

สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากการแกซีฟิเคชันของเปลือกถั่วดาวอินคา



นางสาวชลัฐธร ลักขณา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Optimal conditions for producing fuel gas from gasification of
Sacha inchi shell

Miss Chalattron Lakkhana



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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจาก การแกซิฟิเคชันของเปลือกถั่วดาวอินคา
โดย	นางสาวชลัฐธร ลักขณา
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.ดวงเดือน อางองค์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์)
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.ดวงเดือน อางองค์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชอาณาจักร)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัจฉริยา สุริยวงค์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. คณิต สูงประสิทธิ์)

ชลัฐธร ลักษณะ : สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากการแกซิฟิเคชันของเปลือกถั่วดาวอินคา (Optimal conditions for producing fuel gas from gasification of Sacha inchi shell) อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล, อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.ดวงเดือน อางองค์, 107 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากการแกซิฟิเคชันของเปลือกถั่วดาวอินคา ที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมัน โดยใช้ท่อปฏิกรณ์แบบปล่อยหล่น ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ขนาดเปลือกถั่ว 0.25-0.50 มิลลิเมตร และ 0.50-0.85 มิลลิเมตร อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 700-900 องศาเซลเซียส อัตราส่วนสมมูล 0.2-0.5 และศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ นิกเกิลร้อยละ 5 และ 10 บนตัวรองรับโคโลไมต์ ที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ซึ่งประกอบไปด้วย ของแข็ง (ถ่านชาร์) ของเหลว (น้ำมันดิน) และก๊าซ (คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจนและมีเทน) ผลการศึกษาพบว่า กระบวนการแกซิฟิเคชันของเปลือกถั่วดาวอินคาขนาด 0.50-0.85 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนสมมูล 0.2 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการแปรสภาพ โดยให้ค่าก๊าซสังเคราะห์ (ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน) ร้อยละ 57.57 ค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์ 2.27 MJ/m³ และร้อยละ 43.65 ตามลำดับ เมื่อศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยลดปริมาณน้ำมันดิน และช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของก๊าซผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะตัวเร่งนิกเกิลร้อยละ 5 ซึ่งช่วยลดปริมาณน้ำมันดินได้ถึงร้อยละ 2.87 และเพิ่มปริมาณก๊าซสังเคราะห์สูงสุดร้อยละ 72.45 ค่าความร้อนเท่ากับ 2.72 MJ/m³ และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์ร้อยละ 53.10 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเปลือกถั่วดาวอินคามีความเหมาะสม สามารถนำไปผลิตเป็นพลังงานผ่านกระบวนการดังกล่าวได้ ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการจัดการและกำจัดของเสียเหลือทิ้งชนิดนี้

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาร่วม

5770394821 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: SACHA INCHI SHELL / GASIFICATION / BIOMASS / DROP TUBE REACTOR

CHALATTHON LAKKHANA: Optimal conditions for producing fuel gas from gasification of Sacha inchi shell. ADVISOR: ASSOC. PROF. VIBOON SRICHAROENCHAikul, Ph.D., CO-ADVISOR: DUANGDUEN ATONG, Ph.D., 107 pp.

Sacha inchi shell residues from seed oil production were utilized in gasification process by using a drop tube reactor. The effects of particle sizes (0.25-0.50 mm and 0.50- 0.85 mm), reaction temperature (700-900 °C), equivalence ratio (0.2-0.5) and catalyst (calcined dolomite, 5% Ni/dolomite and 10% Ni/dolomite) were investigated. Products from this process composed of solid residue (char), liquid (tar) and gas (mainly CO₂, CO, H₂ and CH₄). The results showed that gasification of sachal inchi shell size 0.50-0.85 mm at 900°C and ER 0.2 was the optimal conversion condition. The conversion of carbon and hydrogen to synthesis gas (CO+H₂) was approximately 57.57 % with the lower heating value and cold gas efficiency were 2.27 MJ/m³ and 43.65 %, respectively. Addition of catalyst, especially 5% nickel, resulted in lower liquid content to 2.87 % and increase synthesis gas to 72.45 % with the lower heating value of 2.72 MJ/m³ and cold gas efficiency of 53.10 %. The results suggest that sachal inchi shell is suitable for production of quality fuel gas via this conversion process and is an appropriate option to manage and utilize these residues from seed oil production.

Department: Environmental
Engineering

Field of Study: Environmental
Engineering

Academic Year: 2016

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย หากปราศจากบุคคลดังกล่าวต่อไป งานวิจัยนี้อาจไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ ผู้จัดทำจึงใคร่ขอขอบพระคุณ ณา โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ และ ดร. ดวงเดือน อางองค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม เป็นอย่างสูงที่ได้ให้ความรู้ คำปรึกษาและคอยแนะนำ ตลอดจนข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง จนทำให้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ์ รัชฎาวงศ์ ประธานกรรมการสอบ ผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัจฉริยา สุริยะวงค์ และ ดร. คณิต สูงประสิทธิ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อีกทั้ง ให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความ สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่สั่งสอนและถ่ายทอดวิชาความรู้ต่างๆให้แก่ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ ตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

ขอขอบพระคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่ให้การสนับสนุนด้านอุปกรณ์ และสถานที่ในการทำวิจัย และขอบคุณ ดร.ศุภวรรณ วิชพันธ์ นักวิจัย คุณปัญญาลักษณ์ สอนเกตุ ผู้ช่วยนักวิจัยและช่างเทคนิคทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในด้านการใช้ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำวิจัยจนประสบความสำเร็จ

ขอบคุณมิตรภาพดีๆ จากพี่ๆ และเพื่อนๆ ลูกศิษย์อาจารย์วิบูลย์ ที่คอยให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือต่างๆ ตลอดจนกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอบคุณเพื่อนๆภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกคน สำหรับความช่วยเหลือและคอย เป็นกำลังใจให้เสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัว ที่คอยช่วยเหลือ เป็นกำลังใจ และเอาใจใส่อย่างดีเสมอมา จนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ชีวมวล (Biomass).....	4
2.1.1 ประเภทของชีวมวล.....	5
2.1.2 องค์ประกอบของชีวมวล.....	5
2.2 การเปลี่ยนชีวมวลไปเป็นพลังงาน.....	7
2.2.1 การเผาไหม้ (combustion).....	8
2.2.2 ไพโรไลซิส (Pyrolysis).....	8
2.2.3 แกซิฟิเคชัน (Gasification).....	9
2.3 เตาปฏิกรณ์แกซิฟาย.....	10
2.4 ประเภทของเตาปฏิกรณ์แกซิฟาย.....	11
2.4.1 ระบบฟิกส์เบด (Fixed bed).....	11

2.4.2 ระบบฟลูอิดไรซ์เบด (Fluidized bed).....	15
2.5 การเตรียมชีวมวลก่อนนำไปแปรรูปเป็นพลังงานในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	16
2.5.1 การอบแห้งชีวมวล (Biomass drying)	16
2.5.2 การบดและอัดแน่นของชีวมวล (Grinding and densification).....	17
2.6 ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการเกิดแก๊สซิฟิเคชัน.....	18
2.6.1 ขนาดอนุภาค (Size).....	18
2.6.2 รูปร่าง (Shape).....	18
2.6.3 โครงสร้าง (Structure).....	18
2.6.4 อุณหภูมิ (Temperature).....	18
2.6.5 ความดัน (Pressure).....	19
2.6.6 ตัวกลางของปฏิกิริยา (Gasifying agent)	19
2.6.7 สัดส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงและอัตราส่วนสมมูล (Air fuel ratio and equivalence ratio).....	20
2.7 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในงานวิจัย	20
2.8 ศักยภาพของชีวมวลในประเทศไทย	21
2.9 ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี	22
2.9.1 ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี	23
2.9.2 ตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี	23
2.9.3 การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดน้ำมันดิน	24
2.9.4 ปัจจัยที่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี.....	25
2.9.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดน้ำมันดิน	28
2.9.6 วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการเคลือบฝัง (Impregnation method).....	29
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29

บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	33
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	33
3.1.1 วัสดุและสารเคมี.....	33
3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	33
3.1.3 เครื่องมือวิเคราะห์.....	35
3.2 การเตรียมวัตถุดิบ.....	36
3.3 การเตรียมท่อปฏิกรณ์.....	37
3.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	39
3.5 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	40
3.6 การดำเนินงานวิจัย.....	41
3.6.1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติด้านความร้อนของเปลือกถั่วดาวอินคา.....	41
3.6.2 ศึกษากระบวนการแกซีเคชันของเปลือกถั่วดาวอินคาที่สภาวะต่างๆ.....	41
3.6.3 ศึกษากระบวนการแกซีฟิเคชันของเปลือกถั่วดาวอินคาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	42
3.6.4 วิเคราะห์ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแกซีฟิเคชัน.....	42
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	44
4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเปลือกถั่วดาวอินคา.....	44
4.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis).....	44
4.1.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis).....	45
4.1.3 การวิเคราะห์ค่าความร้อน.....	46
4.1.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบ.....	47
4.2 กระบวนการแกซีฟิเคชันของเปลือกถั่วดาวอินคาโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	47
4.2.1 ผลของขนาดเปลือกถั่วดาวอินคาที่มีต่อกระบวนการแกซีฟิเคชัน.....	47
4.2.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระบวนการแกซีฟิเคชัน.....	48

4.2.3 ผลของอัตราส่วนสมมูลที่มีต่อกระบวนการแกซีฟิเคชัน	57
4.3 กระบวนการแกซีฟิเคชันของเปลือกถั่วดาวอินคาเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	66
4.3.1 สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	66
4.3.2 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน	71
4.3.3 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์	73
4.3.4 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ ก๊าซ ผลิตภัณฑ์.....	74
4.3.5 ผลของอุณหภูมิต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Ni/dolomite.....	75
4.3.6 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Ni/dolomite.....	77
4.3.7 ผลของอุณหภูมิต่อค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Ni/dolomite	78
4.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแกซีฟิเคชัน	79
4.4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลว.....	79
4.4.2 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของแข็ง	80
4.5 การศึกษาสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้ว	81
4.6 ผลของโลหะนิกเกิลหลังจากใช้งานแล้วต่อสิ่งแวดล้อม.....	84
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	86
5.1 สรุปผลการวิจัย	86
5.2 ข้อเสนอแนะ	87
รายการอ้างอิง	88
ภาคผนวก.....	93
ภาคผนวก ก.....	94

ฉ

หน้า

ภาคผนวก ข.....	100
ภาคผนวก ค.....	104
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	107



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	การเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะของเตาแก๊สฟายระบบฟิกส์เบด.....	15
ตารางที่ 2.2	ชนิดของคาร์บอนและโค้ก.....	26
ตารางที่ 4.1	ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (wt. % dry basis) ของวัตถุดิบต่างๆ.....	45
ตารางที่ 4.2	ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (wt. % dry basis) ของวัตถุดิบต่างๆ.....	46
ตารางที่ 4.3	ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน (wt. % dry basis) ของวัตถุดิบต่างๆ.....	46
ตารางที่ 4.4	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (BET surface area).....	67
ตารางที่ 4.5	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของแข็ง.....	81



สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	เส้นทางการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นชีวมวล	4
รูปที่ 2.2	การจัดประเภทของชีวมวล.....	5
รูปที่ 2.3	ลักษณะโครงสร้างของเซลลูโลส	6
รูปที่ 2.4	ลักษณะโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส	6
รูปที่ 2.5	ลักษณะโครงสร้างของลิกนิน.....	7
รูปที่ 2.6	กระบวนการทางเคมีความร้อนของชีวมวล.....	8
รูปที่ 2.7	ประเภทของเตาปฏิกรณ์แก๊สเฟส	11
รูปที่ 2.8	ประเภทของเตาแก๊สเฟสระบบฟลักซ์เบด	12
รูปที่ 2.9	แสดงการทำงานของเตาแก๊สเฟสแบบไหลขึ้น	13
รูปที่ 2.10	แสดงการทำงานของเตาแก๊สเฟสแบบไหลลง	14
รูปที่ 2.11	เตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบด	16
รูปที่ 2.12	แสดงรูปร่างที่แตกต่างกันของ (a) การทำให้เป็นก้อน (Balling), (b) การอัดแท่ง (Briquetting) และ (c) การอัดเป็นเม็ด (Pelletizing)	17
รูปที่ 2.13	แสดงอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณน้ำมันดิน.....	19
รูปที่ 2.14	แสดงลักษณะของถั่วดาวอินคา	20
รูปที่ 2.15	ตัวอย่างองค์ประกอบของน้ำมันดินจากชีวมวล	22
รูปที่ 2.16	พลังงานก่อกัมมันต์ของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	23
รูปที่ 2.17	วิธีปฏิกิริยาในการกำจัดน้ำมันดิน	24
รูปที่ 2.18	วิธีทุติยภูมิในการกำจัดน้ำมันดิน.....	25
รูปที่ 2.19	แสดงการเกิดฟาวลิง โดยมีการสะสมของคาร์บอนซึ่งอุดตันรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา	25
รูปที่ 2.20	แสดงการเกิดการปนเปื้อนของสารพิษซัลเฟอร์บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	27
รูปที่ 2.21	แสดงการเกิดผลึกโลหะจากการซินเทอริง โดย (A) อะตอมโลหะหลุดออกจากผลึก (Atomic migration) หรือ (B) การเคลื่อนที่ของผลึก (Crystallite migration)	28

รูปที่ 3.1	เปลือกแก้วดาวอินคาที่ใช้ในงานวิจัย	34
รูปที่ 3.2	เครื่องบดอเนกประสงค์.....	34
รูปที่ 3.3	ชุดตะแกรงร่อน.....	35
รูปที่ 3.4	เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ	36
รูปที่ 3.5	เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี- แมสสเปกโตรมิทรี.....	36
รูปที่ 3.6	เปลือกแก้วดาวอินคาขนาด (a) 0.25-0.50 มิลลิเมตร (b) 0.50-0.85 มิลลิเมตร.....	37
รูปที่ 3.7	ท่อปฏิกรณ์แบบปล่อยหล่น.....	38
รูปที่ 3.8	แผนผังของท่อปฏิกรณ์แบบปล่อยหล่น	38
รูปที่ 3.9	ตัวรองรับโพลีไมต์ ขนาด 0.50-0.85 มิลลิเมตร ที่ผ่านการแคลไซน์แล้ว.....	39
รูปที่ 3.10	ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Ni/dolomite ขนาด 0.50-0.85 มิลลิเมตร (a) ก่อนแคลไซน์ (b) หลังแคลไซน์.....	40
รูปที่ 3.11	ตัวเร่งปฏิกิริยา 10% Ni/dolomite ขนาด 0.50-0.85 มิลลิเมตร (a) ก่อนแคลไซน์ (b) หลังแคลไซน์.....	40
รูปที่ 3.12	แผนภาพการทดลองกระบวนการแกซีฟิเคชันของเปลือกแก้วดาวอินคา.....	43
รูปที่ 4.1	ผลิตภัณฑ์ของแข็งจุดตันบริเวณท่อที่ป้อนชีวมวล.....	47
รูปที่ 4.2	ผลของอุณหภูมิต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2	49
รูปที่ 4.3	ผลของอุณหภูมิต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน ที่อัตราส่วนสมมูล 0.3	49
รูปที่ 4.4	ผลของอุณหภูมิต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน ที่อัตราส่วนสมมูล 0.4	50
รูปที่ 4.5	ผลของอุณหภูมิต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน ที่อัตราส่วนสมมูล 0.5	50
รูปที่ 4.6	ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณก๊าซสังเคราะห์ ที่อัตราส่วนสมมูลต่างๆ.....	51
รูปที่ 4.7	ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2.....	53
รูปที่ 4.8	ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ที่อัตราส่วนสมมูล 0.3.....	53
รูปที่ 4.9	ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ที่อัตราส่วนสมมูล 0.4.....	54
รูปที่ 4.10	ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ที่อัตราส่วนสมมูล 0.5.....	55

รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิต่อค่าความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์ ที่อัตราส่วนสมมูลต่างๆ.....	56
รูปที่ 4.12 ผลของอุณหภูมิต่อค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์ ที่อัตราส่วนสมมูลต่างๆ.....	57
รูปที่ 4.13 ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส	58
รูปที่ 4.14 ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส	59
รูปที่ 4.15 ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส	59
รูปที่ 4.16 ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อปริมาณก๊าซสังเคราะห์ ที่อุณหภูมิต่างๆ	60
รูปที่ 4.17 ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส..	62
รูปที่ 4.18 ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส..	63
รูปที่ 4.19 ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส..	64
รูปที่ 4.20 ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อค่าความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่างๆ	65
รูปที่ 4.21 ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	66
รูปที่ 4.22 SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา (a) dolomite (b) calcined dolomite (c) 5% Ni/dolomite (d) calcined 5% Ni/dolomite (e) 10% Ni/dolomite (f) calcined 10% Ni/dolomite.....	68
รูปที่ 4.23 XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา (a) dolomite (b) calcined dolomite (c) 5% Ni/dolomite (d) calcined 5% Ni/dolomite (e) 10% Ni/dolomite (f) calcined 10% Ni/dolomite.....	69
รูปที่ 4.24 การสลายตัวทางความร้อนของ (a) calcined dolomite (b) calcined 5% Ni/dolomite (c) calcined 10% Ni/dolomite	70
รูปที่ 4.25 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2, 900 องศาเซลเซียส.....	72

รูปที่ 4.26 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณก๊าซสังเคราะห์ ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2, 900 องศาเซลเซียส	72
รูปที่ 4.27 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2, 900 องศาเซลเซียส	74
รูปที่ 4.28 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ ก๊าซผลิตภัณฑ์ ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2, 900 องศาเซลเซียส	75
รูปที่ 4.29 ผลของอุณหภูมิต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Ni/dolomite ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2	76
รูปที่ 4.30 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณก๊าซสังเคราะห์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Ni/dolomite ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2	77
รูปที่ 4.31 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Ni/dolomite ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2	78
รูปที่ 4.32 ผลของอุณหภูมิต่อค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Ni/dolomite ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2	79
รูปที่ 4.33 องค์ประกอบของสารเคมีที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ของเหลว	80
รูปที่ 4.34 SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา (a) dolomite spent (b) 5% Ni/dolomite spent (c) 10% Ni/dolomite spent	82
รูปที่ 4.35 การสลายตัวทางความร้อนของ (a) dolomite spent (b) 5% Ni/dolomite spent (c) 10% Ni/dolomite spent	83
รูปที่ 4.36 XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา (a) dolomite spent (b) 5% Ni/dolomite spent (c) 10% Ni/dolomite spent	84

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันความก้าวหน้าทางอุตสาหกรรมได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็วพร้อมกับการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของโลก แต่ละประเทศจึงมีการศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านพลังงานให้มีประสิทธิภาพและทางเลือกมากขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับความต้องการทางด้านพลังงานที่สูงขึ้นในปัจจุบัน โดยแหล่งพลังงานหลักที่ใช้ในปัจจุบันมาจากแปรสภาพเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ ที่ต้องใช้เวลาในการก่อกำเนิดหลายล้านปีจากการทับถมของซากพืช ซากสัตว์ ส่งผลให้เกิดมลพิษทางอากาศ ฝนกรด และปัญหาโลกร้อน เป็นต้น (Goyal และคณะ, 2008) จึงทำให้นักวิทยาศาสตร์ตื่นตัวและหันมาให้ความสนใจกับการใช้พลังงานทดแทน มีหลายงานวิจัยพบว่า ชีวมวลสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ เนื่องจากเป็นพลังงานที่ไม่มีจำกัดและสามารถสร้างขึ้นเองได้ (Australian institute of energy, 2010) ซึ่งแหล่งพลังงานชีวมวลนี้มาจากแหล่งที่หลากหลาย ราคาถูก สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ดีในการเปลี่ยนเป็นพลังงาน โดยใช้กระบวนการที่เหมาะสม โดยทั่วไปชีวมวล (Biomass) เป็นวัสดุพืชที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ น้ำ และแสงอาทิตย์ร่วมกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเพื่อสร้างคาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นโครงสร้างของชีวมวล (McKendry, 2002) ชีวมวลยังหมายความรวมถึงชีวมวลที่ได้จากพืช (Plant biomass) และสัตว์ (Zoo biomass) ตัวอย่างเช่น วัสดุเหลือใช้จากการเกษตร มูลสัตว์ เป็นต้น (Saidur และคณะ, 2011) จากพื้นฐานของประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ทำให้มีวัสดุเหลือทิ้งจากการทำเกษตรกรรม กสิกรรม เป็นจำนวนมาก จึงมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นพลังงานทางเลือกแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล อีกทั้งยังเป็นการช่วยลดปริมาณการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้นและยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมด้วย ในงานวิจัยนี้จึงนำเปลือกถั่วดาวอินคา มาใช้เพื่อผลิตเป็นพลังงานทดแทน เนื่องจากถั่วดาวอินคาเป็นพืชที่มีน้ำมันโอเมก้า 3 สูง ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันจากเมล็ดถั่วดาวอินคาจึงเป็นที่นิยม หลังจากกระบวนการผลิตทำให้มีเปลือกเหลือทิ้งอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งเปลือกนั้นมีลักษณะคล้ายไม้ สามารถนำมาแปรรูปเป็นพลังงานได้โดยผ่านกระบวนการเคมีความร้อน (Thermochemical process) ได้แก่ กระบวนการเผาไหม้ (Combustion) แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) และ ไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นต้น

ในการนี้ได้เลือกกระบวนการแกซีฟิเคชันมาใช้ ซึ่งมีข้อได้เปรียบกว่ากระบวนการอื่นๆ เช่น โอกาสในการนำก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไปใช้กับเครื่องยนต์ได้โดยตรง ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการไพโรไลซิส เนื่องจากน้ำมันที่ผลิตออกมาได้ ต้องปรับปรุงด้วยกระบวนการหลายอย่างก่อนที่จะสามารถนำไปใช้ได้จริง ยิ่งไปกว่านั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแกซีฟิเคชันยังสามารถปรับปรุงให้มีคุณภาพดียิ่งขึ้นได้ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่น่าสนใจคือ นิกเกิลบนตัวรองรับโดโลไมต์ เพราะมีราคาถูกและสามารถเตรียมได้ง่าย ดังเช่นในงานวิจัยของ Waheed และคณะ (2015) ที่ศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก บนตัวรองรับโดโลไมต์ ในการสร้างก๊าซสังเคราะห์ (คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน) พบว่าเมื่ออุณหภูมิของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนในก๊าซผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นด้วย เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Elbaba และคณะ (2013) ที่ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนิกเกิลบนตัวรองรับโดโลไมต์ โดยเปรียบเทียบการใช้โลหะนิกเกิลร้อยละ 0, 5, 10, 20 โดยน้ำหนัก บนตัวรองรับพบว่าเมื่อเพิ่มโลหะนิกเกิลสูงขึ้นถึงร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีขึ้นและสร้างไฮโดรเจนได้มากขึ้น เป็นต้น ในงานวิจัยได้เลือกใช้ท่อปฏิกรณ์แบบปล่อยหล่น (Drop tube reactor) มาผลิตก๊าซสังเคราะห์โดยใช้กระบวนการแกซีฟิเคชัน เนื่องจากท่อปฏิกรณ์แบบปล่อยหล่นผลิตก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง ปรับแต่งสภาวะการเดินระบบได้สะดวกและควบคุมความร้อนจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ดี เพราะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทางกัน (ประพันธ์ คุชธรราร และศศิธร สรรพอคำ, 2558)

ในงานวิจัยนี้ได้สนใจนำเปลือกถั่วดาวอินคาผลิตเป็นก๊าซเชื้อเพลิงร่วมกับกระบวนการแกซีฟิเคชัน โดยใช้ท่อปฏิกรณ์แบบปล่อยหล่น (Drop tube reactor) เพื่อศึกษาปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยศึกษาผลของขนาดเปลือกถั่วดาวอินคา สภาวะอุณหภูมิและอัตราส่วนสมมูลที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยา ผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับโดโลไมต์ที่มีผลต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ ซึ่งข้อมูลที่ได้จะสามารถนำไปต่อยอดพัฒนาเป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่ช่วยในการสร้างพลังงานจากของเหลือทิ้งทางเกษตรกรรมได้ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของขนาดเปลือกถั่วดาวอินคาที่มีต่อกระบวนการแกซีฟิเคชันและก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้

1.2.2 เพื่อหาสภาวะอุณหภูมิและอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการแกซิฟิเคชัน

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับโดโลไมต์ต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแกซิฟิเคชันเปลือกถั่วดาวอินคา

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ เป็นการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเปลือกถั่วดาวอินคาในการแปรสภาพเป็นก๊าซ ซึ่งเป็นการทดลองในระดับปฏิบัติการ ดำเนินการวิจัยที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และห้องปฏิบัติการชั้น 4 ตึกปฏิบัติการรวม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยกำหนดขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

1.3.1 นำเปลือกถั่วดาวอินคาที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันมาคัดเลือกขนาดวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีต่างๆ และศึกษาสมบัติด้านความร้อน

1.3.2 แปรสภาพเปลือกถั่วดาวอินคาเป็นก๊าซโดยผ่านกระบวนการแกซิฟิเคชัน โดยใช้ท่อปฏิกรณ์แบบปล่อยหล่น เพื่อศึกษาความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้ในสภาวะที่อัตราส่วนผสมและอุณหภูมิแตกต่างกันและศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับโดโลไมต์ที่มีต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์

1.3.3 ตรวจวัดปริมาณก๊าซและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ได้ที่สภาวะต่างๆ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เป็นแนวทางเลือกในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพสูงจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

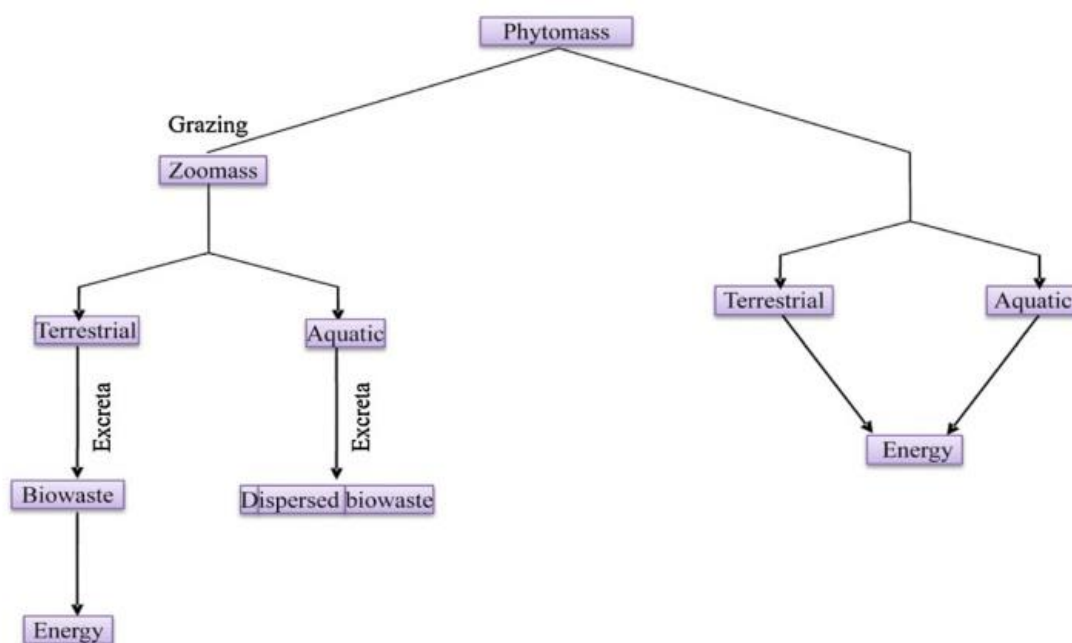
1.4.2 ช่วยในการลดของเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมันของถั่วดาวอินคา

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล เป็นชื่อเรียกอินทรีย์วัตถุ (Organic matter) ที่ได้จากพืช ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากพืชและสัตว์ เช่น พืชผล สาหร่ายทะเล วัสดุเหลือใช้จากการเกษตร และจากกระบวนการทำป่าไม้ ของเสียจากคนและสัตว์ เป็นต้น ชีวมวลโดยทั่วไปหมายความรวมถึงชีวมวลที่ได้จากพืช (Plant biomass) และชีวมวลที่ได้จากสัตว์ (Animal biomass) ชีวมวลเกิดจากการที่พืชเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานเคมีผ่านกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (Photosynthesis) เก็บไว้ในรูปของพืชบกและพืชน้ำ เมื่อสัตว์กินพืชเป็นอาหาร จะเปลี่ยนให้อยู่ในรูปชีวมวลที่ได้จากสัตว์ (Animal biomass) และขับถ่ายออกมา โดยของเสียที่ได้จากสัตว์ก็สามารถใช้เป็นแหล่งของพลังงานได้ ขณะที่ของเสียของสัตว์น้ำมีการแพร่กระจาย ดังนั้นจึงยากที่จะเก็บมาเพื่อสร้างเป็นพลังงาน บางครั้งชีวมวลถูกจัดอยู่ในประเภทวัสดุที่เผาไหม้ได้ ซึ่งสามารถใช้เป็นแหล่งของพลังงาน ดังนั้นชีวมวลจึงจัดเป็นแหล่งพลังงานทดแทน เพราะเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่มีจำกัด (Saidur และคณะ, 2011)

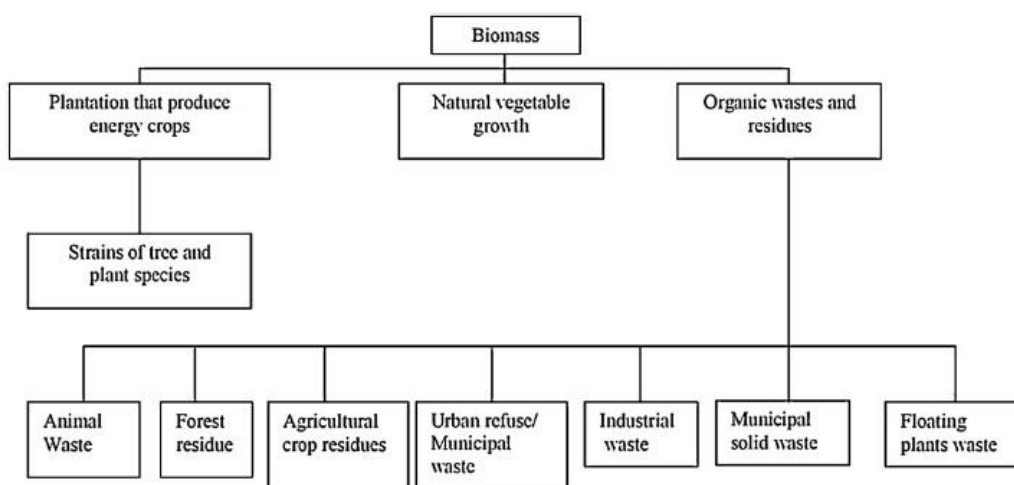


รูปที่ 2.1 เส้นทางการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นชีวมวล (Abbasi และคณะ, 2010)

2.1.1 ประเภทของชีวมวล

ชีวมวล แบ่งออกเป็น 4 ประเภทดังนี้

1. เศษวัสดุเหลือใช้จากเกษตรกรรมและการทำป่าไม้
2. พืชไม้ล้มลุก เช่น หญ้าเนเปียร์ (Napier grass) วัชพืช เป็นต้น
3. ชีวมวลที่ได้จากน้ำและทะเล เช่น สาหร่าย แนวปะการัง (Coral reef) ผักตบชวา (Water hyacinth) เป็นต้น
4. ของเสีย เช่น ของเสียชุมชน ของเสียจากสัตว์และโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

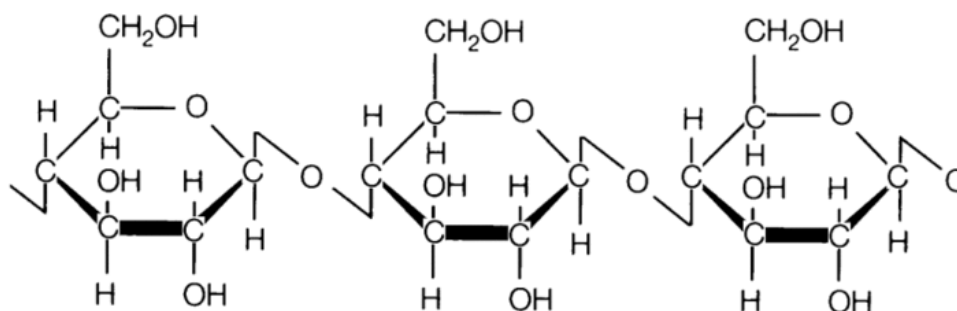


รูปที่ 2.2 การจัดประเภทของชีวมวล (Panwar และคณะ, 2012)

2.1.2 องค์ประกอบของชีวมวล

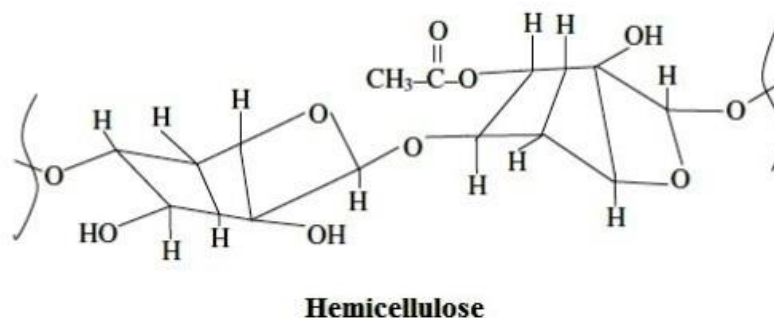
โครงสร้างของชีวมวลประกอบด้วย เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ซึ่งมีไขมัน (Lipids) โปรตีน (Protein) น้ำตาลที่อยู่ในรูปร่างง่าย (Simple sugar) และแป้ง (Starch) เป็นส่วนประกอบเล็กน้อย อีกทั้งชีวมวลยังมีส่วนประกอบที่เป็นอนินทรีย์ และมีสัดส่วนของน้ำอยู่ด้วย โดยส่วนประกอบหลักของชีวมวลคือ เซลลูโลส (ร้อยละ 35-50) เฮมิเซลลูโลส (ร้อยละ 15-25) และลิกนิน (ร้อยละ 15-30) ที่รวมเรียกว่า ลิกโนเซลลูโลส (lignocellulose) ในการวิเคราะห์โครงสร้างของชีวมวลมีความสำคัญมากในการพัฒนากระบวนการสร้างเชื้อเพลิงอื่นๆ อีกทั้งยังช่วยในการประเมินค่าความร้อนของชีวมวลได้อีกด้วย (Saidur และคณะ, 2011)

เซลลูโลส เป็นโพลิเมอร์ของกลูโคส ที่ประกอบไปด้วย (1,4)-D-glucopyranose ต่อกันเป็นสายตรง ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิดบีตา (β -1,4-glycosidic bonds) จำนวนมากกว่า 10,000 โมเลกุล (McKendry, 2002) ลักษณะโครงสร้างของเซลลูโลส แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างของเซลลูโลส (Chloe และคณะ, 2010)

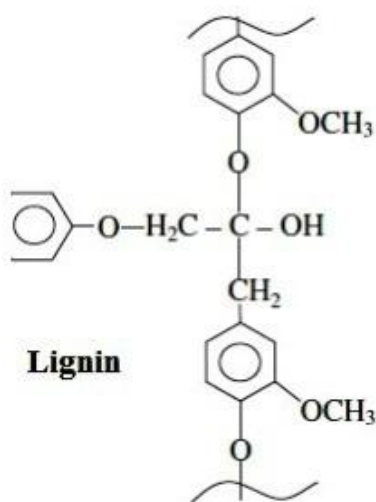
เฮมิเซลลูโลส เป็นโพลิแซ็กคาไรด์ของโมโนเมอร์หลายชนิด ได้แก่ ไซโลส (Xylose) แมนโนส (Mannose) กลูโคส (Glucose) และกาแลคโตส (Galactose) ซึ่งเฮมิเซลลูโลสสามารถสลายตัวได้ง่ายกว่าเซลลูโลส เนื่องจากมีความแข็งแรงของโครงสร้างต่ำกว่า และเฮมิเซลลูโลสสามารถละลายในสารละลายที่เป็นกรดหรือเบสอ่อนได้ (ประพันธ์ คูชลธารา และคณะ, 2558) ลักษณะโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส แสดงดังรูปที่ 2.4



Hemicellulose

รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส (Bledzki และคณะ, 1999)

ลิกนิน ประกอบด้วยสารจำพวกฟีนอล (Phenolic compounds) ทำหน้าที่เสมือนกาวประสานอยู่ระหว่างโครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในผนังเซลล์ ซึ่งลิกนินมีความแข็งแรงของโครงสร้างมากที่สุดเทียบกับส่วนประกอบอื่นๆ จึงมีเสถียรภาพทางความร้อนและย่อยสลายได้ยาก หากปล่อยให้ย่อยสลายโดยธรรมชาติเป็นเวลานานแล้ว ส่วนนี้จะเกิดเป็นองค์ประกอบหลักของพีทและถ่านหินต่อไป (ประพันธ์ คูชดารา และคณะ, 2558) ลักษณะโครงสร้างของลิกนิน แสดงดังรูปที่ 2.5



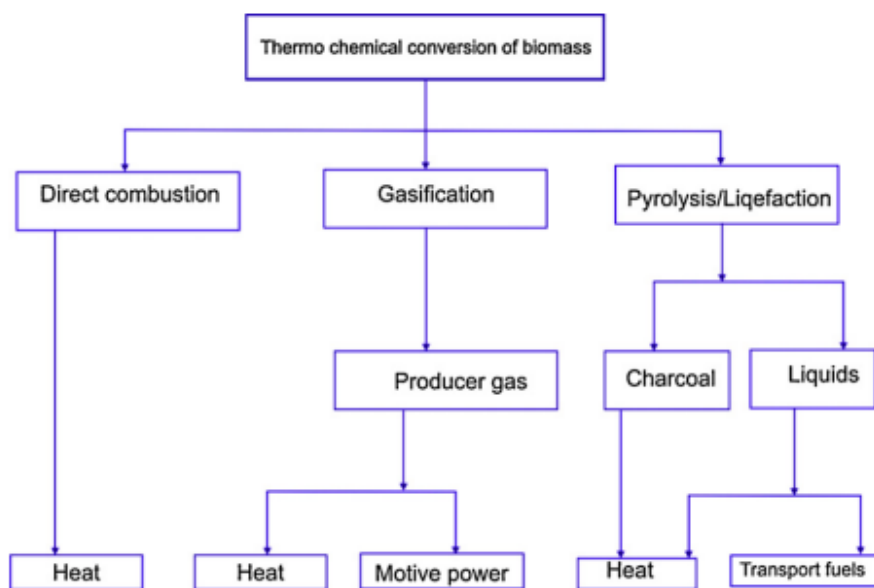
รูปที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างของลิกนิน (Bledzki และคณะ, 1999)

2.2 การเปลี่ยนชีวมวลไปเป็นพลังงาน

ในการเปลี่ยนชีวมวลไปเป็นพลังงานสามารถทำได้หลายกระบวนการ ในแต่ละกระบวนการขึ้นอยู่กับประเภทและปริมาณของชีวมวลที่ใช้เป็นวัตถุดิบ ความต้องการนำพลังงานไปใช้ มาตรฐานทางสิ่งแวดล้อมและสถานะทางด้านเศรษฐกิจ เป็นต้น

การเปลี่ยนชีวมวลไปเป็นพลังงาน แบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ ได้แก่

1. กระบวนการชีวเคมี (Bio-chemical process)
2. กระบวนการเคมีความร้อน (Thermo-chemical process) เป็นกระบวนการเปลี่ยนชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูง ได้แก่ การเผาไหม้ (Combustion), แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) และไพโรไลซิส (Pyrolysis)



รูปที่ 2.6 กระบวนการทางเคมีความร้อนของชีวมวล (Panwar และคณะ, 2012)

2.2.1 การเผาไหม้ (combustion)

ชีวมวลสามารถเผาเป็นพลังงานได้โดยตรง เป็นการเปลี่ยนพลังงานเคมีที่เก็บในชีวมวลเป็นความร้อน พลังงานกล หรือกระแสไฟฟ้า ที่นำไปใช้ได้หลายๆ อุปกรณ์ เช่น หม้อน้ำ กังหันไอน้ำ เป็นต้น เทคโนโลยีนี้มีความเสี่ยงต่อผู้ลงทุนน้อย แต่มีข้อจำกัดคือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาเป็นความร้อนที่ต้องนำมาใช้ทันที (Bridgwater, 2003)

2.2.2 ไพโรไลซิส (Pyrolysis)

เป็นกระบวนการสลายตัวทางความร้อนที่ปรากฏในสภาวะไร้ออกซิเจน อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการประมาณ 500 องศาเซลเซียส (McKendry, 2002) เป็นกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิงเหลว (liquid fuel) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ ได้แก่ น้ำมันชีวภาพ ก๊าซ และผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน ขนาดอนุภาคและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ (Saidur และคณะ, 2011)

2.2.3 แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของชีวมวล เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในการสร้างพลังงาน โดยเป็นการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็ง (Solid fuel) เป็นก๊าซเชื้อเพลิง (Gaseous fuel) โดยใช้การออกซิเดชันบางส่วนของชีวมวลที่อุณหภูมิสูง ซึ่งอยู่ในช่วงประมาณ 800-1300 องศาเซลเซียส โดยมีตัวกลางของปฏิกิริยา (Gasifying agent) ที่ใช้แตกต่างกัน เช่น อากาศ (Air) ออกซิเจน (Oxygen) หรือไอน้ำ (Steam) ผลผลิตออกมาเป็นก๊าซผลิตภัณฑ์ที่มีพลังงานสูงประกอบไปด้วย ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซมีเทน (CH_4) และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ นอกจากนี้ยังมีไนโตรเจน (Nitrogen) ซัลเฟอร์ (Sulfur) สารประกอบอัลคาไลน์ (Alkali compounds) และน้ำมันดิน (Tar) ปนเปื้อนอยู่เล็กน้อย ซึ่งปฏิกิริยาพื้นฐานของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นดังนี้

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

Oxidation reactions:



The Boudouard reaction:



The water gas reaction:



The methane reaction:



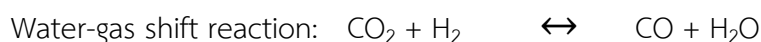
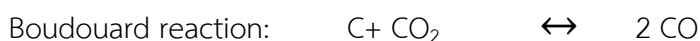
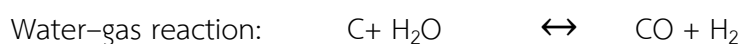
The water gas shift reaction:



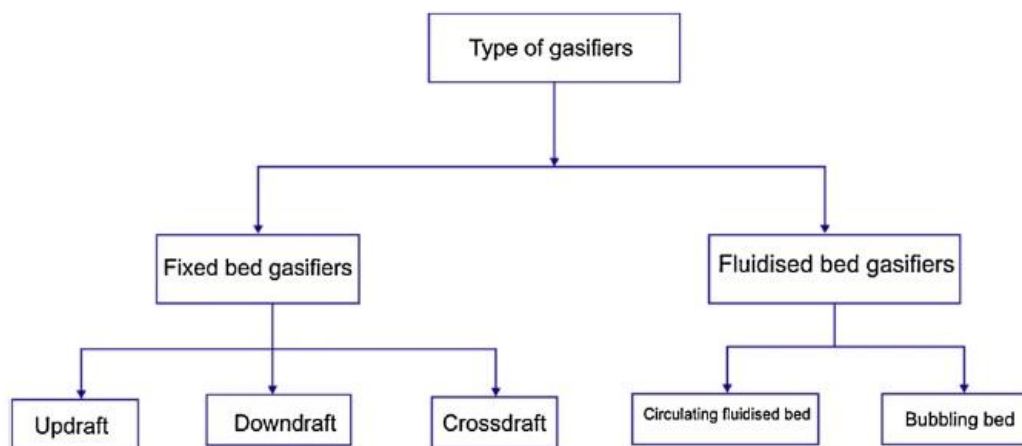
2.3 เตาปฏิกรณ์แก๊สฟาย

ภายในเตาแก๊สฟาย แบ่งออกเป็น 4 บริเวณ ดังนี้ (Puig-Arnabat และคณะ, 2010)

1. บริเวณอบแห้ง (Drying zone) เป็นขั้นตอนการทำให้ชีวมวลแห้งโดยที่ค่าความชื้นในชีวมวลลดลง โดยการระเหยน้ำออกจากชีวมวลด้วยความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 100-200 องศาเซลเซียส เพื่อลดค่าความชื้นของชีวมวลให้น้อยกว่าร้อยละ 5
2. บริเวณไพโรไลซิส (Pyrolysis or Devolatilization zone) เป็นขั้นตอนที่มีความจำเป็นมากต่อการสลายตัวทางความร้อนในสภาวะที่ไร้ออกซิเจนหรืออากาศ ในขั้นตอนนี้สารระเหย (Volatile matter) ในชีวมวลจะลดลง โดยการปล่อยไฮโดรคาร์บอนจากชีวมวล ซึ่งชีวมวลจะถูกเปลี่ยนให้เป็นก้อนถ่าน และไฮโดรคาร์บอนเกิดการควบแน่นที่อุณหภูมิต่ำกลายเป็นน้ำมันดิน ปฏิกิริยานี้เกิดในช่วงอุณหภูมิประมาณ 500-600 องศาเซลเซียส
3. บริเวณเผาไหม้ (Combustion or Oxidation zone) เป็นปฏิกิริยาระหว่างถ่านคาร์บอนและออกซิเจนในอากาศ เป็นผลให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งไฮโดรเจนในชีวมวลถูกออกซิไดซ์ เกิดเป็นน้ำด้วย และความร้อนจำนวนมากถูกปล่อยออกมาจากการออกซิเดชันของคาร์บอนและไฮโดรเจน ถ้าเกิดการออกซิเดชันบางส่วนของคาร์บอนจะเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์
4. บริเวณรีดักชัน (Reduction Zone) เป็นการผลิตก๊าซสังเคราะห์ คือ คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน โดยปฏิกิริยาเกิดในช่วงอุณหภูมิ 800-1000 องศาเซลเซียสและปฏิกิริยาส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน โดยปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นได้แก่



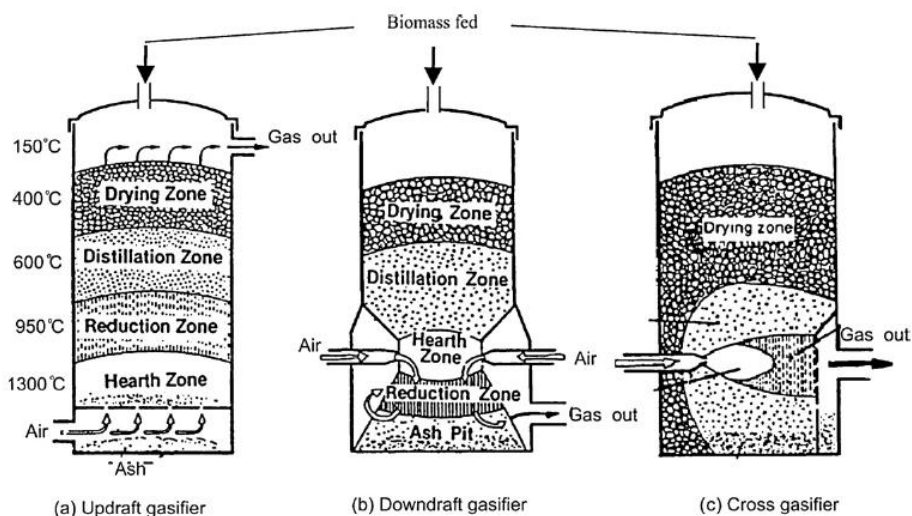
2.4 ประเภทของเตาปฏิกรณ์แก๊สไฟ



รูปที่ 2.7 ประเภทของเตาปฏิกรณ์แก๊สไฟ (Panwar และคณะ, 2012)

2.4.1 ระบบฟิกส์เบด (Fixed bed)

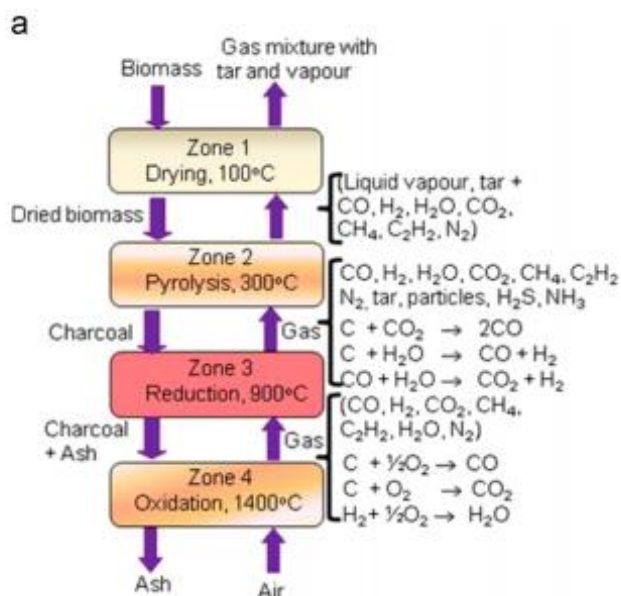
เป็นประเภทของเตาแก๊สไฟอย่างง่ายที่ประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์ที่เป็นรูปทรงกระบอก ซึ่งมีการเผาไหม้ชีวมวลอยู่ภายใน โดยชีวมวลถูกป้อนเข้าสู่ด้านบนของเตาและเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง เสมือนว่าชีวมวลหรือเบดอยู่นิ่ง จึงเรียกว่า ระบบแบบฟิกส์เบดหรือระบบเบดนิ่ง (กรมอุตสาหกรรม พื้นฐานและการเหมืองแร่) โดยก๊าซที่ผลิตได้เคลื่อนที่ออกมาในทิศทางขึ้นหรือลงขึ้นอยู่กับประเภท ที่ใช้ ระบบแบบนี้ง่ายต่อการควบคุมและดำเนินการร่วมกับการแปรสภาพเป็นคาร์บอนสูง ระยะเวลา กักของก๊าซนาน ค่าความเร็วของก๊าซต่ำและปริมาณเถ้าที่เหลือต่ำ (Chopra และคณะ, 2007) โดยวิธีนี้เหมาะสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงงานขนาดเล็ก อีกทั้งการเลือกวัตถุดิบนั้นสำคัญ เพราะองค์ประกอบของชีวมวลมีผลต่อส่วนประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ด้วย ระบบนี้มีการใช้กันอย่าง แพร่หลาย แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามทิศทางการไหลของอากาศ ดังนี้



รูปที่ 2.8 ประเภทของเตาแก๊สไฟระบบฟิกส์เบด (Panwar และคณะ, 2012)

2.4.1.1 เตาแก๊สไฟแบบไหลขึ้น (Updraft gasifier)

เป็นระบบแก๊สไฟเคชั่นที่ก๊าซกับชีวมวลไหลสวนทางกัน (Counter current) กล่าวคือ อากาศและตัวกลางถูกป้อนจากด้านล่าง ขณะที่ชีวมวลเคลื่อนที่จากด้านบนลงสู่ด้านล่างภายใต้แรงโน้มถ่วง ผ่านบริเวณอบแห้ง (Drying zone) ซึ่งอยู่บนสุด จากนั้นตามด้วยบริเวณไพโรไลซิส (Pyrolysis zone) รีดักชัน (Reduction zone) และบริเวณการเผาไหม้ (Combustion zone) ซึ่งแก๊สจะถูกกำจัดออกทางด้านล่าง ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้ไหลขึ้นสู่ด้านบน ดังนั้นก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้มีการปนเปื้อนของน้ำมันดิน อีกทั้งก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ออกไปมีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งเป็นปัญหาหลักของระบบนี้ ดังนั้นระบบแบบไหลขึ้นจึงไม่เหมาะที่จะใช้กับเครื่องยนต์ที่มีการเผาไหม้ภายใน แต่เหมาะสำหรับการนำไปใช้อบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร (Asadullah, 2014) ระบบนี้มีข้อดีคือ การแลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เป็นแบบสวนทางทำให้มีประสิทธิภาพสูง สามารถใช้ความร้อนจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ดี ระบบนี้จึงให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง ซึ่งข้อจำกัดของระบบคือ ระบบนี้เหมาะกับ ชีวมวลที่มีความชื้นสูง (ไม่เกินร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก) และแก๊สสูง (ไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก) แต่ไม่เหมาะกับชีวมวลที่มีปริมาณสารระเหยสูง (ประพันธ์ คุณธรราร และคณะ, 2558) หลักการทำงานของระบบแสดงดังรูปที่ 2.9

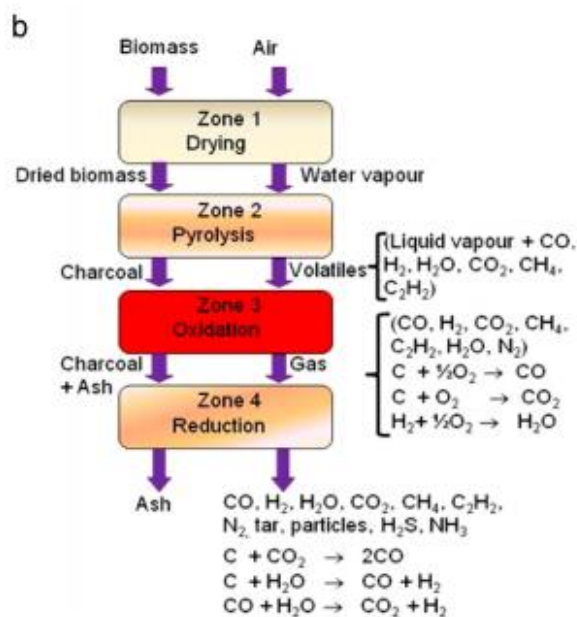


รูปที่ 2.9 แสดงการทำงานของเตาแก๊สไฟแบบไหลขึ้น (Asadullah, 2014)

2.4.1.2 เตาแก๊สไฟแบบไหลลง (Downdraft gasifier)

หลักการทำงานคือ ก๊าซเชื้อเพลิงและชีวมวลเคลื่อนที่จากด้านบนลงสู่ด้านล่างในทิศทางเดียวกัน (Co current) หลักการของเตาประเภทนี้แสดงดังรูปที่ 2.10 โดยชีวมวลและอากาศถูกป้อนลงมาจากด้านบนผ่านบริเวณอบแห้ง (Drying zone) จากนั้นตามด้วยบริเวณไพโรไลซิส (Pyrolysis zone) การเผาไหม้ (Oxidation zone) และรีดักชัน (Reduction zone) ก๊าซผลิตภัณฑ์ถูกเก็บจากด้านล่างผ่านบริเวณรีดักชัน เนื่องจากก๊าซผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่ผ่านบริเวณการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูงและสุดท้ายผ่านบริเวณรีดักชัน ดังนั้นน้ำมันดินเกือบทั้งหมดจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซ ก๊าซที่ได้ออกมาจึงมีความสะอาดกว่าเตาแบบไหลขึ้น (Updraft gasifier) เพื่อเป็นการรักษาระบบนี้ไว้ ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้ของบริเวณการเผาไหม้ต้องสูงเท่าที่เป็นไปได้ (โดยปกติอยู่ที่ประมาณ 1000 องศาเซลเซียส) และตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยาต้องมีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอที่บริเวณคอคอด (Throat) ระบบนี้ ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาเป็นก๊าซสะอาด จึงเหมาะสมสำหรับใช้ในเครื่องยนต์ที่มีการสันดาปภายใน และกังหันสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า (Asadullah, 2014) โดยประเภทนี้เหมาะสมกับการเปลี่ยนเชื้อเพลิงที่มีสารระเหยสูง (High volatile fuel) เช่น ไม้และชีวมวล ให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิงที่มีปริมาณน้ำมันดินต่ำ (Panwar และคณะ, 2012) อีกทั้งยังเหมาะกับชีวมวลที่มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก และเถาต่ำ (ไม่เกินร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก) แม้ว่าระบบนี้จะมีจุดเด่นในเรื่องการให้ปริมาณ

น้ำมันดินค่อนข้างต่ำ เพราะน้ำมันดินในสารระเหยจากชั้นตอนไพโรไลซิสไหลผ่านบริเวณที่เกิดการเผาไหม้และแกซิฟิเคชันของน้ำมันดินซึ่งมีอุณหภูมิสูง ทำให้การแตกตัวของน้ำมันดินเกิดขึ้นได้ดี แต่เตาประเภทนี้ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำกว่าแบบอากาศไหลขึ้น เพราะก๊าซที่ออกจากเตายังคงมีอุณหภูมิค่อนข้างสูง (ประพันธ์ คูชลธารา และคณะ, 2558)



รูปที่ 2.10 แสดงการทำงานของเตาแกซิฟายแบบไหลลง (Asadullah, 2014)

2.4.1.3 เตาแกซิฟายแบบไหลตามขวาง (Cross-flow gasifier)

ชีวมวลถูกป้อนจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง ขณะที่อากาศเข้าสู่ทางด้านข้าง และก๊าซที่ได้จะไหลออกทางด้านตรงข้ามที่ระดับเดียวกัน บริเวณการเผาไหม้และรีดักชันจะอยู่รอบๆทางเข้าของอากาศ บริเวณไพโรไลซิสและบริเวณอบแห้งจะอยู่ในระดับที่สูงขึ้นไป โดยเถ้าถูกกำจัดออกทางด้านล่าง ซึ่งอุณหภูมิของก๊าซที่ไหลออก ประมาณ 800-900 องศาเซลเซียส โดยประสิทธิภาพโดยรวมของระบบนี้ต่ำและก๊าซที่ผลิตได้ประกอบไปด้วยน้ำมันดินสูง (McKendry, 2002) ซึ่งเตาแกซิฟายแบบไหลตามขวาง เหมาะสำหรับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 20 และมีปริมาณเถ้าต่ำ (ไม่เกินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก) (ประพันธ์ คูชลธารา และ คณะ, 2558) อุณหภูมิที่สูงในการสร้างก๊าซเชื้อเพลิงจากเตาประเภทนี้มีผลต่อองค์ประกอบของก๊าซ เช่น มีปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์สูง ไฮโดรเจน และมีเทนต่ำ (Panwar และคณะ, 2012)

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะของเตาแก๊สฟายระบบฟลักซ์เบด

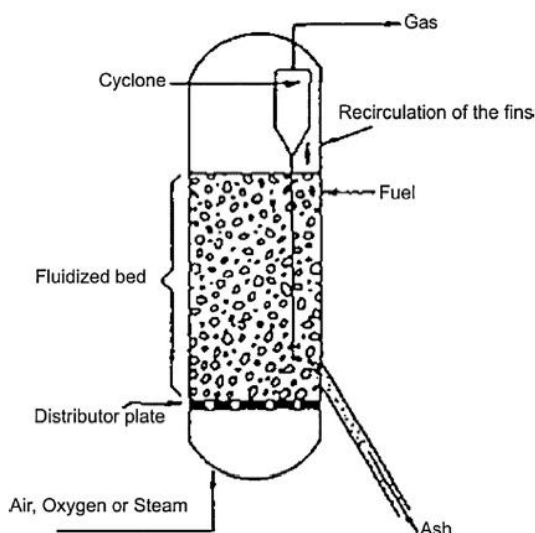
เชื้อเพลิง (ไม้)	แบบไหลขึ้น (Updraft)	แบบไหลลง (Downdraft)	แบบไหลตามขวาง (Crossdraft)
ปริมาณความชื้นแบบฐานเปียก (%)	60 max	25 max	10-20
ปริมาณเถ้าแบบฐานแห้ง (%)	25 max	6 max	0.5-1.0
อุณหภูมิไหลของเถ้า ($^{\circ}\text{C}$)	>1,000	> 1,250	
ขนาด (mm)	5-100	20-100	5-20
ขนาดการใช้งาน (MW)	2-30	1-2	
อุณหภูมิก๊าซขาออก ($^{\circ}\text{C}$)	200-400	700	1,250
ทาร์ (g/Nm^3)	30-150	0.015-3.0	0.01-0.1
ค่าความร้อนของก๊าซ (MJ/Nm^3)	5-6	4.5-5.0	4.0-4.5
ประสิทธิภาพก๊าซร้อน (%)	90-95	85-90	75-90
อัตราส่วนการวัดสูงสุดเทียบกับต่ำสุด (Turn-down ratio)	5-10	3-4	2-3
ฮาร์ทโหลด (Hearth load, MW/m^2)	< 2.8		

ที่มา : ประพันธ์ คูชลธารา และคณะ (2558)

2.4.2 ระบบฟลูอิดไรซ์เบด (Fluidized bed)

ใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับกระบวนการแก๊สฟิเคชันของถ่านหินมาเป็นเวลาหลายปี แต่การใช้งานมีข้อจำกัด เนื่องจากการแปรสภาพเป็นคาร์บอนต่ำ (Tremel และคณะ, 2013) เตาปฏิกรณ์ประเภทนี้มีอัตราการป้อนชีวมวลอย่างต่อเนื่องทางด้านล่างและตัวกลางของกระบวนการแก๊สฟิเคชันไหลอย่างต่อเนื่องทางด้านล่างเช่นกัน ระบบแบบนี้มีข้อดีมากกว่าระบบฟลักซ์เบด คือ บริเวณแก๊สฟิเคชัน (Gasification zone) มีการกระจายตัวของอุณหภูมิสม่ำเสมอ การทำงานของระบบนี้คือ อากาศเคลื่อนที่ผ่านชั้นเบดของอนุภาคของแข็งที่ความเร็วเพียงพอเพื่อรักษาระดับของการลอยตัว ชั้นเบดถูกให้ความร้อนจากภายนอกและวัตถุดิบถูกใส่ลงไปเมื่อมีอุณหภูมิที่สูงเพียงพอ จากนั้นอนุภาคเชื้อเพลิงถูกเหนี่ยวมาอยู่ภายใต้ของเครื่องปฏิกรณ์ เกิดการผสมกันอย่างรวดเร็วกับวัสดุที่ชั้นเบด

ซึ่งอุณหภูมิของชั้นเบตสูงขึ้นอย่างทันที อนุภาคของเถ้าถูกกำจัดออกด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์และกำจัดออกจากก๊าซ เมื่อนำก๊าซนั้นไปใช้ในเครื่องยนต์ (Panwar และคณะ, 2012)



รูปที่ 2.11 เตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดซ์เบต (Panwar และคณะ, 2012)

2.5 การเตรียมชีวมวลก่อนนำไปแปรรูปเป็นพลังงานในกระบวนการแกซิฟิเคชัน

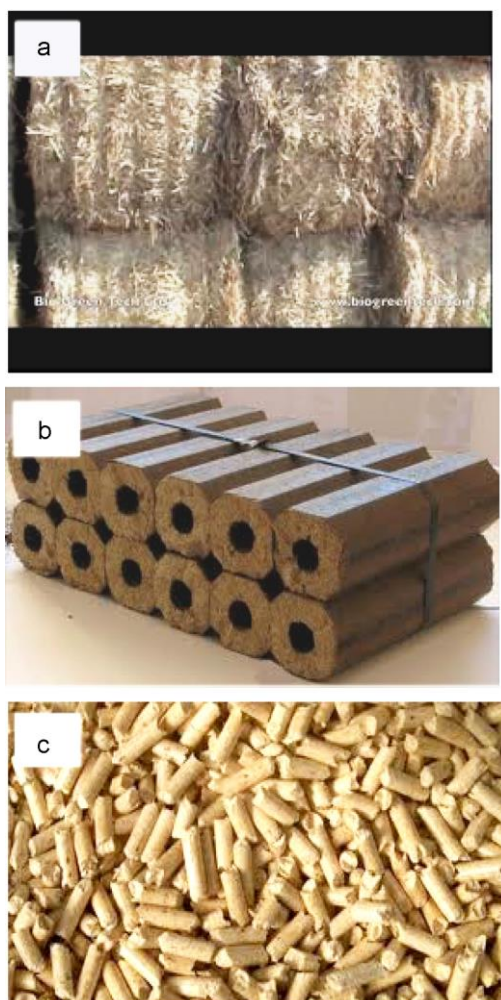
(Asadullah, 2014)

2.5.1 การอบแห้งชีวมวล (Biomass drying)

ในกระบวนการแกซิฟิเคชัน ค่าความชื้นของชีวมวลมีบทบาทที่สำคัญมาก ในแง่ของเทคโนโลยี ภายใต้อุณหภูมิของปฏิกิริยาแกซิฟิเคชัน ไอน้ำที่เกิดจากความชื้นจะทำหน้าที่เป็นตัวกลาง (Gasifying agent) ในการทำปฏิกิริยากับสารระเหยและถ่านชาร์ เพื่อเปลี่ยนเป็นก๊าซผลิตภัณฑ์ ความชื้นของชีวมวลที่มากกว่าร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก มีผลลดประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบแกซิฟิเคชัน ดังนั้นค่าความชื้นของชีวมวลที่ดีสำหรับกระบวนการนี้ อยู่ที่ประมาณร้อยละ 40 สำหรับชีวมวลที่มีค่าความชื้นสูง มีสองทางเลือกสำหรับลดค่าความชื้น วิธีแรก ทำให้แห้งโดยใช้แสงอาทิตย์ เป็นวิธีที่มีราคาต่ำ แต่ใช้เวลานานเพื่อทำให้ความชื้นของชีวมวลเข้าสู่จุดสมดุล และขึ้นอยู่กับค่าความชื้นในบรรยากาศด้วย วิธีที่สองทำให้แห้งโดยความร้อน แต่มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าในเรื่องอุปกรณ์

2.5.2 การบดและอัดแน่นของชีวมวล (Grinding and densification)

ปัญหาของการป้อนชีวมวลสามารถแก้ไขได้โดยการอัดแน่นชีวมวลที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นการกำจัดช่องว่างภายในชีวมวล และเพิ่มความหนาแน่นรวม (Bulk density) (Mupondwa และคณะ, 2012) โดยใช้เทคโนโลยี ได้แก่ การทำให้เป็นก้อน (Balling) การอัดแท่ง (Briquetting) และการอัดเป็นเม็ด (Pelletizing) แต่การทำให้เป็นก้อนไม่เหมาะสมสำหรับการป้อนแบบคงที่เข้าสู่เตาแก๊สฟาย เนื่องจากขนาด ส่วนการอัดแท่งมีข้อดีในเรื่องความคงที่ในการป้อน เพราะมีขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมกว่า (Asadullah, 2014)



รูปที่ 2.12 แสดงรูปร่างที่แตกต่างกันของ (a) การทำให้เป็นก้อน (Balling), (b) การอัดแท่ง (Briquetting) และ (c) การอัดเป็นเม็ด (Pelletizing) (Asadullah, 2014)

2.6 ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการเกิดแกซิฟิเคชัน (Asadullah, 2014)

2.6.1 ขนาดอนุภาค (Size)

ชีวมวลขนาดเล็กมีการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าขนาดใหญ่ อุณหภูมิที่สม่ำเสมอจะเป็นผลให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นตลอดทั่วทั้งอนุภาค เมื่อใดก็ตามที่ปฏิกิริยาเป็นตัวควบคุมกระบวนการแกซิฟิเคชัน อัตราการเกิดปฏิกิริยา จะมากขึ้นและเพิ่มขึ้นแบบทวีคูณกับอุณหภูมิ

2.6.2 รูปร่าง (Shape)

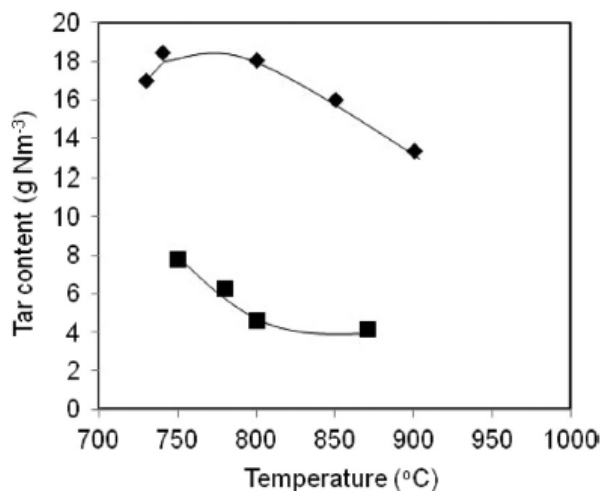
ปัจจุบันมีการนำชีวมวลอัดเป็นเม็ด (pellet) ก่อนเข้าสู่กระบวนการแกซิฟิเคชัน เพื่อเป็นการลดปริมาตรของเตาแกซิฟาย ส่วนการทำให้เป็นก้อนทำให้สะดวกมากขึ้นในการเกิดปฏิกิริยา

2.6.3 โครงสร้าง (Structure)

ถ้าชีวมวลมีรูพรุนสูงทำให้พื้นที่ผิวสำหรับการเกิดปฏิกิริยาสูง ถ้าชีวมวลมีรูพรุนต่ำ อุณหภูมิจะแตกต่างกันจากมากที่สุดที่ด้านนอกสู่น้อยสุดที่ด้านใน ดังนั้นเป็นผลให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่พื้นผิวด้านนอกเท่านั้น ซึ่งอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอนี้มีผลทำให้องค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่สม่ำเสมอด้วย

2.6.4 อุณหภูมิ (Temperature)

ในกระบวนการแกซิฟิเคชันของชีวมวล อุณหภูมิเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญที่สามารถควบคุมองค์ประกอบของก๊าซ ความเข้มข้นของน้ำมันดิน อัตราการเกิดปฏิกิริยา ถ้าที่ เกิดขึ้น เป็นต้น ซึ่งอุณหภูมิต่ำทำให้เกิดน้ำมันดินสูง ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนที่เป็นก๊าซผลิตภัณฑ์ต่ำ ถ้าอุณหภูมิสูงทำให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนมีค่าสูง และเป็นการลดปริมาณน้ำมันดินด้วย แต่มีสองปัญหาที่เป็นข้อจำกัดของการใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส คือ การหลอมละลายของเถ้า โดยเฉพาะชีวมวลที่มีเถ้าเป็นองค์ประกอบสูง อีกปัญหาคือ เตาปฏิกรณ์ ต้องมีความจำเพาะที่สามารถใช้กับอุณหภูมิสูงได้



รูปที่ 2.13 แสดงอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณน้ำมันดิน (Asadullah, 2014)

2.6.5 ความดัน (Pressure)

กระบวนการแกซิฟิเคชันของชีวมวลถูกควบคุมภายใต้สภาวะบรรยากาศและความดันสูง ถ้าความดันภายในเตาแกซิฟายเพิ่มขึ้นเป็นการช่วยลดปริมาณของน้ำมันดินที่เกิดขึ้นด้วย

2.6.6 ตัวกลางของปฏิกิริยา (Gasifying agent)

ตัวกลางของปฏิกิริยา ได้แก่ ไอน้ำ อากาศ ออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสำหรับการนำมาใช้งาน อากาศเป็นตัวกลางของปฏิกิริยาที่ผลิตก๊าซที่มีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำ เพราะอากาศประกอบด้วยไนโตรเจน นอกจากนี้ บางส่วนของก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ถูกใช้ในกระบวนการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ จึงมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น การใช้ไอน้ำมีผลในการลดประสิทธิภาพทางความร้อนของกระบวนการแกซิฟิเคชัน ส่วนออกซิเจนเหมาะสมสำหรับสร้างก๊าซที่มีความเข้มข้นของไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์สูง และความเข้มข้นของน้ำมันดินต่ำ แต่ข้อเสียคือ ออกซิเจนมีราคาแพง ส่วนการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวกลางของปฏิกิริยาทำปฏิกิริยากับคาร์บอน สร้างคาร์บอนมอนอกไซด์ แต่การเกิดปฏิกิริยานั้นช้า

2.6.7 สัดส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงและอัตราส่วนสมมูล

(Air fuel ratio and equivalence ratio)

มวลของอากาศต่อเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้ เรียกว่า Air-fuel ratio (AFR) อัตราส่วนที่น้อยที่สุดของอากาศต่อเชื้อเพลิงที่พอต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างสมบูรณ์ อยู่ในรูปของ Stoichiometric ratio ในกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงต้องการค่า Stoichiometric ratio ของอากาศต่อเชื้อเพลิงที่น้อย แต่แกซีฟิเคชันต้องการอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่า Stoichiometric ratio

$$\text{Air-fuel ratio} = \frac{\text{mol of air}}{\text{mol of fuel}}$$

อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio: ER) คือ อัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงในกระบวนการแกซีฟิเคชัน กับอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์

$$\text{ER} = \frac{\text{actual air-fuel ratio}}{\text{Air-fuel ratio for complete combustion}}$$

ในการประเมินผลกระทบของ ER ในประสิทธิภาพของพลังงาน ของกระบวนการแกซีฟิเคชันที่ใช้ชีวมวลต่างกัน พบว่า ประสิทธิภาพลดลงเมื่อ ER เพิ่มขึ้น

2.7 วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย (ขวัญฤดี ธรารารกุลวัฒนา และ พินิจ จันทร, 2558)



รูปที่ 2. 14 แสดงลักษณะของถั่วดาวอินคา

(Sacha Inchi – prawdziwe złoto Inków, 2015: online)

ถั่วดาวอินคา (Sacha inchi, Inca peanut, wild peanut, mountain peanut) พืชเศรษฐกิจตัวใหม่ของประเทศไทย เป็นพืชตระกูลถั่วที่ขึ้นในแถบกลุ่มน้ำอะเมซอน ประเทศเปรู ทวีปอเมริกาใต้ ซึ่งเป็นประเทศที่มีแหล่งอารยธรรมของชนเผ่าโบราณที่เรียกว่าชาวอินคา และด้วยผลมีลักษณะเป็นรูปดาว จึงเป็นชื่อเรียกของถั่วดาวอินคา ชื่อทางวิทยาศาสตร์ *Plukentia volubilis* L. พืชตระกูล Euphorbiaceae เป็นพืชที่เติบโตได้ดีในสภาพอากาศอุ่น ที่ระดับความสูงจากน้ำทะเล ตั้งแต่ 100 เมตรถึง 2000 เมตร เป็นพืชที่ต้องการแสงแดดและความชื้นสูง มีอายุในช่วง 10- 50 ปี

ผลมีลักษณะเป็นรูปดาว ผลอ่อนมีสีเขียว ผลแก่มีสีน้ำตาลเข้ม ซึ่งภายในเมล็ดประกอบด้วย น้ำมัน ร้อยละ 35-60 และโปรตีนร้อยละ 27 เมล็ดดิบบริโภคไม่ได้ ต้องอบจนสุกก่อน โดยจุดเด่นของถั่วดาวอินคาคือ น้ำมันอุดมไปด้วยกรดไขมันจำเป็น อาทิ โอเมก้า 3 กรดไลโนเลนิก (ร้อยละ 45-53 ของปริมาณไขมัน) โอเมก้า 6 กรดไลโนเลนิก (ร้อยละ 34-39 ของปริมาณไขมัน) โอเมก้า 9 (ร้อยละ 6-10 ของปริมาณไขมัน) ไอโอดีน วิตามินเอและอี จึงเป็นที่นิยมนำเมล็ดมาสกัดเป็นน้ำมันเพื่อบริโภค ยอดของถั่วดาวอินคานิยมนำไปประกอบอาหารเนื่องจากมีรสชาติดูอร่อยอีกทั้งยังมีโอเมก้า 3,6,9 และวิตามิน A,E ส่วนใบสามารถนำไปทำเป็นชา ซึ่งใบมีคลอโรฟิลล์ที่มีคุณค่ามากกว่าคลอโรฟิลล์ทั่วไปถึง 200 เท่า และเปลือกก็นำมาทำเป็นปุ๋ยอินทรีย์ อาหารสัตว์ หรือใช้เป็นพลังงานความร้อนชีวมวล

2.8 ศักยภาพของชีวมวลในประเทศไทย

ถั่วดาวอินคา ที่นิยมปลูกกันในประเทศไทย มีปริมาณผลผลิตเฉลี่ย 1,500-3,000 กิโลกรัม/ไร่/ปี ซึ่งมีการกระจายตัวอยู่ในทุกภาคของประเทศไทย ได้แก่

ภาคเหนือ - เชียงราย, เชียงใหม่, พะเยา, น่าน, ลำพูน, ลำปาง, อุตรดิตถ์

ภาคกลาง - กำแพงเพชร, นครปฐม, เพชรบูรณ์, สิงห์บุรี, สระบุรี, อุทัยธานี

ภาคตะวันออก - จันทบุรี, สระแก้ว

ภาคตะวันตก - กาญจนบุรี, ประจวบคีรีขันธ์

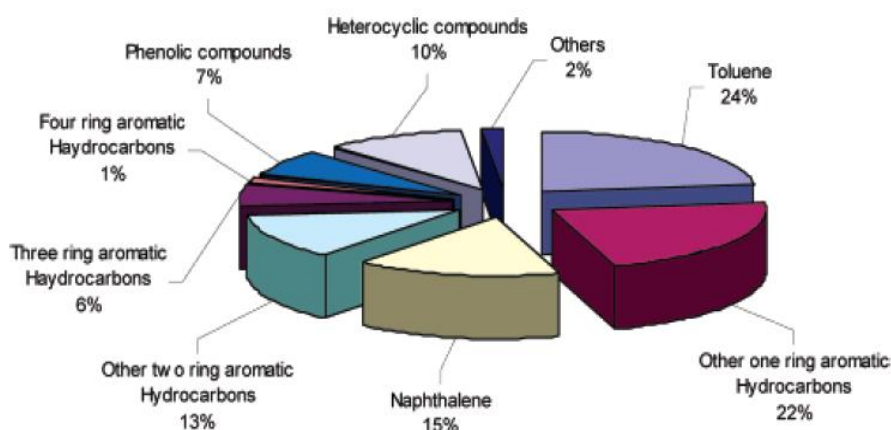
ภาคอีสาน - นครราชสีมา, นครพนม, บึงกาฬ, ยโสธร, หนองคาย, อุตรธานี, อุบลราชธานี, อานาจเจริญ

ภาคใต้ - ชุมพร, สงขลา

โดยในประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกทั้งหมดประมาณ 2,930 ไร่ หรือ 732,500 ต้น ดังนั้นเปลือกที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันของเมล็ดถั่วดาวอินคามีอยู่ประมาณ 1,230,600,000 กิโลกรัม ต่อปี จากของเสียที่เหลือจึงสามารถนำมาใช้แปรรูปเป็นพลังงานได้

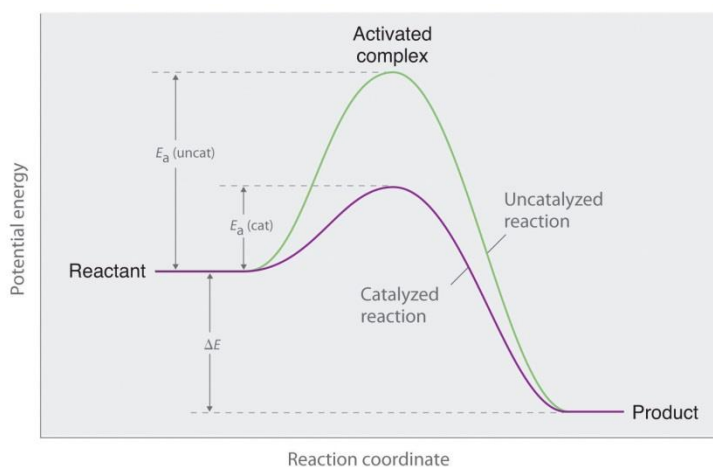
2.9 ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี

ในกระบวนการแกซีฟิเคชันของชีวมวลไม่เพียงแต่สร้างก๊าซเชื้อเพลิงที่มีประโยชน์ แต่ยังสร้างน้ำมันดิน (Tars) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ก่อให้เกิดปัญหา เนื่องจากเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการอุดตันและการกัดกร่อน อีกทั้งยังลดประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ ยิ่งไปกว่านั้นน้ำมันดินเหล่านี้มีอันตรายเพราะเป็นสารก่อมะเร็ง ซึ่งภายในน้ำมันดินยังบรรจุไปด้วยพลังงานจำนวนหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซเชื้อเพลิงได้ เช่น ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์และมีเทน เป็นต้น อีกทั้งความเข้มข้นของน้ำมันดินที่สูงสามารถทำลายหรือนำไปสู่ระดับที่ไม่สามารถยอมรับได้สำหรับเครื่องยนต์ (Engines) และกังหัน (Turbines) ด้วย การกำจัดน้ำมันดินสามารถทำได้หลายทาง เช่น ทางกายภาพ การสลายตัวโดยใช้ความร้อนและการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น สำหรับการเปลี่ยนน้ำมันดินโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นเทคนิคที่น่าสนใจและราคาถูกสำหรับการทำความสะอาดก๊าซ (EI-Rub และคณะ, 2004)



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างองค์ประกอบของน้ำมันดินจากชีวมวล (EI-Rub และคณะ, 2004)

ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) คือ สารที่เติมลงไปในปฏิกิริยาเพียงปริมาณเล็กน้อย เพื่อช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น เนื่องจากพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดปฏิกิริยามีค่าต่ำ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่เติมลงไปนั้นไม่ได้ทำหน้าที่ลดค่าพลังงานก่อกัมมันต์ แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะไปเปลี่ยนวิธีการเกิดปฏิกิริยาใหม่ โดยวิธีนั้นมีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ต่ำ ทั้งนี้พลังงานของทั้งสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์มีค่าเท่าเดิม เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาจะกลับมามีสภาพเดิม (มาลี สันติคุณากรณ์, 2557)



รูปที่ 2.16 พลังงานก่อกัมมันต์ของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Averill และคณะ, 2012)

2.9.1 ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี (มาลี สันติคุณาภรณ์, 2557)

ตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามวิธภาคหรือสถานะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เข้าทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้น

2.9.1.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะเดียวกับสารตั้งต้น ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในสถานะของเหลวหรือก๊าซ

2.9.1.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalyst) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีวิธภาคต่างจากสารตั้งต้น ซึ่งส่วนใหญ่มีสถานะเป็นของแข็ง ส่วนสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์อยู่ในสถานะของเหลวหรือก๊าซ

2.9.2 ตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี (Supports and catalysts)

(มาลี สันติคุณาภรณ์, 2557)

ตัวรองรับที่นิยมใช้มีหลายลักษณะ ได้แก่

2.9.2.1 **วัสดุที่ไม่มีรูพรุน (Nonporous material)** เช่น โมโนลิท ซึ่งเป็นวัสดุที่เกิดจากการอัดรีดให้มีรูปร่างต่างๆ เช่น ทรงกระบอก ทรงสี่เหลี่ยม เป็นต้น

2.9.2.2 วัสดุที่มีรูพรุน (Porous material) เช่น ซิลิกา (Silica) อลูมินา (Alumina) เป็นวัสดุที่มีรูพรุนอยู่ภายใน ทำให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามาก

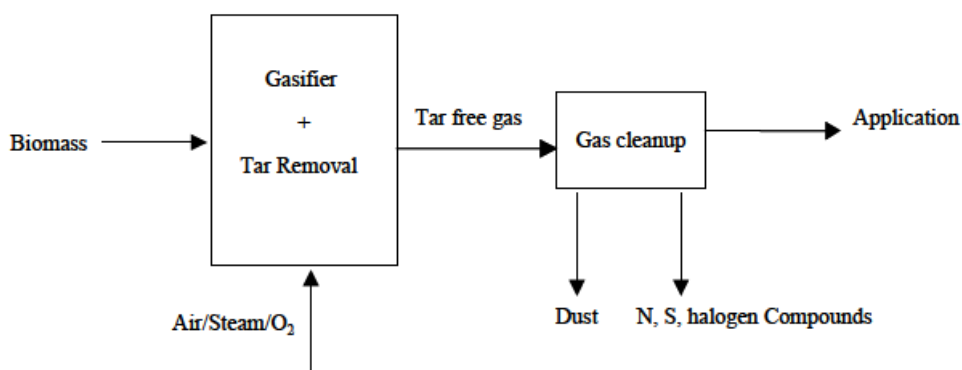
2.9.2.3 วัสดุคัดเลือกขนาด (Shape-selective material) เช่น ซีโอไลต์ (Zeolite) เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Crystalline aluminosilicates) ที่มีลักษณะเป็นผลึกแข็ง มีรูพรุนและช่องว่างที่เชื่อมต่อกันอย่างเป็นระเบียบในลักษณะสามมิติ

2.9.3 การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดน้ำมันดิน

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดน้ำมันดินสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี โดยขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่น้ำมันดินถูกกำจัด

2.9.3.1 วิธีปฐมภูมิ (primary method หรือเรียกว่า insitu)

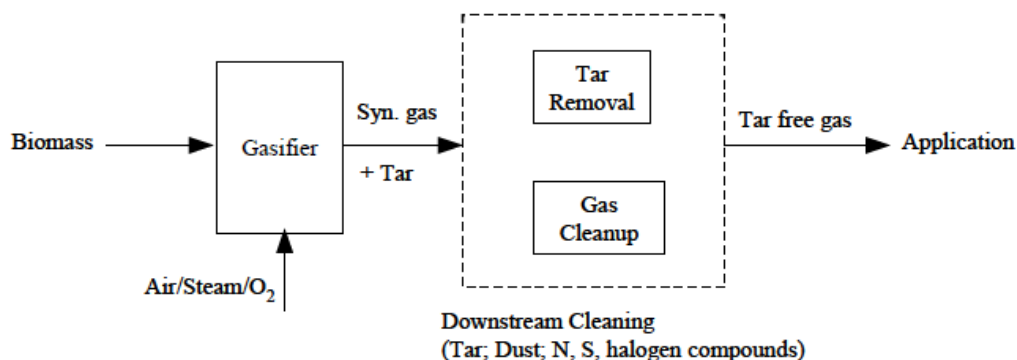
ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกใส่ลงไปพร้อมกับชีวมวล เป็นวิธีแรกที่ใช้กำจัดน้ำมันดิน ซึ่งน้ำมันดินถูกกำจัดภายในเตาปฏิกรณ์แก๊สไฟด้วยตัวเอง ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 วิธีปฐมภูมิในการกำจัดน้ำมันดิน (Devi และคณะ, 2003)

2.9.3.2 วิธีทุติยภูมิ (Secondary method)

เป็นวิธีการบำบัดก๊าซผลิตภัณฑ์ร้อนจากเตาแก๊สไฟ โดยก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ออกมาจากเตาแก๊สไฟถูกบำบัดตามทิศทางไหลในเตาปฏิกรณ์ขั้นที่สอง (Secondary reactor) ซึ่งน้ำมันดินถูกกำจัดภายนอกเตาแก๊สไฟ ดังรูปที่ 2.18



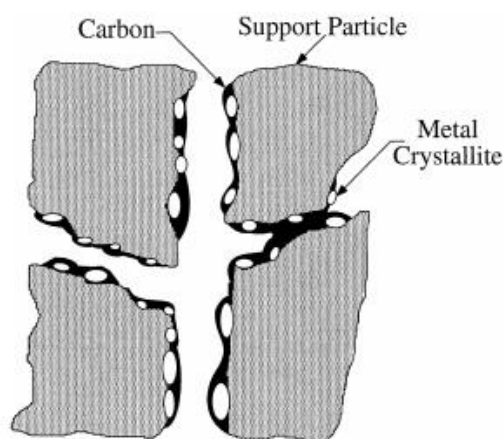
รูปที่ 2.18 วิธีทุติยภูมิในการกำจัดน้ำมันดิน (Devi และคณะ, 2003)

2.9.4 ปัจจัยที่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี

(มาลี สันติคุณภรณ์, 2557)

การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา (Deactivation) ส่งผลให้ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาลดต่ำลง ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยามีการดำเนินปฏิกิริยาผ่านไปในช่วงเวลาหนึ่ง โดยมีสาเหตุมาจากปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

2.9.4.1 ฟาวลิง (Fouling) เป็นการสะสมของคาร์บอน ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการแตกตัวของคาร์บอนมอนอกไซด์ หรือคาร์บอนที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ที่เรียกว่า ค็อก (Coke) โดยเกิดจากการควบแน่นหรือการสลายตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนบนผิว หรือกีดขวางทางเข้ารูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีผลต่อสารตั้งต้นที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยา จึงทำให้ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาลดต่ำลง



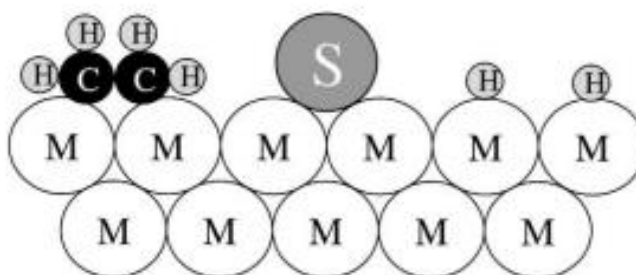
รูปที่ 2.19 แสดงการเกิดฟาวลิง โดยมีการสะสมของคาร์บอนซึ่งอุดตันรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา (Bartholomew, 2001)

ตารางที่ 2.2 ชนิดของคาร์บอนและโค้ก

ปัจจัย	ประเภท	ลักษณะ
โครงสร้างและตำแหน่ง การเกิดโค้ก	- โค้กที่ไม่ไวปฏิกิริยา (Coke-sensitive)	- โค้กที่เกาะอยู่บน ตำแหน่งกัมมันต์ ส่งผลให้ ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพ ต่ำลง
	- โค้กที่ไวปฏิกิริยา (Coke-insensitive)	- โค้กที่เกาะอยู่บน ตำแหน่งกัมมันต์ ซึ่งพร้อมที่ จะหลุดออกจากผิว เมื่อมี แก๊สไฮโดรเจน
กลไกการเกิดโค้ก โดยขึ้นกับชนิดของ ตัวเร่งปฏิกิริยา	- ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ บนตัวรองรับ	- เกิดเส้นคาร์บอนภายใน รูพรุน ส่งผลให้เกิดการ แตกร้าวของตัวรองรับ - คาร์บอนที่สะสมบน โลหะ ส่งผลต่อการ เสื่อมสภาพของตัวเร่ง ปฏิกิริยา - คาร์บอนอุดตันรูพรุน ขนาดกลางและขนาดเล็ก
	- ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ ออกไซด์หรือซัลไฟด์	- โค้กเกิดจากการควบแน่น ของอะโรมาติกส์โมเลกุล ขนาดใหญ่ที่เกิดในสถานะ แก๊ส โดยส่วนใหญ่เกิดจาก สารประกอบไฮโดรคาร์บอน บนตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด

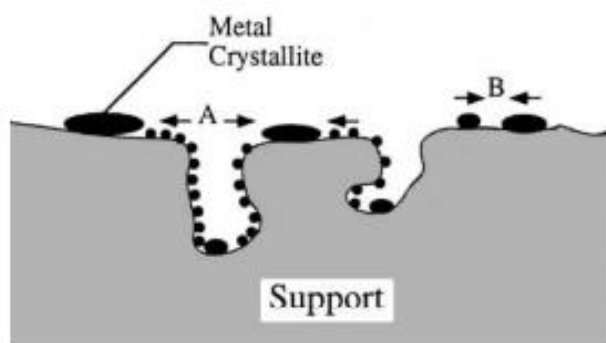
ที่มา : มาลี สันติคุณาภรณ์ (2557)

2.9.4.2 การปนเปื้อนสารพิษ (Poisoning) เป็นผลกระทบทางเคมีจากสิ่งเจือปนหรือสิ่งแปลกปลอมที่ส่งผลให้ความว่องไว หรือการเลือกเกิดปฏิกิริยาลดต่ำลง โดยสารพิษจะไปแย่งจับที่ตำแหน่งกัมมันต์บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งพันธะระหว่างสารพิษกับตำแหน่งกัมมันต์บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีความแข็งแรงสูง จึงส่งผลให้เกิดการกีดขวางการดูดซับของสารตั้งต้นกับตำแหน่งกัมมันต์ สารพิษที่ส่งผลต่อการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ตะกั่ว (Pb) ปรอท (Hg) และซัลเฟอร์ (S) เป็นต้น



รูปที่ 2.20 แสดงการเกิดการปนเปื้อนของสารพิษซัลเฟอร์บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Bartholomew, 2001)

2.9.4.3 การซินเทอริง (Sintering) คือ การหลอมหลวมตัวของโลหะ จนทำให้เกิดเป็นผลึกขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของผลึก (Crystallite migration) หรือการที่อะตอมโลหะหลุดออกจากผลึก (Atomic migration) เนื่องมาจากกระบวนการทางความร้อนภายใต้อุณหภูมิสูง การซินเทอริงทำให้เกิดการสูญเสียพื้นที่ผิวบริเวณตัวรองรับ จึงทำให้ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาลดลง



รูปที่ 2.21 แสดงการเกิดผลึกโลหะจากการซินเตอริง โดย (A) อะตอมโลหะหลุดออกจากผลึก (Atomic migration) หรือ (B) การเคลื่อนที่ของผลึก (Crystallite migration) (Bartholomew, 2001)

2.9.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดน้ำมันดิน

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการแกซีฟิเคชันของชีวมวล แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ โลหะอัลคาไลน์ (Alkali metal) , ออกไซด์ที่ไม่ใช่โลหะ (non-metallic oxides) และตัวรองรับที่เป็นออกไซด์ของโลหะ (supported metallic oxides) สำหรับกระบวนการแกซีฟิเคชันของชีวมวล ในหลายงานวิจัยมีการศึกษาและให้ความสนใจกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มของออกไซด์ที่ไม่ใช่โลหะ เช่น โดโลไมต์ ร่วมกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดน้ำมันดิน

โดโลไมต์ เป็นแร่แคลเซียมและแมกนีเซียม มีสูตรทั่วไปทางเคมี คือ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ซึ่งประกอบด้วย แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ร้อยละ 20, แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 30 และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ร้อยละ 45 และมีแร่ธาตุอื่นๆ เจือปนอยู่เล็กน้อย (Dayton, 2002) โดโลไมต์ที่พบในธรรมชาตินั้นอยู่ในรูปที่ไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสำหรับการเปลี่ยนน้ำมันดิน ต้องผ่านการแคลไซน์ก่อน โดยการแคลไซน์เกี่ยวข้องกับการสลายตัวของแร่ธาตุคาร์บอเนต เป็นการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อเปลี่ยนรูปเป็นแมกนีเซียมออกไซด์-แคลเซียมออกไซด์ ซึ่งเกิดที่อุณหภูมิสูง โดยปกติอยู่ที่ประมาณ 800-900 องศาเซลเซียส (Sundac, 2007) เมื่อผ่านการแคลไซน์แล้ว โดโลไมต์จึงมีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดน้ำมันดิน จากก๊าซที่ออกมาจากเตาแกซีฟาย (Han และคณะ, 2006) แต่การแคลไซน์นั้นทำให้พื้นที่ผิว (Surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ลดลง ส่งผลให้โดโลไมต์เปราะและแตกง่าย ส่วนข้อดีของโดโลไมต์ที่ทำให้

หลายงานวิจัยนิยมใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดน้ำมันดิน เพราะมีราคาถูกและสามารถใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งได้ อีกทั้งยังเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูงในการรีฟอร์มมิ่งน้ำมันดินด้วย (Dayton, 2002)

นิกเกิล มีจุดหลอมเหลว (Melting Point) ที่ 1455 องศาเซลเซียส นิยมนำมาใช้อย่างกว้างขวางในกระบวนการแกซิฟิเคชันของชีวมวลเพื่อเปลี่ยนรูปน้ำมันดิน เนื่องจากมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงในการกำจัดน้ำมันดิน และสามารถรีฟอร์มมิ่งมีเทนได้อย่างสมบูรณ์ พร้อมทั้งช่วยให้เกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนน้ำเป็นก๊าซ (Water –gas shift reaction) เพื่อปรับอัตราส่วนของก๊าซไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของก๊าซผลิตภัณฑ์ ทำให้ก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ของก๊าซผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ในขณะที่ไฮโดรคาร์บอนและมีเทนถูกกำจัดไป บางงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลยังสามารถลดจำนวนของสารประกอบไนโตรเจน เช่น แอมโมเนีย ในก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วย

2.9.6 วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการเคลือบฝัง (Impregnation method)

การเคลือบฝังเป็นวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบมีตัวรองรับที่ได้รับความนิยมมากที่สุด โดยประกอบด้วย 2 ส่วน คือ สารตั้งต้น (Precursor) ที่มีโลหะกัมมันต์ (Active metal) และตัวรองรับ (Support) โดยส่วนใหญ่แล้วเป็นตัวรองรับที่มีรูพรุนหรือมีพื้นที่ผิวสูง เช่น โดโลไมต์ เป็นต้น โดยการเคลือบฝังแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ขึ้นอยู่กับปริมาณสารละลายตั้งต้นที่ใช้ ได้แก่

2.9.6.1 การเคลือบฝังแบบเปียก (Wet impregnation) เป็นการนำตัวรองรับไปจุ่มในสารละลายตั้งต้นที่มีปริมาณมากเกินพอ

2.9.6.2 การเคลือบฝังแบบแห้ง (Dry impregnation) ปริมาณสารละลายที่ใช้มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของรูพรุนตามปริมาตรตัวรองรับที่ใช้

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hernandez และคณะ (2010) ศึกษาผลกระทบของขนาดอนุภาคของชีวมวลและระยะเวลาพักของก๊าซเพื่อสร้างก๊าซผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ โดยใช้ชีวมวลสามชนิด (Grapevine pruning, Sawdust wastes, Marc of grape) และเชื้อเพลิงฟอสซิล (A coal coke blend) ทดลองในเตาแกซิฟายแบบไหลผ่าน (Entrain flowed) จากการทดลองพบว่าเมื่อขนาดของอนุภาคลดลง

ความเข้มข้นของก๊าซที่เผาไหม้ได้ (CO , H_2 และ CH_4) เพิ่มขึ้น ขณะที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ค่อยๆลดลง (การเปลี่ยนเป็นเชื้อเพลิงเพิ่มจากร้อยละ 57.5 เป็นร้อยละ 91.4 เมื่อขนาดลดลงจาก 8 มิลลิเมตร เป็น 0.5 มิลลิเมตร) ดังนั้นขนาดอนุภาคที่เหมาะสมสำหรับเตาแก๊สฟายแบบนี้ต้องมีขนาดต่ำกว่า 1 มิลลิเมตร ส่วนผลระยะเวลากักของก๊าซพบว่า เมื่อระยะเวลากักของก๊าซภายในเตาปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น พบว่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน ค่าความร้อน ประสิทธิภาพของก๊าซ และการเปลี่ยนเป็นเชื้อเพลิง มีการปรับปรุงดีขึ้น นอกจากนี้การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงและระยะเวลากักของก๊าซนาน เป็นการปรับปรุงคุณภาพองค์ประกอบของก๊าซให้ดียิ่งขึ้น

Billaud และคณะ (2014) ศึกษาผลของอุณหภูมิในกระบวนการแก๊สฟิเคชัน พบว่าอุณหภูมิสูงขึ้น การสร้างคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนสูงขึ้น และลดค่าไฮโดรคาร์บอนเบา โดยทดลองที่อุณหภูมิ 800, 1000, 1200 และ 1400 องศาเซลเซียส ในท่อปฏิกรณ์แบบปล่อยหล่น ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆกับอุณหภูมิที่เพิ่มจนถึง 1200 องศาเซลเซียส และหลังจากนั้นจึงลดลง

Natarajan และคณะ (2015) ศึกษากระบวนการแก๊สฟิเคชันของเปลือกถั่วลิสง โดยศึกษาผลของอุณหภูมิขนาดอนุภาคและอัตราส่วนสมมูลที่มีผลต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ ทำการทดลองโดยใช้เตาปฏิกรณ์ในระบบฟลูอิดเบดที่ช่วงอุณหภูมิ 550-990 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 1.0, 1.5 และ 2.75 มิลลิเมตร และอัตราส่วนสมมูลในช่วง 0.26-0.40 พบว่าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนสมมูล 0.3 มีค่าความร้อน 4.13 MJ/m^3 ก๊าซที่ผลิตได้มีประสิทธิภาพร้อยละ 73.5 และการแปรสภาพเป็นคาร์บอนร้อยละ 82.5 เมื่อใช้ขนาดอนุภาค 1 มิลลิเมตร

Septien และคณะ (2013) ศึกษาการแปรสภาพของไม้ในท่อปฏิกรณ์แบบปล่อยหล่นที่อุณหภูมิ 1000, 1200 และ 1400 องศาเซลเซียส ผลของไอน้ำและขนาดอนุภาค 0.35-0.80 มิลลิเมตร ที่มีต่อกระบวนการแก๊สฟิเคชัน พบว่าการเติมไอน้ำมีอิทธิพลต่อน้ำมันดิน เขม่า ถ่านชาร์ และผลผลิตก๊าซ โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 1200 และ 1400 องศาเซลเซียส ส่วนขนาดของอนุภาคในช่วง 0.35-0.80 มิลลิเมตร ไม่ได้ส่งผลต่อผลผลิตของผลิตภัณฑ์ในช่วงเวลากักของก๊าซเพียงไม่กี่วินาที

Elbaba และคณะ (2013) ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนิกเกิลบนตัวรองรับโดโลไมต์เพื่อสร้างไฮโดรเจนในกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และแก๊สฟิเคชันที่

อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเศษยางรถยนต์ 0.5 ทำการทดลองในเตาปฏิกรณ์แบบฟลักซ์เบด ในการทดลองเปรียบเทียบใช้นิกเกิลร้อยละ 0, 5, 10, 20 โดยน้ำหนัก บนตัวรองรับโดโลไมต์ ผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้นิกเกิลร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก บนตัวรองรับโดโลไมต์ การสร้างไฮโดรเจนและก๊าซผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 30.30 เป็นร้อยละ 49.10 โดยน้ำหนัก ถ้าเพิ่มนิกเกิลสูงถึงร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่ามีการเพิ่มอัตราการเร่งปฏิกิริยาซึ่งนำไปสู่การสร้างไฮโดรเจนที่สูงขึ้น

Waheed และคณะ (2016) ศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก บนตัวรองรับโดโลไมต์ ในการสร้างคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน จากการใช้แกลบป่นวัตถุดิบในระบบแบบฟลักซ์เบด พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 850 องศาเซลเซียส เป็น 1050 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของไฮโดรเจนในก๊าซผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น (ร้อยละ 53.95 เป็นร้อยละ 65.18 โดยปริมาตร) เนื่องจากอุณหภูมิสูง ปฏิกิริยาดูดความร้อนจึงเกิดได้มากขึ้น (เช่น ปฏิกิริยา Water gas reaction and Boudouard reaction)

Zhang และคณะ (2010) ศึกษาการลดลงของน้ำมันดินและการเกิดโค้กในสามกระบวนการ ได้แก่ ไพโรไลซิส แกซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำ การออกซิเดชันบางส่วน ที่อุณหภูมิในช่วง 600-1400 องศาเซลเซียส โดยใช้ชีล้อยจากไม้ฮิโนกิเป็นวัตถุดิบ ทดลองในท่อปฏิกรณ์แบบปล่อยหล่น พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้น้ำมันดินเกิดขึ้นน้อยลง ไอน้ำและออกซิเจนให้ผลทางบวกกับการลดลงของการเกิดน้ำมันดินเช่นกัน โดยออกซิเจนเกิดปฏิกิริยาได้มากกว่าไอน้ำในการทำให้น้ำมันดินลดลง ส่วนการเกิดโค้กเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และสูงสุดที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ซึ่งแกซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำและการออกซิเดชันบางส่วนจะลดการเกิดโค้กได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับไพโรไลซิส

Wang และคณะ (2012) ศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ที่มีการปรับปรุง เพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจน จากกระบวนการแกซิฟิเคชันของขยะชุมชนโดยใช้ไอน้ำ ผลการศึกษาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถกำจัดน้ำมันดินและเพิ่มผลผลิตของก๊าซไฮโดรเจนได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอุณหภูมิที่สูงขึ้นสามารถเพิ่มผลผลิตของก๊าซไฮโดรเจนและประสิทธิภาพในการแปรสภาพเป็นคาร์บอนมากขึ้น โดยก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 55.78

Xu และคณะ (2013) ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสี่ชนิด ได้แก่ โดโลไมต์ โลหะนิกเกิลบนตัวรองรับโดโลไมต์ โลหะนิกเกิลบนตัวรองรับโดโลไมต์ที่มีการปรับปรุง และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการ

แปรสภาพจากโรงงานอุตสาหกรรม พบว่า โลหะนิกเกิลบนตัวรองรับโดโลไมต์ที่มีการปรับปรุงและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการแปรสภาพจากโรงงานอุตสาหกรรมมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าและมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการแปรสภาพจากโรงงานอุตสาหกรรมมีราคาแพงกว่า ซึ่งอัตราส่วนของ H_2 ต่อ CO และก๊าซที่ออกจากกระบวนการแกซิฟิเคชันโดยการใช้โลหะนิกเกิลบนตัวรองรับโดโลไมต์ โลหะนิกเกิลบนตัวรองรับโดโลไมต์ที่มีการปรับปรุงและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการแปรสภาพจากโรงงานอุตสาหกรรมมีค่าสูงกว่าการใช้โดโลไมต์ เนื่องจากมีองค์ประกอบของนิกเกิลอยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งส่งผลให้มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า ดังนั้นโลหะนิกเกิลบนตัวรองรับโดโลไมต์ที่มีการปรับปรุงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุด

Liang และคณะ (2015) ศึกษาผลของการเติม La, Mg และ Fe ลงบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับโดโลไมต์ด้วยวิธีการเคลือบฝังแบบเปียก ซึ่งใช้นิกเกิลร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้เตาปฏิกรณ์แบบฟิกซ์เบด ผลการศึกษาพบว่า การเติม La, Mg และ Fe ช่วยเพิ่มปฏิกิริยาและต่อต้านการเกิดซินเตอร์ริง โดยลำดับในการเร่งปฏิกิริยา คือ $La > Mg > Fe$ ซึ่งเมื่อใช้ La เพียงร้อยละ 1 ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเร่งปฏิกิริยาได้สูงสุด อีกทั้งสภาวะในการเกิดปฏิกิริยายังมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/1%La/dolomite ด้วย โดยอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสม

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น จึงสามารถสรุปได้ว่า การแปรสภาพชีวมวลในกระบวนการแกซิฟิเคชัน มีตัวแปรที่ส่งผลต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราส่วนสมมูล และขนาดอนุภาคของชีวมวล ซึ่งเมื่อทำการทดลองร่วมกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของก๊าซผลิตภัณฑ์ด้วย ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยข้างต้น ที่ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับโดโลไมต์ ที่มีร้อยละการกระจายตัวที่แตกต่างกัน เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการแปรสภาพของเปลือกถั่วดาวอินคาโดยกระบวนการแกซิฟิเคชัน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม และศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับโดโลไมต์ที่มีองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาสภาวะอุณหภูมิและอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม ผลของขนาดเปลือกถั่วดาวอินคาและผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อผลิตภัณฑ์ โดยใช้เปลือกถั่วดาวอินคาที่เหลือจากกระบวนการผลิตน้ำมัน ทำการทดลองในท่อปฏิกรณ์แบบปล่อยหล่น ซึ่งเป็นการทดลองในระดับปฏิบัติการ ดำเนินการวิจัยที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และห้องปฏิบัติการชั้น 4 ตึกปฏิบัติการรวม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีสารเคมี อุปกรณ์และวิธีการวิจัยดังนี้

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 วัสดุและสารเคมี

- เปลือกถั่วดาวอินคา
- ก๊าซออกซิเจน 99.5%
- ก๊าซไนโตรเจน 99.99 %
- อะซิโตน (Acetone)
- ซิลิโคนทนอุณหภูมิสูง
- นิกเกิลไนเตรท ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)
- โดโลไมต์ (Dolomite)

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- เครื่องแก้ว
- เครื่องบดเนกประสงค์ ขนาด 50 กิโลกรัม ยี่ห้อ SEW-EURODRIVE
- ชุดอุปกรณ์ทำความสะอาดก๊าซผลิตภัณฑ์ (Washer)
- อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซผลิตภัณฑ์
- เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ OHAUS
- เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ OHAUS
- ชุดตะแกรงร่อน ยี่ห้อ RETSCH ขนาด 20 35 และ 60 เมช (mesh)
- เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน ยี่ห้อ STS

- ตู้อบ (Oven) ยี่ห้อ NDN รุ่น XF-240
- เครื่องควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน (Rotameter) ยี่ห้อ Dwyer รุ่น RMB-50D-SSV
- เครื่องควบคุมอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน (Rotameter) ยี่ห้อ KOFLOC รุ่น RK 1250
- เครื่องให้ความร้อน ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น MAC3A-CRM
- เทอร์โมคัปเปิ้ลและเครื่องแปลงสัญญาณเพื่อแสดงผล ยี่ห้อ Lega รุ่น LK-02L
- เครื่องทำความเย็น ยี่ห้อ Bosstech รุ่น CB-2



รูปที่ 3.1 เปลือกถั่วดาวอินคาที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.2 เครื่องบดอเนกประสงค์ ขนาด 50 กิโลกรัม



รูปที่ 3.3 ชุดตะแกรงร่อน ขนาด 20 35 และ 60 เมช (mesh)

3.1.3 เครื่องมือวิเคราะห์

- เครื่องวิเคราะห์แบบประมาณ (TGA) ยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น SDTA 851e
- เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (CHNS/O Analyzer) ยี่ห้อ Leco รุ่น CHNS 628
- เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน Automatic Bomb Calorimeter; Leco รุ่น AC-350
- เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Portable infrared Coal gas Analyzer) รุ่น Gasboard-3100P
- เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี- แมสสเปกโตรเมทรี (GC-MS) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น GC2010



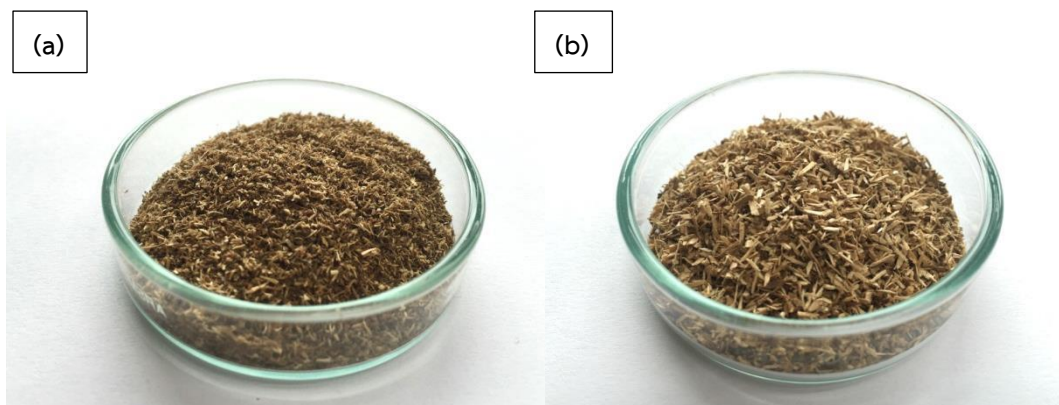
รูปที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Portable infrared Coal gas Analyzer)



รูปที่ 3.5 เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี
(Gas chromatography-Mass spectrometry)

3.2 การเตรียมวัตถุดิบ

บดเปลือกถั่วดาวอินคาและคัดแยกขนาดโดยใช้ตะแกรงขนาด 20 35 และ 60 เมช (mesh) นำเข้าสู่เครื่องเย่าตะแกรงเพื่อแยกขนาด ดังนั้นจะได้เปลือกถั่วดาวอินคา 2 ขนาด คือ 0.25-0.50 มิลลิเมตร และ 0.50-0.85 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.6 เปลือกถั่วดาวอินคาขนาด (a) 0.25-0.50 มิลลิเมตร (b) 0.50-0.85 มิลลิเมตร

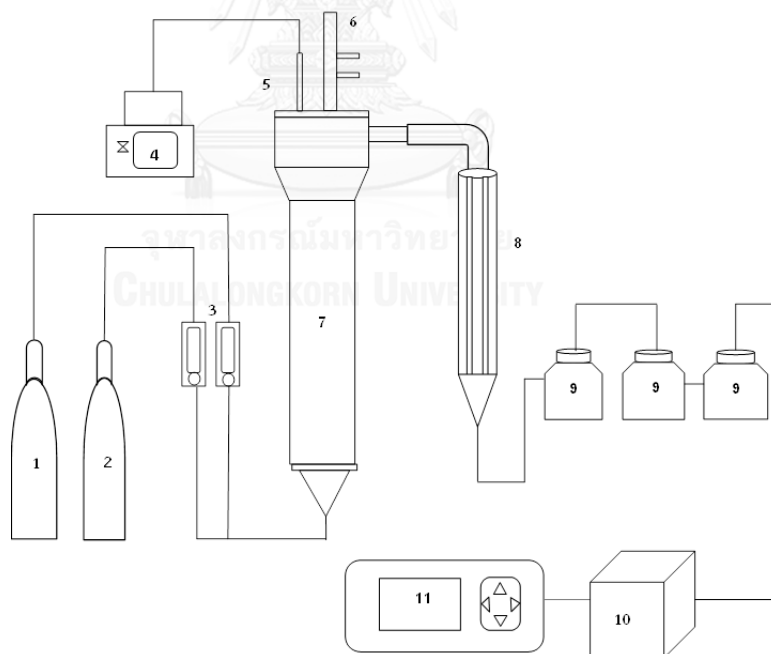
3.3 การเตรียมท่อปฏิกรณ์

นำท่อปฏิกรณ์แบบปล่อยหล่นสแตนเลสรูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 5.5 เซนติเมตร สูง 50 เซนติเมตร ต่อเข้ากับเตาเผาให้ความร้อนแบบท่อกลางสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ ภายในท่อปฏิกรณ์บรรจุอะลูมินาบอลขนาด 8 มิลลิเมตร 200 กรัมที่ด้านล่าง เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวรองรับถ่านชาร์ไม่ให้เกิดลงไปอุดตันท่อสำหรับป้อนก๊าซ จากนั้นต่อชุดควบคุมแรงดัน ชุดทำความสะอาดก๊าซผลิตภัณฑ์ ชุดวัดอัตราการไหลของก๊าซ และเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ

โดยท่อปฏิกรณ์มีหลักการทำงานในกระบวนการแกซิฟิเคชันดังนี้ เมื่อเตรียมท่อปฏิกรณ์เรียบร้อยแล้ว เครื่องให้ความร้อนจะให้ความร้อนแก่ท่อปฏิกรณ์ โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซพาพร้อมกับก๊าซออกซิเจนช่วยในการทำปฏิกิริยาซึ่งเข้าทางด้านล่างของท่อปฏิกรณ์ สามารถปรับเปลี่ยนอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาภายในท่อปฏิกรณ์โดยใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิซึ่งมีเทอร์โมคัปเปิ้ลเป็นตัววัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงถึงค่าที่ต้องการ นำชีวมวลป้อนเข้าสู่ด้านบนตามอัตราเร็วที่กำหนด เมื่อได้รับความร้อนแล้วชีวมวลเกิดการสลายตัวเป็นก๊าซและเคลื่อนที่ออกทางด้านบนของท่อปฏิกรณ์ ผ่านชุดควบคุมแรงดันซึ่งมีน้ำหล่อเย็นเพื่อลดอุณหภูมิของก๊าซ มีบางส่วนของก๊าซผลิตภัณฑ์ถูกควบแน่นเป็นผลิตภัณฑ์เหลวหรือน้ำมันดิน จากนั้นก๊าซผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่ผ่านชุดทำความสะอาดก๊าซก่อนเข้าสู่เครื่องวัดอัตราการไหลของก๊าซและเครื่องวิเคราะห์ร้อยละของก๊าซผลิตภัณฑ์ตามลำดับ



รูปที่ 3.7 ท่อปฏิกรณ์แบบปล่อยหล่น (Drop tube reactor)



รูปที่ 3.8 แผนผังของท่อปฏิกรณ์แบบปล่อยหล่น (1) ก๊าซไนโตรเจน (2) ก๊าซออกซิเจน (3) เครื่องควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ (4) เครื่องให้ความร้อน (5) เทอร์โมคัปเปิ้ล (6) อุปกรณ์ป้อนวัตถุดิบเข้าท่อปฏิกรณ์ (7) ท่อปฏิกรณ์ (8) ชุดอุปกรณ์ควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็น (9) ชุดอุปกรณ์ทำความสะอาดก๊าซผลิตภัณฑ์ (10) อุปกรณ์วัดอัตราการไหลก๊าซผลิตภัณฑ์ (11) เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ

3.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

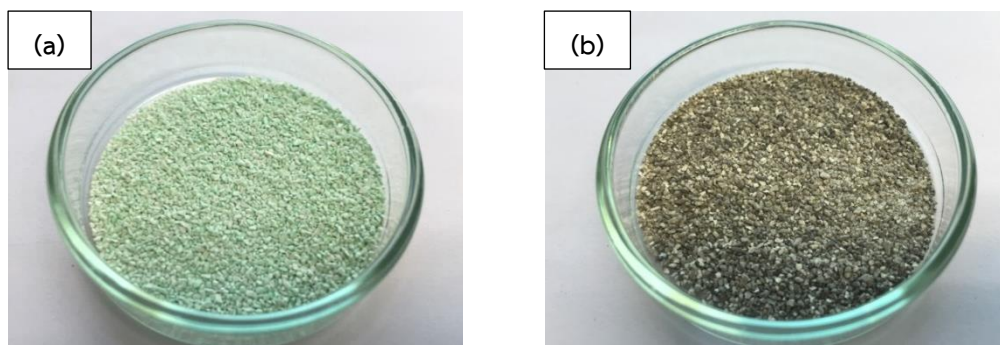
ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (dolomite) และโลหะนิกเกิลบนตัวรองรับโดโลไมต์ (Ni/dolomite) มีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

3.4.1 เตรียมตัวรองรับโดโลไมต์ขนาด 0.50-0.85 มิลลิเมตร โดยผสมผงโดโลไมต์ ขนาด 325 เมช, ดินขาว (Kaolin), คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (CMC) และน้ำ ให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยการอัดรีด แล้วนำไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำตัวรองรับโดโลไมต์ที่ได้มาบดและคัดแยกให้มีขนาดเท่ากับ 0.50-0.85 มิลลิเมตร

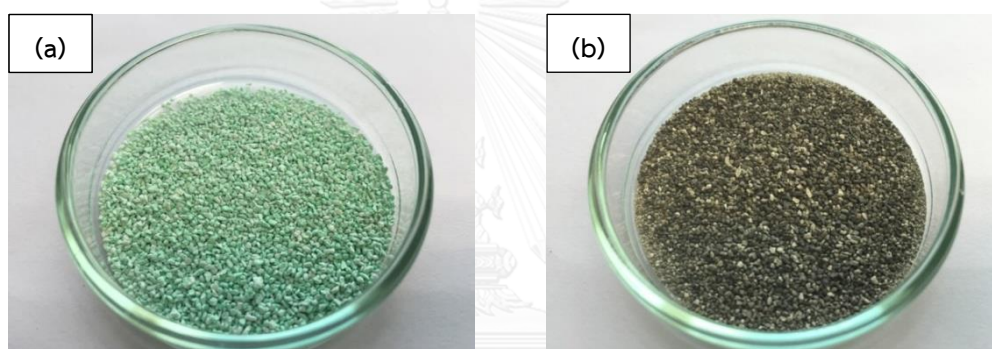


รูปที่ 3.9 ตัวรองรับโดโลไมต์ ขนาด 0.50-0.85 มิลลิเมตร ที่ผ่านการแคลไซน์แล้ว

3.4.2 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนิกเกิลบนตัวรองรับโดโลไมต์ (Ni/dolomite) ด้วยวิธีเคลือบฝังแบบเปียก (wet impregnation method) โดยละลายนิกเกิล (II) ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ที่มีปริมาณนิกเกิล ร้อยละ 5 และ ร้อยละ 10 ตามลำดับ ลงในน้ำกลั่น จากนั้นจึงนำโดโลไมต์ ขนาด 0.50-0.85 มิลลิเมตรที่เป็นตัวรองรับ ใส่ลงในสารละลายและปั่นเหวี่ยงที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำไประเหยน้ำออกในเตาอบ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 3.10 ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Ni/dolomite ขนาด 0.50-0.85 มิลลิเมตร (a) ก่อนแคลไซน์ (b) หลังแคลไซน์



รูปที่ 3.11 ตัวเร่งปฏิกิริยา 10% Ni/dolomite ขนาด 0.50-0.85 มิลลิเมตร (a) ก่อนแคลไซน์ (b) หลังแคลไซน์

3.5 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

นำตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนิกเกิลบนตัวรองรับโดโลไมต์ วิเคราะห์โครงสร้างผลึกและเฟสของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) วิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ BET (Brunauer Emmett Teller surface area) ศึกษาลักษณะสัญญาณของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) วิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธี Energy Dispersive X-ray (EDX) และวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analyzer: TGA)

3.6 การดำเนินงานวิจัย

3.6.1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติด้านความร้อนของเปลือกถั่วดาวอินคา

นำเปลือกถั่วดาวอินคาที่ได้อบไล่ความชื้นแล้วทั้งสองขนาดมาวิเคราะห์ดังนี้

3.6.1.1 วิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) เพื่อหาค่าเพื่อหาร้อยละของคาร์บอน ไนโตรเจน ออกซิเจน ไฮโดรเจนและซัลเฟอร์ ด้วยเครื่อง CHNS/O Analyzer ยี่ห้อ Leco รุ่น CHNS 628 ตามวิธี ASTM-D5373

3.6.1.2 วิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) เพื่อหาร้อยละความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัวและเถ้า ด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric- analyzer: TGA) ยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น SDTA 851e ตามวิธี ASTM-D5142-02

3.6.1.3 วิเคราะห์ค่าความร้อน (Low heating value: LHV) เพื่อหาค่าความร้อนของเปลือกถั่วดาวอินคาด้วยเครื่อง Automatic Bomb Calorimeter; Leco model C-350

3.6.1.4 วิเคราะห์หองค์ประกอบ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ตามวิธี TAPPI T264, T-203 และ T-222 ตามลำดับ

3.6.2 ศึกษากระบวนการแกซีเคชันของเปลือกถั่วดาวอินคาที่สภาวะต่างๆ

ดำเนินการกระบวนการแกซีเคชันของเปลือกถั่วดาวอินคาในท่อปฏิกรณ์ปล่อยหล่นโดยใช้เปลือกถั่วดาวอินคาขนาด 0.25-0.50 มิลลิเมตร และ 0.50-0.85 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการป้อน 1 กรัมต่อนาที ทำการทดลองเป็นเวลา 30 นาที โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซพาและป้อนก๊าซออกซิเจนในสัดส่วนของออกซิเจนต่อเชื้อเพลิงหรืออัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 วัดค่าอัตราการไหลของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้และบันทึกค่าร้อยละของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์ก๊าซทุกๆ 1 นาที เมื่อทำการทดลองในระบบเสร็จสิ้นปิดระบบให้ความร้อนแก่ท่อปฏิกรณ์ ปิดก๊าซออกซิเจนแต่ยังคงให้มีการไหลของก๊าซไนโตรเจน รออุณหภูมิเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วจึงปิดการไหลของก๊าซไนโตรเจน เก็บผลิตภัณฑ์ของแข็งที่หล่นสู่ด้านล่างของท่อปฏิกรณ์และผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการควบแน่นไปวิเคราะห์ผล

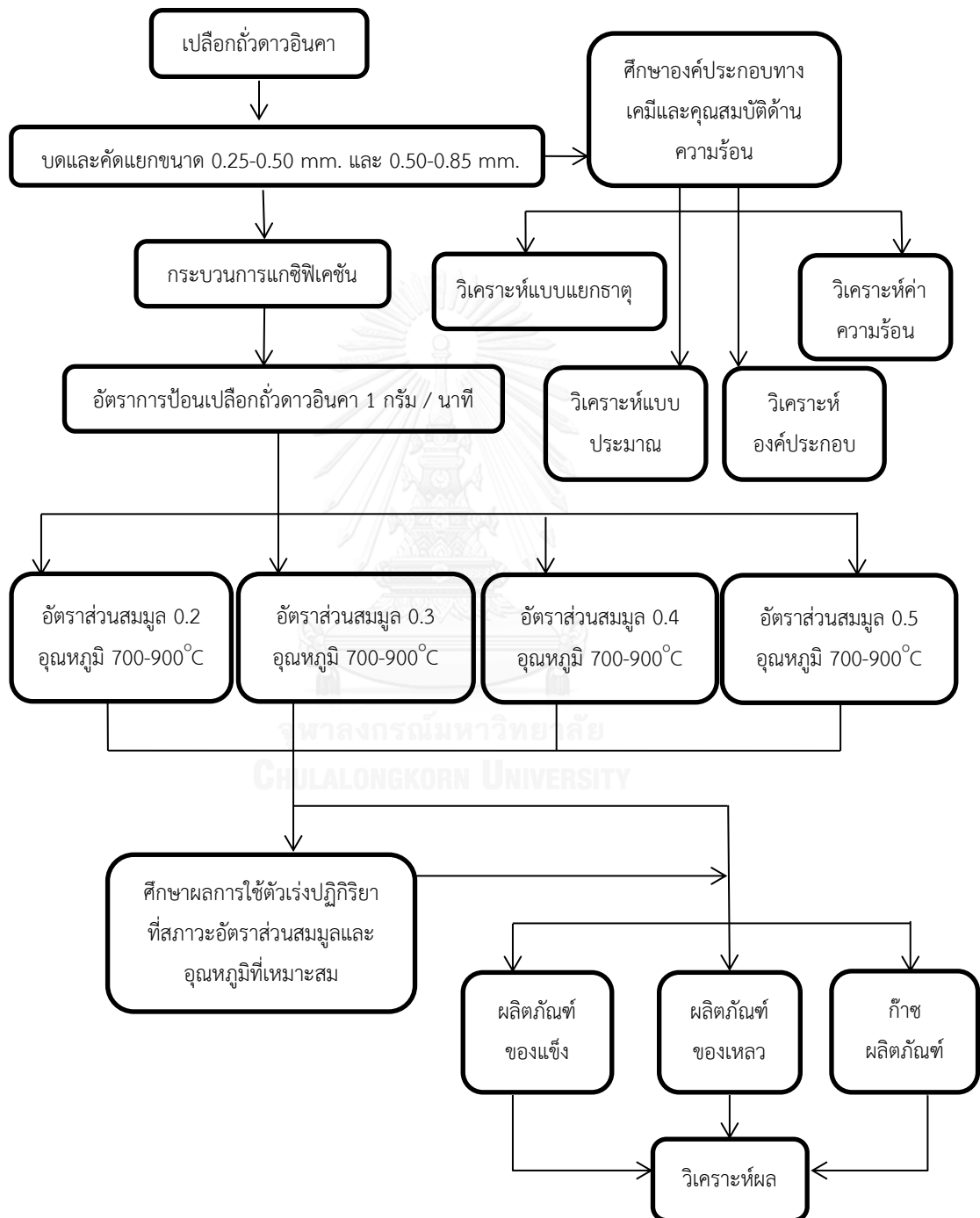
- ขนาดเปลือกถั่วดาวอินคา 0.25-0.50 และ 0.50-0.85 มิลลิเมตร
- อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส
- อัตราการป้อน 1 กรัมต่อนาที ทำการทดลองเป็นเวลา 30 นาที
- อัตราสมมูลเท่ากับ 0.2 0.3 0.4 และ 0.5

3.6.3 ศึกษากระบวนการแกซีฟิเคชันของเปลือกถั่วดาวอินคาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

เลือกสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองข้างต้นมาศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อผลิตภัณฑ์ โดยการเปรียบเทียบการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ โดโลไมต์, นิกเกิลร้อยละ 5 บนตัวรองรับโดโลไมต์ และนิกเกิลร้อยละ 10 บนตัวรองรับโดโลไมต์ ทำการทดลองโดยผสมตัวเร่งปฏิกิริยากับเปลือกถั่วดาวอินคาในอัตราส่วน 1:1 และนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดมาศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อตัวเร่งปฏิกิริยา

3.6.4 วิเคราะห์ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแกซีฟิเคชัน

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแกซีฟิเคชันของเปลือกถั่วดาวอินคา ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ของแข็ง ผลิตภัณฑ์เหลวและก๊าซผลิตภัณฑ์ ซึ่งผลิตภัณฑ์ของแข็ง (ถ่านชาร์) นำมาชั่งน้ำหนักแล้วนำไปวิเคราะห์แบบแยกธาตุเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ผลิตภัณฑ์ของเหลว (น้ำมันดิน) ที่เก็บได้วิเคราะห์โดยใช้ก๊าซโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (GC-MS) ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้ วัดเป็นร้อยละของก๊าซ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซมีเทน ด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Portable infrared Coal gas Analyzer)



รูปที่ 3. 12 แผนภาพการทดลองกระบวนการแกซีฟิเคชันของเปลือกถั่วดาวอินคา

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการแกซีฟิเคชันของเปลือกถั่วดาวอินคาที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันของเมล็ดถั่วดาวอินคา ศึกษาโดยใช้ท่อปฏิกรณ์แบบปล่อยหล่น (Drop tube reactor) ซึ่งตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ ขนาดของเปลือกถั่วดาวอินคา อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio) และศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับโดโลไมต์ (Ni/dolomite) ในการปรับปรุงคุณภาพของก๊าซผลิตภัณฑ์ ในอัตราส่วนเปลือกถั่วดาวอินคาต่อตัวเร่งปฏิกิริยา เท่ากับ 1:1

4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเปลือกถั่วดาวอินคา

เปลือกถั่วดาวอินคาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 2 ขนาด ได้แก่ ขนาด 0.25-0.50 มิลลิเมตร และ 0.50-0.85 มิลลิเมตร ก่อนทำการทดลองถูกนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี และศึกษาสมบัติด้านความร้อน โดยแบ่งออกเป็น การวิเคราะห์แบบประมาณ การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ และการวิเคราะห์หาปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน และการหาค่าความร้อน

4.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis)

ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ ด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analyzer: TGA) ทำให้ทราบค่า ร้อยละของน้ำหนัก สารระเหย คาร์บอนคงตัวและเถ้า ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นว่าขนาดของเปลือกถั่วดาวอินคาที่ต่างกัน แต่ค่าของสารระเหย คาร์บอนคงตัว และน้ำหนัก ไม่ต่างกันมาก หากแต่เปลือกถั่วดาวอินคาขนาดเล็กมีเถ้าเป็นองค์ประกอบมากกว่าเปลือกถั่วดาวอินคาขนาดใหญ่ เนื่องจากเปลือกถั่วดาวอินคาขนาดเล็กมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่เผาไหม้ไม่ได้มากกว่า ซึ่งองค์ประกอบของสารอินทรีย์นี้มาจากโครงสร้างของลิกโนเซลลูโลสระหว่างกระบวนการลดขนาดอนุภาค (Bridgeman และคณะ, 2007)

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (wt. % dry basis) ของวัตถุดิบต่างๆ

การวิเคราะห์ แบบประมาณ	วัตถุดิบ					
	เปลือกถั่วดาวอินคา		เปลือก ถั่วลิสง ¹	ซีลี้อยจาก ต้นปืช ²	ชานอ้อย ³	แกลบ ⁴
	ขนาด 0.25-0.50 มม.	ขนาด 0.50-0.85 มม.				
สารระเหย	69.07	69.83	65.13	85	81.55	63.71
คาร์บอนคงตัว	12.65	13.78	20.86	14.2	10.91	12.98
ความชื้น	4.79	4.69	11.12	9.8	5.92	6.10
เถ้า	13.49	11.70	2.89	0.8	1.62	17.21

ที่มา : ¹Natarajan และคณะ (2015), ²Billaud และคณะ (2014), ^{3,4}Waheed และคณะ (2013)

4.1.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ด้วยเครื่อง CHNS/O Analyzer ทำให้ทราบค่าร้อยละ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์และออกซิเจน ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เปลือกถั่วดาวอินคาขนาดใหญ่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูงกว่าขนาดเล็ก และจากค่าคาร์บอนและ ไฮโดรเจนที่เป็นองค์ประกอบของเปลือกถั่วดาวอินคา พบว่าเหมาะสมสำหรับนำมาแปรสภาพทางเคมี เป็นก๊าซเชื้อเพลิง และพบว่าไม่มีปริมาณซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ ดังนั้นจึงไม่น่าเกิดปัญหาการเกิด ก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์ที่ปนออกมากับก๊าซผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (wt. % dry basis) ของวัตถุดิบต่างๆ

การวิเคราะห์ แบบแยกธาตุ	วัตถุดิบ					
	เปลือกถั่วดาวอินคา		เปลือก ถั่วลิสง ¹	ซีลี้อยจาก ต้นปืช ²	ชานอ้อย ³	แกลบ ⁴
	ขนาด 0.25-0.50 มม.	ขนาด 0.50-0.85 มม.				
คาร์บอน	40.81	41.24	52.96	50.00	45.50	39.82
ไฮโดรเจน	6.89	6.78	6.24	5.80	5.63	5.40
ไนโตรเจน	2.08	1.51	0.59	< 0.30	0.80	1.27
ซัลเฟอร์	-	-	0.22	0.014	-	-
ออกซิเจน	36.73	38.77	40.20	44.00	48.07	53.51

ที่มา : ¹Natarajan และคณะ (2015), ²Billaud และคณะ (2014), ^{3,4}Waheed และคณะ (2013)

4.1.3 การวิเคราะห์ค่าความร้อน

ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของเปลือกถั่วดาวอินคา (Lower heating value : LHV) ด้วยเครื่อง Automatic Bomb Calorimeter ได้ผลดังตารางที่ 4.3 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลอื่นๆ แล้ว พบว่าเปลือกถั่วดาวอินคามีค่าความร้อนที่เหมาะสม สามารถนำมาผลิตเป็นก๊าซเชื้อเพลิงคุณภาพดี มีค่าความร้อนสูงได้

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน (wt. % dry basis) ของวัตถุดิบต่างๆ

วัตถุดิบ	ค่าความร้อน (MJ/Kg)
เปลือกถั่วดาวอินคา	15.80
เปลือกถั่วลิสง ¹	16.36
ต้นข้าวโพด ¹	14.70
ฟางข้าว ¹	12.36
เหง้ำมันสำปะหลัง ²	15.37

ที่มา : ¹Li และคณะ (2017), ²Panchaluck และคณะ (2015)

4.1.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบ

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบ พบว่าร้อยละของ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เท่ากับ 35.20, 11.96, 0.71 ตามลำดับ และมีสารประกอบอื่นๆ ร้อยละ 52.13

4.2 กระบวนการแกซีฟิเคชันของเปลือกถั่วดาวอินคาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ในกระบวนการแกซีฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ศึกษาผลของขนาดอนุภาคเปลือกถั่วดาวอินคา 0.25-0.50 มิลลิเมตรและ 0.50-0.85 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 700 - 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.2-0.5

4.2.1 ผลของขนาดเปลือกถั่วดาวอินคาที่มีต่อกระบวนการแกซีฟิเคชัน

จากการทดลองป้อนเปลือกถั่วดาวอินคาขนาด 0.25-0.50 มิลลิเมตร ลงในท่อปฏิกรณ์แบบปล่อยหล่น ในอัตรา 1 กรัมต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที พบว่า เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 20 นาที ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณลดลง และองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเรื่อยๆ สาเหตุเกิดจาก ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้ไปอุดตันอยู่บริเวณท่อสำหรับป้อนชีวมวล ทำให้ชีวมวลที่ป้อนลงไปไม่สามารถลำเลียงไปสู่บริเวณที่เกิดปฏิกิริยาได้ จึงไม่มีก๊าซผลิตภัณฑ์เกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากชีวมวลมีขนาดเล็ก เมื่อเกิดปฏิกิริยาขึ้น เกิดเป็นถ่านชาร์ที่มีความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้ถ่านชาร์พุ่งขึ้นไปด้านบนเนื่องจากแรงผลักของก๊าซที่ป้อนจากทางด้านล่าง เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของแข็งอุดตันบริเวณท่อ ซึ่งปกติจะตกลงมาสู่ด้านล่างของท่อปฏิกรณ์



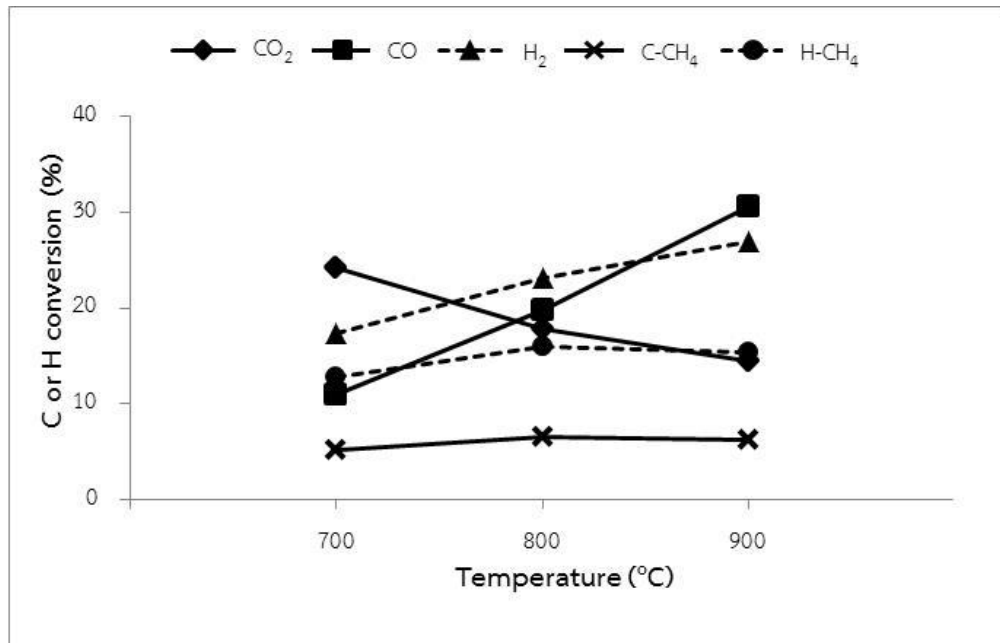
รูปที่ 4.1 ผลิตภัณฑ์ของแข็งอุดตันบริเวณท่อที่ป้อนชีวมวล

ดังนั้น ชีวมวลที่มีขนาดเล็กเกินไปจึงไม่เหมาะสมสำหรับท่อปฏิกรณ์แบบปล่อยหล่นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ในการทดลองต่อมาจึงเลือกใช้เปลือกถั่วดาวอินคาขนาด 0.50-0.80 มิลลิเมตร เพียงขนาดเดียวในการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง โดยศึกษาที่อุณหภูมิ 700-900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.2-0.5

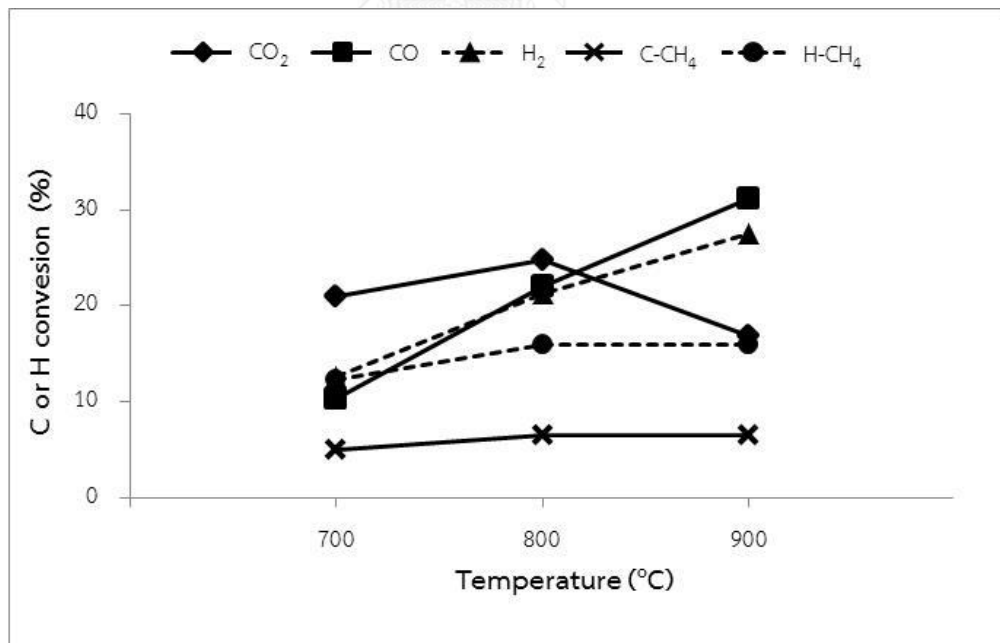
4.2.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระบวนการแกซิฟิเคชัน

4.2.2.1 ผลของอุณหภูมิต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน

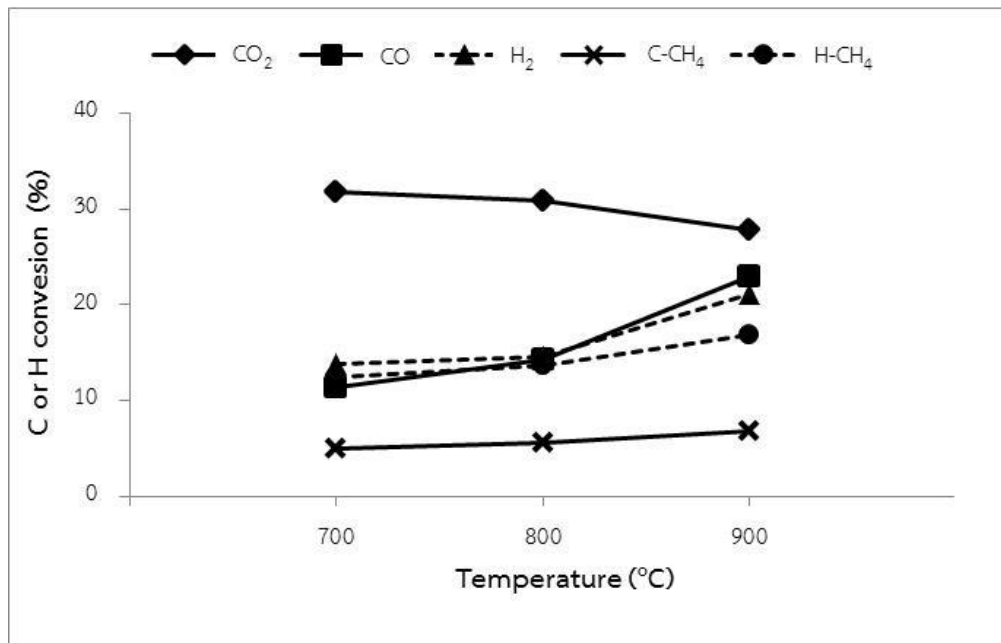
การศึกษาผลของอุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส ที่มีต่อกระบวนการแกซิฟิเคชัน ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 และใช้ขนาดของเปลือกถั่วดาวอินคา 0.50-0.85 มิลลิเมตร โดยทำการคำนวณหาการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นก๊าซผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซมีเทน ใช้วิธีคำนวณดังแสดงในภาคผนวก ก จากการศึกษาพบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 700 เป็น 900 องศาเซลเซียส การแปรสภาพของคาร์บอนในเปลือกถั่วดาวอินคาเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจากร้อยละ 21.00-38.46 เป็นร้อยละ 14.50-34.07 และการแปรสภาพของคาร์บอนเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 10.29-11.60 เป็นร้อยละ 22.88-31.23 ส่วนการแปรสภาพของคาร์บอนเป็นก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากร้อยละ 4.47-5.21 เป็นร้อยละ 6.27-6.87 เมื่อรวมการแปรสภาพของคาร์บอนจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และมีเทน พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การแปรสภาพเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 15.31-16.38 เป็นร้อยละ 29.75-37.70 สำหรับการแปรสภาพของไฮโดรเจนมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการแปรสภาพของคาร์บอน ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 700 เป็น 900 องศาเซลเซียส การแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นก๊าซไฮโดรเจน เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 12.59-17.32 เป็นร้อยละ 21.17-27.59 และการแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 10.99-12.81 เป็นร้อยละ 15.40-16.88 โดยการแปรสภาพทั้งหมดของไฮโดรเจนโดยรวมก๊าซทั้งสองชนิด เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 23.98-30.13 เป็นร้อยละ 37.21-43.49 สำหรับการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นก๊าซสังเคราะห์ (ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน) พบว่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 22.88-28.29 เป็นร้อยละ 44.05-58.82 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันในทุกๆ อัตราส่วนสมมูล ดังแสดงในรูปที่ 4.2-4.6



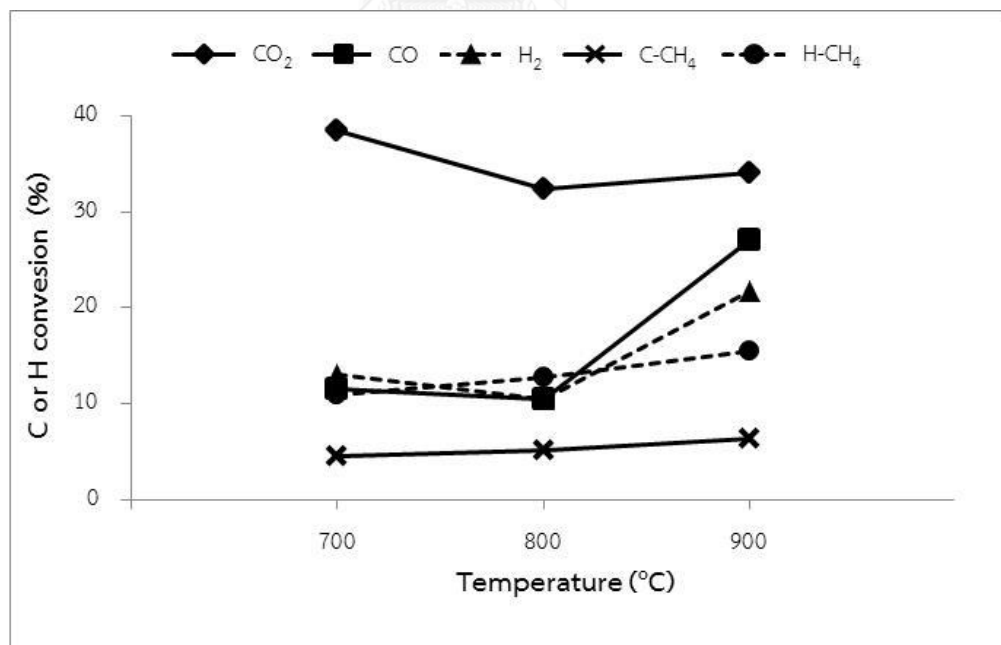
รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2



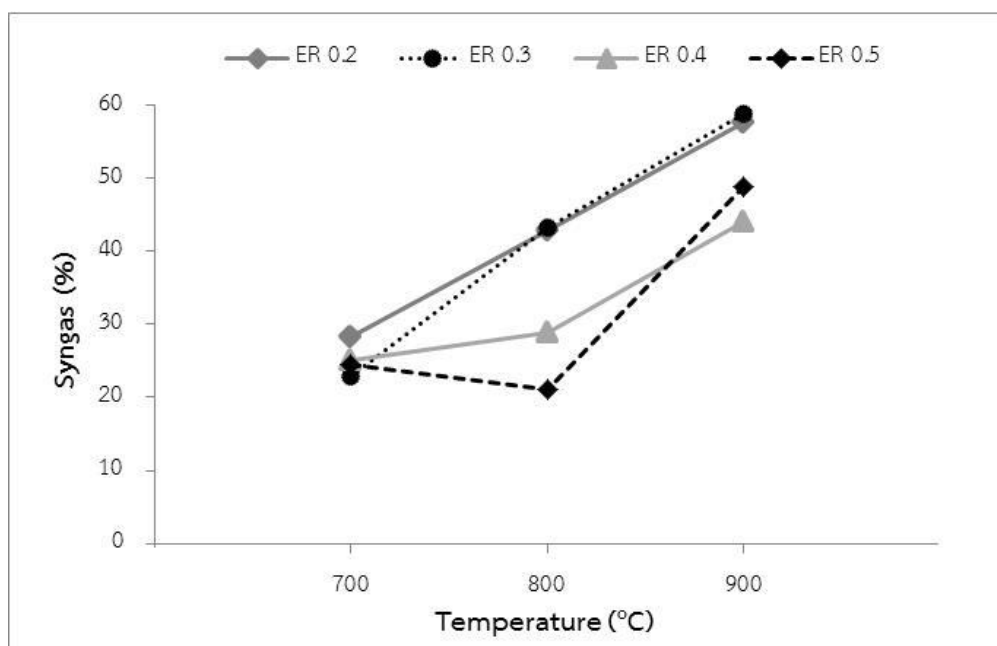
รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน ที่อัตราส่วนสมมูล 0.3



รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน ที่อัตราส่วนสมมูล 0.4



รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน ที่อัตราส่วนสมมูล 0.5



รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณก๊าซสังเคราะห์ ที่อัตราส่วนสมมูลต่างๆ

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนและปริมาณก๊าซสังเคราะห์สามารถอธิบายผลของการทดลอง ดังสมการต่อไปนี้

Oxidation reactions:



Boudouard reaction:



Water gas reaction:



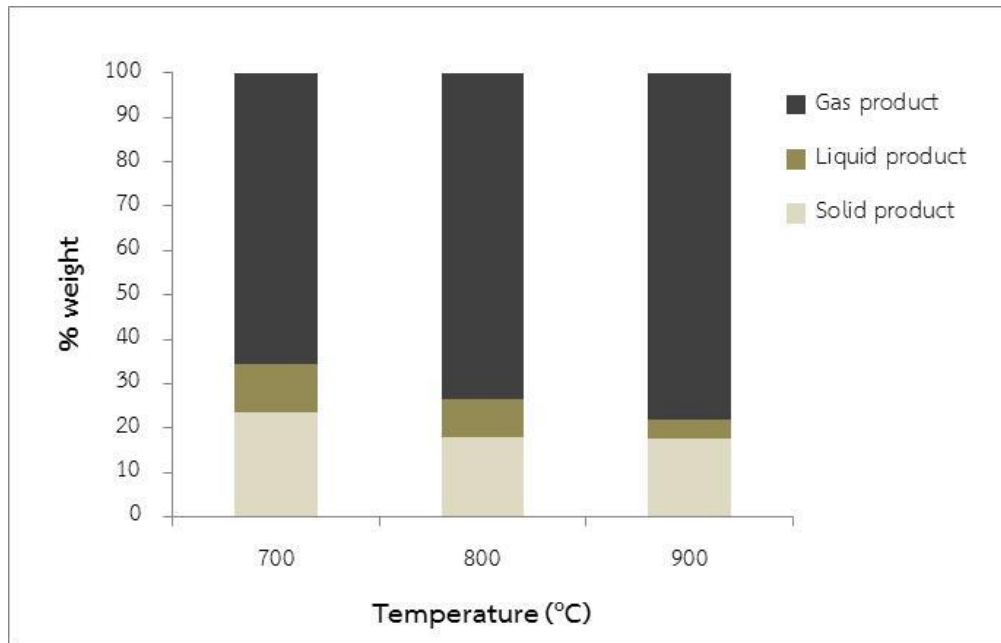
Methanation reaction:



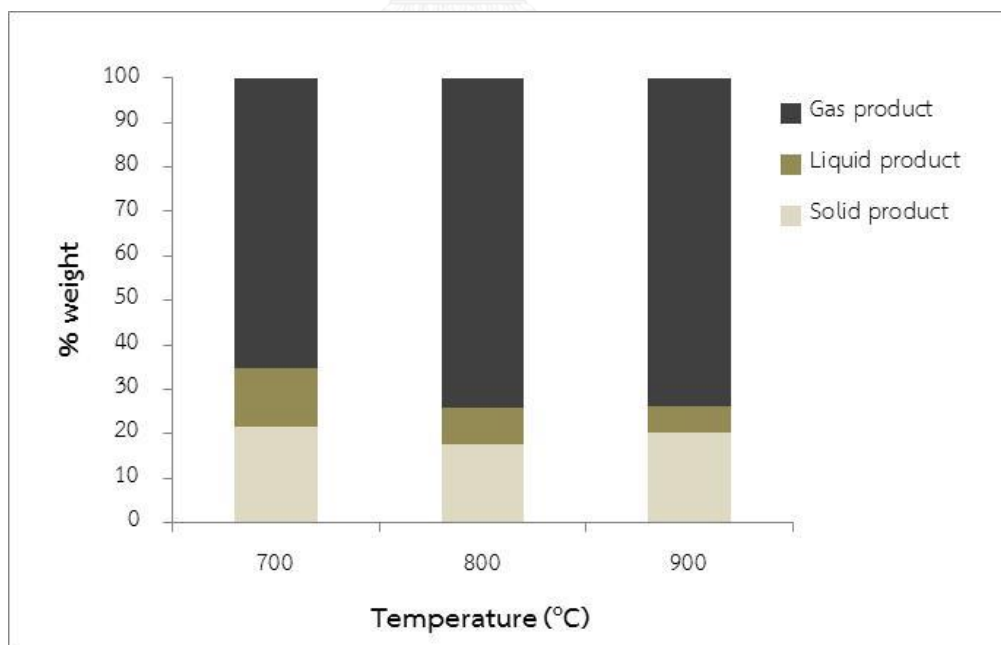
เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 700 เป็น 900 องศาเซลเซียส การแปรสภาพของคาร์บอนเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยา Boudouard และ ปฏิกิริยา Water gas ดังสมการที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้า (ทางขวามือ) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จึงเพิ่มสูงขึ้น และสำหรับการแปรสภาพของคาร์บอนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พบว่า เกิดจากปฏิกิริยาที่ 4.1 และ 4.3 แต่ถูกใช้ในปฏิกิริยาที่ 4.5 จึงทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จาก 700 เป็น 900 องศาเซลเซียส ส่วนการแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นก๊าซไฮโดรเจนมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เกิดจากปฏิกิริยา Water gas ดังสมการที่ 4.6 เนื่องจากปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจึงส่งผลให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้า (ทางขวามือ) ก๊าซไฮโดรเจนจึงเพิ่มสูงขึ้น และสำหรับการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นก๊าซมีเทน เพิ่มขึ้นเกิดจากปฏิกิริยา Methanation ดังสมการที่ 4.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อการแปรสภาพของคาร์บอนเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และการแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ปริมาณก๊าซสังเคราะห์สูงขึ้นตามอุณหภูมิด้วย โดยสูงสุดที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ซึ่งก๊าซสังเคราะห์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า สารเคมี เครื่องอุปโภคบริโภคต่างๆ เป็นต้น

4.2.2.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์

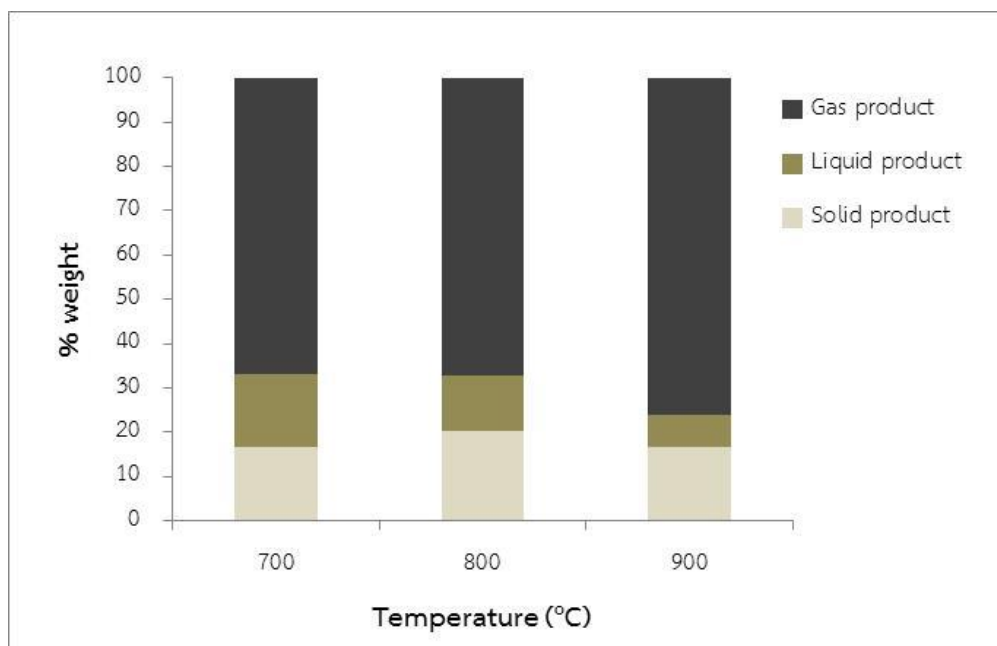
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแกซิฟิเคชันของเปลือกถั่วดาวอินคา ประกอบด้วยของแข็ง (ถ่านชาร์) ของเหลว (น้ำมันดิน) และก๊าซ ในงานวิจัยนี้สนใจผลิตภัณฑ์ก๊าซเป็นหลัก ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 700 เป็น 900 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลงจากร้อยละ 10.79-16.45 เป็นร้อยละ 4.55-7.08 ส่วนผลิตภัณฑ์ของแข็งลดลงด้วยเช่นกัน จากร้อยละ 16.68-23.65 เป็นร้อยละ 16.69-20.12 เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลให้การสลายตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลวและของแข็งเกิดเป็นก๊าซมากขึ้น ผลิตภัณฑ์ก๊าซจึงเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 65.35-66.87 เป็นร้อยละ 73.82-77.96 ซึ่งพบว่า มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันที่อัตราส่วนสมมูล 0.2-0.4 ดังรูปที่ 4.7-4.9



รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2

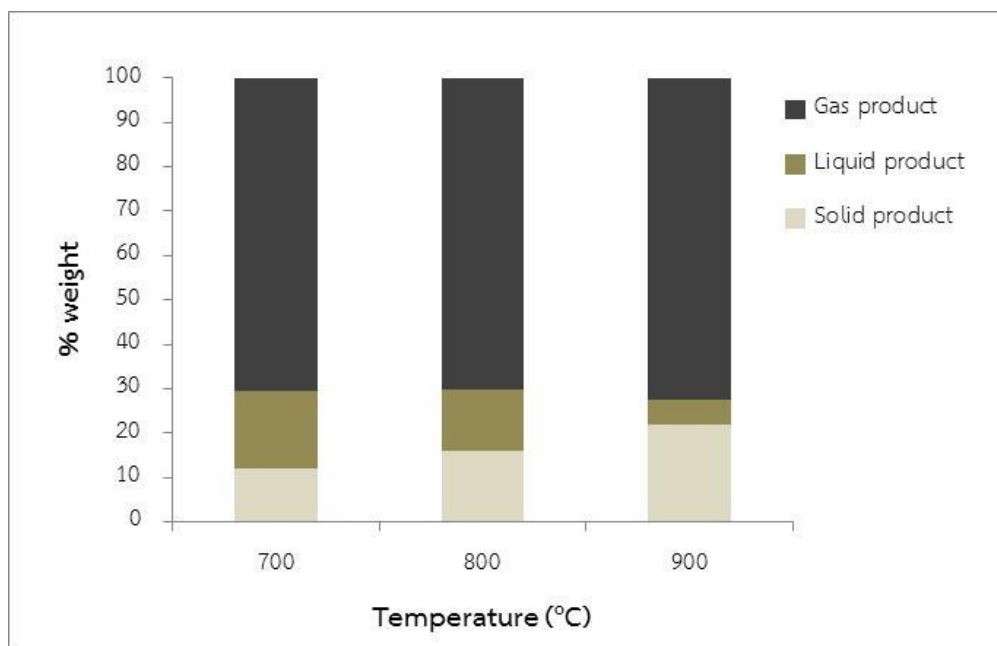


รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ที่อัตราส่วนสมมูล 0.3



รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ที่อัตราส่วนสมมูล 0.4

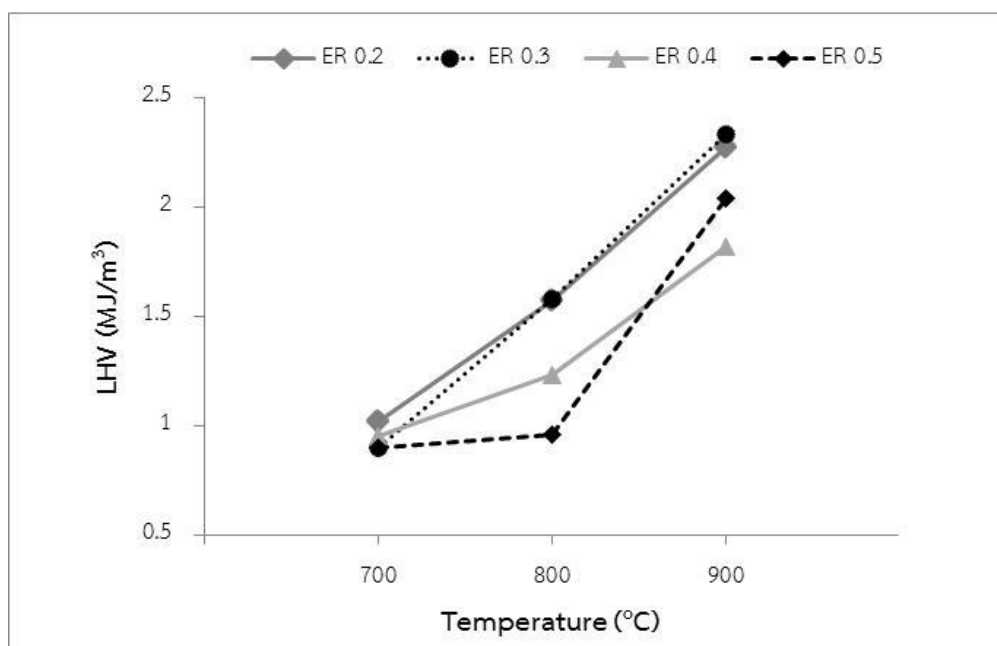
สำหรับผลของอุณหภูมิต่อการสลายตัวของเปลือกถั่วดาวอินคาที่อัตราส่วนสมมูล 0.5 พบว่ามีแนวโน้มแตกต่างจากอัตราส่วนสมมูลอื่นๆ โดยอุณหภูมิสูงส่งผลต่อการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลวเท่านั้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 700 เป็น 900 องศาเซลเซียส ของเหลวลดลงมาจากร้อยละ 17.63 เป็นร้อยละ 5.65 ส่วนผลิตภัณฑ์ของแข็งกลับมีค่าเพิ่มขึ้น จากร้อยละ 11.88 เป็นร้อยละ 21.72 และผลิตภัณฑ์ก๊าซเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากร้อยละ 70.49 เป็นร้อยละ 72.63 ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากอัตราส่วนสมมูลร่วมด้วย



รูปที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ที่อัตราส่วนสมมูล 0.5

4.2.2.3 ผลของอุณหภูมิต่อค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ ก๊าซผลิตภัณฑ์

ค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์ เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ยังชี้คุณภาพของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งจากการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อค่าความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์ (Lower heating value) ที่ได้จากกระบวนการแกซิฟิเคชันของเปลือกถั่วดาวอินคา พบว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลให้ก๊าซผลิตภัณฑ์มีค่าความร้อนสูงขึ้นด้วย ซึ่งพบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันในทุกๆ อัตราส่วนสมมูล ดังรูป 4.11 ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 700 เป็น 900 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 ค่าความร้อนของก๊าซเพิ่มขึ้นจาก 1.02 MJ/m^3 เป็น 2.27 MJ/m^3 และที่อัตราส่วนสมมูล 0.3 ค่าความร้อนของก๊าซเพิ่มขึ้นจาก 0.90 MJ/m^3 เป็น 2.33 MJ/m^3 สำหรับอัตราส่วนสมมูล 0.4 ค่าความร้อนก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยเพิ่มขึ้นจาก 0.95 MJ/m^3 เป็น 1.82 MJ/m^3 ส่วนอัตราส่วนสมมูล 0.5 ค่าความร้อนของก๊าซเพิ่มขึ้นจาก 0.90 MJ/m^3 เป็น 2.04 MJ/m^3 ซึ่งค่าความร้อนที่คำนวณได้ เป็นค่าความร้อนแบบรวมก๊าซพาที่ใช้ในการทดลอง การคำนวณเป็นดังสมการที่ 4.8 ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจึงมาจากค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ



รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิต่อค่าความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์ ที่อัตราส่วนสมมูลต่างๆ

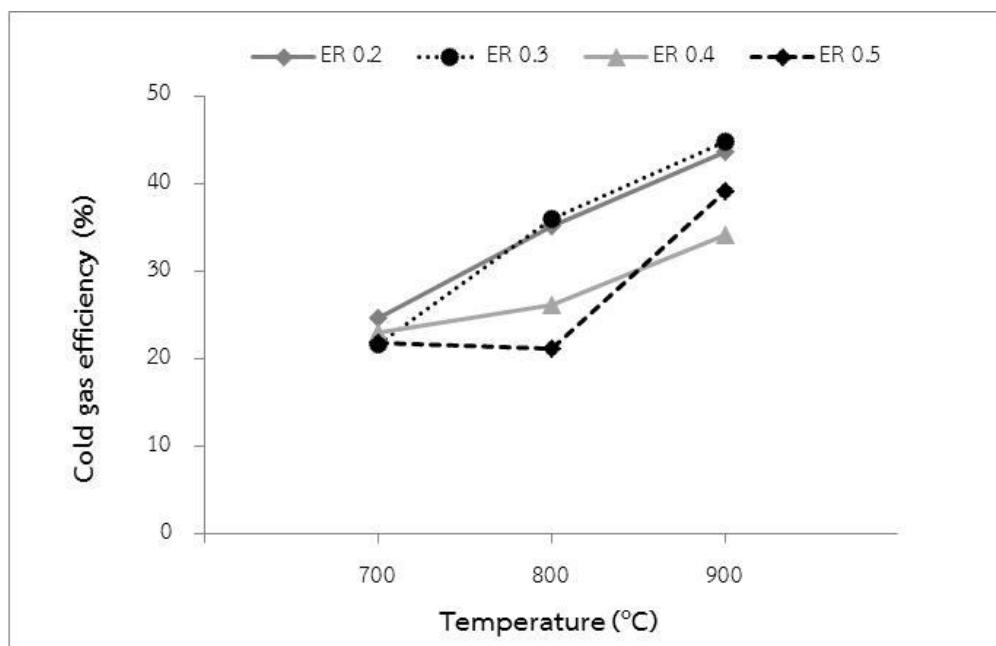
ค่าความร้อน (Lower heating value, MJ/m³)

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

ปริมาตรของก๊าซทั้งหมดต่อนาที

เมื่อ CO, H₂ และ CH₄ คือปริมาตรของ CO, H₂ และ CH₄ ที่ได้ต่อนาที

สำหรับผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์ (Cold gas efficiency) พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซสูงขึ้นด้วย โดยมีแนวโน้มเป็นเช่นเดียวกันในทุกอัตราส่วนสมมูล ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 700 ถึง 900 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 24.56 เป็นร้อยละ 43.65 ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2 และสำหรับอัตราส่วนสมมูล 0.3 0.4 และ 0.5 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 21.65 เป็นร้อยละ 44.75, ร้อยละ 22.94 เป็นร้อยละ 34.13 และร้อยละ 21.81 เป็นร้อยละ 39.06 ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 ผลของอุณหภูมิต่อค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์ ที่อัตราส่วนสมมูลต่างๆ

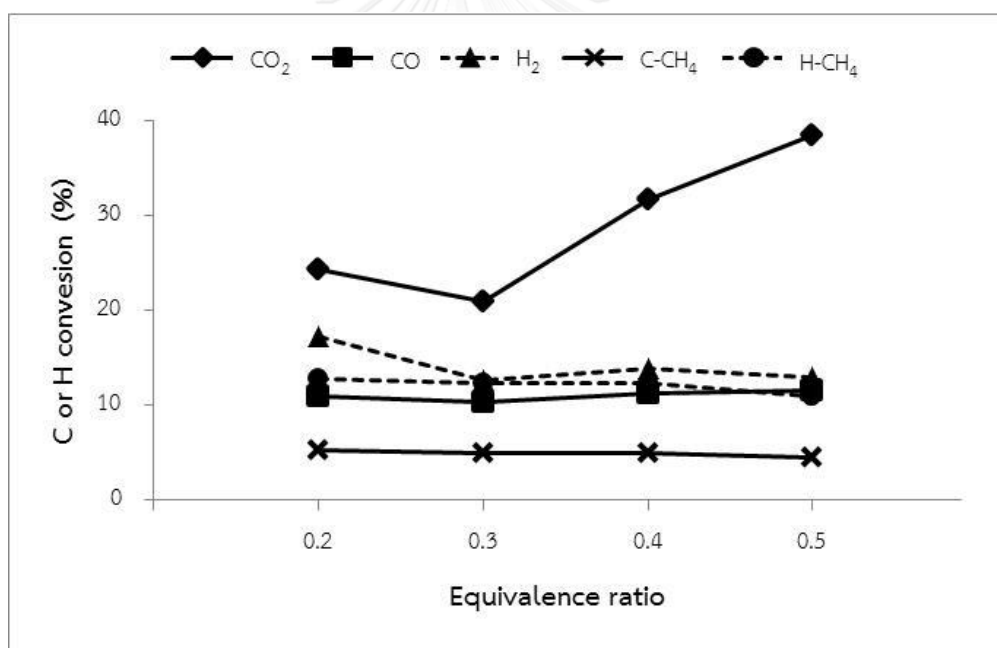
จากการทดลองจึงสามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิมีผลต่อกระบวนการแกซิฟิเคชันของเปลือกถั่วดาวอินคา โดยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่ดีที่สุดสำหรับการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน (ก๊าซสังเคราะห์) สูงกว่าที่อุณหภูมิอื่นๆ อีกทั้งผลิตภัณฑ์ของเหลว (น้ำมันดิน) เกิดขึ้นน้อย และได้ผลิตภัณฑ์ก๊าซที่มีค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิอื่นๆ

4.2.3 ผลของอัตราส่วนสมมูลที่มีต่อกระบวนการแกซิฟิเคชัน

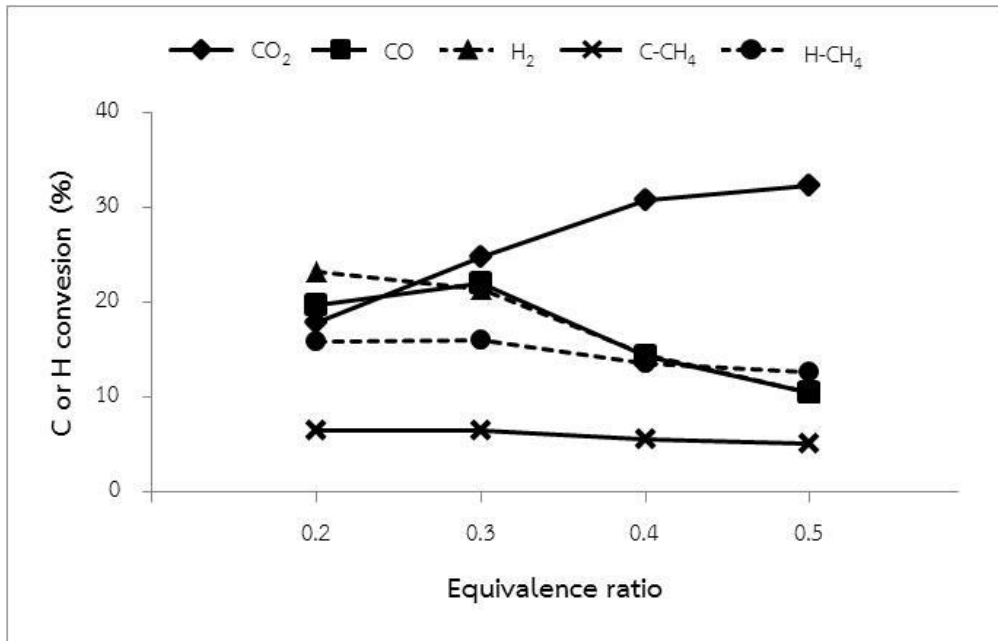
4.2.3.1 ผลของอัตราส่วนสมมูลที่มีต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน

การศึกษาผลของอัตราส่วนสมมูล 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 ที่มีต่อกระบวนการแกซิฟิเคชัน ที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส โดยใช้เปลือกถั่วดาวอินคาขนาด 0.50-0.85 มิลลิเมตร โดยทำการคำนวณหาการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นก๊าซผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซมีเทน ใช้วิธีคำนวณดังแสดงในภาคผนวก ก จากการศึกษาพบว่าเมื่ออัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้น จาก 0.2 เป็น 0.5 การแปรสภาพของคาร์บอนเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงจากร้อยละ 10.97-30.63 เป็นร้อยละ 10.54-27.07 และการแปรสภาพของคาร์บอนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ

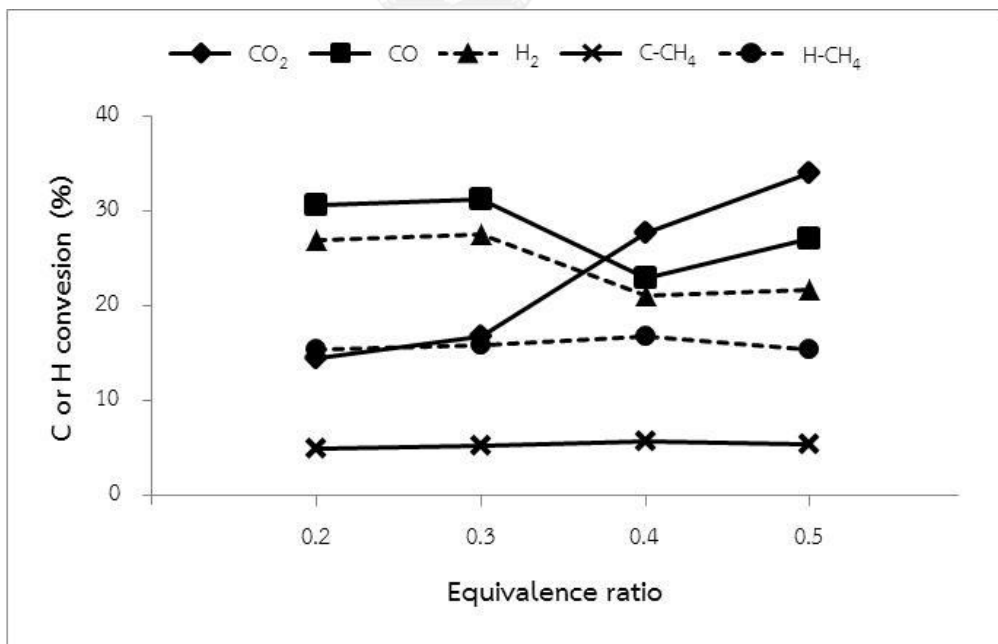
14.50-24.26 เป็นร้อยละ 32.35-38.46 ส่วนการแปรสภาพของคาร์บอนเป็นก๊าซมีเทนลดลงจากร้อยละ 5.21-6.47 เป็นร้อยละ 4.47-6.30 เมื่อรวมการแปรสภาพของคาร์บอนจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และมีเทน พบว่าเมื่ออัตราส่วนสมมูลสูงขึ้น การแปรสภาพลดลงจากร้อยละ 16.18-36.90 เป็นร้อยละ 15.72-33.37 ส่วนการแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นก๊าซไฮโดรเจนลดลงจากร้อยละ 17.32-26.94 เป็นร้อยละ 10.46-21.74 และการแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นก๊าซมีเทนลดลงด้วยเช่นกันจากร้อยละ 12.81-15.90 เป็นร้อยละ 10.99-15.47 เมื่อรวมการแปรสภาพเป็นไฮโดรเจนจากก๊าซทั้งสองชนิด พบว่าเมื่ออัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้น การแปรสภาพเป็นไฮโดรเจนทั้งหมดลดลงจากร้อยละ 30.13-42.34 เป็นร้อยละ 23.18-37.21 สำหรับการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นก๊าซสังเคราะห์ พบว่า ลดลงจากร้อยละ 28.29-57.57 เป็นร้อยละ 21.00-48.81 ซึ่งผลการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันที่ทุกๆ อุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.13-4.16



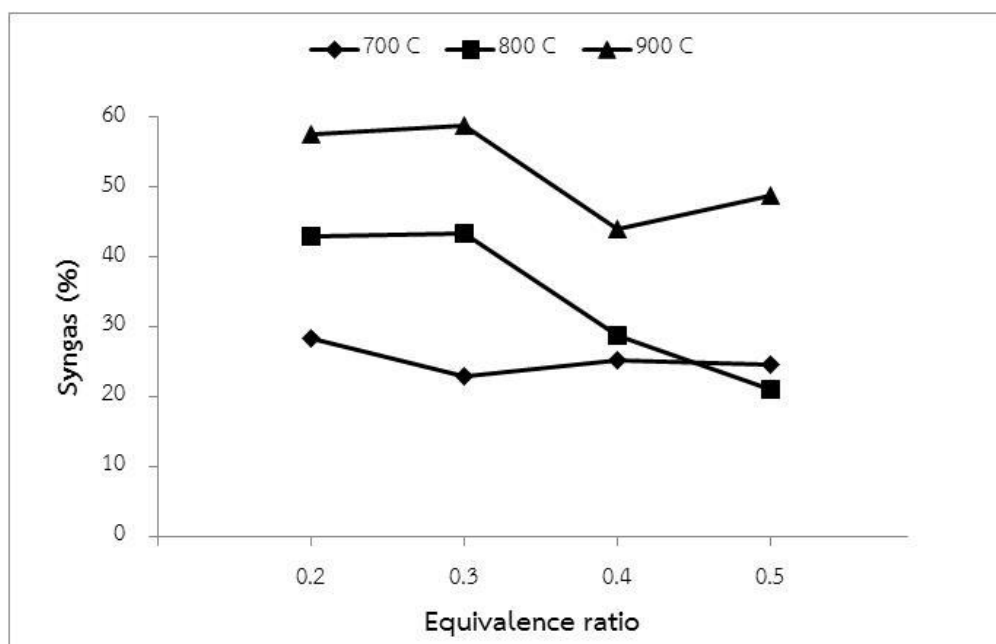
รูปที่ 4.13 ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.14 ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.15 ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.16 ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อปริมาณก๊าซสังเคราะห์ ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากผลของอัตราส่วนสมมูลต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนและปริมาณก๊าซสังเคราะห์ สามารถอธิบายผลของการทดลองดังสมการต่อไปนี้

Oxidation reactions:



Boudouard reaction:



Water gas reaction:



Methanation reaction:



Steam methane reforming reaction:



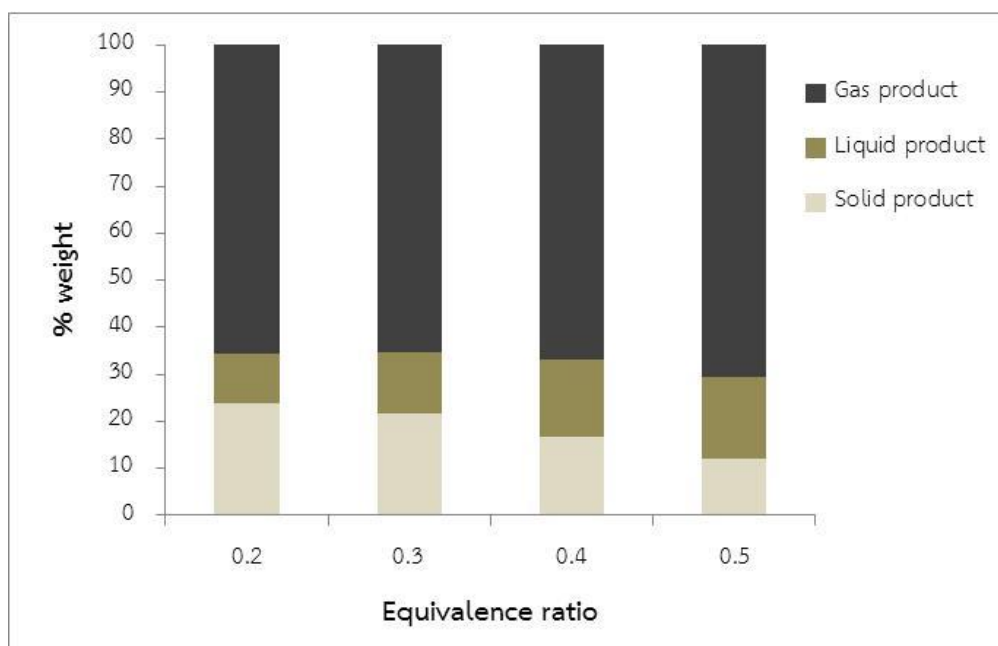
The water gas shift reaction:



เมื่ออัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การแปรสภาพของคาร์บอนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยามาก ซึ่งสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยา Oxidation สมการที่ 4.1 และ 4.3 ให้เกิดได้ดีขึ้น ส่วนก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง เนื่องจากถูกใช้ไปในปฏิกิริยา Oxidation และ Water gas shift เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ตามสมการที่ 4.3 และ 4.10 ส่วนก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทน มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน โดยก๊าซไฮโดรเจนถูกสร้างขึ้นจากปฏิกิริยา Water gas และ Steam methane reforming ตามสมการที่ 4.6 และ 4.9 แต่เมื่อเพิ่มออกซิเจนเข้าสู่ปฏิกิริยามากขึ้น จึงส่งผลให้ก๊าซไฮโดรเจนถูกออกซิไดซ์กลายเป็นน้ำ ดังสมการที่ 4.4 สำหรับก๊าซมีเทนลดลงเนื่องจากถูกใช้ไปในปฏิกิริยา Steam methane reforming ดังสมการที่ 4.9 เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะเห็นได้ว่า เมื่อออกซิเจนในการทำปฏิกิริยามากขึ้น ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน ถูกออกซิไดซ์ได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ (Zheng และคณะ, 2016) ดังนั้นอัตราส่วนสมมูลที่มากขึ้นจึงเป็นการสนับสนุนการสร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ส่งผลให้ปริมาณก๊าซสังเคราะห์ลดลง เนื่องจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนลดลง

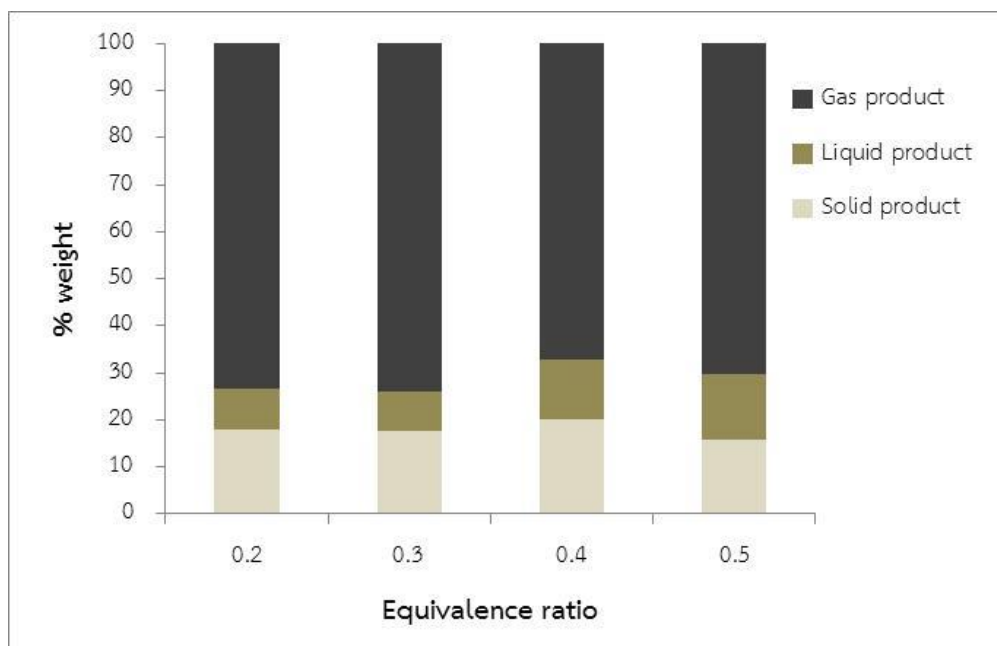
4.2.3.2 ผลของอัตราส่วนสมมูลที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์

จากการทดลองศึกษาผลของอัตราส่วนสมมูลที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้นจาก 0.2 เป็น 0.5 ผลิตภัณฑ์ของเหลว (น้ำมันดิน) มีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 10.79 เป็นร้อยละ 17.63 แต่ผลิตภัณฑ์ของแข็ง (ถ่านชาร์) ลดลงจากร้อยละ 23.65 เป็นร้อยละ 11.88 และผลิตภัณฑ์ก๊าซเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 65.56 เป็นร้อยละ 70.49 ดังรูปที่ 4.17 เนื่องจากอัตราส่วนสมมูลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การสลายตัวของผลิตภัณฑ์ของแข็งเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวและก๊าซเพิ่มขึ้น



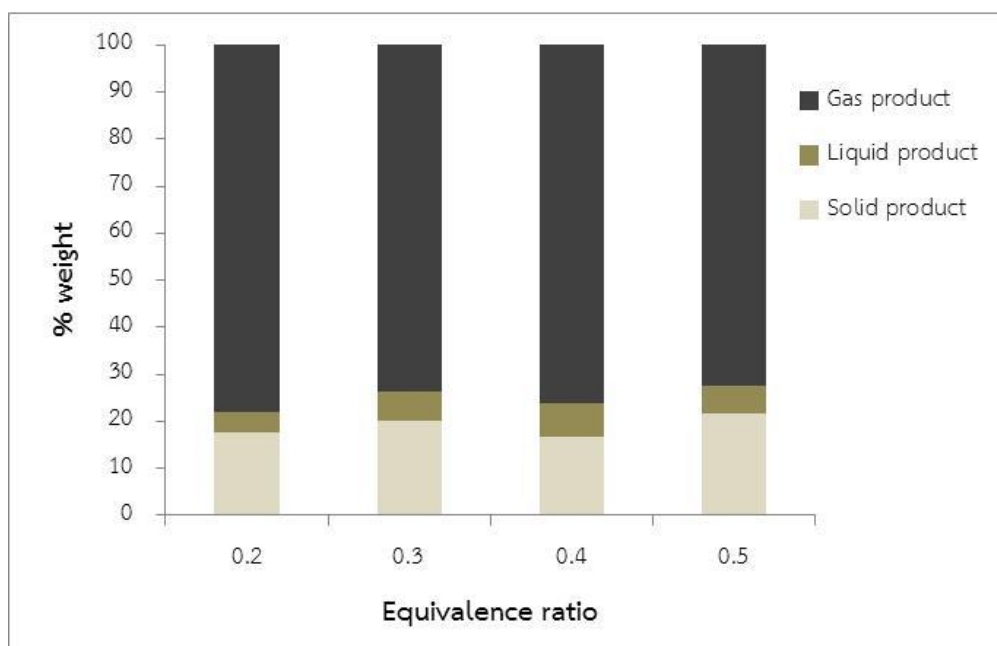
รูปที่ 4.17 ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

จากการทดลองศึกษาผลของอัตราส่วนสมมูลที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้นจาก 0.2 เป็น 0.5 ผลิตภัณฑ์ของเหลว มีค่าเพิ่มขึ้น จากร้อยละ 8.74 เป็นร้อยละ 13.91 แต่ผลิตภัณฑ์ของแข็งลดลง จากร้อยละ 17.84 เป็นร้อยละ 15.81 และผลิตภัณฑ์ก๊าซลดลงด้วยเช่นกัน จากร้อยละ 73.42 เป็นร้อยละ 70.28 แสดงดังรูปที่ 4.18 โดยเมื่ออัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ของแข็งเกิดการสลายตัวเป็นของเหลว ผลิตภัณฑ์ของแข็งจึงลดลง



รูปที่ 4.18 ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

จากการทดลองศึกษาผลของอัตราส่วนสมมูลที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้นจาก 0.2 เป็น 0.5 ผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่าเพิ่มขึ้น จากร้อยละ 4.55 เป็นร้อยละ 5.65 และผลิตภัณฑ์ของแข็งเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 17.49 เป็นร้อยละ 21.72 ส่วนผลิตภัณฑ์ก๊าซลดลงจากร้อยละ 77.96 เป็นร้อยละ 72.63 แสดงดังรูปที่ 4.19 จะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิสูง อัตราส่วนสมมูลไม่ได้ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแกซิฟิเคชันมากนัก ดังนั้นค่าของผลิตภัณฑ์จึงไม่ต่างกันมาก เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง อัตราการเกิดปฏิกิริยา (reaction rate) เกิดขึ้นเร็ว แต่ด้วยข้อจำกัดของท่อปฏิกรณ์ในเรื่องของระยะเวลาในการกักของก๊าซ (Residence time) ที่ต่ำ จึงทำให้ก๊าซออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น ไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับด้านในสุดของชีวมวลได้ ดังนั้นผลิตภัณฑ์จึงไม่เห็นแนวโน้มมาก จากผลการทดลองจึงสามารถสรุปได้ว่า ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์สามารถเห็นชัดที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนที่อุณหภูมิสูง ผลของระยะเวลาพักของก๊าซจะมากกว่าผลของอัตราส่วนสมมูล



รูปที่ 4.19 ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

4.2.3.3 ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์

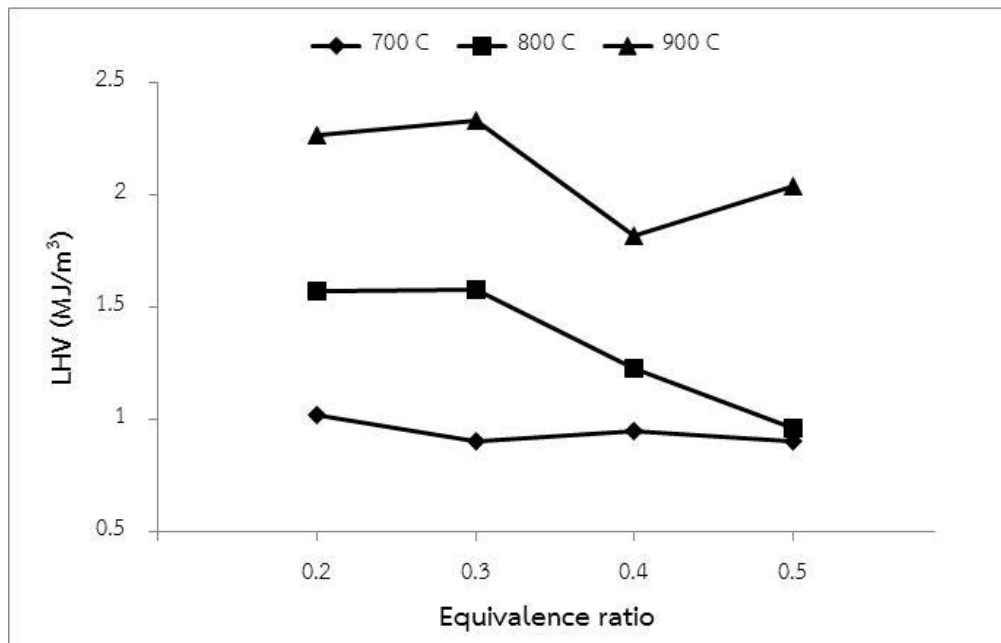
จากการทดลองศึกษาผลของอัตราส่วนสมมูลต่อค่าความร้อนของก๊าซ พบว่า เมื่ออัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์ลดลง ซึ่งมีแนวโน้มเป็นเช่นเดียวกันในทุกๆ อุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.20 เมื่ออัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้นจาก 0.2 เป็น 0.5 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนของก๊าซลดลงจากร้อยละ 1.02 เป็นร้อยละ 0.90 สำหรับที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนของก๊าซลดลงเช่นกันจากร้อยละ 1.57 เป็นร้อยละ 0.96 ส่วนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนของก๊าซลดลงจากร้อยละ 2.27 เป็นร้อยละ 2.04 ซึ่งค่าความร้อนที่คำนวณได้เป็นค่าความร้อนแบบรวมก๊าซพาที่ใช้ในการทดลอง การคำนวณเป็นดังสมการที่ 4.8

ค่าความร้อน (Lower heating value, MJ/m^3)

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

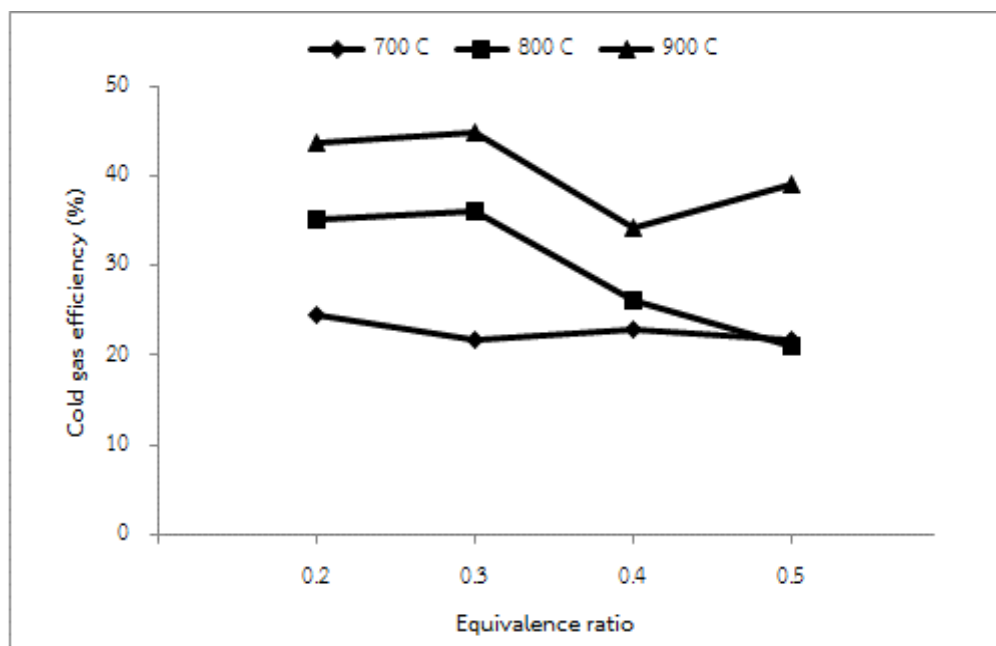
ปริมาตรของก๊าซทั้งหมดต่ออนาที

เมื่อ CO, H₂ และ CH₄ คือปริมาตรของ CO, H₂ และ CH₄ ที่ได้ต่ออนาที



รูปที่ 4.20 ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อค่าความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่างๆ

สำหรับผลของอัตราส่วนสมมูลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์ พบว่าเมื่ออัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซลดลง ซึ่งมีแนวโน้มเป็นเช่นเดียวกันในทุกๆ อุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.21 เมื่ออัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้นจาก 0.2-0.5 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซลดลงจากร้อยละ 24.56 เป็นร้อยละ 21.81 ส่วนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซลดลงจากร้อยละ 35.19 เป็นร้อยละ 21.08 สำหรับที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซลดลงจากร้อยละ 43.65 เป็นร้อยละ 39.06



รูปที่ 4.21 ผลของอัตราส่วนสมมูลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนสมมูลเป็นอีกหนึ่งพารามิเตอร์ที่มีผลต่อกระบวนการแกซิฟิเคชัน ซึ่งในการทดลองนี้พบว่า อัตราส่วนสมมูล 0.2 เป็นอัตราส่วนสมมูลที่เหมาะสมในการทดลอง เนื่องจากให้ค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนที่ไม่ต่างจากที่อัตราส่วนสมมูล 0.3 มากนัก อีกทั้งให้ค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำกว่าด้วย และผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เกิดขึ้นจากอัตราส่วนสมมูล 0.2 มีค่าน้อยกว่า

4.3 กระบวนการแกซิฟิเคชันของเปลือกถั่วดาวอินคาเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

สำหรับกระบวนการแกซิฟิเคชันเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ โดโลไมต์ (dolomite) นิกเกิลร้อยละ 5 บนตัวรองรับโดโลไมต์ (5% Ni/dolomite) และ นิกเกิลร้อยละ 10 บนตัวรองรับโดโลไมต์ (10% Ni/dolomite) โดยผสมกับเปลือกถั่วดาวอินคาขนาด 0.50-0.85 มิลลิเมตร ในอัตราส่วน 1:1 ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.2 ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดลองข้างต้น

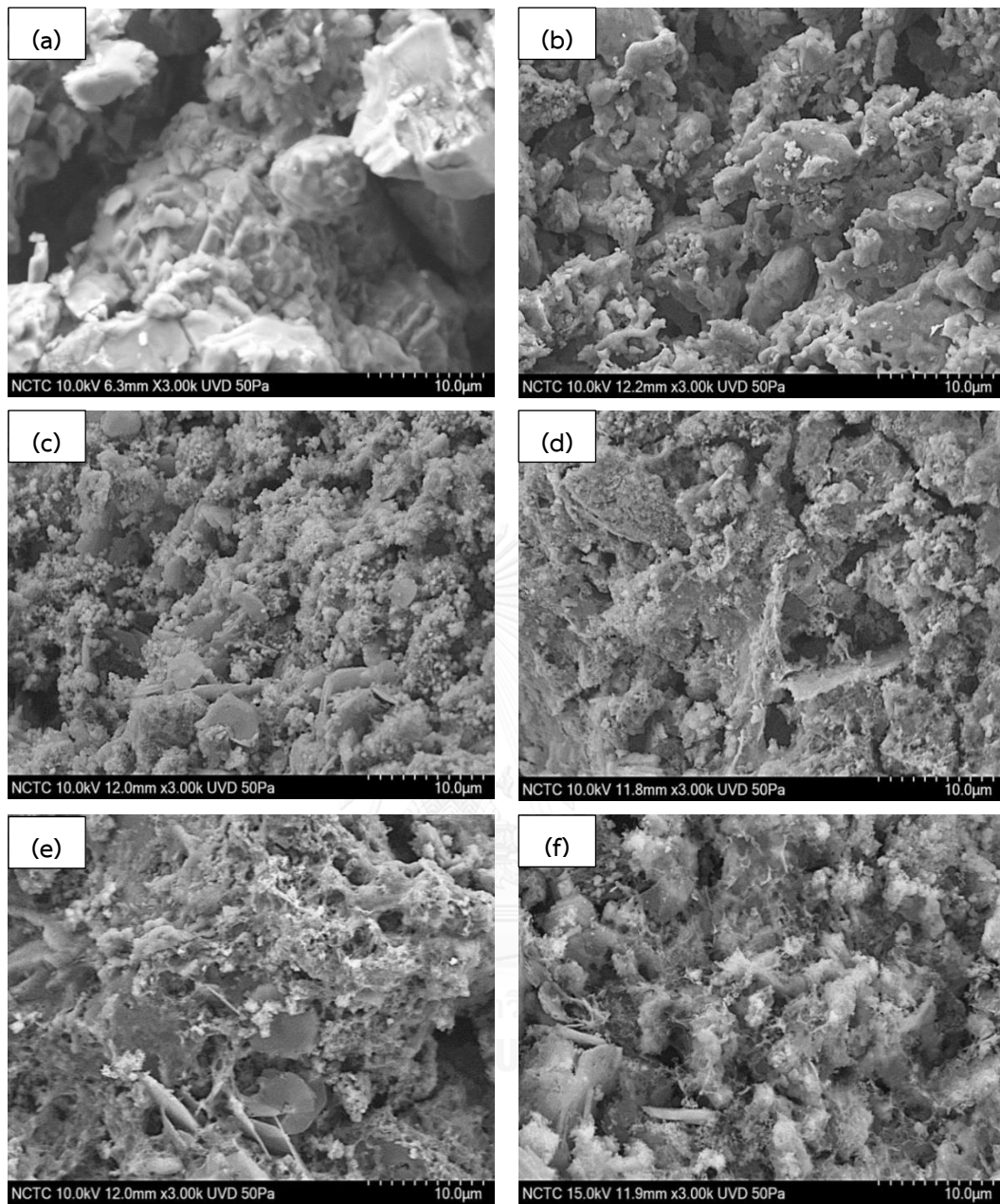
4.3.1 สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยการวิเคราะห์พื้นที่ผิวโดยใช้วิธี BET (Brunauer, Emmett and Teller) พบว่า โดโลไมต์ที่ผ่านการแคลไซน์แล้วมีพื้นที่ผิวเท่ากับ

20.84 ตารางเมตร/กรัม ซึ่งเมื่อนำไปผ่านการเคลือบฝังแบบเปียกในสารละลายนิกเกิลความเข้มข้น 5% พบว่ามีพื้นที่ผิว 78.55 ตารางเมตร/กรัม เมื่อนำไปแคลไซน์แล้ว พบว่า นิกเกิลร้อยละ 5 บนตัวรองรับโดโลไมต์ (5% Ni/dolomite) มีพื้นที่ผิวลดลงเหลือ 35.96 ตารางเมตร/กรัม ทั้งนี้พื้นที่ผิวลดลงอาจเนื่องมาจาก นิกเกิลที่อยู่บนพื้นผิวของโดโลไมต์เกิดการหลอมรวมตัวกัน (sintering) ปิโตรพูนของโดโลไมต์ระหว่างกระบวนการแคลไซน์ขึ้น (Calcination process) สำหรับนิกเกิลร้อยละ 10 บนตัวรองรับโดโลไมต์ (10% Ni/dolomite) หลังผ่านการแคลไซน์แล้ว พื้นที่ผิวลดลงเล็กน้อยจาก 48.15 เป็น 43.55 ตารางเมตร/กรัม ซึ่งสามารถดูลักษณะพื้นผิวและสัญญาณของตัวเร่งปฏิกิริยาได้จากการวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) ดังรูปที่ 4.22 และจากการวิเคราะห์ร้อยละการกระจายตัวของนิกเกิลบนตัวรองรับโดโลไมต์ ด้วยวิธี EDX (Energy Dispersive X-ray) พบว่า มีปริมาณนิกเกิลอยู่ร้อยละ 5.20 และ ร้อยละ 11.70 บนพื้นผิวของโดโลไมต์ ส่วนโดโลไมต์นำมาวิเคราะห์ด้วยวิธี EDX เช่นกัน พบว่ามีปริมาณแคลเซียมร้อยละ 22.90, แมกนีเซียมร้อยละ 12.20 และออกซิเจนร้อยละ 65.00

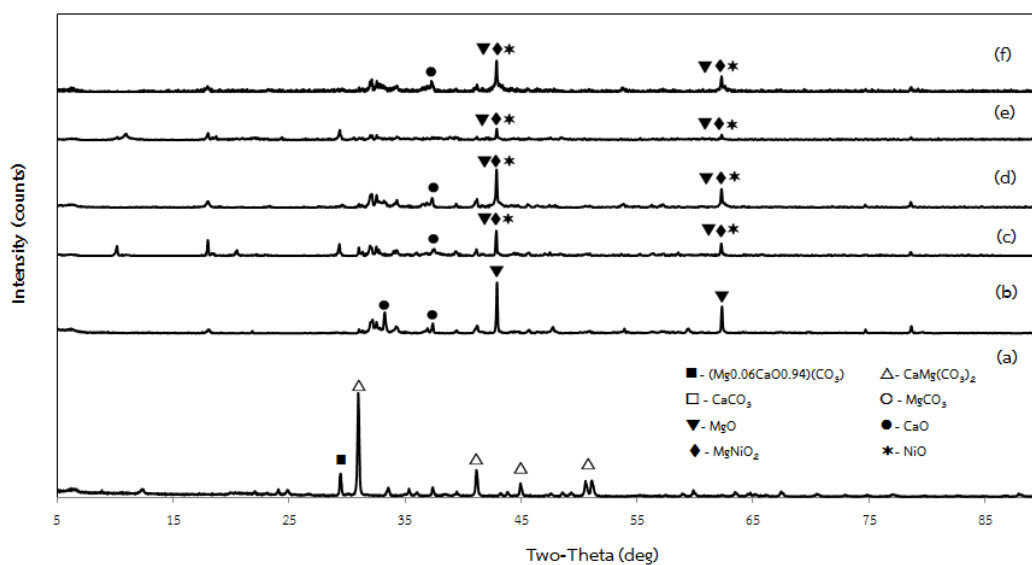
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (BET surface area)

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิว (ตารางเมตร/กรัม)
Calcined dolomite	20.84
5% Ni/dolomite	78.55
Calcined 5% Ni/dolomite	35.96
10% Ni/dolomite	48.15
Calcined 10% Ni/dolomite	43.55



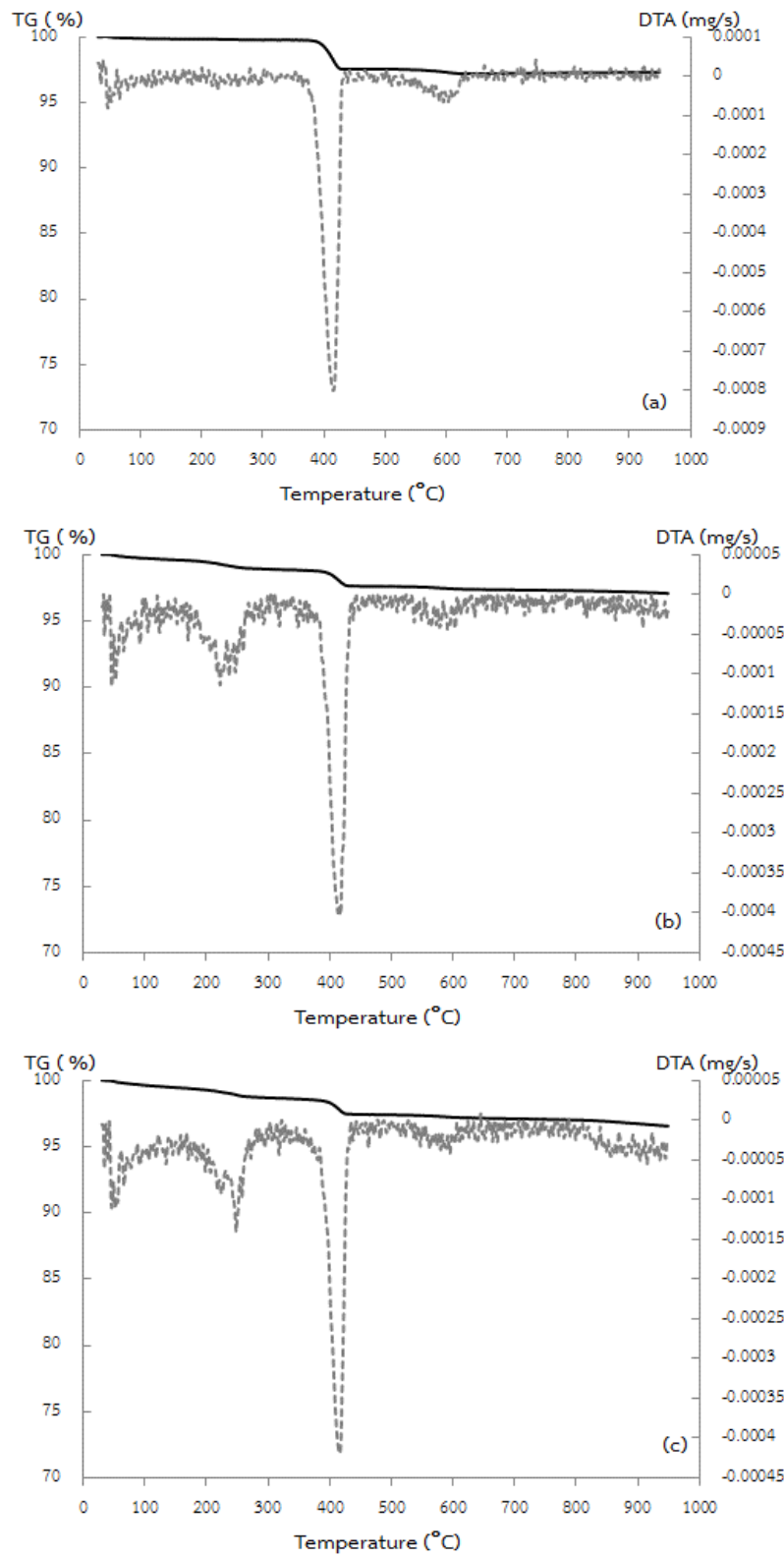
รูปที่ 4.22 SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา (a) dolomite (b) calcined dolomite (c) 5% Ni/dolomite (d) calcined 5% Ni/dolomite (e) 10% Ni/dolomite (f) calcined 10% Ni/dolomite

เมื่อวิเคราะห์เฟสของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยวิธี XRD (X-Ray Diffraction) ดังรูปที่ 4.23 พบว่า โดโลไมต์ที่ผ่านการแคลไซน์แล้ว สามารถตรวจพบตำแหน่งพีคของ MgO ที่มีมุม 2θ เท่ากับ 42° , 63° และ พีคของ CaO ที่มีมุม 2θ เท่ากับ 34° กับ 37° และสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลร้อยละ 5 และร้อยละ 10 บนตัวรองรับโดโลไมต์ ที่ผ่านการแคลไซน์แล้ว แสดงพีคของ CaO ที่มีมุม 2θ เท่ากับ 37° เช่นเดียวกันกับโดโลไมต์ ส่วนพีคของ MgO, NiO และ $MgNiO_2$ พบที่มีมุม 2θ เท่ากับ 42° , 63° ซึ่ง $MgNiO_2$ ที่พบในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลร้อยละ 5 และร้อยละ 10 บนตัวรองรับโดโลไมต์ เป็นนิกเกิลที่อยู่ในรูปที่เสถียร โดยแสดงให้เห็นว่าเกิดปฏิกิริยากันระหว่างนิกเกิลและตัวรองรับโดโลไมต์



รูปที่ 4.23 XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา (a) dolomite (b) calcined dolomite (c) 5% Ni/dolomite (d) calcined 5% Ni/dolomite (e) 10% Ni/dolomite (f) calcined 10% Ni/dolomite

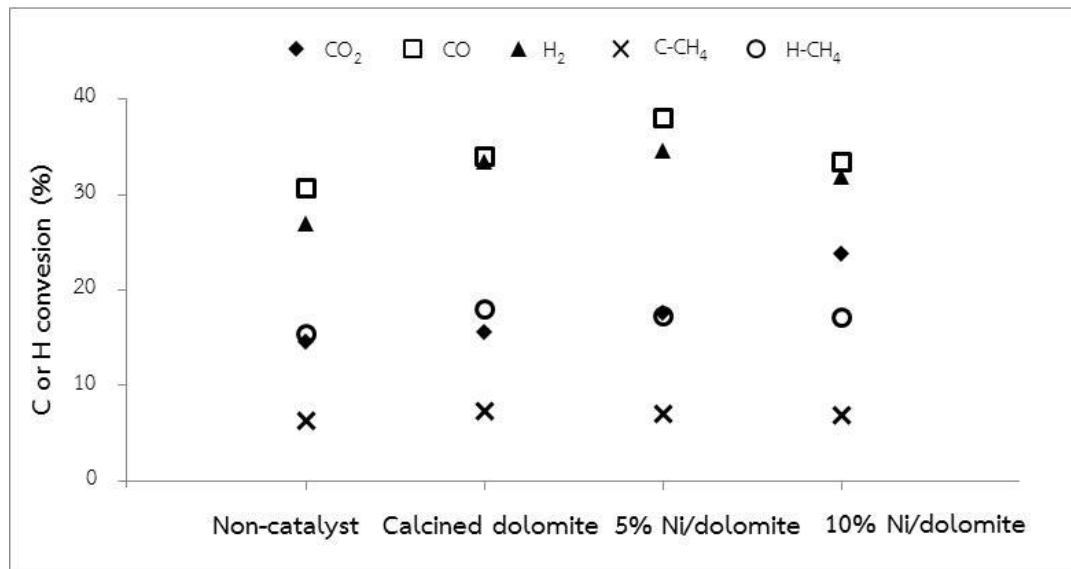
เมื่อศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเทคนิค Thermal gravimetric analysis (TGA) พบว่า โดโลไมต์ที่ผ่านการแคลไซน์แล้ว มีการสลายตัวของความชื้นที่ 100 องศาเซลเซียสในช่วงแรก ส่วนการสลายตัวช่วงที่สอง ที่อุณหภูมิ 230-450 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวของสารระเหยต่างๆ ที่เหลืออยู่ และการสลายตัวช่วงสุดท้ายที่อุณหภูมิ 550-650 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของ CaO และ MgO ที่เหลืออยู่ จากกราฟพบว่าแนวโน้มการสลายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลร้อยละ 5 และร้อยละ 10 บนตัวรองรับโดโลไมต์ ที่ผ่านการแคลไซน์แล้ว มีแนวโน้มเดียวกันกับโดโลไมต์ ดังรูปที่ 4.24



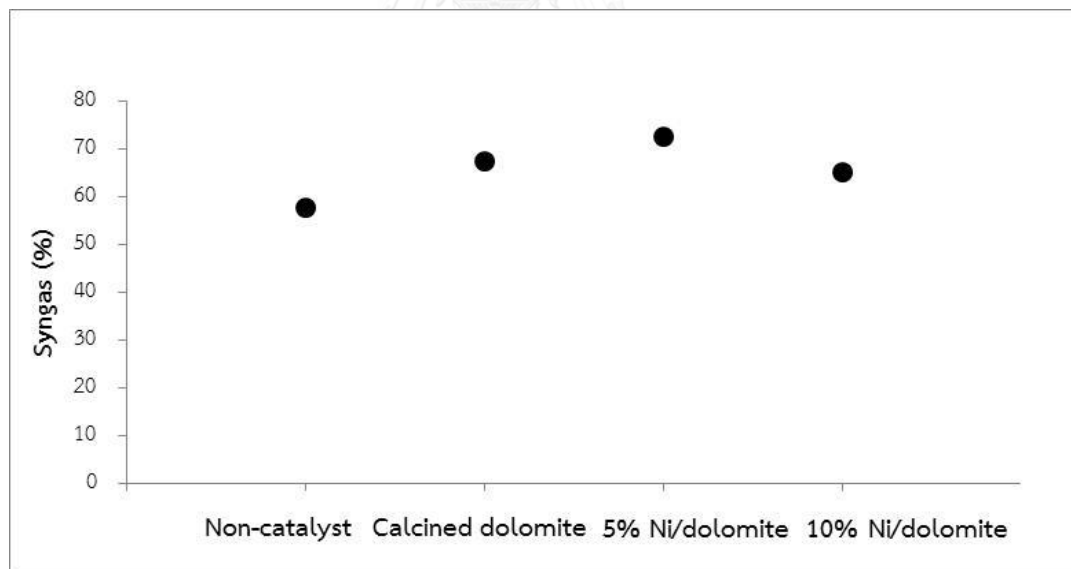
รูปที่ 4.24 การสลายตัวทางความร้อนของ (a) calcined dolomite (b) calcined 5% Ni/dolomite (c) calcined 10% Ni/dolomite

4.3.2 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน

จากการทดลองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา calcined dolomite, 5% Ni/dolomite, 10% Ni/dolomite ในกระบวนการแกซีฟิเคชันของเปลือกถั่วดาวอินคาขนาด 0.50-0.85 มิลลิเมตร ในสภาวะที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.2 และอุณหภูมิเท่ากับ 900 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา การแปรสภาพเป็นคาร์บอนและไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งการแปรสภาพของคาร์บอนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 14.50 เป็นร้อยละ 15.53, ร้อยละ 17.61 และร้อยละ 23.79 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา calcined dolomite, 5% Ni/dolomite, 10% Ni/dolomite ตามลำดับ ส่วนการแปรสภาพของคาร์บอนเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยเพิ่มจากร้อยละ 30.63 เป็นร้อยละ 33.99, ร้อยละ 37.95 และร้อยละ 33.33 สำหรับการแปรสภาพของคาร์บอนเป็นก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากร้อยละ 6.27 เป็นร้อยละ 7.30, ร้อยละ 7.01 และร้อยละ 6.95 เมื่อรวมการแปรสภาพของคาร์บอนเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และมีเทน พบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา calcined dolomite, 5% Ni/dolomite, 10% Ni/dolomite การแปรสภาพเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 36.90 เป็นร้อยละ 41.29, ร้อยละ 44.96 และร้อยละ 40.28 ตามลำดับ ซึ่งการแปรสภาพของไฮโดรเจนมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน โดยเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา calcined dolomite, 5% Ni/dolomite, 10% Ni/dolomite ส่งผลให้การแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น โดยก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 26.94 เป็นร้อยละ 33.44, ร้อยละ 34.50 และร้อยละ 31.84 ตามลำดับ ส่วนก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากร้อยละ 15.40 เป็นร้อยละ 17.93, ร้อยละ 17.24 และร้อยละ 17.09 ตามลำดับ เมื่อรวมการแปรสภาพของไฮโดรเจนทั้งหมดจากก๊าซทั้งสองชนิด พบว่า เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 42.34 เป็นร้อยละ 51.37, ร้อยละ 51.74 และร้อยละ 48.93 สำหรับการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นก๊าซสังเคราะห์ พบว่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 57.57 เป็นร้อยละ 67.43, ร้อยละ 72.45 และร้อยละ 65.17 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.25-4.26

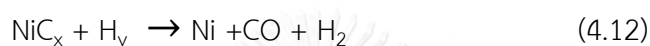


รูปที่ 4.25 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2, 900 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.26 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณก๊าซสังเคราะห์ ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2, 900 องศาเซลเซียส

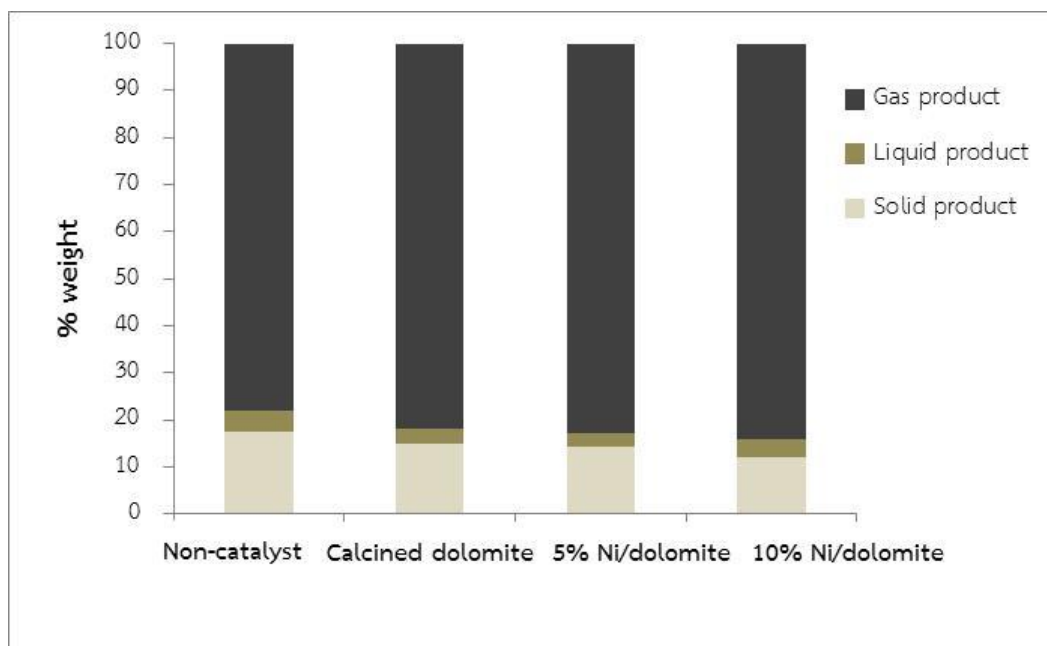
จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนไปเป็นก๊าซผลิตภัณฑ์ ซึ่งทำให้คาร์บอนและไฮโดรเจน แปรสภาพไปเป็นก๊าซผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาสับสนุนปฏิกิริยา Boudouard และ Water gas shift ดังสมการที่ 4.5, 4.10 ซึ่งจากรูปที่ 4.25 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Ni/dolomite ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน มีค่าสูงกว่า calcined dolomite และ 10% Ni/dolomite ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Ni/dolomite เร่งปฏิกิริยาได้ดีและมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีกลไกการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นดังนี้



โดยเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลร่วมกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอน จะช่วยในการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน และกลายเป็นสารประกอบนิกเกิลคาร์ไบด์ ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับไอน้ำแล้วจึงได้เป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนตามลำดับ ซึ่งส่งผลให้ปริมาณก๊าซสังเคราะห์เพิ่มขึ้นด้วย ดังรูปที่ 4.26

4.3.3 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์

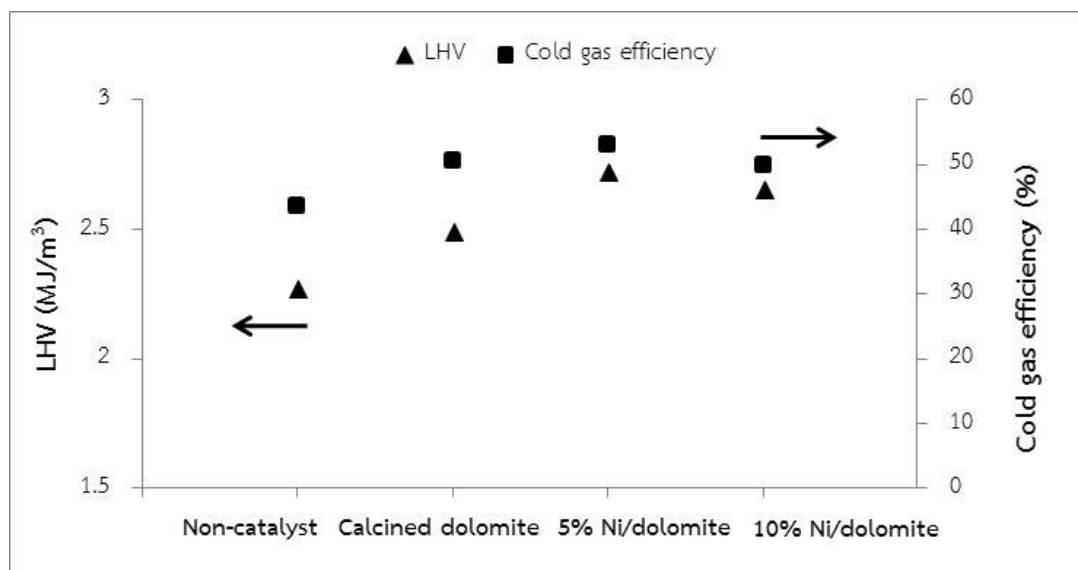
เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา calcined dolomite, 5% Ni/dolomite, 10% Ni/dolomite พบว่าผลิตภัณฑ์ของเหลวและของแข็งมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยของเหลวลดลงจากร้อยละ 4.55 เป็นร้อยละ 3.07, ร้อยละ 2.87 และร้อยละ 3.98 ตามลำดับ ส่วนของแข็งลดลงจากร้อยละ 17.49 เป็นร้อยละ 14.90, ร้อยละ 14.10 และร้อยละ 11.92 ตามลำดับ ส่วนผลิตภัณฑ์ก๊าซเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 77.96 เป็นร้อยละ 82.02, ร้อยละ 83.03 และร้อยละ 84.10 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.27 จะเห็นได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีส่วนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและการสลายตัวของของเหลวไปเป็นผลิตภัณฑ์ก๊าซที่มีคุณภาพเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.27 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2, 900 องศาเซลเซียส

4.3.4 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์

ตัวเร่งปฏิกิริยา calcined dolomite, 5% Ni/dolomite, 10% Ni/dolomite มีผลต่อค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์เช่นกัน โดยเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา calcined dolomite ค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์เท่ากับ 2.49 MJ/m³ และร้อยละ 50.69 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีค่าความร้อนน้อยกว่า โดยมีค่าเท่ากับ 2.27 MJ/m³ และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับร้อยละ 43.65 และเมื่อทำการทดลองที่สภาวะและอุณหภูมิเดียวกัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Ni/dolomite พบว่าค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์เท่ากับ 2.72 MJ/m³ และร้อยละ 53.10 ตามลำดับ ซึ่งให้ค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูงสุด ส่วนการใช้ 10 % Ni/dolomite พบว่าให้ค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Ni/dolomite โดยมีค่าเท่ากับ 2.65 MJ/m³ และร้อยละ 49.83 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.28



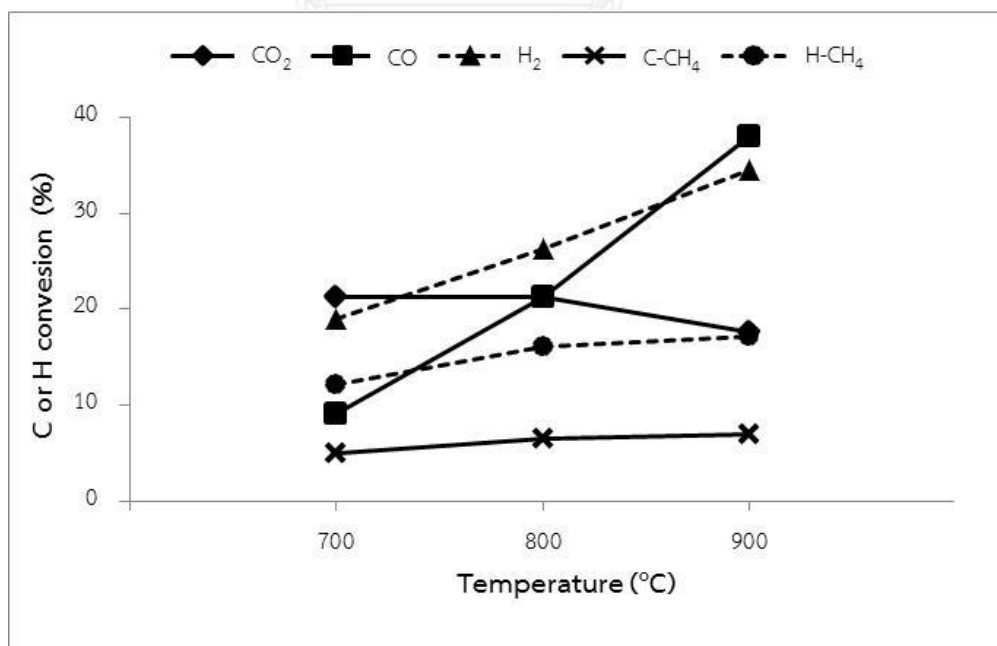
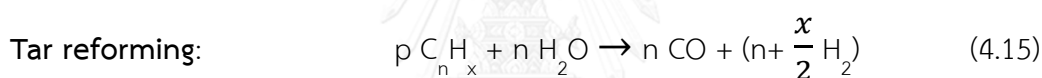
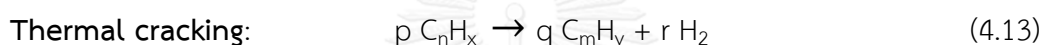
รูปที่ 4.28 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2, 900 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองสำหรับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา calcined dolomite, 5% Ni/dolomite, 10% Ni/dolomite พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Ni/dolomite มีประสิทธิภาพดีที่สุด จึงทำการเปรียบเทียบการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Ni/dolomite ที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Ni/dolomite ในหัวข้อถัดไป

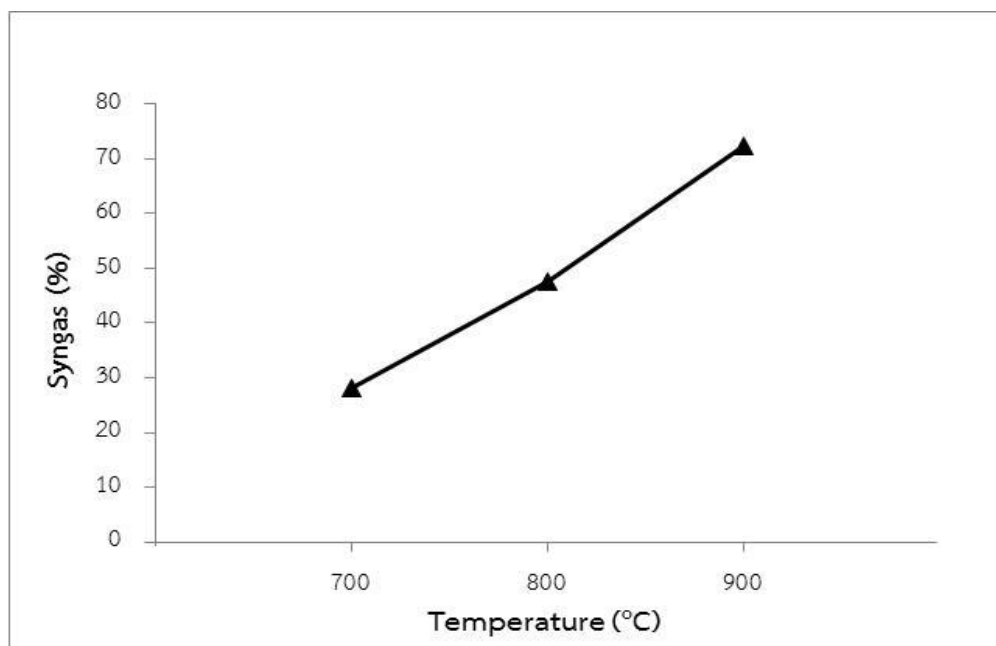
4.3.5 ผลของอุณหภูมิต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Ni/dolomite

จากการทดลองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Ni/dolomite ในสภาวะที่อัตราส่วนสมมูลเดียวกัน คือ 0.2 แต่อุณหภูมิแตกต่างกันในการทำปฏิกิริยา โดยศึกษาผลของอุณหภูมิที่ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส ต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นก๊าซผลิตภัณฑ์ พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 700 เป็น 900 องศาเซลเซียส การแปรสภาพของคาร์บอนเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นจาก ร้อยละ 9.04 เป็นร้อยละ 37.95 และร้อยละ 4.95 เป็นร้อยละ 7.01 ตามลำดับ ในทางกลับกัน การแปรสภาพของคาร์บอนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจากร้อยละ 21.30 เป็นร้อยละ 17.61 ซึ่งการแปรสภาพของคาร์บอนโดยรวมก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซมีเทน พบว่า เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 13.99 เป็นร้อยละ 44.96 ซึ่งมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับการแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทน โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 700

เป็น 900 องศาเซลเซียส การแปรสภาพของคาร์บอนเป็นก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 18.97 เป็นร้อยละ 34.50 สำหรับก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 12.16 เป็นร้อยละ 17.24 โดยการแปรสภาพทั้งหมดของไฮโดรเจนโดยรวมก๊าซทั้งสองชนิด เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 31.13 เป็นร้อยละ 57.14 สำหรับการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นก๊าซสังเคราะห์ พบว่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 28.01 เป็นร้อยละ 72.45 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.29-4.30 ซึ่งจะเห็นได้ว่า อุณหภูมิมีผลต่อการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Ni/dolomite โดยที่อุณหภูมิสูงทำให้ 5% Ni/dolomite เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น ทำให้การแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน จึงเป็นผลให้ปริมาณก๊าซสังเคราะห์เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยา Thermal cracking และ Steam reforming ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปฏิกิริยาจะดำเนินไปข้างหน้า ดังสมการที่ 4.13-4.15



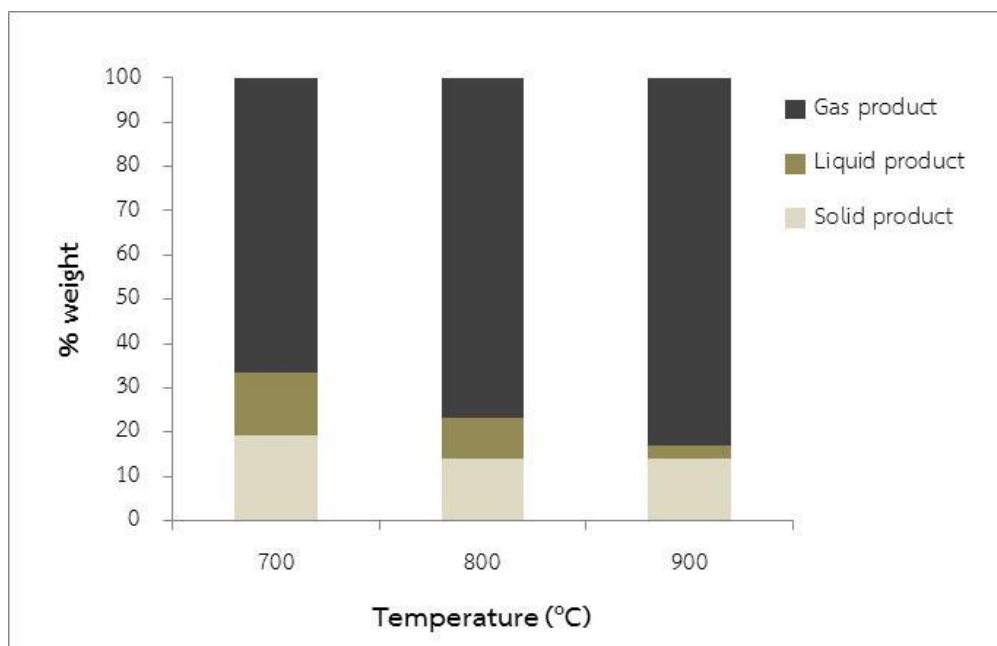
รูปที่ 4.29 ผลของอุณหภูมิต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Ni/dolomite ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2



รูปที่ 4.30 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณก๊าซสังเคราะห์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Ni/dolomite ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2

4.3.6 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Ni/dolomite

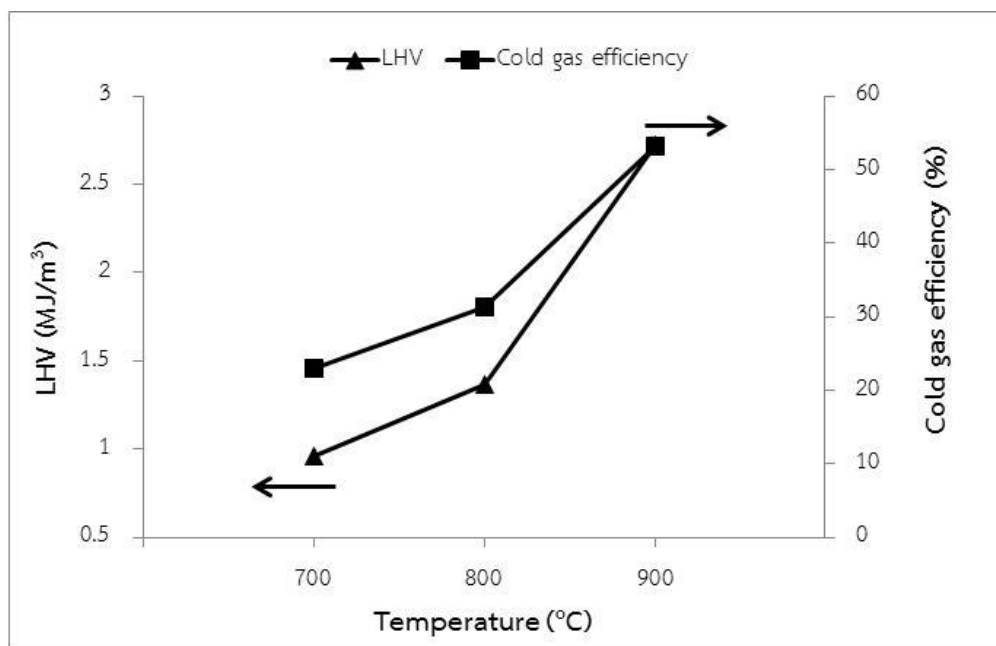
จากการทดลองศึกษาผลของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Ni/dolomite พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ของเหลวมีปริมาณลดลงสูงจากร้อยละ 14.15 เป็นร้อยละ 2.87 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 700 เป็น 900 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ของแข็งลดลงเช่นกัน จากร้อยละ 19.20 เป็นร้อยละ 14.10 ซึ่งเป็นผลให้ก๊าซผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 66.66 เป็นร้อยละ 83.03 ดังรูปที่ 4.31 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา 5 % Ni/dolomite ซึ่งช่วยเร่งปฏิกิริยาการสลายของเหลวเป็นก๊าซผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพเพิ่มขึ้น ปริมาณของของเหลวที่ไม่ต้องการจึงลดลง



รูปที่ 4.31 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Ni/dolomite ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2

4.3.7 ผลของอุณหภูมิต่อค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Ni/dolomite

จากการทดลองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 % Ni/dolomite ในการแกซิฟิเคชันของเปลือกถั่วดาวอินคาที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นจาก 0.96 MJ/m³ และร้อยละ 22.94 เป็น 2.72 MJ/m³ และร้อยละ 53.10 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.32 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์มีค่าสูงสุด



รูปที่ 4.32 ผลของอุณหภูมิต่อค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Ni/dolomite ที่อัตราส่วนสมมูล 0.2

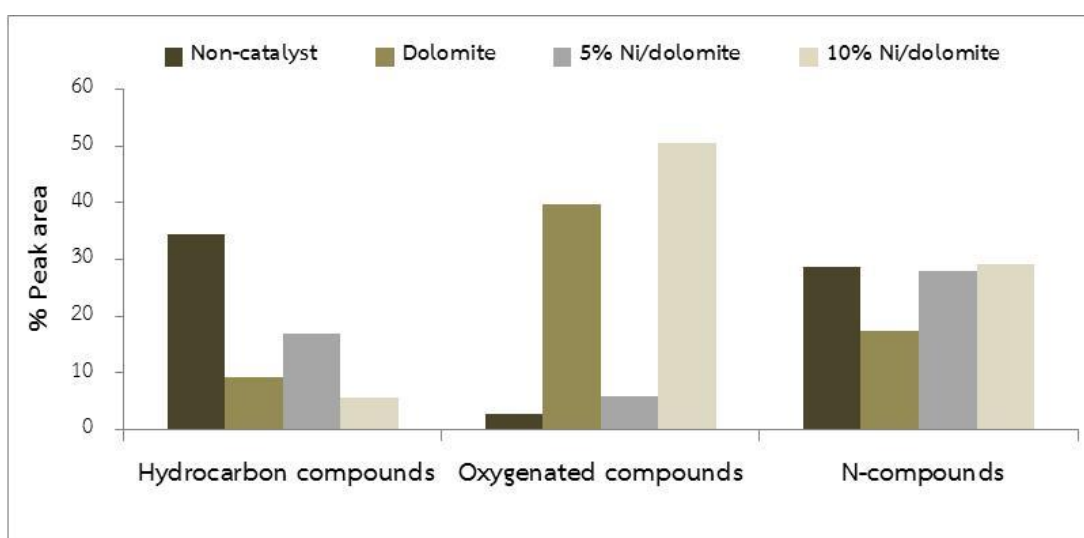
ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา 5 % Ni/dolomite ที่ผสมกับชีวมวล ในอัตราส่วน 1:1 หรือที่เรียกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบปฐมภูมิ (primary catalyst) เนื่องจากให้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซที่มีคุณภาพสูงและลดการเกิดของเหลวที่ไม่ต้องการ

4.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแกซิฟิเคชัน

4.4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลว

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวโดยใช้เครื่อง Gas Chromatography – Mass spectroscopy (GC-MS) เพื่อวิเคราะห์สัดส่วนขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแกซิฟิเคชันของเปลือกถั่วดาวอินคา สภาวะที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.2 และอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ทั้งไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา dolomite, 5% Ni/dolomite, 10% Ni/dolomite ซึ่งในการวิเคราะห์หาสัดส่วนขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลว ได้ทำการแบ่งกลุ่ม ออกเป็น 3 กลุ่ม ตามองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ Hydrocarbon compounds, Oxygenated compounds และ N-compounds ซึ่งผลการทดลอง พบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา มีส่วนช่วยในการลดลงของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon compounds) และ

สารประกอบที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (N-compounds) โดยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลใหญ่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลเล็กลง แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิดกลับช่วยเพิ่มสารประกอบที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (Oxygenated compounds) โดยเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10% Ni/dolomite ในผลิตภัณฑ์ของเหลวมี Oxygenated compounds เป็นองค์ประกอบสูงสุด ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบไปด้วย สารในกลุ่ม Ester และ Ketone ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 องค์ประกอบของสารเคมีที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ของเหลว

4.4.2 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของแข็ง

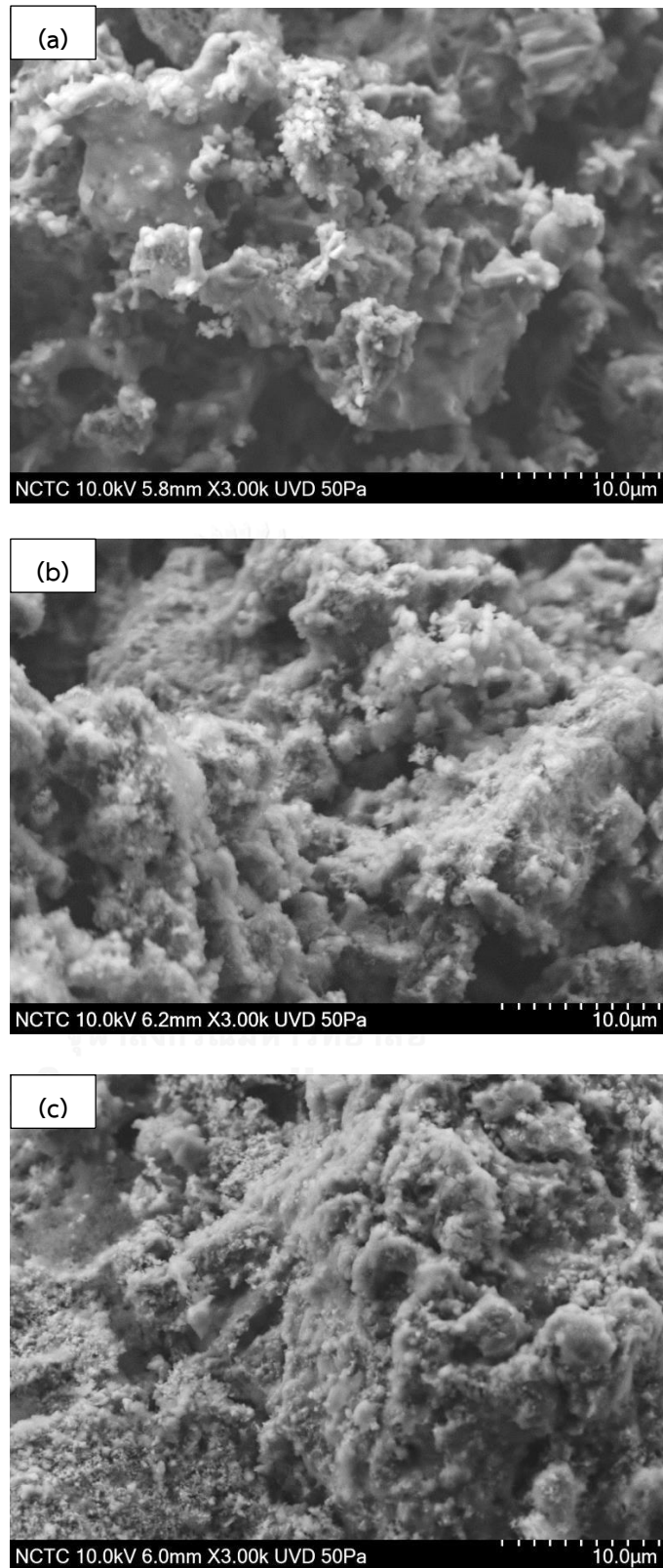
จากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้จากการแกซีฟิเคชัน โดยปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส อัตราส่วนสมมูล 0.2 ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10% Ni/dolomite คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของแข็งลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับของแข็งที่เกิดจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา calcined dolomite, 5% Ni/dolomite และไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งแสดงให้เห็นว่า คาร์บอนในเปลือกถั่วดาวอินคาถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซผลิตภัณฑ์ และพบว่าไม่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์ของแข็ง เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสามชนิด

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของแข็ง

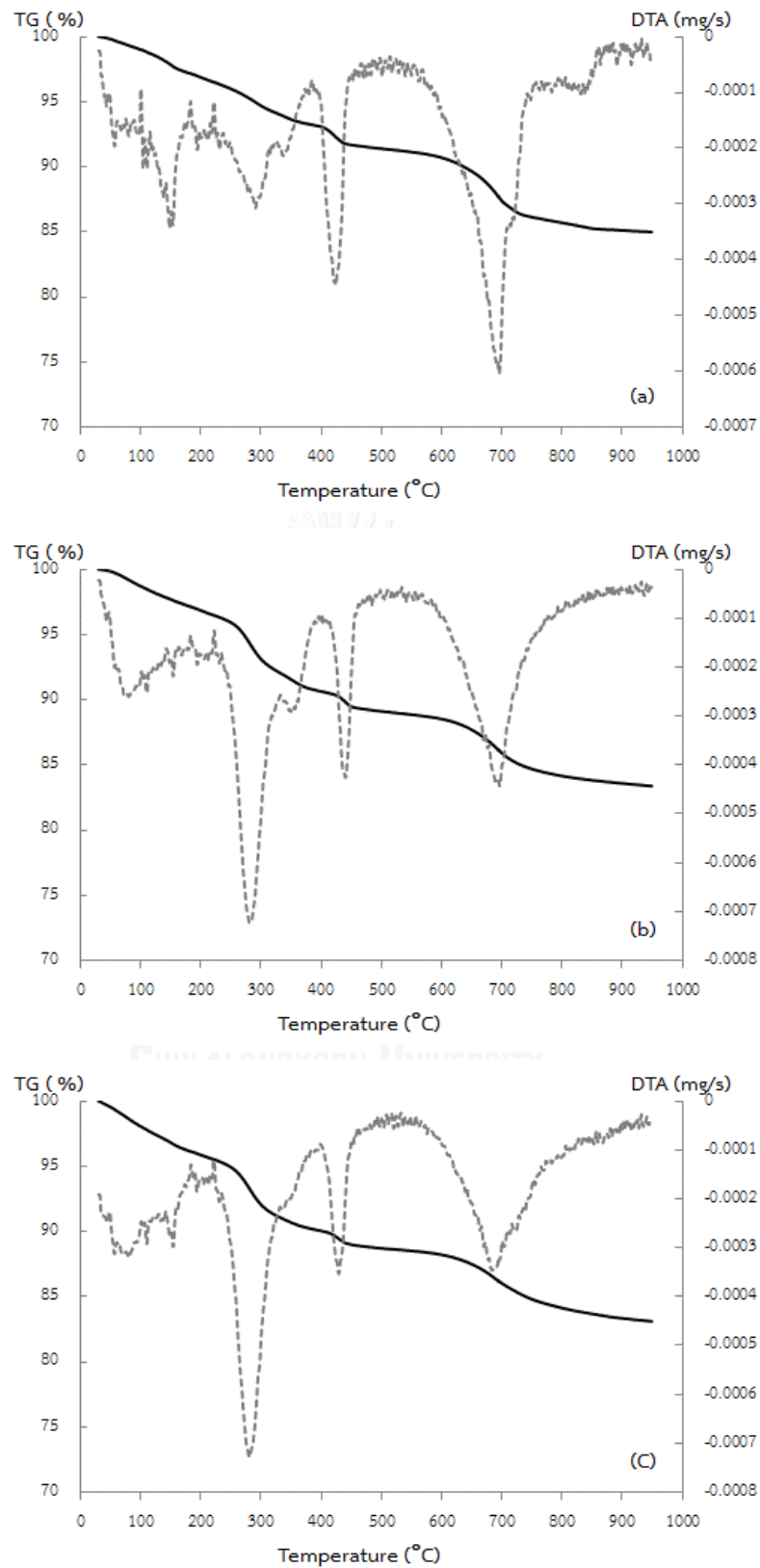
การวิเคราะห์แบบ แยกธาตุ (Ultimate analysis)	Non-catalyst	Calcined dolomite	5% Ni/dolomite	10% Ni/dolomite
คาร์บอน	7.90	7.59	6.84	3.90
ไฮโดรเจน	1.67	2.78	3.12	1.60
ไนโตรเจน	0.33	0.00	0.00	0.00
อื่นๆ	22.77	4.54	4.13	6.41

4.5 การศึกษาสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้ว

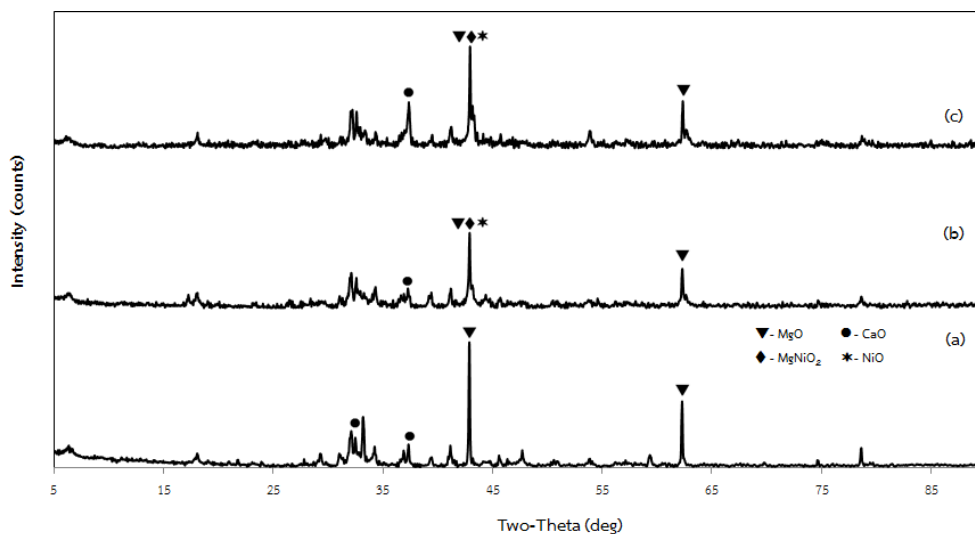
จากการศึกษาสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้ว ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยา dolomite, 5% Ni/dolomite และ 10% Ni/dolomite พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด หลังจากเกิดปฏิกิริยาแล้ว มีคาร์บอนสะสมอยู่บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (coke deposit) ซึ่งคาร์บอนที่สะสมนี้ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา (deactivation) ด้วย ซึ่งจะเห็นได้จากภาพการทดลองโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังรูปที่ 4.34 และจากการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน ดังรูปที่ 4.35 พบว่า คาร์บอนที่สะสมอยู่บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา มีค่าเท่ากับร้อยละ 12.15, ร้อยละ 13.70 และร้อยละ 13.08 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา dolomite, 5% Ni/dolomite และ 10% Ni/dolomite ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณไม่ต่างกัน และจากการวิเคราะห์เฟสของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยวิธี XRD (X-Ray Diffraction) พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Ni/dolomite และ 10% Ni/dolomite มีการเปลี่ยนเฟสของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยพบว่า ที่มุม 2θ เท่ากับ 63° ไม่พบตำแหน่งพีคของ NiO และ $MgNiO_2$ ดังรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.34 SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา (a) dolomite spent (b) 5% Ni/dolomite spent (c) 10% Ni/dolomite spent



รูปที่ 4.35 การสลายตัวทางความร้อนของ (a) dolomite spent (b) 5% Ni/dolomite spent (c) 10% Ni/dolomite spent



รูปที่ 4.36 XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา (a) dolomite spent (b) 5% Ni/dolomite spent (c) 10% Ni/dolomite spent

4.6 ผลของโลหะนิกเกิลหลังจากใช้งานแล้วต่อสิ่งแวดล้อม

ในการทดลองได้มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับชีวมวล ซึ่งหลังจากเกิดปฏิกิริยาแล้ว ถ้านำตัวเร่งปฏิกิริยาแยกออกจากถ่านชาร์ได้ เพื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้กลับมาใช้ใหม่ นิกเกิลก็จะไม่ใช่ของเสียอันตรายอีกต่อไป แต่ถ้าหากนำกลับมาใช้ได้ไม่หมด ซึ่งพบว่านิกเกิลที่ใส่แล้วจัดอยู่ในประเภทของเสียอันตราย (Hazardous waste) ตามกฎหมายโรงงาน เนื่องจากค่าที่วิเคราะห์ได้มีค่ามากกว่าค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLIC) ซึ่งนิกเกิลมีค่า TTLIC ตามมาตรฐานเท่ากับ 2000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดให้ถูกวิธีก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม ไม่งั้นอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมได้

งานวิจัยนี้ได้ทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาในกระบวนการแกซีฟิเคชัน โดยศึกษาผลของขนาดเปลือกถั่วดาวอินคา อุณหภูมิและอัตราส่วนสมมูล ที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ อีกทั้งศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อปรับปรุงคุณภาพของก๊าซผลิตภัณฑ์ พบว่าเปลือกถั่วดาวอินคาขนาด 0.50-0.85 มิลลิเมตร เป็นขนาดที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทดลองนี้ ส่วนสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสและอัตราส่วนสมมูล 0.2 และพบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลร้อยละ 5 บนตัวรองรับโดโลไมต์ ปริมาณก๊าซสังเคราะห์ที่ได้มีค่าสูงสุด โดยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับผลิตภัณฑ์ของแข็งและของเหลวที่ได้จากกระบวนการแกซีฟิเคชัน พบว่า ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่วิเคราะห์แบบแยกธาตุ มีคาร์บอนลดลง เนื่องจากถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซผลิตภัณฑ์ ส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลวที่วิเคราะห์จากเครื่อง GC-MS พบว่า ประกอบด้วยสามกลุ่ม ได้แก่ Hydrocarbon compounds, Oxygenated compounds และ N-compounds เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว พบว่า Hydrocarbon compounds และ N-compounds ที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลง จากนั้นได้วิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาหลังทำการทดลอง พบว่า มีคาร์บอนสะสมบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งโดโลไมต์และนิกเกิลร้อยละ 5 และ 10 บนตัวรองรับโดโลไมต์ แต่มีปริมาณที่ไม่แตกต่างกัน โดยผลที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นการทดลองเบื้องต้นที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ระดับอุตสาหกรรม เพื่อผลิตเป็นพลังงานได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการแกซีฟิเคชันของเปลือกถั่วดาวอินคา โดยใช้ท่อปฏิกรณ์แบบปล่อยหล่น ซึ่งศึกษาผลของขนาดเปลือกถั่วดาวอินคา อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา อัตราส่วนสมมูล และผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์, นิกเกิลร้อยละ 5 และ 10 บนตัวรองรับโดโลไมต์ ที่มีต่อผลิตภัณฑ์พบว่าขนาดเปลือกถั่วดาวอินคาขนาดเล็ก (0.25-0.50 มิลลิเมตร) ไม่เหมาะสมสำหรับใช้ในการเกิดปฏิกิริยาด้วยท่อปฏิกรณ์แบบปล่อยหล่นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากส่งผลให้ถ่านชาร์ที่ได้เกิดการอุดตันอยู่ที่บริเวณท่อสำหรับป้อนชีวมวล อุณหภูมิมีผลต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแกซีฟิเคชัน โดยอุณหภูมิสูงส่งผลให้ปฏิกิริยาต่างๆเกิดได้ดีขึ้น โดยเฉพาะปฏิกิริยา Boudouard และ Water gas อีกทั้งอุณหภูมิสูงยังช่วยทำให้การสลายตัวของชีวมวลเกิดเป็นก๊าซผลิตภัณฑ์ดีขึ้น ได้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น ขณะที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ผลิตภัณฑ์ของแข็งและของเหลวลดลง โดยที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาสำหรับงานวิจัยนี้

อัตราส่วนสมมูลซึ่งคืออัตราส่วนปริมาณออกซิเจนที่ป้อนเข้าระบบ เมื่อเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนลดลง ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจากออกซิเจน สนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งอัตราส่วนสมมูลที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาสำหรับงานวิจัยนี้ คือ อัตราส่วนสมมูล 0.2 เนื่องจากให้ค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำกว่า แต่ให้ค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจนและมีเทน ที่ใกล้เคียงกับที่อัตราส่วนสมมูล 0.3 ซึ่งให้ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่มีค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด เท่ากับ 2.33 MJ/m^3 และร้อยละ 44.75 ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าในระบบ จะส่งผลต่อคุณภาพของก๊าซผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง จะให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น อีกทั้งช่วยลดผลิตภัณฑ์ของเหลวและของแข็งที่เกิดขึ้น ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลร้อยละ 5 บนตัวรองรับโดโลไมต์ มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยให้ค่าก๊าซสังเคราะห์ (ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน) ร้อยละ

72.45 ความร้อนต่ำ 2.72 MJ/m^3 และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์สูงสุด เท่ากับร้อยละ 53.10

ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปหาค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยา ปริมาณการเกิดก๊าซ อัตราการสลายตัว รวมถึงค่าพลังงานการกระตุ้น เพื่อนำไปช่วยในการออกแบบระบบเตาขนาดใหญ่ เพื่อผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากชีวมวลที่มีลักษณะใกล้เคียงกันได้ ผ่านการสอบเทียบผลการทดลองที่ได้กับการใช้โมเดลการคำนวณการแปรสภาพผ่านโปรแกรมประยุกต์ต่างๆ ซึ่งจะช่วยเพิ่มความมั่นใจในการสร้างเตาปฏิกรณ์ระดับอุตสาหกรรมต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาส่วนประกอบของอื่นๆของถั่วดาวอินคาในการนำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิง เช่น เมล็ดที่เหลือใช้จากการหีบน้ำมัน เป็นต้น

5.2.2 ควรปรับปรุงเตาปฏิกรณ์ให้มีระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา (Residence time) นานขึ้น เพื่อให้สามารถเก็บข้อมูลการแปรสภาพได้ครอบคลุมยิ่งขึ้น

5.2.3 ควรศึกษาปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ เช่น อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อชีวมวล

5.2.4 ควรเพิ่มไซโคลนเพื่อดักจับผลิตภัณฑ์ของแข็ง (ถ่านชาร์) ที่หลุดออกมาพร้อมกับก๊าซผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ก๊าซผลิตภัณฑ์มีความสะอาดยิ่งขึ้นก่อนเข้าสู่เครื่องวัดก๊าซ

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ขวัญฤดี ธาราทรรกุลวัฒนา และ พิณิจ จันทร. (2558). *ถั่วดาวอินคา โอเมก้าบนดิน*. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ปัญญาชน.

ประพันธ์ คูชลธารา และ ศศิธร สรรพอคำ. (2558). *พลังงานจากชีวมวลและวัสดุเหลือใช้ Energy from biomass and waste*. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มาลี สันติคุณากรณ์. (2557). *การเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์และเทคนิควิเคราะห์เบื้องต้น*. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ภาษาอังกฤษ

Abbasi, T. and Abbasi, S. A. (2010). Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 919-937. doi: 10.1016/j.rser.2009.11.006

Asadullah, M. (2014). Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 201-215. doi: 10.1016/j.rser.2013.08.074

Billaud, J., Valin, S., Ratel, G. and Thiery, S. (2014). Biomass Gasification Between 800 and 1,400 °C in the Presence of O₂: Drop Tube Reactor Experiments and Simulation *Chemical Engineering Transactions*, 37, 163-168.

Bridgeman, T.G., Darvell, L.I., Jones, J.M., Williams, P.T., Fahmi, R., Bridgwater, A.V., Barraclough, T., Shield, I., Yates, N., Thain, S.C. and Donnison, I.S. (2007). Influence of particle size on the analytical and chemical properties of two energy crops. *Fuel*, 86, 60-72

Bridgwater, A.V. (2003). Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. *Chemical Engineering Journal*, 91, 87-102.

Bulushev, D. A. and Ross, J. R. H. (2011). Catalysis for conversion of biomass to fuels via pyrolysis and gasification: A review. *Catalysis Today*, 171(1), 1-13. doi: 10.1016/j.cattod.2011.02.005

- Chan, F.L. and Tanksale, A. (2014). Review of recent developments in Ni-based catalysts for biomass gasification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 428-438.
- Chloe, V. and Block, D. (Producer). (2010). Cellulose. Retrieved from <https://myorganicchemistry.wikispaces.com/Cellulose>
- Chopra, S. and Jain, A.K. (2007). A Review of Fixed Bed Gasification Systems for Biomass. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, 9(5).
- Devi, L., Ptasiński, K. J., and Janssen, F. J. J. G. (2003). A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes. *Biomass and Bioenergy*, 24, 125-140.
- El-Rub, Z.A., Bramer, E.A. and Brem, G. (2004). Review of Catalysts for Tar Elimination in Biomass Gasification Processes. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 43, 6911-6919.
- Elbaba, I. F. and Williams, P.T. (2013). High yield hydrogen from the pyrolysis–catalytic gasification of waste tyres with a nickel/dolomite catalyst. *Fuel*, 106, 528-536. doi: 10.1016/j.fuel.2012.12.067
- Feng, Y., Xiao, B., Geoerner, K., Cheng, G. and Wang, J. (2011). Influence of catalyst and temperature on gasification performance by externally heated gasifier. *Smart Grid and Renewable Energy*, 2, 177-183
- Gai, C. and Dong, Y. (2012). Experimental study on non-woody biomass gasification in a downdraft gasifier. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 4935-4944.
- Goyal, H. B., Seal, D. and Saxena, R. C. (2008). Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 504-517.
- Hernández, J. J., Ballesteros, R. and Aranda, G. (2013). Characterisation of tars from biomass gasification: Effect of the operating conditions. *Energy*, 50, 333-342. doi: 10.1016/j.energy.2012.12.005
- Kirubakaran, V., Sivaramakrishnan, V., Nalini, R., Sekar, T., Premalatha, M. and Subramanian, P. (2009). A review on gasification of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(1), 179-186. doi: 10.1016/j.rser.2007.07.001

- Li, B., Yang, H., Wei, L., Shao, J. and Wang, X. (2017). Hydrogen production from agricultural biomass wastes gasification in fluidized bed with calcium oxide enhancing. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 4832-4839.
- Liang, P., Wei, A., Liu, Y., Zhang, Y. and Wu, J. (2015). Effect of additives on dolomite-supported Ni catalysts for coal tar cracking. *Materials Research Innovations*, 19. doi: 10.1179/1432891715z.0000000001690.
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1) : overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83, 37-46.
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 2) : conversion technologies. *Bioresource Technology*, 83, 47-54.
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 3) : gasification technologies. *Bioresource Technology*, 83, 55-63.
- Miguel, C.A., Jose, C., Maria-Pilar, A. and Javier, G. (2000). Biomass Gasification with Air in Fluidized Bed. Hot Gas Cleanup with Selected Commercial and Full-Size Nickel-Based Catalysts. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 39, 1143-1154.
- Mupondwa, E., Li, X., Tabil, L., Phani, A., Sokhansanj, S., Stumborg, M., Gruber, M. and Laberge, S. (2012). Technoeconomic analysis of wheat straw densification in the Canadian Prairie Province of Manitoba. *Bioresource Technology*, 110, 355-363. doi: 10.1016/j.biortech.2012.01.100
- Natarajan, E. and Baskara Sethupathy, S. (2015). Gasification of Groundnut Shells. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 37(9), 980-986. doi: 10.1080/15567036.2011.601791
- Sornkade, P., Atong, D. and Sricharoenchaikul, V. (2015). Conversion of cassava rhizome using an in-situ catalytic drop tube reactor for fuel gas generation. *Renewable Energy*, 79, 38-44.
- Panwar, N.L., Kothari, R. and Tyagi, V. V. (2012). Thermo chemical conversion of biomass – Eco friendly energy routes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 1801-1816. doi: 10.1016/j.rser.2012.01.024

- Puig-Arnabat, M., Bruno, J.C. and Coronas, A. (2010). Review and analysis of biomass gasification models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2841-2851. doi: 10.1016/j.rser.2010.07.030
- Raveendran, K., Ganesh, A. and Khilart, K.C. (1995). Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics. *Fuel*, 74(12), 1812-1822.
- Sacha Inchi – prawdziwe złoto Inków. (2015). Retrieved from <http://www.elamo.pl/kosmety-ki-naturalne/sacha-inchi/>
- Saidur, R., Abdelaziz, E. A., Demirbas, A., Hossain, M. S. and Mekhilef, S. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2262-2289. doi: 10.1016/j.rser.2011.02.015
- Septien, S., Valin, S., Peyrot, M., Spindler, B. and Salvador, S. (2013). Influence of steam on gasification of millimetric wood particles in a drop tube reactor: Experiments and modelling. *Fuel*, 103, 1080-1089. doi: 10.1016/j.fuel.2012.09.011
- Son, Y.I., Yoon, S.J., Kim, Y.K. and Lee, J.G. (2011). Gasification and power generation characteristics of woody biomass utilizing a downdraft gasifier. *Biomass and Bioenergy*, 35, 4215-4220.
- Sundac, N. (2007). Catalytic cracking of tar from biomass gasification.
- Sutton, D., Kelleher, B. and Ross, Julian R. H. (2001). Review of literature on catalyst for biomass gasification. *Fuel Processing Technology*, 73, 155-173.
- Tremel, A., Becherer, D., Fendt, S., Gaderer, M. and Spliethoff, H. (2013). Performance of entrained flow and fluidised bed biomass gasifiers on different scales. *Energy Conversion and Management*, 69, 95-106. doi: 10.1016/j.enconman.2013.02.001
- Waheed, Q.M. K. and Williams, P.T. (2013). Hydrogen production from high temperature pyrolysis/steam reforming of waste biomass: rice husk, sugar cane bagasse, and wheat straw. *Energy Fuels*, 27, 6695-6704.
- Waheed, Q.M. K., Wu, C. and Williams, P.T. (2016). Pyrolysis/reforming of rice husks with a Ni-dolomite catalyst: Influence of process conditions on syngas and hydrogen yield. *Journal of the Energy Institute*, 89, 657-667.

- Wang, J., Cheng, G., You, Y. and Xiao, B. (2012). Hydrogen-rich gas production by steam gasification of municipal solid waste (MSW) using NiO supported on modified dolomite. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 6503-6510.
- Xu, Q., Lan, P., Zhang, B., Ren, Z. and Yan, Y. (2013). Preparation of Syngas via Catalytic Gasification of Biomass with a Nickel-based Catalyst. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 35(9), 848-858. doi: 10.1080/15567036.2010.535100
- Zheng, J.L., Zhu, M.Q., Wen J.L. and Sun, R.C. (2016). Gasification of bio-oil: Effects of equivalence ratio and gasifying agents on product distribution and gasification efficiency. *Bioresource Technology*, 211, 164-172.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

การคำนวณ

1. การคำนวณอัตราการไหลของก๊าซพาและก๊าซออกซิเจน

1.1 ระยะเวลาพักของก๊าซ

$$\text{ปริมาตรเครื่องปฏิกรณ์} = 0.98 \text{ ลิตร}$$

$$\text{ก๊าซที่เข้าระบบทั้งหมด} = 13 \text{ ลิตร/ นาที}$$

$$\text{จาก } t = V/Q$$

$$t = (0.98 \times 60) / 13$$

$$\text{ดังนั้น ระยะเวลาพักของก๊าซ} = 4.52 \text{ วินาที}$$

1.2 อัตราการไหลของก๊าซ

$$\text{ความชื้นของเปลือกถั่วดาวอินคา} = \text{ร้อยละ } 4.69$$

$$\text{คาร์บอนในเปลือกถั่วดาวอินคา} = \text{ร้อยละ } 41.24$$

$$\text{อัตราการป้อนชีวมวลเข้าสู่ระบบ} = 1 \text{ กรัม/นาที}$$

$$\text{ดังนั้น คาร์บอนเข้าสู่ระบบ} = 0.3931 \text{ กรัมคาร์บอน/นาที}$$

$$= 0.3931/12 \text{ โมล/นาที}$$

$$= 0.033 \text{ โมล/นาที}$$

$$\text{ปริมาตรก๊าซที่ } 25 \text{ องศาเซลเซียส; } V_1 = 0.033 \times 24.45 \text{ ลิตร/นาที}$$

$$= 0.8069 \text{ ลิตร/นาที}$$

ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่ 700 องศาเซลเซียส

$$\text{จาก } V_1/T_1 = V_2/T_2$$

$$\text{ดังนั้น } V_2 = (V_1/T_1) \times T_2$$

$$\text{เมื่อ } T_1 = 298 \text{ เคลวิน}$$

$$T_2 = 973 \text{ เคลวิน}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad V_2 = (0.8069/298) \times 973$$

$$V_2 = 2.63 \text{ ลิตร/นาท}$$

ก๊าซทั้งหมดที่ต้องป้อนเข้าสู่ระบบ ที่ 25 องศาเซลเซียส

$$= 13 - 2.63$$

$$= 10.37 \text{ ลิตร/นาท}$$

$$= (10.37/973) \times 298$$

$$= 3.17 \text{ ลิตร/นาท}$$

สำหรับอุณหภูมิอื่นๆ มีวิธีคิดเช่นเดียวกัน ดังแสดงในตาราง

ตารางที่ ก.1 ปริมาตรของก๊าซทั้งหมดที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ปริมาตรของก๊าซทั้งหมดที่ 25 องศาเซลเซียส (ลิตรต่อนาท)
700	3.17
800	2.80
900	2.49

1.3 อัตราส่วนสมมูล

อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio) เป็นค่าที่แสดงอัตราส่วนปริมาณออกซิเจนต่อปริมาณเชื้อเพลิงแห้งที่แท้จริง เทียบกับอัตราส่วนปริมาณออกซิเจนต่อปริมาณเชื้อเพลิงทางทฤษฎี ซึ่งถ้าค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1 แสดงถึงการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ตามทฤษฎี ในกรณีที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0 แสดงว่าไม่มีออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาหรือเรียกว่ากระบวนการไพโรไลซิส ดังนั้นในกระบวนการแกซิฟิเคชัน จะมีค่าอัตราส่วนสมมูลอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งเป็นการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์

ในการคิดอัตราส่วนสมมูลในงานวิจัยนี้จะพิจารณาที่คาร์บอนเท่านั้น

จากสมการการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ : $C + O_2 \rightarrow CO_2$

ในกรณีนี้ จะเห็นได้ว่า C 1 โมล ทำปฏิกิริยากับ O_2 1 โมล เกิดปฏิกิริยาอย่างสมมูลกัน
ค่า ER จึงเท่ากับ 1

ในการคำนวณอัตราการป้อนออกซิเจน

$$\begin{aligned} \text{จาก ความชื้นของเปลือกถั่วดาวอินคา} &= \text{ร้อยละ } 4.69 \\ \text{ของแข็งในเปลือกถั่วดาวอินคา} &= 100 - 4.69 = \text{ร้อยละ } 95.31 \\ \text{คาร์บอนในเปลือกถั่วดาวอินคา} &= \text{ร้อยละ } 41.24 \\ \text{อัตราการป้อนชีวมวลเข้าสู่ระบบ} &= 1 \text{ กรัม/นาที่} \\ \text{ดังนั้น คาร์บอนเข้าสู่ระบบ} &= (1 \times 0.9531 \times 0.4124) \\ &= 0.3931 \text{ กรัมคาร์บอน/นาที่} \\ &= 0.3931/12 \text{ โมล/นาที่} \\ &= 0.033 \text{ โมล/นาที่} \end{aligned}$$

ดังนั้น ต้องใช้ออกซิเจน 0.033 โมล/ นาที่ ในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ หรือ
ค่า ER = 1

ถ้าเกิดกระบวนการแกซิฟิชั่นที่ ER = 0.3

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นต้องใช้ออกซิเจน} &= 0.3 \times 0.033 \text{ โมล/ นาที่} = 0.0099 \text{ โมล/นาที่} \\ &= 0.0099 \text{ โมล/นาที่} \times 24.45 \text{ ลิตร/โมล (ที่ } 25^\circ\text{C)} \\ &= 0.24 \text{ ลิตร/นาที่} \end{aligned}$$

ถ้าเกิดกระบวนการแกซิฟิชั่นที่ ER = 0.4

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นต้องใช้ออกซิเจน} &= 0.4 \times 0.033 \text{ โมล/ นาที่} = 0.0132 \text{ โมล/นาที่} \\ &= 0.0132 \text{ โมล/นาที่} \times 24.45 \text{ ลิตร/โมล (ที่ } 25^\circ\text{C)} \\ &= 0.32 \text{ ลิตร/นาที่} \end{aligned}$$

ตารางที่ ก.2 อัตราการป้อนก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจนเข้าสู่ระบบที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ก๊าซทั้งหมด ที่ 25 °C	ER 0.2		ER 0.3		ER 0.4		ER 0.5	
		N ₂	O ₂	N ₂	O ₂	N ₂	O ₂	N ₂	O ₂
700	3.17	3.01	0.16	2.93	0.24	2.85	0.32	2.77	0.40
800	2.80	2.64	0.16	2.56	0.24	2.48	0.32	2.40	0.40
900	2.49	2.33	0.16	2.25	0.24	2.17	0.32	2.09	0.40

2. การคำนวณการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน

2.1 การแปรสภาพของคาร์บอน

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่วัดได้จากเครื่องวัดก๊าซ = ร้อยละ 3.74

อัตราการไหลของก๊าซผลิตภัณฑ์ = 3.03 ลิตร/นาที

ดังนั้นปริมาตรของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ = $(3.74 \times 3.03)/100$

= 0.113 ลิตร/นาที

= $0.113 / 24.45 = 0.0046$ โมล/นาที

คาร์บอนในเปลือกถั่วดาวอินคา = ร้อยละ 41.24

ความชื้นของเปลือกถั่วดาวอินคา = ร้อยละ 4.69

ป้อนตัวอย่างเข้าสู่ระบบ = 1 กรัม/นาที

ดังนั้น ป้อนคาร์บอนเข้าสู่ระบบ = 0.3931 กรัม/นาที

= $0.3931 / 12 = 0.033$ โมล/นาที

ดังนั้น ร้อยละการแปรสภาพของคาร์บอนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

= $(0.0046 / 0.033) \times 100$

= 13.94

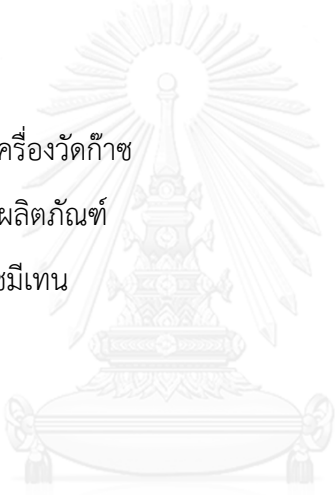
2.2 การแปรสภาพของไฮโดรเจน

ก๊าซไฮโดรเจนที่วัดได้จากเครื่องวัดก๊าซ = ร้อยละ 4.73

อัตราการไหลของก๊าซผลิตภัณฑ์ = 3.03 ลิตร/นาที

ดังนั้นปริมาตรของก๊าซไฮโดรเจน = $(4.73 \times 3.03)/100$

$$\begin{aligned}
 &= 0.143 \text{ ลิตร/นาทีก} \\
 &= 0.143 / 24.45 = 0.0059 \text{ โมล/นาทีก} \\
 \text{ไฮโดรเจนในเปลือกถั่วดาวอินคา} &= \text{ร้อยละ } 6.78 \\
 \text{ความชื้นของเปลือกถั่วดาวอินคา} &= \text{ร้อยละ } 4.69 \\
 \text{ป้อนตัวอย่างเข้าสู่ระบบ} &= 1 \text{ กรัม/นาทีก} \\
 \text{ดังนั้น ป้อนไฮโดรเจนเข้าสู่ระบบ} &= 0.065 \text{ กรัม/นาทีก} \\
 &= 0.065 / 1 = 0.065 \text{ โมล/นาทีก} \\
 \text{ดังนั้น ร้อยละการแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นก๊าซไฮโดรเจน} &= (0.0059 / 0.065) \times 100 \times 2 \\
 &= 18.15
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 \text{ก๊าซมีเทนที่วัดได้จากเครื่องวัดก๊าซ} &= \text{ร้อยละ } 1.35 \\
 \text{อัตราการไหลของก๊าซผลิตภัณฑ์} &= 3.03 \text{ ลิตร/นาทีก} \\
 \text{ดังนั้น ปริมาตรของก๊าซมีเทน} &= (1.35 \times 3.03) / 100 \\
 &= 0.041 \text{ ลิตร/นาทีก} \\
 &= 0.041 / 24.45 \\
 &= 0.0017 \text{ โมล/นาทีก} \\
 \text{ดังนั้น ร้อยละการแปรสภาพของไฮโดรเจนเป็นก๊าซมีเทน} &= (0.0017 / 0.065) \times 100 \times 4 \\
 &= 10.46
 \end{aligned}$$

3. การคำนวณค่าความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์ (Lower heating value)

$$\text{ค่าความร้อน (MJ/m}^3\text{)} = \frac{(12.64 \times \text{CO}) + (10.8 \times \text{H}_2) + (35.72 \times \text{CH}_4)}{\text{ปริมาตรของก๊าซทั้งหมดต่อนาทีก}}$$

เมื่อ CO, H₂ และ CH₄ คือปริมาตรของ CO, H₂ และ CH₄ ที่ได้ต่อนาทีก

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าความร้อน} &= (12.64 \times 0.25) + (10.8 \times 0.18) + (35.72 \times 0.05) / 3.03 \\
 &= 2.27 \text{ MJ/m}^3
 \end{aligned}$$

4. การคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์ (Cold gas efficiency)

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงความร้อน} = \frac{(\text{LHV} \times V_i) \times 100}{(\text{LHV}_{\text{feed}} \times M)}$$

เมื่อ LHV คือ ค่าความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคำนวณ (MJ/m^3)

V_i คือ ปริมาตรของก๊าซผลิตภัณฑ์ (m^3)

LHV_{feed} คือ ค่าความร้อนชีวมวล (MJ/Kg)

M คือ มวลของวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง (Kg)

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซ} &= [(2.27 \times 0.0909)/(15.80 \times 0.0299)] \times 100 \\ &= \text{ร้อยละ } 43.65 \end{aligned}$$

5. การคำนวณร้อยละบนตัวเร่งปฏิกิริยา

น้ำหนักโมเลกุลของ นิกเกิล = 58.693 กรัม

น้ำหนักโมเลกุลของ นิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) = 290.79 กรัม

5.1 นิกเกิลร้อยละ 5 บนตัวรองรับดีโกลไมต์

ตัวรองรับดีโกลไมต์ ปริมาณ 100 กรัม มีนิกเกิล 5 กรัม

ดังนั้น ตัวรองรับดีโกลไมต์ ปริมาณ 10 กรัม มีนิกเกิล 0.5 กรัม

มีนิกเกิล 58.693 กรัม ใน นิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต 290.79 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น นิกเกิล 0.5 กรัม ต้องใช้นิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต} &= (290.79/58.693) \times 0.5 \\ &= 2.477 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

5.2 นิกเกิลร้อยละ 10 บนตัวรองรับดีโกลไมต์

ตัวรองรับดีโกลไมต์ ปริมาณ 100 กรัม มีนิกเกิล 10 กรัม

ดังนั้น ตัวรองรับดีโกลไมต์ ปริมาณ 10 กรัม มีนิกเกิล 1 กรัม

มีนิกเกิล 58.693 กรัม ใน นิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต 290.79 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น นิกเกิล 1 กรัม ต้องใช้นิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต} &= (290.79/58.693) \times 1 \\ &= 4.954 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ภาคผนวก ข
ข้อมูลการทดลอง

1. กระบวนการแกซีฟิเคชันโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ ข.1 ร้อยละของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิและอัตราส่วนสมมูลต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	อัตราส่วน สมมูล	ร้อยละของก๊าซผลิตภัณฑ์				อัตราการไหลของก๊าซ ผลิตภัณฑ์ (ลิตร/นาที่)
		CO ₂	CO	CH ₄	H ₂	
700	0.2	5.74	1.94	0.94	2.50	3.79
	0.3	4.19	1.81	0.88	1.80	3.80
	0.4	6.33	2.01	0.90	1.97	3.79
	0.5	8.17	2.05	0.83	1.83	3.81
800	0.2	4.03	3.73	1.23	3.59	3.53
	0.3	5.35	4.12	1.23	3.29	3.58
	0.4	7.02	2.86	1.14	2.37	3.35
	0.5	7.64	1.96	0.98	1.61	3.47
900	0.2	3.74	6.34	1.35	4.74	3.03
	0.3	3.97	6.91	1.43	5.05	3.03
	0.4	6.05	4.78	1.46	3.67	3.21
	0.5	8.74	6.01	1.46	3.97	3.02

ตารางที่ ข.2 ร้อยละการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อัตราส่วนสมมูลและอุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	อัตราส่วน สมมูล	ร้อยละการแปรสภาพ					
					CH ₄		Syngas
		CO ₂	CO	H ₂	C-CH ₄	H-CH ₄	
700	0.2	24.26	10.97	17.32	5.21	12.81	28.29
	0.3	21.00	10.29	12.59	5.02	12.33	22.88
	0.4	31.71	11.34	13.85	5.04	12.39	25.19
	0.5	38.46	11.60	12.99	4.47	10.99	24.59
800	0.2	17.83	19.76	23.19	6.47	15.90	42.95
	0.3	24.84	21.98	21.34	6.51	15.98	43.32
	0.4	30.84	14.31	14.52	5.55	13.63	28.83
	0.5	32.35	10.54	10.46	5.18	12.72	21.00
900	0.2	14.50	30.63	26.94	6.27	15.40	57.57
	0.3	16.84	31.23	27.59	6.47	15.90	58.82
	0.4	27.76	22.88	21.17	6.87	16.88	44.05
	0.5	34.07	27.07	21.74	6.30	15.47	48.81

ตารางที่ ข.3 ค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของก๊าซผลิตถ่าน

อุณหภูมิ (°C)	อัตราส่วนสมมูล	ค่าความร้อน (MJ/m ³)	ร้อยละประสิทธิภาพ เชิงความร้อน
700	0.2	1.02	24.56
	0.3	0.9	21.65
	0.4	0.95	22.94
	0.5	0.9	21.81
800	0.2	1.57	35.19
	0.3	1.58	35.95
	0.4	1.23	26.07
	0.5	0.96	21.08
900	0.2	2.27	43.65
	0.3	2.33	44.75
	0.4	1.82	34.13
	0.5	2.04	39.06

2. กระบวนการแกซีฟิเคชันเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

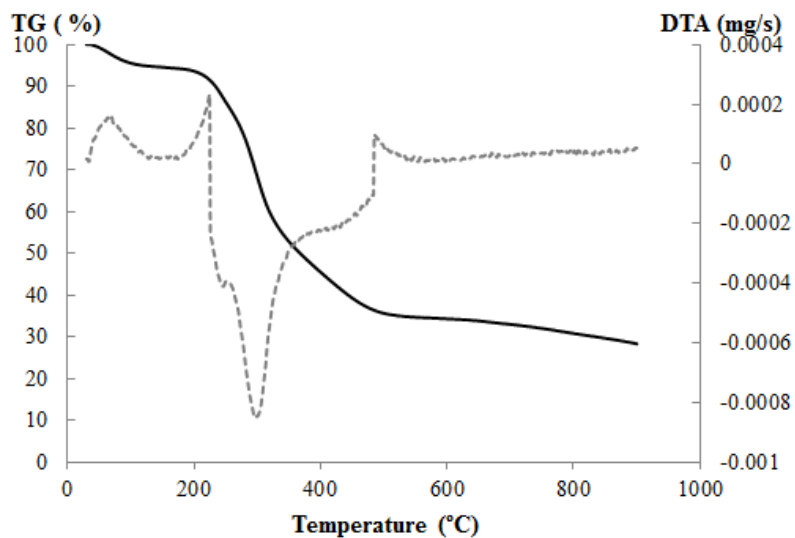
ตารางที่ ข.4 ร้อยละของก๊าซผลิตภัณฑ์เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนสมมูล 0.2

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ร้อยละของก๊าซผลิตภัณฑ์				อัตราการไหลของ ก๊าซผลิตภัณฑ์ (ลิตร/นาท)
	CO ₂	CO	CH ₄	H ₂	
Calcined dolomite	3.21	7.11	1.55	5.78	3.21
5% Ni/dolomite	4.38	8.23	1.56	6.14	3.08
10% Ni/dolomite	6.28	7.84	1.76	6.17	2.91

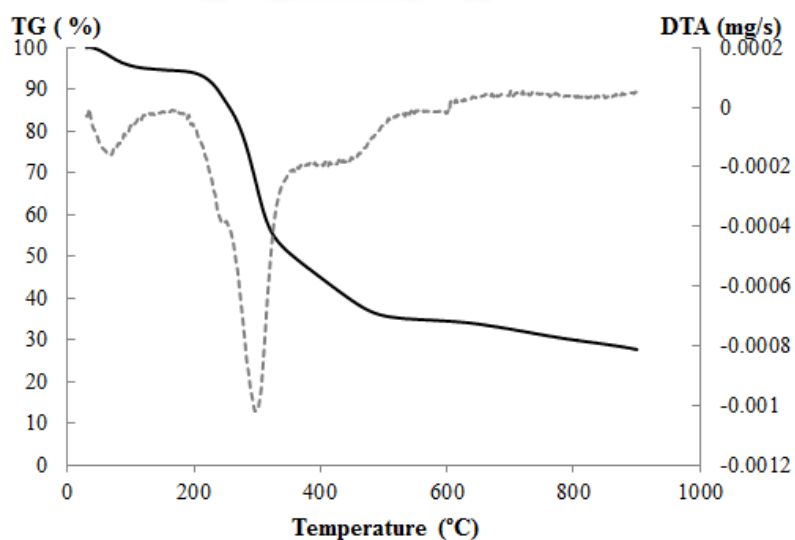
ตารางที่ ข.5 ร้อยละของก๊าซผลิตภัณฑ์เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Ni/dolomite ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ร้อยละของก๊าซผลิตภัณฑ์				อัตราการไหลของ ก๊าซผลิตภัณฑ์ (ลิตร/นาท)
	CO ₂	CO	CH ₄	H ₂	
700	4.23	1.53	0.89	2.60	3.76
800	4.60	3.94	1.26	3.95	3.61
900	4.38	8.23	1.56	6.14	3.08

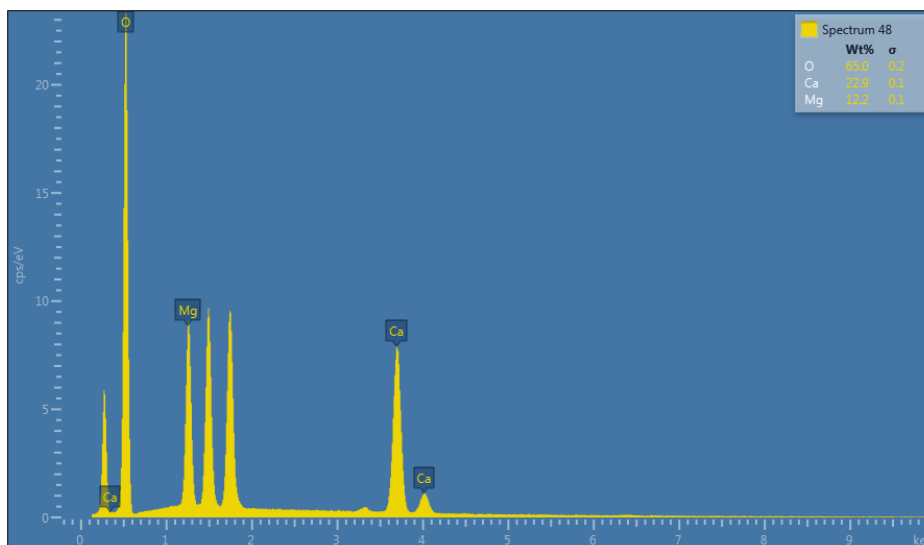
ภาคผนวก ค
การวิเคราะห์ผล



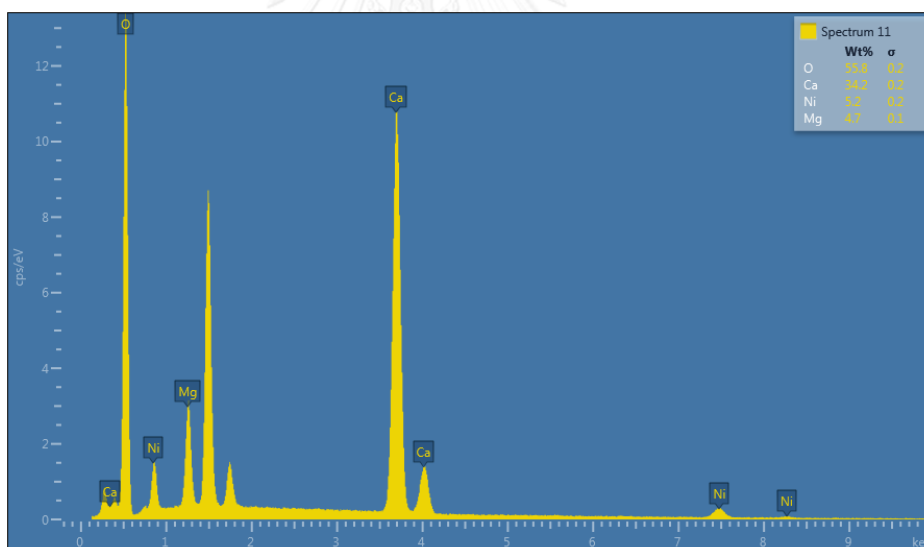
รูปที่ ค.1 การสลายตัวทางความร้อนของเปลือกถั่วดาวอินคาขนาด 0.25-0.50 มิลลิเมตร



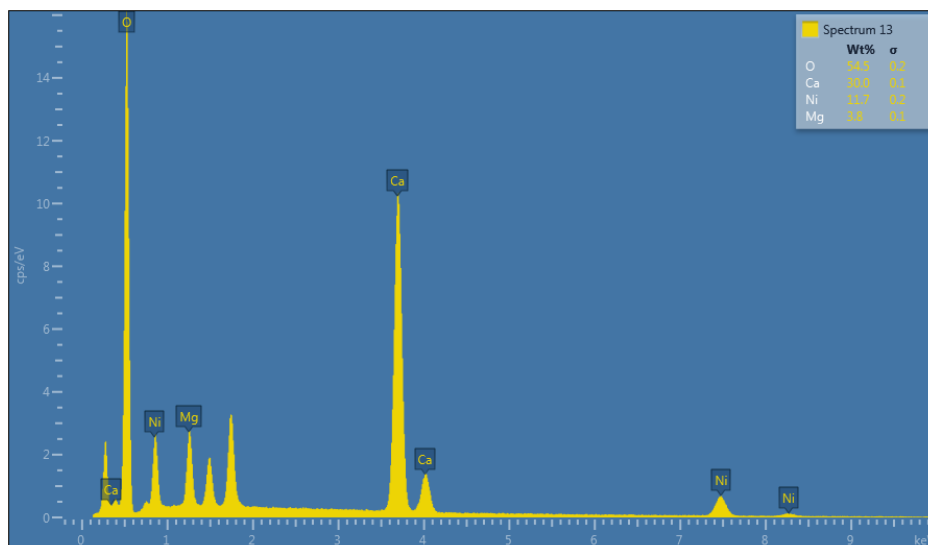
รูปที่ ค.2 การสลายตัวทางความร้อนของเปลือกถั่วดาวอินคาขนาด 0.50-0.85 มิลลิเมตร



รูปที่ ค.3 EDX ของตัวเร่งปฏิกิริยาไดโกลไมต์



รูปที่ ค.4 EDX ของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลร้อยละ 5 บนตัวรองรับไดโกลไมต์



รูปที่ ค.5 EDX ของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลร้อยละ 10 บนตัวรองรับไดโลไมต์



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชลัฐธร ลักขณา เกิดเมื่อวันที่ 6 ธันวาคม พ. ศ. 2534 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี 2557 ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เผยแพร่ในงาน 2017 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies ในชื่อหัวข้อ Fuel Gas Generation from Gasification of Sacha Inchi Shell using a Drop Tube Reactor ระหว่างวันที่ 25-26 พฤษภาคม ณ โรงแรมพูลแมน คิง เพาเวอร์ กรุงเทพฯ ประเทศไทย

