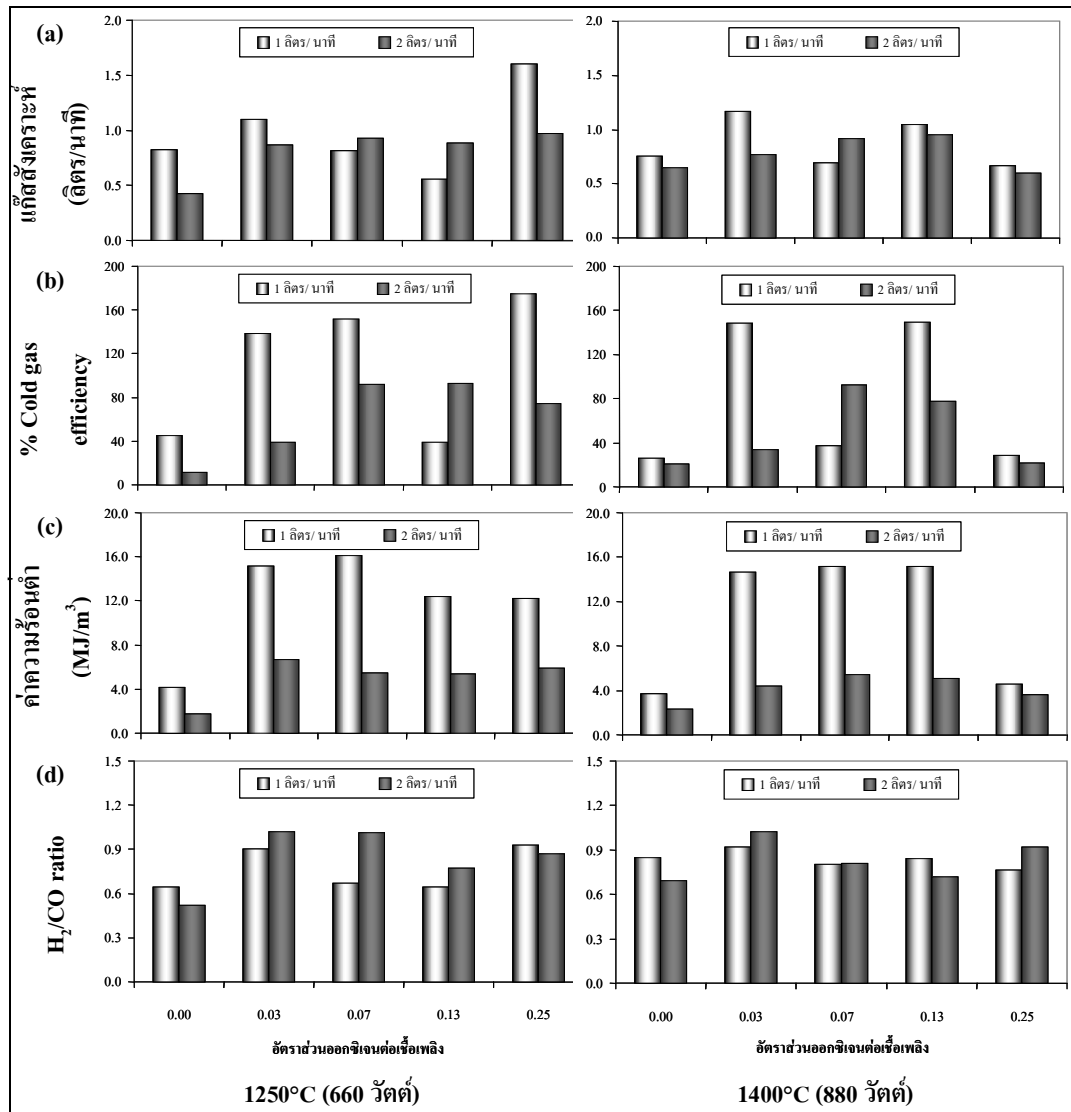
ใน 1 โมเลกุลของกลีเซอรอลจะประกอบด้วยออกซิเจนสูงถึงร้อยละ 50 เพราะฉะนั้นในปฏิกิริยาหนึ่งๆ จึงมีออกซิเจนจากวัตถุดิบอยู่แล้ว ออกซิเจนจากภายนอกจึงไม่ได้รับความสนใจอีกต่อไป อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้จัดได้ว่าการแปรสภาพทางความร้อนด้วยไอน้ำ โดยความชื้นที่มีอยู่แล้วในวัตถุดิบ คิดเป็นไอน้ำ 0.5 กรัมต่อ 1 การทดลอง และเนื่องจากปฏิกิริยาการแปรสภาพทางความร้อนด้วยไอน้ำส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน (Endothermic reaction) ซึ่งจะเกิดขึ้นที่ความร้อนสูง และไอน้ำจะมีบทบาทมากกว่าออกซิเจน (Douette และคณะ, 2007) นอกจากนี้ Hirai และคณะ, (2005) ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการแปรสภาพกลีเซอรอลดิบด้วยความร้อนและไอน้ำ พบว่าปฏิกิริยาที่สำคัญที่เกิดขึ้น ได้แก่



นอกจากนี้ Valliyappan และคณะ, (2008) ยังได้เพิ่มเติมปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้อง ดังนี้



จากสมการที่ 4.1 และ 4.5 จะเห็นว่าเมื่อวัตถุดิบถูกป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์แล้ว น้ำและสารระเหยได้จะทำปฏิกิริยากับกลีเซอรอล (Dou และคณะ, 2009) และทำปฏิกิริยากันเองระหว่างน้ำและสารระเหยนั้น ทำให้ภายในเตาปฏิกรณ์เต็มไปด้วยผลิตภัณฑ์ต่างๆ จากการแปรสภาพทางความร้อนนี้ จะเห็นว่านอกจากน้ำที่เจือปนอยู่ในวัตถุดิบแล้ว ยังมีน้ำที่เกิดขึ้นระหว่างทำปฏิกิริยา (สมการที่ 4.4) ซึ่งจะเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาต่างๆ ดังสมการที่แสดงต่อไป เช่น CO และ H₂ ที่ได้จากสมการที่ 4.1 และ 4.4 จะถูกนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในสมการที่ 4.2 และสมการที่ 4.2 และ 4.4 เมื่อมีผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในปริมาณที่มากพอปฏิกิริยาก็จะผันกลับไปสร้างน้ำ CO และมีเทน เป็นต้น



รูปที่ 4.5 ผลของอัตราแก๊สเข้ารวมและ O_2/fuel ratio ต่อปริมาณแก๊สสังเคราะห์ ร้อยละ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน ค่าความร้อนต่ำ และอัตราส่วนโดยโมลของ H_2/CO ที่ 1250°C และ 1400 °C

เนื่องจากการแปรสภาพทางความร้อนของงานวิจัยนี้ ได้พบถ่านชาร์แม้ว่าในปริมาณเล็กน้อย แต่จากสภาวะการทดลองที่อุณหภูมิสูงและมีไอน้ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Valliyappan และคณะ, (2008) ได้ทำการศึกษาการสลายตัวกลีเซอรอลด้วยไอน้ำ ได้ระบุปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนอกเหนือจากที่กล่าวไว้ข้างต้น ดังนี้





จากสมการที่ 4.6 ถึง 4.9 เป็นการเข้าทำปฏิกิริยาของถ่านชาร์ที่เพิ่มขึ้นกับน้ำและ CO_2 ได้เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ให้แก่ปฏิกิริยาที่กำลังดำเนินอยู่ เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดจะพบถ่านชาร์ปนอยู่ในซิลิกอนคาร์ไบด์แบบด้อย่างกระจาย แม้จะมีอยู่ในปริมาณที่ไม่มากนักก็ตาม ในส่วนของค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน (cold gas efficiency: cold gas eff.) คือค่าที่บอกถึงความสามารถในการนำค่าความร้อนจากวัตถุดิบที่ใช้มาเป็นค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยคิดอยู่ในรูปร้อยละ ค่านี้สามารถบอกได้ถึงปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นและประสิทธิภาพด้านพลังงาน จากรูปที่ 4.5 (b) พบว่าค่า cold gas eff. ของชุดการทดลองที่ TF เท่ากับ 1 ลิตร/นาทิจมีค่าสูงกว่า ด้วยเหตุผลในเรื่องของระยะเวลาของการเข้าทำปฏิกิริยา แม้ว่าการให้ออกซิเจนมีผลต่อผลการทดลองแต่ยังคงไม่ชัดเจนต่อผลการทดลองที่เกิดขึ้น

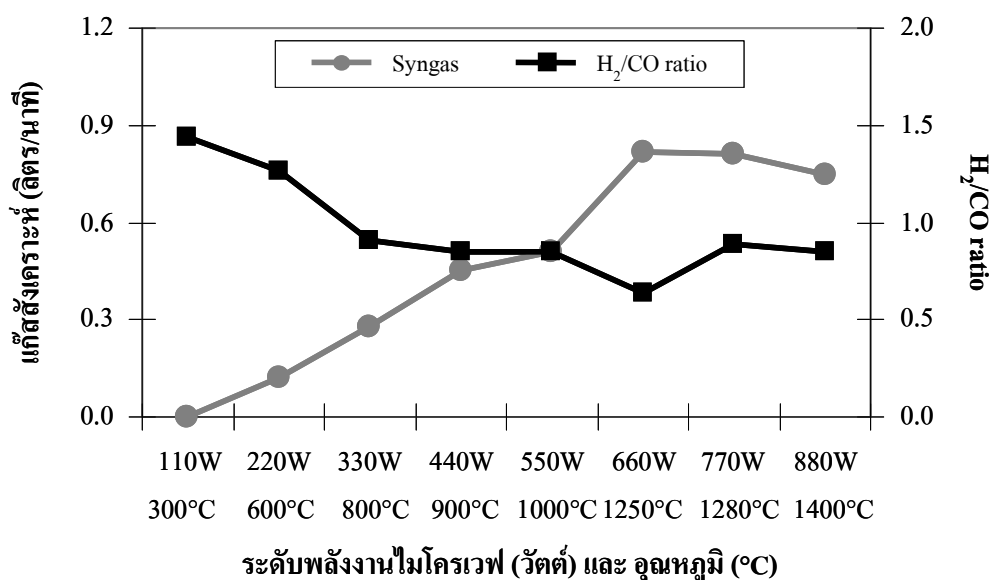
เช่นเดียวกับค่า LHV และค่า H_2/CO ratio โดยค่า LHV ของ TF เท่ากับ 2 ลิตร/นาทิจมีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอแม้ว่าจะมีการเพิ่มปริมาณออกซิเจนเข้าไป คือได้ค่า LHV อยู่ในช่วง 2-5 MJ/m^3 ซึ่งเป็นค่าเดียวกันกับการทดลองที่ TF เท่ากับ 1 ลิตร/นาทิจที่ O_2/fuel ratio เท่ากับ 0 และ 0.25 แต่ที่ O_2/fuel ratio เท่ากับ 0.03-0.13 มีค่าสูงประมาณ 15 MJ/m^3 ในส่วนของค่า H_2/CO ratio (รูปที่ 4.5 (d)) มีแนวโน้มต่อปริมาณออกซิเจนเช่นเดียวกับแก๊สสังเคราะห์ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.7-0.9 ลิตร/นาทิจ ถือว่าเป็นค่าที่ค่อนข้างสูง ใกล้เคียงกับแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากวิธีการผลิตแก๊สสังเคราะห์แบบ Air-coke-steam (Larminie and Dick, 2000) เป็นที่น่าสังเกตว่าผลการทดลองของชุดการทดลองที่ใช้ O_2/fuel ratio เท่ากับ 0.25 มีค่าใกล้เคียงกับชุดการทดลองที่ไม่ใช้ออกซิเจนจากภายนอกเลย แต่ที่ O_2/fuel ratio เท่ากับ 0.03 และ 0.13 เป็นสถานะที่น่าสนใจสำหรับงานวิจัยเพื่อศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของออกซิเจนต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์ต่อไป

จากการทดลองเพื่อศึกษาผลของอัตราการผลิตแก๊สเข้ารวมสรุปได้ว่าที่อัตราการผลิตต่ำกว่า จะให้ผลการทดลองที่ดีกว่า คือให้ปริมาณแก๊สสังเคราะห์ที่มากกว่า คุณภาพแก๊สสังเคราะห์ที่ดีกว่า มีประสิทธิภาพด้านพลังงานสูงกว่า เนื่องจากมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาภายในเตาปฏิกรณ์มากกว่า ส่งผลต่อการศึกษาผลของปริมาณออกซิเจนที่มากขึ้น โดยในชุดการทดลองที่ใช้ TF เท่ากับ 2 ลิตร/นาทิจ ไม่เกิดความเปลี่ยนแปลงของการผลิตแก๊สสังเคราะห์เมื่ออัตราส่วน O_2/fuel เพิ่มขึ้น ในขณะที่ชุดการทดลองที่ใช้ TF เท่ากับ 1 ลิตร/นาทิจมีการเปลี่ยนแปลงทั้งในด้านปริมาณแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้ คุณภาพแก๊สและประสิทธิภาพด้านพลังงาน แต่ยังคงไม่มีแนวโน้มที่

ชัดเจนว่าการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอัตราส่วน $O_2/fuel$ จะมีผลอย่างไรต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์ ทั้งในด้านปริมาณ คุณภาพ และประสิทธิภาพด้านพลังงาน ดังนั้นในชุดการทดลองเพื่อศึกษาผลของระดับอุณหภูมิต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์จึงไม่มีการเติมออกซิเจนจากภายนอก

4.2.3 ผลของอุณหภูมิ

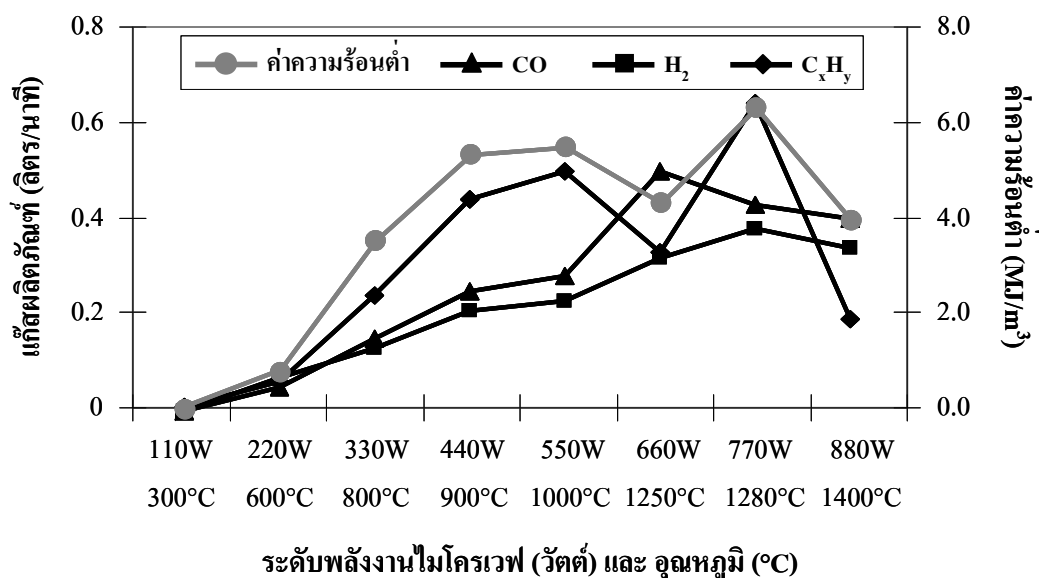
เพื่อศึกษาผลของระดับความร้อนที่เกิดขึ้นในชั้นเบดต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์ และจากผลการทดลองเพื่อศึกษาผลของอัตราการใช้ไอลแก๊สเข้ารวม (TF) และอัตราส่วน $O_2/fuel$ ชุดการทดลองนี้จึงกำหนดให้ TF มีค่าเท่ากับ 1 ลิตร/นาทิจนไม่มีการเติมอากาศคือให้มีเฉพาะแก๊สพาเป็นไนโตรเจนเท่านั้น แล้วทำการแปรผันระดับอุณหภูมิตามระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟ ผลการทดลองดังรูปที่ 4.6-4.8



รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณแก๊สสังเคราะห์และ ค่า H_2/CO ratio ที่ได้จากการแปรผันระดับกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 110-880 วัตต์ อัตราไอลแก๊สเข้ารวมเท่ากับ 1 ลิตร/นาทิจนไม่เติมออกซิเจน

จากรูปที่ 4.6 ในส่วนของค่า H_2/CO ratio พบว่าที่ 300-800°C (110-330 วัตต์) มีค่าประมาณ 1.0 และมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มพลังงานไมโครเวฟให้สูงขึ้น คืออยู่ในช่วง 0.85-0.89 ซึ่งจัดเป็นค่าที่ค่อนข้างสูงเทียบเท่ากับกระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากถ่านโค้กด้วยวิธี Oxygen-coke-steam และ Air-coke-steam ซึ่งได้ค่า H_2/CO ratio เท่ากับ 0.6 และ 0.9 ตามลำดับ นอกจากนี้หากวิธีนี้ได้รับการพัฒนาจะสามารถแข่งขันได้กับวิธีการผลิตแก๊สสังเคราะห์แบบ Oxygen-coal-steam และ Oxygen-fuel oil-steam ซึ่งมีค่า H_2/CO ratio เท่ากับ 1.0 อีกด้วย

จะเห็นว่าที่อุณหภูมิมากกว่า 1000°C ขึ้นไปเป็นสภาวะที่ดีที่สุดสำหรับการ ไพโรไลซิสเพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ โดยยังไม่คำนึงถึงพลังงานที่ใช้ ซึ่งได้แก๊สสังเคราะห์ประมาณ 0.9 ลิตร/นาที่ และได้ค่า H_2/CO ratio ประมาณ 0.8 อย่างไรก็ตามสภาวะที่เหมาะสมเมื่อคำนึงถึงพลังงานที่ต้องใช้ จำเป็นต้องพิจารณาความต้องการด้านอื่นในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ เช่น การเพิ่มพลังงานไมโครเวฟจาก 550 วัตต์เป็น 660 วัตต์ (เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 20) จะสามารถเพิ่มปริมาณแก๊สสังเคราะห์ได้อีกประมาณร้อยละ 61 แต่คุณภาพแก๊สลดลงประมาณร้อยละ 25 ซึ่งหากให้ความสำคัญกับปริมาณแก๊สสังเคราะห์มากกว่า ที่ระดับพลังงานไมโครเวฟเท่ากับ 660 วัตต์ก็จะเป็นสภาวะที่ดีกว่าที่ 550 วัตต์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ได้ให้ความสำคัญกับพลังงานด้วย จึงสรุปว่าที่ 440 วัตต์ สามารถให้แก๊สผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ คือให้ค่าอัตราส่วน H_2/CO ประมาณ 0.9 ซึ่งมีค่าเทียบเท่ากับที่ค่าที่ได้ที่ระดับพลังงานที่สูงกว่า แม้ว่าปริมาณแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จะน้อยกว่า แต่เมื่อพิจารณาตัวชี้วัดอื่นประกอบแล้ว จะพบว่าที่สภาวะนี้ให้ผลการทดลองที่น่าพอใจ ดังจะได้นำเสนอต่อไป



รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์และ ค่าความร้อนต่ำ ที่ได้จากการแปรผันระดับกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 110-880 วัตต์ อัตราไหลแก๊สเข้ารวมเท่ากับ 1 ลิตร/นาที่ ไม่เติมออกซิเจน

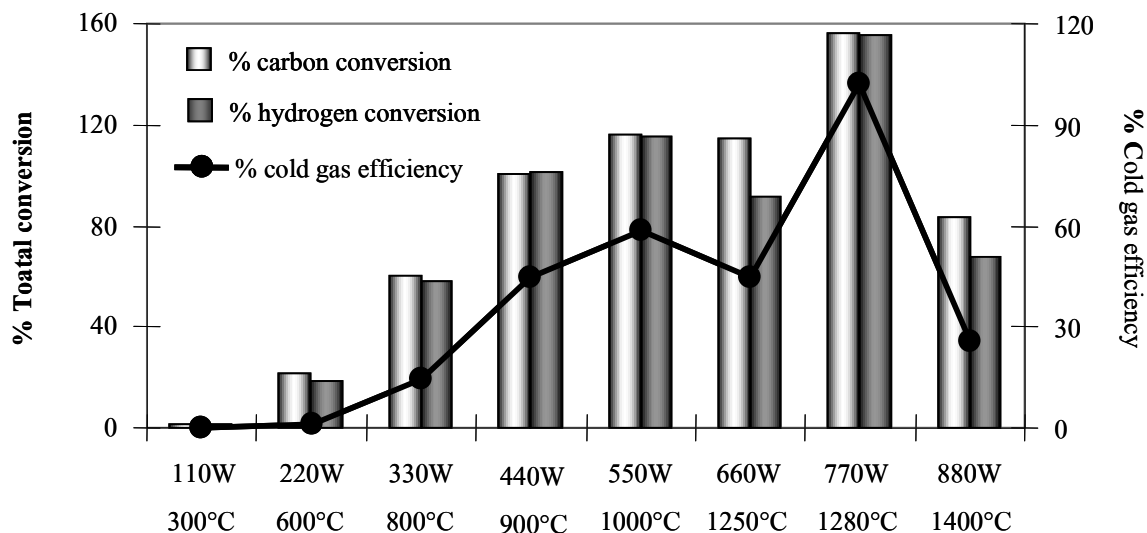
จากรูปที่ 4.7 พบว่าที่อุณหภูมิ 1250°C - 1400°C ปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าสูง โดยปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊ส H_2 และ CO ที่ได้มีค่าประมาณ 0.3-0.4 และ 0.4-0.5 ลิตร/นาที่ ตามลำดับ ส่วนค่า C_xH_y มีค่าสูงที่สุดที่ 1280°C เท่ากับ 0.64 ลิตร/นาที่ เช่นเดียวกับค่า LHV ที่ได้ค่าสูงสุดที่สภาวะนี้โดยมีค่าเท่ากับ 6.0 MJ/m^3 นอกจากนี้พบว่าค่า LHV ที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิตั้งแต่

800°C ขึ้นไปมีค่าประมาณ 3.4-6.0 MJ/m³ จัดเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ (Low Btu Gas) ซึ่งสามารถนำไปใช้เพื่อผลิตไฟฟ้าสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็กได้

นอกจากนี้ยังพบว่าที่ 1250°C แก๊ส H₂ และ CO มีค่าเพิ่มสูงขึ้นในขณะที่ CH₄ มีค่าลดลงเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากสมการที่ 4.4, 4.10 และ 4.11 เป็นผลให้ปริมาณ CH₄ ลดลงเล็กน้อย



อย่างไรก็ตามการเกิดแก๊สที่ 440 วัตต์ซึ่งถือเป็นสภาวะที่ใช้พลังงานไม่มาก จะเห็นว่าได้ผลการทดลองเกาะกลุ่มอยู่ระดับเดียวกันกับผลการทดลองจากสภาวะที่ใช้พลังงานที่สูงกว่า ดังนั้นที่ระดับอุณหภูมิ 1000°C หรือ 440 วัตต์ จึงเป็นสภาวะที่น่าสนใจ ดังนั้นจึงทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพด้านพลังงานต่อไปดังรูปที่ 4.8



ระดับพลังงานไมโครเวฟ (วัตต์) และ อุณหภูมิ (°C)

รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนในวัตถุดิบไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ และค่า cold gas efficiency ที่ได้จากการแปรผันระดับกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 110-880 วัตต์ อัตราไหล่แก๊สเข้ารวมเท่ากับ 1 ลิตร/นาที ไม่เติมออกซิเจน

จากรูปที่ 4.8 ร้อยละการแปรสภาพของคาร์บอน (%C convs.) และไฮโดรเจน (%H convs.) มีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มพลังงานไมโครเวฟ และมีการแปรสภาพอย่างสมบูรณ์ที่ระดับพลังงานไมโครเวฟตั้งแต่ 440 วัตต์ขึ้นไป ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ (รูปที่ 4.6-4.7) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากความร้อนที่มีผลต่อการสลายตัวของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่าง

ดำเนินปฏิกิริยา รวมถึงน้ำที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาซึ่งจะช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนด้วยไอน้ำเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนหรือ cold gas eff. ที่ 440-660 วัตต์มีค่าประมาณร้อยละ 45-60 ซึ่งสูงกว่าที่ 330 วัตต์ถึง 5 เท่า ดังนั้นชุดการทดลองแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเลือกที่สภาวะที่มีประสิทธิภาพด้านพลังงานไม่เกินร้อยละ 100 จึงเลือกที่ระดับกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 110-330 วัตต์ เป็นระดับพลังงานไมโครเวฟที่ใช้ในชุดการทดลองที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าช่วยแทนการใช้สภาวะที่มีความร้อนสูง หรือที่สภาวะที่ใช้พลังงานไมโครเวฟสูงนั่นเอง

อย่างไรก็ตามในชุดการทดลองที่ให้ค่าการแปรสภาพที่สูงกว่าร้อยละเปอร์เซ็นต์ อาจเกิดจากความผิดพลาดเนื่องจากการวัดความเร็วแก๊ส ซึ่งแม้ว่าจะมีการหล่อเย็นแก๊สขาออก แต่ด้วยความเร็วแก๊สที่สูง อาจทำให้แก๊สขาออกสามารถนำความร้อนไปด้วย และส่งผลให้การวัดปริมาณแก๊สที่ได้มากกว่าความเป็นจริง ในบางชุดการทดลองอาจเกิดความผิดพลาดเนื่องจากเครื่องวิเคราะห์แก๊สผลิตภัณฑ์ ที่ใช้งานอย่างต่อเนื่อง อาจส่งผลให้เกิดการตกค้างของแก๊สภายในเครื่องตรวจวัดได้ และในส่วนของชุดการทดลองที่ 110-330 วัตต์ที่ให้ผลการทดลองที่ต่ำกว่าที่พลังงานไมโครเวฟตั้งแต่ 440 วัตต์ขึ้นไปนั้น อาจเกิดจากความร้อนที่เกิดขึ้นจริงในระหว่างการดำเนินปฏิกิริยาต่ำกว่าที่วัดได้จากการทำ Temperature profile เนื่องจากความร้อนของแก๊สขาเข้ารวมที่ต้องอาศัยความร้อนจากชั้นเบดในการอุ่นแก๊สก่อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ (เตาปฏิกรณ์ถูกออกแบบให้แก๊สขาเข้าได้รับความร้อนจากชั้นเบดก่อนเข้าสู่ปฏิกิริยา) ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่ความร้อนของชั้นเบดไม่มากพอที่จะอุ่นแก๊สก่อนเข้าทำปฏิกิริยา ทำให้อุณหภูมิของแก๊สขาเข้าส่งผลต่อความร้อนรวมของระบบ

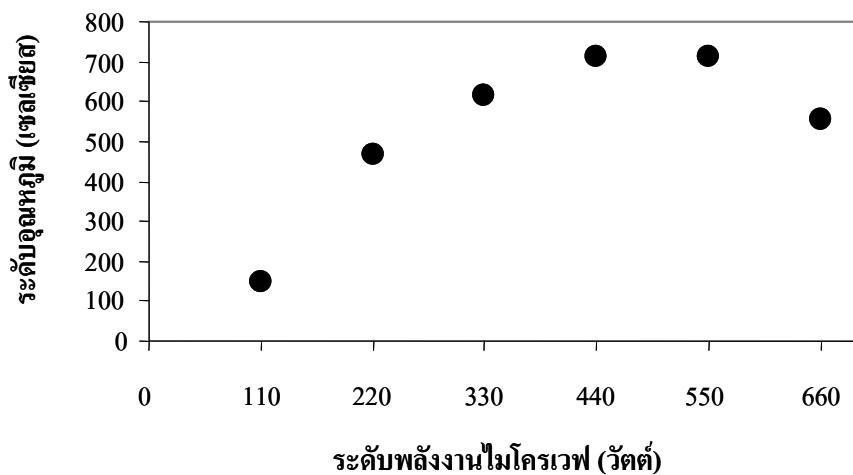
สรุปตัวแปรที่มีผลอย่างชัดเจนต่อการดำเนินปฏิกิริยาแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ อุณหภูมิ โดยมีเมื่อระบบมีความร้อนสูงขึ้น จะส่งผลต่อปริมาณแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้ คุณภาพของแก๊สสังเคราะห์นั้นและประสิทธิภาพด้านพลังงาน อย่างไรก็ตามอัตราการไหลแก๊สขาเข้ารวมและอัตราส่วน $O_2/fuel$ ยังคงเป็นตัวแปรที่น่าสนใจในงานวิจัยต่อไป

4.3 การแปรสภาพทางความร้อนของกลีเซอรอลดิบโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล

ชั้นเบดของชุดการทดลองแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแตกต่างจากการทดลองที่ผ่าน โดยซิลิกอนคาร์ไบด์จะถูกใช้เพียง 20 กรัม อีก 20 กรัมเป็นเบดตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการเคลือบนิกเกิลแล้ว (Catalyst bed: Ni/SiC bed) ทั้งนี้ก่อนดำเนินปฏิกิริยามีการทำ Temperature profile ของเบดตัวเร่งปฏิกิริยาเช่นเดียวกับซิลิกอนคาร์ไบด์เบด (SiC bed) จากนั้นจึงทำการทดลองที่อัตราแก๊สขาเข้ารวมเท่ากับ 1 ลิตรต่อนาที ไม่มีการเติมออกซิเจนจากภายนอก ทำการแปรผันปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเริ่มที่ร้อยละ 10 แล้วลดจนถึงร้อยละ 1 ผลการทดลองเป็นดังนี้

4.3.1 Temperature profile ของเบดตัวเร่งปฏิกิริยา

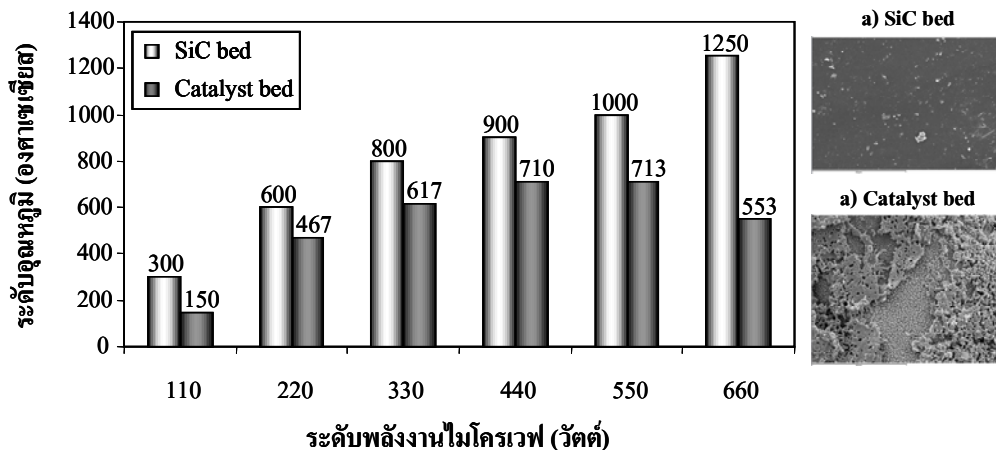
อุณหภูมิของเบดตัวเร่งปฏิกิริยาในเตาปฏิกรณ์ ที่ถูกวัดหลังจากรับคลื่นไมโครเวฟเป็นเวลา 5 นาที ซึ่งเท่ากับระยะเวลาที่ใช้ในการอุ่นระบบให้มีความร้อนก่อนที่จะป้อนวัตถุดิบเข้าสู่ระบบ ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ผลของพลังงานไมโครเวฟตั้งแต่ 110-880 วัตต์ต่อระดับอุณหภูมิของเบดตัวเร่งปฏิกิริยา

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าระดับอุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มพลังงานไมโครเวฟ จนถึงที่ระดับ 440 วัตต์ ซึ่งมีอุณหภูมิเท่ากับ 710°C เป็นความร้อนสูงสุดที่ได้ เพราะเมื่อเพิ่มพลังงานไมโครเวฟให้สูงขึ้นไปอีกพบว่าความร้อนที่ได้เริ่มลดลง อาจเนื่องมาจากความร้อนรวมของระบบมากกว่า 600°C ซึ่งเป็นจุดหลอมเหลวของนิกเกิล (อนันต์, 2548) ทำให้เกิดการรวมตัวกันของนิกเกิล (sintering) จนกระทั่งอนุภาคเล็กๆ หายไปกลายเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น (รูปที่ 4.10 b)) และเนื่องจากคุณสมบัติการสะท้อนคลื่นไมโครเวฟของโลหะ ทำให้ความสามารถในการรับคลื่นไมโครเวฟเพื่อเปลี่ยนเป็นความร้อนของซิลิกอนคาร์ไบด์ลดลง ส่งผลให้อุณหภูมิสุดท้ายที่ทำการวัดมีค่าลดลง

เนื่องจากระดับอุณหภูมิของเบดตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าน้อยกว่าซิลิกอนคาร์ไบด์เบด จึงจำเป็นต้องเลือกที่ระดับพลังงานไมโครเวฟที่ให้ค่าความร้อนใกล้เคียงกันมากที่สุด จึงทำการเปรียบเทียบ Temperature profile ดังรูปที่ 4.10

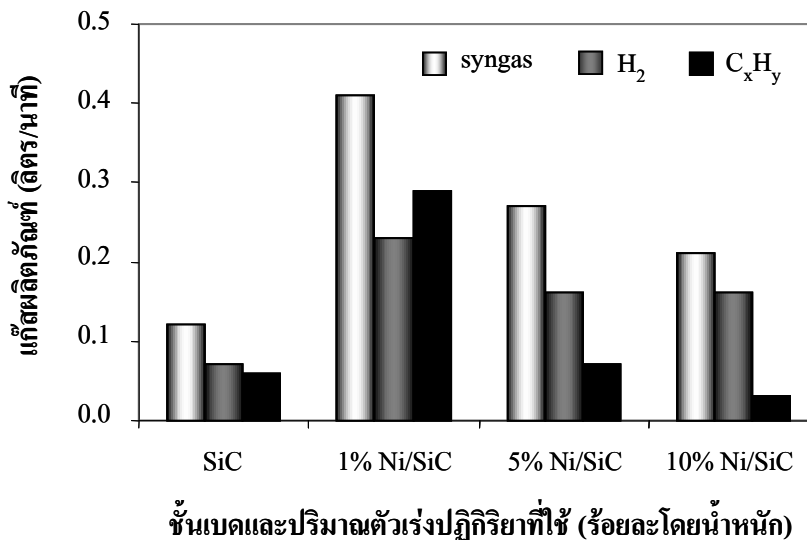


รูปที่ 4.10 ผลของพลังงานไมโครเวฟ 110-660 วัตต์ ต่ออุณหภูมิของซิลิกอนคาร์ไบด์เบดและเบดตัวเร่งปฏิกิริยา และภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1000 เท่า โดยที่ a) เบดซิลิกอนคาร์ไบด์ และ b) เบดตัวเร่งปฏิกิริยา (10% Ni/SiC)

จากภาพที่ 4.10 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ไม่ถูกเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (a) และถูกเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (b) เห็นได้อย่างชัดเจนว่าซิลิกอนคาร์ไบด์เบดมีพื้นที่ผิวในการรับคลื่นไมโครเวฟมากกว่าเบดตัวเร่งปฏิกิริยา โดยคุณสมบัติการรับคลื่นไมโครเวฟได้ของซิลิกอนคาร์ไบด์นี้ มีความสำคัญต่อการให้ความร้อนแก่ปฏิกิริยาในงานวิจัยนี้ แต่ในชุดการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซิลิกอนคาร์ไบด์จะถูกลดบทบาทในการเป็นตัวรับคลื่นไมโครเวฟลง และกลายเป็นตัวรองรับโลหะนิกเกิลที่สามารถสะท้อนคลื่นไมโครเวฟได้ ความร้อนที่เกิดขึ้นที่ระดับพลังงานไมโครเวฟเดียวกันจึงต่างกัน จากการทดลองโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ระดับ 110-330 วัตต์ ถูกเลือกมาเพื่อทำการทดลองในชุดการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และที่ 330 วัตต์ ให้ความร้อนเท่ากับ 617°C ซึ่งเป็นระดับความร้อนที่ใกล้เคียงกับความร้อนที่ได้จากซิลิกอนคาร์ไบด์เบดที่ 220 วัตต์ ดังนั้นการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเลือกที่ระดับพลังงานไมโครเวฟเท่ากับ 330 วัตต์ อัตราการไหลแก๊สเข้ารวมเท่ากับ 1 ลิตร/นาทีและไม่เติมออกซิเจน โดยเริ่มทำการทดลองที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 10%Ni/SiC ก่อน จากงานวิจัยของ Sun และคณะ, (2005) ที่ทำการทดลองผลิตแก๊สสังเคราะห์จากมีเทน โดยใช้เตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนซิลิกอนคาร์ไบด์เท่ากับร้อยละ 5-20 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองพบว่าที่ปริมาณตัวเร่งร้อยละ 10 ให้ปริมาณแก๊สสังเคราะห์สูงสุด

4.3.2 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

การทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เริ่มที่ปริมาณมากที่สุดคือร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของ ซิลิกอนคาร์ไบด์เบดที่ใช้เป็นตัวรองรับ แล้วจึงลดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาลงเป็นร้อยละ 5 และร้อยละ 1 ตามลำดับ เมื่อสิ้นสุดการทดลอง เบดตัวเร่งปฏิกิริยาถูกนำไปศึกษาลักษณะพื้นผิวที่เปลี่ยนไป ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscope: SEM) และเพื่อศึกษาชนิดของธาตุที่จะพบและการกระจายตัวของธาตุนั้นๆ จึงทำการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer: EDS) (ภาคผนวก ก)



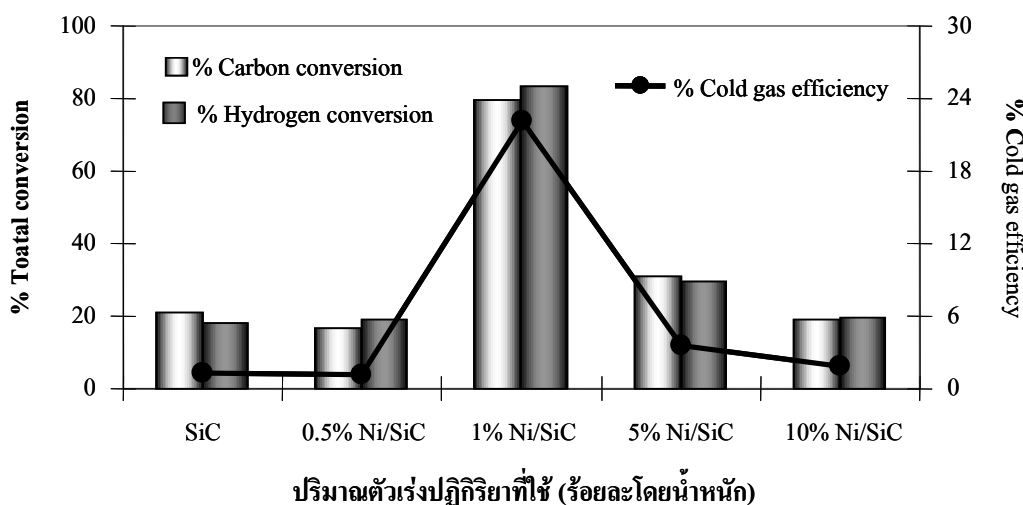
รูปที่ 4.11 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ ที่อุณหภูมิ 600°C อัตราไหลแก๊สเข้ารวมเท่ากับ 1 ลิตร/นาท ไม่เติมออกซิเจน

จากรูปที่ 4.11 ปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า ที่ 1%Ni/SiC ให้ผลิตภัณฑ์แก๊สสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ 1% Ni/SiC กับชุดที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (SiC) พบว่าปริมาณแก๊สสังเคราะห์เพิ่มจาก 0.12 ลิตร/นาท เป็น 0.41 ลิตร/นาท คิดเป็น 3.4 เท่า หรือร้อยละ 240 ปริมาณแก๊ส H₂ เพิ่มจาก 0.07 ลิตร/นาท เป็น 0.23 ลิตร/นาท คิดเป็น 3.3 เท่า หรือร้อยละ 229 และปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์จำพวกไฮโดรคาร์บอน (C_xH_y) เพิ่มจาก 0.06 ลิตร/นาท เป็น 0.29 ลิตร/นาท คิดเป็น 4.8 เท่า หรือร้อยละ 383 ทั้งนี้ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ต่อแก๊สผลิตภัณฑ์ได้สรุปแล้วในตารางที่ 4.4 จะเห็นว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์คือ 1% Ni/SiC ซึ่งนอกจากจะให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดแล้ว ยังเป็นการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยที่สุดอีกด้วย

ตารางที่ 4.4 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้น โดยเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่สภาวะเดียวกัน

ผลจากการใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยา	1% Ni/SiC			5% Ni/SiC			10% Ni/SiC		
	syngas	H ₂	C _x H _y	syngas	H ₂	C _x H _y	syngas	H ₂	C _x H _y
คิดเป็นร้อยละ	▲240	▲229	▲383	▲125	▲128	▲17	▲75	▲128	▼50
คิดเป็นจำนวนเท่า	3.4	3.3	4.8	2.3	2.3	1.2	1.75	1.29	2.0

นอกจากนี้ร้อยละการแปรสภาพคาร์บอน (%C conv.) และไฮโดรเจน (%H conv.) ในวัตถุดิบไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ และค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน (cold gas eff.) ของชุดการทดลองที่ 1%Ni/SiC ยังมีค่าสูงที่สุด ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพด้านพลังงาน ที่ระดับอุณหภูมิ 600°C อัตราไหลแก๊สเข้ารวมกับ 1 ลิตร/ นาที ไม่เติมออกซิเจน

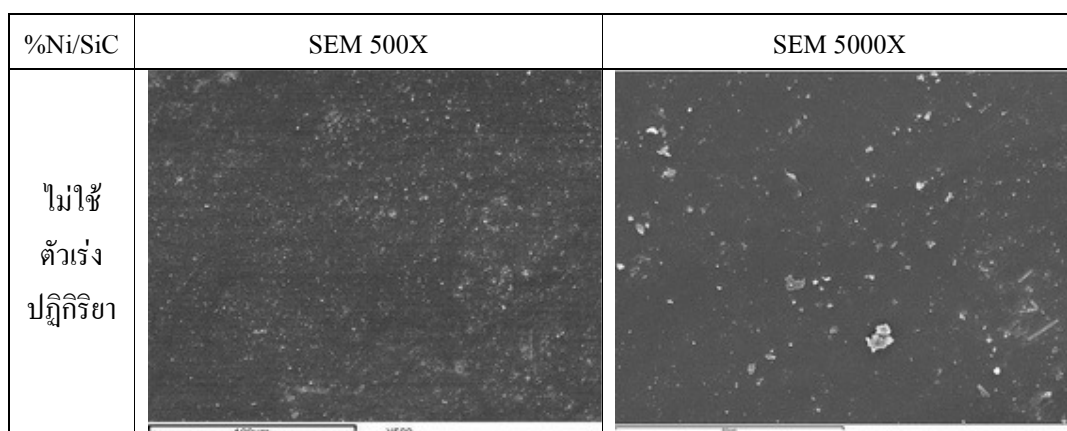
จากการทดลองพบว่าค่า %C conv. และค่า %H conv. จากชุดการทดลองที่ใช้ 1%Ni/SiC ให้ค่าสูงสุด ดังรูปที่ 4.12 โดยค่า %C conv. เพิ่มขึ้นจากชุดการทดลองที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถึง 3.8 เท่า ค่า%H conv. เพิ่มขึ้น 4.6 เท่า และค่า cold gas eff. เพิ่มขึ้นถึง 17.9 เท่า การเพิ่มขึ้นของค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดลองที่ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกันเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกสรุปไว้ในตารางที่ 4.5

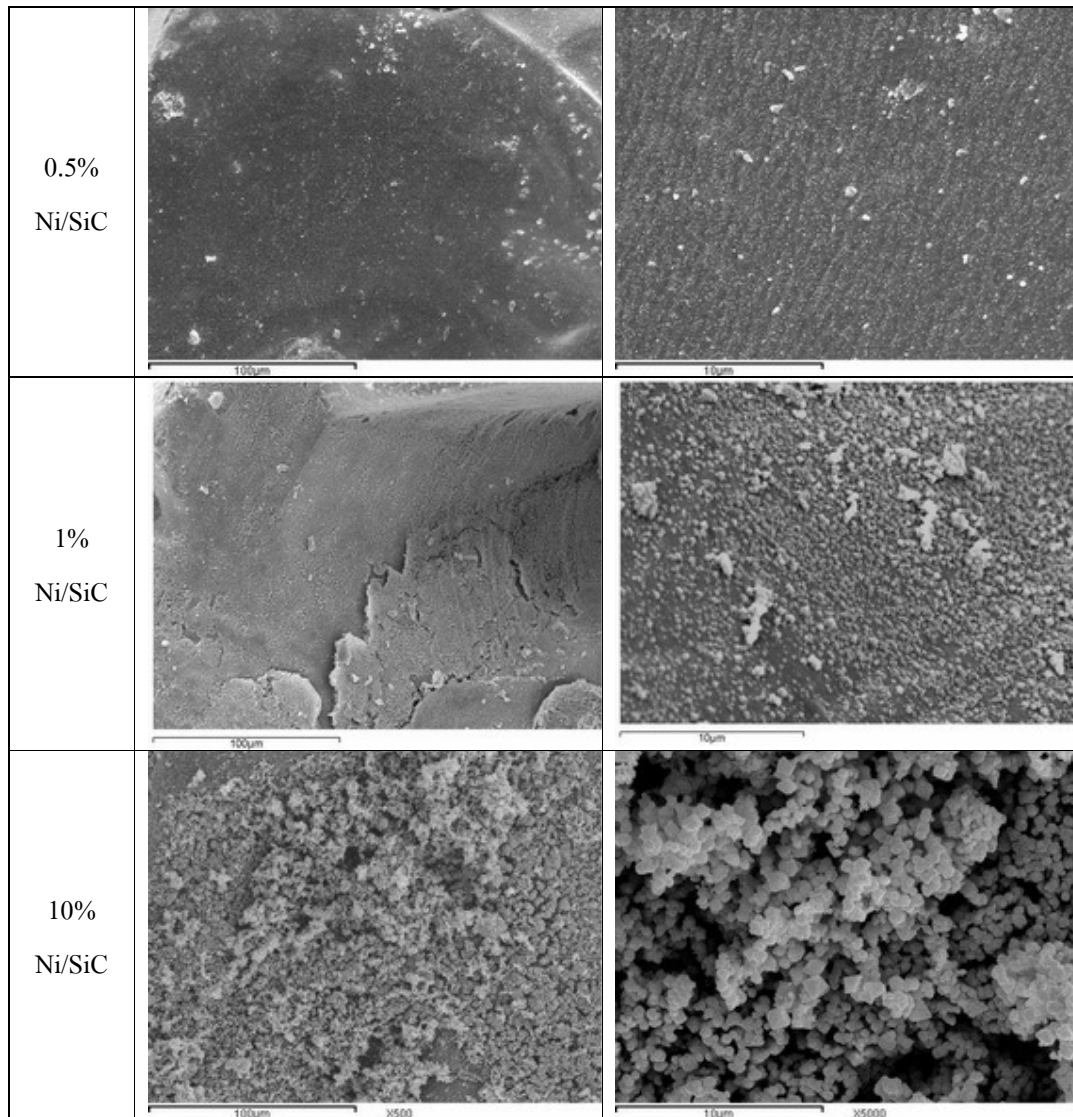
ตารางที่ 4.5 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพด้านพลังงาน โดยเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่สภาวะเดียวกัน

ผลจากการใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยา	1% Ni/SiC			5% Ni/SiC			10% Ni/SiC		
	% C	% H	cold gas eff.	% C	% H	cold gas eff.	% C	% H	cold gas eff.
คิดเป็นร้อยละ	▲297	▲364	▲1690	▲47	▲63	▲229	▼8.7	▲9.5	▲49
คิดเป็นจำนวนเท่า	3.8	4.6	17.9	1.5	1.6	2.8	1.1	1.1	1.5

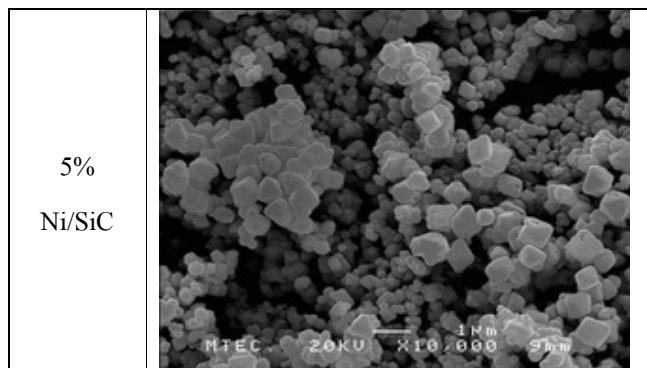
จากผลการทดลองข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่น้อยกว่า จะให้ผลการทดลองที่ดีกว่า ทั้งนี้เนื่องจากชุดการทดลองที่ใช้ปริมาณนิกเกิลมากกว่าเกิดการหลอมรวมกัน (ดังภาพ SEM ในตารางที่ 4.11) ของอนุภาคนิกเกิลจนเป็นแผ่นใหญ่ ทำให้บริเวณเร่ง (active site) ลดลง ส่งผลต่อการเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและแก๊สผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้น อีกทั้งปริมาณนิกเกิลที่น้อยกว่ายังส่งผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคนิกเกิลบนซิลิกอนคาร์ไบด์ได้ดีกว่า จึงทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารตั้งต้นมากกว่า นอกจากนี้ดังที่ได้เคยกล่าวไว้ข้างต้นเกี่ยวกับอนุภาคนิกเกิลที่ขัดขวางการรับคลื่นไมโครเวฟเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน โดยการปิดคลุมผิวหน้าของซิลิกอนคาร์ไบด์ ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของเบดตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณนิกเกิลต่างๆ





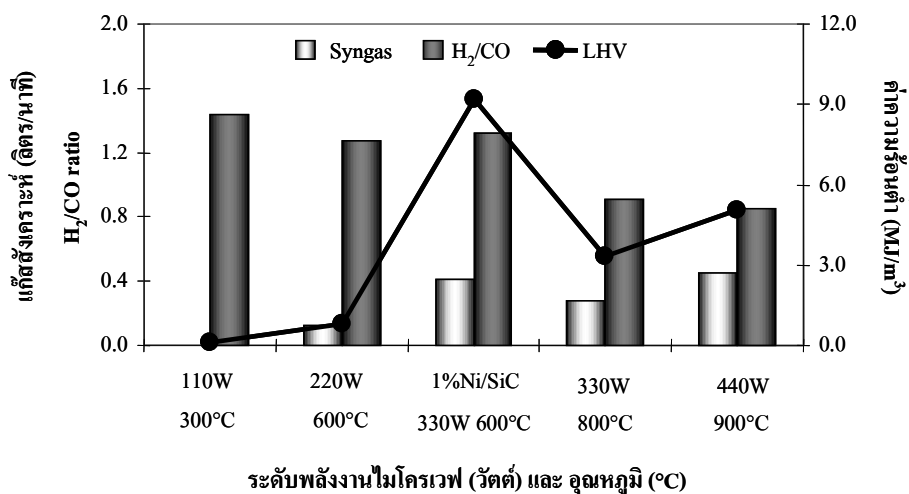
หมายเหตุ: ภาพ SEM ของชุดการทดลอง 5%Ni/SiC มีเฉพาะที่กล้องขยาย 10000 เท่า



ปฏิกิริยาเร่งที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณนิกเกิลที่ใช้และการกระจายตัวของอนุภาคตัวเร่งนั้น (Sutton และคณะ, 2001) การทดลองจึงดำเนินต่อด้วยการลดปริมาณนิกเกิลลงอีก โดยใช้เท่ากับ

0.5%Ni/SiC พบว่าผลการทดลองแย่งเมื่อเทียบกับ 1%Ni/SiC (รูปที่ 4.12) และมีผลการทดลองใกล้เคียงกับชุดการทดลองที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากปริมาณที่น้อยเกินไปจนไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเร่ง สังเกตได้จากภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่าของชุดการทดลองนี้ (ตารางที่ 4.6) จะเห็นว่าอนุภาคของนิกเกิลเล็กและมีปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับชุดการทดลองที่ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 1%Ni/SiC จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS (ภาคผนวก ก) ยังแสดงให้เห็นว่าไม่พบอนุภาคนิกเกิลบนตัวรองรับ ดังนั้นหากมีการทำวิจัยเพิ่มเติมควรทำการแปรผันปริมาณนิกเกิลในช่วง 0.5-1.0 Ni/SiC

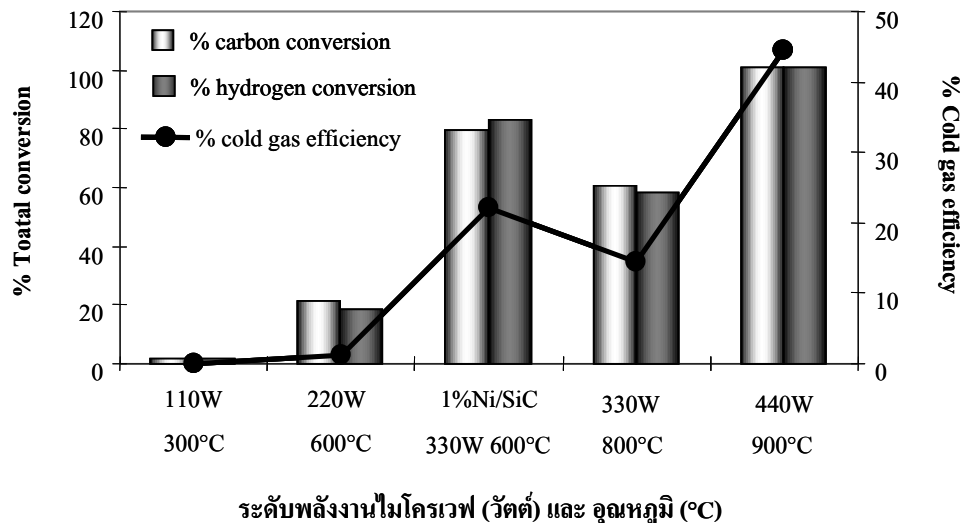
สรุปได้ว่าที่ 1%Ni/SiC ให้ผลการทดลองดีที่สุดในการผลิตแก๊สสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และเมื่อนำผลการทดลองนี้เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ใช้กำลังไฟฟ้า หรือพลังงานไมโครเวฟมากกว่าได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.13 และ 4.14



รูปที่ 4.13 ผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณและคุณภาพแก๊สสังเคราะห์ที่ได้โดยเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ระดับอุณหภูมิที่ต่างๆ อัตราการไหลแก๊สเข้ารวมเท่ากับ 1 ลิตร/นาที่ ไม่เติมออกซิเจน

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าที่ 1%Ni/SiC ให้ค่า LHV สูงถึง 9.2 MJ/m³ ซึ่งมากกว่าชุดการทดลองแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ระดับอุณหภูมิ 1280°C (เป็นสภาวะที่ได้ค่า LHV สูงที่สุดของชุดการทดลองที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเท่ากับ 6.0 MJ/m³) และมากกว่า LHV ที่ระดับพลังงานไมโครเวฟเท่ากันคือ 330 วัตต์ อยู่ร้อยละ 174 หรือเท่ากับ 2.7 เท่า หากเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน (600°C/220W) พบว่าที่ 1%Ni/SiC มีค่า LHV สูงกว่าถึง 11.2 เท่า ในส่วนของปริมาณแก๊สสังเคราะห์ของ 1%Ni/SiC มีค่าใกล้เคียงกับชุดการทดลองที่ระดับ

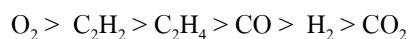
อุณหภูมิ 900°C โดยมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 9.8 แต่มีค่า LHV และ H₂/CO ratio สูงกว่าร้อยละ 44.8 และ 35.6 ตามลำดับ



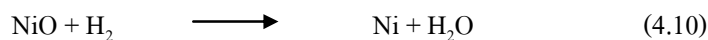
รูปที่ 4.14 ผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อต่อประสิทธิภาพด้านพลังงาน โดยเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ระดับอุณหภูมิที่ต่างๆ อัตราการไหลแก๊สเข้ารวมเท่ากับ 1 ลิตร/นาที ไม่เติมออกซิเจน

จากรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าที่ระดับพลังงานไมโครเวฟเท่ากัน ชุดการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 1%Ni/SiC ให้ค่า %C conv. และ ค่า %H conv. สูงกว่าชุดที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับร้อยละ 24.2 และ 30.1 ตามลำดับ สำหรับค่า % cold gas eff. ของชุดการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาให้ค่าสูงกว่าชุดการทดลองที่ระดับพลังงานไมโครเวฟเท่ากันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับร้อยละ 35.1

เนื่องจากคุณสมบัติในการดูดซับทางเคมีของนิกเกิลที่มีต่อแก๊สต่างๆ โดยเรียงลำดับตามความสามารถในการดูดซับทางเคมีดังนี้ (Bond G.C., 1986)



แก๊สออกซิเจนมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับทางเคมีกับผิวโลหะนิกเกิลสูง ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่ใช้จึงอยู่ในรูปของ NiO ในขณะที่เดียวกัน NiO สามารถทำปฏิกิริยากับ H₂ ได้เป็นไอน้ำ (สมการที่ 4.10) ให้กับปฏิกิริยาการแปรสภาพด้วยไอน้ำ (steam reforming) ได้อีกด้วย

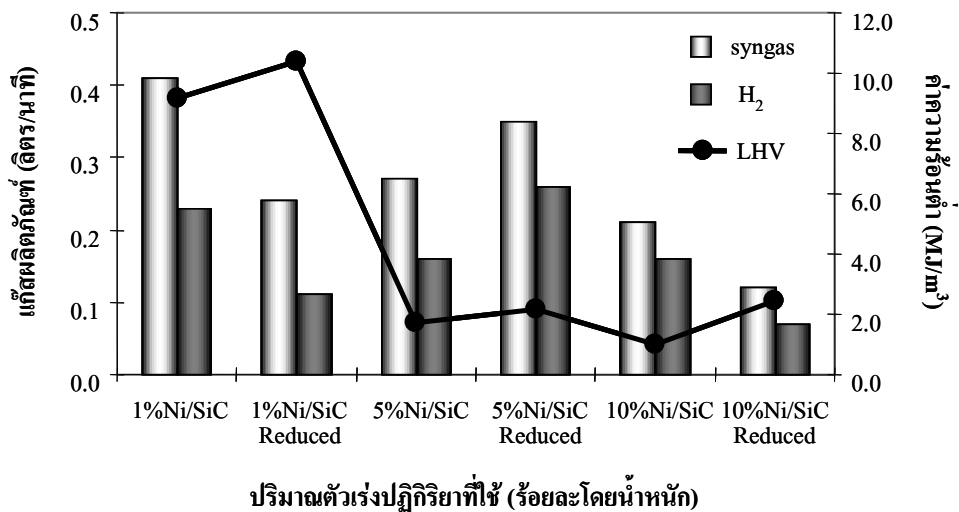


จะเห็นว่านอกจากจะได้น้ำเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายตัวด้วยไอน้ำแล้ว (steam reforming) ยังได้นิกเกิลในรูปโลหะนิกเกิล (Ni) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งให้เกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในระบบ ซึ่งมีโอกาสที่จะเปลี่ยนไปมาระหว่างโลหะนิกเกิลและออกไซด์ของนิกเกิลได้ตลอดการดำเนินปฏิกิริยา ดังนั้นผลการทดลองที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงสูงกว่าผลการทดลองที่ระดับอุณหภูมิเดียวกันแต่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่มาก เพราะนอกจากจะมีโลหะนิกเกิลช่วยเร่งปฏิกิริยาการสลายพันธะของแก๊สผลิตภัณฑ์ต่างๆ แล้ว ยังช่วยเพิ่มไอน้ำซึ่งถือว่าเป็นการเติมสารตั้งต้นของปฏิกิริยาการแปรสภาพทางความร้อนด้วยไอน้ำอีกด้วย

ผลการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์พบว่า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีผลต่อการกระจายตัวของนิกเกิลบนตัวรองรับ ซึ่งนอกจากการกระจายตัวที่ดีกว่า จะทำให้เกิด active site ที่มากกว่าแล้ว ยังเป็นผลให้ผิวหน้าของซิลิกอนคาร์ไบด์ได้รับพลังงาน ไมโครเวฟเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้อีกด้วย สรุปได้ว่าที่ 1%Ni/SiC ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด

4.3.3 ผลของการรีดิวซ์เบดตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฮโดรเจน

การรีดิวซ์เบดตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นการทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวเชิงปฏิกิริยามากขึ้น (อนันต์, 2548) โดยนำออกซิเจนที่ดูดซับอยู่บนพื้นผิวโลหะออกก่อนนำเข้าไปทำปฏิกิริยา ในงานวิจัยนี้ใช้ไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นตัวรีดิวซ์ สมการที่ 4.10 แสดงปฏิกิริยาการรีดิวซ์ด้วยแก๊สไฮโดรเจน หลังจากปล่อยให้อุณหภูมิของเบดตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้องแล้ว จึงนำไปดำเนินการทดลอง ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1, 5 และ 10 เพื่อศึกษาผลของการใช้ไฮโดรเจนรีดิวซ์ก่อนดำเนินปฏิกิริยา ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.15



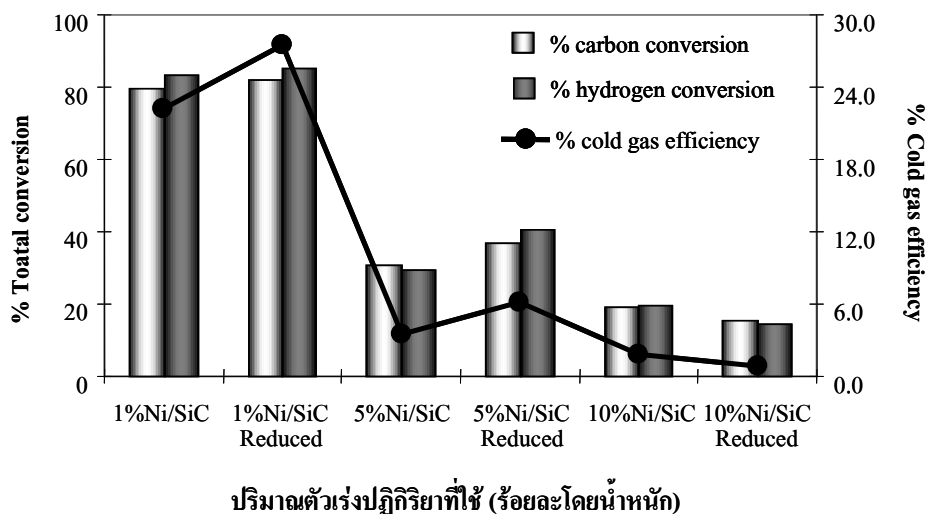
รูปที่ 4.15 ผลของการรีดิวซ์เบดตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์และค่าความร้อนต่อที่อุณหภูมิ 600°C อัตราการไหลแก๊สเข้ารวมเท่ากับ 1 ลิตร/นาฬิกา ไม่เติมออกซิเจน

จากรูปที่ 4.15 พบว่าชุดการทดลองที่เบดตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับการรีดิวซ์มีค่า LHV สูงขึ้น คิดเป็นร้อยละ 13, 63 และ 144 สำหรับชุดการทดลองที่ 1%Ni/SiC 5%Ni/SiC และ 10%Ni/SiC ตามลำดับ ส่วนปริมาณแก๊สสังเคราะห์และแก๊สไฮโดรเจนของชุดการทดลองที่ 1%Ni/SiC และ 10%Ni/SiC มีค่าลดลง แต่ชุดการทดลองที่ 5%Ni/SiC มีค่าเพิ่มขึ้น ตารางที่ 4.7 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการรีดิวซ์เบดตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลิตภัณฑ์แก๊สและ LHV ที่ได้

ตารางที่ 4.7 ผลของการรีดิวซ์เบดตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าผลิตภัณฑ์แก๊สและค่าความร้อนต่ำ โดยเทียบกับชุดการทดลองที่เบดตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ถูกรีดิวซ์ ที่สภาวะเดียวกัน

ผลจากการรีดิวซ์	1% Ni/SiC			5% Ni/SiC			10% Ni/SiC		
	syngas	H ₂	LHV	syngas	H ₂	LHV	syngas	H ₂	LHV
คิดเป็นร้อยละ	▼ 42	▼ 52	▲ 13	▲ 24	▲ 30	▲ 63	▼ 43	▼ 56	▲ 144
คิดเป็นจำนวนเท่า	1.7	2.1	1.1	1.2	1.3	1.6	1.8	2.3	2.4

จากตารางที่ 4.7 ค่า LHV ของชุดการทดลองที่ 10%Ni/SiC มีค่าเพิ่มขึ้น แม้ว่าปริมาณแก๊สสังเคราะห์จะลดลง แต่เนื่องจากปริมาณ C_xH_y ที่มีค่าสูงขึ้น ทำให้ค่า LHV มีค่ามากขึ้นไปด้วย ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่าการรีดิวซ์เบดตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีผลต่อปริมาณแก๊สสังเคราะห์ที่ได้ แต่มีผลต่อค่า LHV จากงานวิจัยของSun และคณะ, (2005) ได้ทำการเปรียบเทียบผลจากการรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจนเช่นกัน และสรุปว่าชุดการทดลองที่รีดิวซ์และไม่รีดิวซ์ให้ผลปริมาณแก๊สสังเคราะห์ที่ไม่ต่างกัน



รูปที่ 4.16 ผลของการรีดิวซ์เบดตัวเร่งปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพด้านพลังงาน ที่อุณหภูมิ 600°C อัตราการไหลแก๊สเข้ารวมเท่ากับ 1 ลิตร/นาที ไม่เติมออกซิเจน

ประสิทธิภาพด้านความพลังงานของชุดการทดลองที่ผ่านการรีดิวซ์และไม่ผ่านการรีดิวซ์มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ในชุดการทดลองที่ 1%Ni/SiC และ 5%Ni/SiC ที่ผ่านการรีดิวซ์มีค่า cold gas eff. เพิ่มขึ้นร้อยละ 24 และ 75 ตามลำดับ ตารางที่ 4.8 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการรีดิวซ์เบดตัวเร่งปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพด้านพลังงาน

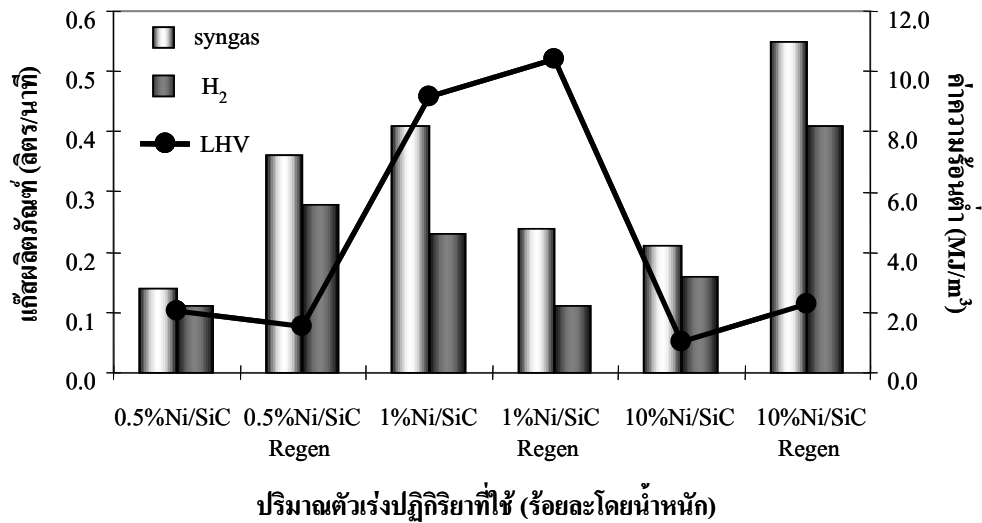
ตารางที่ 4.8 ผลของการรีดิวซ์เบดตัวเร่งปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพด้านพลังงาน โดยเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ถูกรีดิวซ์ ที่สภาวะเดียวกัน

ผลจากการรีดิวซ์	1% Ni/SiC			5% Ni/SiC			10% Ni/SiC		
	% C	% H	cold gas eff.	% C	% H	cold gas eff.	% C	% H	cold gas eff.
คิดเป็นร้อยละ	▲3	▲2	▲24	▲19	▲39	▲75	▼19	▼27	▼58
คิดเป็นจำนวนเท่า	1.0	1.0	1.2	1.2	1.4	1.8	1.2	1.4	2.4

จากตารางที่ 4.8 จะเห็นว่ากรรดิวิซช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานของชุดการทดลองที่ 1%Ni/SiC และ 5%Ni/SiC ในขณะที่ประสิทธิภาพด้านพลังงานของชุดการทดลองที่ 10%Ni/SiC ลดลง จึงอาจกล่าวได้ว่าการรีดิวซ์มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานแต่ต้องมีการทดลองเพิ่มเติมถึงผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลการทดลองต่อไป

4.3.4 ผลของกระบวนการคืนสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา

การคืนสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นการทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาทำงานได้อีกครั้ง หลังจากผ่านการเกิดปฏิกิริยามาแล้ว การสะสมตัวของคาร์บอนบนนิกเกิลเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้บริเวณเร่งของนิกเกิลสูญเสียไป จากงานวิจัยของ Sun และคณะ, (2005) พบว่าซิลิกอนคาร์ไบด์ไม่ทำปฏิกิริยากับ โลหะนิกเกิล ทำให้การคืนสภาพนิกเกิลเป็นไปได้โดยง่าย เพียงให้ความร้อนเพื่อกำจัดคาร์บอน ในงานวิจัยนี้ทำการสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการเผาที่อุณหภูมิ 600°C ภายใต้บรรยากาศ แล้วนำกลับมาทดลองอีกครั้งที่สภาวะเดิม ผลการทดลองเป็นดังนี้



รูปที่ 4.17 ผลของการคืนสภาพเบดตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์และค่าความร้อนต่ำที่อุณหภูมิ 600°C อัตราการไหลแก๊สเข้ารวมเท่ากับ 1 ลิตร/นาที ไม่เติมออกซิเจน

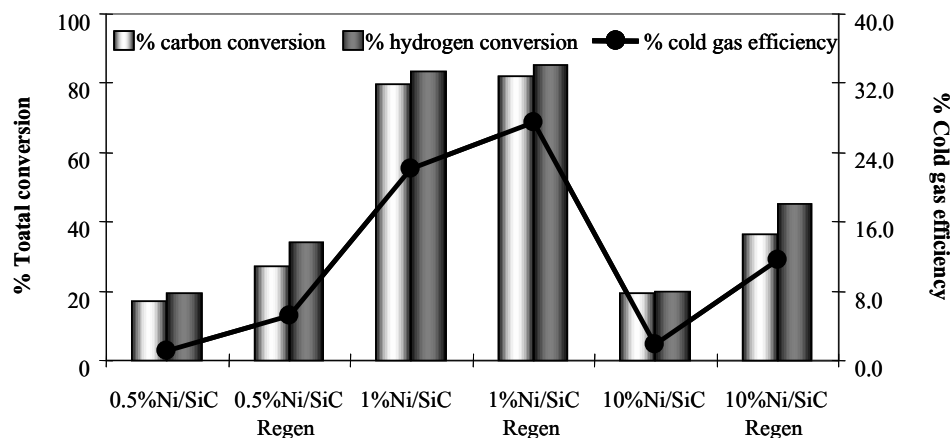
จากรูปที่ 4.17 ปริมาณแก๊สสังเคราะห์และค่า LHV ของชุดการทดลองที่ 10%Ni/SiC ที่ผ่านกระบวนการคืนสภาพ (ถูก regen.) มีค่าสูงกว่าชุดการทดลองที่ไม่ถูก regen. ถึงร้อยละ 162 และ 144 ตามลำดับ ในชุดการทดลองที่ 0.5%Ni/SiC มีผลการทดลองดีขึ้นเมื่อใช้เบดตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูก regen. ผลการทดลองที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับชุดการทดลองที่เบดตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ถูก regen. แสดงไว้ในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลของการคืนสภาพเบดตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์และค่าความร้อนต่ำ โดยเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการคืนสภาพ ที่สถานะเดียวกัน

ผลจากการคืนสภาพ	0.5% Ni/SiC			1% Ni/SiC			10% Ni/SiC		
	syngas	H ₂	LHV	syngas	H ₂	LHV	syngas	H ₂	LHV
แก๊สผลิตภัณฑ์/ค่าความร้อนต่ำ									
คิดเป็นร้อยละ	▲ 157	▲ 155	▼ 25	▼ 41	▼ 52	▲ 13	▲ 162	▲ 156	▲ 144
คิดเป็นจำนวนเท่า	2.6	2.5	1.3	1.7	2.1	1.1	2.6	2.6	2.3

ชุดการทดลองที่ 10%Ni/SiC ให้ผลการทดลองที่ดีขึ้นทั้งปริมาณแก๊สสังเคราะห์และค่า LHV ในขณะที่ 1%Ni/SiC มีค่าปริมาณแก๊สสังเคราะห์ลดลง แม้ว่าค่า LHV จะเพิ่มขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงของชุดการทดลองที่ 1%Ni/SiC มีค่าไม่มากเมื่อเทียบกับชุดการทดลองอื่น ดังนั้นจึง

กล่าวได้ว่าเบดตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการคืนสภาพแล้ว มีความเปลี่ยนแปลงบางอย่างเกิดขึ้นกับเบดตัวเร่งปฏิกิริยานั้น ทั้งต่อปริมาณและคุณภาพของแก๊สแต่ไม่ชัดเจนว่าเป็นส่วนช่วยหรือไม่อย่างไร ดังนั้นในการศึกษาเรื่องนี้ยังคงต้องการการวิจัยเพิ่มเติมต่อไป



ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

รูปที่ 4.18 ผลของการคืนสภาพเบดตัวเร่งปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพด้านพลังงานที่อุณหภูมิ 600°C อัตราการไหลแก๊สเข้ารวมเท่ากับ 1 ลิตร/นาที่ ไม่เติมออกซิเจน

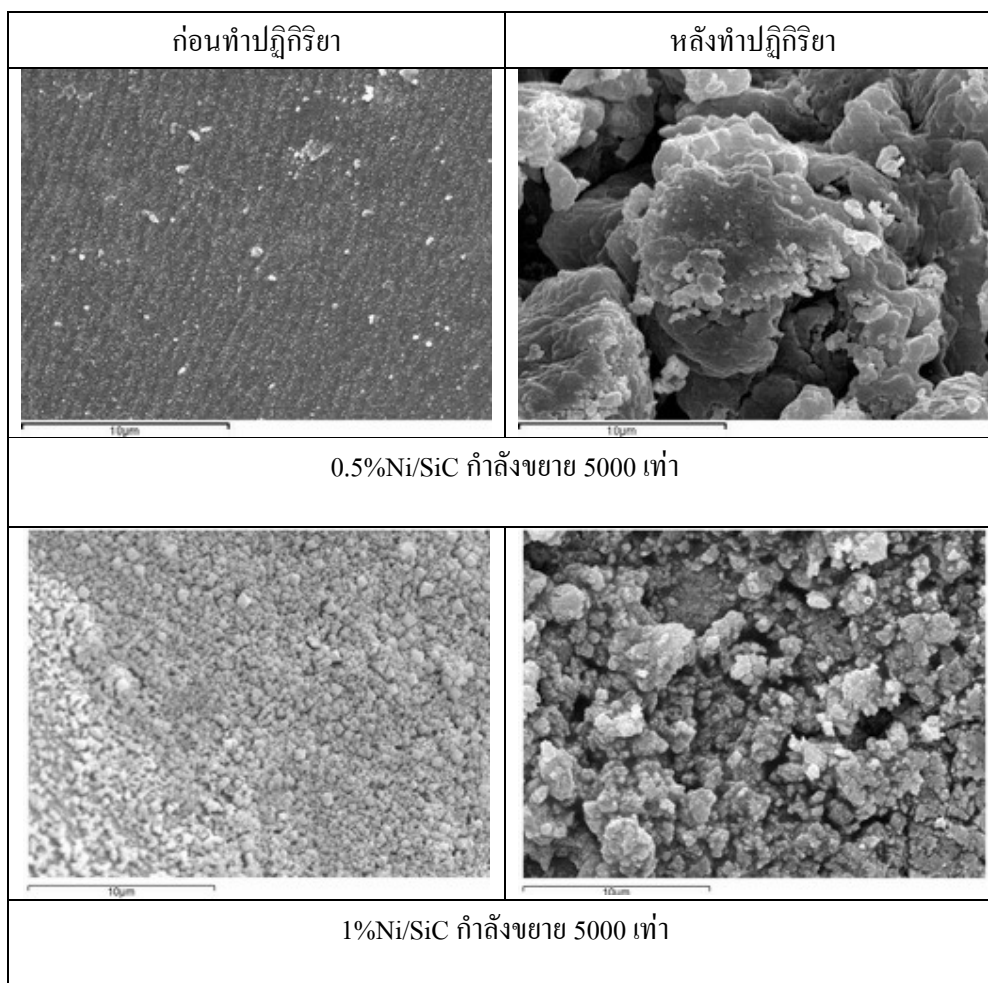
จากรูปที่ 4.18 พบว่าชุดการทดลองที่ 1%Ni/SiC ที่ถูก regen. มีผลการทดลองใกล้เคียงกับชุดการทดลองที่ใช้เบดตัวเร่งที่ไม่ถูก regen. โดยค่า %C conv. และค่า %H conv. ของชุดการทดลองที่ถูก regen. ให้ค่าสูงกว่าชุดการทดลองที่ใช้เบดตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ถูก regen. คิดเป็นร้อยละ 3 และร้อยละ 2 ตามลำดับ และมี % cold gas eff. สูงกว่าคิดเป็นร้อยละ 24 อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าผลการทดลองของการใช้เบดตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูก regen. มีค่าเพิ่มขึ้นทุกค่า ดังที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.10

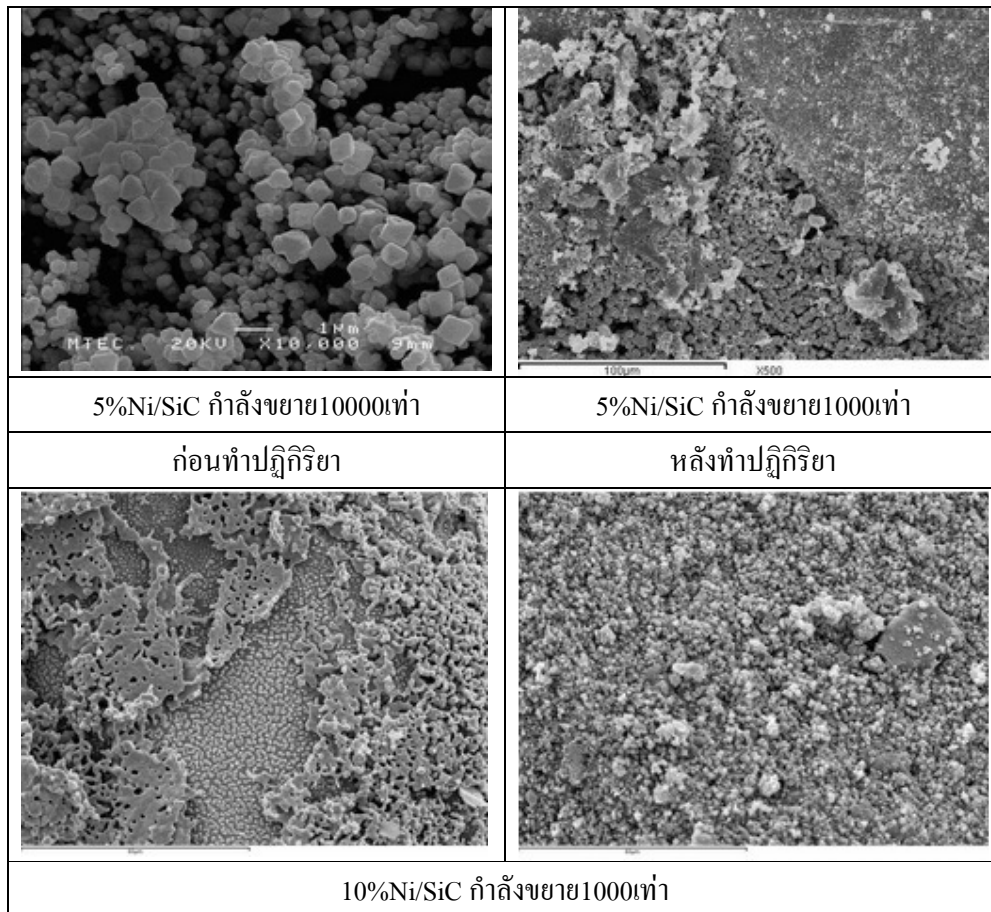
ตารางที่ 4.10 ผลของการคืนสภาพเบดตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าการแปรสภาพจากวัตถุดิบ ไปเป็นแก๊ส โดยเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการคืนสภาพ ที่สภาวะเดียวกัน

ผลจากการคืนสภาพ	0.5% Ni/SiC			1% Ni/SiC			10% Ni/SiC		
	% C	% H	cold gas eff.	% C	% H	cold gas eff.	% C	% H	cold gas eff.
คิดเป็นร้อยละ	▲60	▲79	▲373	▲3	▲2	▲24	▲89	▲129	▲528
คิดเป็นจำนวนเท่า	1.6	1.8	4.7	1.0	1.0	1.2	1.9	2.3	6.3

ผลการทดลองการใช้เบดตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูก regen. มาดำเนินปฏิกิริยาที่สภาวะเดียวกันกับเบดที่ไม่ที่ถูก regen. ผลการทดลองพบว่าการแปรสภาพคาร์บอนและไฮโดรเจนในวัตถุดิบไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ชุดการทดลองที่ 0.5%Ni/SiC และ 10%Ni/SiC ที่มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มสูงขึ้นมาก ส่งผลให้ปริมาณแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากสองชุดการทดลองนี้สูงมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ EDS ของเบดตัวเร่งปฏิกิริยาหลังปฏิกิริยาสิ้นสุด ได้พบธาตุโซเดียมซึ่งไม่พบก่อนดำเนินปฏิกิริยา อยู่อย่างกระจายกระจายบนตัวเร่งบ้างจับตัวเป็นก้อน (ตารางที่ 4.11) และเมื่อผ่านกระบวนการคืนสภาพแล้วทำการวิเคราะห์อีกครั้งพบว่าโซเดียมยังคงอยู่ ดังนั้นจึงควรมีงานวิจัยต่อไปถึงผลของการใช้เบดตัวเร่งที่ผ่านกระบวนการคืนสภาพแล้วต่อการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพด้านพลังงานและผลของโซเดียมที่พบ

ตารางที่ 4.11 ภาพ SEM ของเบดตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังจากการดำเนินการทดลอง ที่อุณหภูมิ 600°C อัตราการไหลแก๊สเข้ารวมเท่ากับ 1 ลิตร/นาที่ ไม่เติมออกซิเจน





บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนให้กับปฏิกิริยาการแปรสภาพทางความร้อนของกลีเซอรอลดิบ โดยใช้กลีเซอรอลดิบจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลภายในประเทศ ทั้งนี้การทดลองถูกออกแบบให้ศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราการใช้แก๊สขาเข้ารวม อัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อเชื้อเพลิง ระดับอุณหภูมิ และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เวลาในการอุ่นระบบก่อนดำเนินปฏิกิริยา 5 นาที จากนั้นจึงป้อนวัตถุดิบด้วยอัตรา 1 กรัมต่อนาทีเป็นเวลา 20 นาที เพื่อศึกษาผลของตัวแปรข้างต้นต่อปริมาณแก๊สสังเคราะห์ที่ได้ คุณภาพของแก๊สผลิตภัณฑ์ และประสิทธิภาพด้านพลังงาน และหาสภาวะที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 จากการศึกษาพบว่าคลื่นไมโครเวฟสามารถนำมาใช้ร่วมกับซิลิกอนคาร์ไบด์เพื่อเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนให้กับปฏิกิริยาได้ ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส แม้จะพบผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันทาร์และถ่านชาร์บ้าง แต่น้อยจนไม่สามารถตรวจวัดได้

5.1.2 ปริมาณแก๊สขาเข้ารวมที่ 1 ลิตร/นาทีให้ผลการทดลองดีกว่า 2 ลิตร/นาที โดยที่ 1 ลิตร/นาทีให้ปริมาณแก๊สสังเคราะห์สูงสุดเท่ากับ 1.17 ลิตร/นาทีหรือต่อ 1 กรัมวัตถุดิบ ที่อุณหภูมิ 1400°C อัตราส่วน $O_2/fuel$ เท่ากับ 0.03 ทั้งยังเป็นสภาวะที่เหมาะสมกว่าในการรักษาสภาพเบคนิงของระบบไว้ได้

5.1.3 อัตราส่วน $O_2/fuel$ มีผลต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์แต่ยังคงมีแนวโน้มไม่ชัดเจน สภาวะที่ให้ผลการทดลองดีที่สุดคือ 0.03 และ 0.13 ให้ค่า LHV อยู่ในช่วง 20-22 MJ/m³

5.1.4 อุณหภูมิมีความสัมพันธ์แบบแปรผันกับพลังงานไมโครเวฟที่ใช้ จากการทำ Temperature profile พบว่าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดซึ่งเท่ากับ 880 วัตต์ ให้ระดับอุณหภูมิสูงถึง 1400°C ในขณะที่กำลังไฟฟ้าน้อยสุดเท่ากับ 110 วัตต์ให้ระดับอุณหภูมิต่ำกว่า 300°C อย่างไรก็ตามจากผลการ

ทดลองทำให้ทราบว่าที่อุณหภูมิมากกว่า 900 °C หรือที่ระดับพลังงานไมโครเวฟตั้งแต่ 440 วัตต์ขึ้นไป มีการแปรสภาพคาร์บอนและไฮโดรเจนในวัตถุคืบไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ได้อย่างสมบูรณ์

5.1.5 สำหรับการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าที่ 1%Ni/SiC ให้ผลการทดลองดีที่สุด โดยให้ค่าร้อยละการแปรสภาพคาร์บอนและไฮโดรเจนในวัตถุคืบไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์เท่ากับ 79.50 และ 83.26 ตามลำดับ เนื่องจากเกิดการกระจายตัวของอนุภาคนิกเกิลได้ดี ทำให้มีพื้นที่ผิวของซิลิกอนคาร์ไบด์ในการรับคลื่นไมโครเวฟ และไม่ทำให้เกิดการรวมตัวกันของนิกเกิล ซึ่งจะมีผลไปปิดพื้นที่ผิวของซิลิกอนคาร์ไบด์อีกด้วย

5.1.6 การรีดิวซ์เบดตัวเร่งปฏิกิริยาและการคืนสภาพตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงาน แต่ไม่มีผลอย่างชัดเจนต่อปริมาณและคุณภาพของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้

5.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับเตาปฏิกรณ์

5.2.1 ควรออกแบบเตาไมโครเวฟและเตาปฏิกรณ์โดยเพิ่มความสูง เพื่อทำการศึกษาผลของ residence time และผลของคลื่นไมโครเวฟต่อแก๊สผลิตภัณฑ์ต่อไป (เนื่องจากแก๊สมีคุณสมบัติในการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ และก่อให้เกิดพลาสมาได้)

5.2.2 ควรมีท่อส่งกลีเซอรอลเข้าสู่ระบบเป็นชนวนกันความร้อน เนื่องจากเมื่ออากาศเย็นเป็นอุปสรรคในการป้อนวัตถุคืบเข้าสู่ระบบ ทำให้กลีเซอรอลเย็นตัวลง เกิดการอุดตันและทำให้ระบบเสียได้

5.2.3 ควรมีท่อนำแก๊สขาเข้าวิ่งคู่ขนานกับท่อป้อนกลีเซอรอล ด้วยเหตุผลเดียวกันคือเรื่องอุณหภูมิรบกวนจากภายนอก และยังได้รับความร้อนจากท่อส่งกลีเซอรอลก่อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ได้อีกด้วย

5.2.4 ควรออกแบบให้ส่วนฝาและตัวของเตาปฏิกรณ์มีที่ซัดที่ทนความร้อนสูงและปิดกันไค้สนิท เพื่อรองรับปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาที่ค่อนข้างมากและมีแรงดันเป็นระยะๆ

5.2.5 ควรมีข้อต่อที่แน่นพอระหว่างท่อนำแก๊สขาออกและฝาของเตาปฏิกรณ์ ซึ่งควรเป็นวัสดุทนความร้อนสูง เพราะแก๊สขาออกมีอุณหภูมิความร้อนสูงมาก

5.2.6 ควรเพิ่มความยาวของท่อนำแก๊สขาออกที่วิ่งผ่านชุดหล่อเย็น เพื่อให้อุณหภูมิของแก๊สผลิตภัณฑ์ไม่สูงจนมีผลต่อการวัดความเร็วแก๊สได้

5.3 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการดำเนินปฏิกิริยา

5.3.1 ควรทดลองใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ขนาดแตกต่างกันออกไปเพื่อศึกษาอุณหภูมิรวมของระบบว่าที่ขนาดใดให้ความร้อนสูงสุดที่พลังงานไมโครเวฟต่ำที่สุด

5.3.2 ควรทำการทดลองโดยใช้แก๊สออกซิเจนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ อัตราส่วน $O_2/fuel$ เท่ากับ 0.03 และ 0.13 และควรทำที่ระดับพลังงานไมโครเวฟน้อยกว่า 440 วัตต์

5.3.3 ควรทำการทดลองโดยใช้อัตราการไหลแก๊สขาเข้ารวมน้อยกว่า 1 ลิตร/นาที หรือเพิ่มความสูงของชั้นเบดเพื่อศึกษาผลของ residence time

5.3.4 ควรทำ Temperature profile ของอุณหภูมิที่ระยะเวลาเท่ากับที่ใช้ในการดำเนินปฏิกิริยา เพื่อศึกษาอัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อนที่ระยะเวลาต่างกัน (องศาเซลเซียส/นาที)

5.3.5 ควรทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่ 0.5-1.0%Ni/SiC เพื่อศึกษาการกระจายตัวที่พอเหมาะบนซิลิกอนคาร์ไบด์ต่อการเกิดปฏิกิริยา

5.3.6 ควรทดลองเพิ่มน้ำให้กับปฏิกิริยาโดยเติมเข้ากับวัตถุดิบ (ซึ่งสามารถละลายในน้ำได้) เพื่อศึกษาผลของไอน้ำต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์

5.3.7 ควรทดลองใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์แทนอากาศในการใช้เป็นออกซิไดซิ่งแก๊ส เพื่อศึกษาผลต่อค่าความร้อนที่ได้

5.3.8 ควรใช้เครื่องชั่งแบบละเอียดในการชั่งลิเซอรอลและเตาปฏิกรณ์ เพื่อสามารถเก็บน้ำหนักของซาร์และทาร์ที่เกิดขึ้นได้

5.3.9 ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการรีดิวซ์และคืนสภาพเบดตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มเติม รวมถึงโซเดียมที่เกิดขึ้นต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์ด้วย

5.3.10 ควรทำการทดลองโดยใช้ตัวรองรับอื่นจำพวกคาร์บอน เพื่อหาตัวรองรับที่เหมาะสมต่อระบบการเหนียวทำให้เกิดความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

5.3.11 ควรทำการทดลองที่ตัวรองรับอื่นที่ไม่สามารถรับคลื่นไมโครเวฟได้ เพื่อศึกษาผลของคลื่นไมโครเวฟต่อการสลายตัวของกลีเซอรอลโดยตรง โดยอาศัยน้ำที่มีอยู่ในตัวกลีเซอรอล

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- พลังงาน, กระทรวง. ปริมาณการใช้ไบโอดีเซล B5 [online]. 2550. Available from: <http://www.energy.go.th/moen/Index.aspx?MenuID=164>. [2009, Jan 22].
- ฉัตรชัย ชนศรีสุข. การกำจัดกำมะถันจากถ่านหินโดยไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- ชนิดา มฤคทัต. การแปรสภาพกากสบู่ดำโดยกระบวนการไพโรไลซิสแบบขั้นเบดนิ่ง. วิทยานิพนธ์
ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2550.
- ชูศักดิ์ โทกะนุทรานนท์. การคาร์บอนไนซ์แก๊สในฟลูอิดไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต
ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
- ณัฐกานต์ บุสรพงษ์พานิช และ ณรงค์ฤทธิ์ คงอยู่. การทำลิเซอรอลที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลให้
บริสุทธิ์. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะ
วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- เบญจมาศ ปุยอ้ออก. แก๊สพีเคชันของแบดกลีเคอร์เร่งปฏิกิริยาด้วยเหล็กบนโคโคไมต์. วิทยานิพนธ์
ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด. 2550. ไบโอดีเซล [online]. Available from: <http://www.bangchak.co.th/th/energyDetail.asp?id=15>. [2009, Feb 16].
- พิสมัย เจนวนิชปัจจุกุล. ไบโอดีเซล: พลังงานทางเลือก. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 16
ฉบับที่ 3 (2544): 9.
- ลาวัลย์ เขียรถาวร. รีฟอร์มมิ่งของก๊าซมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ ใช้น้ำมันตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล
อะลูมินาในฟลูอิดไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะ
วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.
- วสิน กางนฏ. การทำไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์จากแก๊สสังเคราะห์โดยวอเตอร์แก๊สชิฟต์และตัวดูดซับ
ทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
2545.
- สถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพีชน้ำมัน. วัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล
[online]. 2549. Available from: <http://www.biodiesel.eng.psu.ac.th/rawmat.php>. [2009,
Feb 16].

สิทธิศักดิ์ อุปริวงค์. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ของเตาไมโครเวฟชนิดแบบไหล
ขึ้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.

สินีนานู รอดจิน. ไมโครเวฟของชีวมวลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2547.

สุพัตรา ชีวธนาคุปต์. แก๊สสังเคราะห์จากแก๊สซิฟิเคชันของยูคาลิปตัส. วิทยานิพนธ์ปริญญา
โทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

สุรพันธ์ บริสุทธิ์. ประโยชน์และโทษของซิลิกอนคาร์ไบด์. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ ปีที่ 41
ฉบับที่ 133 (ก.ย. 2536) : 29-30.

อนันต์ เศรษฐพฤทธิ. การรีฟอร์มเอทานอลด้วยไอน้ำบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลแมกนีเซียมและ
นิกเกิล/อะลูมินา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

อาภาณี เหลืองนฤมิตรชัย. การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากแกลบในเบดนิ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญา
โทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

ภาษาอังกฤษ

Biotage. Microwave vs. conventional heating [online]. . 2005. Available from :<http://www.biotage.com/DynPage.aspx?id=22052>. [2008, Nov 3].

Bond, G.C. Heterogeneous Catalysis Principle and Applications. Second Edition. Oxford:
Clarendon Press, 1987.

Chen, G., Andries, J., Luo, Z., and Spliethoff, H. Biomass pyrolysis/gasification for product gas
production: the overall investigation of parametric effect. Journal of Energy Conversion
and Management 44 (2003): 1875-1884.

Clark, D. E., Folz, D. C., Folgar, C. E., and Mahmoud, M.M. Microwave Solutions for Ceramic
Engineers. USA: John Wiley & Sons, 2005.

Domínguez A., Menéndez J.A., Fernández Y., Pis J.J., Valente Nabais J.M., Carrott P.J.M., and
Ribeiro Cattott M.M.L. Conventional and microwave induced pyrolysis of coffee hulls
for the production of a hydrogen rich fuel gas. Journal of Analytical of Applied Pyrolysis
79 (2006): 128- 135.

- Dou, B., Dupont, V., Williams, P.T., Chen H., and Ding Y. Thermogravimetric kinetics of crude glycerol. Journal of Bioresource Technology. 100 (2009): 2613-2620.
- Douette, A.M.D., Turn, S.Q., Wang, W., and Keffer, V.I. Experimental Investigation of Hydrogen production from Glycerin Reforming. Journal of Energy and Fuel 21 (2007): 3499-3504.
- Evalueserve. 2005. Developments in Microwave Chemistry [online]. Available from: http://www.rsc.org/images/evaluserve_tcm18-16758.pdf. [2008, Nov 22].
- Fidalgo, B., Dominguez, A., Pis, J.J., and Menendez, J.A. Microwave-assisted dry reforming of methane. Journal of International journal of hydrogen energy 33 (2008): 4337-4344.
- Gañan, J., Abdulla, A. A., Miranda, A. B., Turegano, J., Correiac, S., and Cuerdad, E. M. Energy production by means of gasification process of residuals sourced in Extremadura (Spain). Journal of Renewable Energy. 30 (2005): 1759-1769.
- Gasification Technologies Council. 2008. Gasification Redefining Clean Energy [online]. Available from: http://www.gasification.org/Docs/Final_whitepaper.pdf. [2008, Nov 14].
- Hauue, K. E. Microwave energy for mineral treatment processes-a brief review. Journal of Mineral processing 57 (1999): 1-24.
- Hirai, T., Ikenaga, N-O., Miyake, T., and Suzuki, T. Production of Hydrogen by Steam Reforming of Glycerin on Ruthenium Catalyst. Journal of Energy and Fuel. 19 (2005): 1761-1762.
- Huang, Y.F., Kuan, W.H., Lo, S.L., and Lin, C.F. Total recovery of resources and energy from rice straw using microwave-induced pyrolysis. Journal of Bioresource Technology 99 (2008): 8252-8258.
- Keller, N., Vieira, R., Nhu,t J-M., Pham-Huu, C., and Ledoux, M.J. New Catalysts Based on Silicon Carbide Support for Improvements in the Sulfur Recovery. New silicon carbide nanotubes as catalyst support for the trickle-bed H₂S oxidation. Journal of the Brazilian Chemical Society 16 (2005): 202-209.
- Knoef, H.A.M. Ir. 2004. Biomass gasification [online]. Available from: http://www.kobelco.co.jp/p108/p14_sfe01.htm#gaiyou. [2008, June 28].
- Larminie, J. and Dicks, A. Fuel cell systems explained. USA: John Wiley & Sons, 2000.
- Liu, H., Li, S., Zhang, S., Chen, L., Zhou, G., Wang, J., and Wang, X. Catalytic performance of monolithic foam Ni/SiC catalyst in carbon dioxide reforming of methane to synthesis gas. Journal of Catalysis communications 9 (2008): 51-54.

- Microwaves 101. 2007. Silicon Carbide [online]. Available from: <http://www.microwaves101.com/encyclopedia/siliconcarbide.cfm>. [2008, Nov 18].
- Probstein, R. F. and Hicks, R. E. Synthesis Fuels. USA: McGraw-Hills, 1982.
- Ryu, C., Yang, Y. B., Khor, A., Yates, N. E., Sharifi, V. N. and Swithenbank, J. 2006. Effect of fuel properties on biomass combustion: Part I. Experiments—fuel type, equivalence ratio and particle size. Fuel. 85 : 1039-1046.
- Slinn, M., Kendall, K., Mallon, C., and Andrew, J. Steam reforming of biodiesel by-product to make renewable hydrogen. Journal of Bioresource Technology 99 (2008): 5851-5858.
- Soongpravit, K. Microwave-induced thermal conversion of ethylene-vinyl acetate copolymer/natural rubber composite from shoe sole scrap. Master's Thesis. Department of Applied Polymer Science and Textile Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, 2006.
- Sun Grant Bio Web. 2007. Products from Syngas-Oxosynthesis (Catalyst) [online]. Available from: <http://bioweb.sungrant.org/Technical/Bioproducts/Bioproducts+from+Syngas/Oxosynthesis/Default.htm>. [2008, June 25].
- Sun, W., Jin, G., and Guo, X. Partial oxidation of methane to syngas over Ni/SiC catalyst. Journal of Catalysis Communication 6 (2005): 135-139.
- Sutton, D., Kelleher, B., and Ross, J.R.H., Review of literature on catalysts for biomass gasification. Journal of Fuel Processing Technology. 73 (2001): 155-173.
- The Glycerol Challenge. 2007. Biofuels and glycerol [online]. Available from: <http://theglycerolchallenge.org/>. [2008, Oct 27].
- The Scottish Government Research. 2006. Biomass sources, End-Uses and Conversion Technologies [online]. Available from: <http://www.scotland.gov.uk/Publications/2006/09/22094104/3>. [2008, Dec 11].
- Valliyappan, T., Bakhshi, N.N., and Dalai, A.K. Pyrolysis of glycerol for the production of hydrogen or syn gas. Journal of Bioresource Technology 99 (2008): 4476-4483
- Valliyappan, T., Ferdous, D., Bakhshi, N.N., and Dalai, A.K. Production of Hydrogen and Syngas via Steam Gasification of Glycerol in a Fixed-Bed Reactor. Journal of Top Catal 49 (2008): 59-67.
- Wang, X., Chen, H., Lou, K., Shao, J., and Yang, H. The influence of microwave drying on biomass pyrolysis. Journal of Energy and Fuel 22 (2008): 67-74.

- Watanabe, H. and Otaka, M. Numerical simulation of coal gasification in entrained flow coal gasifier. Journal of Fuel 85 (2006): 1935-1943.
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., Liang, D. T., and Zheng, C. Pyrolysis of palm oil wastes for enhanced production of hydrogen rich gases. Journal of Fuel Processing Technology 87 (2006): 935-942.
- Yoon, S.J., Choi, Y-C., Son, Y-I., Lee, S-H., and Lee, J-G. Gasification of biodiesel by-product with air or oxygen to make syngas. Bioresource Technology 101 (2010): 1227-1232.
- Zhang, R., Cummer, K., Suby, A., and Brown, R. C. Biomass-derived hydrogen from an air-blown gasifier. Journal of Fuel Processing Technology 86 (2005): 861-874.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก ผลการทดลอง

ตารางที่ ก-1 ผลของอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนกับเชื้อเพลิงต่อแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกลีเซอรอลดิบ ที่อัตราแก๊สเข้ารวม 2 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 1400°C (880 วัตต์)

O ₂ to fuel ratio	producer gas (L/min)						O ₂ to fuel ratio	quality					
	CO ₂	CO	H ₂	C _x H _y	syngas	cold gas		%C conversion	%H conversion	LHV (MJ/m ³)	LHV/N ₂	H ₂ /CO	syn/H ₂ /CO
0	0.02	0.39	0.27	0.18	0.65	20.75	0	78.19	57.79	16.98	2.32	0.69	0.95
0.03	0.11	0.38	0.39	0.43	0.77	33.48	0.03	124.10	116.43	20.22	4.39	1.02	0.76
0.07	0.16	0.51	0.41	0.57	0.92	91.84	0.07	166.24	144.81	20.98	5.47	0.81	1.13
0.13	0.17	0.55	0.40	0.49	0.95	77.92	0.13	162.95	128.43	19.97	5.05	0.72	1.33
0.25	0.22	0.31	0.29	0.23	0.60	21.96	0.25	101.98	69.40	14.59	3.62	0.92	0.65

ตารางที่ ก-2 ผลของอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนกับเชื้อเพลิงต่อแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกลีเซอรอลดิบ ที่อัตราแก๊สเข้ารวม 2 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 1250°C (660 วัตต์)

O ₂ to fuel ratio	producer gas (L/min)						O ₂ to fuel ratio	quality					
	CO ₂	CO	H ₂	C _x H _y	syngas	cold gas		%C conversion	%H conversion	LHV (MJ/m ³)	LHV/N ₂	H ₂ /CO	syn/H ₂ /CO
0	0.02	0.27	0.14	0.16	0.42	11.49	0	61.48	43.26	18.58	1.96	0.52	0.80
0.03	0.13	0.39	0.40	0.50	0.87	38.95	0.03	137.57	130.71	21.13	6.66	1.02	0.86
0.07	0.16	0.46	0.47	0.57	0.93	91.46	0.07	160.03	149.75	20.82	5.47	1.01	0.92
0.13	0.17	0.50	0.39	0.58	0.88	92.77	0.13	168.14	144.63	21.32	5.38	0.77	1.14
0.25	0.17	0.52	0.45	0.47	0.97	74.43	0.25	156.24	129.78	19.55	5.88	0.87	1.12

ตารางที่ ก-3 ผลของอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนกับเชื้อเพลิงต่อแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกลีเซอรอลดิบ ที่อัตราแก๊สเข้ารวม 1 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 1400°C (800 วัตต์)

O ₂ to fuel ratio	producer gas (L/min)						O ₂ to fuel ratio	quality					
	CO ₂	CO	H ₂	CxHy	syngas	cold gas		%C conversion	%H conversion	LHV (MJ/m ³)	LHV/N ₂	H ₂ /CO	syn/H ₂ /CO
0	0.02	0.40	0.34	0.19	0.75	25.48	0	82.97	67.63	16.66	3.75	0.85	0.88
0.03	0.08	0.61	0.56	0.72	1.17	148.12	0.03	191.35	187.54	20.90	14.69	0.92	1.28
0.07	0.09	0.37	0.32	0.54	0.69	37.34	0.07	136.21	130.97	22.68	15.20	0.80	0.86
0.13	0.09	0.57	0.48	0.75	1.05	148.79	0.13	191.56	185.83	21.78	15.15	0.84	1.25
0.25	0.18	0.43	0.33	0.21	0.76	28.31	0.25	111.19	69.98	17.00	4.60	0.76	1.01

ตารางที่ ก-4 ผลของอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนกับเชื้อเพลิงต่อแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกลีเซอรอลดิบ ที่อัตราแก๊สเข้ารวม 1 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 1250°C (660 วัตต์)

O ₂ to fuel ratio	producer gas (L/min)						O ₂ to fuel ratio	quality					
	CO ₂	CO	H ₂	CxHy	syngas	cold gas		%C conversion	%H conversion	LHV (MJ/m ³)	LHV/N ₂	H ₂ /CO	syn/H ₂ /CO
0	0.02	0.50	0.32	0.33	0.82	44.74	0	114.90	91.23	18.73	4.13	0.64	1.28
0.03	0.10	0.58	0.52	0.71	1.10	138.40	0.03	187.59	180.96	21.12	15.18	0.90	1.23
0.07	0.08	0.49	0.33	0.81	0.81	151.67	0.07	185.53	181.46	23.77	16.07	0.67	1.22
0.13	0.06	0.34	0.22	0.38	0.55	38.93	0.13	104.25	90.95	21.59	12.42	0.64	0.86
0.25	0.37	0.83	0.78	0.68	1.60	174.51	0.25	253.59	198.86	18.84	12.17	0.93	1.72

ตารางที่ ก-5 ผลของอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนกับเชื้อเพลิงต่อแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกลีเซอรอลบริสุทธิ์ ที่อัตราแก๊สเข้ารวม 2 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 1400°C (880 วัตต์)

O ₂ to fuel ratio	producer gas (L/min)						O ₂ to fuel ratio	quality					
	CO ₂	CO	H ₂	CxHy	syngas	cold gas		%C conversion	%H conversion	LHV (MJ/m ³)	LHV/N ₂	H ₂ /CO	syn/H ₂ /CO
0	0.02	0.39	0.27	0.20	0.65	22.66	0	81.62	62.55	17.54	2.47	0.69	0.95
0.03	0.03	0.53	0.28	0.35	0.81	47.84	0.03	122.34	90.62	19.13	3.94	0.52	1.54
0.07	0.05	0.46	0.30	0.17	0.76	25.92	0.07	91.58	59.87	16.56	2.59	0.62	1.22
0.13	0.06	0.46	0.23	0.18	0.69	24.54	0.13	95.38	54.91	16.94	2.76	0.49	1.41
0.25	0.25	0.57	0.19	0.20	0.76	32.14	0.25	136.94	54.21	17.01	2.92	0.33	2.27

ตารางที่ ก-6 ผลของอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนกับเชื้อเพลิงต่อแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกลีเซอรอลบริสุทธิ์ ที่อัตราแก๊สเข้ารวม 2 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 1250°C (660 วัตต์)

O ₂ to fuel ratio	producer gas (L/min)						O ₂ to fuel ratio	quality					
	CO ₂	CO	H ₂	CxHy	syngas	cold gas		%C conversion	%H conversion	LHV (MJ/m ³)	LHV/N ₂	H ₂ /CO	syn/H ₂ /CO
0	0.02	0.28	0.14	0.16	0.43	12.07	0	63.18	43.95	18.61	2.00	0.51	0.84
0.03	0.05	0.59	0.36	0.33	0.95	52.74	0.03	130.32	94.10	18.04	3.96	0.60	1.57
0.07	0.22	0.57	0.41	0.17	0.98	38.07	0.07	128.71	70.10	15.42	3.40	0.72	1.35
0.13	0.10	0.63	0.41	0.15	1.04	42.62	0.13	119.13	67.36	14.99	3.63	0.65	1.60
0.25	0.27	0.50	0.18	0.13	0.68	22.85	0.25	121.85	41.62	16.04	2.50	0.36	1.90

ตารางที่ ก-7 ผลของอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนกับเชื้อเพลิงต่อแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกลีเซอรอลบริสุทธิ์ ที่อัตราแก๊สเข้ารวม 1 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 1400°C (800 วัตต์)

O ₂ to fuel ratio	producer gas (L/min)						O ₂ to fuel ratio	quality					
	CO ₂	CO	H ₂	CxHy	syngas	cold gas		%C conversion	%H conversion	LHV (MJ/m ³)	LHV/N ₂	H ₂ /CO	syn/H ₂ /CO
0	0.02	0.39	0.33	0.18	0.71	23.20	0	79.23	64.42	16.66	3.76	0.85	0.84
0.03	0.03	0.60	0.37	0.37	0.97	59.74	0.03	134.49	103.04	18.47	10.97	0.62	1.57
0.07	0.09	0.69	0.54	0.25	1.23	63.32	0.07	139.85	97.55	15.92	8.75	0.78	1.58
0.13	0.14	0.68	0.32	0.36	0.99	63.86	0.13	159.52	97.44	18.41	9.90	0.47	2.12
0.25	0.45	0.60	0.19	0.22	0.79	36.67	0.25	171.01	58.43	17.32	4.15	0.31	2.52

ตารางที่ ก-8 ผลของอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนกับเชื้อเพลิงต่อแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกลีเซอรอลบริสุทธิ์ ที่อัตราแก๊สเข้ารวม 1 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 1250°C (660 วัตต์)

O ₂ to fuel ratio	producer gas (L/min)						O ₂ to fuel ratio	quality					
	CO ₂	CO	H ₂	CxHy	syngas	cold gas		%C conversion	%H conversion	LHV (MJ/m ³)	LHV/N ₂	H ₂ /CO	syn/H ₂ /CO
0	0.02	0.41	0.26	0.27	0.67	29.59	0	93.41	74.19	18.73	4.13	0.64	1.04
0.03	0.04	0.64	0.36	0.48	1.00	81.91	0.03	156.24	123.29	19.70	11.57	0.56	1.79
0.07	0.03	0.58	0.28	0.55	0.87	87.05	0.07	156.73	128.42	21.18	15.11	0.49	1.77
0.13	0.14	0.69	0.32	0.38	1.01	68.14	0.13	163.84	101.07	18.51	10.25	0.46	2.19
0.25	0.29	0.36	0.07	0.07	0.43	10.15	0.25	96.64	20.19	15.74	3.74	0.20	2.14

ตารางที่ ก-9 ผลของอุณหภูมิต่อแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ที่อัตราแก๊สขาเข้ารวม 1 ลิตรต่อนาที โดยไม่มีการเติมออกซิเจน

producer gas (L/min)						
MW power	CO ₂	CO	H ₂	C _x H _y	syngas	cold gas eff
110W	0.003	0.00086	0.00124	0.00812	0.00210	0.01
220W	0.04	0.05	0.07	0.06	0.12	1.24
330W	0.05	0.15	0.13	0.24	0.28	14.41
440W	0.06	0.25	0.21	0.44	0.45	44.54
550W	0.08	0.28	0.23	0.50	0.51	58.46
660W	0.02	0.50	0.32	0.33	0.82	44.74
770W	0.09	0.43	0.38	0.64	0.81	102.31
880W	0.02	0.40	0.34	0.19	0.75	25.57

quality						
MW power	%C conversion	%H conversion	LHV (MJ/m3)	LHV/N2	H2/CO	syngas/H2/CO
110W	1.62	1.63	30.75	0.10	1.44	0.001
220W	20.97	17.95	19.73	0.82	1.27	0.10
330W	60.32	58.19	22.89	3.35	0.91	0.31
440W	100.83	101.11	23.53	5.07	0.85	0.53
550W	116.42	115.37	23.56	5.23	0.85	0.60
660W	114.90	91.23	18.73	4.13	0.64	1.28
770W	156.49	155.35	22.36	6.00	0.89	0.90
880W	83.17	67.63	16.66	3.76	0.85	0.88

ตารางที่ ก-10 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ต่อแก๊สผลิตภัณฑ์ ที่อัตราแก๊สขาเข้ารวม 1 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 600°C (330 วัตต์)

producer gas (L/min)				
%Ni/SiC	0.5	1	5	10
CO ₂	0.03	0.07	0.05	0.06
CO	0.50	0.18	0.11	0.05
H ₂	0.32	0.23	0.16	0.016
C _x H _y	0.33	0.29	0.07	0.03
syngas	0.82	0.41	0.27	0.21

quality				
%C conversion	114.90	79.50	30.83	19.14
%H conversion	91.23	83.26	28.00	19.66
LHV (MJ/m3)	18.73	21.56	13.94	13.84
LHV/N2	4.13	9.18	34.97	1.00
H2/CO	0.64	1.32	1.95	2.99
cold gas eff	1.10	22.19	4.70	1.85
syn/H2/CO	0.05	0.31	0.15	0.07

ตารางที่ ก-11 ผลของอุณหภูมิ ต่อแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 5% Ni/SiC ที่อัตราแก๊สขาเข้ารวม 1 ลิตรต่อนาที

%Ni/SiC	Temp	CO ₂	CO	H ₂	CxHy	syngas	%C conversion	%H conversion	LHV (MJ/m ³)	LHV/N ₂	H ₂ /CO	cold gas eff	syn/H ₂ /C O
1% Ni/SiC	467 (220W)	0.05	0.03	0.13	0.01	0.16	13.31	14.25	12.96	0.70	3.76	1.08	0.04
	617 (330W)	0.07	0.18	0.23	0.29	0.41	79.50	83.26	21.56	9.18	1.32	22.19	0.31
5% Ni/SiC	467 (220W)	0.03	0.02	0.06	0.01	0.08	6.99	7.34	13.96	0.35	3.64	0.25	0.02
	617 (330W)	0.05	0.11	0.16	0.07	0.27	30.83	28.00	13.94	34.97	1.95	4.70	0.15

ตารางที่ ก-12 ผลของการรีดิวซ์เบดตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฮโดรเจน และการคืนสภาพของเบดตัวเร่งที่ผ่านกทรีดิวซ์ ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% และ 10% Ni/SiC ต่อ แก๊สผลิตภัณฑ์ ที่อัตราแก๊สขาเข้ารวม 1 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 600°C (330 วัตต์)

catalyst bed	CO ₂	CO	H ₂	C _x H _y	syngas	%C conversion	%H conversion	LHV (MJ/m ³)	LHV/N ₂	H ₂ /CO	cold gas eff	syn/H ₂ /CO
1% Reduce	0.07	0.12	0.11	0.36	0.24	81.97	85.21	26.23	10.40	0.93	27.47	0.25
10 Reduce	0.03	0.05	0.07	0.04	0.12	15.47	14.34	17.92	2.44	1.53	0.78	0.08
1 Reduce-Rgn	0.05	0.11	0.15	0.14	0.25	43.28	42.61	20.00	2.64	1.33	5.76	0.19
10Reduce-Rgn	0.06	0.16	0.33	0.09	0.48	40.63	47.15	15.21	5.52	2.09	9.60	0.23

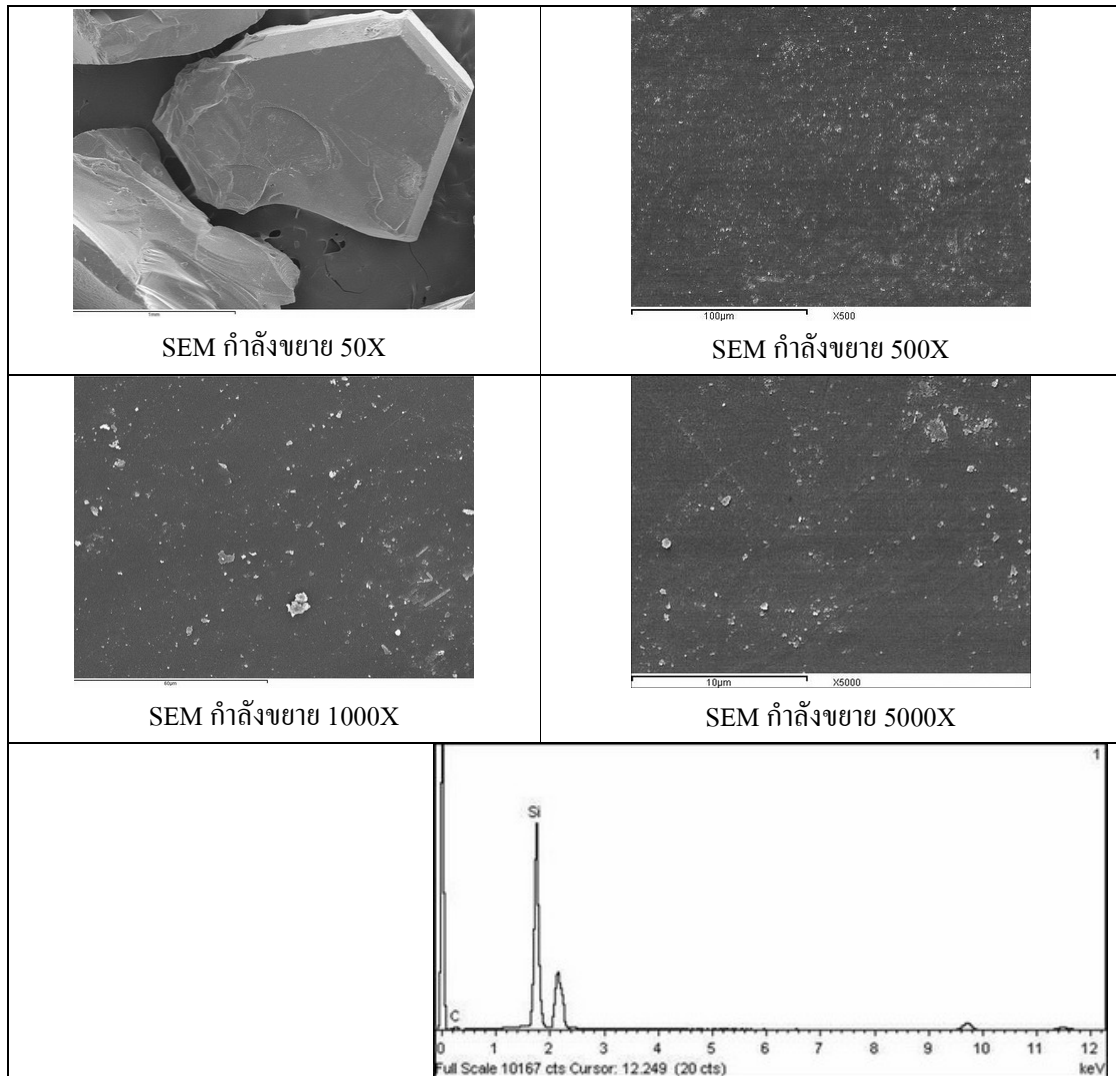
ตารางที่ ก-13 ผลของการคืนสภาพเบดตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5%, 1%, 5% และ 10% Ni/SiC ต่อแก๊สผลิตภัณฑ์ ที่อัตราแก๊สขาเข้ารวม 1 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 600°C (330 วัตต์)

%Ni/SiC	CO ₂	CO	H ₂	C _x H _y	syngas	%C conversion	%H conversion	LHV (MJ/m ³)	LHV/N ₂	H ₂ /CO	cold gas eff	syn/H ₂ /CO
0.5	0.07	0.08	0.28	0.03	0.36	27.08	34.30	13.11	1.53	3.39	5.20	0.11
1	0.10	0.13	0.34	0.09	0.47	42.21	48.22	15.12	2.37	2.73	9.58	0.17
5	0.08	0.10	0.26	0.09	0.35	36.58	40.64	16.26	2.16	2.59	6.16	0.14
10	0.10	0.14	0.41	0.04	0.55	36.26	45.11	12.76	2.26	3.03	11.61	0.18

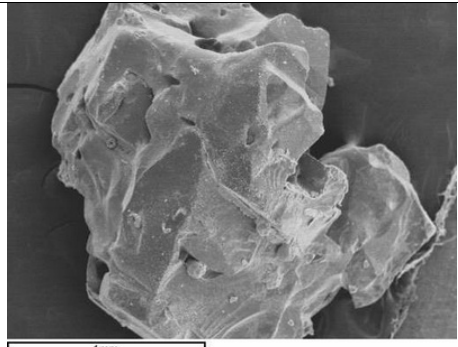
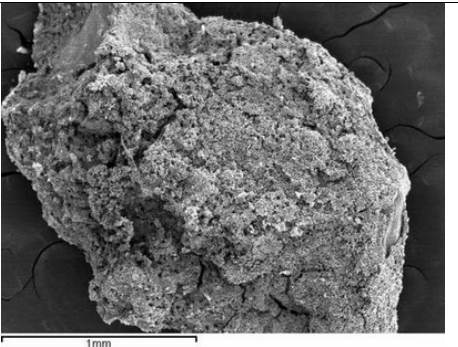
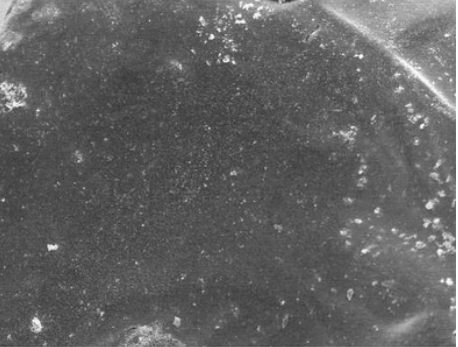
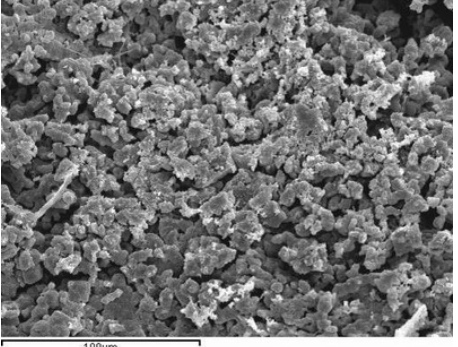
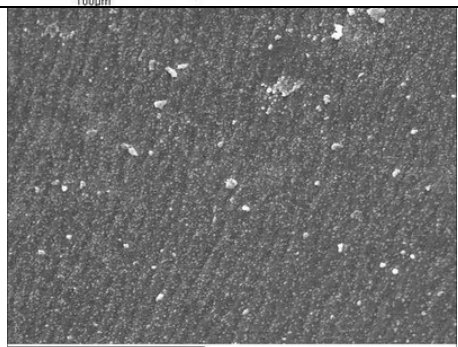
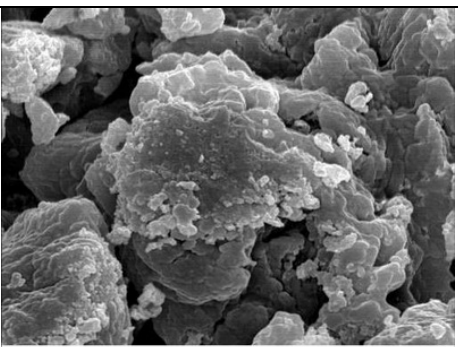
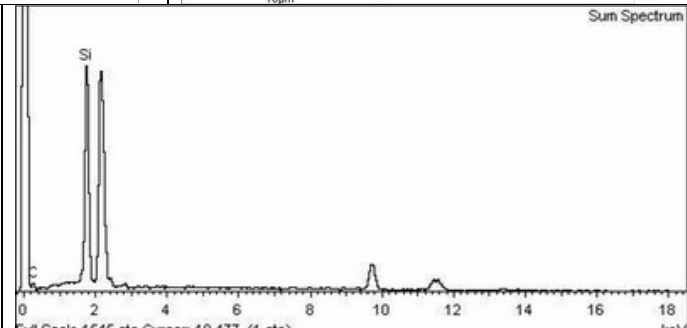
ตารางที่ ก-14 ผลของวิธีการให้ความร้อนแบบทั่วไปและใช้ไมโครเวฟ ของเบดตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นซิลิกอนคาร์ไบด์และอลูมินาออกไซด์ ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10% Ni/SiC ต่อแก๊สผลิตภัณฑ์ ที่อัตราแก๊สเข้ารวม 1 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 600°C (330 วัตต์)

heating method	catalyst support	CO ₂	CO	H ₂	C _x H _y	syngas	%C conversion	%H conversion	LHV (MJ/m ³)	LHV/N ₂	H ₂ /CO	cold gas eff	syn/H ₂ /CO
Microwave (330W)	SiC	0.06	0.05	0.16	0.03	0.21	19.14	19.66	13.84	1.00	2.99	1.85	0.07
	Al ₂ O ₃	0.01	0.02	0.04	0.005	0.06	4.53	4.94	13.04	0.31	2.81	0.13	0.02
Conv	SiC	0.06	0.03	0.06	0.06	0.11	20.43	16.86	20.44	1.19	1.89	0.99	0.06
	Al ₂ O ₃	0.09	0.09	0.30	0.07	0.39	34.06	40.17	14.86	5.38	3.15	6.70	0.12

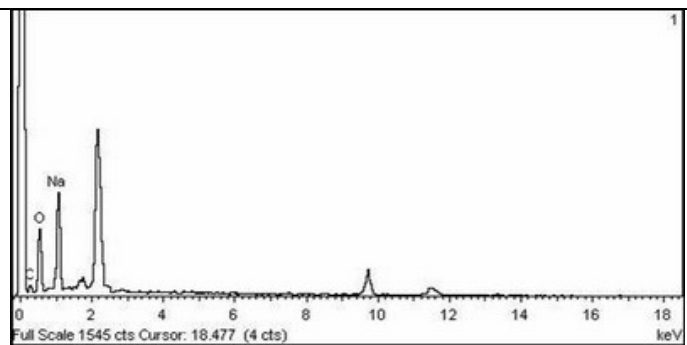
ตารางที่ ก-15 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscope: SEM) และการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer: EDS) ของซิลิกอนคาร์ไบด์เบด



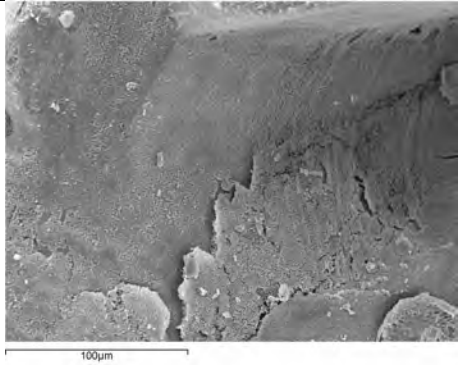
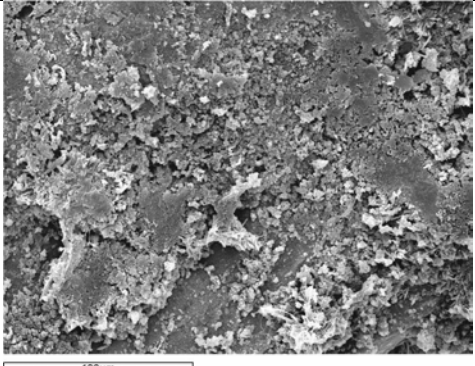
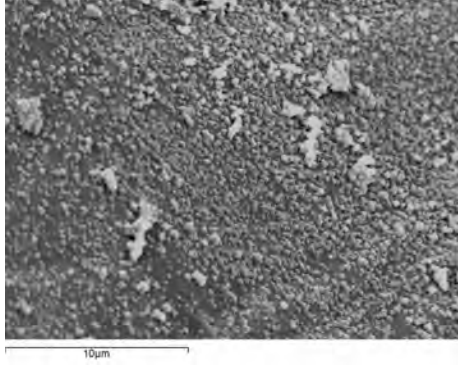
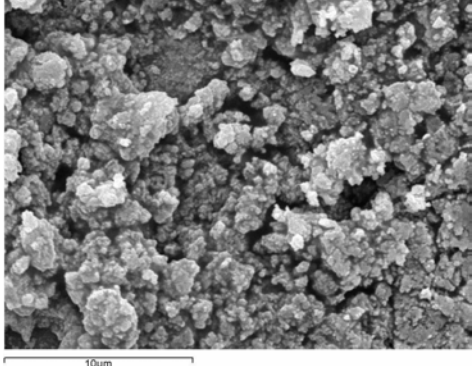
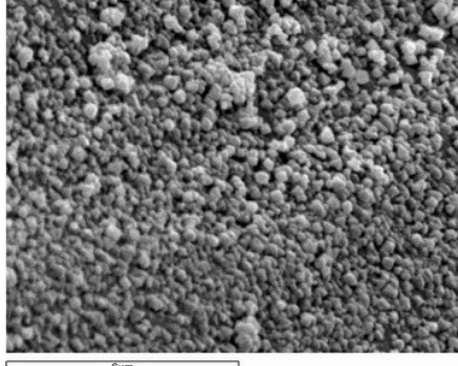
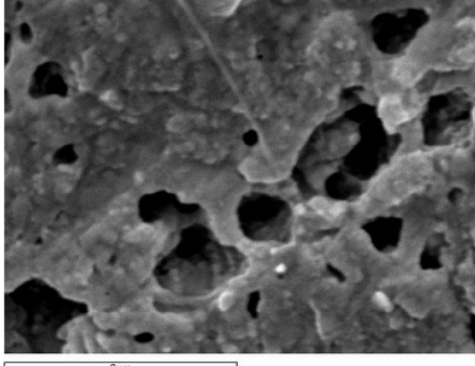
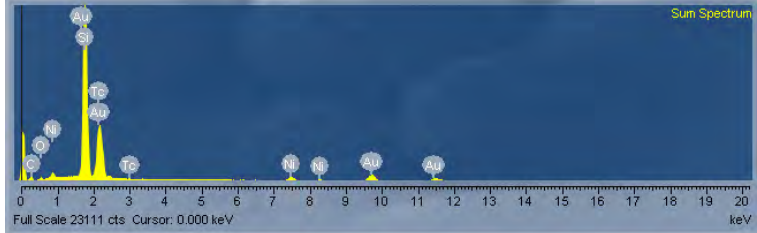
ตารางที่ ก-16 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscope: SEM) และการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer: EDS) ของเบคตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5%Ni/SiC

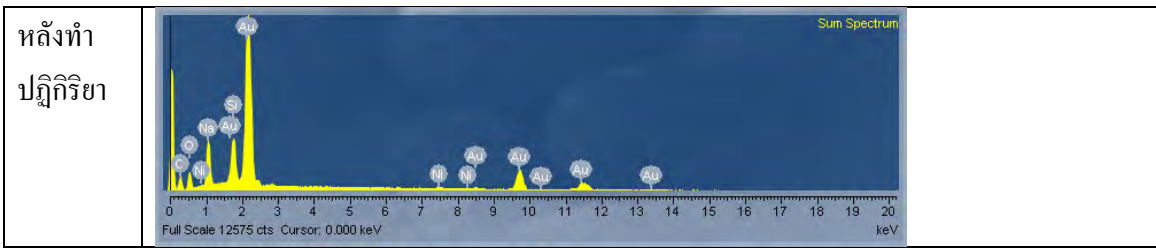
กำลังขยาย	ก่อนทำปฏิกิริยา	หลังทำปฏิกิริยา
SEM กำลังขยาย 50X		
SEM กำลังขยาย 500X		
SEM กำลังขยาย 5000X		
ก่อนทำปฏิกิริยา		

หลังทำปฏิกิริยา

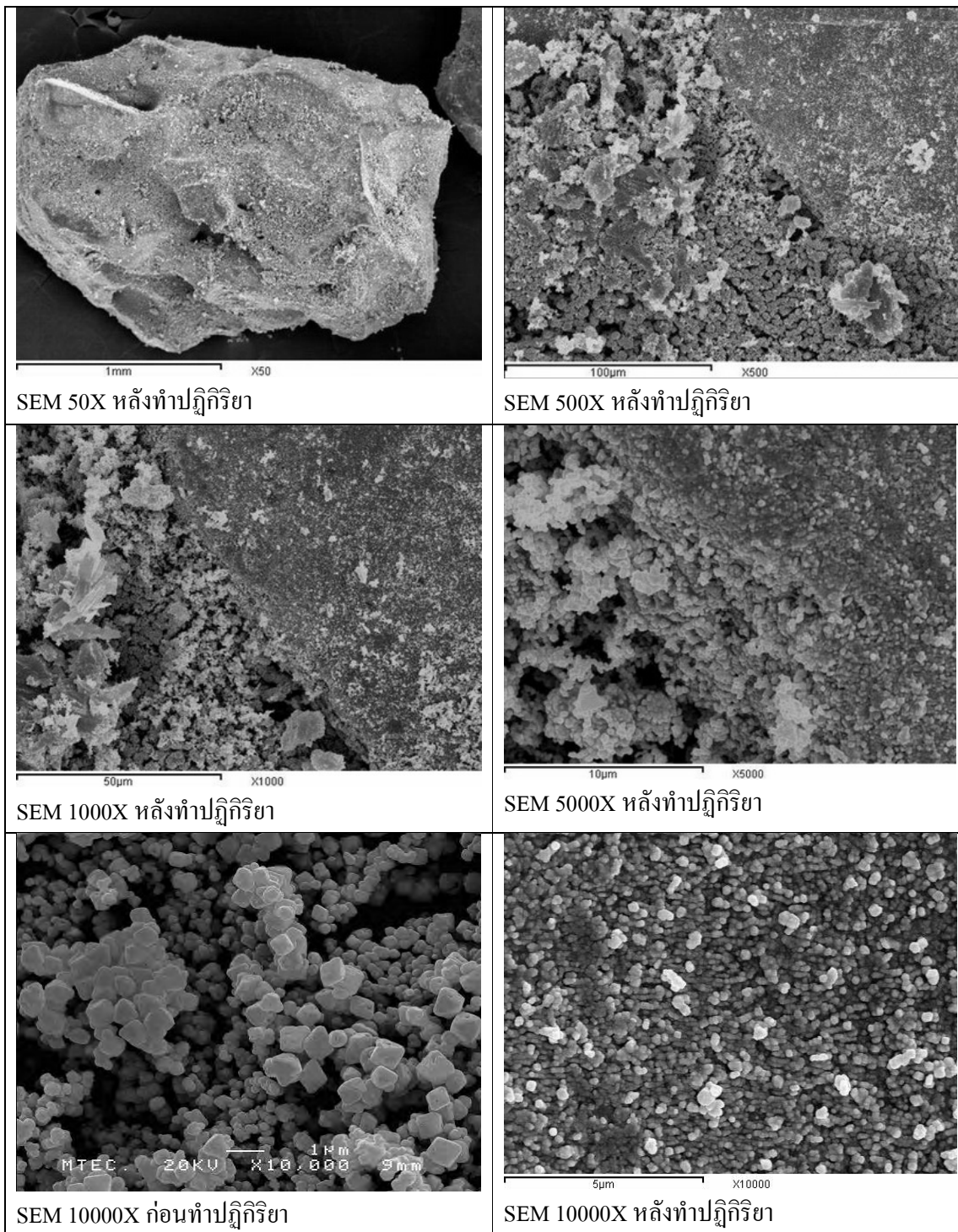


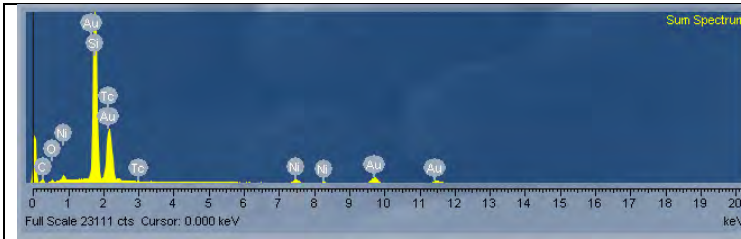
ตารางที่ ก-16 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscope: SEM) และการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer: EDS) ของเบตตัวเร่งปฏิกิริยา 1.0%Ni/SiC

กำลังขยาย	ก่อนทำปฏิกิริยา	หลังทำปฏิกิริยา
SEM กำลังขยาย 500X		
SEM กำลังขยาย 5000X		
SEM กำลังขยาย 10000X		
ก่อนทำ ปฏิกิริยา		

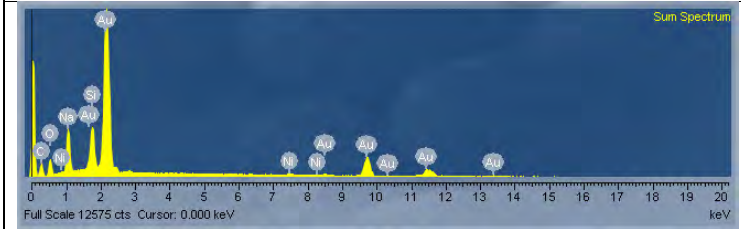


ตารางที่ ก-17 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscope: SEM) และการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer: EDS) ของเบคตัวเร่งปฏิกิริยา 5.0%Ni/SiC



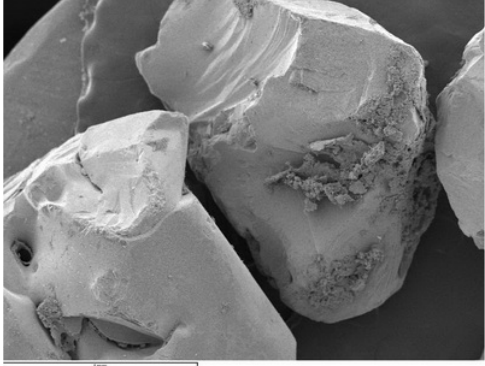

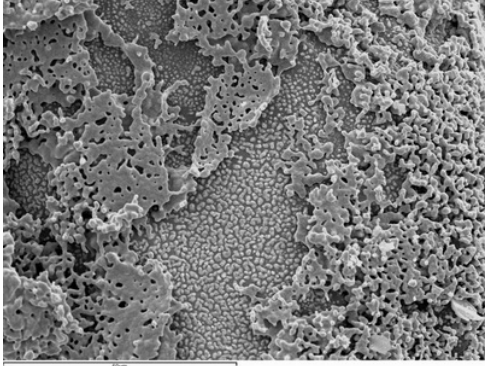
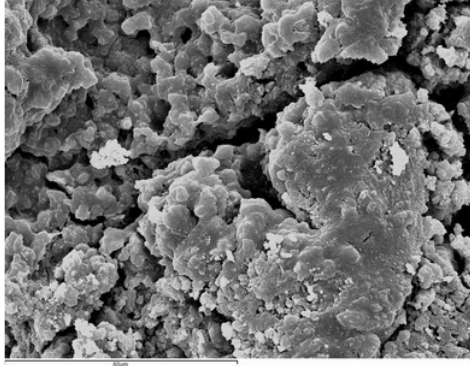
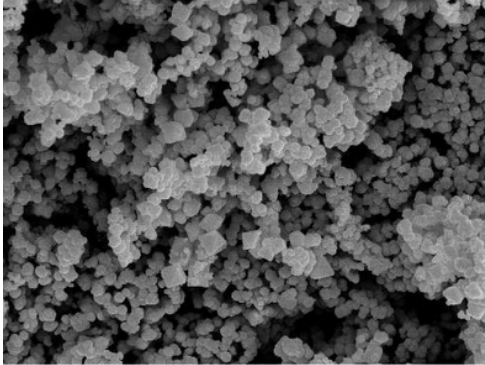
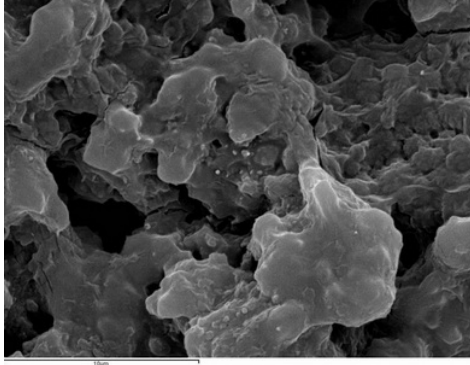


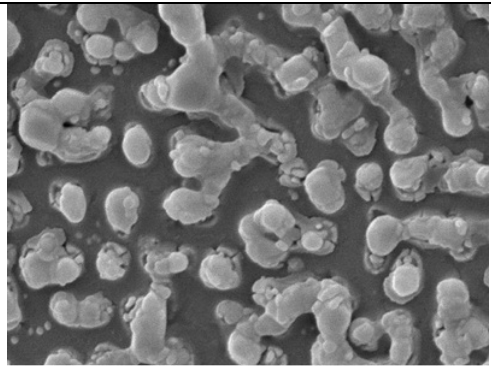
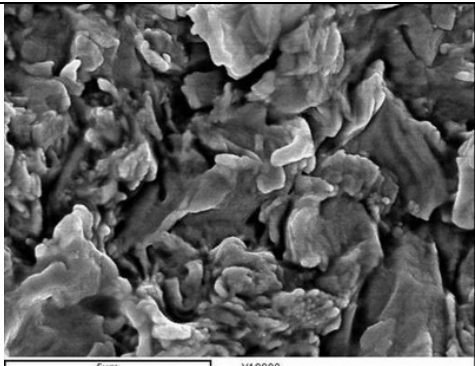
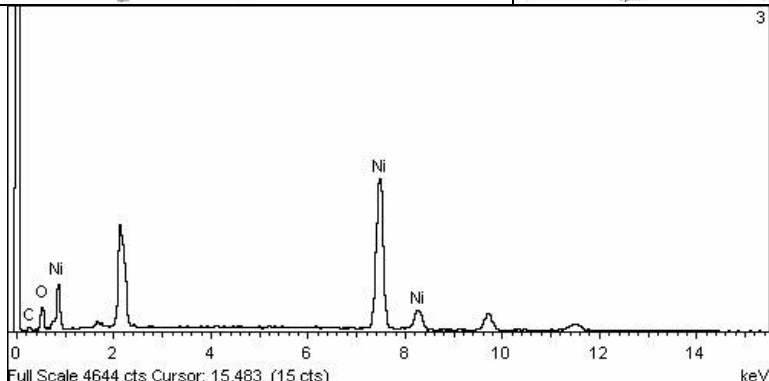
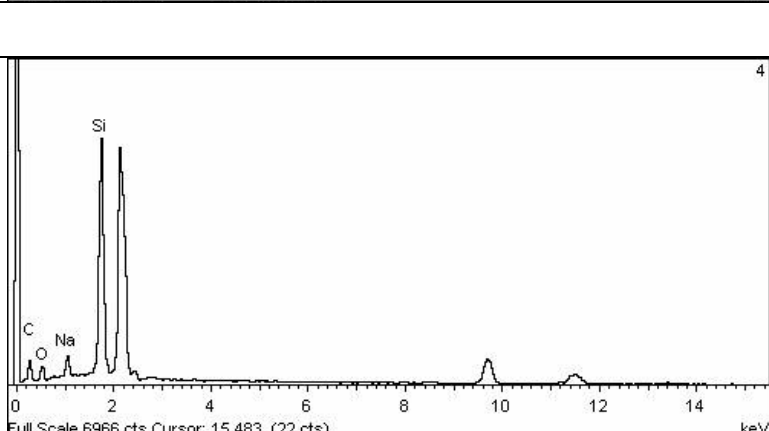
ก่อนทำปฏิกิริยา



หลังทำปฏิกิริยา

ตารางที่ ก-18 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscope: SEM) และการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer: EDS) ของเบคตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SiC

กำลังขยาย	ก่อนทำปฏิกิริยา	หลังทำปฏิกิริยา
SEM กำลังขยาย 50X		
SEM กำลังขยาย 1000X		
SEM กำลังขยาย 5000X		

<p>SEM กำลังขยาย 10000X</p>		
<p>ก่อนทำ ปฏิกิริยา</p>		
<p>หลังทำ ปฏิกิริยา</p>		

ภาคผนวก ข

ภาคผนวก ข การเผยแพร่ผลงานวิจัย

ความวิจัย ตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

- 1) Y. Hawangchu, D. Atong, and V. Sricharoenchaikul, “Enhanced Microwave Induced Thermochemical Conversion of Waste Glycerol for Syngas Production,” *International Journal Of Chemical Reactor Engineering*, Vol. 8, Article A65, (2010)
- 2) Y. Hawangchu, D. Atong, and V. Sricharoenchaikul, “Effect of Silicon Carbide Susceptor and Nickel Catalyst Content on Microwave Enhanced Thermal Conversion of Glycerol Waste,” *Material Science Forum*, (2010) (in press)

บทความวิจัย ในหนังสือสรุปการประชุมวิชาการ (Proceeding) ระดับนานาชาติ

- 1) D. Atong, **Y. Hawangchu**, and V. Sricharoenchaikul, “Feasibility Study On Microwave Induced Gasification Of Crude Glycerol,” *Renewable Energy 2008*, Oct 13-17, Busan, Korea, pp 414 (2008)
- 2) D. Atong, **Y. Hawangchu**, and V. Sricharoenchaikul, “Feasibility Study On Microwave Induced Gasification Of Waste Glycerol”, *Global Congress on Microwave Energy Applications*, Aug 4-8, Otsu, Japan, pp 767-770, (2008)

การเสนอผลงานในการประชุมวิชาการแบบปากเปล่าในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

- 1) **Y. Hawangchu**, D. Atong, and V. Sricharoenchaikul, “Effect of Silicon Carbide Susceptor and Nickel Catalyst Content on Microwave Enhanced Thermal Conversion of Glycerol Waste”, *The 11th International Symposium on Eco-Materials Processing and Design (ISEPD2010)*, January 9-12, Sakai, Japan, pp 23 (2010)
- 2) V. Sricharoenchaikul, **Y. Hawangchu**, and D. Atong, “ Enhanced Microwave Induced Thermochemical Conversion Of Waste Glycerol For Production Of Syngas,” *The 2nd International Congress on Green Process Engineering (GPE2009)*, June 14-17, Venice, Italy (2009)

- 3) V. Sricharoenchaikul, **Y. Hawangchu**, and D. Atong, "Production of Fuel Gas from Waste Glycerol Via Enhanced Microwave Induced Thermal Conversion," The 1st Regional Conference in Biotechnology: Focus on Biofuels and Bioenergy, July 30-31, Manila, Philippines, pp 51 (2009)

การเสนอผลงานในการประชุมวิชาการแบบโปสเตอร์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

- 1) D. Atong, **Y. Hawangchu**, and V. Sricharoenchaikul, "Feasibility Study On Microwave Induced Gasification Of Crude Glycerol," Renewable Energy 2008, Oct 13-17, Busan, Korea, pp 414 (2008)
- 2) D. Atong, **Y. Hawangchu**, and V. Sricharoenchaikul, "Feasibility Study On Microwave Induced Gasification Of Waste Glycerol," Global Congress on Microwave Energy Applications, Aug 4-8, Otsu, Japan, pp 767-770, (2008)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวศวดี ะวังจู เกิดเมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2526 สถานที่เกิด จังหวัดสมุทรสาคร สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะ สิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปี พ.ศ. 2548 และเข้าศึกษาต่อในระดับ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2550

Filename: วิทยานิพนธ์_5070601021-update 10May
Directory: F:\ส่งเล่ม\วิทยานิพนธ์\MS word
Template: C:\Documents and Settings\Winxp\Application
Data\Microsoft\Templates\Normal.dotm
Title: บทที่ 1
Subject:
Author: sKzXP
Keywords:
Comments:
Creation Date: 5/10/2010 6:50:00 PM
Change Number: 2
Last Saved On: 5/10/2010 6:50:00 PM
Last Saved By: Your User Name
Total Editing Time: 4 Minutes
Last Printed On: 5/10/2010 6:53:00 PM

As of Last Complete Printing

Number of Pages: 171
Number of Words: 34,331 (approx.)
Number of Characters: 195,690 (approx.)