

ผลิตภัณฑ์จากแกชฟีเคชั่นของกากกะลาปาล์มผสมกลีเซอรอลดิบ



นางสาวฐานิสรา ชูชัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PRODUCT FROM GASIFICATION OF PALM SHELL WASTE MIXED WITH CRUDE GLYCEROL



Miss Thanisara Chuchai

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science
(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลิตภัณฑ์จากแกซีฟิเคชันของกากกะลาปาล์มผสม
กลีเซอรอลดิบ

โดย

นางสาวฐานิสรา ชูชัย

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

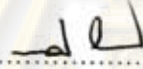
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล

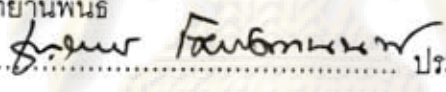
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

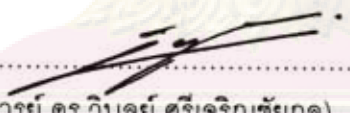
ดร.ดวงเดือน อาจองค์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

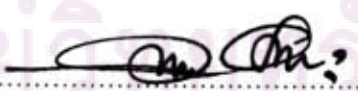

..... คนบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.ดวงเดือน อาจองค์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ภาวดี อังค์วัฒนะ)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)

ฐานิสรา ชูชัย : ผลิตภัณฑ์จากแก๊สฟิเคชันของกากกะลาปาล์มผสมกลีเซอรอลดิบ.
(PRODUCT FROM GASIFICATION OF PALM SHELL WASTE MIXED WITH CRUDE
GLYCEROL) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล, อ.ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.ดวงเดือน อาจองค์, 132 หน้า.

งานวิจัยครั้งนี้ทำการศึกษาปฏิกิริยาแก๊สฟิเคชันของกากกะลาปาล์มผสมกลีเซอรอลดิบโดยใช้
อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ในการทำปฏิกิริยา โดยแก๊สพาเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ทางด้านล่างของเตาปฏิกรณ์ที่
ทำจากควอตซ์ และกากกะลาปาล์มผสมกลีเซอรอลดิบเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ทางด้านล่าง โดยตัวแปรที่
ทำการศึกษา คือ อุณหภูมิ 700 - 900 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 100:0 -
70:30 และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0 - 0.6 โดยให้มีอัตราการไหลของแก๊สพา รวม 15 ลิตร
ต่อนาที และอัตราการป้อนกากกะลาปาล์มผสมกลีเซอรอลเข้าสู่ระบบ 5 กรัมต่อนาที ผลิตภัณฑ์แก๊ส
หลักที่ได้จากปฏิกิริยา คือ คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน โดยผ่านซาร์
และน้ำมันหยาบจากการทำปฏิกิริยาทำการเก็บไว้เพื่อทำการวิเคราะห์โดยน้ำหนัก

ผลการวิจัยครั้งนี้พบว่าที่ภาวะต่าง ๆ ดังนี้ คือ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกาก
กะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 70:30 และ อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0 เป็นภาวะที่ให้แก๊สที่มี
อัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์สูงที่สุดในการศึกษาในครั้งนี้คือ 0.37 และให้
แก๊สที่มีค่าความร้อนสูงที่สุด โดยค่าความร้อนที่ได้จากงานวิจัยนี้อยู่ในช่วงระหว่าง 4.32 - 17.62 MJ/m³
ซึ่งค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้สูงพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยไม่ต้องใช้เชื้อเพลิงอื่น ๆ เป็น
ตัวเสริม

ศูนย์วิทยทรัพยากร

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2551

ลายมือชื่อนิสิต.....ฐานิสรา ชูชัย
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

4989087320 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD: GASIFICATION / PLAM SHELL WASTE / CRUDE GLYCEROL / SYNTHESIS GAS

THANISARA CHUCHAI : PRODUCT FROM GASIFICATION OF PALM SHELL WASTE
MIXED WITH CRUDE GLYCEROL. THESIS PRINCIPAL ADVISOR : VIBOON
SRICHAROENCHAIKUL, Ph.D., THESIS COADVISOR : DUANGDUEN ATONG, Ph.D.,
132 pp.

In this study, gasification of palm shell waste mixed with crude glycerol by partial oxidation with air was proposed. Air and mixed waste were introduced into the gasifier from the bottom and the top of a laboratory scale quartz gasifier, respectively. The effects of temperature (700 and 900°C), ratio of palm shell waste to crude glycerol (100:0 and 70:30) and equivalent ratio (ER) of 0 – 0.6 with total flow rate 15L/min and feeding rate 5 g/min were investigated. Major gaseous products were CO₂, CO, H₂ and CH₄. Char and tar from the reactions were collected and analyzed.

Within the operating range of this study, the temperature 900°C and ER of 0 appeared to be the optimum conditions for palm shell waste mixed with crude glycerol gasification with respect to the maximum of mole ratio of H₂/CO in this study which is 0.37 and also yielding maximum heating value of gas product in this study. The lower heating value obtained from this work are 4.32 – 17.62 MJ/m³. Heating value of obtained gas product is high enough to be further utilized without addition auxiliary fuel.

Field of Study Environmental Science
Academic Year 2008

Student's Signature.....*Thanisara Chuchai*
Advisor's Principal Signature.....*Viboon Sricharoenchaikul*
Co-advisor's Signature.....*Duangduen Atong*

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.ดวงเดือน อางองค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือจนงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ ดร.ภาวดี อังค์วัฒน์ และรองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่สนับสนุนเงินทุนและอุปกรณ์ในการวิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการศึกษาตลอด 2 ปีการศึกษา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบิดา - มารดา และครอบครัวที่คอยให้กำลังใจ และการสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 แก๊สซิฟิเคชัน(Gasification) และไพโรไลซิส (Pyrolysis).....	3
2.1.1 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	3
2.1.2 ประเภทของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	8
2.1.3 กระบวนการไพโรไลซิส.....	9
2.1.4 ประเภทของเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิง.....	16
2.1.5 วัสดุที่ใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิส.....	22
2.2 ชีวมวล.....	23
2.2.1 สมบัติของชีวมวล.....	23
2.2.2 หลักการแปรรูปชีวมวล.....	24
2.3 แก๊สสังเคราะห์.....	27
2.3.1 กระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์.....	27
2.3.2 การนำแก๊สสังเคราะห์ไปใช้ประโยชน์.....	28
2.4 ทาร์ (Tar).....	32
2.4.1 คำจำกัดความของทาร์.....	32
2.4.2 สมบัติทางเคมีของทาร์.....	32

2.5 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง	33
2.5.1 ปาล์มน้ำมัน.....	33
2.5.2 กลีเซอรอล (Glycerol).....	44
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	48
3. วิธีดำเนินการวิจัย.....	51
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	51
3.2 สารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้.....	59
3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	59
3.4 วิธีการทดลอง.....	60
4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	62
4.1 การวิเคราะห์สมบัติของของกากกะลาปาล์มและกลีเซอรอลดิบ	62
4.2 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อกระบวนการแกซีฟิเคชัน	65
4.2.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแปลงสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน.....	65
4.2.2 ผลการเพิ่มอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์.....	71
4.2.3 ผลของการเพิ่มอุณหภูมิที่มีต่ออัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจน ต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์.....	75
4.2.4 ผลของการเพิ่มอุณหภูมิที่มีต่อค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้.....	76
4.3 ผลของอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีต่อกระบวนการแกซีฟิเคชัน.....	79
4.3.1 ผลของอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีต่อองค์ประกอบ ของแก๊สผลิตภัณฑ์.....	79
4.3.2 ผลการเพิ่มอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีต่อองค์ประกอบ ของผลิตภัณฑ์.....	85
4.3.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มี อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์.....	89
4.3.4 ผลของการเพิ่มอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีต่อค่า ความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้.....	90
4.4 ผลของอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีต่อกระบวนการแกซีฟิเคชัน.....	92

4.4.1 ผลของอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีต่อการแปลงสภาพ ของคาร์บอนและไฮโดรเจน.....	92
4.4.2 ผลการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีต่อองค์ประกอบ ของผลิตภัณฑ์.....	99
4.4.3 ผลของการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีอัตราส่วน โดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์.....	104
4.4.4 ผลของการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีต่อค่าความร้อน ของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้.....	105
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	110
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	110
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	111
รายการอ้างอิง.....	112
ภาคผนวก.....	115
ภาคผนวก ก วิธีการทดสอบสำหรับการวิเคราะห์เชื้อเพลิงไม้	116
ภาคผนวก ข ตัวอย่างวิธีการคำนวณการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน เป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ (%conversion).....	120
ภาคผนวก ค ข้อมูลผลการทดลอง.....	122
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	132

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ญ

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ปฏิบัติการเผาไหม้พื้นฐาน.....	5
ตารางที่ 2.2 แสดง Major Independent & Dependent Gasifier Characteristics.....	8
ตารางที่ 2.3 แสดงลักษณะการดำเนินการของ moving bed gasifiers โดยใช้ bituminous coals มีการป้อนไอน้ำและออกซิเจน หรืออากาศ.....	18
ตารางที่ 2.4 แสดงชนิดขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สเป็นเปอร์เซ็นต์โดยโมลจากกระบวนการแกซิฟิเคชันของ bituminous coals ใน moving bed gasifier กับไอน้ำและออกซิเจนหรืออากาศ.....	19
ตารางที่ 2.5 แสดงสูตรโครงสร้างและน้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบคาร์โบไฮเดรตและลิกนิน.....	24
ตารางที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติของตัวอย่างชีวมวล.....	25
ตารางที่ 2.7 อัตราส่วนของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการต่าง ๆ.....	28
ตารางที่ 2.8 วิธีการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยกระบวนการต่าง ๆ.....	31
ตารางที่ 2.10 ส่วนประกอบทางเคมีของ Biomass Tars.....	33
ตารางที่ 2.11 องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันเมล็ดในปาล์ม.....	42
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์กากกะลาปาล์มและกลีเซอรอลดิบแบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ด้วยวิธีมาตรฐาน.....	62
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์กากกะลาปาล์มผสมกลีเซอรอลดิบแบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ด้วย Thermogravimetric analysis (TGA).....	63
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุโดยเครื่อง CHNS/O Elemental Analyzer.....	63
ตารางที่ 4.4 ผลการหาค่าความร้อนสูงโดยใช้เครื่อง Bomb calorimeter	64
ตารางที่ 4.5 ผลการหาค่าความร้อนต่ำจากการคำนวณ.....	64
ตารางที่ 4.6 ผลของการเพิ่มอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส.....	71
ตารางที่ 4.7 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์.....	74
ตารางที่ 4.8 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่ออัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์.....	76
ตารางที่ 4.9 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อค่าความร้อนต่ำของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ต่อเนื่อง.....	79

ตารางที่ 4.10 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีต่อการ แปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส.....	84
ตารางที่ 4.11 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีต่อ องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์.....	88
ตารางที่ 4.12 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีต่อ อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์.....	90
ตารางที่ 4.13 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีต่อ ค่าความร้อนต่ำของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ต่อมาที่.....	92
ตารางที่ 4.14 ผลของการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีต่อการแปรสภาพของ คาร์บอนและไฮโดรเจนไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส.....	98
ตารางที่ 4.15 ผลของการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีต่อการแปรสภาพของ คาร์บอนและไฮโดรเจนไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส.....	99
ตารางที่ 4.16 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจาก 0 เป็น 0.3 ที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์.....	103
ตารางที่ 4.17 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจาก 0.3 เป็น 0.6 ที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์.....	103
ตารางที่ 4.18 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีต่ออัตราส่วน โดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์.....	105
ตารางที่ 4.19 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีต่อค่า ความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ต่อมาที่.....	108
ตารางที่ 4.20 การเปรียบเทียบผลงานวิจัยในครั้งนี้นักงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ.....	109
ตารางที่ ค.1 ผลของสภาวะต่าง ๆ ที่มีผลต่อการแปลงสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์..	122
ตารางที่ ค.2 ผลของสภาวะต่าง ๆ ที่มีผลต่อการแปลงสภาพของไฮโดรเจนเป็นแก๊ส ผลิตภัณฑ์.....	124
ตารางที่ ค.3 ผลของสภาวะต่าง ๆ ที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์.....	126
ตารางที่ ค.4 ผลของสภาวะต่าง ๆ ที่มีต่อค่าความร้อนต่ำของแก๊สผลิตภัณฑ์.....	130

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 ระบบการผลิตแก๊สสังเคราะห์.....	3
รูปที่ 2.2 moving bed gasifier.....	4
รูปที่ 2.3 การเกิดไพโรไลซิสของเซลลูโลสที่อุณหภูมิต่ำ.....	10
รูปที่ 2.4 การเกิดไพโรไลซิสเซลลูโลสที่แข่งขัน.....	11
รูปที่ 2.5 การเกิดไพโรไลซิสของเซลลูโลสที่อุณหภูมิสูง.....	11
รูปที่ 2.6 การเกิดไพโรไลซิสของลิกนิน.....	12
รูปที่ 2.7 แสดงเตาผลิตแก๊ส 4 ประเภท.....	21
รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงโดยใช้ความร้อนของชีวมวล.....	26
รูปที่ 2.9 ผลิตภัณฑ์ขั้นต้นที่ได้จากการใช้แก๊สสังเคราะห์เป็นวัตถุดิบ.....	29
รูปที่ 2.10 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม.....	39
รูปที่ 2.11 การแยกส่วนและการกลั่นบริสุทธิ์น้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันเมล็ดในปาล์ม	41
รูปที่ 2.12 โครงสร้างของกลีเซอรอล.....	44
รูปที่ 2.13 ปฏิกริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน.....	47
รูปที่ 2.14 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	47
รูปที่ 3.1 แผนผังกระบวนการแกซีฟิเคชันโดยรวม.....	52
รูปที่ 3.2 เครื่องบดละเอียดความเร็วสูง.....	52
รูปที่ 3.3 ตะแกรงร้อนเบอร์ 20 mesh.....	53
รูปที่ 3.4 เครื่องผสม.....	53
รูปที่ 3.5 เครื่องปฏิกรณ์สำหรับการทำปฏิกริยาแกซีฟิเคชัน.....	54
รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ป้อนวัตถุดิบเข้าเครื่องปฏิกรณ์.....	55
รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนและอากาศ.....	55
รูปที่ 3.8 เตาเผาให้ความร้อนแบบท่อกลวง.....	56
รูปที่ 3.9 ชุดอุปกรณ์ดักจับฝุ่นของแข็งที่เกิดจากปฏิกริยา.....	57
รูปที่ 3.10 อุปกรณ์สกัดน้ำมันทาร์ออกจากแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้	57
รูปที่ 3.11 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊สที่เกิดขึ้น.....	58
รูปที่ 3.12 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกริยา.....	59

รูปที่ 4.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนที่อัตราส่วนกาก กะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 100:0 (อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3).....	66
รูปที่ 4.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของไฮโดรเจนที่อัตรา ส่วนกาก กะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 100:0 (อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3).....	66
รูปที่ 4.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนที่อัตรา ส่วนกาก กะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 85:15 (อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)	67
รูปที่ 4.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของไฮโดรเจนที่อัตรา ส่วนกาก กะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 85:15 (อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3).....	68
รูปที่ 4.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนที่อัตรา ส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 70:30 (อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)	69
รูปที่ 4.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของไฮโดรเจนที่อัตรา ส่วนกาก กะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 70:30 (อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)	69
รูปที่ 4.7 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ (อัตราส่วนกาก กะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 100:0 และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)	72
รูปที่ 4.8 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ (อัตราส่วนกาก กะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 85:15 และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)	73
รูปที่ 4.9 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ (อัตราส่วนกาก กะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 70:30 และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)	74
รูปที่ 4.10 ผลของการเพิ่มอุณหภูมิที่มีต่ออัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊ส คาร์บอนมอนอกไซด์ (ที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม 100:0, 85:15, 70:30 และอัตราส่วน ระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3).....	75
รูปที่ 4.11 ผลของการเพิ่มอุณหภูมิที่มีต่อค่าความร้อนต่ำของผลิตภัณฑ์แก๊สแบบไม่รวมแก๊สพา (ที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม 100:0, 85:15, 70:30 และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3).....	77
รูปที่ 4.12 ผลของการเพิ่มอุณหภูมิที่มีต่อค่าความร้อนต่ำของผลิตภัณฑ์แก๊สแบบรวมแก๊สพา (ที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม 100:0, 85:15, 70:30 และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3).....	78

รูปที่ 4.23 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีต่อค่าความร้อน
ต่ำของผลิตภัณฑ์แก๊สแบบไม่รวมแก๊สพา (ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส และ
อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)..... 91

รูปที่ 4.24 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีต่อค่าความร้อน
ต่ำของผลิตภัณฑ์แก๊สแบบรวมแก๊สพา (ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส และ
อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)..... 92

รูปที่ 4.25 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนกาก
กะลาปาล์ม:กลีเซอรอลเท่ากับ 100:0 ที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอน (อุณหภูมิ 900
องศาเซลเซียส)..... 93

รูปที่ 4.26 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนกาก
กะลาปาล์ม:กลีเซอรอลเท่ากับ 100:0 ที่มีต่อการแปรสภาพของไฮโดรเจน (อุณหภูมิ 900
องศาเซลเซียส)..... 94

รูปที่ 4.27 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนกาก
กะลาปาล์ม:กลีเซอรอลเท่ากับ 85:15 ที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอน (อุณหภูมิ 900
องศาเซลเซียส)..... 95

รูปที่ 4.28 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนกาก
กะลาปาล์ม:กลีเซอรอลเท่ากับ 85:15 ที่มีต่อการแปรสภาพของไฮโดรเจน (อุณหภูมิ 900
องศาเซลเซียส)..... 95

รูปที่ 4.29 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนกาก
กะลาปาล์ม:กลีเซอรอลเท่ากับ 70:30 ที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอน (อุณหภูมิ 900
องศาเซลเซียส) 96

รูปที่ 4.30 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนกาก
กะลาปาล์ม:กลีเซอรอลเท่ากับ 70:30 ที่มีต่อการแปรสภาพของไฮโดรเจน (อุณหภูมิ 900
องศาเซลเซียส) 97

รูปที่ 4.31 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีต่อองค์ประกอบ
ของผลิตภัณฑ์ (อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล
เท่ากับ 100:0)..... 100

รูปที่ 4.32 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีต่อองค์ประกอบ ของผลิตภัณฑ์ (อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล เท่ากับ 85:15).....	101
รูปที่ 4.33 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีต่อองค์ประกอบ ของผลิตภัณฑ์ (อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล เท่ากับ 70:30).....	102
รูปที่ 4.34 ผลของการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ แก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (ที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 100:0, 85:15 และ 70:30 และอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส).....	104
รูปที่ 4.35 ผลของการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีต่อค่าความร้อนของ ผลิตภัณฑ์แก๊สแบบไม่รวมแก๊สพา (ที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 100:0, 85:15 และ 70:30 และอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส).....	106
รูปที่ 4.36 ผลของการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีต่อค่าความร้อนของ ผลิตภัณฑ์แก๊สแบบรวมแก๊สพา (ที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 100:0, 85:15 และ 70:30 และอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส).....	107

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากปัญหาวิกฤตด้านพลังงานทั่วโลกที่ส่งผลกระทบต่อประเทศไทยส่งผลให้ภาครัฐบาลได้ส่งเสริมให้มีการผลิตพลังงานทางเลือกใหม่ หนึ่งในนั้นคือ ไบโอดีเซล โดยส่งเสริมการปลูกพืชที่สามารถนำมาสกัดน้ำมันได้เพื่อนำมาผลิตไบโอดีเซล ทำให้ในปัจจุบันมีการปลูกปาล์มและสบู่ดำเพื่อผลิตไบโอดีเซลเป็นจำนวนมาก โดยในปี พ.ศ. 2551 กระทรวงพลังงานตั้งเป้าหมายจะเร่งปลูกปาล์มในประเทศไทยให้ได้ 4 ล้านไร่ ส่งผลให้เกิดกากกะลาปาล์มน้ำมันเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมัน และยังไม่มียุทธศาสตร์การจัดการที่ถูกต้องเหมาะสมที่จะกำจัดกากกะลาปาล์มเหล่านี้ การนำกากกะลาปาล์มน้ำมันมาผ่านกระบวนการแกซีฟิเคชันเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถนำมาจัดการกับของเสียได้ และยังเป็นพลังงานทางเลือกชนิดหนึ่งให้แก่ประเทศไทยอีกด้วย นอกจากนี้การผลิตไบโอดีเซลยังทำให้เกิดกลีเซอรอลอีกเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นกลีเซอรอลที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ ได้ กลีเซอรอลที่เพิ่มจำนวนมากขึ้นนี้จึงเป็นปัญหาในการกำจัดเช่นกัน จึงมีแนวความคิดที่จะนำกากกะลาปาล์มและกลีเซอรอลที่มาจากกระบวนการผลิต ไบโอดีเซลมาทำเป็นเชื้อเพลิง แล้วนำมาผ่านกระบวนการแกซีฟิเคชันและไพโรไลซิสเพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อไป

การผลิตเชื้อเพลิงแก๊สจากชีวมวลโดยใช้กระบวนการผลิตแก๊สนั้นจะมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการที่สำคัญสองกระบวนการ ซึ่งได้แก่ กระบวนการแกซีฟิเคชัน และกระบวนการไพโรไลซิส โดยกระบวนการแกซีฟิเคชันเป็นกระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงแข็ง เช่น ถ่านหิน ถ่านไม้ เป็นต้นให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊ส ดังเช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน มีเทน ซึ่งในกระบวนการนี้จะเกิดปฏิกิริยาหลายขั้นตอน ทั้งปฏิกิริยาดูดความร้อนและคายความร้อน โดยใช้ออกซิเจนหรือไอน้ำในการทำปฏิกิริยา โดยจะเกิดปฏิกิริยาหลายส่วนทั้งส่วนที่มีออกซิเจนเพียงพอในการทำปฏิกิริยา และส่วนที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอในการทำปฏิกิริยา และจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของแก๊สคือ ชาร์ ของเหลวที่ควบแน่นได้ ทาร์ และแก๊ส

ส่วนกระบวนการไพโรไลซิส เป็นกระบวนการสลายตัวทางความร้อนที่ไม่สมบูรณ์ในภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (ไม่มีการเติมไอน้ำ ไฮโดรเจน หรือคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์) ซึ่งในปัจจุบันการสลายตัวทางความร้อนในภาวะที่มีออกซิเจนน้อย หรือในที่มีการถ่ายเทความร้อนให้เกิดการไพโรไลซิสโดยตรงจากการเผาไหม้บางส่วนของชาร์และแก๊ส เรียกได้ว่าเป็นกระบวนการ

ไฟโรไลซิส โดยจากการทำงานของทั้งสองกระบวนการจะสามารถผลิตเชื้อเพลิงแก๊สได้ เชื้อเพลิงแก๊สที่ได้จะต้องผ่านการปรับปรุงคุณภาพก่อนที่จะนำไปใช้งาน

เชื้อเพลิงแก๊สที่ได้สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์ และยังสามารถใช้เป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตสารเคมีอินทรีย์อื่น ๆ ได้อย่างมากมาย ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารพวกปิโตรเคมี เชื้อเพลิงแก๊สสามารถเปลี่ยนไปเป็นเมทานอลได้เป็นอย่างดี โดยใช้ซิงค์โคโรเมียออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบแอลเคน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโคบอลต์ และยังสามารถนำแก๊สไฮโดรเจนไปใช้ในกระบวนการปิโตรเคมีได้ เช่น การผลิตกรดอะคริลิก

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแกซิฟิเคชันของกากกะลาปาล์มผสมกลีเซอรอล

1.2.2 ศึกษาอัตราส่วนและภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงแก๊สจากกากกะลาปาล์มผสมกลีเซอรอลโดยใช้กระบวนการแกซิฟิเคชัน

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 ทราบองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแกซิฟิเคชันของกากกะลาปาล์มผสมกลีเซอรอล

1.3.2 ทราบอัตราส่วนและภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงแก๊สจากกากกะลาปาล์มผสมกลีเซอรอลโดยใช้กระบวนการแกซิฟิเคชัน เพื่อใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงทดแทนได้ในอนาคต

1.3.3 เป็นข้อมูลเพื่อใช้ในการพัฒนาระบบผลิตพลังงานจากกากของเสียเหล่านี้เพื่อเป็นทางเลือกให้แก่ประเทศไทย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

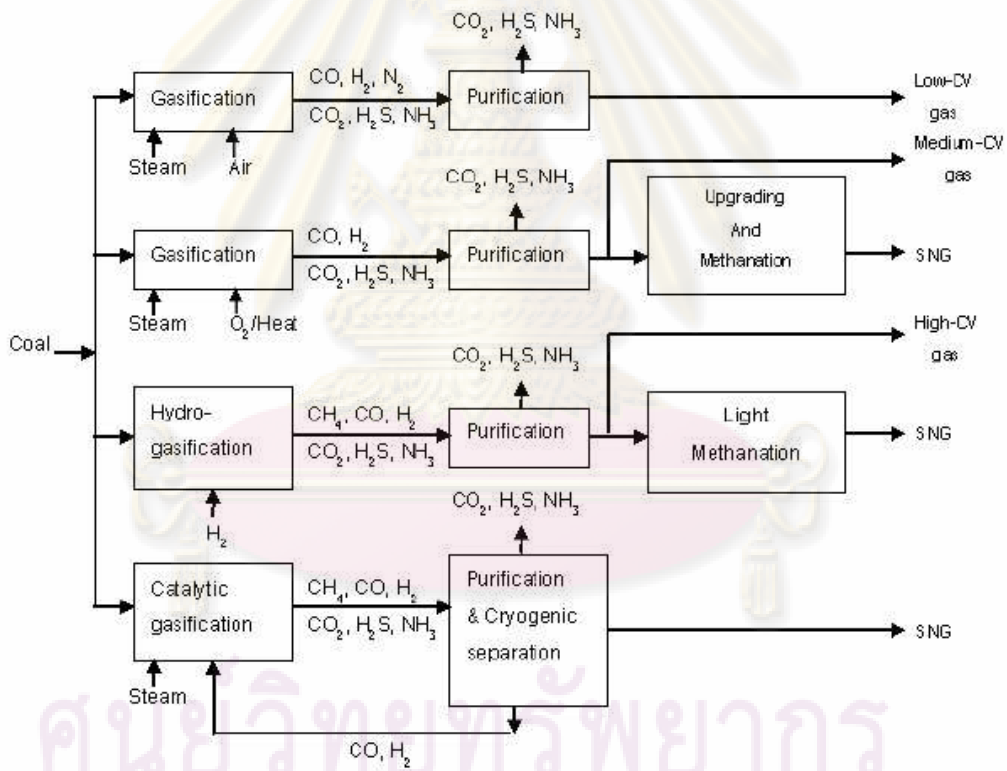
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) และไพโรไลซิส (Pyrolysis)

2.1.1 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (สุพัตรา ชีวธนาคุปต์, 2546)

แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) หรือกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เป็นกระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงแข็งเช่น ถ่านหิน ถ่านไม้ เป็นต้น ให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊ส เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H_2) มีเทน (CH_4) ในแง่ของกระบวนการหมายถึง ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดที่รวมการไพโรไลซิสในขั้นต้น และการปรับปรุงคุณภาพแก๊สในขั้นถัดไป ดังรูปที่ 2.1



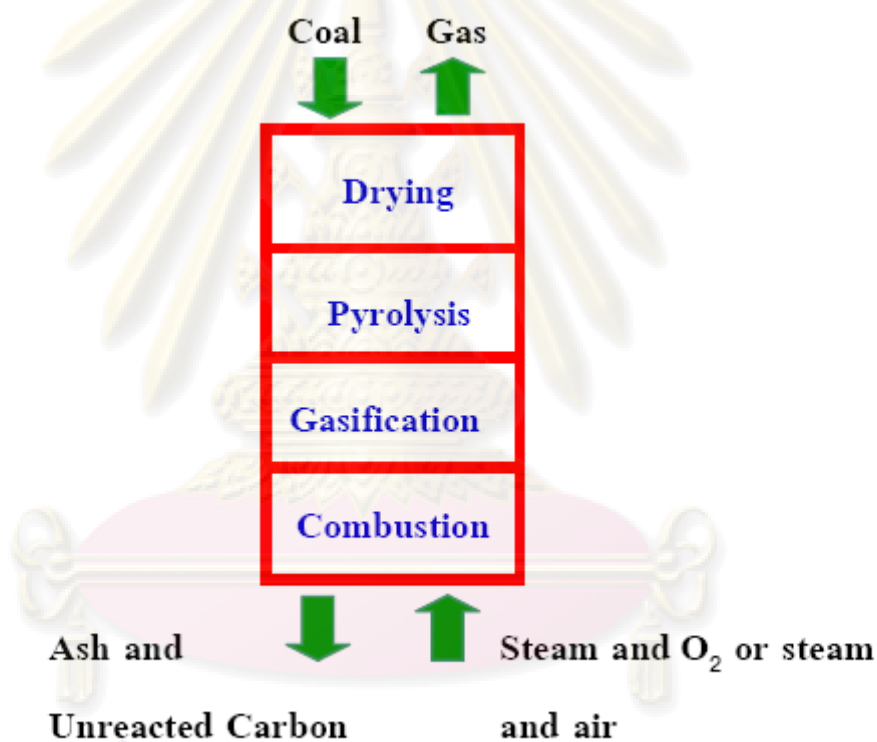
รูปที่ 2.1 ระบบการผลิตแก๊สสังเคราะห์ (สุพัตรา ชีวธนาคุปต์, 2546)

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเทอร์โมเคมีคอล (Thermochemical Conversion Process) ได้จากปฏิกิริยาของคาร์บอน กับออกซิเจน และ/หรือไอน้ำที่อุณหภูมิสูงความดันตั้งแต่ 1 บรรยากาศขึ้นไป ปฏิกิริยาเกิดขึ้นหลายขั้นตอนทั้งปฏิกิริยาดูด

ความร้อน และปฏิกิริยาคายความร้อน แก๊สเชื้อเพลิงประกอบด้วยแก๊สผสมระหว่าง CO และ H₂ เรียกว่าโปรดิวเซอร์แก๊ส (Producer Gas)

โปรดิวเซอร์แก๊ส เกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ (Incomplete Combustion) ของคาร์บอนไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ และปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ของคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน (อนวรรตน์ เกตุคง, 2547)

ลำดับการเปลี่ยนแปลงอาจแสดงได้โดยตัวอย่างของ Moving bed gasifier ดังแสดงในรูป 2.2



รูปที่ 2.2 moving bed gasifier (Probstein and Hicks, 1982)

ถ่านหินเคลื่อนที่ลงมาถูกทำให้แห้งด้วยแก๊สร้อนที่สวนทางขึ้นมาเมื่อเคลื่อนต่อลงมาจะร้อนขึ้นจนเกิดการไล่สารระเหย และไพโรไลซิส ในชั้นถัดไปอุณหภูมิสูงขึ้นจนเกิดการแก๊สฟาย (gasify) ถือได้ว่าเป็นการแก๊สฟายซาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิส นั่นก็คือ solid carbon นั่นเอง

ปฏิกิริยาเผาไหม้พื้นฐาน (Fundamental Combustion Reaction) (จีระศักดิ์ แสงฟุ้ง, 2530)

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างคาร์บอนกับอากาศและ/หรือไอน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ปฏิกิริยาเหล่านี้มีการศึกษามานานแล้ว นับว่าเป็นปฏิกิริยาพื้นฐานที่สามารถนำมาอธิบายกระบวนการเผาไหม้ต่าง ๆ ได้

ตารางที่ 2.1 ปฏิกิริยาการเผาไหม้พื้นฐาน

ปฏิกิริยา	ลักษณะ ของ 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

ที่มา : สุพัตตรา ชีวธนาคุปต์ (2546)

หมายเหตุ 1. ปฏิกิริยาทดลองที่ภาวะ 1,200 องศาเซลวิน (1,700 องศาฟาเรนไฮต์ 927 องศาเซลเซียส) ความดัน 1 บรรยากาศ คาร์บอนที่ใช้เป็นมาตรฐานอยู่ในรูปแกรไฟต์

2. เครื่องหมายลบ หมายถึง ปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic Reaction)

เครื่องหมายบวก หมายถึง ปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic Reaction)

ปฏิกิริยาที่ 2.1 เป็นการเผาไหม้คาร์บอนในบริเวณที่มีคาร์บอนมากเกินไป เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนปฏิกิริยาที่ 2.2 เป็นการเผาไหม้คาร์บอนที่กำลังลุกแดงภายใต้ภาวะที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอ เกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์

ปฏิกิริยาที่ 2.3 เรียกว่า “Boudouard Reaction” เป็นปฏิกิริยาพื้นฐานของการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่มากเกินไป (Excess Carbon) ในอุณหภูมิของแข็งเกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ มีการศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยา (Reactivity) ของเชื้อเพลิงต่างๆ พบว่าอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา ขึ้นกับธรรมชาติของเชื้อเพลิงและลักษณะเฉพาะของผิว (Surface Characteristic) ของเชื้อเพลิง อัตราการ

เกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 950 องศาเซลเซียส เนื่องจากการแตกตัวของคาร์บอนแข็งชั้นที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของเชื้อเพลิงเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่านี้

ปฏิกิริยาที่ 2.4 จะเกิดขึ้นเมื่อมีออกซิเจนเหลืออยู่ คาร์บอนมอนอกไซด์จะรวมตัวกับออกซิเจนได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์

ส่วนกรณีที่ 2.5 และ 2.6 เป็นกรณีที่ไอน้ำเข้าไปพร้อมกับอากาศ เกิดการแตกตัวของไอน้ำเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอน ปฏิกิริยาที่ 2.5 เราเรียกว่า Water Gasification และปฏิกิริยาที่ 2.7 เป็นปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์กับไอน้ำ ได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮโดรเจน ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Water Gas หรือ Shift Reaction ปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ (Reversible) (Zhang และคณะ, 2005)

ปฏิกิริยาในกระบวนการแกซิฟิเคชัน (จีระศักดิ์ แสงพุ่ม, 2530)

ในชั้นการแกซิฟาย (Gasification zone) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ การแกซิฟายคาร์บอนซึ่งประกอบด้วยปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ

- Oxygenolysis หรือ การทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเพื่อเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ ในบรรยากาศที่มีออกซิเจนจำกัด เพราะอากาศที่ป้อนเข้าจากด้านล่างถูกใช้ในชั้นการเผาไหม้ (Combustion zone) ไปส่วนมาก ปฏิกิริยาในชั้นนี้คือ



- Hydrogenolysis คือ ปฏิกิริยากับ ไฮโดรเจน เพื่อเกิด มีเทน หรือ ปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน



H_2 จะทำปฏิกิริยากับ N_2 และ S ในถ่านหินด้วย เกิดแก๊ส NH_3 และ H_2S การเติมไฮโดรเจนในรูปของไอน้ำนี้เพื่อเพิ่มอัตราส่วน H/C ในแก๊สผลิตภัณฑ์

- hydrolysis



และอาจเกิด $\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2 \quad \Delta H^\circ_{298} = +90.1 \text{ kJ/mol} \quad (2.6)$

หรือ $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \frac{1}{2}\text{CO}_2 + \frac{1}{2}\text{CH}_4 \quad \Delta H^\circ_{298} = +7.7 \text{ kJ/mol} \quad (2.7)$

ในปัจจุบันกระบวนการแกซิฟิเคชันมีการทดลองอยู่ 3 ระบบ คือ (อนวรรตน์ เกตุคง, 2547)

(1) การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value Gas or Low Btu Gas) แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อนประมาณ $3.3-5.6 \text{ MJ/m}^3$ ($90-150 \text{ Btu/SCF}$) เกิดจากการเผาไหม้บางส่วนของถ่านกับอากาศ โดยมากมักมีไอน้ำอยู่ด้วย ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นดังนี้



องค์ประกอบที่สามารถเผาไหม้ได้ (Combustible Component) ของแก๊สผลิตภัณฑ์ คือ คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ซึ่งเจือจางอยู่ในคาร์บอนไดออกไซด์ และไนโตรเจน แก๊สจะมีอุณหภูมิเปลวไฟ (Flame Temperature) ต่ำ ในปัจจุบันได้มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการผลิตไฟฟ้าสำหรับความต้องการของอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

(2) การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนปานกลาง (Medium Heating Value Gas หรือ Medium Btu Gas) แก๊สเชื้อเพลิงมีค่าความร้อนประมาณ $9.3-20.5 \text{ MJ/m}^3$ ($250-550 \text{ Btu/SCF}$) กระบวนการนี้ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ ซึ่งจาก Medium Btu Gas สามารถเปลี่ยนเป็นแก๊สสังเคราะห์ได้โดยกระบวนการนี้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ที่ได้จากการแยกออกจากอากาศ เพื่อใช้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Partial Oxidation) การไม่มีแก๊สไนโตรเจนจะทำให้ค่าความร้อนสูงขึ้น

(3) การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูง (High Heating Value Gas หรือ High Btu Gas) ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้เทียบเท่ากับ Synthesis Gas (SNG) ส่วนประกอบของแก๊สนี้มักเป็นมีเทนเกือบบริสุทธิ์ ซึ่งจากแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนปานกลางสามารถเปลี่ยนเป็น SNG ได้โดยกระบวนการ Methanation ที่อุณหภูมิต่ำ Catalytic Process เกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเป็นแก๊สมีเทนและน้ำดังสมการ (2.9)



เมื่อผ่านการทำให้แห้งก็จะได้แก๊สซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับแก๊สบริสุทธิ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.2 ประเภทของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Classification of Gasification) (สุพัตรา ชีวธนาคุปต์, 2546)

ประเภทของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันอาจแยกออกไปตามลักษณะการให้ความร้อน หรือ ชนิดของ gasifying medium เช่น ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งถือเป็น independent characteristic หรือแยกออกไปตามปฏิกิริยา อุณหภูมิ คุณสมบัติแก๊ส หรือกากของแข็งที่เหลือซึ่ง ถือเป็น dependent characteristic แสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดง Major Independent & Dependent Gasifier Characteristics

Independent	Dependent
1. Method of Supplying heat - direct - indirect	1. Reaction temperature - high - medium - low
2. Gasifying medium & amount - steam with air or O ₂ -air - H ₂ with or without steam - Steam with catalyst	2. Raw gas properties - composition - H ₂ /CO ratio - Tar & oil content - CV
3. Reactor type - moving packed bed - fluidized bed - entrained flow - molten media	3. Solid residue - ash - slag - unconverted carbon

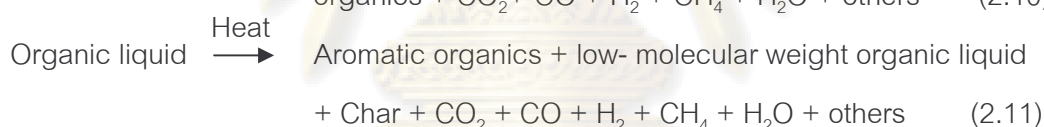
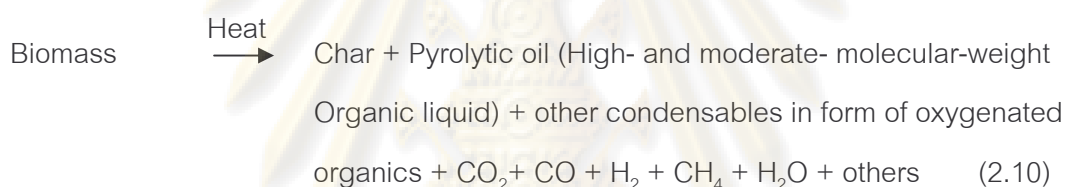
ที่มา : Probstein and Hicks (1982)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.3 กระบวนการไพโรไลซิส (สินีนาฏ รอดจัน, 2547)

ไพโรไลซิสหรือการกลั่นสลาย (Destructive distillation) เป็นกระบวนการสลายตัวทางความร้อน (Thermal degradation) ที่ไม่สมบูรณ์ในภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (ไม่มีการเติมไอน้ำ ไฮโดรเจน หรือคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์) ที่มีการถ่ายเทความร้อนโดยทางอ้อม ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของแข็งคือชาร์ ของเหลวที่ควบแน่นได้ ทาร์ และแก๊ส ปฏิริยาไพโรไลซิสต้องการความร้อนทั้งทางตรงจากการออกซิเดชันเพียงบางส่วน หรือจากปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ และทางอ้อม ซึ่งในปัจจุบันการสลายตัวทางความร้อนในภาวะที่มีออกซิเจนน้อย หรือในที่มีการถ่ายเทความร้อนให้เกิดการไพโรไลซิสโดยตรง จากการเผาไหม้บางส่วนของชาร์และแก๊ส เรียกได้ว่าเป็นกระบวนการไพโรไลซิส

เมื่อชีวมวลเกิดการสลายตัวทางความร้อนจะเกิดอนุกรมของปฏิกิริยาต่าง ๆ ได้แก่แก๊สที่มีพลังงานปานกลาง น้ำมันที่มีองค์ประกอบซับซ้อน และชาร์ ซึ่งปฏิกิริยาของกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวลแสดงได้ดังสมการที่ 2.10 และ 2.11



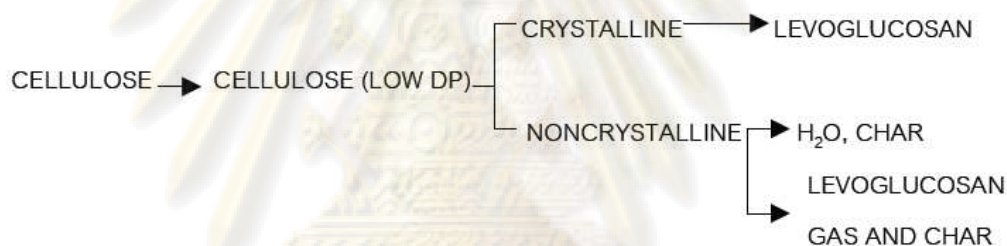
การไพโรไลซิสแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ การไพโรไลซิสแบบช้าและแบบเร็ว การไพโรไลซิสแบบช้าจะเกิดสมดุลในบริเวณช่วงแคบ โดยอัตราการให้ความร้อนจะช้าพอที่จะทำให้เกิดความสมดุลตามอุณหภูมิ ในขณะที่ปริมาณและการกระจายของผลิตภัณฑ์จะขึ้นอยู่กับแนวของอุณหภูมิเดิม (Temperature history) ส่วนการไพโรไลซิสแบบรวดเร็วจะไม่คำนึงถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงการให้ความร้อน แต่การไพโรไลซิสจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ของช่วงอุณหภูมิสุดท้าย

2.1.3.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส (ชูศักดิ์ โภคะนุทรานนท์, 2536)

การไพโรไลซิสสามารถเข้าใจได้โดยศึกษาพฤติกรรมขององค์ประกอบแต่ละตัวที่มีอยู่ภายใน ได้แก่ พอลิเมอร์ของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งแต่ละชนิดมีโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันทำให้ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ต่างกัน นอกจากนี้อาจศึกษาถึงสารต่าง ๆ ที่แยกได้จากปฏิกิริยา เช่น ไฮโดรคาร์บอน ทาร์ แก๊ส เป็นต้น ส่วนการกระจายของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ สามารถควบคุมได้ถ้าทราบถึงกลไกและจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา

- เซลลูโลส

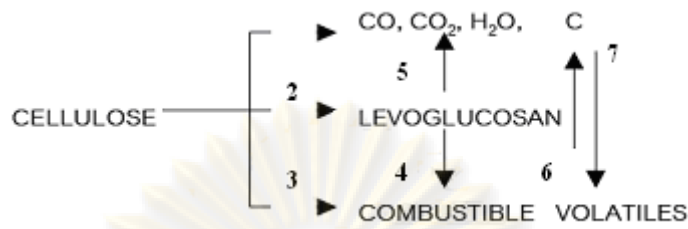
จากการศึกษาพบว่า กลไกของการเกิดไฟโรไลซิสของเซลลูโลสแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงอุณหภูมิกว้าง ๆ คือ ช่วงอุณหภูมิต่ำ (<250 องศาเซลเซียส) ในช่วงเริ่มต้นของการไฟโรไลซิส จะมีการแตกพันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic) ที่บริเวณขอบเขตระหว่างโครงสร้างรูปผลึกและอสัณฐานด้วยอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ทำให้อัตราการพอลิเมอไรเซชันลดลงอย่างรวดเร็ว จาก 1000 หน่วยมาคงที่ประมาณ 200 หน่วยในโครงสร้างทั้งที่เป็นรูปผลึกและอสัณฐาน สายของพอลิเมอร์จะไม่จับตัวเข้าคู่กัน (Unzipping) ซึ่งในโครงสร้างรูปผลึกจะมีการเปลี่ยนรูปไปเป็นพวกเลวโกลูโคซานส่วนในโครงสร้าง อสัณฐานจะมีการแตกของสายเซลลูโลส ที่เกิดการแยกตัวของอะตอมไฮโดรเจนจากอะตอมของคาร์บอน ทำให้มีการดึงอะตอมไฮโดรเจนจากสายพอลิเมอร์ข้างเคียง สายของพอลิเมอร์ทั้งสองจะมีส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาสูง (Active site) ทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุล (Cross link) ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การเกิดไฟโรไลซิสของเซลลูโลสที่อุณหภูมิต่ำ (Antal, 1982)

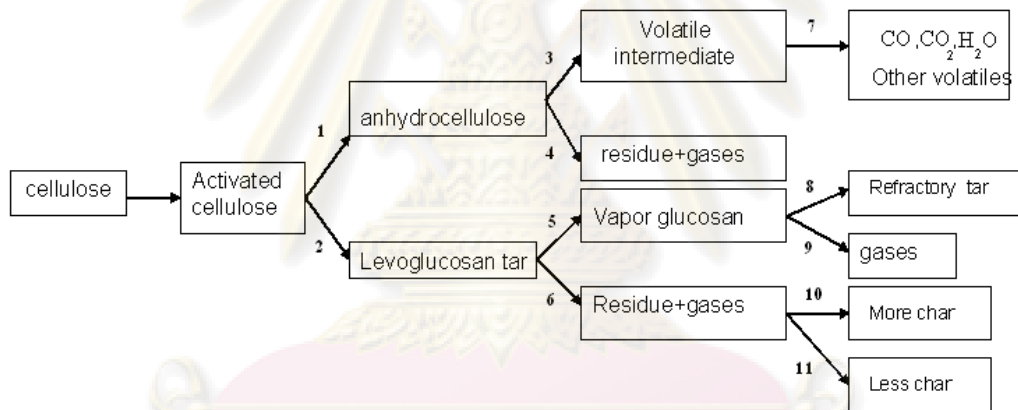
ช่วงอุณหภูมิปานกลาง (250-500 องศาเซลเซียส) จะเกิดการแตกตัวของเซลลูโลสอย่างรวดเร็วและสมบูรณ์ และเกิดการสลายตัวแข่งกันของปฏิกิริยาดิพอลิเมอไรเซชันกับการไล่น้ำออก (Dehydration) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ตามปฏิกิริยาที่ 1 จะเกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ขั้นกลาง (Intermediate) ทำให้เกิดการไล่น้ำออกและเกิดซาร์ซีน ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดเร็วกว่าปฏิกิริยาที่ 2 และ 3 ที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนปฏิกิริยาที่ 2 จะมีการแลกเปลี่ยนอิออนระหว่างพันธะไกลโคซิดิก (Tranglucosylation) ทำให้เกิดเลวโกลูโคซานขึ้น โดยกลไกที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย 2 กลไกคือ กลไกแรกจะเป็นการแตกพันธะไกลโคซิดิกแบบโฮโมไลติก (Homolytically) และเกิดการดิพอลิเมอไรเซชันตามกลไกของอนุมูลอิสระ (Free radical) กลไกที่สองจะมีการแตกพันธะแบบเฮเทอโรไลติก (Heterolytically) และเกิดการดิพอลิเมอไรเซชันของผลิตภัณฑ์ขั้นกลางของคาร์บอนเนียมอิออน (Carbonium ion) ในปฏิกิริยาที่ 3 เป็นการเกิดฟิชชัน (Fission) และการไม่เป็นสัดส่วนกัน (Disproportionation) ปัจจัยที่มีผลกระทบอย่างมากต่อปฏิกิริยาเหล่านี้ ได้แก่

อุณหภูมิ ช่วงเวลาให้ความร้อน บรรยากาศแวดล้อม (ออกซิเจน น้ำ แก๊สเฉื่อย ตัวทำปฏิกิริยาอื่น ๆ) องค์ประกอบ และธรรมชาติทางกายภาพของชีวมวล



รูปที่ 2.4 การเกิดไพโรไลซิสเซลลูโลสที่แข่งกัน (Antal, 1982)

ช่วงอุณหภูมิสูง (> 500 องศาเซลเซียส) กลไกการเกิดไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงเป็นไปตามรูปที่ 2.5 ซึ่งเมื่อความดันสูงขึ้นมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยาตามปฏิกิริยาที่ 4 และ 6 ได้ ชาร์ ในขณะที่การเกิดสารระเหยได้ผ่านปฏิกิริยาที่ 3 และ 5 จะต้องใช้ความดันต่ำลง



รูปที่ 2.5 การเกิดไพโรไลซิสของเซลลูโลสที่อุณหภูมิสูง (Antal, 1982)

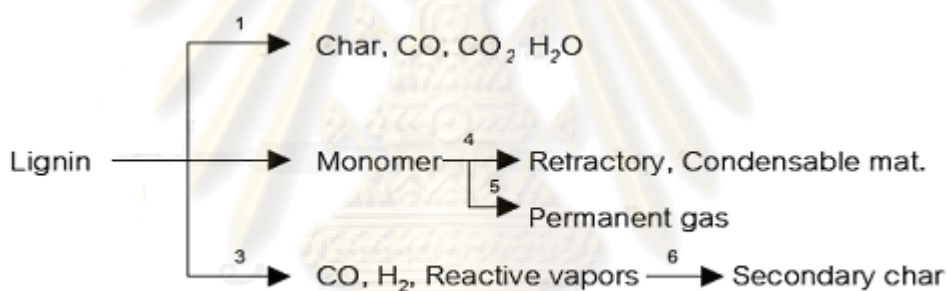
- เฮมิเซลลูโลส

การไพโรไลซิสเฮมิเซลลูโลสหรือพอลิเมอร์ของน้ำตาลจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของแก๊สมากกว่า และน้ำมันทาร์น้อยกว่าเซลลูโลสในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน เมื่อพิจารณาถึงปฏิกิริยาที่ทำให้ได้สารที่สามารถควบแน่นได้ จะพบว่า มีลักษณะเช่นเดียวกับเซลลูโลส โดยกลไกของการเกิดไพโรไลซิสของเฮมิเซลลูโลสจะมีการสลายตัว 2 ขั้นตอน เริ่มจากการดิพอลิเมอร์เชนไปเป็นพวกที่ละลายน้ำได้ แล้วตามด้วยการสลายตัวไปเป็นสารระเหยได้โดยในช่วงแรกจะมีการแตกสลายพันธะระหว่างคาร์บอน อะตอมและออกซิเจนอะตอมไปเป็นเพนโตซาน (Pentosan) ที่จะนำไปสู่

การเกิดกรดอะซิติค ฟอรัลดีไฮด์ คาร์บอนมอนนอกไซด์ และไฮโดรเจน ที่อาจมีผลกระทบต่อสาร
ไฟโรไลซิสของเซลลูโลสและลิกนิน

- ลิกนิน

ลิกนินเป็นโมเลกุลใหญ่ที่มีโครงสร้างต่าง ๆ มาประกอบรวมกันจึงทำให้มีกลไกใน
การเกิดปฏิกิริยาได้หลายทางที่จะได้สารประกอบอินทรีย์ที่สามารถควบแน่นได้ โดยการ
เกิดปฏิกิริยาที่สำคัญแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งชนิดของชีวมวลและภาวะที่ใช้ในการทดลองจะมีผล
ต่อการเกิดปฏิกิริยาอย่างมาก โครงสร้างของปฏิกิริยาเหล่านี้จะคล้ายกับการเกิดไฟโรไลซิสของ
เซลลูโลสช่วงอุณหภูมิต่ำ (< 240 องศาเซลเซียส) จะเกิดปฏิกิริยาการไล่น้ำออกตามปฏิกิริยาที่ 1
แล้วเกิดปฏิกิริยาเชื่อมต่อบริเวณโมเลกุล ทำให้ได้ถ่านชาร์และแก๊สมากขึ้น ช่วงอุณหภูมิปาน
กลาง (240 - 500 องศาเซลเซียส) จะเกิดลิกนินโมโนเมอร์ขึ้นจากปฏิกิริยาที่ 2 โดยที่อัตราการ
ให้ความร้อนสูงและความดันต่ำจะทำให้เกิดโมโนเมอร์ของลิกนินได้ดี



รูปที่ 2.6 การเกิดไฟโรไลซิสของลิกนิน (Antal, 1982)

ช่วงอุณหภูมิสูง (> 500 องศาเซลเซียส) แบ่งการเกิดปฏิกิริยาได้เป็น 2 พวกคือ
โมโนเมอร์ต่าง ๆ ที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ 2 จะเริ่มมีการแตกตัวในวัฏภาคไอและเกิดการไฟโรไลซิส
ตามปฏิกิริยาที่ 4 และ 5 การควบแน่นของวัฏภาคไอที่อุณหภูมิต่ำตามปฏิกิริยาที่ 4 จะได้
วัสดุทนไฟและสารที่ควบแน่นได้ขึ้น ในขณะที่การแตกกิ่ง (Cracking) ของวัฏภาคไอที่อุณหภูมิสูง
กว่าตามปฏิกิริยาที่ 5 จะได้พวกแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ มีเทน และไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ เมื่อถูก
ให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะเกิดปฏิกิริยาที่ 3 และ 6 และเมื่อเกิดการควบแน่นของสารที่เหลืออยู่
ในไอในภาวะอิมมัตวียังยวดจะเกิดชาร์ขึ้น ซึ่งการไฟโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงจะเกิด ปฏิกิริยาแตกตัว
ตามปฏิกิริยาที่ 3 และได้แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ในปริมาณที่สูง

2.1.3.2 ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ต่อการไฟโรไลซิส (สินีนานู รอดจิ้น, 2547)

การไฟโรไลซิสส่วนใหญ่จะสนใจถึงอัตราและปริมาณของสารระเหยที่ได้ การกระจายของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ รวมถึงภาวะในการทดลอง โดยตัวแปรทางเคมีที่สำคัญคือธาตุองค์ประกอบของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในชีวมวลที่มีสมบัติแตกต่างกันไป นอกจากนี้ตัวแปรพื้นฐานทางกายภาพที่สำคัญได้แก่ อุณหภูมิ เวลา อัตราการให้ความร้อน ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะมีผลกระทบต่อการไฟโรไลซิสดังจะอธิบายต่อไปนี้ (ชูศักดิ์ โทกะนุทรานนท์, 2536)

- องค์ประกอบของชีวมวล

ชีวมวลเป็นวัสดุซับซ้อนไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะมีโครงสร้างและองค์ประกอบแตกต่างกันไปตามส่วนต่าง ๆ และชนิดของพืชนั้น สารเหล่านี้แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติทางความร้อนและก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ต่างกันไป โดยที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียสจะมีการแตกตัวของพอลิแซคคาไรด์ที่สายเชื่อมกลูโคสิดิก (Glucosidic linkage) ทำให้ได้น้ำมันที่ประกอบด้วยอนุพันธ์ของแอนไฮโดรซูการ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และชาร์จำนวนเล็กน้อย ในขณะที่ลิกนินส่วนใหญ่จะควบแน่นเป็นชาร์และสารประกอบฟีนอลบางส่วน ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของชีวมวลจะเป็นสิ่งกีดขวางการใช้ประโยชน์ทางเคมี เนื่องจากสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแต่ละองค์ประกอบจะได้น้อย ซึ่งจะมีผลกระทบต่อปริมาณชาร์ และเชื้อเพลิงอื่น ๆ ที่ได้จากการไฟโรไลซิสโดยตรง

- อุณหภูมิในการไฟโรไลซิส

ช่วงอุณหภูมิของการไฟโรไลซิสจะมีผลกระทบต่อทั้งปริมาณ และองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้ โดยการไฟโรไลซิสแบ่งได้เป็น 3 ชั้นคือ ชั้นแรกที่อุณหภูมิระหว่าง 200 – 300 องศาเซลเซียส จะมีการปลดปล่อยสารระเหยเล็กน้อย และแก๊สที่ประกอบด้วยออกไซด์ของคาร์บอน และน้ำเป็นส่วนใหญ่ ชั้นที่สองอุณหภูมิระหว่าง 300 – 500 องศาเซลเซียส จะมีการสลายตัวที่ปลดปล่อยสารระเหยออกมาประมาณสามในสี่ของสารระเหยทั้งหมด ชั้นที่สาม อุณหภูมิระหว่าง 500 – 800 องศาเซลเซียส จะมีการไล่แก๊สออกอีกเป็นครั้งที่สอง พร้อมกับมีการเปลี่ยนแปลงของชาร์ รวมไปถึงการปลดปล่อยแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวกไฮโดรเจน

- อัตราการให้ความร้อน

ผลกระทบของอัตราการให้ความร้อนเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อปริมาณ และองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการไฟโรไลซิส แต่เดิมภาวะในการให้ความร้อนถูกแบ่งได้ด้วย

อัตราการเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียสต่อวินาที ซึ่งเป็นช่วงที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยออกอย่างรวดเร็ว ดังนั้นอัตราการให้ความร้อนต่ำจะถูกนิยามให้มีผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับหรือน้อยกว่าค่าที่กำหนด และโดยทั่ว ๆ ไปอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะมีผลต่างของอุณหภูมิมากกว่า 103 – 105 องศาเซลเซียสต่อวินาที การไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความร้อนต่ำจะได้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นชาร์ ส่วนการไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความร้อนสูง เซลลูโลสจะเปลี่ยนไปเป็นแก๊สที่มีสัดส่วนของพวกโอเลฟินสูงเป็นส่วนใหญ่ และได้ชาร์จำนวนน้อยมาก

2.1.3.3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส (ฉัตรชัย ธนศรีสุข, 2541)

เมื่อชีวมวลผ่านกระบวนการไพโรไลซิส จะมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการระเหยไประหว่างและสารระเหยรวมทั้งแก๊สต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นด้วย องค์ประกอบของสารอินทรีย์และอนินทรีย์เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งด้านกายภาพและเคมี ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นผลรวมของการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี และเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้มี 3 ประเภทคือ

- ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง

มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเรียกว่า ถ่านชาร์ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือผลิตสารเคมีอื่นได้อีก เช่น ถ่านกัมมันต์ แนฟทาลีน แอนทราซีน และสารประกอบไฮยาโนเจน แต่ส่วนใหญ่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงไร้ควัน เพื่อใช้ในบ้านเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือกลางได้ดี เช่น เป็นเชื้อเพลิงให้หม้อไอน้ำ การเผาอิฐ การอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โรงงานผลิตหินปูนและซีเมนต์ หรือใช้ในโรงงานกลึงเหล็กและทองแดง เพราะไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสภาพแวดล้อมจากกลิ่นหรือควันจากพวกสารระเหยและสารประกอบพวกไนโตรเจนและกำมะถัน

- ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

ประกอบด้วยน้ำและสารประกอบที่ละลายน้ำ อีกส่วนหนึ่งจะเป็นน้ำมันทาร์ องค์ประกอบของน้ำมันทาร์เป็นสารประกอบที่ซับซ้อนของไฮโดรคาร์บอน ที่มีโครงสร้างส่วนมากเป็นพวกวงแหวนแนฟทาลีนเชื่อมด้วยหมู่เอทีลีน โมเลกุลของน้ำมันทาร์มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนตั้งแต่ C5 – C6 ประกอบเป็นโครงสร้างของสารเคมีต่าง ๆ อาจมีมากกว่า 200 ชนิด แบ่งออกได้ตามอุณหภูมิที่ใช้ในการกลั่นเป็น 5 ส่วน คือ

- น้ำมันเบา(light oil) ช่วงอุณหภูมิ <200 องศาเซลเซียส ได้แก่ เบนซิน เบนโซลดิบ โทลูอิน เอทิล เบนซีน ไซลีน
- น้ำมันช่วงกลาง(middle oil) ช่วงอุณหภูมิ 200 – 250 องศาเซลเซียส ได้แก่ ฟีนอล ไพริดีน
- น้ำมันช่วงหนัก(heavy oil) ช่วงอุณหภูมิ 250 – 300 องศาเซลเซียส ได้แก่ ไดมัททิล แนพทาลิน
- น้ำมันแอนทาซีน(anthracence) ช่วงอุณหภูมิ 300 – 350 องศาเซลเซียส ได้แก่ ฟลูออรีน ฟีนแอนทีน
- พิตช์(pitch) ช่วงอุณหภูมิ >350 องศาเซลเซียส ได้แก่ น้ำมันหนักบางประเภทพวกไข (red wax) ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการกลั่น

- ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

เป็นของผสมระหว่างแก๊สอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ คาร์บอนมอนนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนและแอมโมเนีย ส่วนแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ มีเทน อีเทน เอทิลีน เป็นต้น โดยแก๊สส่วนใหญ่จะเป็นแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนนอกไซด์ และมีเทนซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้เพื่อให้ความร้อน หรือการผลิตไฟฟ้า แก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้คือ คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน ออกซิเจน และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน นอกจากนี้ยังมีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์และแอมโมเนียในปริมาณเล็กน้อย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.4 ประเภทของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (สุพัตรา ชีวธนาคุปต์, 2546)

เนื่องจากแบบของ gasifier (reactor) ถือเป็น characteristics ที่สำคัญของกระบวนการ ซึ่งมีอยู่ 3 แบบใหญ่ๆ คือ

- moving packed bed
- fluidized bed
- entrained flow ส่วนแบบ molten media อาจจัดอยู่ในพวก entrained flow

กากที่เหลือต่างกันด้วยช่วงอุณหภูมิที่ดำเนินการคือประมาณ 815-1925 องศาเซลเซียส และ gasifier แต่ละแบบจะทำงานที่ช่วงอุณหภูมิหนึ่งๆ สำหรับ gasifier ที่เถ้าไม่หลอมละลาย เรียกว่า dry bottom gasifier และแบบที่เถ้าหลอมละลายเรียกว่า slagging gasifier (ช่วงอุณหภูมิ 1200-1800 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของเถ้า)

2.1.4.1 Moving bed gasifiers (สุพัตรา ชีวธนาคุปต์, 2546)

หลักการทั่วๆ ไปเป็นลักษณะ gasifier ที่ป้อนถ่านหินจากด้านบนถ่านหินจะเคลื่อนลงด้านล่างด้วยแรงดึงดูดของโลกซึ่งจะถูกแก๊สไฟและเถ้าไหม้หมดไปกลายเป็นเถ้าในช่วงล่างสุด แต่เนื่องจากกระยะบนและล่างของเบดอยู่กับที่ จึงอาจเรียกว่า fixed bed gasifier ก็ได้ ขณะที่วัตถุเคลื่อนตัวลงมา สิ่งที่จะเกิดขึ้น คือ

- การ drying เมื่อสัมผัสกับแก๊สร้อนที่ลอยตัวขึ้น
- การ devolatilization สารระเหยในวัตถุดิบจะระเหยออกมาแตกตัวให้แก๊ส

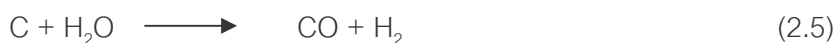
ไฮโดรเจน มีเทน และไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลหนักอื่น ๆ ลอยปะปนไปกับผลิตภัณฑ์แก๊ส

- เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนทั้งออกซิเดชันและรีดักชัน ส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาที่เหลือก็จะถูกปล่อยออกมาทางส่วนล่างของเบด

การดำเนินการใช้ถ่านหินขนาด 3 - 50 มม. ถ้าขนาดเล็กเกินไปอาจแตกออกและออกไปกับแก๊สขาออก หรือเมื่อเคลื่อนลงมาจะทำให้เบดอุดตัน และทำให้แก๊สไหลขึ้นมาไม่สะดวก

การเคลื่อนที่ของเบดค่อนข้างช้าเพียง 0.5 เมตรต่อชั่วโมง ในไอน้ำ/air gasifier ที่ความดันบรรยากาศ และ 5 เมตรต่อชั่วโมงในไอน้ำ/oxygen gasifier ที่ความดันบรรยากาศ

อุณหภูมิภายใน gasifier ขึ้นอยู่กับระดับของ oxidant ใน atmospheric gasifier อุณหภูมิจะไม่สูงกว่า ash fusion point สำหรับ steam/O₂ gasifier อาจเป็นแบบ dry bottom หรือ slagging ขึ้นอยู่กับปริมาณไอน้ำเทียบกับออกซิเจน ถ้าพ่นไอน้ำมากทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ 2.5 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนมีผลให้อุณหภูมิของเบดลดลง



เพื่อลดปริมาณการใช้ไอน้ำอาจยอมให้อุณหภูมิสูง และกำจัดเถ้าในรูปของ molten slag เป็นหลักการของ slagging gasifier การดำเนินการที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ 2.5 มากขึ้นด้วย (โดยไม่ต้องใช้ไอน้ำมากเกินไป)

ข้อดีของ moving bed คือ การมีการสัมผัสโดยตรงกับแก๊สร้อน ทำให้ได้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนสูงสุด และมีการสูญเสียความร้อนน้อย

ปัญหาที่พบคือการเฝิ้มและการเกาะติดกันเป็นก้อนของถ่านหิน ทำให้เกิดการอุดตันในเบดเป็นต้องมี preoxidative treatment และภายใน gasifier อาจต้องมีใบพัดกวนเพื่อให้ถ่านหินแตกเป็นก้อนไม่ติดกัน นอกจากนี้เป็นปัญหาที่ไม่สามารถใช้ถ่านหินละเอียดได้ ลักษณะการดำเนินการของ moving bed gasifiers และ ชนิดขององค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยใช้ bituminous coals โดยมีการป้อนไอน้ำ และออกซิเจนหรืออากาศ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 และ 2.4



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 แสดงลักษณะการดำเนินการของ moving bed gasifiers โดยใช้ bituminous coals มีการป้อนไอน้ำและออกซิเจน หรืออากาศ

Characteristic	steam/oxygen		steam/air	
	Lurgi Slagging	Lurgi Dry Ash	Woodhall Duckham/ Gas Integrate	Wellman-Galusha
Pressure, MPa	2.1	2.5	0.1	0.1
Temperature,* °C				
Combustion zone (max.)	~2000	980-1370	N/A	~1300
Gasifier zone	~1475	650-815	1200	N/A
Gas exit	350-450	370-540	650	590-650
Steam/Oxidant, kg/kg	1	4	0.11	0.12
Oxidant, kg/GJ gas	20	17	110	130
Raw coal throughput, t/(m ² .h)	5.9	2.9	0.37	0.44
Bed velocity, # m/h	8.2	4.0	0.51	0.61
Coal residence time, +h	0.4	1	23	3
Coal gas efficiency, %	90	80	77	75

ที่มา : Probststein and Hicks (1982)

* Dependent on coal

Assuming coal bed density of 720 kg/m³

+ Based on estimated coal bed heights N/A Not available.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 แสดงชนิดขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส*เป็นเปอร์เซ็นต์โดยโมล⁺จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของ bituminous coals ใน moving bed gasifier กับไอน้ำและออกซิเจนหรืออากาศ

Constituent	steam/oxygen		steam/air	
	Lurgi Slagging	Lurgi Dry Ash	Woodhall Duckham/ Gas Integrate	Wellman-Galusha
CO	61	18	28	29
CO ₂	3	30	5	3
H ₂	28	40	17	15
CH ₄	7	9	3	3
N ₂	1	1	47	50
Other	–	2	–	–
Total	100	100	100	100
GCV, MJ/m ³	13.8	11.3	6.5	6.3

ที่มา : Probststein and Hicks (1982)

* Dry basis after scrubbing and cooling

⁺ Identical with volume percent

2.1.4.2 Fluidization Bed Gasifier (อนรรฆรัตน์ เกตุคง, 2547)

ในสมัยก่อนสงครามโลกครั้งที่สอง เตาผลิตแก๊สนี้ใช้ในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และเดินเครื่องยนต์ Gas Engines ที่ใช้ในโรงงานการสังเคราะห์แอมโมเนีย เตาผลิตแก๊สนี้มีขนาดเล็ก ๆ จะถูกฟลูอิดไรซ์โดยความเร็วของแก๊สแบบมีทิศทาง โดยเมื่อเปรียบเทียบกับ Entrained Flow Gasifier พบว่ามีความร้อนและฝุ่นเล็ก ๆ ซึ่งสูญเสียไปกับแก๊สเชื้อเพลิงที่ออกจากเตา ผลเสียอันนี้ถูกชดเชยด้วยความสามารถในการเดินเครื่องได้อย่างต่อเนื่องที่ปริมาณการป้อนสูง สามารถใช้ได้กับชีวมวลที่มีความชื้นสูง มีความหนาแน่นต่ำการใช้เวลานานและปริมาณการป้อนของเตาสูงกว่า อีกทั้งการถ่ายโอนมวลสารและความร้อนดี ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ง่าย (Xiao และคณะ, 2007)

ระบบนี้สามารถทำงานได้ทั้งในภาวะที่แห้ง หรือเปียกชื้นได้ การฟลูอิดระบบแห้งสามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดอ่อนตัวของเถ้า อนุภาคของเศษถ่านและเถ้าจะถูกดึงออกจากด้านล่างโดยกรรมวิธีทางกล ในขณะที่บางส่วนถูกพัดติดมากับแก๊สเชื้อเพลิงทางด้านบน ทำให้ต้องมีการติดตั้งไซโคลน (Cyclone) เพื่อดักเก็บเถ้าไว้ การผลิตแก๊สที่มีเถ้าอยู่ และอุณหภูมิสูงกว่าจุดอ่อนตัวของเถ้า ทำให้เถ้ารวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นจะตกลงมายังส่วนล่างของเบดและถูกดึงออก

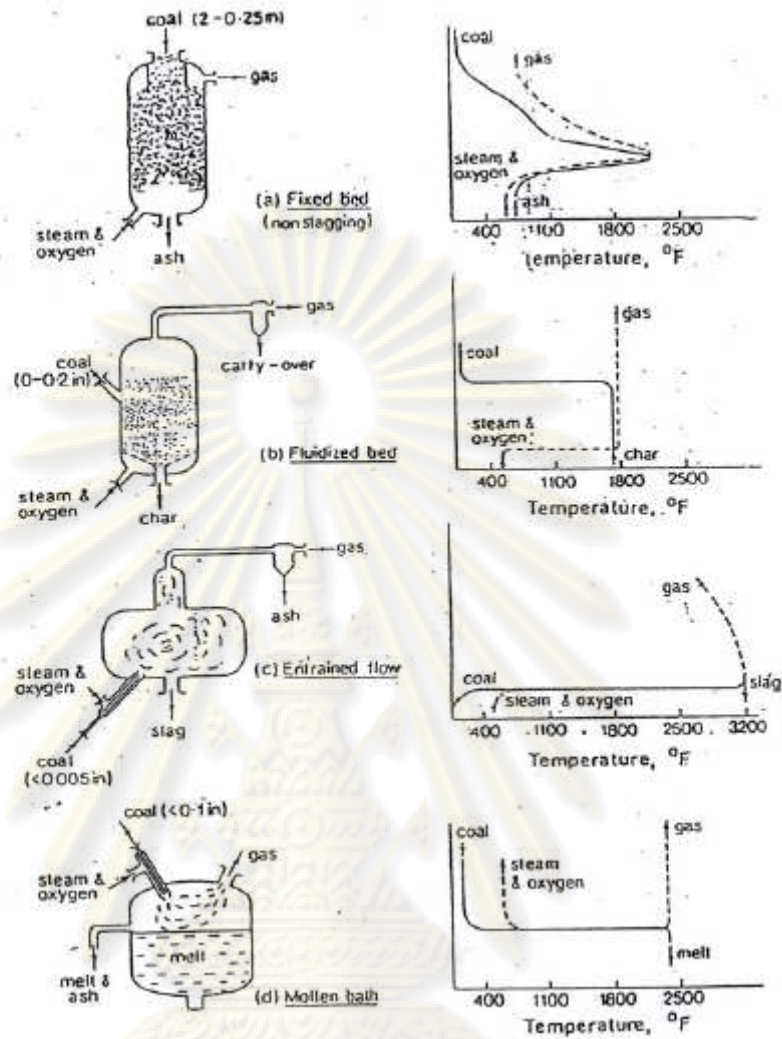
2.1.4.3 Entrained Flow Gasifier

เป็นการใช้ส่วนผสมของวัตถุดิบกับแก๊ส (อากาศ/ไอน้ำ หรือ ออกซิเจน/ไอน้ำ) เพื่อนำเอาพลังงานเฉียดเล็ก ๆ ของวัตถุดิบเข้าสู่เตาผลิตแก๊ส โดยที่ขนาดของวัตถุดิบ และความเร็วของแก๊สที่เข้าจะต้องพอดีกันเพื่อรักษาสภาพของการแขวนลอยไว้ การทดลองเรื่องนี้ได้รับการพัฒนามาจากกระบวนการเผาไหม้ของ Pulverized-Coal เถ้า และถ่าน (Char) จะออกจากเตาพร้อมกับแก๊สผลิตภัณฑ์ ซึ่งต้องมีการแยกออกอีกครั้งหนึ่ง อัตราการเกิดปฏิกิริยาของถ่านและอุณหภูมิสูงมากเมื่อเทียบกับเบดนิ่ง และเมื่ออุณหภูมิสูงเกินภาวะเกิด Slag แก๊สที่เค้นจะสำเร็จด้วยการผ่านเข้าเพียงครั้งเดียว ซึ่งในระบบแห้งมักจะมีการนำถ่านกลับ เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในปริมาณสูง (เบญจมาศ ปุยอ็อก, 2547)

2.1.4.4 Molten Salt Gasifier

สารหลอมเหลวสามารถใช้ในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เพื่อที่จะถ่ายโอนความร้อน และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของกระบวนการ สารที่เป็นสารหลอมเหลวนอกจากเกลือแล้วอาจจะเป็นเหล็ก หรือโลหะอื่นๆ รวมทั้งเถ้าของถ่านเอง การผลิตแก๊สที่ใช้ตัวกลางที่หลอมเหลวได้นั้นทำให้ผลิตแก๊สได้มากขึ้น เพราะการเร่งปฏิกิริยาของสารหลอมเหลว กำมะถัน จะอยู่ในส่วนที่หลอมเหลว ทำให้กรรมวิธีที่ใช้ในการทำความสะอาดแก๊สน้อยลง ผลเสียที่สำคัญ คือ เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากการใช้สารหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง โดยการผสมกระเบื้องอะลูมินา (Alumina) ที่มีความบริสุทธิ์สูงในเกลือที่ใช้ เป็นเพียงการแก้ปัญหาอย่างชั่วคราว (สุพัตรา ชีวธนาคุปต์, 2546)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.7 แสดงเตาผลิตแก๊ส 4 ประเภท (Probstein and Hicks, 1982)

(a) แบบเบดอยู่นิ่งกับที่

(b) แบบฟลูอิดไเซชัน

(c) แบบเอ็นทรานโฟลด์

(d) แบบมอลเทนซอลท์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.5 วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการแกซิฟิเคชัน (พรทิพย์ แก้ววานนท์ชัย, 2534)

2.1.5.1 ถ่านหิน

จัดว่าเป็นเชื้อเพลิงจากซากดึกดำบรรพ์ (Fossil Fuel) ชนิดหนึ่งเกิดจากการทับถมของซากพืชซากสัตว์ซึ่งอาจสะสมกันอยู่ชายฝั่งทะเล บริเวณน้ำกร่อย น้ำจืด หรือแผ่นดินที่ชื้น และ ในขณะเดียวกันเกิดการกักตัวของดินตะกอนลงทับถมกับซากพืช ทำให้เกิดการเน่าเปื่อยผุพังกลายเป็นถ่านฟีด ถ่านฟีดนี้เป็นต้นกำเนิดของถ่านหินการจำแนกถ่านอาจดูได้จากชนิดและศักดิ์

จากเชื้อเพลิงแข็งซึ่งมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจนสูงคือ ประมาณ 15 มาแปรรูปให้เป็นเชื้อเพลิงเหลว หรือแก๊สเชื้อเพลิงที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจนต่ำ ๆ โดยการทำปฏิกิริยา Hydrogenation ในกระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงเหลว หรือ ปฏิกิริยา Partial Oxidation ในกระบวนการแกซิฟิเคชัน หรือ ปฏิกิริยา Decomposition ในกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน และจะมีการกำจัดหรือลดสารประกอบไนโตรเจนกับซัลเฟอร์จากถ่านหินในรูปไฮโดรเจนซัลไฟด์ และแอมโมเนียไปด้วยพร้อม ๆ กัน

2.1.5.2 ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ไม่หมด และสามารถสร้างขึ้นใหม่ได้ (Renewable energy resources) หมายรวมทั้ง energy crops, ฟาร์ม, ภาคทางการเกษตร และ ของเสียชุมชนรวมทั้ง ของเสียจากสัตว์ ในแง่ที่ใช้อาหารเป็นพืช การใช้ประโยชน์ของสารชีวมวลซึ่งอาจใช้เป็นทั้งแหล่งอาหาร และแหล่งพลังงาน สารชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานเนื่องจากเป็นสารประกอบของไฮโดรเจน, คาร์บอน และออกซิเจน คุณสมบัติของชีวมวลที่แตกต่างจากถ่านหินคือมีความชื้น, ออกซิเจน, และไฮโดรเจน สูง แต่มีเถ้า, ซัลเฟอร์, และไนโตรเจน ต่ำ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว และแก๊สสูง ปริมาณชาร์ต่า (Lv และคณะ, 2007)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 ชีวมวล (เบญจมาศ ปุຍ้ออก, 2547)

ชีวมวลมีความสำคัญมากในแง่ที่เป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ไม่รู้หมด และสามารถสร้างขึ้นใหม่ได้ (Renewable energy resources) สารชีวมวลมีความหมายรวมทั้ง energy crops, ฟาร์ม, ทางการเกษตร และ ของเสียชุมชน รวมทั้ง ของเสียจากสัตว์ ในแง่ที่ใช้อาหารเป็นพืช การใช้ประโยชน์ของสารชีวมวลซึ่งอาจใช้เป็นทั้งแหล่งอาหาร และแหล่งพลังงาน สารชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานเนื่องจากเป็นสารประกอบของ H, C และ O โดยสร้างจาก CO₂ และน้ำด้วยกระบวนการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) เมื่อมีแสงแดด และ คลอโรฟิลล์

2.2.1 สมบัติของชีวมวล

สารชีวมวลมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ คาร์โบไฮเดรต และ ลิกนิน

2.2.1.1 คาร์โบไฮเดรต คือสารพวก แซคคาไรด์, เซลลูโลส, แป้ง และ เฮมิเซลลูโลส

- เซลลูโลส เป็นเส้นใย polysaccharide ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของผนังเซลล์ของพืช และมีอยู่มาก เซลลูโลสเป็นตัวที่ไม่ละลาย และไม่ค่อยทำปฏิกิริยาโดยเฉพาะไฮโดรไลซิส

- แป้ง เป็นเม็ดพอลิแซคคาไรด์ ถูกเก็บไว้ในส่วนต่าง ๆ ของพืช ได้แก่พวกเมล็ด, ราก, หัว และลำต้น ประกอบด้วย 10-20% α -amylose ซึ่งละลายน้ำ และ 80-90% amylopectin ซึ่งไม่ละลายน้ำ

- เฮมิเซลลูโลส เป็นพอลิแซคคาไรด์ที่พบอยู่ร่วมกับเซลลูโลส แตกต่างกันที่เป็น amorphous และมีมวลโมเลกุลต่ำกว่า จึงละลายได้ดีกว่าเซลลูโลส

2.2.1.2 ลิกนิน เป็นกลุ่มสำคัญที่มีในชีวมวลไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต เป็นองค์ประกอบพิเศษของผนังของ woody cell ทำหน้าที่เป็นกาวเชื่อมเกาะให้เกิดความแข็งแรงเชิงกล เป็น amorphous และละลายได้ดีกว่าเซลลูโลส สามารถแยกจากเนื้อไม้ได้โดยใช้ไอน้ำ ลิกนินต้านทานปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และไม่สามารถถูกย่อยโดยแบคทีเรียได้

ตารางที่ 2.5 แสดงสูตรโครงสร้างและน้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบคาร์โบไฮเดรต และลิกนิน

	Approximate Representation	Monomer Building Block	Molar Mass
Polysaccharides			
Cellulose	$(-C_6H_{10}O_5-)_n$	D-glucose	>100,000
Starch	$(-C_6H_{10}O_5-)_n$	D-glucose	35,000-90,000
Hemicellulose	-	Various sugars	10,000-35,000
Wood	$C_{36}H_{54}O_{23}$	Lignocellulose	5,000-10,000
Lignin	-	Hydroxyphenyl-propane (C_3H_7, C_6H_4, OH)	5,000-10,000

ที่มา : Probst and Hicks (1982)

2.2.2 หลักการแปรรูปชีวมวล

การแปรรูปสารชีวมวลให้เป็นแหล่งพลังงานกระทำได้โดยใช้กระบวนการแปรรูป หลักการด้วยกันคือ 2

2.2.2.1 กระบวนการแปรรูปชีวมวลทางชีวภาพ (Biochemical conversion) โดยวิธี Fermentation, Anaerobic digestion

2.2.2.2 กระบวนการแปรรูปชีวมวลทางความร้อน (Thermal conversion) โดยวิธี Pyrolysis Gasification และ combustion

กระบวนการแกซีฟิเคชันใช้หลักการและวิธีการคล้ายกับของถ่านหินที่ได้กล่าวถึงแล้วในแง่ของเชื้อเพลิงจะสนใจองค์ประกอบของ C,H,O,N,S และค่าความร้อน รวมทั้งร้อยละของเถ้า (%ash) ที่มีอยู่ในชีวมวลมากกว่า (Dogru และคณะ, 2002) ซึ่งแสดงในตารางที่ 2.6 ในเนื้อไม้สามารถ hydrolyse ส่วนที่เป็น hemicellulose ได้ทั้งหมด และส่วนที่เป็นเซลลูโลสได้เพียงหนึ่งในสี่ไปเป็นน้ำตาล แต่เซลลูโลสส่วนที่เหลือกับลิกนินจะไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งอาจใช้วิธีการสกัดลิกนินออกก่อนแล้วจึงย่อยส่วนของเซลลูโลส แต่วิธีนี้แพงและไม่นิยมใช้ ดังนั้นจึงไม่ค่อยใช้วิธีการแปรรูปชีวมวลทางชีวภาพกับไม้ แต่จะใช้วิธีทางความร้อนแทน (สินีนานู รอดจัน, 2547)

ตารางที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติของตัวอย่างชีวมวล

Mass %,dry	wood	grain	multipl Solid waste	animal waste (manure)
Carbon	50-53	45.0	47.60	3.51
Hydrogen	5.8-7.0	5.8	6.0	5.3
Nitrogen	0-0.3	2.4	1.20	2.52
Sulfur	0-0.1	0	0.3	0.4
Oxygen	38-44	42	32.9	38.7
Volatile matter	77.87	80	77	76.5
Fixed Carbon	13-21	-	11	0
Ash	0.1-2.0	4.0	12	23.5
H/C atom ratio	1.4-1.6	1.5	1.5	1.8
GCV,MJ/kg(dry)	19.8-21.0	16.8	19	13.4
Moisture,%	25.60	16	20	7-35

ที่มา : Probststein and Hicks (1982)

กระบวนการแปรรูปทางความร้อน รวมถึงกระบวนการ

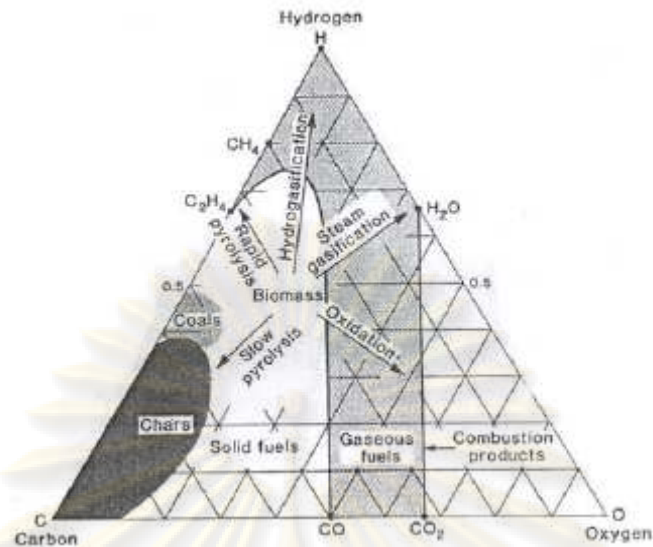
- Pyrolysis
- Gasification
- Combustion

สามารถแสดงกระบวนการเปลี่ยนแปลงได้ในกราฟสามเหลี่ยม

เปรียบเทียบกับ

รูปที่ 2.8 ของถ่านหิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงโดยใช้ความร้อนของชีวมวล (Probst and Hicks, 1982)

ชีวมวลเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยใช้ความร้อนกลายเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.8 โดยที่กระบวนการไพโรไลซิสเกิดที่อุณหภูมิมากกว่า หรือเท่ากับ 600 องศาเซลเซียส ขณะที่กระบวนการแกซิฟิเคชันใช้อุณหภูมิประมาณ 800 – 1100 องศาเซลเซียส และเกิดการเผาไหม้ที่อุณหภูมิประมาณ 1500 องศาเซลเซียส (สุพัตรา ชีวธนาคุปต์, 2546)

- Slow pyrolysis ให้ปริมาณถ่านชาร์ที่อยู่ที่มีมของคาร์บอนขณะที่ rapid hydrolysis ให้ของเหลว และแก๊สมากกว่า และ hydrolysis ให้ปริมาณผลได้แก๊สสูงมาก และให้ของเหลวคุณภาพดี
- กระบวนการแกซิฟิเคชันให้แก๊สที่มีค่าความร้อนสูงประกอบไปด้วย CO, CH₄ และ H₂ (Gañan และคณะ, 2005)
- Combustion ต้องการ O₂ ได้ผลิตภัณฑ์ CO₂, H₂O สำหรับชีวมวลกระบวนการและหลักการที่ใช้กับถ่านหินทั้งแกซิฟิเคชัน และไพโรไลซิสสามารถใช้กับชีวมวลคุณสมบัติของสารชีวมวลที่แตกต่างกับถ่านหินในแง่เชื้อเพลิง คือ ชีวมวลจะให้ปริมาณความชื้น ออกซิเจน และไฮโดรเจนสูง ส่วนปริมาณเถ้า ซัลเฟอร์ และ ไนโตรเจนมีปริมาณต่ำ นั่นคือทำให้ปริมาณผลได้ของแก๊สและของเหลวสูง ส่วนปริมาณผลได้ชาร์ต่ำแต่เนื่องจากมีปริมาณออกซิเจนสูงจึงต้องใช้ไฮโดรเจนมากในการเกิดน้ำที่อยู่ในเนื้อไม้ ดังนั้นจึงไม่ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อ

คาร์บอนสูงตามต้องการ แต่ข้อดีของชีวมวล คือ มีเปอร์เซ็นต์ซัลเฟอร์ต่ำและให้คาร์ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (Ryu และคณะ, 2006)

2.3 แก๊สสังเคราะห์ (Synthesis Gas หรือ Syngas) (วสิน กาญจนภู, 2545)

แก๊สสังเคราะห์ คือ แก๊สผสมระหว่างแก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen) และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide) ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีหลายอย่าง หรือในกระบวนการถลุงเหล็ก แก๊สสังเคราะห์สามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งในรูปของแก๊สผสม หรือแยกไปเป็นแก๊สไฮโดรเจน หรือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บริสุทธิ์ โดยการใช้ประโยชน์ในรูปของแก๊สผสมนั้นจะใช้ในกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล (Methanol) ไดเมทิลอีเธอร์ หรือใช้เป็นแก๊สรีดิวซ์ (Reducing Gas) ในการถลุงเหล็ก ส่วนในการแยกใช้จะใช้อย่างมากในกระบวนการกลั่นแยก การผลิตแอมโมเนีย และใช้เป็นวัตถุดิบในการทำสารเคมีหลายชนิด ดังจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

2.3.1 กระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์

แก๊สสังเคราะห์โดยทั่วไปแล้วจะผลิตจากไฮโดรคาร์บอน ดังเช่น แก๊สธรรมชาติ น้ำมัน ถ่านหิน และชีวมวลโดยวิธีการ

2.3.1.1 การรีฟอร์มแก๊สธรรมชาติหรือไฮโดรคาร์บอนเบาด้วยไอน้ำ หรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือทั้งไอน้ำ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

2.3.1.2 การออกซิไดซ์บางส่วนของน้ำมันหนัก (Partial oxidation of heavy oil)

2.3.1.3 การแกซิฟิเคชันถ่านหิน หรือ ถ่านโค้ก (Gasification of coal or coke)

วิธีการต่าง ๆ ข้างต้นจะให้สัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์แตกต่างกันไปซึ่งสามารถที่จะแสดงได้ดังตารางที่ 2.7

คู่มือวิทยานิพนธ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.7 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 2.7 จะเห็นได้ว่าแก๊สสังเคราะห์ที่ได้นั้น จะมีสัดส่วนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจนในสัดส่วนต่าง ๆ ขึ้นกับกระบวนการที่ใช้สังเคราะห์ระบบการผลิต

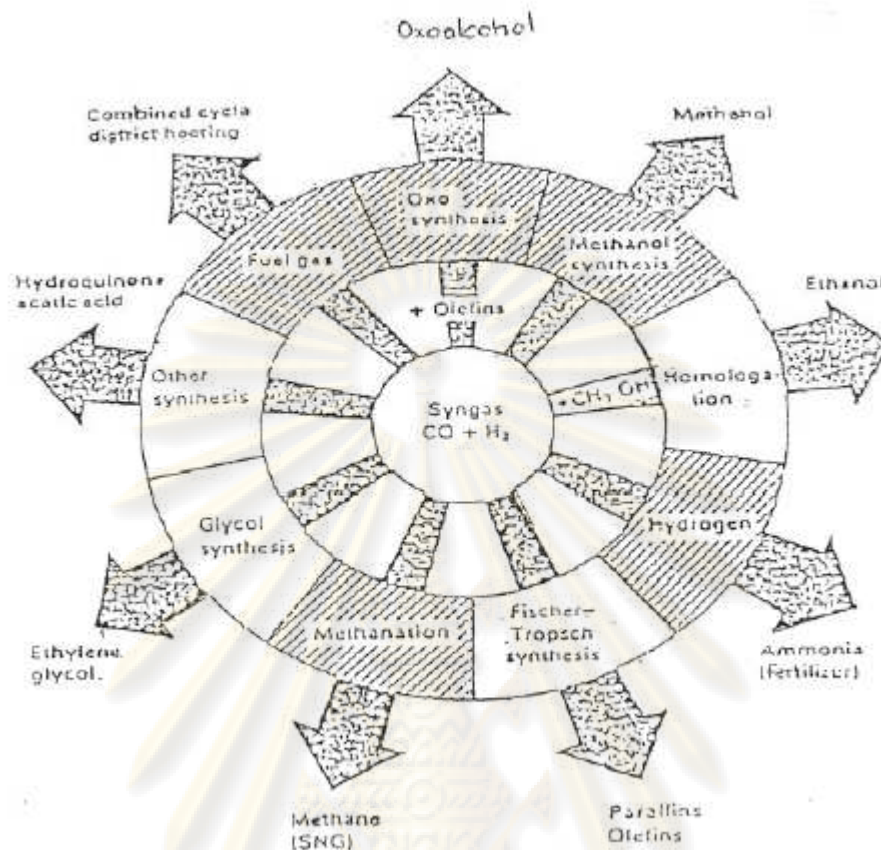
แก๊สเชื้อเพลิง

2.3.2 การนำแก๊สสังเคราะห์ไปใช้ประโยชน์

2.3.2.1 การใช้ประโยชน์ในรูปแก๊สสังเคราะห์ (วสิน กาญจนภู, 2545)

ผลิตภัณฑ์ขั้นต้น (Primary product) ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้แก๊สสังเคราะห์เป็นวัตถุดิบ แสดงไว้ดังรูปที่ 2.9

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.9 ผลิตภัณฑ์ขั้นต้นที่ได้จากการใช้แก๊สสังเคราะห์เป็นวัตถุดิบ (วสิน กาญจนภู, 2545)

แก๊สสังเคราะห์เป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตสารเคมีอินทรีย์อื่น ๆ ได้อย่างมากมายซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารพวกปิโตรเคมี ในตอนต้นของทศวรรษที่ 1920 นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันได้ค้นพบว่า แก๊สสังเคราะห์ สามารถเปลี่ยนไปเป็นเมทานอลได้เป็นอย่างดีโดยใช้ซิงก์โครเมียมออกไซด์ (Zinc-Chromium Oxide) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบแอลเคน (Alkanes) ได้ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโคบอลต์ที่มีเหล็กเป็นโปรโมเตอร์และตัวรองรับปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแก๊สสังเคราะห์ให้เป็นแอลเคนและแอลกอฮอล์เป็นที่รู้จักกันทั่วโลกคือปฏิกิริยาฟิชเชอร์-ทรอปส์ช (Fischer-Tropsch reaction) โดยจุดประสงค์ของปฏิกิริยานี้ เพื่อที่จะผลิตเชื้อเพลิงเหลว (Liquid Fuel) ซึ่งเป็นสารแอลเคนที่มีโมเลกุลสูง

สำหรับการผลิตเมทานอลนั้นนอกจากจะนำไปใช้ประโยชน์โดยตรงแล้ว ยังนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารปิโตรเคมีอื่น ๆ ได้อีกมากมาย เช่น ฟอรั่มัลดีไฮด์, กรดแอสติก, เมทิลคลอไรด์ เป็นต้น นอกเหนือจากนี้ยังใช้เป็นตัวเติม (Additive) ในแก๊สโซลีนในรูปของ Methyltertiary butyl ether (MTBE)

นอกจากนี้ แก๊สสังเคราะห์ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้า แร่เหล็กที่ขุดได้จากเหมืองในตอนแรกจะเป็นเหล็กออกไซด์ เมื่อสัมผัสกับแก๊สสังเคราะห์ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะทำหน้าที่เป็นแก๊สรีดิวซ์ (Reducing Gas) ซึ่งพร้อมจะถูกนำไปผ่านกระบวนการต่าง ๆ เพื่อให้ได้เป็นเหล็กกล้าตามต้องการ

2.3.2.2 แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

นอกจากการใช้ประโยชน์แก๊สสังเคราะห์ ในลักษณะรวมแล้วนั้น ยังสามารถแยกแต่ละแก๊สมาใช้ประโยชน์ ในการสังเคราะห์สารเคมีตัวอื่น ๆ ได้อีก จึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงประโยชน์ของแก๊สแต่ละชนิด

แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นแก๊สพิษที่ติดไฟได้ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น เกิดขึ้นได้จากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ สามารถที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย โดยสามารถที่จะแยกออกจากแก๊สสังเคราะห์ได้โดยวิธีการดูดซับด้วยทองแดงหลอมเหลว โดยมากแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะนำไปใช้ในปฏิกิริยาพื้นฐานที่สำคัญ 2 ปฏิกิริยาคือ คาร์บอนิเลชัน (Carbonylation) และไฮโดรฟอร์มมิเลชัน (Hydroformylation) สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรฟอร์มมิเลชันนั้น อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ปฏิกิริยาออกซิ (Oxo Reaction) (สุพัตรา ชิวธนาคุปต์, 2546)

ในกระบวนการโอเลฟิน คาร์บอนิเลชัน โดยทำปฏิกิริยากับน้ำ, แอลกอฮอล์, เอมีน และกรดคาร์บอกซิลิก โดยไซโลหะกลุ่ม VIII เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้สารประกอบตัวใหม่ที่สามารนำไปใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีได้ เช่น การผลิตกรดอะคริลิก (Acrylic acid) โดยใช้อะเซทิลีนทำปฏิกิริยากับน้ำ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้ $\text{Ni}(\text{CO})_4$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความดัน 30 บาร์ จะได้ปริมาณของกรดอะคริลิกมากกว่าร้อยละ 90 ดังปฏิกิริยา



ในการผลิตการผลิตรกรดโพรพิโอนิกจากเอทิลีน สามารถทำได้โดยกระบวนการไฮดรอกซีคาร์บอนิเลชัน (Hydroxycarbonylation) โดยใช้นิกเกิลโพรพิเนต (Nickel propionate) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 270 ถึง 320 องศาเซลเซียส ความดัน 200 ถึง 300 บาร์จะได้กรดโพรพิโนอิกมากกว่าร้อยละ 90 ดังปฏิกิริยา



นอกจากนี้ยังสามารถนำแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น อุตสาหกรรม การผลิตกรดฟอร์มิก และกรดโพรพิโนอิกด้วยปฏิกิริยาไฮโดรฟอร์มมิเลชัน หรือในอุตสาหกรรมการผลิตอัลดีไฮด์ต่าง ๆ

2.3.2.3 แก๊สไฮโดรเจน

กระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนมีอยู่มากมาย โดยใช้วัตถุดิบเริ่มต้นต่าง ๆ กัน ซึ่งขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์และปริมาณแก๊สที่ต้องการผลิต ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ด้วย เช่น ราคาและความเหมาะสม วิธีการผลิตแก๊สไฮโดรเจนอย่างง่ายคือ การแยกสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย เช่น การแยกน้ำเกลือด้วยไฟฟ้า (Electrolysis of an aqueous solution) นอกจากนี้ ยังสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ โดยการผ่านไอน้ำไปบนเหล็กสปองจ์ ที่อุณหภูมิประมาณ 650 องศาเซลเซียสและความดันบรรยากาศ และในปัจจุบันพบว่าแก๊สไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานนิวเคลียร์ ส่วนในอุตสาหกรรมที่มีการใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นนั้นจะนิยมใช้กระบวนการรีฟอร์มมิง (สุพัตรา ชีวธนาคุปต์, 2546) ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 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)

ในปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์แก๊สไฮโดรเจนในกระบวนการต่าง ๆ เช่น การสังเคราะห์แอมโมเนีย นิยมใช้กระบวนการฮาเบอร์ (Haber Process) โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ที่อุณหภูมิต่ำ และจากหลักของ เลอ ชาเตอลีเยร์ (Le Chatelier's Principal) พบว่าควรทำที่ความดันสูง

และอุณหภูมิต่ำ ๆ และยังมีการใช้โปรโมเตอร์เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_4) ร่วมกับออกไซด์ของโลหะอื่น ๆ ในการเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้มีค่าร้อยละการเปลี่ยนที่สูงขึ้น

การนำแก๊สไฮโดรเจนไปใช้ในอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม จะใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำมันและผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีอื่น ๆ โดยใช้กระบวนการไฮโดรซัลเฟอร์ไรซิง (Hydro-sulfurizing) และกระบวนการไฮโดรแครกกิง (Hydrocracking) และในปัจจุบันได้มีการนำแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิงไปใช้ เพื่อเป็นสารตั้งต้นในเซลล์เชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งต้องมีการกำจัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ให้มีปริมาณต่ำกว่า 10 ppm

2.4 ทาร์ (Tar) (อาภาณี เหลืองนฤมิตรชัย, 2538; พรทิพย์ แก้ววราพันธ์ชัย, 2534)

2.4.1 คำจำกัดความของทาร์ (Definition of Tar)

ทาร์ (Tar) หมายถึงผลิตภัณฑ์ที่เราไม่ต้องการที่เกิดจากแก๊สไพเคชั่นหรือเกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ลักษณะของทาร์เป็นของเหลวที่มีความหนืดสูง (High Viscous) และมีฤทธิ์กัดกร่อน (Corrosive) โดยทั่วไปมีสีน้ำตาลเข้มถึงดำ ประกอบไปด้วยสารไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก คำที่มีความหมายคล้าย ๆ กันได้แก่ Pyrolysis Oil, Pyrolytic Tar

2.4.2 สมบัติทางเคมีของทาร์

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ พบว่าปริมาณทาร์ที่เกิดจากการเผาไหม้ และองค์ประกอบของทาร์เกิดการเปลี่ยนแปลง จากการวิเคราะห์ทาร์ดิบ (Crude Tar) ที่ได้จากเตาผลิตแก๊สแล้วคำนวณองค์ประกอบของทาร์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการสูงขึ้น ปริมาณออกซิเจนจะลดลง และสัดส่วนของ H/C อะตอมก็ลดลงเช่นกัน ซึ่งแสดงถึงการผันกลับของ Highly Oxygenate Pyrolyzate ไปเป็น Less Oxygenate Pyrolyzate และมีความคงที่ ทางอุณหภูมิมากกว่า (Thermally Highly Aromatic Structure Stable) ซึ่งในที่สุดจะไม่มีออกซิเจน (Deoxygenate) และคงเหลือแต่โครงสร้างที่เป็นอะโรมาติก (Aromatic) ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบของทาร์กับอุณหภูมิแสดงดังตารางที่ 2.10

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.10 ส่วนประกอบทางเคมีของ Biomass Tars

Conventional Flash Pyrolysis (400-500°C)	Hi-Temperature Flash Pyrolysis (600-650°C)	Conventional Steam Gasification (700-800°C)	Hi-Temperature Steam Gasification (900-1,000°C)
Acids	Benzenes	Naphthalenes	Naphthalene
Aldehydes	Phenols	Acenaphthalenes	Acenaphthalene
Ketones	Catechols	Fluorenes	Phenanthrene
Furans	Naphthalenes	Phenanthrenes	Fluoranthene
Alcohols	Biphenyls	Benzaldehydes	Pyrene
Complex- Oxygenates	Phenanthrenes	Phenols	Acephenanthrylene
Phenols	Benzofurans	Naphthofurans	Benzanthracenes
Guaiacols	Benzaldehydes	Benzanthracenes	Benzopyrenes
Syringols			226 MW PAHs
Complex- Phenolics			276 MW PAHs

ที่มา : อาภาณี เหลืองนฤมิตรชัย (2538)

2.5 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

2.5.1 ปาล์มน้ำมัน (กรมวิชาการเกษตร, 2548)

2.5.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและเป็นพืชยืนต้น (perennial crop) ได้จำแนกปาล์มน้ำมันให้อยู่ในวงศ์ (family) Palmae หรือ Arecaceae (monocotyledon) ปาล์มน้ำมันเป็นพืชผสมข้าม ประเภทที่มีช่อดอกตัวผู้และตัวเมียอยู่บนต้นเดียวกัน แต่ช่วงเวลาการออกดอกจะไม่พร้อมกัน เป็นพืชดิพลอยด์มีจำนวนโครโมโซม $2n = 2x = 32$ และในสกุล (genus) *Elaeis* ประกอบด้วยปาล์มน้ำมัน 2 ชนิด (species) ได้แก่ ปาล์มน้ำมัน ชื่อวิทยาศาสตร์ *Elaeis guineensis* Jacq. ในปัจจุบันเป็นพันธุ์ปลูกเพื่อการค้า เดิมมีถิ่นกำเนิดในทวีปแอฟริกาตอนกลางและตะวันตก คำว่า *Elaeis* มีความหมายตรงกับคำ *elaion* ซึ่งแปลว่า น้ำมัน ส่วนคำว่า *guineensis* มีความหมายว่า แหล่งรวบรวมอยู่ที่ ประเทศ Guinea แอฟริกาตะวันตก ลักษณะ

ของปาล์มน้ำมัน *E. guineensis* ให้ผลผลิตทะลายสูง มีน้ำหนักผล เปลือกนอกต่อผลและผลผลิต น้ำมันสูง ส่วนอีก species หนึ่งคือ ปาล์มน้ำมัน ชื่อวิทยาศาสตร์ *Elaeis oleifera* มีถิ่นกำเนิดในทวีปอเมริกาใต้และอเมริกากลาง ลักษณะต้นเดี่ยวและต้านทานต่อโรคตาเน่า (Lethal bud rot) เปอร์เซ็นต์กรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง (unsaturated fatty acid) ค่าไอโอดีนสูง (iodine value) ประมาณ 77 - 78 เปอร์เซ็นต์ รวมทั้งมีวิตามินเอและวิตามินอีสูง แต่ให้ผลผลิตและปริมาณน้ำมันน้อยกว่าปาล์มน้ำมัน *E.guineensis* ปัจจุบันมีประโยชน์ในการเป็นเชื้อพันธุกรรมสำหรับปรับปรุงพันธุ์ โดยการผสมข้ามระหว่าง Species (Kelly-Yong และคณะ, 2007)

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่ให้ผลผลิตน้ำมันต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่าพืชน้ำมันทุกชนิด (640 - 800 กิโลกรัมน้ำมันต่อพื้นที่ปลูก 1 ไร่) และเป็นพืชน้ำมันที่มีการผลิตทั่วโลกเป็นอันดับสอง คือ ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ หรือคิดเป็นปริมาณผลิต 23.355 ล้านตัน ในปี 2544 รองจากน้ำมันถั่วเหลือง ซึ่งมีสัดส่วนประมาณ 28 เปอร์เซ็นต์ โดยมีประเทศมาเลเซียเป็นผู้ผลิตรายใหญ่ที่สุดของโลก (52 เปอร์เซ็นต์) และอินโดนีเซียเป็นอันดับสอง (32 เปอร์เซ็นต์) ส่วนประเทศไทยถึงแม้จะมีอันดับการผลิตอยู่อันดับที่ 4 ของโลก แต่มีสัดส่วนการผลิตเพียง 2 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น คือ มีพื้นที่ปลูกถึงปี 2547 ประมาณ 2.19 ล้านไร่ และมีผลผลิตปาล์มน้ำมัน 0.68 ล้านตัน และผลิตน้ำมันปาล์มดิบได้ 775,000 ตัน โดยใช้ในการอุปโภคทั้งหมด

ปาล์มน้ำมันที่เป็นพืชที่ให้น้ำมัน 2 ชนิด คือ น้ำมันปาล์มจากเปลือกผลปาล์ม ซึ่งมีปริมาณน้ำมันประมาณ 22 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักทะลาย น้ำมันปาล์มมีองค์ประกอบทางเคมีเกี่ยวข้องกับวิตามินที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ วิตามินอี และสารแคโรทีนอยด์ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการสร้างวิตามินเอ มีปริมาณสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับพืชน้ำมันชนิดอื่น ๆ (Hussain และคณะ, 2006)

น้ำมันปาล์มมีกรดไขมันอิ่มตัว (กรดลอริก, ไมริสติก, บัลมิติก และสเตียริก) รวมกันประมาณ 52 เปอร์เซ็นต์ และมีกรดไขมันไม่อิ่มตัว (โอเลอิก, ลิโนลิก และลิโนลิค) รวมกันประมาณ 48 เปอร์เซ็นต์ น้ำมันปาล์มและน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่สกัดได้จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันดิบยังไม่สามารถบริโภคได้ ต้องนำไปทำการกลั่นให้เป็นน้ำมันบริสุทธิ์ด้วยกระบวนการแยกยางเหนียว ลดกรด ฟอกสี และดูดกลิ่น ได้เป็นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ และมีผลพลอยได้คือ กรดไขมัน ซึ่งผลผลิตทั้งหมดนี้เรานำไปใช้ เพื่อการอุปโภคบริโภคได้อย่างมากมาย เช่น ทำเป็นน้ำมันปรุงอาหาร น้ำมันทอด ผลิตภัณฑ์นมข้น ไอศกรีม เนยเทียม เนยขาว ไขขนมปังกรอบ เนยโกโก้ ครีมเทียม คอฟฟี่เมท ไขมันทำขนมปัง สบู่ เทียนไข ผงซักฟอก ยาสีฟัน และใช้ในอุตสาหกรรมโอเลโอเคมีคัลอย่างกว้างขวาง นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเมทิลเอสเตอร์ นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซล หรือที่เรานิยมเรียกว่า ไบโอดีเซล นั่นเอง ซึ่งการผลิตเมทิลเอสเตอร์จะเป็นการนำเอาน้ำมันปาล์มมาทำปฏิกิริยากับเมทานอล โดยมีโซดาไฟ

เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เรียกว่าปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันได้เป็นเมทิลเอสเตอร์ และกลีเซอรอล เป็นผลพลอยได้

2.5.1.2 กายวิภาคของปาล์มน้ำมัน

- ราก

ปาล์มน้ำมันมีระบบรากฝอย รากอ่อนจะงอกออกจากเมล็ดเป็นอันดับแรก เมื่อต้นกล้าอายุได้ประมาณ 2 - 4 เดือน รากอ่อนจะหยุดเจริญเติบโต และหายไป ระบบรากจริงจะงอกจากส่วนฐานของลำต้น ต้นปาล์มที่เจริญเติบโตเต็มที่นั้น ประกอบด้วย รากแรกที่หยั่งลึกลงผิวดิน ช่วยยึดลำต้นบ้างเล็กน้อย และมีรากสอง สาม และสี่ที่แตกแขนงออกมาตามลำต้น ทอดไปตามแนวนอน จะเป็นระบบรากสานกันอย่างหนาแน่น อยู่บริเวณผิวดินระดับลึก 30 - 50 เซนติเมตร

- ลำต้น

ปาล์มน้ำมันมีลำต้นตั้งตรง มียอดเดี่ยวรูปกรวย ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 - 12 เซนติเมตร สูง 2.5 - 4 เซนติเมตรประกอบด้วยใบอ่อนและเนื้อเยื่อเจริญ ต้นปาล์มน้ำมันในระยะ 3 ปีแรกจะเจริญเติบโตทางด้านกว้าง หลังจากนั้นลำต้นจะยัดขึ้น ปล้องฐานโคนใบ และข้อจะปรากฏให้เห็นก็ต่อเมื่อปาล์มน้ำมันอายุมากแล้ว ทางใบจะติดอยู่กับลำต้นอย่างน้อย 12 ปี หรือมากกว่านั้น แล้วเริ่มหลุดจากใบล่างขึ้นไป ทางใบบนลำต้นมีการจัดเรียงตัวเวียนตามแกนลำต้น รอบละ 8 ทางใบ 2 ทิศทางคือเวียนซ้ายและเวียนขวา เส้นผ่าศูนย์กลางลำต้น ประมาณ 20 - 75 เซนติเมตร โดยทั่วไปลำต้นมีความสูงเพิ่มขึ้นประมาณ 35 - 60 เซนติเมตรต่อปี ขึ้นกับสภาพแวดล้อมและพันธุกรรม ปาล์มน้ำมันมีความสูงได้มากกว่า 30 เมตร และมีอายุยืนนานมากกว่า 100 ปี แต่การปลูกปาล์มน้ำมันเป็นการค้าไม่ควรมีความสูงเกิน 15-18 เมตร หรืออายุประมาณ 25 ปี

- ใบ

ใบของปาล์มน้ำมันเป็นใบประกอบรูปขนนก (pinnate) แต่ละใบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแกนกลางที่มีใบย่อยอยู่ 2 ข้าง และส่วนก้านทางใบ ซึ่งมีขนาดสั้นกว่าส่วนแรก และมีหนามสั้น ๆ อยู่ 2 ข้าง แต่ละทางมีใบย่อย 100 - 160 คู่ แต่ละใบย่อยยาว 100 - 120 เซนติเมตร กว้าง 4 - 6 เซนติเมตร

- ดอก

ปาล์มน้ำมัน เป็นพืชผสมข้าม มีดอกเพศเมียและดอกเพศผู้แยกช่อดอกภายในต้นเดียวกัน (monoecious) ที่ตำแหน่งของทางใบมีตาดอก 1 ตา อาจจะพัฒนาเป็นช่อดอกเพศผู้หรือเพศเมีย บางครั้งจะพบว่า มีช่อดอกกะเทยซึ่งมีทั้งดอกเพศผู้และเพศเมียอยู่รวมกัน (hermaphrodite) การบานของดอกปาล์มน้ำมันแต่ละดอกไม่พร้อมกัน การพัฒนาจากระยะตาดอกจนถึงดอกบานพร้อมที่จะรับการผสม (anthesis) ใช้เวลาประมาณ 33 - 34 เดือน การเปลี่ยนเพศของตาดอก (sex differentiation) จะเกิดขึ้นในช่วง 20 เดือนก่อนดอกบาน ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม ช่อดอกจะพัฒนาเป็นช่อดอกเพศเมียเป็นส่วนใหญ่ การผสมเกสรมีลมและแมลงเป็นพาหะ โดยเฉพาะด้วงวงงปาล์มน้ำมัน (*Elaeidobius kamerunicus*) เป็นแมลงที่ช่วงผสมเกสรที่สำคัญ หลังจากการผสมเกสร 5 - 6 เดือน ช่อดอกตัวเมียจะพัฒนาไปเป็นทะลายที่สุกแก่เต็มที่ สามารถเก็บเกี่ยวได้ ดอกตัวเมียมีกาบหุ้ม (bract) เจริญเป็นหนามยาว 1 อัน กาบรอง (bractiole) 2 แผ่นและมีกลีบดอก (perianth) 2 ชั้น ๆ ละ 3 กลีบ ห่อหุ้มรังไข่ 3 พูไว้ยอดเกสรตัวเมียมี 3 แฉก เมื่อดอกบานแฉกนี้จะโค้งเปิดออก วันแรกกลีบดอกเป็นสีขาว ตรงกลางมีต่อมผลิตของเหลวเหนียว วันต่อมาเปลี่ยนเป็นสีชมพู วันที่ 2-3 ของการบานของดอกจะเป็นระยะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผสมพันธุ์ปาล์มน้ำมัน วันที่สามเปลี่ยน เป็นสีน้ำตาลอ่อน และวันที่สี่เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลหลังจากผสมเกสรแล้ว ยอดเกสรตัวเมียจะเปลี่ยนเป็นสีดำและแข็ง ปาล์มน้ำมันที่โตเต็มที่แล้วช่อดอกตัวเมียมีช่อดอกย่อยประมาณ 110 ช่อ และมีดอกตัวเมียประมาณ 4,000 ดอก ดอกตัวผู้ที่เจริญเต็มที่ก่อนที่จะบานมีขนาด กว้าง 1.5 - 2 มิลลิเมตร ยาว 3 - 4 มิลลิเมตร ถูกห่อหุ้มด้วยกาบหุ้มรูปสามเหลี่ยม 1 แผ่น มีกลีบดอก 2 ชั้น ๆ ละ 3 กลีบ มีเกสรตัวผู้ 6 อัน รวมกันอยู่เป็นท่อตรงกลางดอก อับเกสรตัวผู้มี 2 พู ละของเกสรจะหลุดจากช่อดอกทั้งหมดภายในเวลา 3 วัน ถ้าอากาศชื้นจะใช้เวลามากขึ้น ละของเกสรจะมีชีวิตอยู่ได้ 7 วัน แต่หลังจากวันที่ 4 ความมีชีวิตจะต่ำลง เมื่อดอกเจริญเต็มที่ช่อดอกย่อยตัวผู้มีขนาดยาว 10 - 20 เซนติเมตร หนา 0.8 - 1.5 เซนติเมตร มีลักษณะคล้ายนิ้วมือ ต้นปาล์มน้ำมันที่โตเต็มที่ช่อดอกตัวผู้ 1 ดอกให้ละของเกสรมีน้ำหนักประมาณ 30 - 50 กรัม

- ทะลาย

ทะลายปาล์มน้ำมัน ประกอบด้วย ก้านทะลาย ช่อทะลายย่อย และผล ในแต่ละทะลายมีปริมาณผล 45 - 70 เปอร์เซ็นต์ ทะลายปาล์มน้ำมันเมื่อสุกแก่เต็มที่ มีน้ำหนักประมาณ 1 - 60 กิโลกรัม แปรไปตามอายุของปาล์มน้ำมันและปัจจัยสิ่งแวดล้อมแบบการปลูกเป็นการค้า ต้องการทะลายที่มีน้ำหนัก 10 - 25 กก. จำนวนทะลายต่อต้นก็มีความแตกต่างกัน โดยมีสหสัมพันธ์ทางลบกับน้ำหนักทะลาย

- ผล

ผลปาล์มน้ำมันไม่มีก้านผล (sessile drup) รูปร่างมีหลายแบบ ตั้งแต่รูปรียาวแหลมจนถึงรูปไข่หรือรูปยาวรี ความยาวผลอยู่ระหว่าง 2 - 5 เซนติเมตร น้ำหนักผลมีตั้งแต่ 3 กรัม จนถึงประมาณ 30 กรัม ประกอบด้วยผิวเปลือกนอก (exocarp) ชั้นเปลือกนอก (mesocarp) เป็นเนื้อเยื่อเส้นใย สีส้มแดงเมื่อสุก และมีน้ำมันอยู่ในชั้นนี้ ปาล์มน้ำมันที่ปลูกเป็นการค้า โดยทั่วไปพบว่ามีสีผลที่ผิวเปลือกนอก 3 ลักษณะ คือ เมื่อผลดิบเป็นสีเขียว จะเปลี่ยนเป็นสีส้มเมื่อสุก (light reddish-orange) เรียกลักษณะนี้ว่า virescens โดยทั่วไปพบน้อยกว่าแบบที่ 2 เรียกว่า nigrescens ผลดิบมีสีดำ ปลายผลมีสีข้างจะเปลี่ยนเป็นสีแดงเมื่อสุกแล้ว (deep reddish-orange) แบบที่ 3 เรียกว่า albescens มีสีผิวเปลือกเมื่อสุกเป็นสีเหลืองซีด โดยทั่วไปพบน้อยมาก ผลปาล์มน้ำมัน *Elaeis guineensis* Jacq. อาจปรากฏว่าต้นปาล์มน้ำมันที่มีลักษณะของผลแตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลจากยีนควบคุมความหนาของกะลา 1 คู่ (single gene) จำแนกลักษณะผล (fruit type) ได้ 3 แบบ ดังนี้

- **ดูรา (Dura)** มีกะลาหนา 2 - 8 มิลลิเมตร และไม่มีวงเส้นประสีดำอยู่รอบกะลา มีชั้นเปลือกนอกบาง 35 - 60 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักผล มียีนควบคุมเป็นลักษณะเด่น (dominant) Sh+Sh+

- **เทเนอรา (Tenera)** มีกะลาบาง ตั้งแต่ 0.5 - 4 มิลลิเมตร มีวงเส้นประสีดำอยู่รอบกะลา มีชั้นเปลือกนอกมาก 60-90 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก ผลลักษณะเทเนอรา (Sh+Sh-) เป็นพันธุ์ทาง (heterozygous) เกิดจากการผสมข้ามระหว่างลักษณะดูรากับพิลีเฟอรา

- **พิลีเฟอรา (Pisifera)** ยีนควบคุมลักษณะผลแบบนี้เป็นลักษณะด้อย (recessive, Sh-Sh-) ลักษณะผลไม่มีกะลาหรือมีกะลาบาง มีข้อเสีย คือช่อดอกตัวเมียมักเป็นหมัน (abortion) ทำให้ผลฝ่อลีบ ทะลายเล็กเนื่องจากผลไม่พัฒนา ผลผลิตทะลายต่ำมาก ไม่ใช้ปลูกเป็นการค้า การที่มีต้นพิลีเฟอราปรากฏในสวนปาล์มน้ำมันนั้นมาจากแหล่งผลิตที่มีการผลิตลูกผสมที่ไม่ได้มาตรฐาน ช่อดอกตัวเมียมี 2 ลักษณะ คือ female fertile และ female infertile มักพบว่าต้นพิลีเฟอราที่มีการพัฒนาของผลมาจากช่อดอกแบบ female infertile จะมีทะลายฝ่อและลำต้นใหญ่มาก ส่วนลักษณะ female fertile พบว่าอาจมีเนื้อในขนาดเล็กปรากฏในบางผล

- เมล็ด

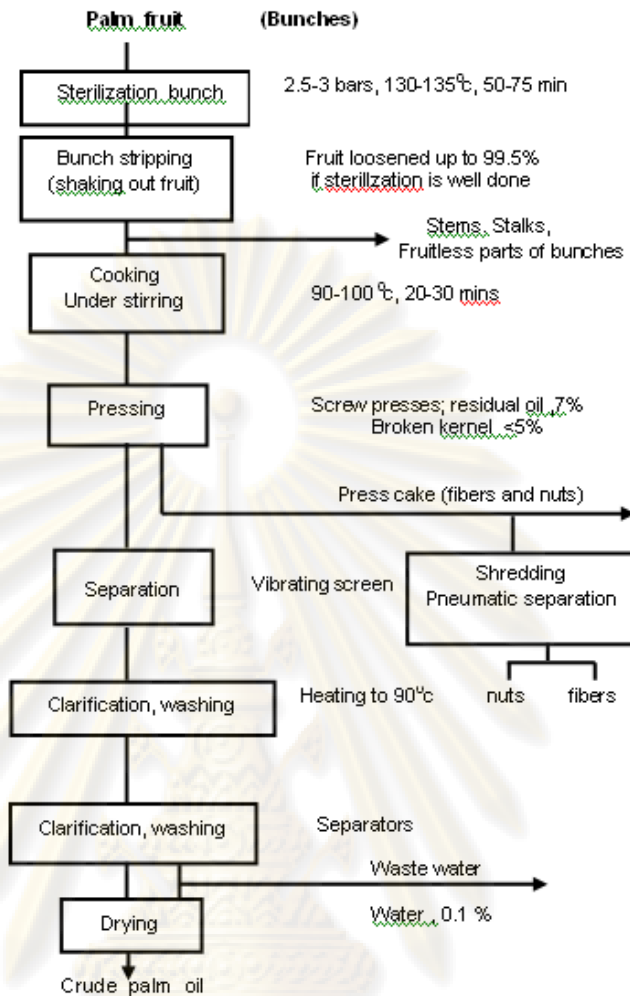
เมล็ดของปาล์มน้ำมันมีลักษณะแข็ง ประกอบด้วย กะลา (endocarp) และเนื้อใน ซึ่งเจริญมาจากไข่ 1 - 3 อัน บางครั้งพบ 4 อัน ขนาดของเมล็ดขึ้นอยู่กับความหนาของกะลา

และขนาดของเนื้อใน บนกะลาจะมีช่องสำหรับงอก (germ pore) 3 ช่อง ในกะลานั้นประกอบด้วยอาหารต้นอ่อน (endosperm) หรือเนื้อในสีเขียวอมเทาซึ่งมีน้ำมันสะสมอยู่ และมีเยื่อ (testa) สีน้ำตาลแก่หุ้มอยู่ โดยมีเส้นใยรองรับระหว่างเยื่อหุ้มกับกะลาอีกชั้นหนึ่ง ภายในเนื้อในตรงกันข้ามกับช่องสำหรับงอกมีต้นอ่อนฝังตัวอยู่ มีลักษณะตรง ยาวประมาณ 3 มิลลิเมตร โดยปกติเมล็ดปาล์มน้ำมันมีการพักตัวซึ่งสามารถทำลายการพักตัวโดยการอบด้วยความร้อน เมล็ดจะงอกเมื่อได้รับการกระตุ้นโดยอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสม ขบวนการงอกจะเกิดในระยะเวลา 3 - 4 วัน แต่ละเมล็ดจะใช้เวลาในการงอกแตกต่างกัน ต้นอ่อนในเมล็ดเริ่มมีการเจริญเติบโตขึ้น ยอดของใบเลี้ยงจะขยายใหญ่ขึ้นมีสีเขียว เรียกว่า จาว (haustorium) และยังคงฝังตัวอยู่ในเนื้อใน ทำหน้าที่ดูดอาหารมาเลี้ยงต้นอ่อน จาวจะผลิตเอนไซม์ออกมาย่อยอาหารต้นอ่อนให้เป็นของเหลวไปเลี้ยงต้นอ่อนเป็นเวลาประมาณ 3 เดือน จนกระทั่งต้นอ่อนสามารถสังเคราะห์แสงเองได้

2.5.1.2 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม ประกอบด้วย 2 กระบวนการหลัก คือ (วิภาดา ศรีสุนาครวั และ เอกสิทธิ์ เลิศสกุลทอง, 2548)

- กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม (Mill Processing) หลังการเก็บเกี่ยวทะเลาะลายปาล์มน้ำมัน จะมีการขนส่งผลผลิตเข้าสู่โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งมีกระบวนการสกัดน้ำมัน 2 แบบ คือ แบบมาตรฐาน (หีบน้ำมันแยก) และแบบหีบน้ำมันผสม โดยโรงงานแบบมาตรฐานเป็นโรงงานที่มีกำลังการผลิตสูง ประมาณ 30-80 ตัน/ชั่วโมง และน้ำมันที่ได้จัดเป็นน้ำมันเกรดเอ เนื่องจากมีการแยกชนิดของน้ำมันปาล์ม สำหรับโรงงานแบบหีบน้ำมันผสมเป็นโรงงานที่มีกำลังการผลิตค่อนข้างต่ำ และน้ำมันที่สกัดได้เป็นน้ำมันผสมระหว่างน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดในปาล์ม ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีการสกัดน้ำมันแบบที่นิยมใช้โดยทั่วไปมาตรฐาน (รูปที่ 2.10)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.10 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม (กรมวิชาการเกษตร, 2548)

โรงงานสกัดน้ำมันแบบมาตรฐาน กระบวนการผลิตจะมี 4 ขั้นตอน

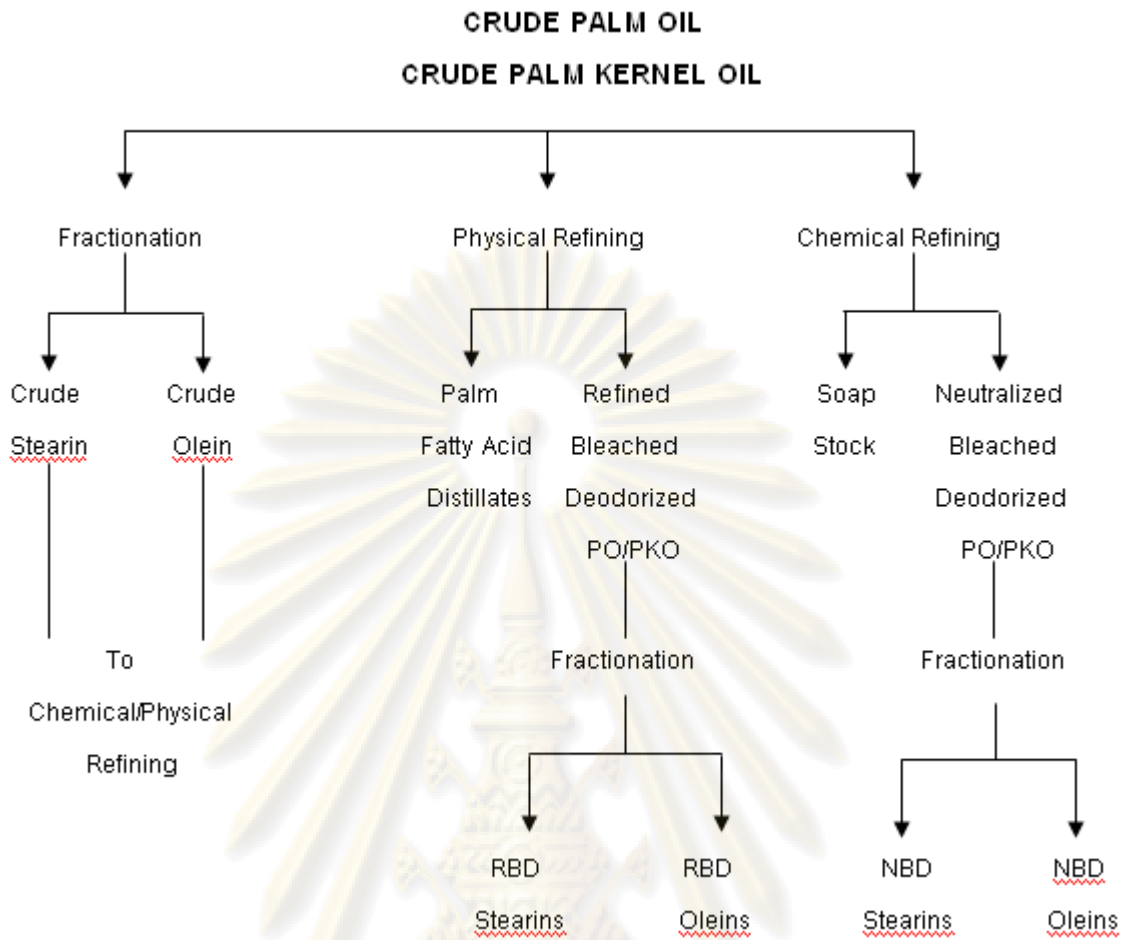
- การอบทะลายด้วยไอน้ำ (sterilization) อบที่อุณหภูมิ 130 - 135 องศาเซลเซียส ความดัน 2.5 - 3 bars นาน 50-75 นาที การอบทะลายจะช่วยหยุดปฏิกิริยาไลโปไลซิสที่ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระในผลปาล์ม และช่วยให้ผลปาล์มอ่อนนุ่มหลุดจากขั้วผลได้ง่าย
- การแยกผล (stripping) เป็นการส่งทะลายเข้าเครื่องแยกผลปาล์มออกจากทะลาย สำหรับทะลายเปล่าจะถูกแยกออกไป จากนั้นนำผลปาล์มไปย่อยด้วยเครื่องย่อยผลปาล์ม เพื่อให้ส่วนเปลือกแยกออกจากเมล็ด

- การสกัดน้ำมัน (oil extraction) นำส่วนเปลือกอบที่อุณหภูมิ 90 - 100 องศาเซลเซียส นาน 20 - 30 นาทีจากนั้นผ่านเข้าเครื่องหีบแบบเกลียวอัดคู่ จะได้น้ำมันปาล์มดิบ ที่มีองค์ประกอบคือ น้ำมันประมาณ 66 เปอร์เซ็นต์ น้ำ 24 เปอร์เซ็นต์ และของแข็ง 10 เปอร์เซ็นต์

- การทำความสะอาดน้ำมันปาล์มดิบ (clarification) นำน้ำมันปาล์มดิบที่ได้จากการสกัดส่งเข้าถังกรองเพื่อแยกน้ำและของแข็งออก จากนั้นนำเข้าเครื่องเหวี่ยงเพื่อทำความสะอาดอีกครั้ง และไล่น้ำออกเพื่อให้แห้ง ส่งเข้าถังเก็บน้ำมันสำหรับรอการกลั่นหรือจำหน่ายต่อไป น้ำมันปาล์มดิบที่ได้แยกเป็นสองส่วนคือ ส่วนบนมีลักษณะเป็นของเหลวสีส้มแดง (crude palm oil olein) ประมาณ 30 - 50 เปอร์เซ็นต์ ส่วนล่างมีลักษณะเป็นไขสีเหลืองส้ม (crude palm oil stearin) ประมาณ 50 - 70 เปอร์เซ็นต์ สำหรับกากผลปาล์มจะถูกนำมาแยกเส้นใยออกจากเมล็ด นำเมล็ดที่ได้มาอบแห้งและทำความสะอาด จากนั้นนำเข้าเครื่องกะเทาะเพื่อแยกกะลาออก และนำเมล็ดในมาอบแห้งให้มีความชื้นไม่เกิน 7 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นบรรจุกระสอบเพื่อรอจำหน่ายหรือหีบน้ำมันต่อไป น้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่ได้จากกระบวนการสกัด สามารถส่งเข้าสู่โรงงานเพื่อทำให้บริสุทธิ์ หรือนำไปแยกส่วน (Fractionation) ก่อนก็ได้ ซึ่งจะได้น้ำมันปาล์มที่มีสมบัติแตกต่างกันไป (รูปที่ 2.11)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.11 การแยกส่วนและการกลั่นบริสุทธิ์น้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันเมล็ดในปาล์ม (กรมวิชาการเกษตร, 2548)

โดยทั่วไปน้ำมันปาล์มดิบมีองค์ประกอบดังต่อไปนี้ (วิภาดา ศรีสุนาครวั และ เอกสิทธิ์ เลิศสกุลทอง, 2548) คือ

- Glycerides ประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์
- Fatty acids ประมาณ 3 – 5 เปอร์เซ็นต์
- Minor & Trace component ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งประกอบไปด้วย

ด้วย phytonutrient ที่มีคุณค่าทางอาหารสูง และสารอื่น ๆ เช่น corotene, tocopherols, tocotrienols, sterols, triterperpene alcohols, phospholipids, glycolipids, terpenic hydrocarbons, waxes และ impurities จากกระบวนการสกัดปาล์มน้ำมัน สามารถแบ่งน้ำมันปาล์มตามวัตถุประสงค์ที่ใช้สกัดเป็น 2 ชนิด คือ น้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันเมล็ดในปาล์ม ซึ่งมีองค์ประกอบกรดไขมันที่แตกต่างกัน โดยน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดใน

ปาล์ม มีองค์ประกอบของกรดไขมันอิ่มตัว:กรดไขมันไม่อิ่มตัวในสัดส่วน 50:50 และ 82:18 ตามลำดับ (ตารางที่ 2.11)

ตารางที่ 2.11 องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันเมล็ดในปาล์ม

กรดไขมัน	น้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil)	น้ำมันเมล็ดในปาล์ม (Palm Kernel Oil)
กรดไขมันอิ่มตัว	50%	82%
C 6:0 (caproic acid)	-	0.1-0.5
C 8:0 (carylic acid)	-	3.4-5.9
C10:0 (capric acid)	-	3.3-4.4
C12:0 (lauric acid)	0.1-0.4	46.3-51.1
C14:0 (myristic acid)	1.0-1.4	14.3-16.8
C16:0 (palmitic acid)	40.9-47.5	6.5-8.9
C18:0 (stearic acid)	3.8-4.8	1.6-2.6
C20:0 (arachidic acid)	0-0.8	-
กรดไขมันไม่อิ่มตัว	50%	18%
C16:1 (palmitoleic acid)	0-0.6	-
C18:1 (oleic acid)	36.4-41.2	13.2-16.4
C18:2 (linoleic acid)	9.2-11.6	2.2-3.4
C18:3 (linolenic acid)	0-0.5	-
Others	-	0 – 0.9

ที่มา : พิสมัย เจนวนิชปัญญากุล (2545)

กระบวนการกลั่นบริสุทธิ์น้ำมันปาล์ม (Refine Processing) เป็นกระบวนการทำให้น้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันเมล็ดในปาล์ม เป็นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ และน้ำมันเมล็ดในปาล์มบริสุทธิ์ พร้อมสำหรับการบริโภค ซึ่งกระบวนการกลั่น สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีการคือ

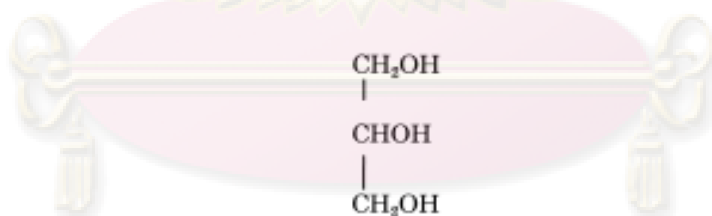
- วิธีทางกายภาพ (Physical or Steam refining) เป็นกระบวนการกำจัดกรดไขมันอิสระ โดยผ่านไอน้ำเข้าไปในน้ำมันร้อน แล้วกลั่นแยกกรดไขมันอิสระและสารที่ให้กลิ่นให้

ระเหยออกไป จึงเป็นการกำจัดกลิ่นและทำให้น้ำมันเป็นกลางไปพร้อมกัน การกลั่นน้ำมันปาล์มโดยวิธีทางกายภาพ ทำได้โดยเตรียมน้ำมันปาล์มดิบหรือน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่ไม่มีฟอสโฟลิปิดโดยกำจัดออกด้วยน้ำ แล้วทำปฏิกิริยาด้วยกรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 80 – 85 เปอร์เซ็นต์ ประมาณ 0.05 – 0.2 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำมันปาล์มดิบผสมกับน้ำมันที่อุณหภูมิ 90 – 100 องศาเซลเซียส นาน 15 – 30 นาที จากนั้นเติมผงฟอกสี (bleaching earth) ประมาณ 0.8 – 2.0 เปอร์เซ็นต์ของน้ำมันปาล์มดิบ และฟอกสีภายใต้สภาพสุญญากาศที่อุณหภูมิ 95 – 100 องศาเซลเซียส นาน 30 – 45 นาที จากนั้นนำน้ำมันปาล์มผ่านเข้าเครื่องกรอง จะได้น้ำมันที่ไม่มีฟอสโฟลิปิด และทำการกลั่นโดยใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิน้ำมัน 240 – 270 องศาเซลเซียส นาน 1 - 2 ชั่วโมง ภายใต้สภาพสุญญากาศ จะได้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (Refined Bleached and Deodorized Palm Oil, RBD PO) หรือน้ำมันเมล็ดในปาล์มบริสุทธิ์ (Refined Bleached and Deodorized Palm Kernel Oil, RBD PKO)

- วิธีทางเคมี (Chemical refining) เป็นกระบวนการกำจัดกรดไขมันอิสระโดยใช้สารเคมี ที่นิยมคือ ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโซเดียมคาร์บอเนต ทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระในน้ำมันให้เกิดเป็นสบู่ จากนั้นแยกสบู่ออกโดยวิธีการหมุนเหวี่ยง สำหรับความเข้มข้นของด่างที่ใช้มากน้อยแปรผันตามปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม การกลั่นน้ำมันปาล์มด้วยสารละลายต่าง เริ่มด้วยการให้ความร้อนแก่น้ำมันปาล์มดิบที่อุณหภูมิ 80 – 90 องศาเซลเซียสแล้วเติมกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 80 – 85 เปอร์เซ็นต์ ในปริมาณ 0.05 – 0.2 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นเติมสารละลายต่างซึ่งจะทำให้เกิดสบู่ แยกสบู่ออกด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง และล้างโซสบู่ด้วยน้ำ จากนั้นให้ความร้อนแก่น้ำมันเพื่อไล่น้ำให้ระเหยออก จากนั้นนำน้ำมันมาฟอกสีและกำจัดกลิ่นด้วยไอน้ำ จะได้น้ำมันปาล์มที่เรียกว่า Neutralized Bleached and Deodorized Palm Oil น้ำมันปาล์มที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์แล้ว แยกเป็นสองส่วนคือ ส่วนล่างมีลักษณะเป็นไขและส่วนบนเป็นน้ำมัน มีสีเหลืองอ่อนถึงเข้ม เนื่องจากน้ำมันที่ได้มีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพบางประการที่ไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด จึงได้มีการศึกษาการดัดแปรคุณสมบัติของน้ำมันปาล์ม โดยใช้กระบวนการต่าง ๆ เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายมากขึ้น ผลผลิตพลอยได้ที่สำคัญ จากการกลั่นบริสุทธิ์น้ำมันปาล์ม คือ palm fatty acid distillated (PFAD) ซึ่งนิยมใช้เป็นวัตถุดิบในการทำสบู่ อาหารสัตว์ ใช้เป็นสารตั้งต้นในการสกัดกรดไขมันชนิดต่าง ๆ หรือการสกัดวิตามินอีในอุตสาหกรรมออร์โธเคมิคอล

2.5.2 กลีเซอรอล (Glycerol) (สุกัญญา มากมี ,2547)

กลีเซอรอลและกลีเซอริน คือ ผลพลอยได้ของการผลิตไบโอดีเซล มีลักษณะใส ไม่มีสี ไม่มีพิษ หนืด ค่อนข้างคงตัวต่อการเกิดออกซิเดชัน ทำให้สามารถเก็บรักษาโดยไม่มีสี กลิ่น รสได้นาน กลีเซอรอลที่จะจำหน่ายต้องผ่านการทำให้เป็นกลาง ซึ่งกลีเซอรอลที่มาจากการผลิตไบโอดีเซลชีวภาพโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานับว่าเป็นกลีเซอรอลดิบ ซึ่งสามารถทำให้เป็นกลางโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก กรดฟอสฟอริกหรือโซเดียมคลอไรด์ สำหรับสีของกลีเซอรอลสามารถขจัดออกได้โดยการกรองผ่านถ่าน กลีเซอรอลสามารถละลายได้ดีทั้งในน้ำและแอลกอฮอล์ จึงเป็นตัวละลายที่ดีสำหรับองค์ประกอบในอุตสาหกรรมต่าง ๆ และเนื่องจากมีความหนืดสูง จึงมักใช้เป็น thickening agent หรือ bodying agent กลีเซอรอลเป็นสาร hygroscopic ดูดซับความชื้นจากอากาศได้ดี จึงนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความนุ่มและความเป็นครีม ในทางการค้ามีการใช้กลีเซอรอลเป็นสารรักษาความชุ่มชื้น เป็นตัวเพิ่มสภาพพลาสติกชนิดที่ช่วยเก็บรักษาความอ่อนนุ่มและความหนืด กลีเซอรอลถูกใช้ในผลิตภัณฑ์ในช่องปาก เช่น ยาสีฟัน เนื่องจากมีสมบัติในการเป็นดูดความชื้นและการระเหยต่ำ จึงถูกใช้เพื่อป้องกันไม่ให้ยาสีฟันแข็งในหลอด กลีเซอรอลส่วนใหญ่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องสำอางเป็นตัวทำละลายและสารดูดความชื้น โมโนกลีเซอไรด์ที่ได้จากกลีเซอรอลถูกใช้เป็นสารอิมัลชัน และสารเพิ่มความคงตัวในผลิตภัณฑ์ประเภทมาการีน น้ำสลัด และลูกกวาด ในผลิตภัณฑ์ยาสูบ บุหรี่ จะใช้กลีเซอรอลในการรักษาความชื้นให้กับใบยาสูบและใช้เป็นส่วนผสมในไส้กรองในอุตสาหกรรมยาใช้กลีเซอรอลเป็นสารให้ความหวาน และเป็นสารให้ความนุ่มในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางใช้เป็นสารอิมัลชัน



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของกลีเซอรอล (Kusdiana and Saka, 2000)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5.2.1 สมบัติของกลีเซอรอล

- สมบัติทางกายภาพ

กลีเซอรอลบริสุทธิ์เป็นของเหลว ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีพิษ และมีโครงสร้างที่คล้ายน้ำตาล จึงทำให้กลีเซอรอลมีรสหวาน และเนื่องจากโมเลกุลมีพันธะไฮโดรเจนจึงทำให้กลีเซอรอลเป็นของเหลวหนืด กลีเซอรอลมีจุดเดือด 290 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ กลีเซอรอลสามารถละลายได้ดีกับน้ำ เมทานอล เอทานอล และไอโซเมอร์ของโพรพานอล บิวทานอล และเพนทานอล รวมทั้ง ฟีนอล ไกลคอล โพรเพนไดออล เอมีน และสารประกอบที่เป็นเฮทเทอโรไซคลิกที่ประกอบด้วยอะตอมของไนโตรเจนในวงแหวน โดยที่กลีเซอรอลไม่สามารถละลายได้ในไฮโดรคาร์บอน รวมทั้งแอลกอฮอล์ที่มีโซ่ยาว น้ำมันพืชและสัตว์ และตัวทำละลายจำพวกเฮโลเจน เช่น คลอโรฟอร์ม ดังนั้นกลีเซอรอลจึงเป็นตัวทำละลายที่มีประโยชน์ต่อสารหลายชนิด ทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ซึ่งมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น

- สมบัติทางเคมี

กลีเซอรอลสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เหมือนกับแอลกอฮอล์ทั่ว ๆ ไป โดยที่หมู่ไฮดรอกซีด้านนอกจะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าหมู่ไฮดรอกซีตรงกลาง ภายใต้ภาวะที่เป็นกลางหรือด่าง กลีเซอรอลสามารถทนความร้อนได้ถึง 275 องศาเซลเซียส โดยไม่เกิดอะโครลีน ในทางตรงข้ามในภาวะกรดเล็กน้อยพบว่าที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส จะมีกลิ่นของอะโครลีน (อยู่ในช่วง 0.2 - 0.4 ppm) โดยที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส อะโครลีนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นปฏิกิริยาของกลีเซอรอลจึงควรทำในภาวะที่เป็นกลางหรือเป็นด่าง และที่อุณหภูมิห้องกลีเซอรอลจะดูดความชื้นอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้กลีเซอรอลยังถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายโดยที่อะตอมคาร์บอนด้านนอกจะถูกออกซิไดซ์เป็นหมู่คาร์บอกซิล และอะตอมคาร์บอนตรงกลางจะถูกออกซิไดซ์เป็นหมู่คาร์บอนิล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

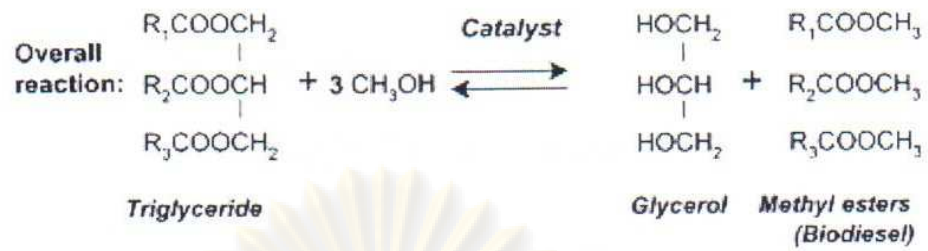
2.5.2.2 การผลิตกลีเซอรอล

การผลิตกลีเซอรอลอาจแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ กลีเซอรอลธรรมชาติและกลีเซอรอลสังเคราะห์ กลีเซอรอลธรรมชาติเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมจากกระบวนการเปลี่ยนไขมันและน้ำมันให้เป็นกรดไขมัน หรือกรดไขมันของเมทิลเอสเทอร์ ในขณะที่กลีเซอรอลสังเคราะห์จะได้รับการสังเคราะห์โพพีน นอกจากนี้ยังมีกระบวนการผลิตอื่น ๆ อีก เช่น การหมักน้ำตาล และปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของคาร์โบไฮเดรต เป็นต้น ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่สำคัญในทางอุตสาหกรรม

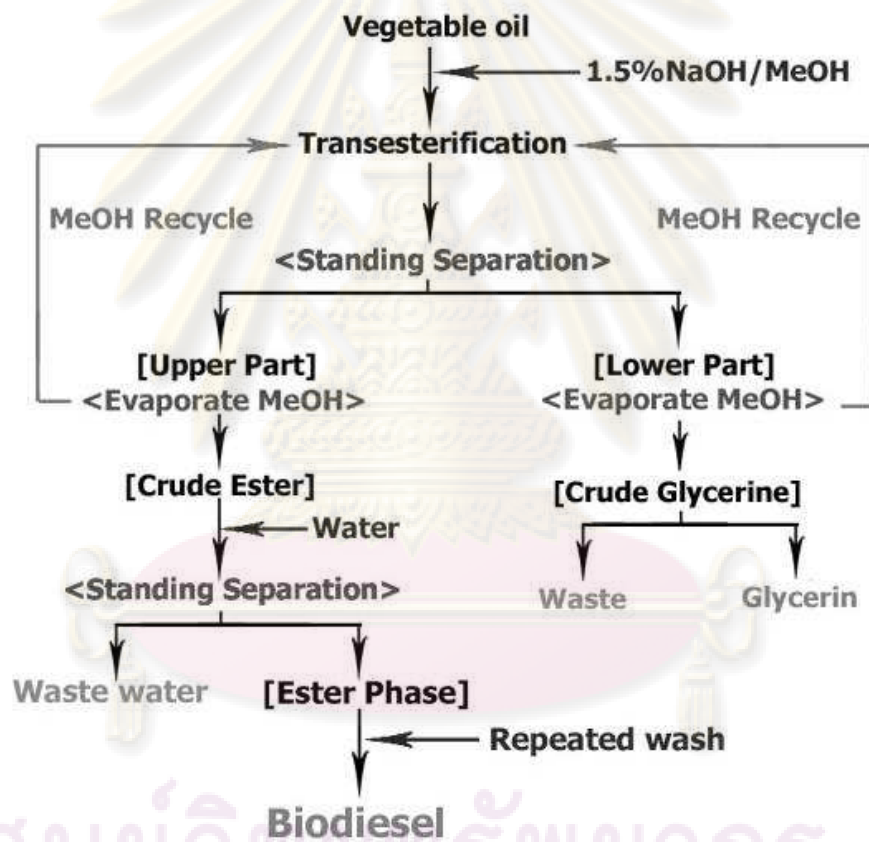
กลีเซอรอลธรรมชาติไม่พบในรูปแบบอิสระในไขมันและน้ำมันที่ได้จากพืชและสัตว์ แต่กลีเซอรอลธรรมชาติจะอยู่ในรูปของเอสเทอร์ของกรดไขมัน โดยที่หมู่ไฮดรอกซีทั้ง 3 หมู่ มักจะเกิดปฏิกิริยาเป็นเอสเทอร์ ปริมาณกลีเซอรอลธรรมชาติในไขมันและน้ำมันจะอยู่ระหว่าง 8 – 14 เปอร์เซ็นต์ การที่จะได้กลีเซอรอลธรรมชาติจากไขมันและน้ำมันที่ได้จากพืชและสัตว์นั้นจะต้องทำให้ไขมันและน้ำมันแตกตัว ซึ่งสามารถแบ่งปฏิกิริยาการแตกตัวของไขมันและน้ำมันเพื่อผลิตกลีเซอรอลจากธรรมชาติได้เป็น 3 วิธีหลัก ๆ คือ การแตกตัวด้วยความดันสูง (High-Pressure Splitting) ปฏิกิริยาการทำสบู่ (Saponification) และปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Tranesterification) หรือปฏิกิริยาที่ใช้ผลิตไบโอดีเซล (คิตา เบ็ญจพรกุลพงศ์, 2548)

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เป็นการนำน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์มาทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ โดยใช้กรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์หรือที่เรียกว่า ไบโอดีเซล (Biodiesel) กับกลีเซอรอลดิบ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยแอลกอฮอล์ที่นิยมใช้ได้แก่ เมทานอล หรือเอทานอล ซึ่งเอสเทอร์ที่ได้นั้นอาจเป็นเมทิลเอสเทอร์หรือเอทิลเอสเทอร์ ตามแต่แอลกอฮอล์ที่เลือกใช้ และได้กลีเซอรอลดิบเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมออกมา ซึ่งกลีเซอรอลดิบที่ได้มาจากกระบวนการนี้เป็นกลีเซอรอลที่ไม่บริสุทธิ์ เนื่องจากมีการปนเปื้อนจากสารชนิดอื่น ๆ เช่น แอลกอฮอล์หรือตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลือจากปฏิกิริยาข้างต้น จึงทำให้การนำกลีเซอรอลดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมาใช้ประโยชน์มีข้อจำกัดหลายด้าน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.13 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (ศิตา เบ็ญจพรกุลพงศ์, 2548)



รูปที่ 2.14 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

(ศิตา เบ็ญจพรกุลพงศ์, 2548)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สินีนาฏ รอดจัน (2547) ศึกษาปฏิกิริยาไพโรไลซิสของซังข้าวโพด โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ แก๊สเชื้อเพลิง ผลิตภัณฑ์ของเหลว และชาร์ ในงานวิจัยนี้ศึกษาการไพโรไลซิสของซังมวลภายใน เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์แบบหมุนเวียนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร สูง 165 เซนติเมตร โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ อุณหภูมิช่วง 650 - 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของซังข้าวโพดในเชื้อเพลิง ผสมช่วง 0 - 100 ร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ช่วง 1 - 5 และร้อยละของนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยา ช่วง 5 - 9 ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลอง พบว่าเมื่ออุณหภูมิ ร้อยละของซังข้าวโพดในเชื้อเพลิงผสม ร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ และร้อยละของนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยา เพิ่มขึ้น ร้อยละความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนแก๊สมีเทนมีค่าลดลงอย่างมาก โดยภาวะที่เหมาะสมในการทดลองคือ อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของซังข้าวโพดในเชื้อเพลิงผสมเท่ากับ 100 ร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เท่ากับ 5 และร้อยละของนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 9 โดยได้ ร้อยละความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากับ 52.0 และ 18.0 ตามลำดับ

สุพัตรา ชีวธนาคุปต์ (2546) ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ด้วย กระบวนการแกซิฟิเคชันจากชีวมวล ที่อุณหภูมิ 550 - 800 องศาเซลเซียส ในงานวิจัยทำการ ทดลองใช้ไม้ยูคาลิปตัส 15 กรัม โดยมีการป้อนไอน้ำที่อัตราการป้อนคือ 0.15 - 2.10 กรัม/ชั่วโมง/ กรัมของชีวมวล โดยศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ 1:1 โดย ประมาณ พบว่าภาวะที่เหมาะสม คือ อัตราการป้อนไอน้ำ 0.15 กรัม/ชั่วโมง/กรัมของชีวมวล และอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ได้แก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 1:1.612 และเมื่อใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ที่ อัตราการป้อนไอน้ำ 0.15 กรัม/ชั่วโมง/กรัมของชีวมวล ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส พบว่าแก๊สสังเคราะห์ที่ได้มีอัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 0.96

อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย (2538) ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของการผลิตแก๊สชีวมวลจาก กระบวนการแกซิฟิเคชัน โดยใช้เครื่องกำเนิดแก๊สแบบเบตติงโดยใช้แกลบ โดยศึกษาปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 650-900 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ และค่าอัตราการไหลของอากาศ 0.12 ถึง 0.32 ลูกบาศก์เมตร/นาที่ ผลการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สชีวมวลในเครื่องกำเนิดแก๊สแบบเบตติง คือ ที่อุณหภูมิของการทดลอง 850 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของอากาศ 0.2 ลูกบาศก์เมตร/นาที่ แก๊สชีวมวลที่ได้มีปริมาณร้อยละ โดยปริมาตรของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 8.46 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละโดยปริมาตร 5.12

แก๊สไฮโดรเจนร้อยละโดยปริมาตร 7.78 และแก๊สมีเทนร้อยละโดยปริมาตร 0.83 ค่าความร้อนของแก๊สชีวมวล 671.79 กิโลแคลอรี/ลูกบาศก์เมตร

Cao และคณะ (2006) ศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงและไม่มีน้ำมันดินจากชีวมวล โดยใช้ชี๊เลี้ยงในการทดลอง ทำการทดลองโดยแบ่งบริเวณในการเกิดปฏิกิริยาเป็นสองบริเวณทั้งบนและล่าง โดยให้มีการป้อนอากาศทั้งสองบริเวณเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดชั้นไพโรไลซิสเมื่อถ่านชาร์จากส่วนบนไปถึงชั้นล่างจะเกิดการทำให้ปฏิกิริยาได้อีก และในส่วนบนจะมีการฉีดอากาศเข้าไปเพิ่มเติมเพื่อเป็นการรักษาอุณหภูมิในส่วนนั้นไว้ น้ำมันดินที่อยู่ในแก๊สเชื้อเพลิงจะลอยขึ้นส่วนบนและเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิในขณะนั้นของส่วนบนของเตาปฏิกรณ์ ผลการศึกษาพบว่าที่ภาวะที่เหมาะสมที่สุด สามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงได้ประมาณ 3.0 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมของชีวมวล โดยแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อนประมาณ 5,000 กิโลจูล/ลูกบาศก์เมตร โดยสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ร้อยละ 9.27 แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 9.25 และแก๊สมีเทนร้อยละ 4.21 ตามลำดับ

Jiang และ Morey (1992) ศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากซังข้าวโพดโดยใช้เตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไชน์ โดยทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 920 – 1050 องศาเซลวิน พบว่าได้แก๊สผลิตภัณฑ์สูงสุด คือ แก๊สไฮโดรเจนร้อยละ 11.1 แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 15.3 แก๊สมีเทนร้อยละ 2.2 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 11.8 แก๊สเอทิลีนร้อยละ 0.9 แก๊สไนโตรเจนร้อยละ 55.4 และแก๊สออกซิเจนร้อยละ 3.4 โดยใช้อุณหภูมิ 1051 องศาเซลวิน

Khater และคณะ (1992) ศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากแกลบ โดยใช้เตาปฏิกรณ์แบบแก๊สไหลลงที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร และมีความสูง 140 เซนติเมตร ทำการทดลองป้อนแกลบในอัตรา 1.3 – 5.1 กิโลกรัม/ชั่วโมง และมีอัตราการป้อนอากาศ 2 – 4.44 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง โดยคิดเป็นร้อยละ 26 – 55 ของปริมาณอากาศที่ต้องใช้ในการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 570 – 820 องศาเซลเซียส โดยพบว่าแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม แต่แก๊สไฮโดรเจนจะมีปริมาณลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และที่อัตราการป้อนอากาศร้อยละ 55 ของปริมาณอากาศที่ต้องใช้ในการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ จะได้แก๊สผลิตภัณฑ์มากที่สุด โดยได้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 13.67 แก๊สไฮโดรเจนร้อยละ 5.13 และแก๊สมีเทนร้อยละ 2.42

Mansaray และคณะ (1999) ศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากแกลบโดยใช้เตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไชน์ โดยศึกษาผลของความเร็วในการฟลูอิดไชน์อุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่มีต่อแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยใช้ความเร็วในการฟลูอิดไชน์ 0.22, 0.28 และ 0.33 เมตร/วินาที และใช้ช่วงอุณหภูมิ 665 – 830 องศาเซลเซียสในการศึกษา จากผลการศึกษาพบว่า ที่ความเร็วในการฟลูอิดไชน์ 0.22 เมตร/วินาที เป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพที่ดีที่สุด โดยแก๊ส

เชื้อเพลิงมีค่าความร้อน 3.09 – 5.03 เมกะจูล/ลูกบาศก์เมตรโดยได้แก๊สไฮโดรเจนร้อยละ 4 ไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 5 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 15 แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 20 และแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 57

Valliyappan (2004) การผลิตแก๊สไฮโดรเจนหรือแก๊สสังเคราะห์จากกลีเซอรอลโดยใช้กระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชันแบบใช้น้ำ ใช้วัตถุดิบเป็นกลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เตาปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นเตาแบบเบดนิ่งที่แก๊สไหลลง โดยใช้อัตราของแก๊สพาอยู่ในช่วง 30 – 70 มิลลิลิตร/นาที่ ช่วงอุณหภูมิ 650 – 800 องศาเซลเซียส และใช้ตัวเบดต่าง ๆ กัน ทั้งทราย ควอตซ์ และซิลิกอนคาร์ไบด์ จากผลการทดลองในส่วนของกระบวนการแกซิฟิเคชันแบบใช้น้ำ โดยใช้อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของไอน้ำต่อกลีเซอรอล 0:100 และ 50:50 ใช้ควอตซ์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.21 - 0.35 มิลลิเมตร และซิลิกอนคาร์ไบด์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15 มิลลิเมตรเป็นเบด พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อกลีเซอรอลจะทำให้ได้แก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น และจะได้แก๊สผลิตภัณฑ์ปริมาตรสูงกว่าใช้กระบวนการไพโรไลซิสคือได้แก๊สผลิตภัณฑ์ 1.71 ลิตร/กรัมของกลีเซอรอล และที่อัตราส่วนของไอน้ำต่อกลีเซอรอล 50:50 กลีเซอรอลจะกลายเป็นแก๊สและถ่านชาร์อย่างสมบูรณ์ โดยได้แก๊สผลิตภัณฑ์ร้อยละ 94 และได้แก๊สไฮโดรเจนร้อยละโดยโมล 58

Yang และคณะ (2006) ทำการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของใยปาล์ม กะลาปาล์ม และทะลายปาล์ม โดยใช้เตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ทำการศึกษาระดับปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการคือ อุณหภูมิ residences time และตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้อุณหภูมิในการทดลองที่ 500 – 900 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสจะได้ผลิตภัณฑ์แก๊สสูงที่สุด โดยได้แก๊สไฮโดรเจน ร้อยละ 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/กิโลกรัมของชีวมวล) และผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ เช่น นิกเกิล อะลูมิเนียม ออกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนต โพแทสเซียมคาร์บอเนต พบว่า นิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีที่สุด โดยได้แก๊สไฮโดรเจน 29.78 กรัม/กิโลกรัมของชีวมวล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

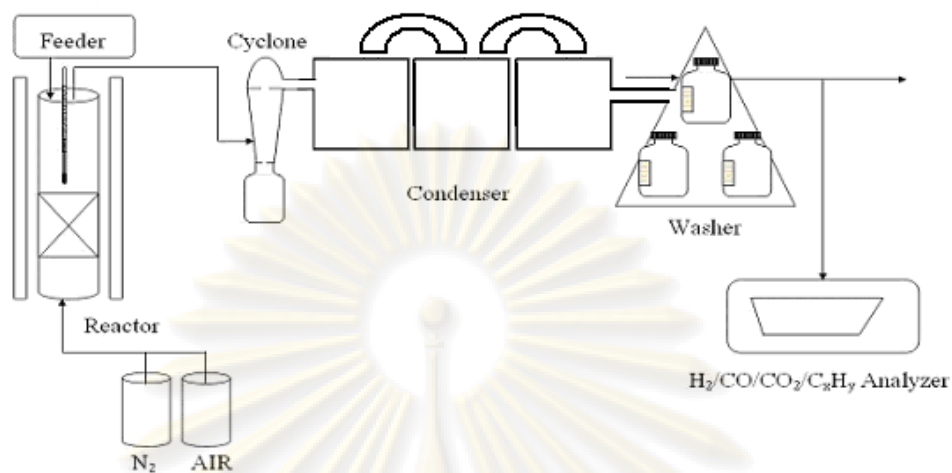
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

การทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงการทำปฏิกิริยาแกซีฟิเคชันจากชีวมวล คือ กากกะลาปาล์มผสมกลีเซอรอล ด้วยอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 100:0, 85:15 และ 70:30 โดยเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วย

1. เครื่องบดละเอียดความเร็วสูงจากบริษัทโจ้วฮวดหยู
2. ตะแกรงร่อนเบอร์ 20 mesh (Sieve)
3. เครื่องผสมยี่ห้อ DALTON
4. เครื่องปฏิกรณ์สำหรับการทำปฏิกิริยาแกซีฟิเคชัน (Reactor) ยี่ห้อ SUAN LUNG ENGINEERING
5. อุปกรณ์ป้อนวัตถุดิบเข้าเครื่องปฏิกรณ์ (Feeder)
6. อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนและอากาศ (Rotameter)
7. เตาเผาให้ความร้อนแบบท่อกลวงสำหรับเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการทำปฏิกิริยาแกซีฟิเคชันยี่ห้อ SUAN LUNG ENGINEERING
8. ชุดอุปกรณ์ดักจับฝุ่นของแข็งที่เกิดจากปฏิกิริยา (Cyclone)
9. อุปกรณ์สกัดน้ำมันดินออกจากผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ (Condenser)
10. อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊สที่เกิดขึ้น ยี่ห้อ testo รุ่น testo 425
11. เครื่องวิเคราะห์ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากปฏิกิริยา ยี่ห้อ MRU GmbH รุ่น SWG-200

แผนผังกระบวนการแกซีฟิเคชันโดยรวมแสดงดังรูปที่ 3.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 แผนผังกระบวนการแก๊สพีเคชั่นโดยรวม

3.1.1 เครื่องบดละเอียดความเร็วสูง

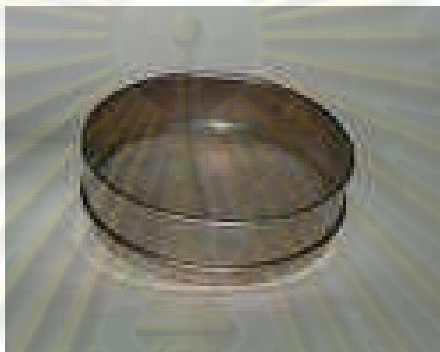
เครื่องบดละเอียดความเร็วสูง ใช้สำหรับบดกากกะลาปาล์มให้มีขนาดอนุภาคที่เหมาะสม
 สำหรับใช้ในการทดลอง โดยลักษณะของเครื่องบดละเอียดความเร็วสูงแสดงไว้ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องบดละเอียดความเร็วสูง

3.1.2 ตะแกรงร่อน

สำหรับตะแกรงร่อนเบอร์ 20 mesh แสดงไว้ในรูปที่ 3.3 ใช้สำหรับคัดกรองอนุภาคของกากกะลาปาล์มที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดละเอียดความเร็วสูงให้มีขนาดเล็กกว่า 0.85 mm. เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบที่เหมาะสมสำหรับการทดลอง



รูปที่ 3.3 ตะแกรงร่อนเบอร์ 20 mesh

3.1.3 เครื่องผสม

ใช้สำหรับผสมกากกะลาปาล์มและกลีเซอรอลเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาแกซีฟิเคชัน โดยลักษณะของเครื่องผสมแสดงไว้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องผสม

3.1.4 เครื่องปฏิกรณ์สำหรับการทำปฏิกิริยาแกซีฟิเคชัน

เครื่องปฏิกรณ์สำหรับปฏิกิริยาแกซีฟิเคชันสร้างขึ้นจากควอตซ์ โดยเครื่องปฏิกรณ์มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.1 เซนติเมตร สูง 112 เซนติเมตร โดยมีการติดตั้งตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อรองรับชีวมวลไว้ภายในบริเวณส่วนล่างของเครื่องปฏิกรณ์ โดยแก๊สพาจะเข้าทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ด้วยท่อส่ง และผลิตภัณฑ์แก๊สจะออกจากเครื่องปฏิกรณ์ทางด้านบน ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องปฏิกรณ์สำหรับการทำปฏิกิริยาแกซีฟิเคชัน

3.1.5 อุปกรณ์ป้อนวัตถุดิบเข้าเครื่องปฏิกรณ์

สำหรับอุปกรณ์ป้อนวัตถุดิบเข้าเครื่องปฏิกรณ์สร้างขึ้นมาจากท่อพีวีซีขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว ต่อเชื่อมกับสายยางซิลิโคนขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว โดยปลายของท่อซิลิโคนจะต่อกับกรวยพลาสติกเพื่อใช้เป็นที่ยอมรับวัตถุดิบเพื่อป้อนเข้าระบบ โดยลักษณะของอุปกรณ์ป้อนวัตถุดิบเข้าเครื่องปฏิกรณ์ แสดงไว้ดังรูปที่ 3.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ป้อนวัตถุติบเข้าเครื่องปฏิกรณ์

3.1.6 อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนและอากาศ

ในการควบคุมอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนและอากาศเข้าสู่ระบบจะใช้เครื่องวัดอัตราการไหล (Rotameter) เป็นตัวควบคุม ซึ่งลักษณะเครื่องวัดอัตราการไหลที่ใช้เป็นอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนและอากาศแสดงไว้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนและอากาศ

3.1.7 เตาเผาให้ความร้อนแบบท่อกลวงสำหรับเครื่องปฏิกรณ์

เตาเผาให้ความร้อนแบบท่อกลวงสำหรับเครื่องปฏิกรณ์สำหรับปฏิกิริยาแกซีฟิเคชันที่ใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.8 โดยเตาเผาให้ความร้อนจะทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดความยาวของเครื่องปฏิกรณ์ให้ได้ตามภาวะที่ต้องการ โดยจะแปรค่าจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนให้กับเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 3.8 เตาเผาให้ความร้อนแบบท่อกลวง

3.1.8 ชุดอุปกรณ์ดักจับฝุ่นของแข็งที่เกิดจากปฏิกิริยา

สำหรับฝุ่นของแข็งที่เกิดจากปฏิกิริยาจะถูกดักจับด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่าไซโคลน โดยด้านล่างของไซโคลนจะต่อกับขวดเก็บตัวอย่างฝุ่นของแข็งดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.9

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.9 ชุดอุปกรณ์ดักจับฝุ่นของแข็งที่เกิดจากปฏิกิริยา

3.1.9 อุปกรณ์สกัดน้ำมันทาร์ออกจากผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้

น้ำมันดินที่เกิดจากปฏิกิริยาจะถูกดักจับก่อนจะนำผลิตภัณฑ์แก๊สเข้าสู่เครื่องวิเคราะห์แก๊ส โดยจะใช้น้ำเป็นตัวดักจับน้ำมันทาร์ที่เกิดขึ้น สำหรับอุปกรณ์สกัดน้ำมันทาร์ออกจากผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 อุปกรณ์สกัดน้ำมันดินออกจากผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้

3.1.10 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊สที่เกิดขึ้น

อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊สทั้งหมดที่ออกจากระบบแสดงไว้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊สที่เกิดขึ้น

3.1.11 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากปฏิกิริยา

ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้จะทำการวิเคราะห์ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สยี่ห้อ MRU GmbH รุ่น SWG-200 ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.12 โดยเครื่องวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ใช้ในครั้งนี้ใช้เทคนิค NDIR ในการวิเคราะห์ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรคาร์บอน ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนจะใช้เทคนิค Gas chromatography โดยใช้ TCD เป็นดีเทคเตอร์

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.12 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากปฏิกิริยา

3.2 สารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้

1. แก๊สไนโตรเจน 99.99 % จากบริษัทไทยอินดัสเตรียลแก๊ส จำกัด
2. อากาศจากบริษัทไทยอินดัสเตรียลแก๊ส จำกัด
3. อะลูมินาเบดจากบริษัทเซอร์นิก อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด
4. ก๊าซเซอร์คอลจากบริษัท AI ENERGY
5. กากกะลาปาล์มจากบริษัท AI ENERGY

3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

3.3.1 อุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชัน โดยทำการศึกษาที่ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส

3.3.2 อัตราส่วนของกากกะลาปาล์มและก๊าซเซอร์คอล เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของกากกะลาปาล์มและก๊าซเซอร์คอลที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชัน โดยทำการศึกษาที่อัตราส่วนของกากกะลาปาล์ม:ก๊าซเซอร์คอล 100:0, 85:15 และ 70:30

3.3.3 อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง (Equivalent Ratio) เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชัน โดยทำการศึกษาที่อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0, 0.3 และ 0.6

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 คำนวณค่าพหุคูณและข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการแกซีฟิเคชัน และวัตถุดิบที่ใช้

3.4.2 ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผสมกากกะลาปาล์มกับกลีเซอรอลเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง โดยทำการผสมกลีเซอรอลและกากกะลาปาล์มที่ทำการบดและร่อนเพื่อคัดขนาดให้มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 0.850 มิลลิเมตร โดยผสมกากกะลาปาล์มต่อกลีเซอรอลในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 100:0 – 70:30 และศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของกากกะลาปาล์มผสมกลีเซอรอลที่มีความเหมาะสมในการทำการศึกษา

3.4.3 การวิเคราะห์สมบัติของกากกะลาปาล์มผสมกลีเซอรอล

3.4.3.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) นำกากกะลาปาล์มผสมกลีเซอรอลมาวิเคราะห์ปริมาณความชื้น สารระเหยได้ คาร์บอนคงตัว และเถ้า ด้วย Thermogravimetric analysis (TGA)

3.4.3.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ด้วยเครื่องมือ CHNS Analyser

3.4.3.3 การหาค่าความร้อนของกากกะลาปาล์มและกลีเซอรอล โดยใช้ Bomb calorimeter ตามวิธี ASTM D 240

3.4.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.4.1 ป้อนอากาศและแก๊สพาเข้าสู่ด้านล่างของเตาปฏิกรณ์ โดยให้อัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงเป็น 0 โดยในการศึกษาครั้งนี้ใช้อะลูมินาเบด

3.4.4.2 ตั้งอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ไว้ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ณ ความดันบรรยากาศ รอให้ได้อุณหภูมิตามที่กำหนด

3.4.4.3 ป้อนกากกะลาปาล์มผสมกลีเซอรอลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ โดยใช้อุปกรณ์ป้อนวัตถุดิบเข้าเครื่องปฏิกรณ์ครั้งละ 5 กรัม โดยทำการป้อนวัตถุดิบทุก ๆ 1 นาที โดยใช้กากกะลาปาล์มที่ผสมกับกลีเซอรอลในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 100:0

3.4.4.4 วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊ส จนกระทั่งปริมาณ ผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นมีค่าคงที่

3.4.4.5 วัดอัตราการไหลของแก๊สที่เกิดขึ้น โดยใช้อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊สที่เกิดขึ้น

3.4.4.6 ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 800 และ 900 องศาเซลเซียสตามลำดับ

3.4.4.7 ทำการทดลองซ้ำโดยใช้กากกะลาปาล์มที่ผสมกับกลีเซอรอลในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 85:15 และ 70:30

3.4.4.8 ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็น 0.3 และ 0.6

3.4.4.9 นำถ่านชาร์หรือกากของแข็งที่เหลือจากการเผาไหม้มาวิเคราะห์โดยการชั่งน้ำหนัก

3.4.5 วิเคราะห์ สรุปผลและเขียนวิทยานิพนธ์



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปฏิกิริยาการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแกซีฟิเคชันของกากกะลาปาล์มผสมกลีเซอรอล โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนของกากกะลาปาล์มและกลีเซอรอล และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊ส

4.1 การวิเคราะห์สมบัติของกากกะลาปาล์มและกลีเซอรอลดิบ

จากการศึกษาสมบัติทางเคมีของกากกะลาปาล์มผสมกลีเซอรอลดิบด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM E871, D1120 และ E872 และด้วย Thermogravimetric analysis (TGA) เพื่อหาความชื้น สารระเหยได้ คาร์บอนคงตัว และเถ้า และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1, 4.2 และ ตารางที่ 4.3 ตามลำดับ และการหาค่าความร้อนของกากกะลาปาล์มและกลีเซอรอลดิบโดยใช้เครื่อง Bomb calorimeter ได้ผลดังแสดงตามตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์กากกะลาปาล์มและกลีเซอรอลดิบแบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ด้วยวิธีมาตรฐาน

การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis)	วัตถุดิบ	
	กากกะลาปาล์ม	กลีเซอรอลดิบ
ความชื้น	12.01	13.56
สารระเหยได้	70.50	เกิดการลุกไหม้ ติดไฟ
คาร์บอนคงตัว	13.41	-
เถ้า	4.07	2.43

จากผลการวิเคราะห์กากกะลาปาล์มและกลีเซอรอลดิบแบบประมาณโดยวิธีมาตรฐาน พบว่าไม่สามารถทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าสารระเหยได้และคาร์บอนคงตัวของกลีเซอรอลดิบได้ เนื่องจากเกิดการลุกไหม้ติดไฟ จึงต้องทำการวิเคราะห์กากกะลาปาล์มและกลีเซอรอลดิบแบบประมาณด้วย Thermogravimetric analysis (TGA) แทนวิธีมาตรฐาน

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์กากกะลาปาล์มผสมกลีเซอรอลดิบแบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ด้วย Thermogravimetric analysis (TGA)

การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis)	อัตราส่วนกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล		
	100:0	85:15	70:30
ความชื้น	11.95	12.22	12.48
สารระเหยได้	62.54	65.56	68.58
คาร์บอนคงตัว	18.73	16.93	15.12
เถ้า	6.78	5.30	3.82

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุโดยเครื่อง CHNS Elemental Analyzer (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)	กากกะลาปาล์ม	กลีเซอรอลดิบ
Carbon	44.90	36.40
Hydrogen	5.51	8.76
Nitrogen	0.00	0.00
Sulfur	0.046	0.666
Oxygen (by difference)	49.54	54.17

จากผลการวิเคราะห์แบบประมาณ พบว่ากากกะลาปาล์มมีองค์ประกอบในส่วนของความชื้น สารระเหยได้ และคาร์บอนคงตัวอยู่ถึงร้อยละ 93.22 ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้สามารถสลายตัวเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สได้ ในส่วนของกากกะลาปาล์มผสมกลีเซอรอลดิบ ในอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลดิบ เท่ากับ 70:30 พบว่ามีความชื้น สารระเหยได้ และคาร์บอนคงตัวอยู่ร้อยละ 96.18 ซึ่งจากผลการวิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นได้ว่ากากกะลาปาล์มผสมกลีเซอรอลดิบเป็นวัตถุดิบที่มีความเหมาะสมที่จะใช้ในกระบวนการแกซีฟิเคชัน

และจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ พบว่ากากกะลาปาล์มมีค่าคาร์บอนอยู่ร้อยละ 44.90 ไฮโดรเจนร้อยละ 5.51 ซัลเฟอร์ร้อยละ 0.046 และออกซิเจนร้อยละ 49.54 โดยไม่มีไนโตรเจน ในส่วนของกลีเซอรอลดิบมีคาร์บอนอยู่ร้อยละ 36.40 ไฮโดรเจนร้อยละ 8.76 และออกซิเจนร้อยละ 54.17 โดยไม่มีไนโตรเจนและซัลเฟอร์ นั้นแสดงให้เห็นว่ากากกะลาปาล์มและกลีเซอรอลดิบมีความเหมาะสมในการใช้ผลิตแก๊สสังเคราะห์ เนื่องจากกากกะลาปาล์มและกลีเซอรอลดิบมี

คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนประกอบ ดังนั้นจึงสามารถให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนประกอบได้

ตารางที่ 4.4 ผลการหาค่าความร้อนสูงโดยใช้เครื่อง Bomb calorimeter

	ค่าความร้อนสูง (MJ/kg) (Higher heating value)
กากกะลาปาล์ม	21.20
กลีเซอรอลดิบ	20.80

จากผลการหาค่าความร้อนที่ได้พบว่ากากกะลาปาล์มและกลีเซอรอลดิบมีค่าความร้อนสูง ทำให้กากกะลาปาล์มและกลีเซอรอลมีความเหมาะสมในการนำมาใช้ผลิตเชื้อเพลิงแก๊สที่มีค่าความร้อนสูง สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ได้

โดยค่าความร้อนสูงที่ได้นี้เป็นค่าความร้อนของชีวมวลที่ไม่ได้คำนวณค่าความร้อนแฝงในการเป็นไอของน้ำไว้ด้วย ซึ่งสามารถแปลงค่าความร้อนสูงเป็นค่าความร้อนต่ำที่มีการคำนวณค่าความร้อนแฝงในการเป็นไอของน้ำไว้ด้วย โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\text{Higher heating value (MJ/kg)} = \text{Lower heating value} + 23.95 (9H+M) \quad (4.1)$$

โดยที่ H คือ ค่าร้อยละของไฮโดรเจนในชีวมวล M คือ ค่าร้อยละของความชื้นในชีวมวล

จากสมการจึงสามารถคำนวณหาค่าความร้อนต่ำของกากกะลาปาล์มและกลีเซอรอลได้ ดังนี้

ตารางที่ 4.5 ผลการหาค่าความร้อนต่ำจากการคำนวณ

	ค่าความร้อนต่ำ (MJ/kg) (Lower heating value)
กากกะลาปาล์ม	18.22
กลีเซอรอลดิบ	17.33

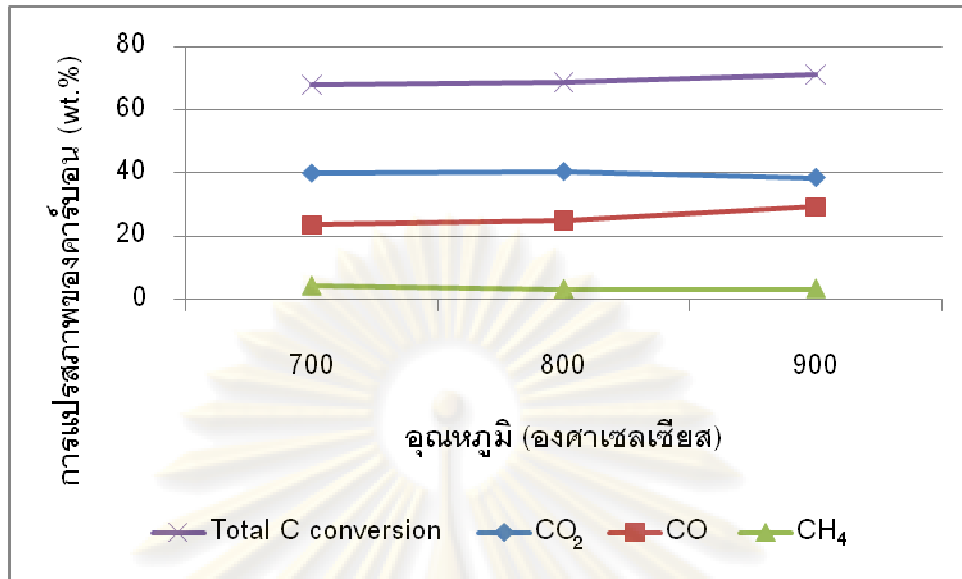
4.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระบวนการแกซีฟิเคชัน

4.2.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน

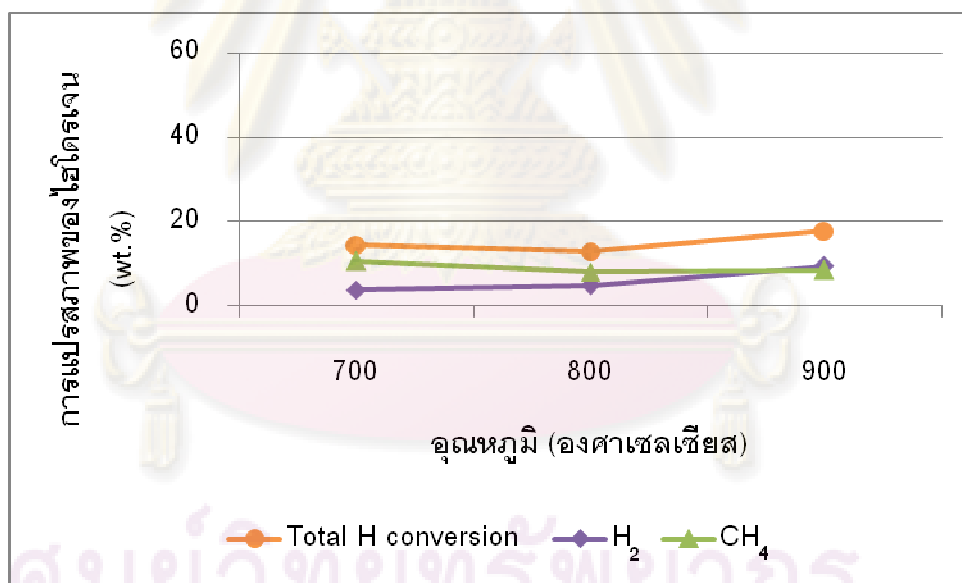
การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน ทำการทดลองที่ภาวะต่าง ๆ ดังนี้ คือ อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 100:0, 85:15 และ 70:30 และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเท่ากับ 0.3

โดยการทดลองนี้ทำการเปลี่ยนอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ 3 ค่า คือ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส และทำการคำนวณหาการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทน โดยใช้วิธีคำนวณดังแสดงในภาคผนวก ข ผลที่ได้เป็นดังแสดงในรูปที่ 4.1 - 4.6 ซึ่งในรูปจะแสดงให้เห็นถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน จากรูปเห็นได้ว่า ผลการทดลองมีแนวโน้มเดียวกัน ในทุก ๆ อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล โดยที่ อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 100:0 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 700 องศาเซลเซียส เป็น 900 องศาเซลเซียส พบว่าการแปรสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจาก 39.97% เป็น 35.05% ส่วน การแปรสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มจาก 24.48% เป็น 26.60% ส่วนการแปรสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊สมีเทนลดลงเล็กน้อยจาก 3.89% เป็น 3.11% โดยมีการแปรสภาพเป็นคาร์บอนโดยรวมของแก๊สทั้งสามชนิดเพิ่มขึ้นจาก 61.69% เป็น 64.75% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ผลดังแสดงในรูปที่ 4.1 ส่วนของการแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นแก๊สไฮโดรเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 3.84% เป็น 9.36% และแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นแก๊สมีเทนลดลงจาก 10.56% เป็น 8.44% โดยมีการแปรสภาพของไฮโดรเจนโดยรวมของแก๊สทั้งสองชนิดเพิ่มจาก 14.40% เป็น 17.80% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 700 องศาเซลเซียส เป็น 900 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



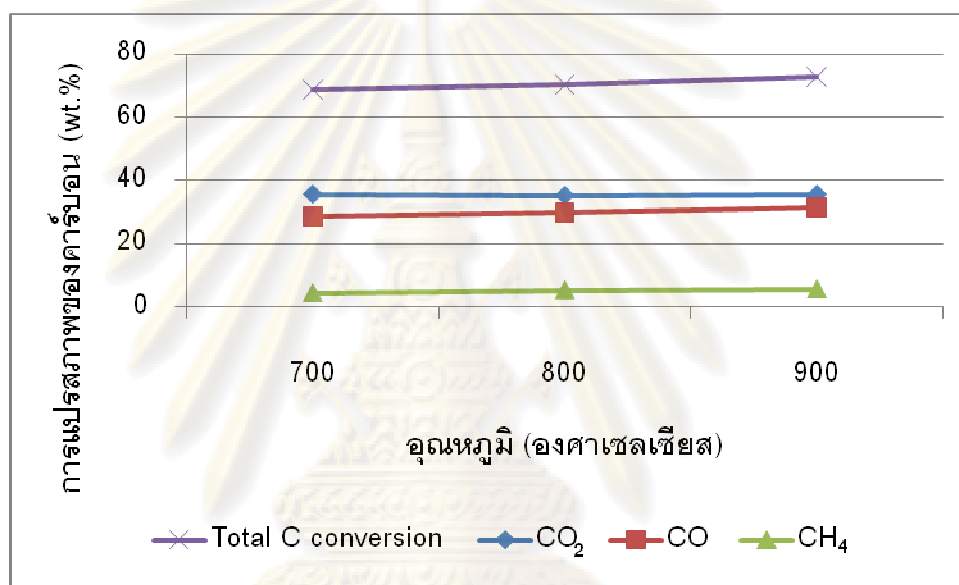
รูปที่ 4.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 100:0 (อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)



รูปที่ 4.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของไฮโดรเจนที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 100:0 (อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)

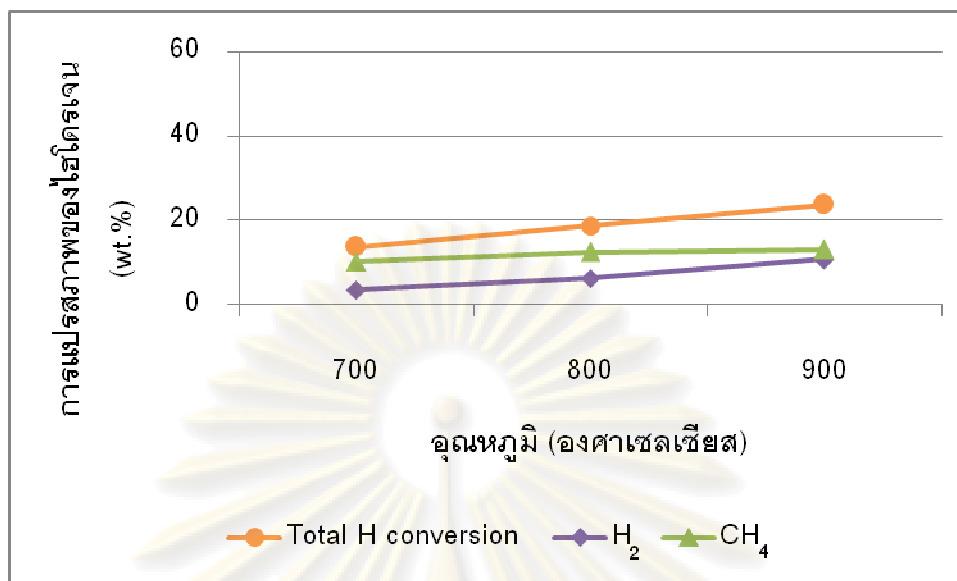
การทดลองที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 85:15 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 700 องศาเซลเซียส เป็น 900 องศาเซลเซียส พบว่าการแปรสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเล็กน้อยจาก 33.47% เป็น 33.44% ส่วนการแปรสภาพของคาร์บอนเป็น

แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 26.79% เป็น 29.46% ส่วนการแปรสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นจาก 4.18% เป็น 5.38% โดยมีการแปรสภาพเป็นคาร์บอนโดยรวมของแก๊สทั้งสามชนิดเพิ่มขึ้นจาก 64.44% เป็น 68.28% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ผลดังแสดงในรูปที่ 4.3 ส่วนของการแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นแก๊สไฮโดรเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 3.47% เป็น 10.69% และแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นจาก 10.14% เป็น 13.04% โดยมีการแปรสภาพของไฮโดรเจนโดยรวมของแก๊สทั้งสองชนิดเพิ่มจาก 13.61% เป็น 23.73% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 700 องศาเซลเซียส เป็น 900 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.4



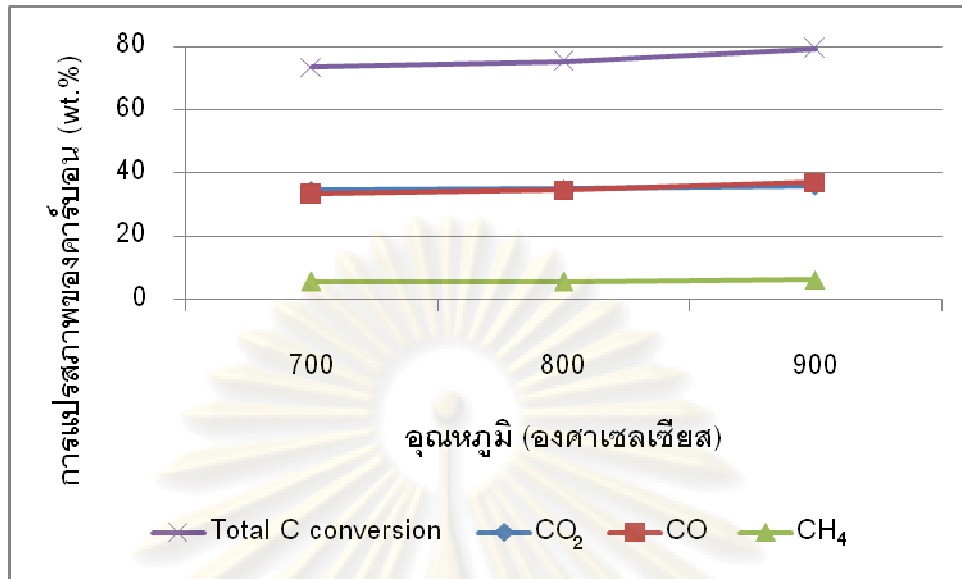
รูปที่ 4.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 85:15 (อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

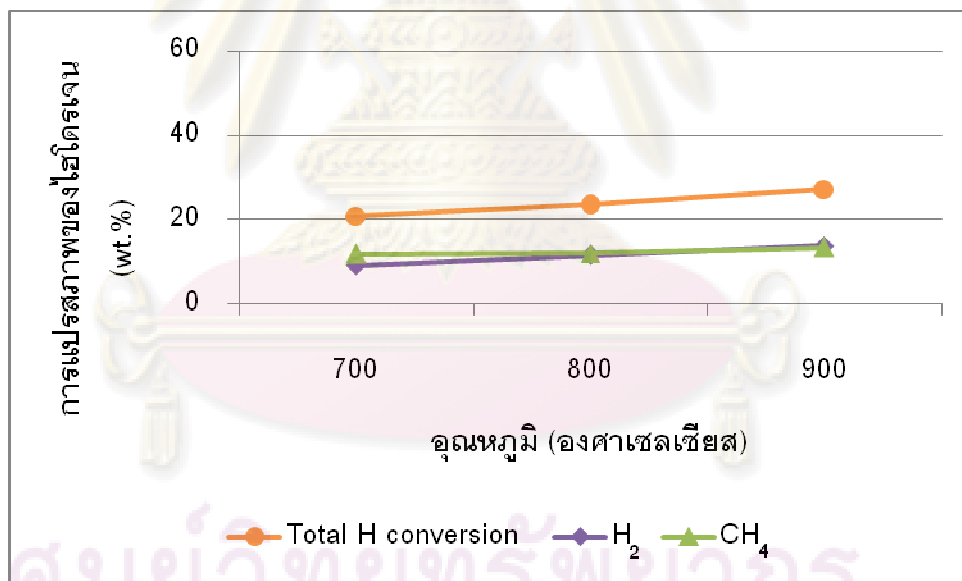


รูปที่ 4.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของไฮโดรเจนที่อัตราส่วนนากะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 85:15 (อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)

และที่อัตราส่วนนากะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 70:30 ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.5 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 700 องศาเซลเซียส เป็น 900 องศาเซลเซียส พบว่าการแปรสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 33.50% เป็น 34.89% ส่วนการแปรสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มจาก 32.28% เป็น 35.97% ส่วนการแปรสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 5.43% เป็น 6.12% โดยมีการแปรสภาพเป็นคาร์บอนโดยรวมของแก๊สทั้งสามชนิดเพิ่มขึ้นจาก 71.22% เป็น 76.99% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ส่วนของการแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นแก๊สไฮโดรเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 9.02% เป็น 13.82% และแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 11.82% เป็น 13.32% โดยมีการแปรสภาพของไฮโดรเจนโดยรวมของแก๊สทั้งสองชนิดเพิ่มจาก 20.84% เป็น 27.14% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 700 องศาเซลเซียส เป็น 900 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.6

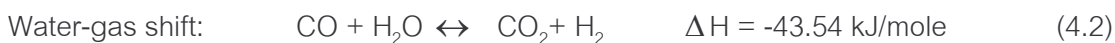


รูปที่ 4.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนที่อัตราส่วนกาซกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 70:30 (อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)



รูปที่ 4.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของไฮโดรเจนที่อัตราส่วนกาซกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 70:30 (อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส สามารถอธิบายผลการทดลองจากสมการดังต่อไปนี้



พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 700 เป็น 900 องศาเซลเซียส การแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นแก๊สไฮโดรเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยา CO_2 reforming ดังสมการที่ (4.3) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน เนื่องจากค่าความร้อนของการเผาไหม้ (ΔH) เป็นบวก ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาไปข้างหน้า (ไปทางขวา) ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนจึงเพิ่มขึ้น แต่จะถูกใช้ไปในปฏิกิริยา Water-gas shift ดังสมการที่ (4.2) มีค่าความร้อนของการเผาไหม้ (ΔH) เป็นลบ เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ (ไปทางซ้าย) ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนจะลดลง แต่เนื่องจากค่าความร้อนของการเผาไหม้มีค่าน้อยกว่าปฏิกิริยาอื่น ๆ เป็นผลให้ปริมาณไฮโดรเจนมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น

การแปรสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยา CO_2 reforming และปฏิกิริยา Boudouard ดังสมการที่ (4.3) และ (4.4) ตามลำดับ เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จึงเพิ่มขึ้น และถูกใช้ไปในปฏิกิริยา Water-gas shift ดังสมการที่ (4.2) จากการทดลอง พบว่าที่อุณหภูมิสูง ปฏิกิริยา CO_2 reforming และปฏิกิริยา Boudouard จะเกิดได้ดีเพราะว่าเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ในขณะที่ปฏิกิริยา Water-gas shift เกิดได้ไม่ดี เพราะว่าเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา Water-gas shift ดังสมการที่ (4.2) และถูกใช้ไปในปฏิกิริยา CO_2 reforming และ Boudouard ดังสมการที่ (4.3) และ (4.4) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น พบว่าการแปรสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิปฏิกิริยา Water-gas shift จะเกิดได้ไม่ดีเพราะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงขณะเดียวกันก็ถูกใช้ในปฏิกิริยา CO_2 reforming และ Boudouard มากขึ้นเพราะว่าเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน

การแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นแก๊สมีเทนเกิดขึ้นจากปฏิกิริยา Methanation ดังสมการที่ (4.5) และถูกใช้ในปฏิกิริยา CO_2 reforming ดังสมการที่ (4.3) การแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นแก๊สมีเทนมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 4.6 ผลของการเพิ่มอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส

การแปรสภาพ	อุณหภูมิเพิ่มจาก 700 องศาเซลเซียส เป็น 900 องศาเซลเซียส		
	อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล		
	100:0	85:15	70:30
C → Total C	+4.96%	+5.96%	+8.10%
C → CO ₂	-3.53%	-0.10%	+4.14%
C → CO	+23.85%	+9.99%	+11.43%
C → CH ₄	-20.12%	+28.56%	+12.69%
H → total H	+23.57%	+74.29%	+30.23%
H → H ₂	+143.70%	+207.83%	+53.25%
H → CH ₄	-20.12%	+28.56%	+12.67%

+ คือ การแปรสภาพเพิ่มขึ้น (เปรียบเทียบกันระหว่างอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และ 900 องศาเซลเซียส)

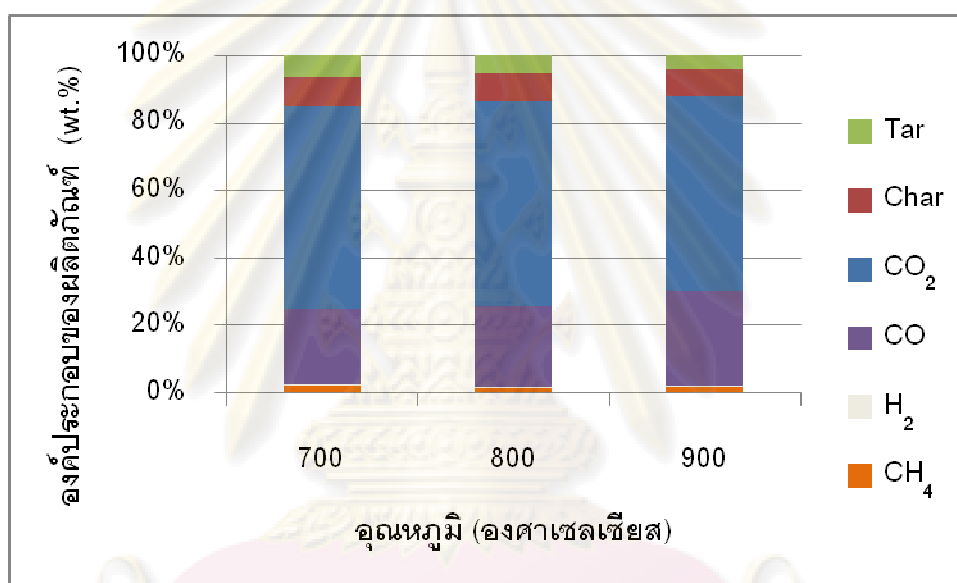
- คือ การแปรสภาพลดลง (เปรียบเทียบกันระหว่างอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และ 900 องศาเซลเซียส)

4.2.2 ผลการเพิ่มอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิทำให้กากกะลาปาล์มผสมกลีเซอรอลสามารถสลายตัวได้ผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มมากขึ้น ขณะที่ได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านชาร์และน้ำมันทาร์ลดลง จากการทดลองนี้ทำการคำนวณหาปริมาณของแก๊สที่ได้จากปริมาตรของแก๊สขาออกและความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สชนิดที่ได้จากการทำปฏิกิริยา และทำการชั่งน้ำหนักถ่านชาร์ที่ได้จากอุปกรณ์ส่วนต่าง ๆ ส่วนผลของน้ำมันทาร์ที่ได้มาจากการคำนวณหาค่าของผลิตภัณฑ์แก๊สและถ่านชาร์ออก จึงได้เป็นผลน้ำหนักของน้ำมันทาร์ สาเหตุที่ไม่ได้ทำการชั่งน้ำหนักน้ำมันทาร์โดยตรงเนื่องมาจากมีน้ำมันทาร์ที่ตกค้างอยู่ในอุปกรณ์ต่าง ๆ หลายส่วน ไม่สามารถนำมาชั่งน้ำหนักได้ทั้งหมด จึงใช้วิธีหาค่าของแก๊สและถ่านชาร์ออกจากองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์

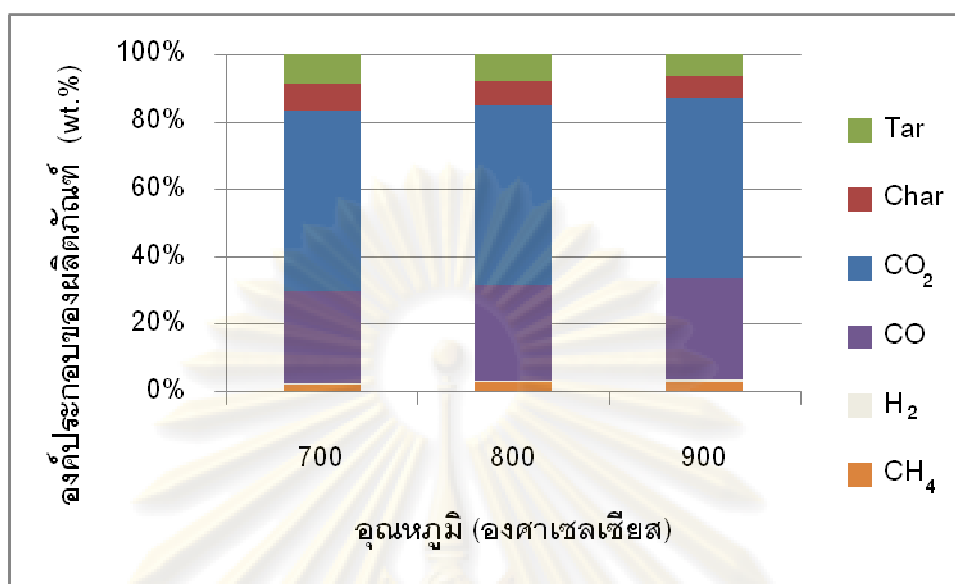
โดยผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นไปในแนวโน้มเดียวกันในทุก ๆ อัตราส่วนของกากกะลาปาล์มที่ผสมกลีเซอรอล ที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 100:0 และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 700 องศาเซลเซียส เป็น 900 องศาเซลเซียส ปริมาณถ่านชาร์และน้ำมันทาร์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาลดลง เนื่องจากกาก

กะลาปาล์มสามารถสลายตัวเป็นแก๊สได้มากขึ้น ตามสมการ (4.6) โดยผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้เพิ่มจาก 84.85% (แบ่งเป็นน้ำหนักของผลิตภัณฑ์แก๊สที่สามารถนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงแก๊สได้ คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทนรวมกันเป็น 25.04% และเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 59.81%) เป็น 87.94% (แบ่งเป็นน้ำหนักของผลิตภัณฑ์แก๊สที่สามารถนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงแก๊สได้ คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทนรวมกันเป็น 30.24% และเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 57.70%) และปริมาณถ่านชาร์ที่ได้ลดลงจาก 8.90% เหลือ 7.86% และน้ำมันทาร์ลดลงจาก 6.25% เป็น 4.20% ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ (อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 100:0 และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)

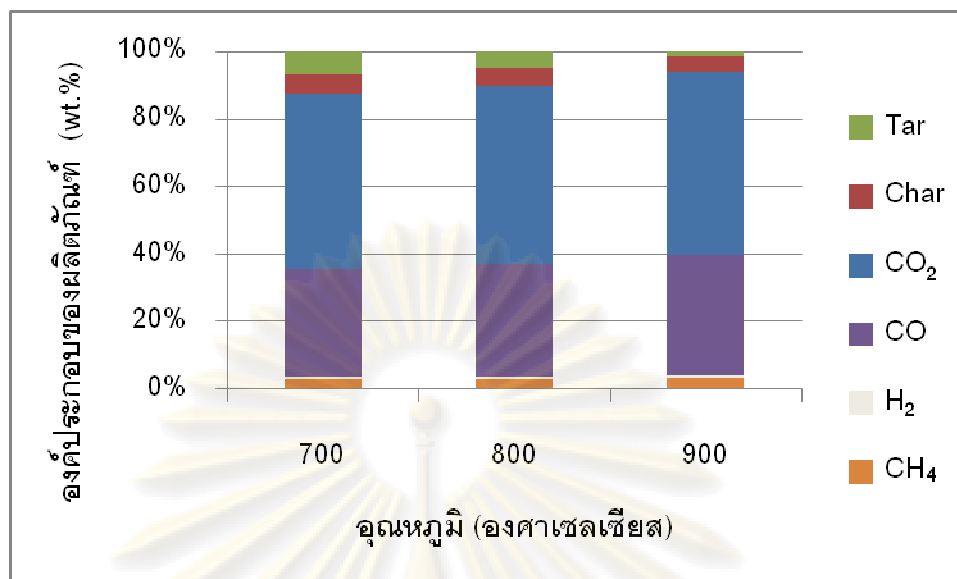
ส่วนที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 85:15 และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3 ก็เป็นไปในแนวโน้มเดียวกัน โดยปริมาณถ่านชาร์และน้ำมันทาร์ที่ได้ลดลงจาก 7.68% และ 8.86% เหลือ 6.35% และ 6.39% ตามลำดับ ส่วนผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้เพิ่มจาก 83.46% (แบ่งเป็นน้ำหนักของผลิตภัณฑ์แก๊สที่สามารถนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงแก๊สได้ คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทนรวมกันเป็น 29.91% และเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 53.55%) เป็น 87.26% (แบ่งเป็นน้ำหนักของผลิตภัณฑ์แก๊สที่สามารถนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงแก๊สได้ คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทนรวมกันเป็น 33.77% และเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 53.49%) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ (อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 85:15 และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)

ส่วนที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 70:30 และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3 ก็เป็นไปในแนวโน้มเดียวกัน โดยปริมาณถ่านชาร์และน้ำมันทาร์ที่ลดลงจาก 5.54% และ 6.89% เหลือ 4.37% และ 1.55% ตามลำดับ ส่วนผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้เพิ่มจาก 87.57% (แบ่งเป็นน้ำหนักของผลิตภัณฑ์แก๊สที่สามารถนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงแก๊สได้ คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทนรวมกันเป็น 35.55% และเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 52.02%) เป็น 94.08% (แบ่งเป็นน้ำหนักของผลิตภัณฑ์แก๊สที่สามารถนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงแก๊สได้ คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทนรวมกันเป็น 39.90% และเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 54.18%) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.9

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.9 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ (อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 70:30 และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)

ตารางที่ 4.7 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์

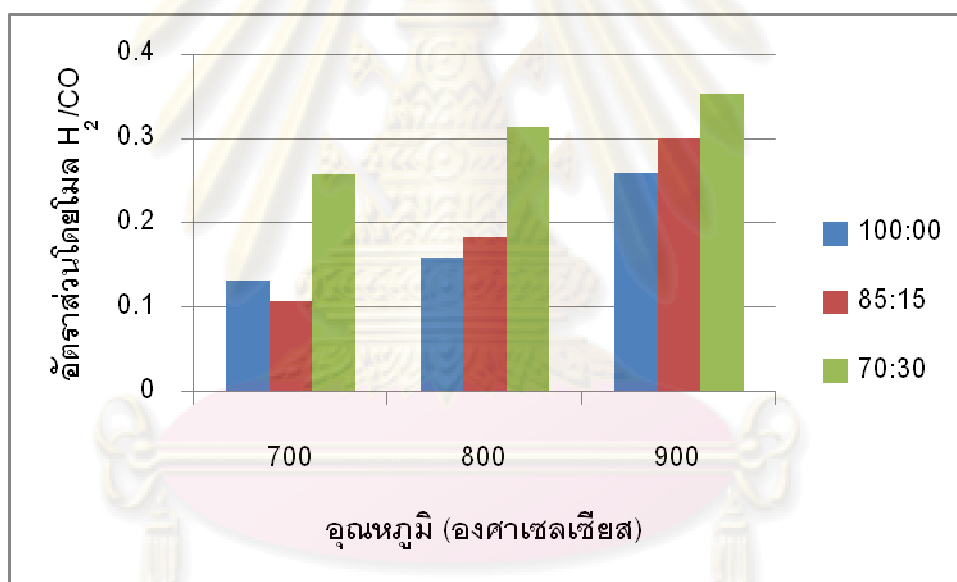
องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์	อุณหภูมิเพิ่มจาก 700 องศาเซลเซียส เป็น 900 องศาเซลเซียส		
	อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล		
	100:0	85:15	70:30
CO + H ₂ + CH ₄	+20.77%	+23.84%	+12.23%
CO ₂ + CO + H ₂ + CH ₄	+3.65%	+7.50%	+7.43%
ถ่านชาร์	-11.69%	-31.77%	-21.12%
น้ำมันทาร์	-32.83%	-43.09%	-77.51%

+ คือ องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น (เปรียบเทียบกันระหว่างอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และ 900 องศาเซลเซียส)

- คือ องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ลดลง (เปรียบเทียบกันระหว่างอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และ 900 องศาเซลเซียส)

4.2.3 ผลของการเพิ่มอุณหภูมิที่มีต่ออัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 700 องศาเซลเซียส เป็น 900 องศาเซลเซียส ค่าของอัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มแปรผันตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในทุก ๆ อัตราส่วนจากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล โดยที่อัตราส่วนจากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 100:0 ค่าอัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มจาก 0.13 เป็น 0.26 ที่อัตราส่วนจากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 85:15 ค่าอัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มจาก 0.11 เป็น 0.30 และที่อัตราส่วนจากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 70:30 ค่าอัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มจาก 0.26 เป็น 0.35 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 700 องศาเซลเซียส เป็น 900 องศาเซลเซียสตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ผลของการเพิ่มอุณหภูมิที่มีต่ออัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (ที่อัตราส่วนจากกะลาปาล์ม 100:0, 85:15, 70:30 และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)

จากการทดลองนี้จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าต่ำ ยังไม่สามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นที่จะใช้ในกระบวนการต่าง ๆ เช่น การสังเคราะห์เมทานอล ไดมethylเอเธอร์ได้ หากจะนำไปใช้ในการสังเคราะห์ไดเมทิลเอเธอร์ ต้องมีอัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 1:1 ดังนั้นจึงสมควรมีการใช้

เติมน้ำในปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันหรือมีการเติมตัวเร่ง เช่น นิกเกิล ลงในชีวมวล เพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้น และจะช่วยให้อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าสูงขึ้น เป็นการปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์แก๊สเพื่อให้นำไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น

ตารางที่ 4.8 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่ออัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

	อุณหภูมิเพิ่มจาก 700 องศาเซลเซียส เป็น 900 องศาเซลเซียส		
	อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล		
	100:0	85:15	70:30
อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์	+96.77%	+179.86%	+37.55%

+ คือ อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น (เปรียบเทียบกันระหว่างอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และ 900 องศาเซลเซียส)

4.2.4 ผลของการเพิ่มอุณหภูมิที่มีต่อค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้

จากการทดลองสามารถคำนวณหาค่าความร้อนต่ำของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ตามสมการ

(4.7)

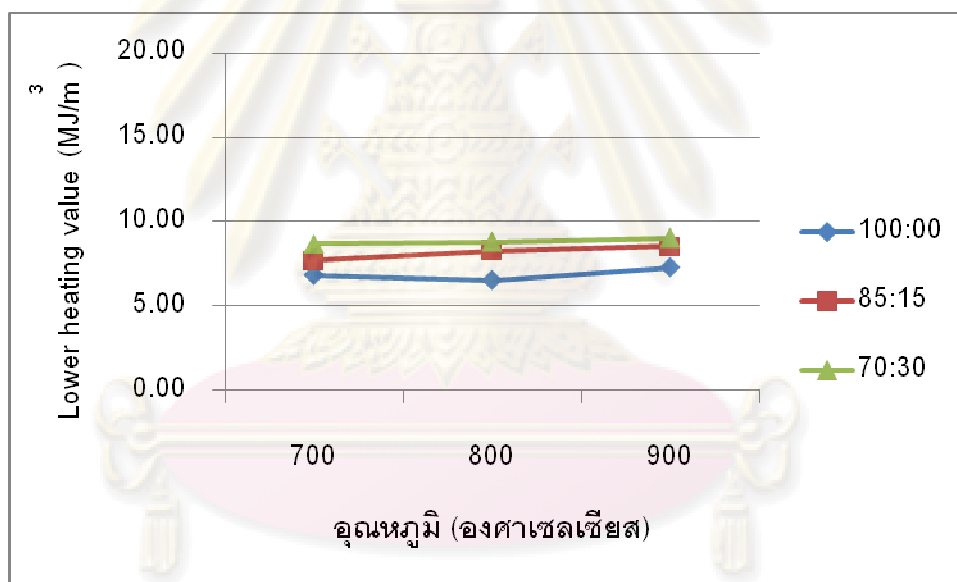
The lower heating value (LHV, MJ/m³)

$$= \frac{(12.64 \times \text{CO} + 10.8 \times \text{H}_2 + 35.72 \times \text{CH}_4)}{(\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2 + \text{CH}_4)} \quad (4.7)$$

เมื่อ CO₂, CO, H₂ และ CH₄ คือ ปริมาตรของ CO₂, CO, H₂ และ CH₄ ที่ได้ต่อเวลาที่

จากการคำนวณที่ได้พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจาก 700 องศาเซลเซียส เป็น 900 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่ม เนื่องจากจากการเพิ่มขึ้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจนเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ยกเว้นการทดลองในส่วนที่ใช้อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 100:0 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีการเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ขณะที่แก๊สมีเทนลดลงค่อนข้างมาก โดยแก๊สมีเทน

เป็นแก๊สที่มีค่าความร้อนสูง เมื่อแก๊สมีเทนลดลงทำให้ค่าความร้อนที่ได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สลดลง จาก 6.83 MJ/m^3 เป็น 6.53 MJ/m^3 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 700 องศาเซลเซียส เป็น 800 องศาเซลเซียส แต่เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้เพิ่มมากขึ้นเป็น 7.28 MJ/m^3 เนื่องจากกาการที่มีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนเกิดเพิ่มมากขึ้น ขณะที่แก๊สมีเทนค่อนข้างคงที่ ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สจึงเพิ่มสูงขึ้น ขณะที่การทดลองในส่วนที่ใช้อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 85:15 และ 70:30 มีแนวโน้มเดียวกัน คือ ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 700 องศาเซลเซียส เป็น 900 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 85:15 ค่าความร้อนเพิ่มจาก 7.71 MJ/m^3 เป็น 8.56 MJ/m^3 และที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 70:30 ค่าความร้อนเพิ่มจาก 8.70 MJ/m^3 เป็น 9.04 MJ/m^3 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 เมื่อพิจารณาจากค่าความร้อนที่ได้พบว่าเชื้อเพลิงแก๊สที่ได้มีค่าความร้อนปานกลาง



รูปที่ 4.11 ผลของการเพิ่มอุณหภูมิที่มีต่อค่าความร้อนต่ำของผลิตภัณฑ์แก๊สแบบไม่รวมแก๊สพา (ที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม 100:0, 85:15, 70:30 และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)

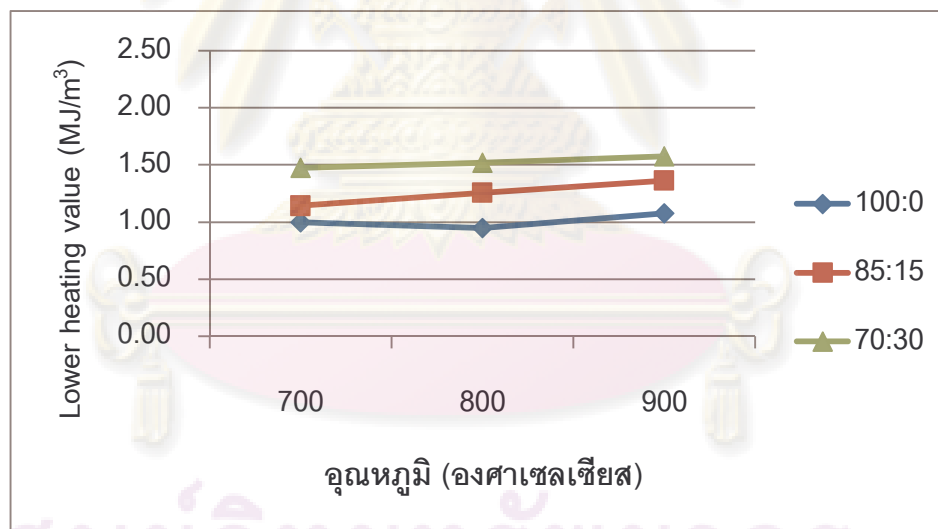
ค่าความร้อนต่ำของผลิตภัณฑ์แก๊สที่คำนวณได้ เป็นการคำนวณโดยค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้โดยที่ยังไม่ได้รวมปริมาณของแก๊สพาที่ใช้ในการทดลอง โดยแก๊สพานี้ทำให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ถูกเจือจาง ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้แบบรวมแก๊สพาจึงต่ำกว่าค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สแบบไม่รวมแก๊สพา จึงต้องคำนวณค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์แบบรวมแก๊สพาตามสมการที่ (4.8)

The lower heating value (LHV, MJ/m³)

$$= \frac{(12.64 \times \text{CO} + 10.8 \times \text{H}_2 + 35.72 \times \text{CH}_4)}{\text{ปริมาตรของแก๊สทั้งหมดต่ออนาที}} \quad (4.8)$$

เมื่อ CO, H₂ และ CH₄ คือ ปริมาตรของ CO, H₂ และ CH₄ ที่ได้ต่ออนาที

จากผลการคำนวณที่ได้พบว่าผลที่ได้เป็นไปในแนวโน้มเดียวกันในทุก ๆ อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล คือ ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 700 องศาเซลเซียส เป็น 900 องศาเซลเซียส โดยที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 100:0 ค่าความร้อนค่อนข้างคงที่ ที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 85:15 ค่าความร้อนเพิ่มเล็กน้อย จาก 1.14 MJ/m³ เป็น 1.36 MJ/m³ และที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 70:30 ค่าความร้อนค่อนข้างคงที่ โดยเพิ่มเล็กน้อยจาก 1.48 MJ/m³ เป็น 1.58 MJ/m³ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 เมื่อดูแนวโน้มโดยรวมพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิมีผลต่อการเพิ่มค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 4.12 ผลของการเพิ่มอุณหภูมิที่มีต่อค่าความร้นต่ำของผลิตภัณฑ์แก๊สแบบรวมแก๊สพา (ที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม 100:0, 85:15, 70:30 และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)

ตารางที่ 4.9 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อค่าความร้อนต่ำของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ต่อ
นาที่

	อุณหภูมิเพิ่มจาก 700 องศาเซลเซียส เป็น 900 องศาเซลเซียส		
	อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล		
	100:0	85:15	70:30
ค่าความร้อนต่ำของผลิตภัณฑ์แก๊ส (แบบรวมแก๊สพา)	+7.71%	+19.31%	+6.70%

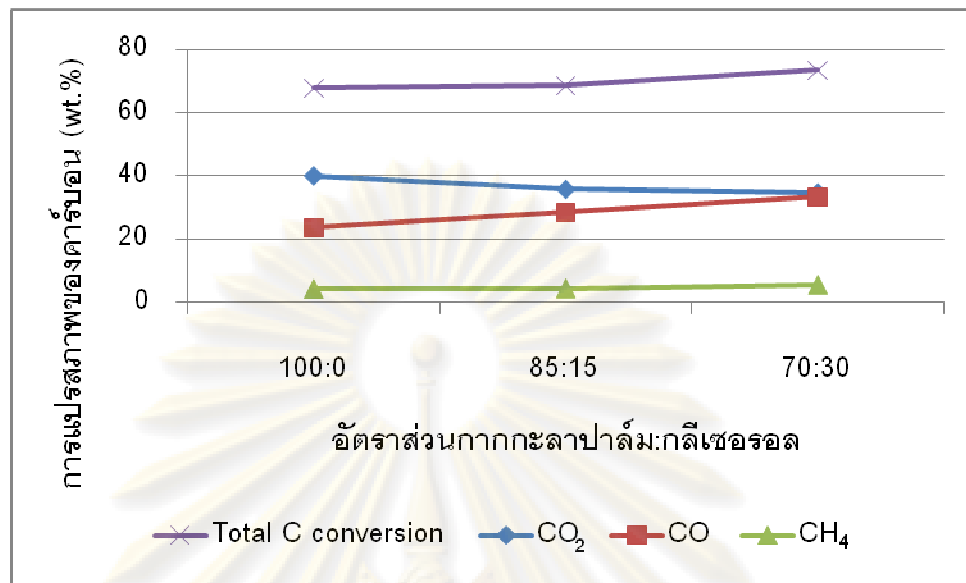
+ คือ ค่าความร้อนต่ำของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ต่อเวลาที่เพิ่มขึ้น (เปรียบเทียบกันระหว่างอุณหภูมิ
700 องศาเซลเซียส และ 900 องศาเซลเซียส)

4.3 ผลของอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีต่อกระบวนการแกซีฟิเคชัน

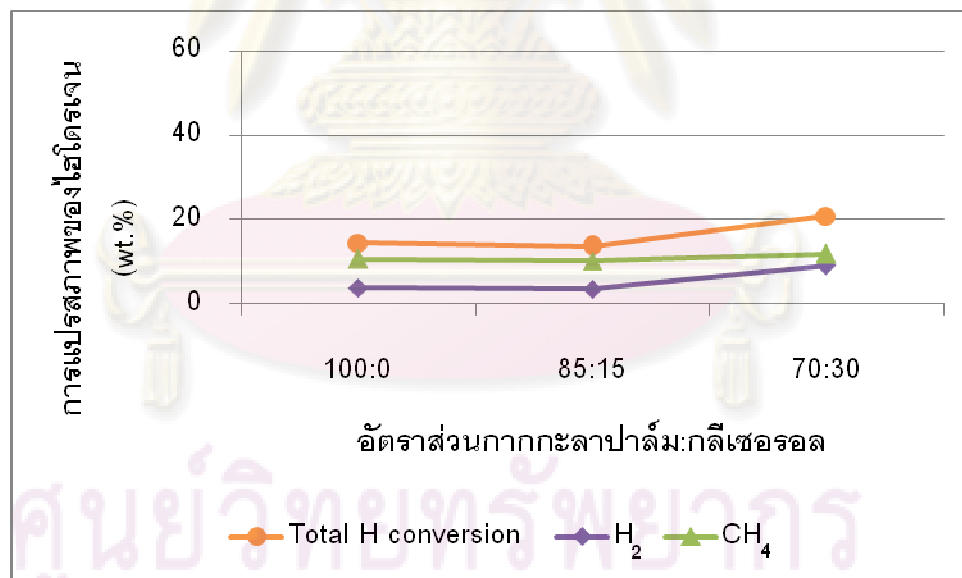
4.3.1 ผลของอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีต่อองค์ประกอบของ ผลิตภัณฑ์แก๊ส

การศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีต่อการ
แปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน ทำการทดลองที่ภาวะต่าง ๆ ดังนี้ คือ อุณหภูมิ 700, 800
และ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเท่ากับ 0.3

โดยในการทดลองนี้ทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลเป็น 100:0,
85:15 และ 70:30 และทำการคำนวณหาการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นแก๊ส
คาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทน โดยใช้วิธีคำนวณดัง
แสดงในภาคผนวก ข ผลที่ได้เป็นดังแสดงในรูปที่ 4.13 - 4.18 ซึ่งในรูปจะแสดงให้เห็นถึงผลของ
อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน พบว่าผล
การทดลองมีแนวโน้มเดียวกันทุกอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เมื่อเปลี่ยน
อัตราส่วนระหว่างกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลจาก 100:0 เป็น 70:30 การแปรสภาพของคาร์บอน
เป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น จาก 24.48% และ 3.89% เป็น 32.28% และ
5.43% ตามลำดับ ส่วนการแปรสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจาก
39.97% เป็น 33.50% และมีการแปรสภาพของคาร์บอนโดยรวมของแก๊สสามชนิดเพิ่มขึ้นจาก
61.69% เป็น 71.22% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ส่วนการแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นแก๊ส
ไฮโดรเจนและแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นจาก 3.84% และ 10.56% เป็น 9.02% และ 11.82% ตามลำดับ
การแปรสภาพของไฮโดรเจนโดยรวมของแก๊สสองชนิดเพิ่มจาก 14.40% เป็น 20.84% เมื่อเปลี่ยน
อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล จาก 100:0 เป็น 70:30 ดังแสดงในรูปที่ 4.14



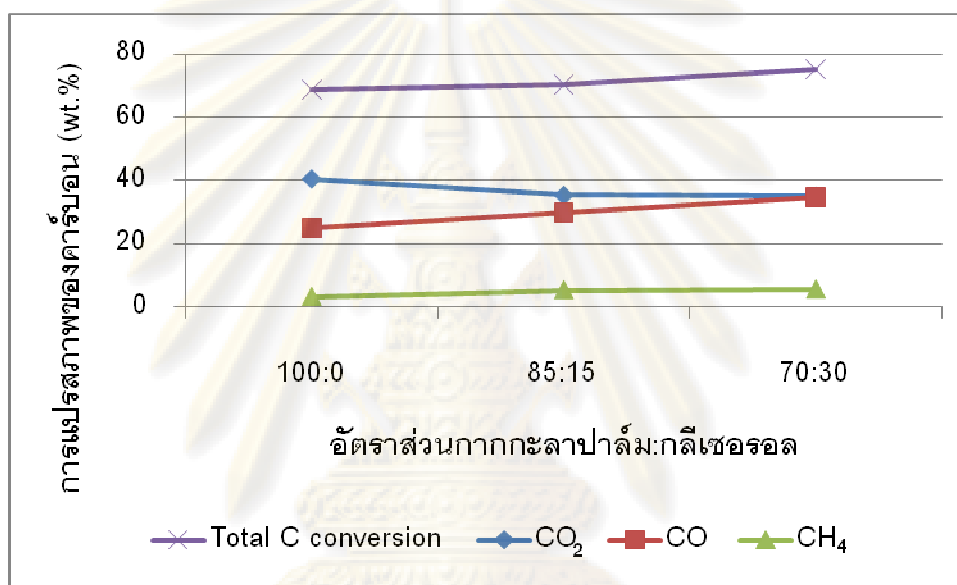
รูปที่ 4.13 ผลของการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส (อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)



รูปที่ 4.14 ผลของการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีต่อการแปรสภาพของไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส (อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)

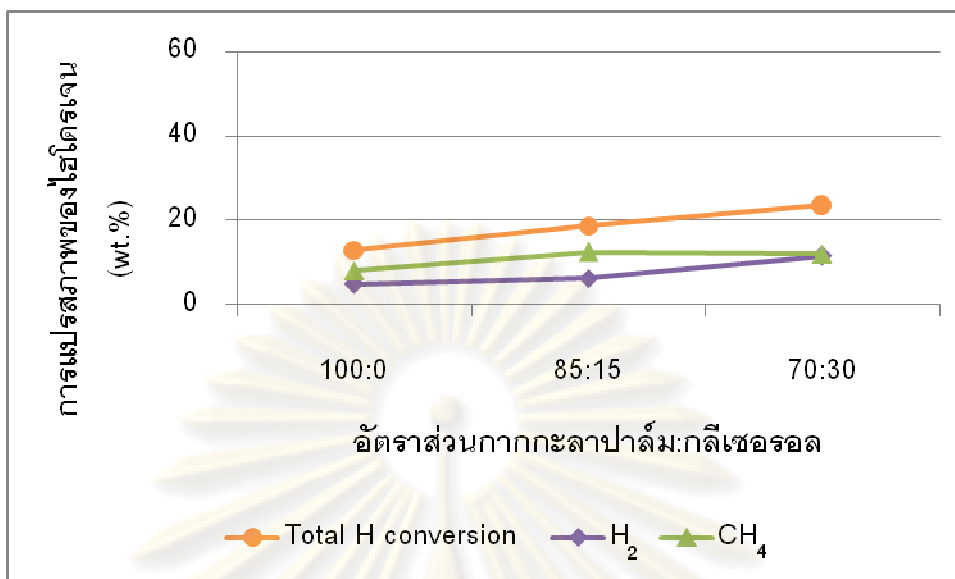
การทดลองที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลเป็น 100:0, 85:15 และ 70:30 พบว่า การแปรสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊ส

คาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น จาก 22.68% และ 2.97% เป็น 33.58% และ 5.52% ตามลำดับ ส่วนการแปรสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจาก 36.83% เป็น 33.92% และมีการแปรสภาพของคาร์บอนโดยรวมของแก๊สสามชนิดเพิ่มขึ้นจาก 62.48% เป็น 73.02% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ส่วนการแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นจาก 6.20% และ 8.06% เป็น 11.47% และ 12.00% ตามลำดับ การแปรสภาพของไฮโดรเจนโดยรวมของแก๊สสองชนิดเพิ่มจาก 12.96% เป็น 23.47% เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล จาก 100:0 เป็น 70:30 ดังแสดงในรูปที่ 4.16



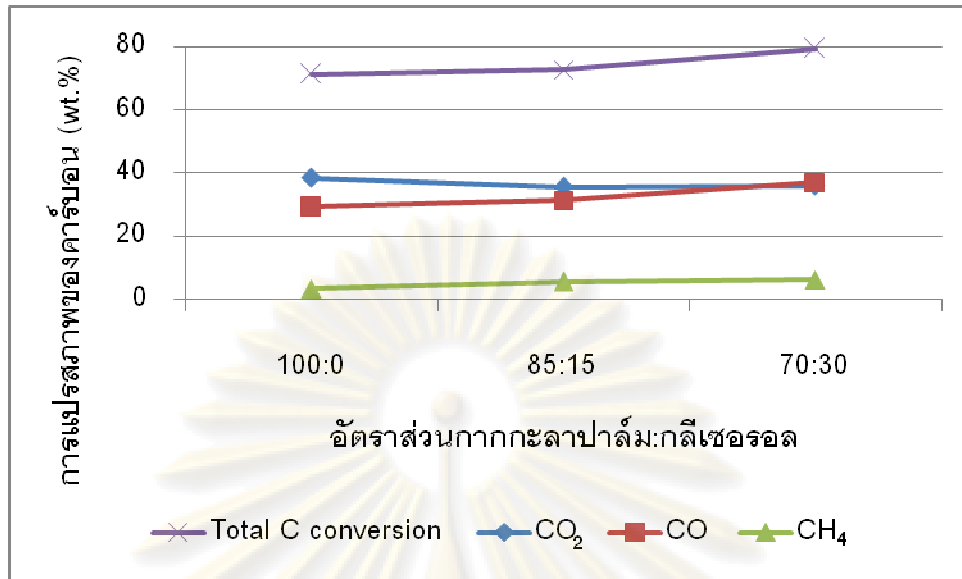
รูปที่ 4.15 ผลของการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีการแปรสภาพของคาร์บอนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส (อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

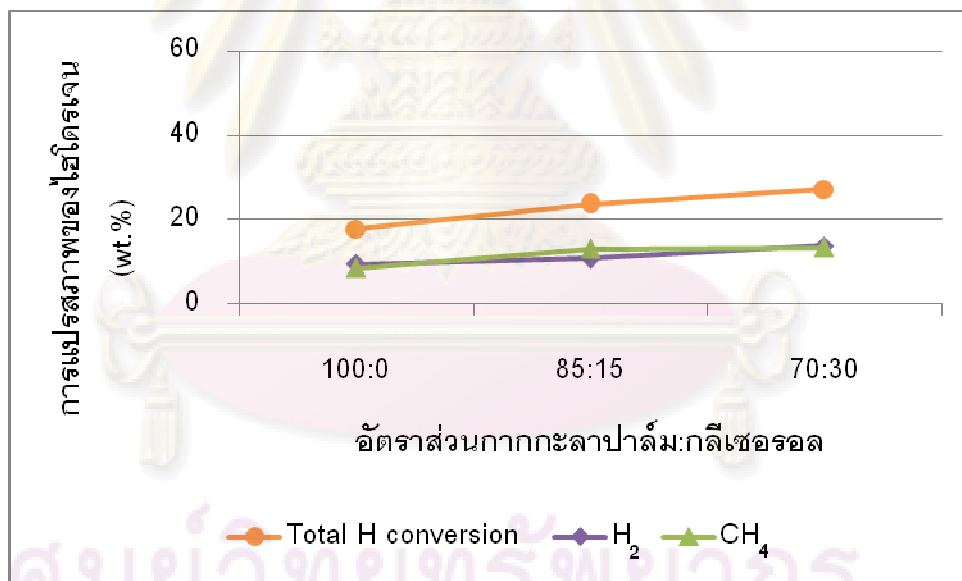


รูปที่ 4.16 ผลของการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีการแปรสภาพของไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส (อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)

จากรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นถึงผลการทดลองที่ 900 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลเป็น 100:0, 85:15 และ 70:30 พบว่าการแปรสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น จาก 26.60% และ 3.11% เป็น 35.97% และ 6.12% ตามลำดับ ส่วนการแปรสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ลดลงจาก 35.05% เป็น 34.89% และมีการแปรสภาพของคาร์บอนโดยรวมของแก๊สสามชนิดเพิ่มขึ้นจาก 64.75% เป็น 76.99% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ส่วนการแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นจาก 9.36% และ 8.44% เป็น 13.82% และ 13.32% ตามลำดับ การแปรสภาพของไฮโดรเจนโดยรวมของแก๊สสองชนิดเพิ่มจาก 17.80% เป็น 27.14% เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล จาก 100:0 เป็น 70:30 ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.17 ผลของการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีการแปรสภาพของคาร์บอนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส (อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)



รูปที่ 4.18 ผลของการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีการแปรสภาพของไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส (อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)

จากผลการทดลองเห็นได้ว่าการเพิ่มกลีเซอรอลลงในกากกะลาปาล์ม ทำให้ได้เกิดการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทนมากขึ้น จากผลการวิเคราะห์โดยประมาณจะเห็นได้ว่า เมื่อผสมกลีเซอรอลลงไปจะช่วยเพิ่มความชื้น

และสารระเหย ซึ่งสามารถสลายตัวให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สได้เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ความชื้นใน ก๊าซเซอร์คอลยังมีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ช่วยให้เกิดก๊าซเซอร์คอลแตกตัวได้ดีขึ้น รวมทั้งใน ก๊าซเซอร์คอลมีองค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนและไฮโดรเจนสูง ดังนั้นเมื่อผสมก๊าซเซอร์คอลในกากกะลา ปาล์ม จึงทำให้ได้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทนมากขึ้น

ตารางที่ 4.10 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:ก๊าซเซอร์คอลที่มีต่อการแปรสภาพ ของคาร์บอนและไฮโดรเจนไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส

การแปรสภาพ	อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:ก๊าซเซอร์คอล เปลี่ยนจาก 100:0 เป็น 70:30		
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		
	700	800	900
C → Total C	+15.44%	+16.86%	+18.90%
C → CO ₂	-7.78%	-7.90%	-0.44%
C → CO	+50.31%	+48.05%	+35.24%
C → CH ₄	+39.76%	+85.94%	+97.13%
H → total H	+44.68%	+81.17%	+52.51%
H → H ₂	+134.80%	+134.28%	+47.68%
H → CH ₄	+11.91%	+48.90%	+57.86%

+ คือ การแปรสภาพเพิ่มขึ้น (เปรียบเทียบกันระหว่างอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:ก๊าซเซอร์คอล 100:0 และ 70:30)

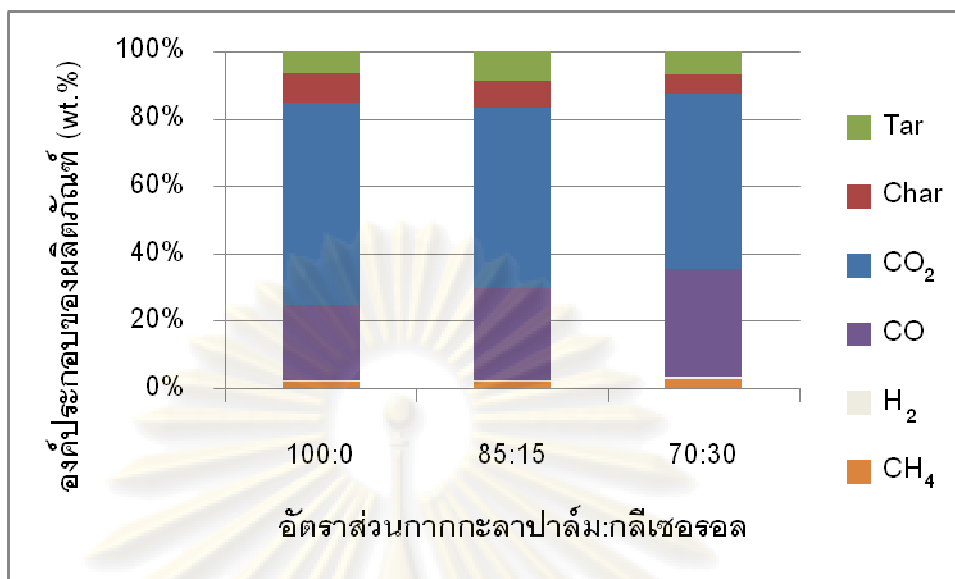
- คือ การแปรสภาพลดลง (เปรียบเทียบกันระหว่างอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:ก๊าซเซอร์คอล 100:0 และ 70:30)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.2 ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์

จากการทดลองนี้ทำการคำนวณหาน้ำหนักของแก๊สที่ได้จากปริมาตรของแก๊สขาออกและความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ผลิตได้จากการทำปฏิกิริยา และทำการชั่งน้ำหนักถ่านชาร์ที่ได้จากอุปกรณ์ส่วนต่าง ๆ ส่วนผลของน้ำมันทาร์ที่ได้มาจากการคำนวณหกลบน้ำหนักของผลิตภัณฑ์แก๊สและถ่านชาร์ออก ด้วยเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น โดยผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลจาก 100:0 เป็น 70:30 จะได้ผลิตภัณฑ์แก๊สและน้ำมันทาร์เพิ่มขึ้นจาก 84.85% (แบ่งเป็นน้ำหนักของผลิตภัณฑ์แก๊สที่สามารถนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงแก๊สได้ คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทนรวมกันเป็น 25.04% และเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 59.81%) และ 6.25% เป็น 87.57% (แบ่งเป็นน้ำหนักของผลิตภัณฑ์แก๊สที่สามารถนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงแก๊สได้ คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทนรวมกันเป็น 35.55% และเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 52.02%) และ 6.89% ตามลำดับ โดยที่ได้ถ่านชาร์ลดลงจาก 8.90% เป็น 5.54% ดังแสดงในรูปที่ 4.19 เนื่องจากกลีเซอรอลสามารถเกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันและให้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สได้ง่าย โดยมีถ่านชาร์อยู่ในองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ต่ำ

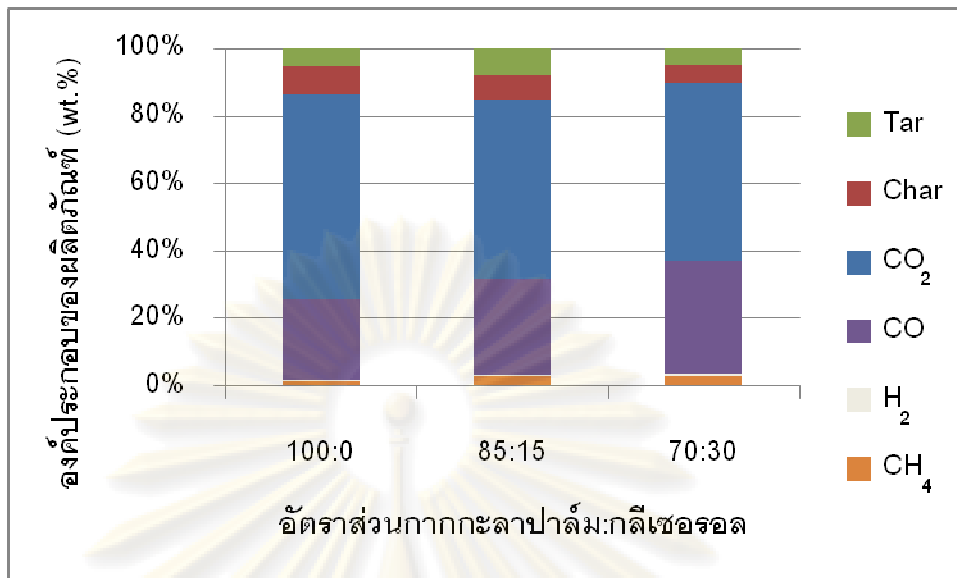
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.19 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ (อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)

ส่วนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลจาก 100:0 เป็น 70:30 จะได้ผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นจาก 86.45% (แบ่งเป็นน้ำหนักของผลิตภัณฑ์แก๊สที่สามารถนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงแก๊สได้ คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทนรวมกันเป็น 25.81% และเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 60.64%) เป็น 89.72% (แบ่งเป็นน้ำหนักของผลิตภัณฑ์แก๊สที่สามารถนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงแก๊สได้ คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทนรวมกันเป็น 37.04% และเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 52.67%) ส่วนถ่านชาร์และน้ำมันทาร์ลดลงจาก 8.15% และ 5.40% เป็น 5.24% และ 5.04% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.20

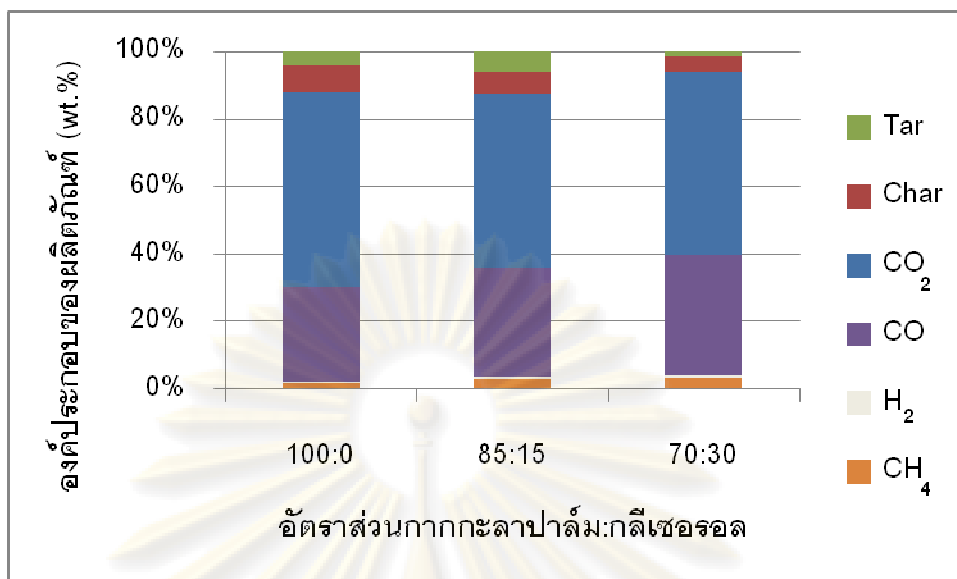
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.20 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกาซกลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ (อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)

รูปที่ 4.21 แสดงถึงผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกาซกลาปาล์ม:กลีเซอรอล ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกาซกลาปาล์ม:กลีเซอรอลจาก 100:0 เป็น 70:30 จะได้ผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นจาก 87.94% (แบ่งเป็นน้ำหนักของผลิตภัณฑ์แก๊สที่สามารถนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงแก๊สได้ คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทนรวมกันเป็น 30.24% และเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 57.70%) เป็น 94.08% (แบ่งเป็นน้ำหนักของผลิตภัณฑ์แก๊สที่สามารถนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงแก๊สได้ คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทนรวมกันเป็น 39.90% และเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 54.18%) ส่วนถ่านชาร์และน้ำมันทาร์ลดลงจาก 7.86% และ 4.20% เป็น 4.37% และ 1.55% ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.21 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ (อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)

ตารางที่ 4.11 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์

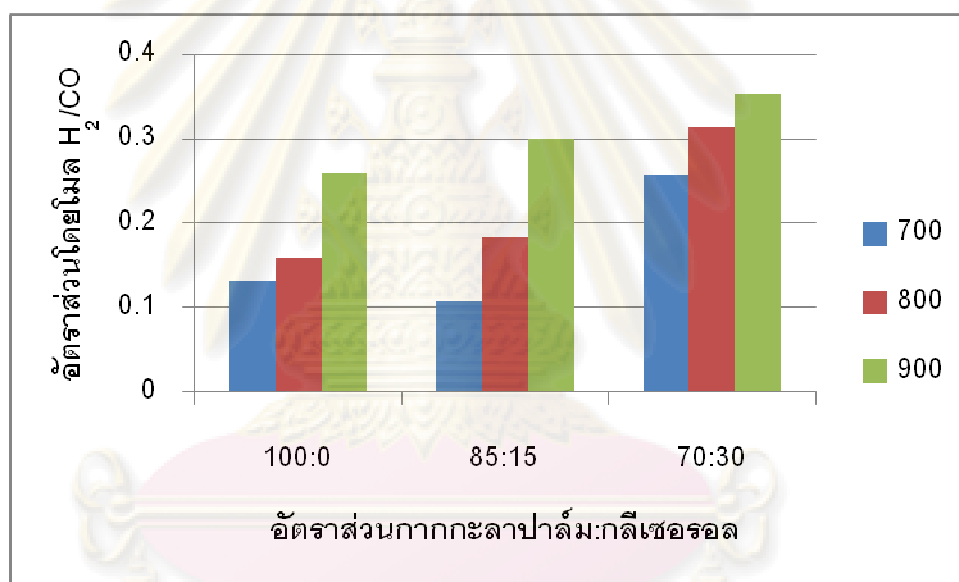
องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์	อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลเปลี่ยนจาก 100:0 เป็น 70:30		
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		
	700	800	900
CO + H ₂ + CH ₄	+41.98%	+43.52%	+31.94%
CO ₂ + CO + H ₂ + CH ₄	+3.22%	+3.78%	+6.98%
ถ่านชาร์	-37.75%	-35.71%	-44.40%
น้ำมันทาร์	+0.10%	-6.64%	-63.14%

+ คือ องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น (เปรียบเทียบกันระหว่างอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 100:0 และ 70:30)

- คือ องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ลดลง (เปรียบเทียบกันระหว่างอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 100:0 และ 70:30)

4.3.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีอัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

จากการทดลองพบว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลจาก 100:0 เป็น 70:30 ทำให้อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นในทุก ๆ อุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะเพิ่มจาก 0.13 เป็น 0.26 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะเพิ่มจาก 0.16 เป็น 0.31 และที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะเพิ่มจาก 0.26 เป็น 0.35 เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลจาก 100:0 เป็น 70:30 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีต่ออัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)

จากการทดลองนี้จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าต่ำ ยังไม่สามารถนำไปใช้ในเป็นสารตั้งต้นที่จะใช้ในกระบวนการต่าง ๆ เช่น การสังเคราะห์เมทานอล ไดเมทิลอีเธอร์ได้ หากจะนำไปใช้ในการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเธอร์ ต้องมีอัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 1:1 ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องเพิ่มไอน้ำในปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันหรือมีการเติมตัวเร่ง เช่น นิกเกิล ลงในชีวมวล เพื่อให้เกิด

ผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้น และจะช่วยให้อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าสูงขึ้น เป็นการปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์แก๊สเพื่อให้นำไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น

ตารางที่ 4.12 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีต่ออัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

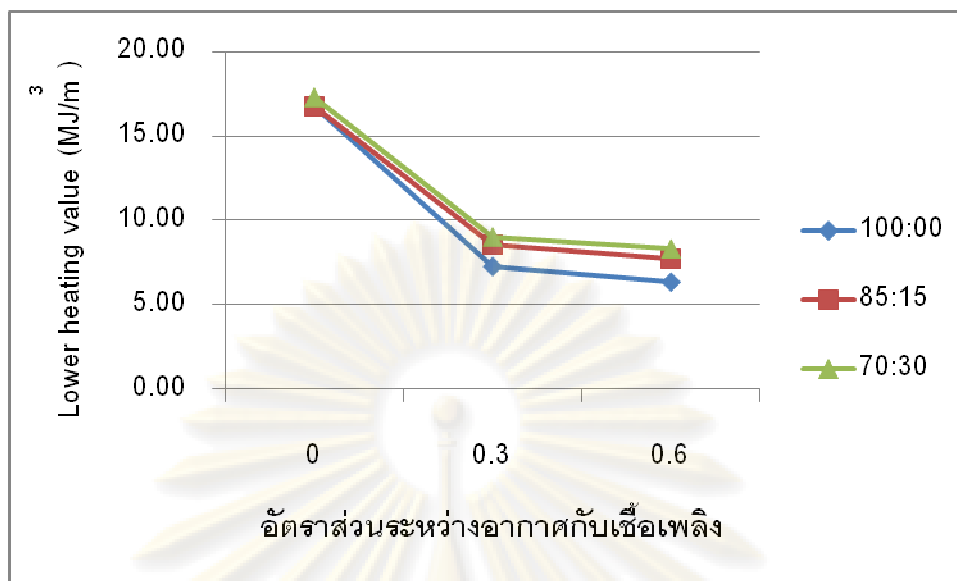
	อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลเปลี่ยนจาก 100:0 เป็น 70:30		
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		
	700	800	900
อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์	+95.08%	+97.62%	+36.37%

+ คือ อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น (เปรียบเทียบกับระหว่างอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 100:0 และ 70:30)

4.3.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีต่อค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้

จากการทดลองสามารถคำนวณหาค่าความร้อนต่ำสุดของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ตามสมการ (4.7)

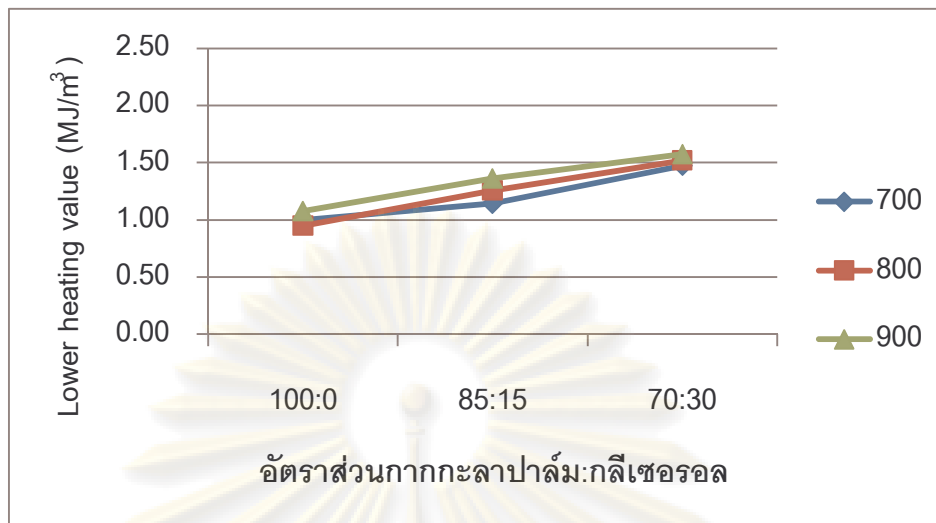
จากการคำนวณที่ได้พบว่าเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลจาก 100:0 เป็น 70:30 ค่าความร้อนของแก๊สที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุก ๆ อุณหภูมิ เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทน ที่เกิดเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มกลีเซอรอลลงในกากกะลาปาล์ม จึงทำให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีค่าความร้อนเพิ่มมากขึ้น ตามสมการที่ (4.7) โดยที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นจาก 6.83 MJ/m³ เป็น 8.70 MJ/m³ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นจาก 6.53 MJ/m³ เป็น 8.80 MJ/m³ และที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นจาก 7.28 MJ/m³ เป็น 9.04 MJ/m³ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.23 เมื่อพิจารณาจากค่าความร้อนที่ได้พบว่าเชื้อเพลิงแก๊สที่ได้มีค่าความร้อนปานกลาง



รูปที่ 4.23 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีต่อค่าความร้อนต่ำของผลิตภัณฑ์แก๊สแบบไม่รวมแก๊สพา (ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)

ค่าความร้อนต่ำของผลิตภัณฑ์แก๊สที่คำนวณได้ เป็นการคำนวณโดยค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้โดยที่ยังไม่ได้รวมปริมาตรของแก๊สพาที่ใช้ในการทดลอง โดยแก๊สพานี้ทำให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ถูกเจือจาง ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้แบบรวมแก๊สพาจึงต่ำกว่าค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สแบบไม่รวมแก๊สพา จึงต้องคำนวณค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์แบบรวมแก๊สพาตามสมการที่ (4.8)

จากการคำนวณที่ได้พบว่าเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลจาก 100:0 เป็น 70:30 ค่าความร้อนของแก๊สที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุก ๆ อุณหภูมิ เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทน ที่เกิดเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มกลีเซอรอลลงในกากกะลาปาล์ม จึงทำให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีค่าความร้อนเพิ่มมากขึ้น ตามสมการที่ (4.8) โดยที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นจาก 1.00 MJ/m³ เป็น 1.48 MJ/m³ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นจาก 0.95 MJ/m³ เป็น 1.52 MJ/m³ และที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นจาก 1.07 MJ/m³ เป็น 1.58 MJ/m³ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม: ก๊าซซีโพรอลที่มีต่อค่าความร้อนต่ำของผลิตภัณฑ์แก๊สแบบรวมแก๊ส (ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3)

ตารางที่ 4.13 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม: ก๊าซซีโพรอลที่มีต่อค่าความร้อนต่ำของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ต่อหน้าที่

	อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม: ก๊าซซีโพรอลเปลี่ยนจาก 100:0 เป็น 70:30		
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		
	700	800	900
ค่าความร้อนต่ำของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ต่อหน้าที่	+47.97%	+60.71%	+46.59%

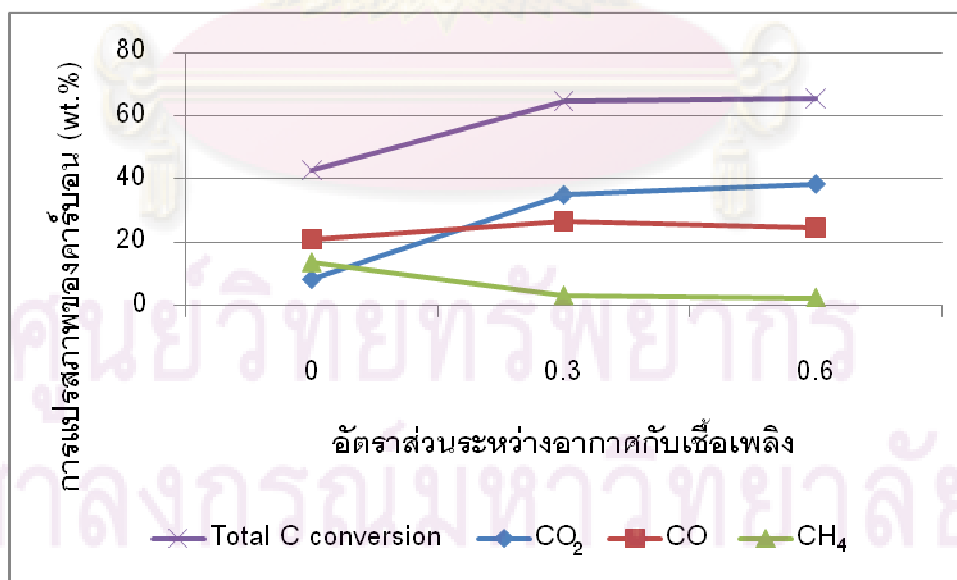
+ คือ ค่าความร้อนต่ำของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ต่อหน้าที่เพิ่มขึ้น (เปรียบเทียบกันระหว่างอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม: ก๊าซซีโพรอล 100:0 และ 70:30)

4.4 ผลของอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีต่อกระบวนการแกซิฟิเคชัน

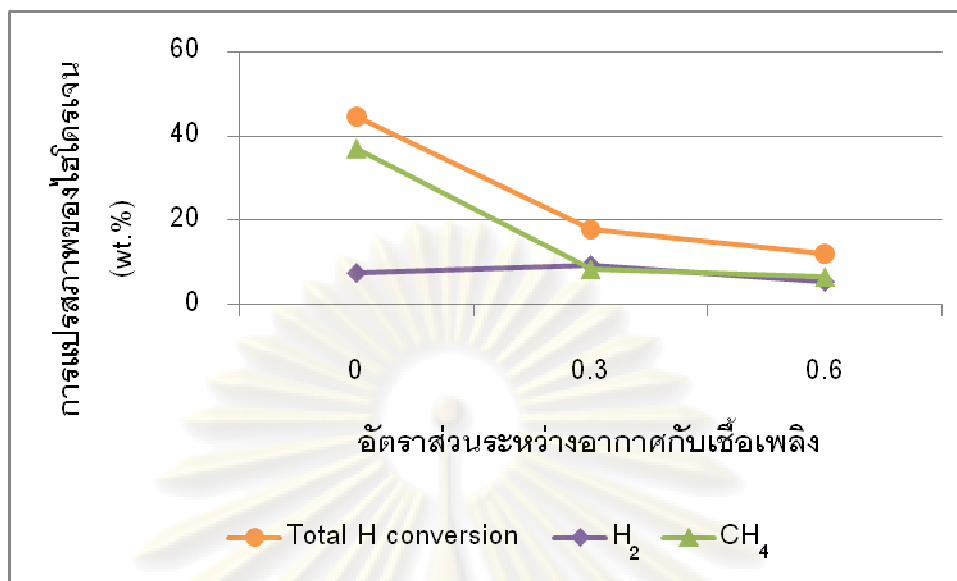
4.4.1 ผลของอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน

การศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง (Equivalent Ratio) ที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน โดยทำการทดลองที่ภาวะต่าง ๆ ดังนี้ คือ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม: ก๊าซซีโพรอลเท่ากับ 100:0, 85:15 และ 70:30

โดยในการทดลองนี้ทำการเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็น 0, 0.3 และ 0.6 และทำการคำนวณหาการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทน โดยใช้วิธีคำนวณดังแสดงในภาคผนวก ข ผลที่ได้เป็นดังแสดงในรูปที่ 4.25 - 4.30 ซึ่งในรูปจะแสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน พบว่าผลการทดลองมีแนวโน้มเดียวกันทุก ๆ อัตราส่วนอากาศกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจาก 0 เป็น 0.3 ที่อัตราส่วนอากาศกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลเท่ากับ 100:0 การแปรสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สมีเทนเปลี่ยนแปลงจาก 8.29% 20.97% และ 13.61% เป็น 35.05%, 26.60% และ 3.11% ตามลำดับ และการแปรสภาพของคาร์บอนโดยรวมเพิ่มจาก 42.88% เป็น 64.75% และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็น 0.6 การแปรสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สมีเทนจึงเปลี่ยนเป็น 38.47%, 24.72% และ 2.43% ตามลำดับ และการแปรสภาพเป็นคาร์บอนโดยรวมเพิ่มขึ้นเป็น 65.62% ดังแสดงในรูปที่ 4.25 ส่วนการแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มจาก 7.54% เป็น 9.36% และเพิ่มขึ้นเป็น 5.44% ส่วนการแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นแก๊สมีเทนลดลงจาก 36.98% เป็น 8.44% และ 6.61% ตามลำดับ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจาก 0 เป็น 0.3 และ 0.6 และการแปรสภาพของไฮโดรเจนโดยรวมลดลงจาก 44.52% เป็น 17.80% และ 12.06% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.26

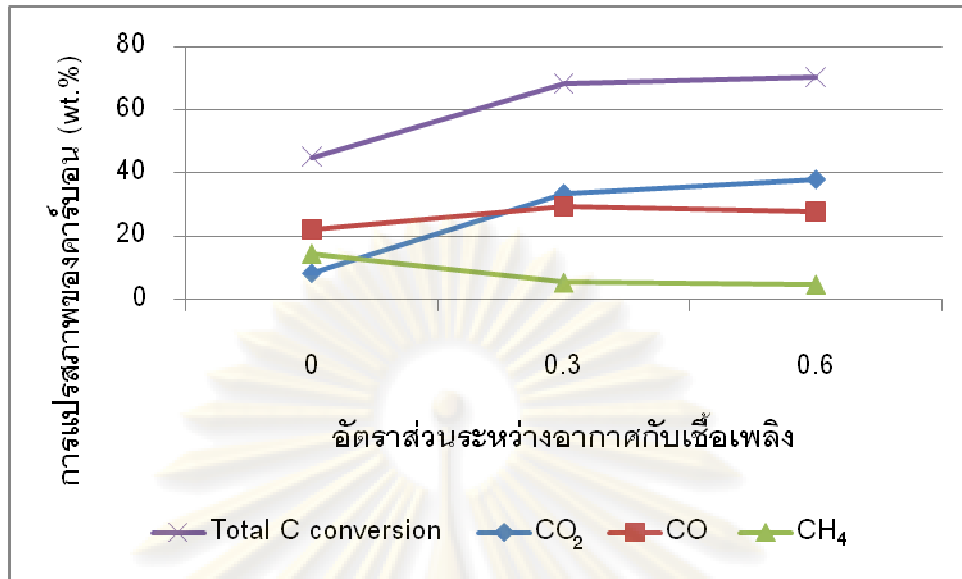


รูปที่ 4.25 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนอากาศกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 100:0 ที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอน (อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส)

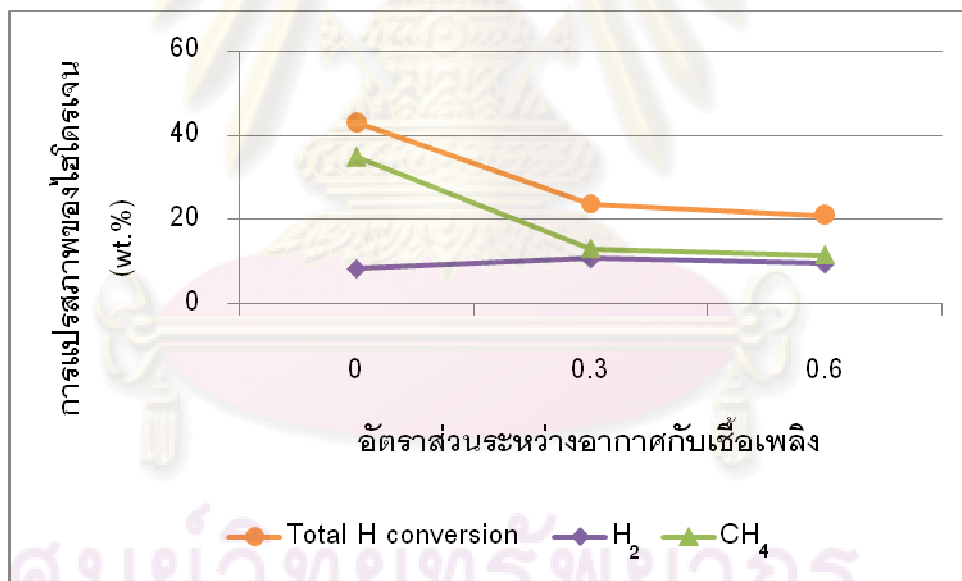


รูปที่ 4.26 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลเท่ากับ 100:0 ที่มีต่อการแปรสภาพของไฮโดรเจน (อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส)

ส่วนการทดลองของกากกะลาปาล์มผสมกลีเซอรอลที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ในอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 85:15 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจาก 0 เป็น 0.3 การแปรสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สมีเทนเปลี่ยนแปลงจาก 8.45%, 22.14% และ 14.37% เป็น 33.44%, 29.46% และ 5.38% ตามลำดับ และการแปรสภาพของคาร์บอนโดยรวมเพิ่มจาก 47.94% เป็น 68.28% และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็น 0.6 การแปรสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สมีเทนจึงเปลี่ยนเป็น 37.87%, 27.70% และ 4.76% ตามลำดับ และการแปรสภาพโดยรวมของคาร์บอนเพิ่มขึ้นเป็น 70.33% ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ส่วนการแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มจาก 8.29% เป็น 10.69% และ 9.46% ส่วนการแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นแก๊สมีเทนลดลงจาก 34.84% เป็น 13.04% และ 11.55% ตามลำดับ และการแปรสภาพโดยรวมของไฮโดรเจนลดลงจาก 43.13% เป็น 23.73% และ 21.01% เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจาก 0 เป็น 0.3 และ 0.6 ดังแสดงในรูปที่ 4.28



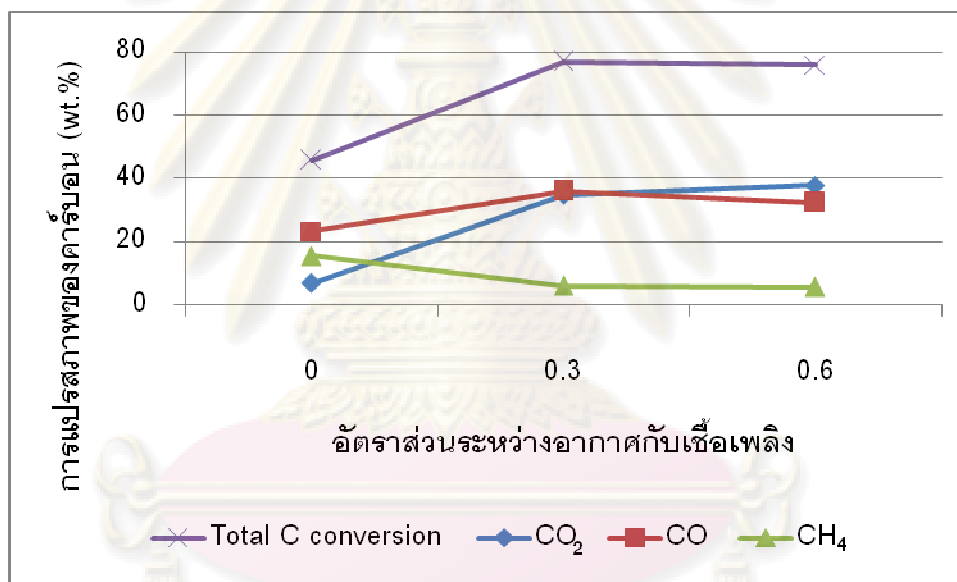
รูปที่ 4.27 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลเท่ากับ 85:15 ที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอน (อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 4.28 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลเท่ากับ 85:15 ที่มีต่อการแปรสภาพของไฮโดรเจน (อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส)

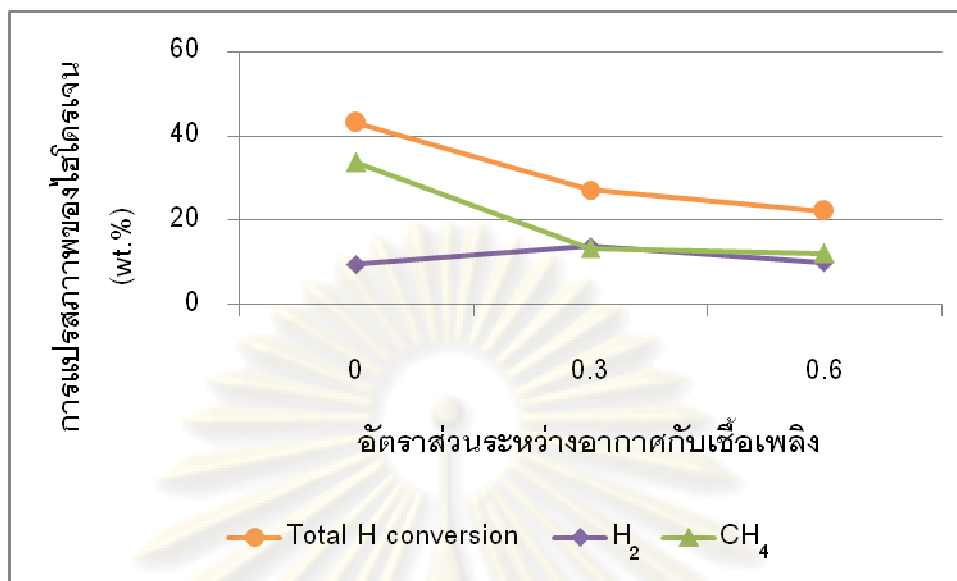
จากรูปที่ 4.29 แสดงให้เห็นถึงผลการทดลองของกากกะลาปาล์มผสมกลีเซอรอลในอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 70:30 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจาก 0 เป็น 0.3 การแปรสภาพเป็นคาร์บอนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และ

แก๊สมีเทนเปลี่ยนแปลงจาก 6.84%, 23.35% และ 15.47% เป็น 34.89%, 35.97% และ 6.12% ตามลำดับ และการแปรสภาพของคาร์บอนโดยรวมเพิ่มจาก 45.67% เป็น 76.99% และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็น 0.6 อัตราการแปรสภาพเป็นคาร์บอนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สมีเทนจึงเปลี่ยนเป็น 37.88%, 32.46% และ 5.58% ตามลำดับ และการแปรสภาพของคาร์บอนโดยรวมลดลงเล็กน้อยเป็น 75.92% ส่วนการแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มจาก 9.52% เป็น 13.82% และ 10.05% ส่วนการแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นแก๊สมีเทนลดลงจาก 33.65% เป็น 13.32% และ 12.13% ตามลำดับ โดยมีการแปรสภาพของไฮโดรเจนโดยรวมลดลงจาก 43.17% เป็น 27.14% และ 22.19% ตามลำดับ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจาก 0 เป็น 0.3 และ 0.6 ดังแสดงในรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.29 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนอากาศกะลา
ปาล์ม:กลีเซอรอลเท่ากับ 70:30 ที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอน (อุณหภูมิ 900 องศา
เซลเซียส)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.30 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนอากาศลาปาล์ม:กลีเซอรอลเท่ากับ 70:30 ที่มีต่อการแปรสภาพของไฮโดรเจน (อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส)

จากผลการทดลองเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจาก 0 เป็น 0.3 จะทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเพิ่มอากาศเข้าไปทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้พื้นฐานต่าง ๆ ได้ดีขึ้น ดังนี้



แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อทำการเติมออกซิเจนเข้าสู่ปฏิกิริยา เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ตามสมการที่ (4.9) และ (4.11) ได้ดีขึ้น โดยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นบางส่วนถูกใช้ไปในปฏิกิริยา Boudouard ดังสมการที่ (4.4) ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มมากขึ้น

นอกจากแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะเพิ่มขึ้นตามสมการ Boudouard แล้ว แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ยังสามารถเกิดได้จากการเผาไหม้โดยมีออกซิเจนอยู่อย่างจำกัด ตามสมการที่ (4.10) และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะถูกใช้ไปในปฏิกิริยา Water-gas shift ดังสมการที่ (4.2) และถูกใช้ไปในการเผาไหม้เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อยังมีออกซิเจนเหลือในการทำปฏิกิริยา ตามสมการที่ (4.11) จึงทำให้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

แก๊สไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเติมออกซิเจนลงไปในปฏิกิริยามาจากการเกิดปฏิกิริยา Water-gas shift ดังสมการที่ (4.2) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยา Water-gas shift ไปข้างหน้าได้ดีขึ้น แก๊สไฮโดรเจนจึงเพิ่มมากขึ้น

แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจาก 0.3 เป็น 0.6 แล้ว การแปรสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอากาศที่เป็นตัวออกซิไดซ์ จึงเกิดปฏิกิริยาตามสมการที่ (4.11) ทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ขณะที่แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง การแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นแก๊สไฮโดรเจนก็เป็นไปในแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน ส่วนการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นแก๊สมีเทนลดลง เนื่องจากการออกซิไดซ์ที่เพิ่มขึ้นของกากกะลาปาล์มผสมกลีเซอรอล

ตารางที่ 4.14 ผลของการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส

การแปรสภาพ	อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเพิ่มจาก 0 เป็น 0.3		
	อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล		
	100:0	85:15	70:30
C → Total C	+51.02%	+51.84%	+68.58%
C → CO ₂	+322.55%	+295.50%	+409.76%
C → CO	+26.85%	+33.06%	+54.05%
C → CH ₄	-77.18%	-62.57%	-60.41%
H → total H	-60.02%	-44.99%	-37.13%
H → H ₂	+24.07%	+28.87%	+45.22%
H → CH ₄	-77.18%	-62.57%	-60.42%

+ คือ การแปรสภาพเพิ่มขึ้น (เปรียบเทียบกันอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0 และ 0.3)

- คือ การแปรสภาพลดลง (เปรียบเทียบกันอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0 และ 0.3)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.15 ผลของการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส

การแปรสภาพ	อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเพิ่มจาก 0.3 เป็น 0.6		
	อัตราส่วนอากาศ:กลีเซอรอล		
	100:0	85:15	70:30
C → Total C	+1.34	+3.00	-1.38
C → CO ₂	+9.76	+13.25	+8.57
C → CO	-7.06	-5.99	-9.76
C → CH ₄	-21.65	-11.43	-8.91
H → total H	-32.27	-11.45	-18.26
H → H ₂	-41.84	-11.46	-27.27
H → CH ₄	-21.65	-11.43	-8.91

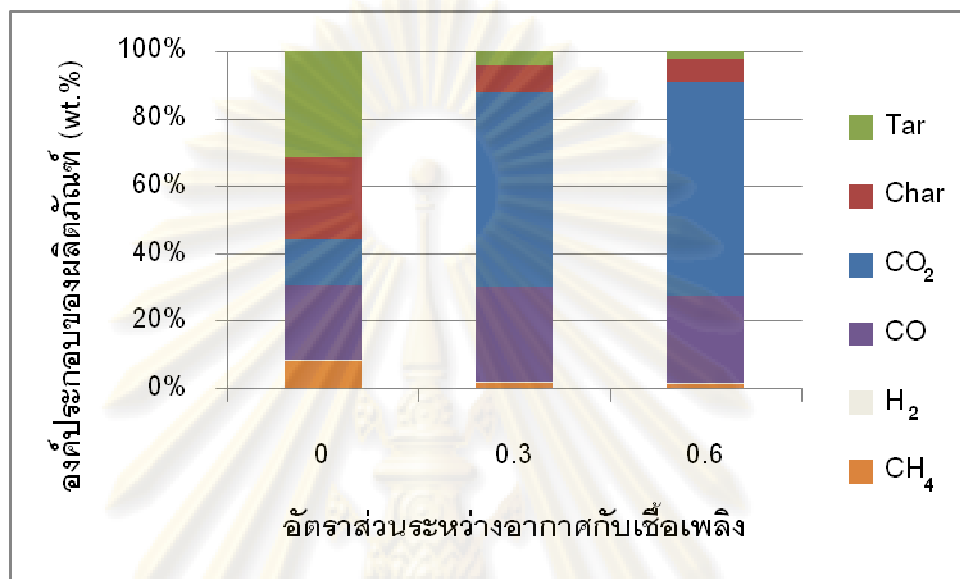
+ คือ การแปรสภาพเพิ่มขึ้น (เปรียบเทียบกันอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3 และ 0.6)

- คือ การแปรสภาพลดลง (เปรียบเทียบกันอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3 และ 0.6)

4.4.2 ผลการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์

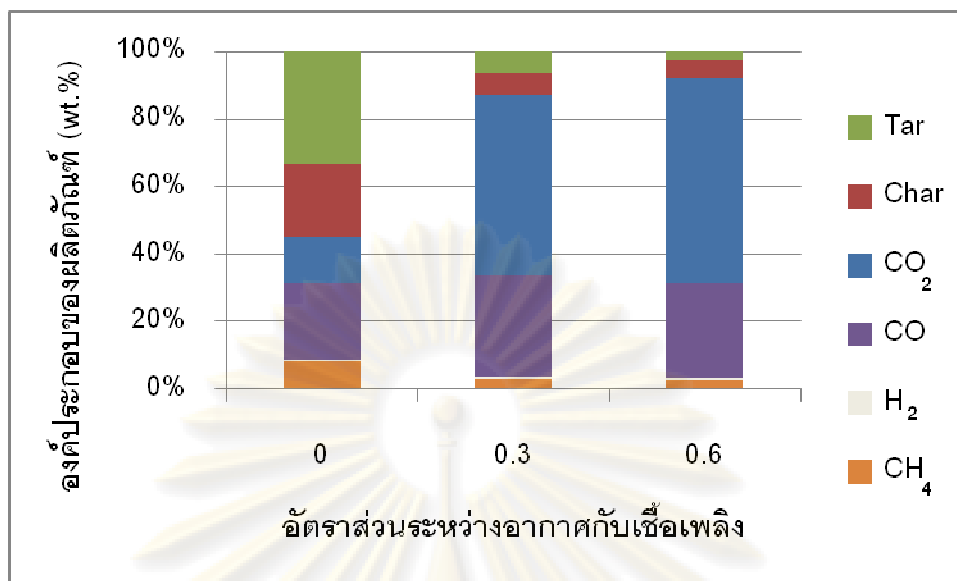
จากการทดลองนี้ทำการคำนวณน้ำหนักของแก๊สที่ได้จากปริมาตรของแก๊สขาออกและความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ออกมาจากการทำปฏิกิริยา และทำการชั่งน้ำหนักถ่านชาร์ที่ได้จากอุปกรณ์ส่วนต่าง ๆ ส่วนผลของน้ำมันที่ได้ออกมาจากการคำนวณหักน้ำหนักของผลิตภัณฑ์แก๊สและถ่านชาร์ออก ด้วยเหตุผลดังกล่าวมาแล้วในข้างต้น โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจาก 0 เป็น 0.6 ทำให้กากกะลาปาล์มผสมกลีเซอรอลสามารถสลายตัวให้ผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มมากขึ้น ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านชาร์และน้ำมันที่ลดลง เนื่องจากการเพิ่มของอากาศที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ทำให้ตัวออกซิไดซ์ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ทำให้กากกะลาปาล์มผสมกลีเซอรอลสามารถสลายตัวให้ผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มมากขึ้น ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอากาศ:กลีเซอรอลเท่ากับ 100:0 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจาก 0 เป็น 0.6 จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นจาก 44.19% (แบ่งเป็นน้ำหนักของผลิตภัณฑ์แก๊สที่สามารถนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงแก๊สได้ คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทนรวมกันเป็น 30.53% และเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 13.65%) เป็น 90.99% (แบ่งเป็นน้ำหนักของผลิตภัณฑ์แก๊สที่สามารถนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงแก๊สได้ คือ แก๊ส

คาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทนรวมกันเป็น 27.66% และเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 63.33%) ส่วนถ่านชาร์ลดลงจาก 24.46% เป็น 6.79% และน้ำมันทาร์ลดลงจาก 31.35% เป็น 2.20% ดังแสดงในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ (อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอากาศกะลาปาล์ม: ก๊าซเซอร์อลเท่ากับ 100:0)

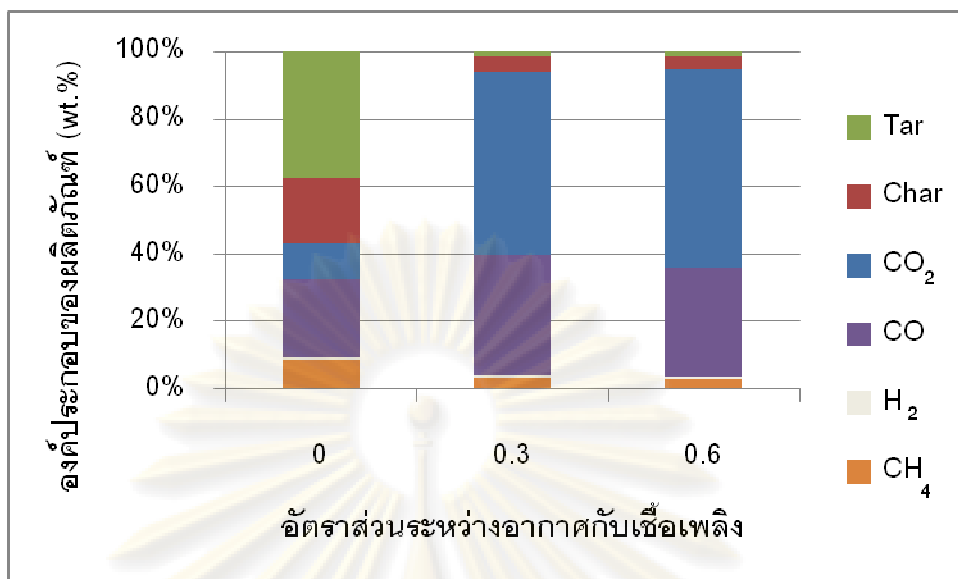
รูปที่ 4.32 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอากาศกะลาปาล์ม: ก๊าซเซอร์อลเท่ากับ 85:15 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจาก 0 เป็น 0.6 จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นจาก 44.93% (แบ่งเป็นน้ำหนักของผลิตภัณฑ์แก๊สที่สามารถนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงแก๊สได้ คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทนรวมกันเป็น 31.40% และเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 13.53%) เป็น 92.12% (แบ่งเป็นน้ำหนักของผลิตภัณฑ์แก๊สที่สามารถนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงแก๊สได้ คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทนรวมกันเป็น 31.54% และเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 60.58%) ส่วนถ่านชาร์ลดลงจาก 21.64% เป็น 5.37% และน้ำมันทาร์ลดลงจาก 33.43% เป็น 2.51%



รูปที่ 4.32 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ (อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอากาศต่อถ่าน: ก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 85:15)

ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอากาศต่อถ่าน: ก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 70:30 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจาก 0 เป็น 0.6 จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น จาก 43.06% (แบ่งเป็นน้ำหนักของผลิตภัณฑ์แก๊สที่สามารถนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงแก๊สได้ คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทนรวมกันเป็น 32.43% และเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 10.63%) เป็น 94.70% (แบ่งเป็นน้ำหนักของผลิตภัณฑ์แก๊สที่สามารถนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงแก๊สได้ คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทนรวมกันเป็น 35.88% และเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 58.82% ส่วนถ่านชาร์ลดลงจาก 19.28% เป็น 3.64% และน้ำมันชาร์ลดลงจาก 37.66% เป็น 1.66% ดังแสดงในรูปที่ 4.33

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.33 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ (อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนอากาศกะลาปาล์ม:

กลีเซอรอลเท่ากับ 70:30)

จากผลการวิจัยพบว่า การเพิ่มเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจาก 0 เป็น 0.6 ทำให้เกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ต่าง ๆ ได้ดีขึ้น จึงได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สเพิ่มมากขึ้น ได้ถ่านชาร์และน้ำมันทาร์ลดลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.16 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจาก 0 เป็น 0.3 ที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์

องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์	อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเพิ่มจาก 0 เป็น 0.3		
	อัตราส่วนอากาศ:กะลาปาล์ม:กลีเซอรอล		
	100:0	85:15	70:30
CO + H ₂ + CH ₄	-0.95%	7.53%	23.04%
CO ₂ + CO + H ₂ + CH ₄	99.01%	94.23%	118.51%
ถ่านชาร์	-67.87%	-70.66%	-77.33%
น้ำมันทาร์	-86.60%	-80.89%	-95.89%

- + คือ องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น (เปรียบเทียบกันระหว่างอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0 และ 0.3)
- คือ องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ลดลง (เปรียบเทียบกันระหว่างอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0 และ 0.3)

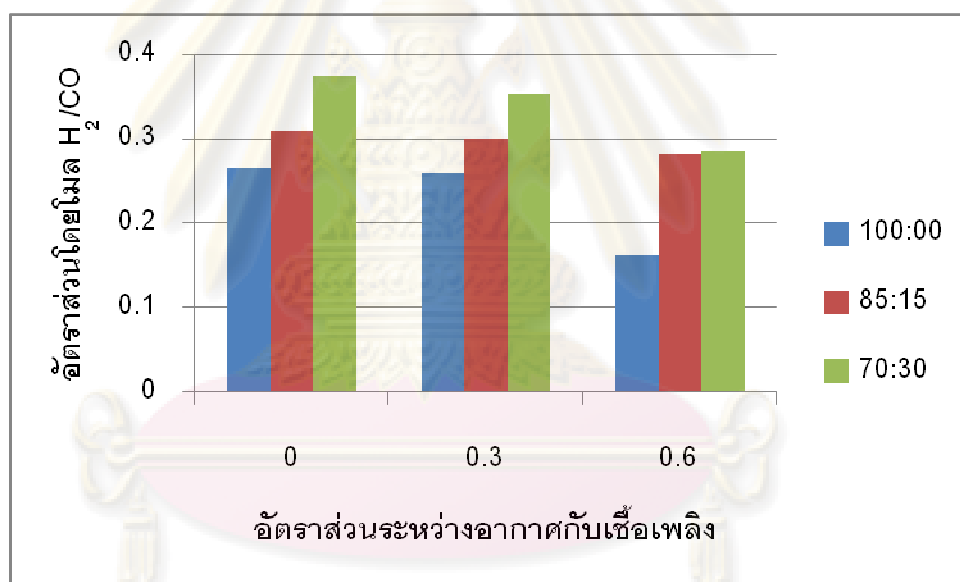
ตารางที่ 4.17 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจาก 0.3 เป็น 0.6 ที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์

องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์	อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเพิ่มจาก 0.3 เป็น 0.6		
	อัตราส่วนอากาศ:กะลาปาล์ม:กลีเซอรอล		
	100:0	85:15	70:30
CO + H ₂ + CH ₄	-8.55	-6.60	-10.08
CO ₂ + CO + H ₂ + CH ₄	+3.46	+5.57	+0.66
ถ่านชาร์	-13.61	-15.43	-16.70
น้ำมันทาร์	-47.05	-60.69	+7.05

- + คือ องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น (เปรียบเทียบกันระหว่างอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3 และ 0.6)
- คือ องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ลดลง (เปรียบเทียบกันระหว่างอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0.3 และ 0.6)

4.4.3 ผลของการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีอัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจาก 0 เป็น 0.6 จะทำให้อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงในทุก ๆ อัตราส่วนอากาศกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล โดยที่อัตราส่วนอากาศกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 100:0 อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะลดลงจาก 0.26 เป็น 0.16 ส่วนที่อัตราส่วนอากาศกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 85:15 อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะลดลงจาก 0.31 เป็น 0.28 และที่อัตราส่วนอากาศกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 70:30 อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะลดลงจาก 0.37 เป็น 0.28 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจาก 0 เป็น 0.6 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 ผลของการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีอัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (ที่อัตราส่วนอากาศกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 100:0, 85:15 และ 70:30 และอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส)

จากการทดลองนี้จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าต่ำ ยังไม่สามารถนำไปใช้ในเป็นสารตั้งต้นที่จะใช้ในกระบวนการต่าง ๆ เช่น การสังเคราะห์เมทานอล ไดเมทิลอีเธอร์ได้ หากจะนำไปใช้ในการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเธอร์ ต้องมีอัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 1:1 ดังนั้นจึงมีความจำเป็น

เติมไอน้ำในปฏิกิริยาแกซีฟิเคชันหรือมีการเติมตัวเร่ง เช่น นิกเกิล ลงในชีวมวล เพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้น และจะช่วยให้อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าสูงขึ้น เป็นการปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์แก๊สเพื่อให้นำไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น

ตารางที่ 4.18 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีต่ออัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

	อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเพิ่มจาก 0 เป็น 0.6		
	อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล		
	100:0	85:15	70:30
อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์	-38.79	-8.79	-24.01

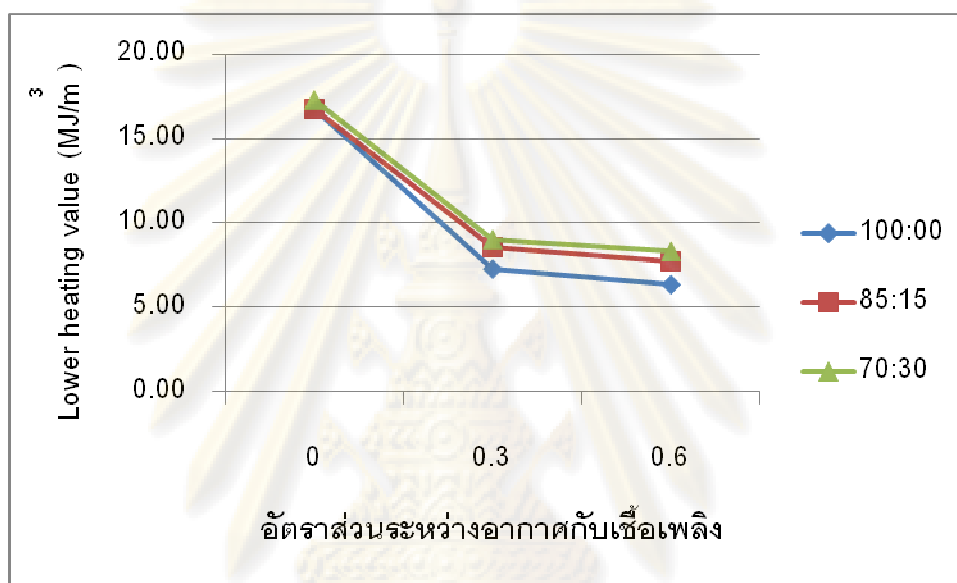
- คือ อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง (เปรียบเทียบกันระหว่างอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0 และ 0.3)

4.4.4 ผลของการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีต่อค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้

จากการทดลองสามารถคำนวณหาค่าความร้อนต่ำสุดของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ตามสมการ (4.7)

จากการคำนวณที่ได้พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจาก 0 เป็น 0.6 ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีแนวโน้มลดต่ำลงตามอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่เพิ่ม เนื่องจากการลดลงของแก๊สมีเทน แม้ว่าแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนจะเพิ่มมากขึ้น แต่ค่าความร้อนของแก๊สทั้งสองชนิดต่ำกว่ามีเทนค่อนข้างมาก ทำให้ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ลดลง โดยผลที่ได้นี้เป็นไปในแนวโน้มเดียวกันในทุก ๆ อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล โดยที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 100:0 ค่าความร้อนของแก๊สลดลงจาก 16.75 MJ/m^3 เป็น 6.36 MJ/m^3 ที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 85:15 ค่าความร้อนของแก๊สลดลงจาก 16.74 MJ/m^3 เป็น 7.74 MJ/m^3 และที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 70:30 ค่าความร้อนของแก๊สลดลงจาก 17.32 MJ/m^3 เป็น 8.33 MJ/m^3 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจาก 0 เป็น 0.6 ดังแสดงในรูปที่ 4.35 เมื่อพิจารณาจากค่าความร้อนที่ได้พบว่าเชื้อเพลิงแก๊สที่ได้มีค่าความร้อนปานกลาง

สภาวะที่สามารถทำให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีค่าความร้อนต่ำแบบรวมแก๊สพาสสูงที่สุดจากงานวิจัยนี้ คือ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 70:30 และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0 โดยค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์เท่ากับ 17.62 MJ/m^3 จึงเชื้อเพลิงแก๊สที่ได้มีค่าความร้อนปานกลาง สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เมื่อผ่านการปรับปรุงคุณภาพ

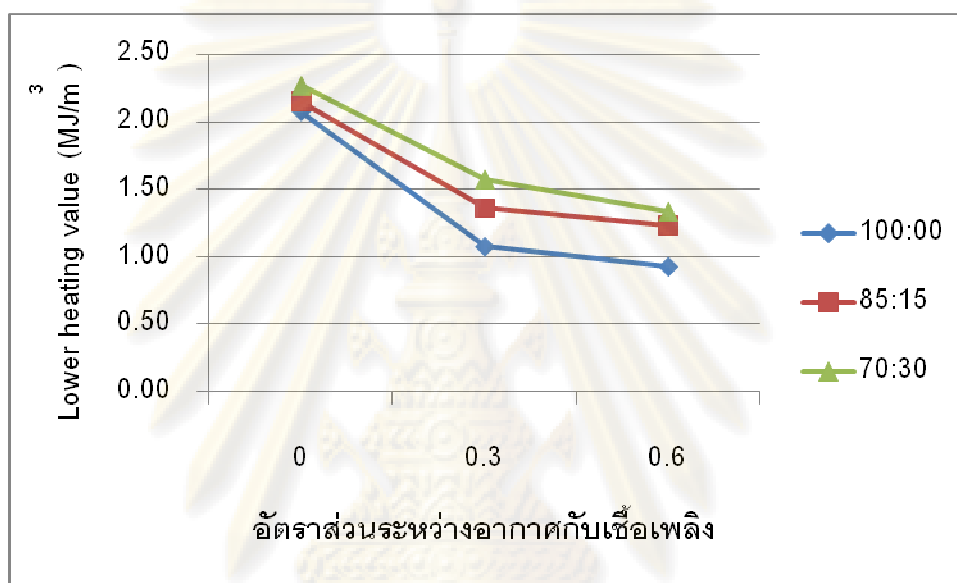


รูปที่ 4.35 ผลของการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีต่อค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สแบบไม่รวมแก๊สพาส (ที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 100:0, 85:15 และ 70:30 และอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส)

ค่าความร้อนต่ำของผลิตภัณฑ์แก๊สที่คำนวณได้ เป็นการคำนวณโดยค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้โดยที่ยังไม่ได้รวมปริมาตรของแก๊สพาสที่ใช้ในการทดลอง โดยแก๊สพาสนี้ทำให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ถูกเจือจาง ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้แบบรวมแก๊สพาสจึงต่ำกว่าค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สแบบไม่รวมแก๊สพาส จึงต้องคำนวณค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์แบบรวมแก๊สพาสตามสมการที่ (4.8)

จากการคำนวณที่ได้พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจาก 0 เป็น 0.6 ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีแนวโน้มลดต่ำลงตามอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง

ที่เพิ่ม โดยผลที่ได้นี้เป็นไปในแนวโน้มเดียวกันในทุก ๆ อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล โดยที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 100:0 ค่าความร้อนของแก๊สลดลงจาก 2.07 MJ/m^3 เป็น 0.93 MJ/m^3 ที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 85:15 ค่าความร้อนของแก๊สลดลงจาก 2.15 MJ/m^3 เป็น 1.23 MJ/m^3 และที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 70:30 ค่าความร้อนของแก๊สลดลงจาก 2.27 MJ/m^3 เป็น 1.34 MJ/m^3 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง จาก 0 เป็น 0.6 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.36 ผลของการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีต่อค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สแบบรวมแก๊สพา (ที่อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 100:0, 85:15 และ 70:30 และ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส)

โดยสภาวะที่สามารถให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีค่าความร้อนต่ำแบบไม่รวมแก๊สพาสูงที่สุด จากงานวิจัยนี้ คือ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 70:30 และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0 โดยค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สเท่ากับ 2.27 MJ/m^3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.19 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีต่อค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ต่อหน้าที่

	อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเพิ่มจาก 0 เป็น 0.6		
	อัตราส่วนอากาศกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล		
	100:0	85:15	70:30
ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ต่อหน้าที่	-55.27	-42.85	-41.23

- คือ ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ต่อหน้าที่ลดลง (เปรียบเทียบกันระหว่างอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง 0 และ 0.6)

จากตารางที่ 4.19 เห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจาก 0 เป็น 0.6 จะทำให้ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ลดลง ในทุก ๆ อัตราส่วนอากาศกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล โดยที่อัตราส่วนอากาศกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล 100:0 ค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ลดลงมากที่สุดเมื่ออัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเพิ่ม

เมื่อนำผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ใช้วัตถุดิบเป็นชีวมวลและกลีเซอรอล และมีคุณสมบัติในการทดลองใกล้เคียงกัน เห็นได้ว่าค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่น ๆ โดยวัตถุดิบที่ใช้ ภาวะการทดลอง และค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สของแต่ละงานวิจัยเป็นดังแสดงตารางที่ 4.20

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.20 การเปรียบเทียบผลงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ

	วัตถุดิบที่ใช้ ในการศึกษา	ภาวะการทดลอง	ค่าความร้อน ต่ำของแก๊ส ผลิตภัณฑ์ (MJ/m ³)
Jiang และ Morey (1992)	ซังข้าวโพด	อัตราการป้อนวัตถุดิบ 14.2 - 20 กิโลกรัมต่อ ชั่วโมง, อุณหภูมิ 920-1050°K, อัตราการป้อน อากาศ 1390 กิโลกรัมต่อชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร	4 - 5
Yang และ คณะ (2006)	กะลาปาล์ม ใยปาล์มและ ทะเลายเปล่า	ไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500-900°C, อัตราการป้อน วัตถุดิบ 1 กรัมต่อนาที, อัตราการป้อนไนโตรเจน 5 ลิตรต่อนาที	8 - 15
Valliyappan (2004)	กลีเซอรอล	ไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 650-800°C, อัตราการป้อน วัตถุดิบ 30 มิลลิลิตรต่อนาที	13 - 22
วัชราวลี จรัสมาศ (2551)	กากสับดำ และกาก สับดำผสม กลีเซอรอล	อัตราการป้อนวัตถุดิบ 5 กรัมต่อนาที, อุณหภูมิ 700-900°C, ER 0-0.6, อัตราการป้อนแก๊สพา 15 ลิตรต่อนาที	3 - 17
ฐานิสรา ชูชัย (2551)	กากกะลา ปาล์มและ กาก กะลาปาล์ม ผสม กลีเซอรอล	อัตราการป้อนวัตถุดิบ 5 กรัมต่อนาที, อุณหภูมิ 700-900°C, ER 0-0.6, อัตราการป้อนแก๊สพา 15 ลิตรต่อนาที	4 - 17

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ แบ่งเป็น ผลิตภัณฑ์แก๊ส ถ่านชาร์และน้ำมันทาร์ โดยตัวแปรที่ทำการศึกษได้แก่ อุณหภูมิ อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง สามารถสรุปผลวิจัยได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ผลของการเปลี่ยนอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ คือ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียสที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น การแปรสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น 8.16% การแปรสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง 14.26% และการแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น 107.40% ขณะที่การแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นแก๊สมีเทนค่อนข้างคงที่ มีการเพิ่ม-ลดไม่มากนัก ในขณะที่องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ คือ ร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น 5.24% ร้อยละของถ่านชาร์ลดลง 16.00% และร้อยละน้ำมันทาร์ลดลง 44.82% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น 84.01% และค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น 10.96% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ

5.1.2 ผลของการเปลี่ยนอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอล คือ 100:0, 85:15 และ 70:30 ที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส พบว่าเมื่ออัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลเพิ่มสูงขึ้น องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส ได้แก่ การแปรสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น 43.92% และการแปรสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น 71.40% ขณะที่การแปรสภาพของคาร์บอนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง 5.44% ขณะที่การแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น 89.60% และการแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น 37.26% ในขณะที่ผลของการเพิ่มอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ คือ ร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น 4.68% ร้อยละของถ่านชาร์ลดลง 59.55% และร้อยละน้ำมันทาร์ลดลง 15.01% เมื่ออัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กลีเซอรอลเพิ่มสูงขึ้น อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น

68.14% และค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น 51.47% เมื่อเพิ่มอัตราส่วนกากกะลาปาล์ม: กาลีเซอรอล

5.1.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง คือ 0, 0.3 และ 0.6 ที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจาก 0 เป็น 0.3 การแปรสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น 338.18% และการแปรสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น 38.48% และการแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น 33.89% ขณะที่การแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นแก๊สมีเทนลดลง 66.38% และ 67.01% ตามลำดับ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจาก 0.3 เป็น 0.6 การแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน ลดลง 7.77% และ 26.31% ตามลำดับ โดยที่การแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นแก๊สมีเทนลดลง 12.55% และ 12.94% ตามลำดับ ในขณะที่การเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจาก 0 เป็น 0.6 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ คือ ร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น 110.19 % ร้อยละของถ่านชาร์ลดลง 75.83% และร้อยละน้ำมันชาร์ลดลง 93.76% อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง 23.18% และค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สลดลง 46.24% เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราส่วนกากกะลาปาล์ม:กาลีเซอรอล และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นงานวิจัยพื้นฐานในการนำผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ไปใช้ประโยชน์ ดังนั้นการที่จะนำการวิจัยนี้ไปใช้ประโยชน์จะต้องมีการนำผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มาผลิตเป็นเชื้อเพลิงแก๊สเพื่อให้ได้เป็นเชื้อเพลิงที่สะอาด เหมาะที่จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซลได้ต่อไปในอนาคต รวมทั้งการศึกษาวิจัยกากของเสียอื่น ๆ ที่มีจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เพื่อทำการพัฒนาระบบผลิตพลังงานจากของเสียเหล่านี้เพื่อเป็นแหล่งเชื้อเพลิงทดแทนในอนาคต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- จิระศักดิ์ แสงพุ่ม. 2530. การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านไม้ในฟลูอิดไครซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชูศักดิ์ โภคะนุทรานนท์. 2536. การคาร์บอนไนท์แกลบในฟลูอิดไครซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ฉัตรชัย ธนศรีสุข. 2541. การกำจัดกำมะถันจากถ่านหินโดยไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ. วิทยานิพนธ์
ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เฉลิมพล ใจหนัก. 2547. การศึกษาการผลิตก๊าซจากลิกไนต์โดยใช้เทคโนโลยีแบบเบดนิ่ง. วิทยา
นิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เบญจมาศ ปุยอ็อก. 2547. แก๊สพีเคชั่นของแบลกลิเคอร์เร่งปฏิกิริยาด้วยเหล็กบนโคโลไมต์.
วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.
- พรทิพย์ แก้ววรานนท์ชัย. 2534. แบบจำลองของการแก๊สพีเคชั่นจากถ่านไม้ในฟลูอิดไครซ์เบด.
วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พรรณนีย์ วิชาชู. 2550. www.doa.go.th/th/thShowArticles.aspx?id=1495. กรุงเทพฯ : กรม
วิชาการเกษตร.
- พิสมัย เจนวนิชปัญกุล. 2545. น้ำมันไบโอดีเซล : พลังงานทางเลือก. วารสารวิทยาศาสตร์และ
เทคโนโลยี ปีที่ 16 ฉบับที่ 13 : 18-31.
- วสิน กางมู. 2545. การทำไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์จากแก๊สสังเคราะห์โดยวอเตอร์แก๊สชิฟต์และตัว
ดูดซับทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.
- วิภาดา ศรีสุนาคร้ว และ เอกสิทธิ์ เลิศสกุลทอง. 2548. การทำทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของน้ำมัน
ปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา MgAl hydrotalcite. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริม
ประสบการณ์ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุกัญญา มากมี. 2547. การทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชในภาวะเหนือวิกฤติโดย
กระบวนการแบบต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะ
วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- สุพัตรา ชีวธนาคุปต์. 2546. แก๊สสังเคราะห์จากแก๊ซพีเคชั่นของยูคาลิปตัส. วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สินีนางุ รอดจีน. 2547. ไพโรไลซิสของชีวมวลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในฟลูอิดไธร์เบดแบบหมุนเวียน.
วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.
- ศิตา เบ็ญจพกุลพงศ์. 2548. การเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแบบวิวิธพันธุ์ของน้ำมัน
เมล็ดในปาล์มและน้ำมันมะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อนวรรณ เกตุคง. 2547. แก๊ซพีเคชั่นของไม้ยูคาลิปตัสบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/ไดไลไมต์. วิทยา
นิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อาภาณี เหลืองนฤมิตรชัย. 2538. การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากแกลบในเบดนิ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Antal, Jr. M. J. 1982. A review of Literature Part 1-Carbohydrate Pyrolysis. Part 2-
Lignocellulose Pyrolysis. Advances in Solar Energy. New York, American Solar
Energy Society
- Cao, Y., Wang, Y., John T. R. and Pan, W. 2006. A novel biomass air gasification
process for producing tar-free higher heating value fuel gas. Fuel Processing
Technology. 87 : 343 – 353.
- Dogru, M., Howarth, C. R., Akay, G., Keskinler, B. and Malik, A. A. 2002. Gasification of
hazelnut shells in a downdraft gasifier. Energy. 27 : 415-427.
- Gañan, J., Abdulla, A. A., Miranda, A. B., Turegano, J., Correiac, S. and Cuerdad, E. M.
2005. Energy production by means of gasification process of residuals sourced
in Extremadura (Spain). Renewable Energy. 30 : 1759-1769.
- Hussain, A., Ani, F. N., Darus, A. N., Mokhtar, H., Azam, H. and Mustafa, A. 2006.
Thermochemical behaviour of empty fruit bunches and oil palm shell waste in a
Circulating Fluidized-Bed Combustor. Journal of Oil Palm Research. 18 : 210-
218.

- Jiang, H. and Morey, R. V. 1992. Air gasification of comcobs at fluidization. Biomass and Bioenergy. 3 : 87-92.
- Kelly-Yong, T. L., Lee, K. T., Mohamed, A. R., and Bhatia, S. 2007. Potential of hydrogen from oil palm biomass as a source of renewable energy worldwide. Energy Policy. 37 : 5692-5701.
- Khater, E. M. H., El-Ibiary, N. N., Khattab I. A. and Hamad, M. A. 1992. Gasification of rice huck. Biomass and Bioenergy. 3 : 329-333.
- Kusdiana, D.; and Saka, S. 2004. Effect of water on biodiesel fuel production by supercritical methanol treatment. Bioresource Technology. 91 : 289-295.
- Mansaray, K. G., Ghaly, A. E., Al-Taweel, A. M., Hamdullahpur, F. and Ugursa, V. I. 1999. Air gasification of rice husk in a dual distributor type fluidized bed gasifier. Biomass and Bioenergy. 17 : 315-332.
- Larminie, J. and Dicks, A. 2000. Fuel Cell System Explained. USA : WILEY&SONS.
- Lv, P., Yuan, Z., Ma, L., Wu, C., Chen, Y. และ Zhu, J. 2007. Hydrogen-rich gas production from biomass air and oxygen/steam gasification in a downdraft gasifier. Renewable Energy. 32 : 2173-2185.
- Probst, R. F. and Hicks, R. E. 1982. Synthesis Fuels. USA : McGraw-Hills.
- 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.
- Valliyappan, T. 2004. Hydrogen or syn gas production from glycerol using pyrolysis and steam gasification processes. Master's Thesis. Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Saskatchewan.
- Xiao, R., Jin, B., Zhou, H., Zhong, z. and Zhang, M. 2007. Air gasification of polypropylene plastic waste in fluidized bed gasifier. Energy Conversion and Management. 47 : 778-786.
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., Liang, D. T. and Zheng, C. 2006. Pyrolysis of palm oil wastes for enhanced production of hydrogen rich gases. Fuel Processing Technology. 87 : 935-942.
- Zhang, R., Cummer, K., Suby, A. and Brown, R. C. 2005. Biomass-derived hydrogen from an air-blown gasifier. Fuel Processing Technology. 86 : 861-874.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

วิธีการทดสอบสำหรับการวิเคราะห์เชื้อเพลิงไม้

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis)

1.1 วิเคราะห์ความชื้น (Moisture analysis) : ASTM E871

อุปกรณ์ที่ใช้

1. เตาอบ
2. ภาชนะสำหรับบรรจุตัวอย่างทดสอบซึ่งอาจทำจากแก้ว โลหะ หรือเซรามิก
3. เดสสิเคเตอร์ (desiccators)

วิธีการทดสอบ

1. อบภาชนะที่อุณหภูมิ 103 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำภาชนะไปวางในเดสสิเคเตอร์จนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ซึ่งน้ำหนักภาชนะโดยผลต่างไม่เกิน 0.02 กรัม บันทึกน้ำหนัก (W_0) จากนั้นใส่ตัวอย่าง ประมาณ 50 กรัม ลงในภาชนะซึ่งน้ำหนักตัวอย่างและภาชนะ โดยผลต่างไม่เกิน 0.01 กรัม บันทึกน้ำหนักเริ่มต้น (W_1)
2. อบภาชนะบรรจุตัวอย่างที่อุณหภูมิ 103 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง
3. นำภาชนะที่บรรจุตัวอย่างออกจากเตาอบ จากนั้นนำไปวางที่เดสสิเคเตอร์จนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ซึ่งน้ำหนักโดยผลต่างไม่เกิน 0.01 กรัม บันทึกน้ำหนัก
4. อบภาชนะซึ่งบรรจุตัวอย่างอีกครั้งที่อุณหภูมิ 103 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำตามขั้นตอน 3
5. ทำตามขั้นตอน 4 จนกระทั่งน้ำหนักรวมมีค่าไม่เกิน 0.2% บันทึกน้ำหนักสุดท้าย (W_2)

ศูนย์วิจัยทรัพยากรชีวภาพและ
จุพาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{Moisture\%} = 100[(W_i - W_f)/(W_i - W_c)]$$

เมื่อ W_c = น้ำหนักภาชนะ, กรัม

W_i = น้ำหนักเริ่มต้น, กรัม

W_f = น้ำหนักสุดท้าย, กรัม

1.2 วิเคราะห์สารระเหย (Volatile matter) : ASTM E872

อุปกรณ์ที่ใช้

1. crucible พร้อมฝาปิดซึ่งอาจเป็น platinum crucible หรือ nickel-chromium crucible

2. Vertical electric tube furnace

วิธีการทดสอบ

1. ชั่งน้ำหนัก crucible พร้อมฝาปิด โดยผลต่างไม่เกิน 0.01 กรัม บันทึกน้ำหนัก (W_c)

2. ใส่ตัวอย่างทดสอบประมาณ 1 กรัม ลงใน crucible จากนั้นปิดฝา แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก โดยผลต่างไม่เกิน 0.01 กรัม บันทึกน้ำหนักเริ่มต้น (W_i)

3. วาง crucible ใน wire support จากนั้นสอดเข้าไปใน furnace chamber ซึ่งมีอุณหภูมิคงที่ที่ 950 ± 20 องศาเซลเซียส วางกลางเตาซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการให้ความร้อน 7 นาที

4. นำ crucible ซึ่งยังปิดฝายู่ออกจาก furnace นำ crucible ไปวางในเดสลิเคเตอร์ จนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนัก crucible ซึ่งยังมีตัวอย่างบรรจุอยู่ โดยผลต่างไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัม บันทึกน้ำหนักสุดท้าย (W_f)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{Weight loss\%} = [(W_i - W_f)/(W_i - W_c)] \times 100 = A$$

เมื่อ W_c = น้ำหนักภาชนะ, กรัม

W_i = น้ำหนักเริ่มต้น, กรัม

W_f = น้ำหนักสุดท้าย, กรัม

Volatile matter ในตัวอย่าง% = A-B

เมื่อ A = weight loss%

B = Moisture%

1.3 วิเคราะห์เถ้า (Ash) : ตามมาตรฐาน ASTM D1102

อุปกรณ์ที่ใช้

1. crucible พร้อมฝาปิด ซึ่งอาจจะเป็น platinum crucible หรือ porcelain crucible ก็ได้
2. Muffle Furnace
3. เตาอบ (Drying Oven)
4. ตะแกรงร่อนเบอร์ 40 (425 ไมโครเมตร)

วิธีการทดสอบ

1. เฝา crucible พร้อมฝาปิดใน muffle furnace ที่อุณหภูมิ มี 600 องศาเซลเซียส จากนั้นไปวางในเดสสิเคเตอร์ จนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ซึ่งน้ำหนัก โดยผลต่างไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัม บันทึกน้ำหนัก
2. ตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์จะต้องผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 40 ก่อน จากนั้นชั่งน้ำหนัก crucible พร้อมตัวอย่างทดสอบ
3. อบ crucible ซึ่งบรรจุตัวอย่างทดสอบที่อุณหภูมิ มี 100-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ขณะอบเปิดฝา crucible ออก)
4. หลังจากอบ 1 ชั่วโมง นำ crucible ออกจากเตาอบ (ขณะออกจากเตาอบ เปิดฝา crucible) จนกระทั่งมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ซึ่งน้ำหนัก
5. อบอีกครั้งแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก จนกระทั่งน้ำหนักคงที่โดยผลต่างไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัม บันทึกน้ำหนัก
6. วาง crucible ซึ่งบรรจุตัวอย่างหลังอบในเตาเผา (เปิดฝา crucible ออก) อุณหภูมิในการเผา 580-600 ระวังอย่าให้อุณหภูมิสูงเกิน 600 องศาเซลเซียส
7. นำ crucible ซึ่งบรรจุตัวอย่างหลังอบในเตาเผา (เปิดฝา crucible) วางใน เดสสิเคเตอร์ จนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ซึ่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปเผา อีกครั้งเป็นเวลา 30 นาที วางในเดสสิเคเตอร์นำไปชั่งน้ำหนัก จนกระทั่ง น้ำหนักคงที่โดยผลต่างไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัม

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\%Ash = W_1/W_2 \times 100$$

W_1 = น้ำหนักเถ้า, กรัม

W_2 = น้ำหนัก oven – dry sample, กรัม

(oven – dry sample = น้ำหนัก crucible ซึ่งบรรจุตัวอย่างหลังอบ – น้ำหนัก crucible)

1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

ร้อยละของคาร์บอนคงตัว = 100 - ร้อยละของความชื้น - ร้อยละของเถ้า - ร้อยละ
ของสารระเหย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างวิธีการคำนวณการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ (%conversion)

ทราบค่า

คาร์บอนในกากกะลาปาล์ม เท่ากับ	44.90%
ป้อนตัวอย่างเข้าสู่ระบบ	5 กรัม/นาที่
จึงเท่ากับป้อนคาร์บอนเข้าสู่ระบบ	$5 \times 0.4490 = 2.2450$ กรัม/นาที่
ไฮโดรเจนในกากกะลาปาล์ม เท่ากับ	5.51 %
ป้อนตัวอย่างเข้าสู่ระบบ	5 กรัม/นาที่
จึงเท่ากับป้อนคาร์บอนเข้าสู่ระบบ	$5 \times 0.0551 = 0.2755$ กรัม/นาที่
Vol.% ของ CO ₂	2.65 %
วัดอัตราการไหลของก๊าซขาออกได้	15.7872 ลิตร/นาที่
จึงเท่ากับมี Vol.ของ CO ₂	$(2.65 \times 15.7872)/100$ = 0.4184 ลิตร/นาที่
เท่ากับมี CO ₂	$= 0.4184/22.4 \text{ mol} = 0.0187 \text{ mol}$ $= 0.0187 \times (12+16+16)$ = 0.8218 กรัม
ซึ่งใน CO ₂ 0.8218 กรัม จะมี C อยู่	$= (0.8218 \times 12)/(12+16+16)$ = 0.2241 กรัม
ดังนั้น % C conversion ของ CO ₂ จึง	$= (0.2241/2.2450) \times 100$ = 9.98%
Vol.% ของ CO	4.77 %
วัดอัตราการไหลของก๊าซขาออกได้	15.7872 ลิตร/นาที่
จึงเท่ากับมี Vol.ของ CO	$(4.77 \times 15.7872)/100$ = 0.7530 ลิตร/นาที่
เท่ากับมี CO	$= 0.7530/22.4 \text{ mol} = 0.0336 \text{ mol}$ $= 0.0336 \times (12+16)$

$$\begin{aligned}
 &= 0.9413 \text{ กรัม} \\
 \text{ซึ่งใน CO 0.9413 กรัม จะมี C อยู่} &= (0.9413 \times 12)/(12+16) \\
 &= 0.4034 \text{ กรัม} \\
 \text{ดังนั้น \% C conversion ของ CO}_2 \text{ จึง} &= (0.4034/2.2450) \times 100 \\
 &= 17.97\% \\
 \\
 \text{Vol. \% ของ H}_2 &= 0.37 \% \\
 \text{วัดอัตราการไหลของก๊าซขาออกได้} &= 15.7872 \text{ ลิตร/นาที} \\
 \text{จึงเท่ากับมี Vol. ของ H}_2 &= (0.37 \times 15.7872)/100 \\
 &= 0.0584 \text{ ลิตร/นาที} \\
 \text{เท่ากับมี H}_2 &= 0.0584/22.4 \text{ mol} = 0.0026 \text{ mol} \\
 &= 0.0026 \times (1 \times 2) = 0.0052 \text{ กรัม} \\
 \text{ซึ่งใน H}_2 \text{ 0.8218 กรัม จะมี H อยู่} &= (0.0052 \times 2)/(1 \times 2) \\
 &= 0.0052 \text{ กรัม} \\
 \text{ดังนั้น \% H conversion ของ H}_2 \text{ จึง} &= (0.0052/0.2755) \times 100 = 1.89\% \\
 \\
 \text{Vol. \% ของ CH}_4 &= 2.60 \% \\
 \text{วัดอัตราการไหลของก๊าซขาออกได้} &= 15.7872 \text{ ลิตร/นาที} \\
 \text{จึงเท่ากับมี Vol. ของ CH}_4 &= (2.60 \times 15.7872)/100 \\
 &= 0.4105 \text{ ลิตร/นาที} \\
 \text{เท่ากับมี CH}_4 &= 0.4105/22.4 \text{ mol} = 0.0183 \text{ mol} \\
 &= 0.0183 \times (12+(1 \times 4)) \\
 &= 0.2932 \text{ กรัม} \\
 \text{ซึ่งใน CH}_4 \text{ 0.2932 กรัม จะมี C อยู่} &= (0.2932 \times 12)/(12+(1 \times 4)) \\
 &= 0.2199 \text{ กรัม} \\
 \text{ดังนั้น \% C conversion ของ CH}_4 \text{ จึง} &= (0.2199/2.2450) \times 100 \\
 &= 9.79\% \\
 \text{ซึ่งใน CH}_4 \text{ 0.2932 กรัม จะมี H อยู่} &= (0.2932 \times (1 \times 4))/(12+(1 \times 4)) \\
 &= 0.0733 \text{ กรัม} \\
 \text{ดังนั้น \% C conversion ของ CH}_4 \text{ จึง} &= (0.0733/0.2755) \times 100 \\
 &= 26.61\%
 \end{aligned}$$

ภาคผนวก ค

ข้อมูลผลการทดลอง

ตารางที่ ค.1 ผลของสภาวะต่างๆ ที่มีผลต่อการแปลงสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	อัตราส่วน ระหว่าง อากาศกับ เชื้อเพลิง	อัตราส่วนภาค กะลาปาล์ม: กลีเซอรอล	การแปลงสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊ส ผลิตภัณฑ์ต่างๆ (wt.)			
			CO ₂	CO	CH ₄	Total
700	0	100:0	9.98	17.97	9.79	37.75
700	0	85:15	8.53	18.38	10.78	37.68
700	0	70:30	7.15	19.21	11.34	37.70
700	0.3	100:0	36.33	21.48	3.89	61.69
700	0.3	85:15	33.47	26.79	4.18	64.44
700	0.3	70:30	33.50	32.28	5.43	71.22
700	0.6	100:0	41.55	16.75	0.79	59.09
700	0.6	85:15	41.86	20.71	1.12	63.69
700	0.6	70:30	42.02	22.89	3.50	68.40
800	0	100:0	8.37	19.70	11.37	39.43
800	0	85:15	8.54	20.35	12.25	41.13
800	0	70:30	7.37	21.17	14.86	43.40
800	0.3	100:0	36.83	22.68	2.97	62.48
800	0.3	85:15	33.11	27.85	5.12	66.09
800	0.3	70:30	33.92	33.58	5.52	73.02
800	0.6	100:0	39.13	20.45	2.13	61.71
800	0.6	85:15	38.77	22.72	4.29	65.79
800	0.6	70:30	38.83	25.95	4.88	69.66

ตารางที่ ค.1 ผลของสภาวะต่าง ๆ ที่มีผลต่อการแปลงสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ (ต่อ)

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	อัตราส่วน ระหว่าง อากาศกับ เชื้อเพลิง	อัตราส่วนกาก กะลาปาล์ม: กลีเซอรอล	การแปลงสภาพของคาร์บอนเป็นแก๊ส ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ (wt.)			
			CO ₂	CO	CH ₄	Total
900	0	100:0	8.29	20.97	13.61	42.88
900	0	85:15	8.45	22.14	14.37	44.97
900	0	70:30	6.84	23.35	15.47	45.67
900	0.3	100:0	35.05	26.60	3.11	64.75
900	0.3	85:15	33.44	29.46	5.38	68.28
900	0.3	70:30	34.89	35.97	6.12	76.99
900	0.6	100:0	38.47	24.72	2.43	65.62
900	0.6	85:15	37.87	27.70	4.76	70.33
900	0.6	70:30	37.88	32.46	5.58	75.92

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.2 ผลของสภาวะต่าง ๆ ที่มีผลต่อการแปลงสภาพของไฮโดรเจนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	อัตราส่วน ระหว่าง อากาศกับ เชื้อเพลิง	อัตราส่วนกาก กะลาปาล์ม: กลีเซอรอล	การแปลงสภาพของไฮโดรเจนเป็นแก๊ส ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ (wt.)		
			H ₂	CH ₄	Total
700	0	100:0	1.89	26.61	28.50
700	0	85:15	2.87	26.12	28.99
700	0	70:30	4.17	24.67	28.84
700	0.3	100:0	3.84	10.56	14.40
700	0.3	85:15	3.47	10.14	13.61
700	0.3	70:30	9.02	11.82	20.84
700	0.6	100:0	3.18	2.16	5.33
700	0.6	85:15	3.28	2.71	5.99
700	0.6	70:30	6.69	7.61	14.30
800	0	100:0	4.12	30.87	34.99
800	0	85:15	4.36	29.69	34.05
800	0	70:30	5.40	32.32	37.72
800	0.3	100:0	4.90	8.06	12.96
800	0.3	85:15	6.20	12.41	18.61
800	0.3	70:30	11.47	12.00	23.47
800	0.6	100:0	4.00	5.79	9.79
800	0.6	85:15	5.49	10.40	15.89
800	0.6	70:30	10.14	10.62	20.76

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.2 ผลของสภาวะต่าง ๆ ที่มีผลต่อการแปลงสภาพของไฮโดรเจนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์
(ต่อ)

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	อัตราส่วน ระหว่าง อากาศกับ เชื้อเพลิง	อัตราส่วนกาก กะลาปาล์ม: กลีเซอรอล	การแปลงสภาพของไฮโดรเจนเป็นแก๊ส ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ (wt.)		
			H ₂	CH ₄	Total
900	0	100:0	7.54	36.98	44.52
900	0	85:15	8.29	34.84	43.13
900	0	70:30	9.52	33.65	43.17
900	0.3	100:0	9.36	8.44	17.80
900	0.3	85:15	10.69	13.04	23.73
900	0.3	70:30	13.82	13.32	27.14
900	0.6	100:0	5.44	6.61	12.06
900	0.6	85:15	9.46	11.55	21.01
900	0.6	70:30	10.05	12.13	22.19

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.3 ผลของสภาวะต่าง ๆ ที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	อัตราส่วน ระหว่างอากาศ กับเชื้อเพลิง	อัตราส่วนกาก กะลาปาล์ม: กลีเซอรอล	ร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์		
			แก๊ส	ถ่านชาร์	น้ำมันทาร์
700	0	100:0	41.23	28.14	30.63
700	0	85:15	38.79	23.54	37.67
700	0	70:30	36.76	21.19	42.05
700	0.3	100:0	84.85	8.90	6.25
700	0.3	85:15	83.46	7.68	8.86
700	0.3	70:30	87.57	5.54	6.89
700	0.6	100:0	86.60	7.53	5.87
700	0.6	85:15	88.90	5.29	5.81
700	0.6	70:30	90.27	4.38	5.35
800	0	100:0	41.45	24.48	34.07
800	0	85:15	41.76	22.33	35.91
800	0	70:30	41.10	20.69	38.21
800	0.3	100:0	86.45	8.15	5.40
800	0.3	85:15	84.68	7.53	7.79
800	0.3	70:30	89.72	5.24	5.04
800	0.6	100:0	87.34	7.31	5.35
800	0.6	85:15	87.99	6.98	5.03
800	0.6	70:30	89.35	6.75	3.90

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.3 ผลของสภาวะต่าง ๆ ที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ (ต่อ)

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	อัตราส่วน ระหว่างอากาศ กับเชื้อเพลิง	อัตราส่วนกาก กะลาปาล์ม: กลีเซอรอล	ร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์		
			แก๊ส	ถ่านชาร์	น้ำมันทาร์
900	0	100:0	44.19	23.97	31.84
900	0	85:15	44.93	21.64	33.43
900	0	70:30	43.06	19.28	37.66
900	0.3	100:0	87.94	7.86	4.20
900	0.3	85:15	87.26	6.35	6.39
900	0.3	70:30	94.08	4.37	1.55
900	0.6	100:0	90.99	6.79	2.22
900	0.6	85:15	92.12	5.37	2.51
900	0.6	70:30	94.70	3.64	1.66

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.4 ผลของสภาวะต่าง ๆ ที่มีต่ออัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	อัตราส่วน ระหว่างอากาศ กับเชื้อเพลิง	อัตราส่วนกาก กะลาปาล์ม: กลีเซอรอล	อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์
700	0	100:0	0.08
700	0	85:15	0.13
700	0	70:30	0.20
700	0.3	100:0	0.13
700	0.3	85:15	0.11
700	0.3	70:30	0.26
700	0.6	100:0	0.14
700	0.6	85:15	0.13
700	0.6	70:30	0.27
800	0	100:0	0.15
800	0	85:15	0.18
800	0	70:30	0.23
800	0.3	100:0	0.16
800	0.3	85:15	0.18
800	0.3	70:30	0.31
800	0.6	100:0	0.14
800	0.6	85:15	0.20
800	0.6	70:30	0.36

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.4 ผลของสภาวะต่าง ๆ ที่มีต่ออัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	อัตราส่วน ระหว่างอากาศ กับเชื้อเพลิง	อัตราส่วนกาก กะลาปาล์ม: กลีเซอรอล	อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์
900	0	100:0	0.26
900	0	85:15	0.31
900	0	70:30	0.37
900	0.3	100:0	0.26
900	0.3	85:15	0.30
900	0.3	70:30	0.35
900	0.6	100:0	0.16
900	0.6	85:15	0.28
900	0.6	70:30	0.28

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.4 ผลของสภาวะต่าง ๆ ที่มีต่อค่าความร้อนต่ำของแก๊สผลิตภัณฑ์

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	อัตราส่วน ระหว่าง อากาศกับ เชื้อเพลิง	อัตราส่วนกาก กะลาปาล์ม: กลีเซอรอล	ค่าความร้อนต่ำของ แก๊สผลิตภัณฑ์แบบไม่ รวมแก๊สพา (MJ/m ³)	ค่าความร้อนต่ำของ แก๊สผลิตภัณฑ์แบบรวม แก๊สพา (MJ/m ³)
700	0	100:0	15.13	1.57
700	0	85:15	16.05	1.66
700	0	70:30	16.66	1.73
700	0.3	100:0	6.83	1.00
700	0.3	85:15	7.71	1.14
700	0.3	70:30	8.70	1.48
700	0.6	100:0	4.32	0.64
700	0.6	85:15	4.98	0.77
700	0.6	70:30	6.45	1.09
800	0	100:0	16.19	1.79
800	0	85:15	16.40	1.86
800	0	70:30	17.62	2.09
800	0.3	100:0	6.53	0.95
800	0.3	85:15	8.29	1.26
800	0.3	70:30	8.80	1.52
800	0.6	100:0	5.67	0.81
800	0.6	85:15	6.96	1.05
800	0.6	70:30	7.64	1.22

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.4 ผลของสภาวะต่าง ๆ ที่มีต่อค่าความร้อนต่ำของแก๊สผลิตภัณฑ์ (ต่อ)

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	อัตราส่วน ระหว่างอากาศ กับเชื้อเพลิง	อัตราส่วนกาก กะลาปาล์ม: กลีเซอรอล	ค่าความร้อนต่ำ ของแก๊สผลิตภัณฑ์ (MJ/m ³)	ค่าความร้อนต่ำ ของแก๊สผลิตภัณฑ์ แบบรวมแก๊สพา (MJ/m ³)
900	0	100:0	16.75	2.07
900	0	85:15	16.74	2.15
900	0	70:30	17.32	2.27
900	0.3	100:0	7.28	1.07
900	0.3	85:15	8.56	1.36
900	0.3	70:30	9.04	1.58
900	0.6	100:0	6.36	0.93
900	0.6	85:15	7.74	1.23
900	0.6	70:30	8.33	1.34

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวฐานิสรา ชูชัย เกิดเมื่อวันที่ 18 มกราคม พุทธศักราช 2527 สถานที่เกิด กรุงเทพมหานคร จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสามเสนวิทยาลัย ในปี 2544 และจบการศึกษาระดับอุดมศึกษาวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2551



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย