

ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่ดูดซับบนวัสดุเบด
ต่อการรีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำ

นายชัชวาท ธีรฐิตยางกูร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

CATALYTIC EFFECTS OF ALKALI AND ALKALINE EARTH METALS
ADSORBED ON BED MATERIAL ON TAR STEAM REFORMING

Mr. Chalot Teeratitayangoon

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่ ดูดซับบนวัสดุเบดต์อการีฟอรัมน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำ
โดย	นายชัชท ธีรจิตยางกูร
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เลอสรวง เมฆสุด
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.เลอสรวง เมฆสุด)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.สุชาดา บุตรนาค)

ชลัทธีรัฐิตยงกูร : ผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่ดูดซับบนวัสดุเบดต่อการรีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำ. (CATALYTIC EFFECTS OF ALKALI AND ALKALINE EARTH METALS ADSORBED ON BED MATERIAL ON TAR STEAM REFORMING) อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร. เลอสรวงเมฆสุต, อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ.ดร. ประพันธ์ คูชลธารา, 112 หน้า.

โลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทเป็นแร่ธาตุที่พบมากในชีวมวลและสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีในกระบวนการแกซิฟิเคชันได้ แต่โดยทั่วไปแร่ธาตุเหล่านี้จะสูญเสียไประหว่างกระบวนการแปรรูปทางเคมีความร้อนของชีวมวล งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิในการไพโรไลซิสต่อร้อยละการปลดปล่อยของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการไพโรไลซิสจาก 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส ร้อยละการปลดปล่อยของโลหะโซเดียมและโพแทสเซียมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ร้อยละการปลดปล่อยของโลหะแคลเซียมและแมกนีเซียมค่อนข้างคงที่ เนื่องจากโลหะแคลเซียมและแมกนีเซียมสามารถเกิดอันตรกิริยาที่แข็งแกร่งกับแร่ธาตุซิลิกาในถ่านชาร์ได้นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวและไม้กระถินด้วยอะลูมินาและซิลิกา เพื่อเป็นแนวทางในการลดปัญหาการกัดกร่อนและอุดตันของเตาปฏิกรณ์จากโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่ถูกปลดปล่อยออกมาระหว่างกระบวนการแปรรูปทางเคมีความร้อน อีกทั้งเพื่อศึกษาแนวทางการนำไปใช้ในการนำวัสดุเบดที่ผ่านการดูดซับไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการรีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำ จากผลการศึกษา พบว่า โลหะโพแทสเซียมสามารถถูกดูดซับบนวัสดุเบดทั้งสองชนิดได้สูงสุดเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่นๆ และพบว่าสภาวะที่ให้ปริมาณการดูดซับของโลหะโพแทสเซียมสูงสุดคือ การดูดซับจากฟางข้าว ภายใต้สภาวะที่มีไอน้ำที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊สตัวพา 120 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้วัสดุเบดเป็นอะลูมินา จากการศึกษาผลเชิงเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำของวัสดุเบดที่ผ่านการดูดซับด้วยโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท พบว่า อะลูมินาที่ผ่านการดูดซับแร่ธาตุจากฟางข้าว สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้โดยให้ร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สและให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น

ภาควิชาเคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา2554..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

5272272823 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS : ALKALI AND ALKALINE EARTH METALS / BED MATERIAL / STEAM REFORMING / BIOMASS

CHALAT TEERATITAYANGGOON: CATALYTIC EFFECTS OF ALKALI AND ALKALINE EARTH METALS ADSORBED ON BED MATERIAL ON TAR STEAM REFORMING. ADVISOR: ASSOC.PROF. LURSUANG MEKASUT, Dr. Ing., CO-ADVISOR: ASST.PROF. PRAPAN KUCHONTHARA, Ph.D., 112 pp.

Alkali and alkaline earth metals (AAEMs) are inherently exist in biomass and also good catalyst for gasification process. However, AAEMs are typically released out of thermochemical process of biomass. This work investigated effect of pyrolysis temperature on release of AAEMs from rice straw and leucaena leucocephala. It found that increase in release of Na and K when pyrolysis temperature increased from 600 to 800 °C. Release of Ca and Mg were rather constant because of strong interaction with SiO₂ mineral in char. Nevertheless, previous works have mentioned the AAEMs vapors caused corrosion and slagging for thermochemical process. Therefore, this work investigated adsorption of AAEMs by Al₂O₃ and SiO₂ in order to study feasibility for reducing the problem from the released AAEM (i.e. slag and corrosion) inside reactor. Also, spent bed was studied feasibility in catalytic activity of tar steam reforming. The results revealed that K species were adsorbed more than other metals and adsorption of AAEMs from rice straw by Al₂O₃ at temperature of 800 °C, carrier gas flow rate of 120 mL/min and under steam atmosphere provided high potassium content, comparing with other biomass and bed. In part of catalytic activity study, it revealed Al₂O₃ adsorbed AAEMs from rice straw provided positive interaction on carbon conversion into gaseous product and also increased in H₂ and CO content via water gas shift and boudouard reaction.

Department :Chemical technology..... Student's Signature

Field of Study :Chemical technology..... Advisor's Signature

Academic Year :2011..... Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุต อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธारा อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้กรุณามอบความรู้ แนวคิด และข้อคิดเห็นต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้มอบคำแนะนำและความช่วยเหลือที่ดีตลอดมา

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ และ ดร. สุชาดา บุตรนาถ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ นักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้าง ซ่อมแซมเครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ รวมไปถึงให้ความรู้และคำแนะนำในการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่คอยดูแล ช่วยเหลือ เป็นกำลังใจอย่างดี และให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ชาวเคมีเทคนิคทุกคนที่ให้กำลังใจ ช่วยเหลือและให้คำแนะนำด้วยดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณดีทั้งหมดของงานวิจัยนี้ให้แก่ทุกท่านที่กล่าวมาแล้วข้างต้น และที่ยังไม่ได้เอ่ยนามมา ณ โอกาสนี้ด้วย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 พลังงานจากชีวมวล.....	5
2.2 แร่ธาตุ.....	12
2.3 หลักการแปรรูปชีวมวล.....	13
2.4 กระบวนการแกซีฟิเคชัน.....	14
2.5 ระบบการผลิตเชื้อเพลิงแก๊ส.....	20
2.6 ประเภทของเตาเผาผลิตเชื้อเพลิงแก๊ส.....	21
2.7 การทำความสะอาดแก๊ส.....	24
2.8 ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี.....	32
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33

บทที่	หน้า
3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	39
3.1 สารตั้งต้นและสารเคมี.....	39
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	39
3.3 วิธีการทดลอง.....	42
4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	46
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของซีวมวล.....	48
4.2 สมบัติของวัสดุเบตก่อนใช้.....	50
4.3 การปลดปล่อยตัวของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทภายใต้การไพโรไลซิสของฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์.....	50
4.4 พฤติกรรมการดูดซับของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในวัสดุภาคไอด้วยเทคนิคการดูดซับด้วยวัสดุเบต.....	54
4.5 พฤติกรรมเร่งปฏิกิริยาซีพอร์มน้ำมันทอดด้วยไอน้ำของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่ดูดซับด้วยวัสดุเบต.....	63
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	84
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	84
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	86
รายการอ้างอิง.....	87
ภาคผนวก.....	
ภาคผนวก ก.....	92
ภาคผนวก ข.....	95
ภาคผนวก ค.....	98
ภาคผนวก ง.....	101
ภาคผนวก จ.....	104
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	112

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	ส่วนประกอบลิกโนเซลลูโลสของพืชพลังงาน (dry basis).....	8
2.2	ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย.....	11
2.3	องค์ประกอบทางเคมีของทาร์.....	16
2.4	สิ่งเจือปนในแก๊ส ปัญหาและกระบวนการทำแก๊สให้สะอาด.....	25
3.1	สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (gas chromatography).....	42
4.1	สัญลักษณ์ของชีวมวลและวัสดุเบดก่อนและหลังการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลไนต์จากฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ที่ดำเนินการในภาวะต่างกัน.....	47
4.2	ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของฟางข้าว, ไม้กระถินยักษ์ และเซลลูโลส.....	48
4.3	ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของฟางข้าว, ไม้กระถินยักษ์ และเซลลูโลส.....	49
4.4	ผลการวิเคราะห์โลหะแอลคาไลและแอลคาไลไนต์ (AAEM analysis) ของฟางข้าว, ไม้กระถินยักษ์ แลเซลลูโลส.....	49
4.5	ผลการวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวของวัสดุเบดก่อนใช้ ด้วยเทคนิค BET.....	50
4.6	อุณหภูมิจุดหลอมเหลวและจุดเดือดของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลไนต์ในรูปธาตุอิสระ, สารประกอบเกลืออะซิเตตและคลอไรด์.....	53
4.7	ปริมาณโลหะแอลคาไลและแอลคาไลไนต์ที่ปลดปล่อยออกมาจากการไพโรไลซิสฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส.....	53
4.8	การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ของการเกิดสารประกอบซิลิเกต.....	54
4.9	แสดงผลของการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลไนต์ด้วยวัสดุเบดต่อปริมาณพื้นที่ผิวของวัสดุเบด.....	57
4.10	ผลของจำนวนครั้งในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลไนต์ต่อปริมาณพื้นที่ผิวของวัสดุเบด.....	59

ตาราง	หน้า
ง 1 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวมาตรฐาน (Standard).....	101
ง 2 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวอย่าง.....	101
จ 1 ข้อมูลการทดลองของร้อยละการปลดปล่อยตัวของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทภายใต้การไพโรไลซิสของฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์.....	104
จ 2 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในวัฏภาคไอจากชีวมวลด้วยวัสดุเบด.....	105
จ 3 ข้อมูลการทดลองของอัตราการไหลของแก๊สตัวพาในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในวัฏภาคไอจากชีวมวลด้วยวัสดุเบด ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 800 องศาเซลเซียส.....	105
จ 4 ข้อมูลการทดลองของผลจำนวนครั้งในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในวัฏภาคไอจากชีวมวลด้วยวัสดุเบด ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 800 องศาเซลเซียส.....	106
จ 5 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาอีพอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำของวัสดุเบดก่อนและหลังดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 800 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊สตัวพา 120 มิลลิลิตรต่อนาที.....	107
จ 6 ข้อมูลการทดลองของผลอัตราการไหลของแก๊สตัวพาในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทต่อการทำปฏิกิริยาอีพอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 800 องศาเซลเซียส.....	110
จ 7 ข้อมูลการทดลองของจำนวนครั้งในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทต่อการทำปฏิกิริยาอีพอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 800 องศาเซลเซียส.....	111

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
2.1 แนวทางการใช้พลังงานชีวมวล.....	5
2.2 โครงสร้างของเซลล์โลส.....	6
2.3 โครงสร้างของลิกนิน.....	7
2.4 องค์ประกอบของชีวมวล (biomass composition)	10
2.5 ขั้นตอนของกระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชัน.....	14
2.6 โชนกการเกิดแก๊สตามปฏิกิริยาทางเคมีและความแตกต่างของอุณหภูมิภายในเตา...	19
2.7 เตาผลิตแก๊สแบบต่าง ๆ.....	24
2.8 ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับลดปริมาณทาร์.....	27
2.9 ลักษณะโครงสร้างของซิลิกา	29
2.10 การคายน้ำออกเมื่อนำอะลูมินาไปอบแห้ง.....	31
2.11 ตำแหน่งกรดและเบสลิวอิสบนผิวของอะลูมินา.....	31
3.1 เครื่องปฏิกรณ์ drop tube/ fixed bed แบบสองขั้นตอน.....	40
3.2 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ drop tube/ fixed bed แบบสองขั้นตอน.....	41
3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (gas chromatography).....	42
3.4 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ และการทดสอบต่างๆ.....	45
4.1 ผลของการปลดปล่อยตัวของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจาก (ก) ฟางข้าว และ (ข) ไม้กระถินยักษ์ภายใต้การไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส.....	52
4.2 แสดงผลของอุณหภูมิในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในภูมิภาคไอบาก (ก) ฟางข้าวด้วยอะลูมินา (ข) ไม้กระถินยักษ์ด้วยอะลูมินา (ค) ฟางข้าวด้วยซิลิกา และ (ง) ไม้กระถินยักษ์ด้วยซิลิกา ต่อปริมาณโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่เกาะบนเบด ที่อุณหภูมิ 600-800 องศาเซลเซียส ไอน้ำร้อยละ 60 โดยปริมาตร อัตราการไหลของแก๊สตัวพา 120 มิลลิลิตรต่อนาที.....	55

ภาพ	หน้า
4.3 ผลของการเพิ่มจำนวนครั้งในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในวัฏภาคไอจาก (ก) ฟางข้าวด้วยอะลูมินา และ (ข) ไม้กระถินยักษ์ด้วยอะลูมินา ต่อปริมาณโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่เกาะบนเบด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ใอน้ำร้อยละ 60 โดยปริมาตร อัตราการไหลของแก๊สตัวพา 120 มิลลิลิตร ต่อนาที.....	58
4.4 ผลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพาในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในวัฏภาคไอจาก (ก) ฟางข้าวด้วยอะลูมินา และ (ข) ไม้กระถินยักษ์ด้วยอะลูมินา ต่อปริมาณโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่เกาะบนเบด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ใอน้ำร้อยละ 60 โดยปริมาตร ในการดูดซับ 1 ครั้ง.....	61
4.5 ผลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพาในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในวัฏภาคไอจาก (ก) ฟางข้าวด้วยอะลูมินา และ (ข) ไม้กระถินยักษ์ด้วยอะลูมินา ต่อปริมาณโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่เกาะบนเบด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ใอน้ำร้อยละ 60 โดยปริมาตร ในการดูดซับ 3 ครั้ง.....	62
4.6 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวที่ดูดซับบนอะลูมินาต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 600-800 องศาเซลเซียส.....	63
4.7 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวที่ดูดซับบนอะลูมินาต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 600-800 องศาเซลเซียส.....	65
4.8 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากไม้กระถินยักษ์ที่ดูดซับบนอะลูมินาต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 600-800 องศาเซลเซียส.....	67
4.9 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากไม้กระถินยักษ์ที่ดูดซับบนอะลูมินาต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 600-800 องศาเซลเซียส.....	69

ภาพ	หน้า
4.10 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวที่ดูดซับบนซิลิกาต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 600-800 องศาเซลเซียส.....	70
4.11 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากไม้กระถินยักษ์ที่ดูดซับบนซิลิกาต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 600-800 องศาเซลเซียส.....	72
4.12 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวที่ดูดซับบนซิลิกาต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 600-800 องศาเซลเซียส.....	74
4.13 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากไม้กระถินยักษ์ที่ดูดซับบนซิลิกาต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 600-800 องศาเซลเซียส.....	75
4.14 ผลของจำนวนครั้งในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ด้วยอะลูมินาต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ ในปฏิกิริยารีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 800 องศาเซลเซียส....	77
4.15 ผลของจำนวนครั้งในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ด้วยอะลูมินาต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส ในปฏิกิริยารีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 800 องศาเซลเซียส.....	79
4.16 ผลของอัตราการไหลของแก๊สดั่วพาในการดูดซับ 1 ครั้ง ของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ด้วยอะลูมินาต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในปฏิกิริยารีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 800 องศาเซลเซียส.....	80
4.17 ผลของอัตราการไหลของแก๊สดั่วพาในการดูดซับ 1 ครั้ง ของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ด้วยอะลูมินาต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส ในปฏิกิริยารีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 800 องศาเซลเซียส.....	81

ภาพ	หน้า
4.18 ผลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพาในการดูดซับ 3 ครั้ง ของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ด้วยอะลูมินาต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในปฏิริยารีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิทำปฏิริยารี 800 องศาเซลเซียส.....	82
4.19 ผลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพาในการดูดซับ 3 ครั้ง ของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ด้วยอะลูมินาต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส ในปฏิริยารีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิทำปฏิริยารี 800 องศาเซลเซียส.....	83

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีพื้นฐานทางเกษตรกรรมมีผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรอยู่มากมาย โดยที่ผลผลิตหลักและเศรษฐกิจหรือของเหลือจากทั้ง 2 ภาคเศรษฐกิจสามารถนำมาใช้ประโยชน์หรือแปรรูปให้เป็นพลังงานหรือเชื้อเพลิงเพื่อทดแทนการใช้พลังงานจากฟอสซิล ซึ่งส่วนใหญ่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศและจะหมดไปจากโลกในอนาคต ในขณะที่พลังงานชีวมวลถือได้ว่าเป็นพลังงานทดแทนชนิดหนึ่ง เนื่องจากการปลูกพืชทดแทนจะมีต่อเนื่องตลอดไปในอนาคตถ้าหากเรามีการจัดการในภาคเกษตรกรรมที่ดี ข้อดีต่อสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ คือ การใช้ชีวมวลในการผลิตความร้อนหรือไฟฟ้าจะไม่เพิ่มปริมาณสุทธิของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลก ในกรณีที่เรามีการผลิตชีวมวลขึ้นมาเพื่อทดแทนชีวมวลที่ได้ใช้ไป เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกหมุนเวียนมาใช้ในชีวมวลที่ผลิตใหม่เท่ากับปริมาณก๊าซที่ถูกผลิตจากการเผาไหม้ชีวมวลนั้นๆ เนื่องจากพืชต้องหายใจเพื่อเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปใช้ในการเจริญเติบโต อีกทั้งชีวมวลยังมีปริมาณกำมะถันต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลมาก นั้นหมายถึง การใช้ชีวมวลจะลดโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect)

กระบวนการที่เปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งในอยู่ในสภาพแก๊สสังเคราะห์ เป็นวิธีการหนึ่งซึ่งได้มีการศึกษาทางด้านทฤษฎีกันอย่างกว้างขวาง และมีการนำมาใช้ในการผลิตแก๊สได้ในระดับหนึ่ง กระบวนการนี้เรียกว่า “แกซิฟิเคชัน” (Gasification) แก๊สสังเคราะห์จะเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในที่มีออกซิเจนจำกัด มีกลไกการทำงานไม่ยุ่งยาก โดยการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาทางเคมีภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศอุณหภูมิอยู่ในช่วงประมาณ 700-1200 องศาเซลเซียส แก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น การนำไปเผาไหม้สร้างความร้อนโดยตรงในหม้อไอน้ำ การใช้เป็นก๊าซเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ เครื่องจักรกังหันก๊าซ การใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า หรือการใช้เป็นสารตั้งต้นในการเพิ่มคุณภาพให้เป็นสารเคมีหรือน้ำมันเชื้อเพลิงสังเคราะห์สำหรับการขนส่ง อย่างไรก็ตามกระบวนการแกซิฟิเคชันของชีวมวลเป็นผลในการผลิตของน้ำมันคาร์, แกล และโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท (Alkali and alkaline earth metals : AAEMs) ในปริมาณมากกว่าเมื่อเทียบกับถ่านหิน นอกเหนือจากแก๊สและ

ถ่านชาร์ น้ำมันทาร์ประกอบด้วยสารประกอบอินทรีย์ที่ซับซ้อนหลายชนิด ระเหยตัวเป็นไอที่อุณหภูมิในการเกิดแกซีฟิเคชันและควบแน่นได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นสาเหตุของปัญหาต่างๆ เช่น การอุดตันของท่อ หรือ ลดประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานของกระบวนการแกซีฟิเคชัน ถึงแม้ว่า AAEMs ที่คงอยู่ในถ่านชาร์อาจทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของถ่านชาร์และการรีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำได้ แต่เนื่องจากภาวะทำปฏิกิริยาแกซีฟิเคชันสนับสนุนให้ AAEMs ที่คงอยู่ในถ่านชาร์ถูกปลดปล่อยตัวได้อย่างมาก เป็นผลให้สูญเสียตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งยังก่อให้เกิดปัญหาในระบบ เช่น เป็นผลทำให้เกิดสแลก (Slagging), ตะกรัน (Fouling) และการกัดกร่อน เป็นต้น วิธีสำหรับการกำจัด AAEMs มีอยู่ 2 วิธี คือวิธีการชะละลาย (Leaching) ของสารตั้งต้น อย่างไรก็ตามวิธีนี้อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับโครงสร้างของชีวมวล วิธีที่สองคือการดูดซับ (Adsorption) วิธีการนี้เป็นการใช้วัสดุเบดเพื่อให้เกิดการดูดซับของ AAEMs และเป็นแนวทางในการนำ AAEMs ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ใหม่ โดยให้ถูกดูดซับอยู่บนวัสดุเบดระหว่างในกระบวนการแกซีฟิเคชันของชีวมวลและเกิดการเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มน้ำมันทาร์ไปพร้อมกัน

โครงการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการกำจัดไอระเหยของ AAEMs ด้วยเทคนิคการดูดซับด้วยวัสดุเบดที่มีความแข็งแรงและเหมาะสมกับการนำไปใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์เบด พร้อมทั้งศึกษาผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของ AAEMs ที่ถูกดูดซับบนวัสดุเบดในการรีฟอร์มด้วยไอน้ำของน้ำมันทาร์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาการดูดซับไอระเหยของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทด้วยวัสดุเบด
- 1.2.2 ศึกษาผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่ดูดซับบนวัสดุเบดในการรีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษารวบรวมข้อมูลและบทความวิจัยล่าสุดที่เกี่ยวข้อง
- 1.3.2 วิเคราะห์หาสมบัติต่างๆ ของชีวมวล

- 1.3.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการปล่อยของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในภาวะของไพโรไลซิส ในเครื่องปฏิกรณ์ปฏิกรณ์แบบ drop-tube/ fixed bed
- 1.3.4 ศึกษาการดูดซับของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทด้วยวัสดุเบดในเครื่องปฏิกรณ์แบบ drop-tube/ fixed bed
- 1.3.5 ศึกษาการเร่งปฏิกิริยาการรีฟอร์มด้วยไอน้ำของน้ำมันทาร์ด้วยวัสดุเบดที่ดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับผลการใช้วัสดุเบดที่ไม่ได้ผ่านการดูดซับ
- 1.3.6 วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph)

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของชีวมวล
 - การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Proximate analysis) ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และ ปริมาณเถ้า
 - การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (Ultimate Analysis) ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน และ ไนโตรเจน
 - การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท ด้วยเทคนิค Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES)
- 1.4.3 เตรียมวัสดุเบดที่ใช้สำหรับการดูดซับ พร้อมทั้งวิเคราะห์สมบัติต่างๆ โดยนำวัสดุเบดไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ให้เย็นในตู้ดูดความชื้น
- 1.4.4 ทดลองไพโรไลซิสของชีวมวลด้วยเครื่องปฏิกรณ์ drop tube/ fixed bed แบบหนึ่งขั้นตอน ที่อุณหภูมิ 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส
- 1.4.5 วิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนในถ่านชาร์ที่เหลืออยู่หลังปฏิกิริยาด้วยเทคนิค CHN
- 1.4.6 ทดลองไพโรไลซิสและรีฟอร์มด้วยไอน้ำในเครื่องปฏิกรณ์ drop-tube/ fixed bed แบบสองขั้นตอน โดยเกิดไพโรไลซิสของชีวมวลในขั้นตอนที่ 1 และทำการรีฟอร์มด้วยไอน้ำของสารระเหยในขั้นตอนที่ 2 ซึ่งบรรจุวัสดุเบดที่มีโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทดูดซับอยู่ หรือวัสดุเบดที่ไม่ผ่านการดูดซับ

- 1.4.7 วิเคราะห์โลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่คงอยู่ในถ่านซาร์และที่ดูดซับบนวัสดุเบดด้วยเทคนิค Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES)
- 1.4.8 วิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph)
- 1.4.9 วิเคราะห์ สรูปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

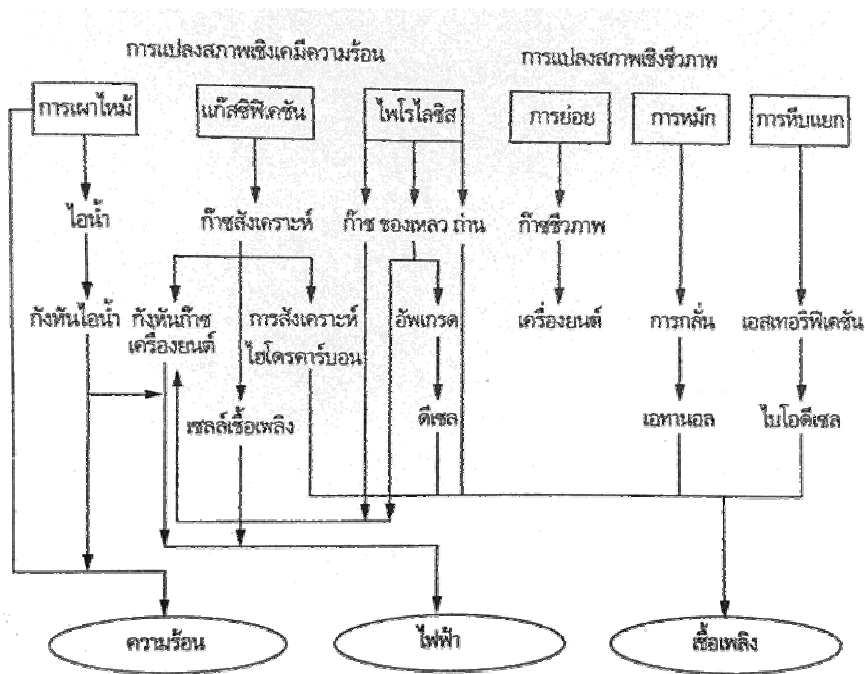
ได้ฐานความรู้ใหม่เกี่ยวกับการเร่งปฏิกิริยาของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่ดูดซับบนวัสดุเบดในการรีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำ

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 พลังงานจากชีวมวล

ชีวมวล ถือเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่กักเก็บพลังงานจากดวงอาทิตย์ซึ่งมาจากการสังเคราะห์ด้วยแสงและเกิดขึ้นหมุนเวียนซ้ำแล้วซ้ำอีกได้ในธรรมชาติ สามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานเพื่อใช้ทดแทนพลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานฟอสซิลซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงได้ ข้อดีต่อสิ่งแวดล้อมที่สำคัญคือ การใช้ชีวมวลในการผลิตความร้อนหรือพลังงานในรูปแบบต่างๆ จะไม่เป็นการเพิ่มปริมาณสุทธิของคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลก ในกรณีที่เรามีการผลิตชีวมวลขึ้นมาทดแทนชีวมวลที่ใช้ไป อีกทั้งชีวมวลยังมีปริมาณกำมะถันต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลมาก นั้นหมายความว่า การใช้ชีวมวลจะช่วยลดโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกได้ทางหนึ่งด้วย อีกทั้งปัจจุบันก็เป็นแหล่งพลังงานสำคัญในลำดับต้นๆ ของประเทศเกษตรกรรมและประเทศกำลังพัฒนาทั้งหลาย โดยในภาพที่ 2.1 แสดงถึงแนวทางการใช้ชีวมวล

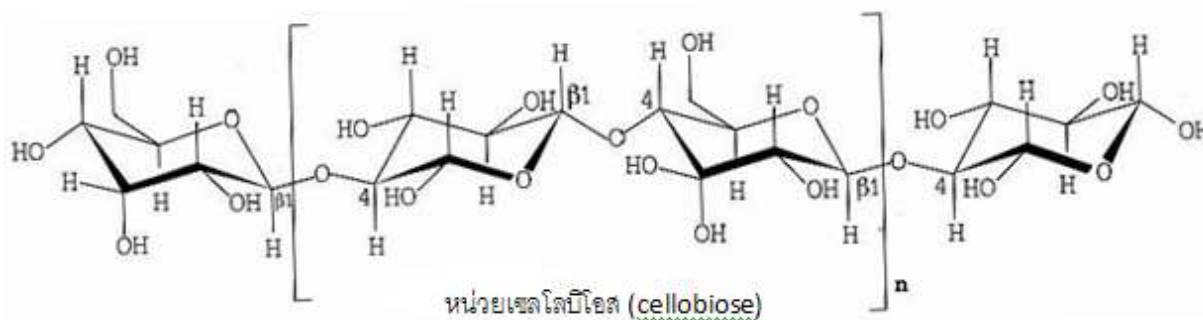


ภาพที่ 2.1 แนวทางการใช้พลังงานชีวมวล (นคร ทิพยาวงศ์, 2552)

ชีวมวล คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ ประกอบด้วยธาตุหลักๆ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน รวมทั้งไนโตรเจนและธาตุอื่นๆอีกเล็กน้อย โดยชีวมวลอาจจะเรียกว่าเป็นเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น แกลบ ชานอ้อย เศษไม้ กากปาล์ม กากมันสำปะหลัง ชังข้าวโพด กาบและกะลามะพร้าว เป็นต้น นอกจากนี้ยังรวมถึงพืชในกลุ่มของไม้โตเร็วที่ปลูกเพื่อใช้เป็นแหล่งผลิตพลังงานโดยตรง เช่น กระจินยักษ์ กระจินณรงค์ กระจินเทพา กระจินลูกผสม และยูคาลิปตัส เป็นต้น

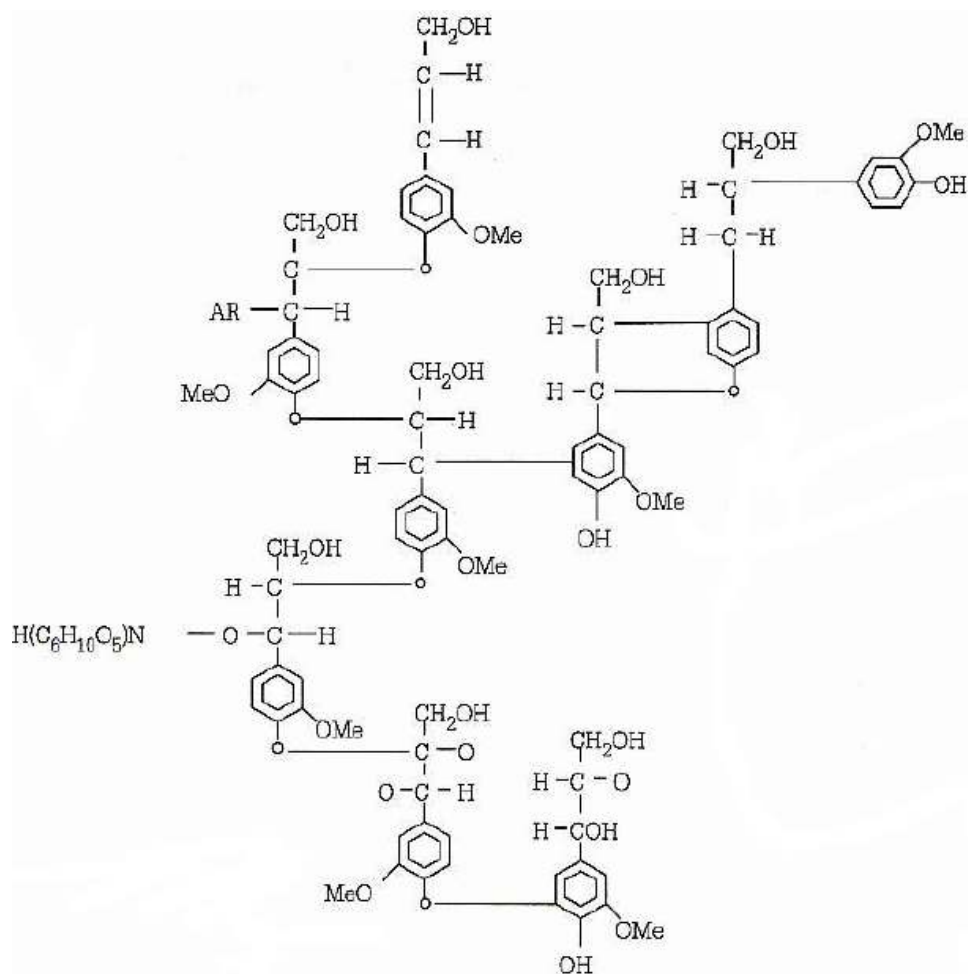
2.1.1 ส่วนประกอบโดยรวม

ชีวมวลประกอบด้วยเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) และสารสกัดบางจำพวก (Extractives) ซึ่งสร้างขึ้นจากกลุ่มโมเลกุลขนาดใหญ่ เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสรวมกลุ่มกัน เรียกว่า โฮโลเซลลูโลส (Holocellulose) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของผนังเซลล์ของเส้นใยไม้ เซลลูโลสเกิดจากหน่วยของเซลโลบิโอสหลายหน่วยต่อกันเข้าไปซ้ำมา ดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของเซลลูโลส (นคร ทิพยาวงศ์, 2552)

ขณะที่เฮมิเซลลูโลสเกิดจากการผสมผสานกันของหน่วยต่างๆ ของเฮกโซสและเพนโตสซึ่งมีระดับพอลิเมอร์เชชันอยู่ระหว่าง 15-14,000 ส่วนลิกนินนั้นเกิดจากการต่อข้ามเชื่อมกันของกลุ่มพอลิเมอร์สามมิติซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานดังแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของลิกนิน (นคร ทิพย์วงศ์, 2552)

เป็นที่น่าสนใจว่าสารประกอบไฮโดรเซลลูโลสที่เป็นกลุ่มอะลิฟาติกที่มีอะตอมออกซิเจนร่วมจะพบเป็นส่วนใหญ่ในมวลเนื้อไม้ แต่ไม่พบสารประกอบอะโรมาติกเลย ไฮโดรเซลลูโลสเหล่านี้มีกลุ่มฟังก์ชันนัล (Functional group) สำคัญ คือ ไฮดรอกซิล (-OH) และเมทานอล (-CH₂OH) แต่ในลิกนิน กลับพบกลุ่มของวงแหวนเบนซีนอยู่ โดยสารประกอบอะโรมาติกเหล่านี้พบว่าเกิดเป็นหน่วยเดี่ยวไม่ได้รวมกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่เหมือนกับในเชื้อเพลิงฟอสซิล กลุ่มฟังก์ชันนัลหลักในลิกนิน คือ เมทอกซี (-OCH₃) โดยมีกลุ่มไฮดรอกซิลและเมทานอลอยู่บ้างเล็กน้อย ลิกนินนั้นค่อนข้างจะเป็นสารที่มีขี้และเป็นสารอะโรมาติกโดยธรรมชาติ สำหรับส่วนที่เป็นสารสกัด จะมีโครงสร้างของอะลิฟาติกและอะโรมาติกที่มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับธาตุอื่นๆ เช่น ไนโตรเจน

เศษวัสดุการเกษตร จะมีส่วนประกอบแตกต่างจากไม้ วัสดุเหล่านี้มีไฮโดรเจนและคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ และมีลิกนินน้อยหรือไม่มีเลย และมีส่วนที่เป็นโปรตีนสูง ส่วนจำพวกกลุ่มอะโรมาติกในเศษวัสดุการเกษตรที่ไม่ใช่ไม้มีปริมาณน้อยกว่าในไม้ โดยส่วนประกอบในตัวอย่างของพืชพลังงาน แสดงตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบลิกนินเซลลูโลสของพืชพลังงาน (dry basis) (นคร ทิพย์าวงศ์, 2552)

	เซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)	อื่นๆ (%)
ฟางข้าว	38	36	16	10
ซังข้าวโพด	32	44	13	11
ชานอ้อย	35	25	20	20
ไม้โตเร็ว	50	23	22	5
กระต๊าก	76	13	11	0
ไม้ไผ่	41	26	27	7

2.1.2 ค่าความร้อน

ค่าความร้อน (heating value) คือ พลังงานความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักที่ถูกปล่อยออกมา จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีจุดเริ่มอยู่ที่อุณหภูมิอ้างอิง ค่าความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำ ขึ้นอยู่กับสถานะของน้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ โดยค่าความร้อนต่ำ คือ ค่าความร้อนที่ให้ออกมาหลังการเผาไหม้สมบูรณ์ เมื่อน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงและที่เกิดจากผลผลิตการเผาไหม้อยู่ในสถานะไอ ส่วนค่าความร้อนสูง คือ ค่าความร้อนที่ให้ออกมาหลังการเผาไหม้สมบูรณ์ เมื่อน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงและที่เกิดจากผลผลิตการเผาไหม้อยู่ในสถานะของเหลว โดยค่าความร้อนสูงมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนต่ำดังนี้

$$\text{HHV (MJ/kg)} = \text{LHV (MJ/kg)} + 0.02395(9H + \text{MC}_i)$$

ในการหาค่าความร้อนมักจะหาจากการทดลองโดยใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ค่าความร้อนของชีวมวลขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงในรูปของสัดส่วนคาร์บอน

(C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และกำมะถัน (S) หรือในรูปของสัดส่วนคาร์บอน คงดัว (FC) สารระเหย (VM) ความชื้น (MC_i) และเศษเถ้า หรือได้จากการใช้สูตรอย่างง่ายคำนวณ เช่น สูตรของดulong (Dulong formula) และ สูตรของเดเมียบาส (Demirbas, 1997) ดังสมการต่อไปนี้

สูตรของดulong (Dulong formula) (Perry and Chilton, 1973)

$$\text{HHV (MJ/kg)} = 33.585\text{C} + 141.924\text{H} + 12.908\text{S} - 15.327\text{O} - 3.538\text{O}^2$$

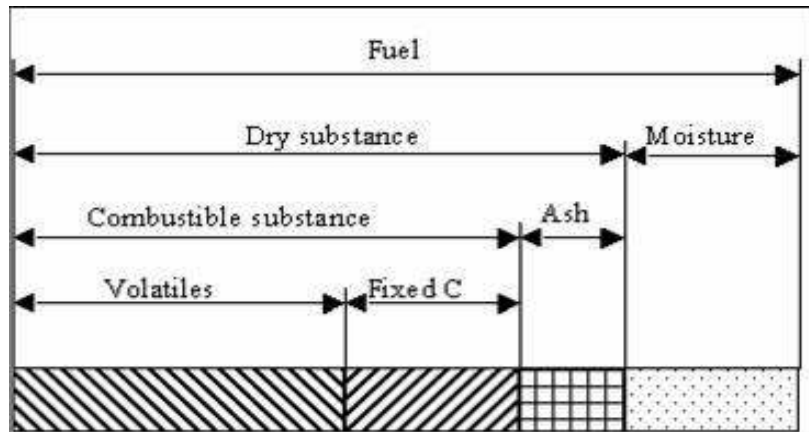
สูตรของเดเมียบาส (Demirbas, 1997)

$$\text{HHV (MJ/kg)} = 33.5\text{C} + 142.3\text{H} - 15.4\text{O} - 24.5\text{N}$$

$$\text{HHV (MJ/kg)} = 31.2\text{FC} + 15.34\text{VM}$$

2.1.3 การวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุ

ในการแสดงคุณลักษณะเชื้อเพลิงแข็งมักจะใช้การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และแบบแยกธาตุ (ultimate analysis) การวิเคราะห์แบบประมาณจะระบุ ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงดัว และปริมาณเศษเถ้า ตามสภาพของ เชื้อเพลิงดังแสดงในภาพที่ 2.4 ส่วนการวิเคราะห์แบบแยกธาตุจะระบุถึงปริมาณธาตุต่างๆ ใน เชื้อเพลิง ซึ่งปกติจะเป็นคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน



ภาพที่ 2.4 องค์ประกอบของชีวมวล (biomass composition) (นคร ทิพย์าวงศ์, 2552)

2.1.3.1 ความชื้น (moisture) หมายถึง ปริมาณน้ำที่สะสมอยู่ในชีวมวล โดยส่วนใหญ่แล้วชีวมวลมักมีความชื้นค่อนข้างสูง เพราะเป็นผลผลิตทางการเกษตร ถ้าต้องการแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงานโดยการเผาไหม้ ชีวมวลควรมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 50

2.1.3.2 ส่วนที่เผาไหม้ได้ (combustible substance) จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ สารระเหย (volatiles matter) และคาร์บอนคงที่ (fixed carbon) โดยสารระเหย คือ ส่วนที่เผาไหม้ง่าย สลายตัวเมื่อได้รับความร้อนในที่ที่ไม่มีอากาศ ดังนั้นชีวมวลที่มีค่าสารระเหยสูงแสดงว่าติดไฟได้ง่าย ส่วนคาร์บอนคงที่นั้น เป็นคาร์บอนที่อยู่ในรูปของแข็ง

2.1.3.3 ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ หรือขี้เถ้า (ash) เมื่อชีวมวลถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์แล้วจะมีเนื้อสารบางส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้นั้น คือขี้เถ้า โดยชีวมวลแต่ละประเภทนั้นจะมีสัดส่วนของปริมาณขี้เถ้าในชีวมวลแตกต่างกัน

2.1.4 ศักยภาพของพลังงานชีวมวลในประเทศไทย

ปัจจุบันประเทศไทยมีบทบาททางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตรมากขึ้น โดยเฉพาะการแปรรูปวัตถุดิบจากพืชผลทางการเกษตร จึงก่อให้เกิดเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจำนวนมาก จากข้อมูลทางสถิติของสำนักงานสถิติแห่งชาติ ได้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของชีวมวลภายในประเทศ สํารวจเมื่อปี พ.ศ.2546 พบว่า สัดส่วนของชีวมวลที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ผลิตพลังงานนั้นมีมากกว่าร้อยละ 50 ของปริมาณชีวมวลที่ผลิตได้ แสดงดังตารางที่ 2.2 โดยส่วนเหลือจากอ้อย เช่น ชานอ้อยหรือยอดและใบอ้อย แกลบและฟางข้าว และส่วนเหลือของปาล์มน้ำมัน เช่น กะลา ทะลาย หรือเส้นใยปาล์ม จัดเป็นกลุ่มชีวมวลที่มีสัดส่วนสูงสุด คิดเป็น 85% ของศักยภาพชีวมวลทั้งหมดของประเทศ ปัจจุบันในประเทศไทยมีผู้ผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลแล้วไม่ต่ำกว่า 20 ราย ซึ่งจะพบในภาคอุตสาหกรรมประเภทที่ใช้กากอ้อยและแกลบเป็นเชื้อเพลิงหลัก (วงศต วงศ์ภักย์, 2547)

ตารางที่ 2.2 ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย สํารวจเมื่อปี พ.ศ. 2546

ผลผลิตทางการเกษตร	ปริมาณผลผลิต (พันตันต่อปี)	ประเภทชีวมวล	ปริมาณชีวมวล (พันตันต่อปี)	เปอร์เซ็นต์ที่เหลือเพื่อผลิตพลังงาน	ค่าความร้อน (MJ/kg)	คิดเป็นค่าพลังงาน (PJต่อปี)
ข้าว	26,057	ฟางข้าว	11,647	70	14.27	83.5
		แกลบ	5,993	50	10.24	42.8
อ้อย	74,258	ต้นและใบ	22,426	98	17.39	382.2
		ชาน	21,610	20	14.4	62.2
ปาล์มน้ำมัน	4,605	ทะลาย	1,971	60	17.86	21.1
		เส้นใย	677	13	17.62	1.2
		กะลา	226	4	18.46	0.3
ข้าวโพด	4,230	ชัง	1,155	65	18.04	13.5
มันสำปะหลัง	16,868	ต้น	1,484	40	18.42	11.1
มะพร้าว	1,418	เปลือก	148	60	16.23	5.0
		กะลา	94	40	17.93	1.5

ที่มา : สำนักงานสถิติแห่งชาติ สถิติผลผลิตทางการเกษตร ปี พ.ศ. 2546

2.2 แร่ธาตุ (จุฬารักษ์ สิงห์สุธำ, 2550)

แร่ธาตุเป็นอาหารที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งปริมาณแร่ธาตุที่อยู่ในพืชแต่ละชนิดจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล แร่ธาตุมีความสำคัญต่อพืช ดังนี้

1. แร่ธาตุนั้นต้องจำเป็นต่อการเจริญเติบโตและการขยายพันธุ์พืช ถ้าขาดไปจะทำให้พืชเจริญไม่ครบวงจรชีวิต
2. พืชต้องการธาตุนั้นในลักษณะเฉพาะเจาะจง ไม่มีธาตุอื่นทำหน้าที่แทนได้
3. แร่ธาตุนั้นมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชโดยตรง กล่าวคือ จะต้องทำหน้าที่เฉพาะอย่างใดอย่างหนึ่งในขบวนการเมตาบอลิซึมในพืช

จากหลักการดังกล่าวข้างต้น จะมีธาตุที่จำเป็น (essential elements) สำหรับพืช 16 ธาตุ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โบแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม กำมะถัน เหล็ก ทองแดง สังกะสี โบรอน แมงกานีส โมลิบดีนัม และคลอรีน แต่ในปัจจุบันนี้ได้รับการยอมรับว่าธาตุบางชนิดมีความจำเป็นต่อพืชบางชนิดเช่น ซิลิคอน มีความจำเป็นต่อข้าวหรือโคบอลท์ มีความจำเป็นต่อพืชตระกูลถั่ว เป็นต้น จากธาตุ 16 ธาตุนี้ C, H และ O เป็นธาตุที่พืชได้จากอากาศและน้ำ และอีก 13 ธาตุพืชจะได้จากดินโดยตรง ซึ่งแบ่งธาตุเหล่านี้ได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

- ธาตุปริมาณมาก ธาตุเหล่านี้พืชต้องการในปริมาณที่สูง มี 6 ธาตุ คือ N, P, K, Ca, Mg และ S ซึ่งธาตุทั้ง 6 นี้ ธาตุ N, P, K พืชต้องการในปริมาณมากและในดินส่วนใหญ่จะมีธาตุเหล่านี้ไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช ดังนั้นจึงเรียกธาตุทั้ง 3 นี้ว่า ธาตุอาหารหลัก ส่วนธาตุ Ca, Mg และ S มักจะมีในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการของพืช จึงเรียกว่า ธาตุอาหารรอง
- ธาตุปริมาณน้อย ได้แก่ ธาตุ 7 ธาตุ คือ Fe, Cu, Zn, B, Mn, Mo และ Cl ธาตุเหล่านี้พืชต้องการในปริมาณน้อยแต่ก็ขาดไม่ได้ ในดินทั่วไปจะพบธาตุเหล่านี้ในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการของพืช และพืชทั่วไปมักจะไม่แสดงอาการขาด แต่ดินบางชนิดจะมีธาตุพวกนี้อยู่มากซึ่งอาจเป็นพิษต่อพืชได้

2.3 หลักการแปรรูปชีวมวล (สุภชิตา เกริกไกรวัล, 2551)

เทคโนโลยีที่ใช้ในการแปรรูปชีวมวล สามารถจำแนกได้ 2 เทคโนโลยี คือ กระบวนการทางชีวเคมี (Biochemical process) และ กระบวนการทางความร้อนเคมี (Thermochemical process) โดยกระบวนการทางเคมีความร้อนนี้ สามารถจำแนกออกเป็นกระบวนการย่อยได้อีก 3 กระบวนการ คือ กระบวนการเผาไหม้ (combustion) กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) และ กระบวนการแกซิฟิเคชัน (gasification) ทั้งนี้ลักษณะความแตกต่างของแต่ละกระบวนการจะขึ้นอยู่กับสถานะที่ใช้ในการดำเนินการและวัตถุประสงค์ในการนำผลิตภัณฑ์ไปหลักไปใช้งาน

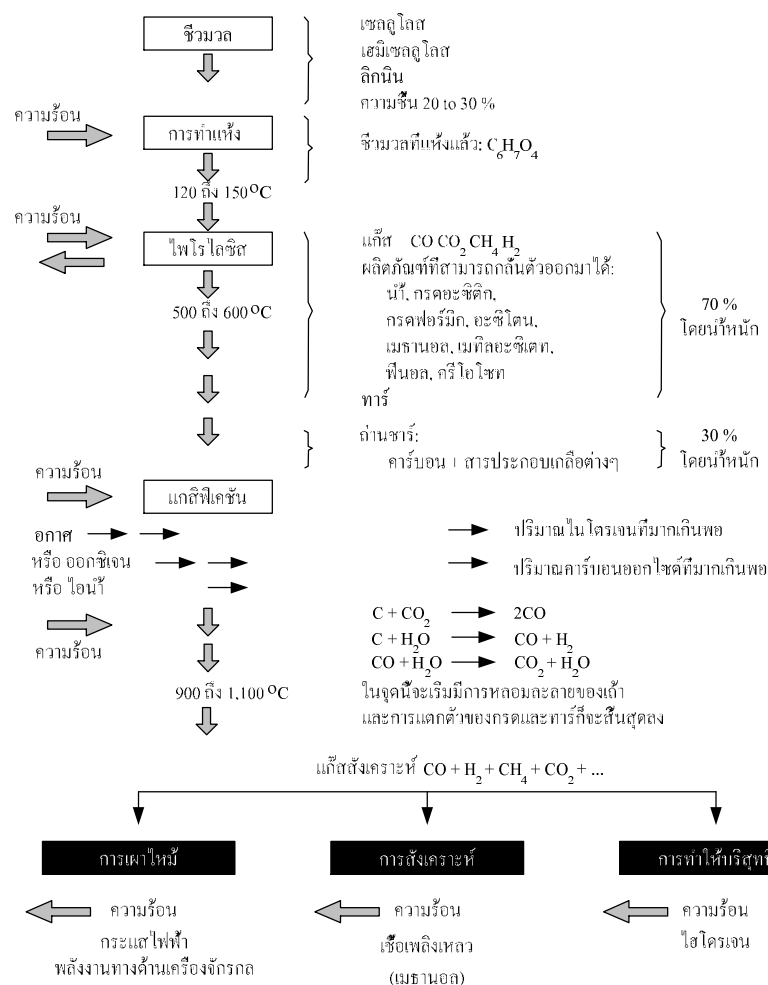
กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมี ถือเป็นกระบวนการที่ใช้ภาวะดำเนินงานที่รุนแรงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการทางเคมีความร้อน แต่วิธีการนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลค่อนข้างมาก จึงทำให้กระบวนการทางเคมีความร้อนมีความน่าสนใจมากกว่าทั้งในแง่ของปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่หลากหลายกว่ากระบวนการทางชีวเคมี โดยที่กระบวนการไพโรไลซิสและกระบวนการแกซิฟิเคชันนั้นมีความน่าสนใจมากกว่ากระบวนการเผาไหม้ เนื่องจากมีข้อได้เปรียบหลายประการ เช่น กระบวนการเผาไหม้จำเป็นต้องติดตั้งระบบปรับปรุงคุณภาพแก๊สจากกระบวนการเผาก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ อีกทั้งยังให้พลังงานความร้อนเพียงอย่างเดียว

ขั้นตอนของกระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชันแสดงดังภาพที่ 2.5 โดยเริ่มจากการนำชีวมวลเข้ากระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิประมาณ 120 – 150 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นชีวมวลจะได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 500 – 600 องศาเซลเซียส เพื่อทำลายพันธะทางเคมีของโมเลกุลซึ่งเป็นขั้นตอนของกระบวนการไพโรไลซิส ได้เป็นผลิตภัณฑ์จำพวกแก๊ส ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และไฮโดรเจน ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่สามารถกลั่นตัวได้ เช่น น้ำ กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก อะซิโตน เมธานอล เมทิลอะซิเตท ฟีนอล เป็นต้น รวมทั้งพวกทาร์และซาร์ หลังจากนั้นเมื่อมีการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิประมาณ 900 – 1,100 องศาเซลเซียส ประกอบกับมีการเติมตัวออกซิไดส์ให้แก่ระบบจะทำให้ทาร์และถ่านซาร์เกิดการแตกตัวได้เป็นผลิตภัณฑ์แก๊สต่อไป ซึ่งขั้นตอนนี้นั้นเป็นขั้นตอนของกระบวนการแกซิฟิเคชันนั่นเอง

2.4 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

2.4.1 นิยาม

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เป็นกระบวนการที่สำคัญกระบวนการหนึ่งในการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่มีอยู่ในชีวมวลให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงแก๊สโดยอาศัยโดยอาศัยหลักการสันดาปเพียงบางส่วน แก๊สที่ได้จากกระบวนการนี้เรียกว่า แก๊สผลิตภัณฑ์ (producer gas) ส่วนใหญ่ประกอบด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H₂) มีเทน (CH₄) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และไฮโดรคาร์บอน นอกจากนี้ยังมีผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้แก่ น้ำมันทาร์ และ ชาร์ เป็นต้น



ภาพที่ 2.5 ขั้นตอนของกระบวนการไพโรไลซิสและแก๊สซิฟิเคชัน

(ที่มา http://www.eng.mut.ac.th/Camer/article_detail.asp?ArticleID=148)

2.4.2 ผลิตรภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแกซีฟิเคชัน

ในกระบวนการแกซีฟิเคชันประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือการไพโรไลซิสของชีวมวล ในขั้นตอนแรก ซึ่งจะมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการระเหยไประหว่างน้ำและสารระเหยรวมทั้งแก๊สต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นด้วย หลังจากนั้นจะเกิดขั้นตอนที่ 2 คือ กระบวนการแกซีฟิเคชัน โดยน้ำมันทาร์และชาร์เปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น (Davi, 2005) แสดงดังภาพที่ 2.5 ผลิตรภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการแกซีฟิเคชันมี 3 ประเภทคือ (ฉัตรชัย ธนศรีสุข, 2541)

2.4.2.1 ผลิตรภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง

มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเรียกว่า ถ่านชาร์ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือผลิตสารเคมีอื่นได้อีก เช่น ถ่านกัมมันต์ แนพทาซีน แอนทราซีน และสารประกอบไฮยาโนเจน เป็นต้น แต่ส่วนใหญ่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงไร้ควัน (ถ่านไร้ควัน) เพื่อใช้ในบ่อบำบัดน้ำเสียและอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือกลางได้ดี เช่น เป็นเชื้อเพลิงให้หม้อไอน้ำ การเผาอิฐ การอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โรงงานผลิตหินปูนและซีเมนต์ หรือใช้ในโรงงานถลุงเหล็กและทองแดง เพราะไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสภาพแวดล้อมจากกลิ่นหรือควันที่เกิดจากสารระเหยและสารประกอบพวกไนโตรเจนและกำมะถัน

2.4.2.2 ผลิตรภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

ประกอบด้วยน้ำและสารประกอบที่ละลายน้ำ อีกส่วนหนึ่งจะเป็นน้ำมันทาร์องค์ประกอบของน้ำมันทาร์เป็นสารประกอบที่ซับซ้อนของไฮโดรคาร์บอน ที่มีโครงสร้างส่วนมากพวกวงแหวนแนพทาซีนเชื่อมด้วยหมู่เอทีลีน โมเลกุลของน้ำมันทาร์มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนตั้งแต่ $C_5 - C_6$ ประกอบเป็นโครงสร้างของสารเคมีต่าง ๆ อาจมีมากกว่า 200 ชนิด โดยแบ่งออกได้ตามอุณหภูมิที่ใช้ในการกลั่นเป็น 5 ส่วน คือ

- น้ำมันเบา (light oil) ช่วงอุณหภูมิ $< 200^{\circ}C$ ได้แก่ เบนซิน เบนโซลดิบ โทลูอีน เอทิลเบนซีน ไซลีน
- น้ำมันช่วงกลาง (middle oil) ช่วงอุณหภูมิ $200 - 250^{\circ}C$ ได้แก่ ฟีนอล ไพริดีน

- น้ำมันช่วงหนัก (heavy oil) ช่วงอุณหภูมิ 250 – 300 °C ได้แก่ ไดเมททิล แนพทาซีน
- น้ำมันแอนทาซีน (anthracence) ช่วงอุณหภูมิ 300 – 350 °C ได้แก่ ฟลูออรีน ฟีนแอนทีน
- พิตช์ (pitch) ช่วงอุณหภูมิ >350 °C ได้แก่ น้ำมันหนักบางประเภทพวกไซซึ่ง เป็นส่วนที่เหลือจากการกลั่น

สมบัติทางเคมีของน้ำมันทาร์

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพบว่าปริมาณน้ำมันทาร์ที่เกิดจากการเผาไหม้ และองค์ประกอบของน้ำมันทาร์เกิดการเปลี่ยนแปลง พบว่าเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการสูงขึ้น ปริมาณออกซิเจนจะลดลง และสัดส่วนของ H/C อะตอมก็ลดลงเช่นกัน ซึ่งแสดงถึงการผันกลับ ของ highly oxygenate pyrolyzate ไปเป็น less oxygenate pyrolyzate และมีความคงที่ของ อุณหภูมิมากกว่า (thermally highly aromatic structure stable) ซึ่งในที่สุดจะไม่มีออกซิเจน และ คงเหลือแต่โครงสร้างที่เป็นอะโรมาติก องค์ประกอบทางเคมีของทาร์แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของทาร์ (R. Coll, 2001)

Compound	Percentage weight
Benzene	37.9
Toluene	14.3
Other one-ring aromatic hydrocarbons	13.9
Naphthalene	9.6
Other two-ring aromatic hydrocarbons	7.8
Three-ring aromatic hydrocarbons	3.6
Four-ring aromatic hydrocarbons	0.8
Phenolic compound	4.6
Heterocyclic compounds	6.5
Others	1.0

2.4.2.3 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

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

2.4.3 ปฏิกริยาในกระบวนการแกซีฟิเคชัน

ปฏิกริยาความร้อนของการเกิดแก๊สชีวมวลภายในเตาผลิตแก๊สนั้น ถึงแม้ว่าบริเวณที่เกิดจะอยู่ติดกัน แต่ก็ยังสามารถแยกบริเวณต่างๆ ออกจากกันตามปฏิกริยาเคมี และอุณหภูมิที่แตกต่างกันซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 บริเวณด้วยกัน แสดงในภาพที่ 2.6 ประกอบด้วย

- บริเวณเผาไหม้ (combustion zone) อาจเรียกว่า “Oxidation zone” หรือ “Hearth zone” อากาศจะถูกป้อนเข้าทางบริเวณนี้ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เชื้อเพลิงกับอากาศสัมผัสกันเป็นจุดแรก ทำให้เกิดปฏิกริยาเคมีกันระหว่างออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอน และไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง ทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และไอน้ำ (H₂O) ดังสมการ



ปฏิกริยาในสมการ 2.1 และ 2.2 เป็นปฏิกริยาคายความร้อน และความร้อนที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จะถูกนำไปใช้ในปฏิกริยาแบบดูดความร้อนในบริเวณรีดักชัน และบริเวณการกลั่นสลาย อุณหภูมิบริเวณเผาไหม้อยู่ระหว่าง 1,000 – 1,500 องศาเซลเซียส (Overend, 1982) โดยผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากปฏิกริยาในบริเวณนี้ คือ ความร้อนและเถ้า

- บริเวณรีดักชัน (reduction zone) เมื่ออากาศเข้าสู่บริเวณเผาไหม้ และทำปฏิกริยากับคาร์บอน และไฮโดรเจน ได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำแล้ว ก็จะไปไหลเข้าสู่บริเวณรีดักชัน ดังนั้นปฏิกริยาหลักในบริเวณนี้เป็นแบบ reduction reaction อุณหภูมิบริเวณนี้จะอยู่

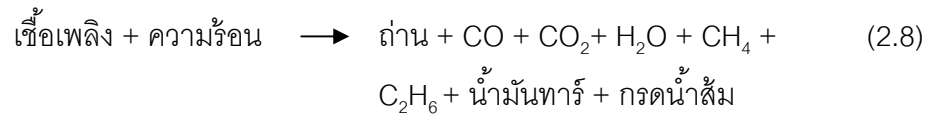
ระหว่าง 500-900 องศาเซลเซียส บริเวณนี้จะเปลี่ยนบางส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งเป็นแก๊สที่เผาไหม้ไม่ได้ ให้เป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ซึ่งเป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้ โดยไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น จะไหลผ่านคาร์บอนที่กำลังลุกไหม้อยู่จะได้ คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ดังสมการ



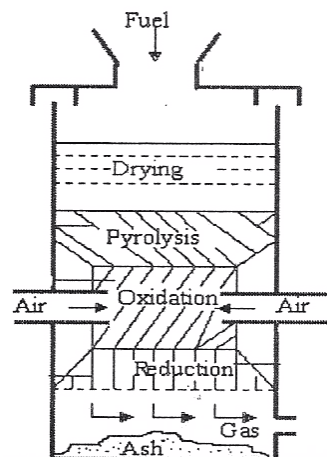
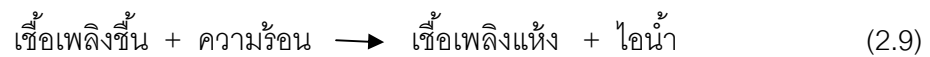
ปฏิกิริยาในสมการที่ 2.3 เรียกว่า Boudouard reaction และปฏิกิริยาในสมการที่ 2.4 เรียกว่า Water gas reaction เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 600 – 900 องศาเซลเซียส (Kaupp and Goss, 1981) และแก๊สที่ได้จาก 2 สมการนี้เป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของแก๊สที่ได้จากเตาผลิตแก๊ส ส่วนสมการที่ 2.5 เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ประมาณ 500 – 600 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญเพราะทำให้ส่วนผสมของไฮโดรเจนมีมากขึ้น มีผลทำให้แก๊สมีค่าพลังงานความร้อนสูงขึ้น ถ้ามีไอน้ำมากเกินไปไอน้ำอาจทำปฏิกิริยากับคาร์บอนมอนอกไซด์ ทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ดังสมการที่ 2.6 โดยทั่วไปเรียกว่า Water-gas shift reaction ทำให้ค่าความร้อนของแก๊สที่ได้น้อยลง ส่วนสมการที่ 2.7 เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส ได้แก๊สมีเทนปริมาณเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาเมทานเนชัน (methanation) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในบริเวณรีดักชันนี้จะเป็นตัวกำหนดคุณภาพแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้

- บริเวณกลั่นสลาย (distillation zone) หรือการไพโรไลซิส (pyrolysis zone) ในบริเวณนี้จะเป็นบริเวณที่มีการสลายสารอินทรีย์ในเชื้อเพลิง โดยความร้อนที่ใช้ในบริเวณนี้เป็นความร้อนที่ได้จากบริเวณรีดักชัน อุณหภูมิในบริเวณนี้จะเกิดประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส (Overend.,1982) สารระเหยที่ได้จากการสลายสารอินทรีย์นั้นจะประกอบไปด้วยเมทานอล กรดอะซีติก น้ำมันทาร์ และแก๊สต่างๆ ซึ่งเป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้และเผาไหม้ไม่ได้ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน ของแข็งที่เหลืออยู่หลังจากผ่าน

กระบวนการนี้แล้วคือ คาร์บอนในรูปของถ่าน ซึ่งจะ去做ปฏิกิริยาต่อในบริเวณรีดักชัน และบริเวณเผาไหม้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบริเวณนี้แสดงดังสมการที่ (2.8)



- บริเวณอบแห้ง (drying zone) ในบริเวณนี้อุณหภูมิจะไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของสารระเหยต่างๆ โดยความร้อนที่ได้จากบริเวณไพโรไลซิส จะระเหยความชื้นที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงให้ออกมาในรูปของไอน้ำ อุณหภูมิในบริเวณนี้ประมาณ 100-200 องศาเซลเซียส (Overend,1982)



ภาพที่ 2.6 แสดงโซนการเกิดแก๊สตามปฏิกิริยาทางเคมี และความแตกต่างของอุณหภูมิภายในเตา (ที่มา: <http://www.ata.or.th/projects/ashram/ash-biomass.htm>)

2.5 ระบบการผลิตเชื้อเพลิงแก๊ส (เอกพร แจมกระจ่าง, 2553)

ในปัจจุบันกระบวนการแก๊สซิเคชันมีการทดลองอยู่ 3 ระบบ คือ

2.5.1 การผลิตเชื้อเพลิงแก๊สที่มีค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value gas or Low Btu gas)

เชื้อเพลิงแก๊สที่ได้มีค่าความร้อนประมาณ 3.3-5.6 MJ/m³ (90-150 Btu/SCF) เกิดจากการเผาไหม้บางส่วนของถ่านกับอากาศ โดยมากมักจะมีไอน้ำอยู่ด้วย ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นดังนี้



2.5.2 การผลิตเชื้อเพลิงแก๊สที่มีค่าความร้อนปานกลาง (Medium Heating Value gas or Medium Btu gas)

เชื้อเพลิงแก๊สมีค่าความร้อนประมาณ 9.3-20.5 MJ/m³ (250-550 Btu/SCF) กระบวนการนี้ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ที่ได้จากการแยกออกจากอากาศ เพื่อใช้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพียงบางส่วน (Partial oxidation) การที่ไม่มีไนโตรเจนจะทำให้ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้สูงขึ้น

2.5.3 การผลิตเชื้อเพลิงแก๊สที่มีค่าความร้อนสูง (High Heating Value gas or High Btu gas)

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแก๊สที่ได้เทียบเท่ากับแก๊สสังเคราะห์ (Synthesis gas, SNG) โดยส่วนประกอบของแก๊สนี้มักเป็นแก๊สมีเทนเกือบบริสุทธิ์ โดยเชื้อเพลิงแก๊สที่มีค่าความร้อนปานกลางสามารถเปลี่ยนเป็นแก๊สสังเคราะห์ได้โดยกระบวนการเกิดมีเทน (Methanation) ที่

อุณหภูมิต่ำ คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สมีเทนและน้ำ ดังสมการ



2.6 ประเภทของเตาผลิตเชื้อเพลิงแก๊ส (Gasifiers)

เมื่อแบ่งเตาผลิตเชื้อเพลิงแก๊สตามทิศทางการไหลของแก๊ส เทียบกับการไหลเลื่อนของเชื้อเพลิง สามารถแบ่งได้ 4 ชนิด คือ

2.6.1 เตาผลิตแก๊สที่มีการไหลขึ้นของแก๊สสังเคราะห์ (Updraft gasifier)

เตาผลิตแก๊สแบบนี้เป็นแบบที่ใช้เริ่มแรกและเป็นแบบที่ง่ายที่สุด เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าทางส่วนบนของเครื่อง ส่วนสารช่วยให้เกิดปฏิกิริยา (อากาศ ออกซิเจน และ/หรือไอน้ำ) จะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างและไหลขึ้นสวนทางกับเชื้อเพลิง แสดงในภาพที่ 2.7 (ก) บริเวณเหนือตะแกรงขึ้นไปจะมีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงขึ้น ซึ่งเรียกบริเวณนี้ว่า Combustion zone หรือ Oxidation zone เมื่ออากาศผ่านเข้าไปที่บริเวณ Combustion zone จะเกิดปฏิกิริยาขึ้น ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ สำหรับแก๊สร้อนที่มาจาก Combustion zone ซึ่งมีอุณหภูมิสูงจะถูกส่งผ่านไปยัง Reduction zone ซึ่งเป็นบริเวณที่มีปริมาณคาร์บอนมากเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน หลังจากนั้นแก๊สที่ได้จะไหลเข้าสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในชั้นของเชื้อเพลิง และกลั่นสลายในช่วงอุณหภูมิ 200-500 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นแก๊สก็จะไหลเข้าสู่ชั้นของเชื้อเพลิงที่ชั้นต่อไป

เนื่องจากแก๊สยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่ จึงไประเหยน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงเหล่านั้น ทำให้แก๊สที่ออกจากเครื่องปฏิกิริยามีอุณหภูมิต่ำลง สารระเหยและทาร์ที่เกิดขึ้นในช่วงการกลั่นสลายจะติดออกไปกับเชื้อเพลิงแก๊สที่เกิดขึ้น ดังนั้นเชื้อเพลิงแก๊สที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลขึ้นจะมีปริมาณของทาร์มาก บางครั้งอาจถึงร้อยละ 20 ของทาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสของเชื้อเพลิงเชื้อเพลิงแก๊สที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลขึ้น มีอุณหภูมิต่ำและไม่สูงนักและมีปริมาณสารประกอบ

ไฮโดรคาร์บอนและทาร์มาก ทำให้มีค่าความร้อนมากจำเป็นต้องมีหน่วยทำความสะอาดเชื้อเพลิง แก๊สก่อนนำเชื้อเพลิงไปหมუნกัณฑ์แก๊ส ข้อดีหลักของเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลขึ้น คือ ติดตั้งง่ายและมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูง

2.6.2 เตาผลิตแก๊สที่มีการไหลลงของแก๊สสังเคราะห์ (Downdraft gasifier)

เตาผลิตแก๊สแบบนี้ออกแบบมาเพื่อขจัดทาร์ในเชื้อเพลิงแก๊สโดยเฉพาะอากาศจะถูกดูดผ่านจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง แสดงในภาพที่ 2.7 (ข) ผ่านกลุ่มของหัวฉีดซึ่งเรียกว่า Tuyers บริเวณหัวฉีดจะเป็นบริเวณของการเผาไหม้แก๊สที่ได้จากบริเวณการเผาไหม้จะถูกรีดิวส์ ในขณะที่ไหลลงสู่ด้านล่างและผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อนซึ่งอยู่เหนือตะแกรงเล็กน้อยขณะเดียวกันในชั้นของเชื้อเพลิงที่อยู่ทางด้านบนของบริเวณการเผาไหม้จะมีปริมาณออกซิเจนน้อยมากทำให้เกิดการกลั่นสลาย และทาร์ที่เกิดจากการกลั่นสลายจะไหลผ่านชั้นคาร์บอนที่ร้อน ทำให้ทาร์เกิดการแตกตัวเป็นแก๊ส ซึ่งการแตกตัวนี้จะเกิดอุณหภูมิคงที่ในช่วงระหว่าง 800-1,000 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ปฏิริยาาคูความร้อนจะทำให้แก๊สที่ได้มีอุณหภูมิต่ำลง แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ปฏิริยาาคูความร้อนจะทำให้แก๊สที่ได้มีอุณหภูมิสูงขึ้น แก๊สที่ผ่านบริเวณการเผาไหม้จะมีส่วนประกอบของทาร์ลดลงเหลือน้อยกว่าร้อยละ 10 ของทาร์ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลขึ้น (Updraft gasifier) และเชื้อเพลิงแก๊สที่ได้จะสะอาดกว่า

การผลิตเชื้อเพลิงแก๊สโดยเตาผลิตแก๊สที่มีการไหลลงของแก๊สสังเคราะห์นี้ง่าย และมีความน่าเชื่อถือสำหรับเชื้อเพลิงที่ได้ (มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 30) เนื่องจากว่าเชื้อเพลิงแก๊สที่ได้มีปริมาณทาร์ต่ำ ดังนั้นเตาผลิตแก๊สดังกล่าวจึงเหมาะสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีเครื่องยนต์สันดาปภายใน ที่มีขนาดกำลังการผลิตไม่เกิน 500 กิโลกรัมต่อชั่วโมง หรือ 500 กิโลวัตต์

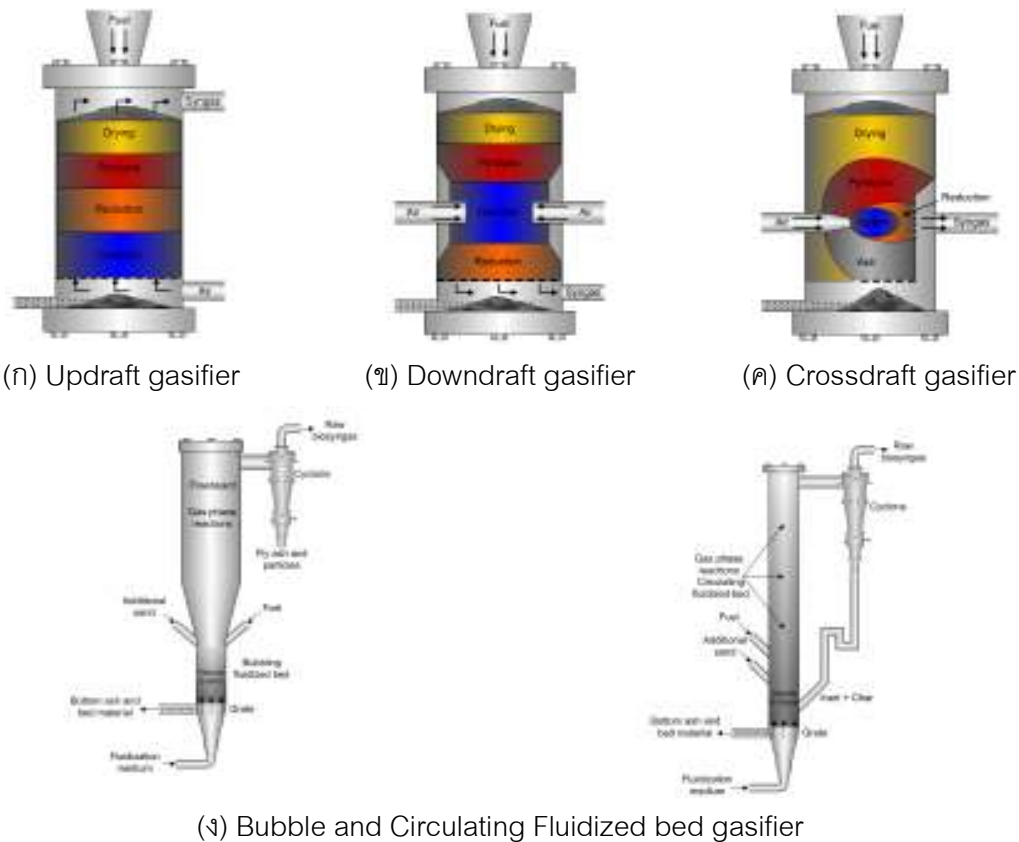
2.6.3 เตาผลิตแก๊สที่มีการไหลแบบขวาง (Crossdraft gasifier)

เชื้อเพลิงถูกป้อนทางด้านบน ส่วนสารช่วยให้เกิดปฏิริยา (Gasifying agent) จะถูกป้อนเข้าทางด้านข้างและไหลผ่านเชื้อเพลิง ได้แก๊สสังเคราะห์ทางด้านตรงข้าม แสดงในภาพที่ 2.7 (ค) อากาศจะถูกดูดผ่านหัวฉีดที่อยู่ในแนวราบ ส่วนบริเวณ Combustion จะอยู่ถัดหัวฉีด

ออกไป และถัดออกไปอีกจะเป็นบริเวณ Reduction แก๊สที่ออกจากบริเวณนี้แล้วจะเป็นบริเวณ สลายทาร์ และทาร์ที่ได้จากบริเวณการกลั่นสลายนี้จะผ่านบริเวณ Reduction ก่อนที่ออกสู่ ภายนอกทำให้ทาร์เกิดการแตกตัวเป็นแก๊สก่อนที่จะออกสู่ภายนอก ส่งผลให้เชื้อเพลิงแก๊สที่ได้มี ปริมาณทาร์ต่ำ เนื่องจากอุณหภูมิภายในเตาไหลขวางมีอุณหภูมิสูงมาก รูอากาศที่เข้าไปเตาและ ตะแกรงต้องใช้วัสดุทนความร้อนที่ดีหรือมีการหล่อเย็นที่ดี

2.6.4 เตาผลิตแก๊สแบบฟลูอิไดซ์เบด (Fluidized bed gasifiers)

ปัญหาที่เกิดจากการใช้เตาผลิตแก๊สทั้ง 3 ที่กล่าวมาข้างต้น คือ เกิดเถ้าหลอมเหลว เป็น สแลก (Slag) อยู่ด้านล่างซึ่งส่งผลให้ความดันลด และมีการเผาไหม้ไม่ดี เพื่อแก้ปัญหา ดังกล่าวจึงใช้หลักการของฟลูอิไดซ์เบด โดยการป้อนกระแสแก๊ส เรียกว่าสารฟลูอิไดซ์ ซึ่งส่วนใหญ่ เป็นอากาศ จะถูกป้อนที่ด้านล่างสุดของเบด ความเร็วของอากาศจะช่วยดันให้เบดขยายตัวขึ้น จนกระทั่งอนุภาคอยู่ในภาวะแขวนลอยและหมุนวนอยู่ในกระแสอย่างสม่ำเสมอ เมื่อเกิดการฟลูอิ ไดซ์แล้วจะเกิดฟองอากาศขึ้นในทรายและเบดเริ่มลอยขึ้น ลักษณะนี้เรียกว่า Bubbling Fluidized Bed (BFB) และถ้าความเร็วสูงขึ้นอีก ทรายบางส่วนจะหลุดลอยออกไป ไชโคลนจึงถูกติดตั้งเพื่อ นำทรายกลับมาในขณะที่แก๊สจะไหลผ่านไชโคลนออกไปทางด้านบน และกลับมาป้อนเข้าที่ ด้านล่างของเบดอีกครั้ง ลักษณะนี้เรียกว่าฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed, CFB) แสดงในภาพที่ 2.7 (ง)



ภาพที่ 2.7 เตาผลิตแก๊สแบบต่าง ๆ

2.7 การทำความสะอาดแก๊ส (Gas Cleaning)

การทำแก๊สเชื้อเพลิงที่ออกจากเตาผลิตแก๊ส (gasifier) ให้สะอาดนับเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการนำแก๊สเชื้อเพลิงมาเผาไหม้ในกังหันแก๊ส เนื่องจากการกำจัดและป้องกันปัญหาด้านมลภาวะที่อาจเกิดขึ้น อีกทั้งยังเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบและลดปัญหาการเสียหายของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเนื่องจากการกัดกร่อนของแก๊สกรด หรือการสึกกร่อนด้วยอุณหภูมิของแข็ง แก๊สเชื้อเพลิงที่ออกจากเตาผลิตแก๊ส จะมีสารเจือปนดังแสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งปริมาณของสารเจือปนนี้จะขึ้นอยู่กับกระบวนการแกซีฟิเคชันและคุณลักษณะของเชื้อเพลิงที่ใช้

ตารางที่ 2.4 สิ่งเจือปนในแก๊ส ปัญหาและกระบวนการทำแก๊สให้สะอาด (กระทรวงพลังงาน,2549)

Contaminant	Examples	Problems	Cleanup method
Particulates	ash, char, fluid bed materials	Erosion	Filtration,scrubbing
Alkali metals	Sodium and potassium compounds	Hot corrosion	Cooling,condensation,filtration, adsorption
Fuel nitrogen	Mainly NH ₃ and HCN	NOx formation	Scrubbing, SCRa
Tars	Refractory aromatics	Clog filters,difficult to burn, deposit internally	Tar cracking, Tar removal
Sulfur, chlorine	H ₂ S, HCl	Corrosion, emissions	Lime or dolomite scrubbing or absorption

2.7.1 Hot Gas Cleanup for Particulate

ในแก๊สเชื้อเพลิงจะมีอนุภาคที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ที่มีขนาดเล็กมากซึ่งกำจัดออกได้ยากโดยไซโคลน มีรายงานว่าไม่สามารถลดปริมาณของอนุภาคให้น้อยกว่า 5-30 กรัมลูกบาศก์เมตร ได้โดยใช้ไซโคลนประสิทธิภาพสูง แต่ต้องใช้อุปกรณ์กรองโดย sintered metal หรือ ceramic filters อย่างไรก็ตาม มีรายงานว่าในการทำความสะอาดแก๊สจากไม้ (wood-derived gas) เกิดการอุดตันของตัวกรอง (filters) เนื่องจากเขม่าซึ่งเกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อนของน้ำมันทาร์ ปัญหานี้แก้ไขได้โดยลดอุณหภูมิของแก๊สให้ต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียส และลดความเร็วของแก๊สที่ไหลผ่านตัวกรอง อย่างไรก็ตามเมื่อลดอุณหภูมิของแก๊สให้ต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส จะเกิดปัญหาของการควบแน่นของน้ำมันทาร์ ปัจจุบันมีการพัฒนาระบบการกรองที่เรียกว่า ceramic candle filters ซึ่งจะมีการติดตั้ง automatic pulsing เพื่อกำจัด accumulated filter cake ที่เกาะอยู่ที่ตัวกรอง

2.7.2 Tar Removal

วิธี water scrubbing ถือได้ว่าเป็นวิธีกำจัดทางกายภาพที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นละออง น้ำมันทาร์และสิ่งเจือปนอื่นๆ แต่ในทางปฏิบัติพบว่ามีปัญหามากในการกำจัดน้ำมันทาร์โดยเฉพาะในแง่ของประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันทาร์ ในการกำจัดน้ำมันทาร์

จำเป็นต้องใช้วิธีจับทางกายภาพให้น้ำมันทาร์รวมตัวกัน (agglomeration) หรือจับตัวกัน มากกว่าจะใช้เพียงการลดอุณหภูมิ เป็นที่ทราบกันดีว่าน้ำมันทาร์จากชีวมวลนั้นรวมตัวกันยาก และจำเป็นต้องใช้ระบบบำบัดที่ย่างยากซับซ้อนในการกำจัดให้ได้ถึง 90%

2.7.3 Tar Cracking

ความเข้มข้นของน้ำมันทาร์ในแก๊สเชื้อเพลิงจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิที่แก๊สฟลาย ซึ่งความเข้มข้นของน้ำมันทาร์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณน้ำมันทาร์จะเป็นฟังก์ชันของชนิดเตาผลิตแก๊ส และภาวะที่ดำเนินการ นอกจากนี้ปริมาณและคุณลักษณะของน้ำมันทาร์จะขึ้นกับเชื้อเพลิงด้วย มีรายงานว่าน้ำมันทาร์ที่ได้จากการแก๊สฟลายไม่มีปริมาณมากกว่าน้ำมันทาร์ที่ได้จากการแก๊สฟลายถ่านหิน ซึ่งน้ำมันทาร์นี้จะทำปฏิกิริยาต่อเกิดเป็นเขม่าซึ่งจะทำให้ตัวกรองอุดตัน วิธีการกำจัดน้ำมันทาร์ โดยการแตกตัวน้ำมันทาร์ไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส มีอยู่ด้วยกัน 2 วิธีหลักๆ ได้แก่

- thermal cracking โดยวิธี partial oxidation หรือ direct thermal contact
- catalytic cracking โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

2.7.3.1 Thermal Cracking

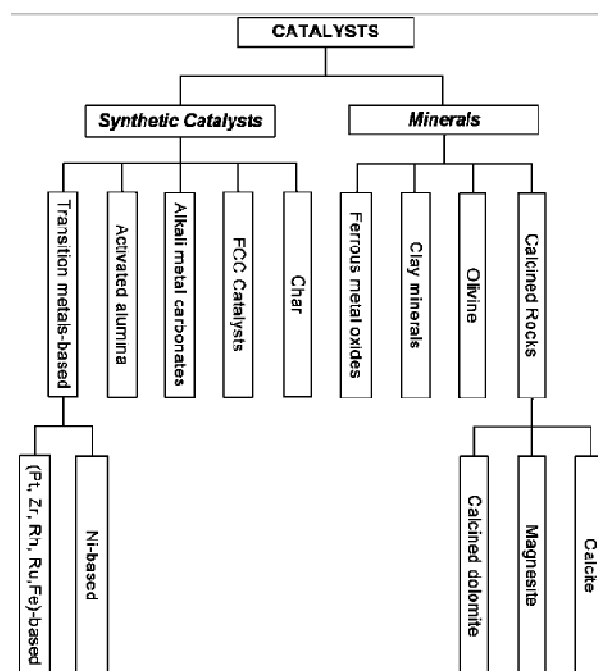
น้ำมันทาร์ที่ได้จากชีวมวลจะสลายตัวด้วยความร้อนยากกว่าน้ำมันทาร์ที่ได้จากถ่านหิน ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะกำจัดน้ำมันทาร์ด้วยวิธี thermal treatment อย่างเดียวมีหลายวิธีในการกำจัดน้ำมันทาร์โดย thermal cracking เช่น

1. เพิ่ม residence time ที่บริเวณ freeboard ในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไธด์เบด แต่วิธีนี้ได้ผลเพียงแค่บางส่วน
2. สัมผัสโดยตรงกับพื้นผิวที่ให้ความร้อน ซึ่งวิธีนี้ต้องใช้พลังงานในการให้ความร้อนพื้นผิว เป็นการลดประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ วิธีนี้ได้ผลเพียงแค่บางส่วนเช่นกัน
3. ออกซิเดชันบางส่วน (partial oxidation) โดยเติมอากาศหรือออกซิเจน วิธีนี้จะทำให้ปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพลดลงและเพิ่มค่าใช้จ่ายในการ

เติมออกซิเจน วิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,300 องศาเซลเซียส และเป็นระบบ oxygen gasification

2.7.3.2 Catalytic Cracking

มีรายงานว่า การกำจัดน้ำมันหาว์โดยวิธี catalytic cracking มีประสิทธิภาพมาก โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการลดปริมาณหาว์สามารถจำแนกได้ 2 ประเภท คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาจากการธรรมชาติ ได้แก่ แร่ธาตุโอลิวีน เคลย์ และตัวเร่งปฏิกิริยาจากการสังเคราะห์ ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล ตัวเร่งปฏิกิริยาจากโลหะหมู่ทรานสิชัน ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับลดปริมาณหาว์ (Z. Abu El-Rub, 2004)

2.7.4 Alkali control (Cummer และ Brown, 2002)

โลหะแอลคาไล โดยเฉพาะโพแทสเซียมที่พบมากในชีวมวล โลหะแอลคาไลระเหยตัวได้ง่ายในช่วงแกซีฟิเคชันและเกิดการควบแน่นได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส โดยที่ละอองลอยของแอลคาไลมีผลกระทบที่เป็นอันตรายหลายอย่าง เช่น การที่แอลคาไลเกาะติดบนพื้นผิวโลหะทำให้เกิดเป็นฟิล์มที่เหนียว ซึ่งมันเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดปัญหาการถ่ายโอนความร้อน

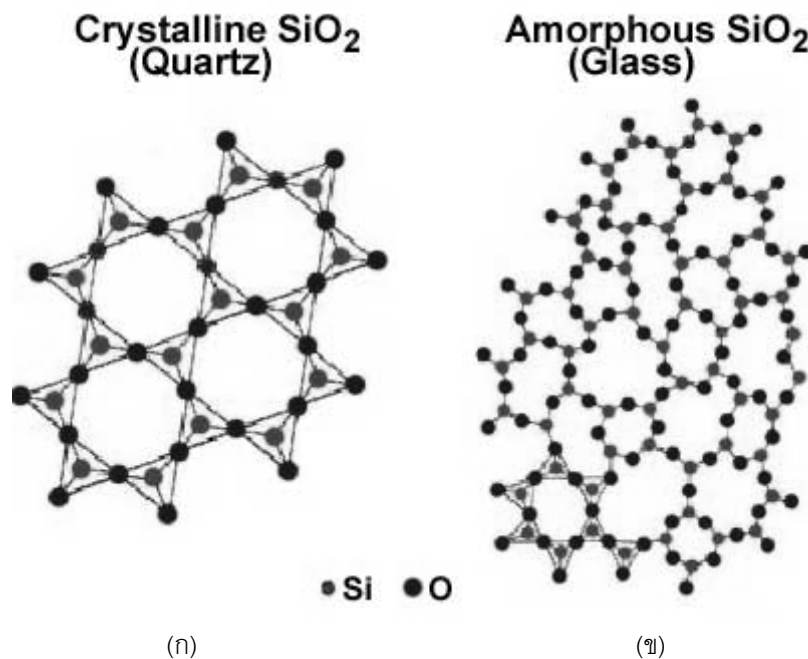
ของ Boiler tube หรือมีปัญหาต่ออากาศพลศาสตร์ของ Turbine blades นอกจากนั้นโลหะแอลคาไลยังกัดกร่อนพื้นผิวโลหะเช่นกัน

ในการศึกษาการเผาไหม้ชีวมวล โลหะแอลคาไลถูกปลดปล่อยถัดจากการปลดปล่อยของสารระเหยในช่วงการเผาไหม้ของถ่านชาร์ การปลดปล่อยโลหะแอลคาไลไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนอุณหภูมิและปริมาณออกซิเจนมากนัก ในขณะที่การเติมไอน้ำเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปของแอลคาไลจากเกลือโพแทสเซียมคลอไรด์กลายเป็นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ในขณะที่เดียวกันถ้าไม่ได้คำนึงถึงการเติมไอน้ำ เกลือโพแทสเซียมคลอไรด์เป็นรูปแบบของเกลือแอลคาไลที่พบมากในการปลดปล่อยในช่วงการเผาไหม้ นักวิจัยหลายท่านได้สรุปไว้ว่าโลหะแอลคาไลอยู่ในรูปของอนุภาคซึ่งอาจเกาะติดบนถ่านลอยมากกว่าอยู่ในรูปของไอระเหย ถ้าโลหะแอลคาไลหลุดลอยเข้าสู่ระบบของกังหันที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าเกินกว่าค่ากำหนดไว้จากผู้ผลิตกังหันโดยส่วนใหญ่แล้วกำหนดค่าความเข้มข้นแอลคาไลที่เข้ากังหันไว้ไม่เกิน 24 ppb อย่างไรก็ตามการควบคุมความเข้มข้นหรือปริมาณโลหะแอลคาไลให้ลดต่ำลงมีกระบวนการในการทำอยู่ 2 กระบวนการ คือ การดูดซับและการชะ

การดูดซับเป็นกระบวนการโดยการให้โมเลกุลติดกับวัสดุหรือตัวดูดซับ เช่น อะลูมินา ซิลิกาเจล แร่กาแลน และแรบอกลีไซต์ เป็นต้น กระบวนการดูดซับสามารถจำแนกออกเป็นการดูดซับแบบกายภาพและการดูดซับแบบเคมี ในการดูดซับแบบกายภาพ โมเลกุลจะถูกจับกับตัวดูดซับด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเป็นแรงระหว่างโมเลกุลที่อ่อน โดยที่โมเลกุลที่ดูดซับผ่านการดูดซับแบบกายภาพสามารถเกิดการย้อนทับกันเป็นหลายเลเยอร์ได้บนพื้นผิวของตัวดูดซับแต่พวกมันก็สามารถถูกคายซับหรือกำจัดออกมาได้เช่นกัน สำหรับการดูดซับแบบเคมีเป็นการเกิดพันธะกันระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับ และยังไม่เกิด Multi-layer อีกด้วย โดยที่แรงที่ยึดติดโมเลกุลกับตัวดูดซับมีความแข็งแรงกว่าการดูดซับแบบกายภาพ ดังนั้นการคายซับเกิดได้ยากมาก ตัวดูดซับในอุดมคติต้องมี ความสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูง, อัตราการดูดซับเร็ว และความสามารถในการดูดซับสูง โดยการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดหรือให้เกิดขึ้นในเบดนิ่งถัดจากเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบด

2.7.4.1 ซิลิกา (SiO₂)

ซิลิกามีสูตรทั่วไปคือ SiO₂ ประกอบด้วย อะตอมซิลิกอนจับอยู่กับอะตอมออกซิเจน จำนวน 4 อะตอม ซึ่งใช้ร่วมกับซิลิกอนอะตอมอื่น ซิลิกาเป็นสารที่เฉื่อย ไม่มีพิษ ใช้เป็นตัวดูดความชื้น ตัวดูดซับ และใช้เป็นวัสดุในการบรรจุคอลัมน์ในโครมาโทกราฟี ถ้าซิลิกามีความเป็นผลึกสูง เช่น ควอตซ์ จะมีลักษณะโครงสร้างดังภาพที่ 2.9 (ก) โดยซิลิกาจะจับกับออกซิเจน 4 อะตอม แต่ถ้าแตกผลึกเร็วจะทำให้การจัดเรียงตัวไม่สมบูรณ์ ดังภาพที่ 2.9 (ข) ซึ่งเป็นลักษณะของโครงสร้างอสัณฐาน



ภาพที่ 2.9 ลักษณะโครงสร้างของซิลิกา (ก) แบบเป็นผลึก และ (ข) แบบเป็นอสัณฐาน

ทรายซึ่งเป็นหนึ่งในอัญรูปของซิลิกา นิยมนำไปใช้เป็นวัสดุเบดในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบด เนื่องจากมีราคาถูก หาได้ง่าย เฉื่อยต่อปฏิกิริยา และมีการถ่ายเทความร้อนที่ดี อย่างไรก็ตามการใช้ทรายเป็นผลให้เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่ม (Agglomeration) เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างซิลิกากับแร่ธาตุที่อยู่ในเถ้า โดยเฉพาะธาตุในกลุ่มโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท โดยกลายเป็นสารประกอบซิลิเกตที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ (Bartels และคณะ, 2008) อย่างไรก็ตามงานวิจัยของ Dahlin และคณะ (2009) ได้รายงานว่าซิลิกาที่มีขนาดต่ำ

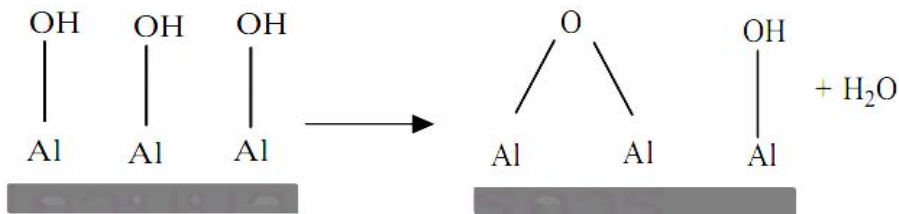
กว่าไมโครเมตรช่วยในการป้องกันปัญหาการรวมตัวเป็นกลุ่มของเบตได้ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการดักจับกับโลหะแอลคาไลที่มากพอ อีกทั้งขนาดอนุภาคก็เล็กพอที่จะไม่เกิดการไม่เกิดการไหลของเบต (Defluidization) ถึงแม้ว่าเกิดอันตรกิริยากับโลหะแอลคาไลกลายเป็นสารประกอบซิลิเกตในบางส่วน

2.7.4.2 อะลูมินา (Al_2O_3)

อะลูมินาซึ่งมีสูตรทั่วไปคือ Al_2O_3 เป็นตัวรองรับที่นิยมใช้มากตัวหนึ่ง เนื่องจากราคาไม่แพง มีโครงสร้างที่เสถียรภาพสูง (จุดหลอมเหลว > 2000 องศาเซลเซียส) และสามารถเตรียมให้มีขนาดอนุภาคเล็กได้ง่าย อีกทั้งในการเตรียมสามารถกำหนดพื้นที่ผิวและกระจายของรูพรุนได้ตามต้องการ อะลูมินาที่มีจำหน่ายมีพื้นที่ผิวระหว่าง 100-600 ตารางเมตรต่อกรัม ไปจนถึงโครงสร้างที่ไม่มีรูพรุน การที่ของแข็งที่มีความพรุนสูงทำให้มีพื้นที่ผิวภายในสูง ทำให้อนุภาคของโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยากระจายตัวได้ดีและเพิ่มประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยา ส่วนของแข็งที่ทึบแน่นไม่เหมาะกับการใช้ทำตัวเร่งปฏิกิริยาเพราะมีพื้นที่ผิวดำ

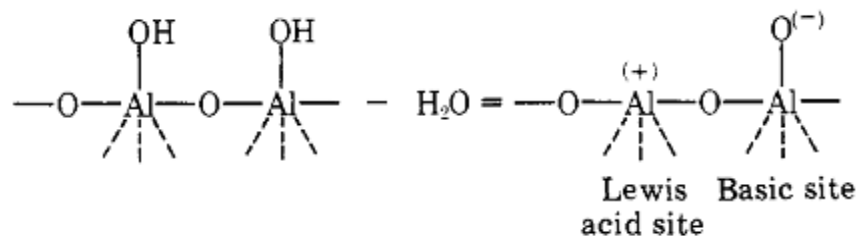
อะลูมินามีหลายเฟสแต่เฟสที่นิยมใช้เป็นอุตสาหกรรมเกี่ยวกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคือแกมมาอะลูมินา ($\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$) ซึ่งเตรียมได้จากการกำจัดน้ำจากอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 900 องศาเซลเซียส แกมมาอะลูมินามีความพรุน ทำให้มีพื้นที่ผิวสูง จึงเป็นที่นิยมในการใช้เป็นตัวรองรับสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนเฟสที่เสถียรที่สุดคือแอลฟาอะลูมินา ซึ่งไม่มีรูพรุน อย่างไรก็ตามแกมมาอะลูมินามีเสถียรภาพพอสมควรเพราะที่สภาวะทั่วไปมันจะไม่เปลี่ยนเฟสไปเป็นแอลฟาอะลูมินา

ถ้านำอะลูมินาไปสัมผัสความชื้น จะเกิดการดูดซับทำให้ผิวหน้าจะถูกปกคลุมไปด้วยโมเลกุลของน้ำ และเมื่อนำไปอบที่ 100 ถึง 150 องศาเซลเซียส จะเกิดการคายโมเลกุลของน้ำ แสดงดังภาพที่ 2.10 แต่ยังมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) อยู่ทำให้อะลูมินามีความเป็นกรดแบบรอนสเตรดแบบอ่อน



ภาพที่ 2.10 การคายน้ำออกเมื่อนำอะลูมินาไปอบแห้ง

สำหรับการแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส ทำให้กลุ่ม $-OH$ ที่อยู่ใกล้กันรวมตัวและปลดปล่อย H_2O ออกมามากขึ้นและทำให้เกิด Al^{3+} ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เป็นกรดลิวอิส (Lewis acid sites) และ O^{2-} ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เป็นเบสลิวอิส (Lewis basic site) แสดงดังภาพที่ 2.11 เนื่องจากความแข็งของผิวหน้าทำให้ทั้งกรดลิวอิสและเบสลิวอิสอยู่รวมตัวกันได้โดยไม่ทำปฏิกิริยากันเอง ตำแหน่งทั้งสองแบบมีกัมมันตภาพสูงในการเร่งปฏิกิริยาต่างๆ เช่น ปฏิกิริยาการกำจัดน้ำแอลกอฮอล์ และไอโซเมอไรเซชันของอัลคีน และเนื่องจากบริเวณผิวหน้าของอะลูมินาที่มีตำแหน่งกรดเบสลิวอิส ดังนั้นมันสามารถดูดซับโมเลกุลที่เป็นลิวอิสเบสได้ เช่น การดูดซับแอมโมเนีย



ภาพที่ 2.11 แสดงตำแหน่งกรดและเบสลิวอิสบนผิวของอะลูมินา

จากปัญหาการรวมตัวกันของเบตจากการใช้ทรายเป็นวัสดุเบต ทำให้หลายปีที่ผ่านมาการหาวัสดุเบตอื่นๆ ที่นำมาแทนทรายมีมากขึ้น เช่น อะลูมินา แร่บอกไซต์ หินปูน และแมกนีเซีย เป็นต้น แต่อะลูมินามีข้อได้เปรียบกว่าวัสดุเบตชนิดอื่นที่ได้กล่าวมา คือมีความแข็งที่มากกว่า ซึ่งเหมาะกับการใช้งานในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบต Ergudentler และ Ghaly (1993) กล่าวว่า การใช้อะลูมินาเป็นวัสดุเบตในการเผาไหม้ฟางข้าวในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบตช่วยเพิ่มอุณหภูมิในการเผาไหม้ที่ไม่เกิดการรวมตัวของเบตเป็น 920 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าการใช้ทรายที่มีอุณหภูมิในการรวมตัวของเบตอยู่ที่ 800 องศาเซลเซียส นอกจากนั้นอะลูมินาที่พรุน (porous alumina) ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้อีกเช่นกัน (Shimizu และคณะ, 2006)

2.8 ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี (Catalyst)

คำว่า “ตัวเร่งปฏิกิริยา” มาจากภาษากรีก 2 คำ ได้แก่คำว่า คะตะ (cata) หมายถึง หัก (down) และไลซีน (lysein) หมายถึง แยกหรือแตก (spit or break) ดังนั้น “ตัวเร่งปฏิกิริยา” จึงหมายถึง ตัวที่ทำให้เกิดการแตกหักที่เกิดขึ้นบนโมเลกุล ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีมีหน้าที่เร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยา โดยทำงานอย่างมีประสิทธิภาพมากในการเลือกเร่งเฉพาะปฏิกิริยาที่ต้องการให้เกิด ในขณะที่เดียวกันก็ไม่ส่งเสริมปฏิกิริยาอื่นที่อาจเกิดขึ้นข้างเคียง การเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีมาใช้ยังคงต้องอาศัยวิธีการทดลองเป็นหลัก

ความว่องไว และความสามารถในการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีมีอิทธิพลโดยตรงจากลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของของแข็ง ได้มีความพยายามที่จะอธิบายถึงการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี โดยมองภาพว่าโมเลกุลของสารตั้งต้นที่ถูกเปลี่ยนสภาพไปมีพลังงานเพิ่มขึ้นหรือกลายเป็นสารผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยา (Intermediate) หลายทฤษฎีได้พยายามอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว ตัวอย่างเช่น ทฤษฎีสถานะทรานสิชัน (Transition – state – theory) อธิบายว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีเป็นตัวช่วยลดพลังงานศักย์ขวางกั้น (Potential energy barrier) ซึ่งสารตั้งต้นต้องมีเพื่อเปลี่ยนสารผลิตภัณฑ์ คือ ลดพลังงานการกระตุ้นของปฏิกิริยาต่ำลงนั่นเอง

2.8.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทแร่ธาตุ (Mineral matter)

แร่ธาตุเป็นธาตุแท้หรือสารบริสุทธิ์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มีราคาถูกกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ขึ้น (Synthetic catalyst) โดยมีส่วนประกอบทางเคมีและมีรูปผลึกที่แน่นอน ในการนำตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้ไปใช้งานอาจนำไปใช้ได้โดยตรงหรือนำไปให้เผาเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านกายภาพบางอย่าง ซึ่งทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทแร่ธาตุมีความว่องไวต่อการเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้วแร่ธาตุที่ถูกจัดกลุ่มเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้ ได้แก่ สารประกอบเกลือในกลุ่มธาตุแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท, โดโลไมต์, โอลิวีน และดินเคลย์ เป็นต้น โดยที่แร่ธาตุในกลุ่มแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท (โดยเฉพาะธาตุโซเดียม, โพแทสเซียม, แคลเซียม และแมกนีเซียม) มักพบมากในชีวมวล เนื่องจากเป็นสารอาหารที่พืชใช้ในการเจริญเติบโต

โลหะแอลคาไลเป็นธาตุที่มีวาเลนซ์หนึ่ง (monovalent) ได้แก่ ลิเทียม (Li), โซเดียม (Na), โพแทสเซียม (K), รูบิเดียม (Rb), ซีเซียม (Cs) และ ฟรานเซียม (Fr) ส่วนโลหะแอลคาไลน์เอิร์ทประกอบไปด้วย เบริลเลียม(Be), แมกนีเซียม (Mg), แคลเซียม (Ca), สตรอนเซียม (Sr), แบเรียม (Ba) and เรเดียม (Ra) เป็นธาตุที่มีวาเลนซ์สอง (divalent) มีความหนาแน่น, ความแข็ง, จุดเดือด และจุดหลอมเหลว สูงกว่าโลหะแอลคาไล แต่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาดำกว่าโลหะแอลคาไล

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Keown และคณะ (2005) ศึกษาผลของไพโรไลซิสของชานอ้อยและยอดอ้อยต่อการระเหยตัวของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท ที่อุณหภูมิ 300-950 องศาเซลเซียสและอัตราการให้ความร้อนแบบช้า (10 K min^{-1}) และแบบเร็ว (1000 K s^{-1}) ในเครื่องปฏิกรณ์ fluidised-bed/fixed-bed ผลการทดลองพบว่า ในกรณีของการให้อัตราการให้ความร้อนเร็วของชีวมวลทั้งสองที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 400 องศาเซลเซียส ให้ผลผลิตของถ่านชาร์สูงกว่าในกรณีของการให้อัตราการให้ความร้อนช้า แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส เป็นผลให้ผลผลิตของถ่านชาร์ต่ำกว่า เนื่องจากองค์ประกอบที่ว่องไว (เช่น H_2O และ CO_2) ในสารระเหยที่เกิดจากการแตกตัวของความร้อนของน้ำมันทาร์ สามารถเข้าทำปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันกับถ่านชาร์ได้ ดังนั้นในกรณีนี้สามารถบอกได้ว่าในภาวะการให้อัตราการให้ความร้อนเร็วสนับสนุนในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารระเหยและถ่านชาร์ได้ดีกว่าอัตราการให้ความร้อนช้า เมื่อพิจารณาการคงอยู่ของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในถ่านชาร์ พบว่า ในกรณีการให้อัตราการให้ความร้อนเร็ว เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 900 องศาเซลเซียส ทำให้การคงอยู่ของโลหะลดลงประมาณ 60-80% น่าจะเป็นผลมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารระเหยและถ่านชาร์ได้ดีเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ เป็นผลให้โลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทระเหยตัวได้เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การให้อัตราการให้ความร้อนช้า มีผลเล็กน้อยหรือแทบจะไม่มีผลต่อการระเหยตัวของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทกับการเพิ่มอุณหภูมิ

Quyn และคณะ (2002) ศึกษาผลของการเติม NaCl ลงบนถ่านหินลิกไนต์ Victorian ด้วยวิธีการเคลือบฝังต่อการคงอยู่ในถ่านชาร์ของโลหะโซเดียม, แคลเซียม, แมกนีเซียม และคลอรีน

ภายใต้ไฟโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 200-900 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อนแบบช้า (10 K min^{-1}) และแบบเร็ว ($10^3\text{-}10^4 \text{ K s}^{-1}$) ในเครื่องปฏิกรณ์ fluidized-bed/fixed-bed จากผลการทดลองพบว่า คลอรีนระเหยตัวออกได้อย่างมากที่อุณหภูมิมากกว่า 200 ถึงประมาณ 500 องศาเซลเซียส แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส ในกรณีการใช้อัตราการให้ความร้อนเร็ว พบว่า คลอรีนอาจเกิดอันตรกิริยากับถ่านชาร์ เป็นผลให้การคงอยู่ของคลอรีนเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิสูงถึง 900 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อนเร็ว พบว่า ถ่านหินที่เติมและไม่เติม NaCl มีร้อยละการระเหยตัวของไฮโดรเจนที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม การเติม NaCl ไม่มีผลต่อการสับสนุนการระเหยตัวของแคลเซียมและแมกนีเซียม

Nishimura และคณะ (2009) ศึกษาหน้าที่ของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในไฟโรไลซิสเซลลูโลส ที่อุณหภูมิ 300 - 1,000 องศาเซลเซียส พบว่า สำหรับการเติมโพแทสเซียมคาร์บอเนตในปริมาณ 14.7 wt% ผลผลิตแก๊สและน้ำมันชาร์เริ่มปล่อยออกมาที่อุณหภูมิต่ำลงจาก 500 เป็น 300 องศาเซลเซียส เนื่องจากโพแทสเซียมคาร์บอเนตช่วยในการสลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ของเซลลูโลส อีกทั้งยังไปยับยั้งการเกิด levoglucosan ซึ่งเป็นสารตัวกลางของการเกิดน้ำมันชาร์

เอกสิทธิ์ สกุกการคำ (2006) ศึกษาผลของแร่ธาตุต่อการแกซิฟิเคชันร่วมของถ่านหินและชีวมวลประกอบด้วยแคลบและซังข้าวโพด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยศึกษาเปรียบเทียบผลของแร่ธาตุที่มีอยู่ต่อการไฟโรไลซิส การไฟโรไลซิสร่วม การแกซิฟิเคชัน และการแกซิฟิเคชันร่วม โดยพิจารณาจากผลของการเปลี่ยนน้ำหนักที่สูญเสียและผลของอัตราการเปลี่ยนน้ำหนักที่สูญเสียกับอุณหภูมิในกระบวนการไฟโรไลซิส และผลของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ กับ สัดส่วนการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส ทาร์และชาร์ พบว่าแร่ธาตุในถ่านหินไม่มีผลต่อการไฟโรไลซิสแต่แร่ธาตุในชีวมวลจะมีผลต่อการไฟโรไลซิสโดยจะลดอุณหภูมิในการเกิดการไฟโรไลซิสลงประมาณ 40-50 องศาเซลเซียส และการชะแร่ธาตุส่งผลให้อัตราการสลายตัวทางความร้อนสูงขึ้น สำหรับในขั้นตอนการไฟโรไลซิสร่วมพบว่าแร่ธาตุในแคลบทำให้อัตราการสลายตัวโดยรวมสูงขึ้นเมื่อผสมกับถ่านหินที่ผ่านการชะแร่ธาตุแล้ว ส่วนแร่ธาตุในชีวมวลพบว่าช่วยลดอุณหภูมิในการไฟโรไลซิสมีผลเช่นเดียวกันในกรณีของการไฟโรไลซิสชีวมวลเพียงอย่างเดียว อีกทั้งการชะแร่ธาตุยังส่งผลให้อัตราการสูญเสียน้ำหนักสูงขึ้นในการไฟโรไลซิสร่วม สำหรับในกระบวนการแกซิฟิเคชันพบว่า แร่ธาตุในถ่านหินโดยเฉพาะแคลเซียมและเหล็กมีบทบาทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเฉพาะปฏิกิริยาออกเตออร์แกนิคส์ ส่งผลให้มีปริมาณแก๊สไฮโดรเจน

และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ส่วนแร่ธาตุในชีวมวลโดยเฉพาะโพแทสเซียมส่งผลต่อการลดการรีพอลิเมอร์ไรเซชันทำให้มีปริมาณถ่านชาร์ลดลง สารระเหยหรือน้ำมันทาร์สูงขึ้น

Lv และคณะ (2010) ศึกษาผลกระทบของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทต่อพฤติกรรมแกซีฟิเคชันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านชาร์จากเซลลูโลส ลิกนินและชีวมวล โดยเปรียบเทียบชีวมวลที่ผ่านการล้างด้วยกรดและไม่ผ่านการล้างด้วยกรด พบว่าการเกิดแกซีฟิเคชันขึ้นอยู่กับโครงสร้างของถ่านชาร์และอันตรกิริยาระหว่างเซลลูโลส/ลิกนินและ AAEMs และยังพบว่าองค์ประกอบเซลลูโลสของชีวมวลที่เพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้อุณหภูมิของการเกิดแกซีฟิเคชันเพิ่มขึ้นและเวลาในการเกิดแกซีฟิเคชันยาวนานขึ้น

Yip และคณะ (2010) ศึกษาอิทธิพลของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทต่อแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของถ่านชาร์จากชีวมวลที่ ถ่านชาร์ถูกเตรียมจากการแยกสลายด้วยความร้อนของส่วนลำต้น, ใบ และเปลือกของต้นยูคาลิปตัสเตี้ย ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส โดยพบว่าโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่อยู่ภายในชีวมวลเกิดการระเหยตัวออกไปประมาณร้อยละ 10-20 ในช่วงการแยกสลายด้วยความร้อนของชีวมวล นอกจากนั้นถ่านชาร์ที่เตรียมได้ยังถูกล้างด้วยกรดเพื่อกำจัดโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท แกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของถ่านชาร์ที่ผ่านและไม่ผ่านการล้างด้วยกรดดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นไอน้ำ 8.2 ร้อยละโดยปริมาตร โดยพบว่าแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของถ่านชาร์ที่มีโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทคงอยู่มีค่าความไวปฏิกิริยาจำเพาะ (Specific reactivity) ที่สูงกว่าถ่านชาร์ที่ผ่านการล้างด้วยกรด โดยที่ถ่านชาร์ที่เตรียมจากส่วนใบของต้นยูคาลิปตัสเตี้ยซึ่งมีปริมาณการคงอยู่ของโพแทสเซียมสูงมีค่าความไวปฏิกิริยาจำเพาะสูงสุด เมื่อเทียบกับถ่านชาร์ที่เตรียมจากส่วนลำต้นและเปลือกของต้นยูคาลิปตัสเตี้ย นอกจากนั้นยังพบว่าปริมาณโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารระเหยและถ่านชาร์

Hayashi และคณะ (2002) ศึกษาอิทธิพลของการล้างและไม่ล้างกรดของถ่านหินลิกไนต์ Yallourn และ Loy Yang ต่อปฏิกิริยาทุติยภูมิของน้ำมันทาร์และถ่านชาร์ที่เกิดจากการแยกสลายตัวทางความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์ drop tube ที่อุณหภูมิ 1073-1173 องศาเซลวิน ในบรรยากาศ

N_2 หรือ H_2O/N_2 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการมีโลหะแอลคาไลและแอลคาไลนัเอิร์ทของอยู่ในถ่านชาร์สามารถตอบสนองอย่างรวดเร็วต่อการรีฟอร์มด้วยไอน้ำ/แก๊สซิเคชันของน้ำมันทาร์/ถ่านชาร์ พร้อมกับยับยั้งการเกิดเขม่า เนื่องจากโลหะแอลคาไลและแอลคาไลนัเอิร์ทเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มน้ำมันด้วยไอน้ำพร้อมทั้งเกิดแก๊สซิเคชันของถ่านชาร์ ในขณะที่การกำจัดโลหะแอลคาไลและแอลคาไลนัเอิร์ทในชีวมวลด้วยการล้างกรด เป็นผลให้เกิดเขม่าจากน้ำมันทาร์มีมากถึงร้อยละ 15-19 และ 6-13 ของคาร์บอนในถ่านหิน ในกรณีของบรรยากาศ N_2 และ H_2O/N_2 ตามลำดับ

Masek และคณะ (2007) ศึกษาการรีฟอร์มด้วยไอน้ำของน้ำมันทาร์จากไพโรไลซิสของ victorian brown coal ในเครื่องปฏิกรณ์ drop tube แบบหนึ่งชั้นตอนและสองชั้นตอน โดยที่น้ำมันทาร์ที่เกิดจากการแยกสลายทางความร้อนจะถูกทำปฏิกิริยารีฟอร์มด้วยไอน้ำและการแตกตัวทางความร้อนในภาวะการมีและไม่มีถ่านชาร์มาเกี่ยวข้องในการทำปฏิกิริยาร่วมกับน้ำมันทาร์ตามลำดับ โซเดียมเป็นแร่ธาตุที่พบมากในถ่านหิน และระเหยตัวได้ร้อยละ 60-80 ในการแยกสลายตัวทางความร้อน อย่างไรก็ตาม โซเดียมที่กระจายตัวอยู่ทั่วภูมิภาคไอไม่ส่งผลต่อการเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มด้วยไอน้ำ ในขณะที่โซเดียมที่คงอยู่บนพื้นผิวของถ่านชาร์จากถ่านหินแสดงอันตรกิริยาต่อการเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มด้วยไอน้ำของน้ำมันทาร์ เป็นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำมันทาร์เป็นแก๊สได้มากถึง 90% น่าจะเป็นผลจากการสะสมตัวเป็นกลุ่มก้อนของโลหะโซเดียม ซึ่งมีขนาดใหญ่พอที่ว่างไวต่อการเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ พบว่า การป้อนไอน้ำมีผลอย่างมากต่อการยับยั้งการเกิดเขม่าจากไอของน้ำมันทาร์ ประมาณ 80% แต่ในภาวะที่ไม่มีแร่ธาตุคงอยู่ในถ่านชาร์พบว่า การป้อนไอน้ำช่วยเพิ่มผลผลิตของ Poly-nuclear aromatics hydrocarbons (PAHs)

Dou และคณะ (2003) ศึกษาการกำจัดโลหะแอลคาไลด้วยตัวดูดซับของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 840 องศาเซลเซียส โดยใช้ NaCl เป็นแหล่งของแอลคาไล ปัจจัยที่ศึกษา คือ ชนิดของตัวดูดซับของแข็ง (ได้แก่ special grade alumina, general alumina mineral, second grade alumina, kaolin, bauxite, acidic white clay และ activated alumina) และเวลาในการดูดซับ ผลการทดลอง พบว่า ที่เวลาในการดูดซับอยู่ที่ 3 ชั่วโมง activated alumina มีประสิทธิภาพการดูดซับอยู่ที่ 98.20% และปริมาณการดูดซับโลหะโซเดียมอยู่ที่ 6.20 mg/g แสดงว่า activated alumina ถือเป็นตัวดูดซับโลหะแอลคาไลที่ดี เนื่องจากวัสดุนี้มีความเป็นรูพรุนสูงจึงทำให้โมเลกุล NaCl สามารถแพร่ผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาภายในรูพรุนได้ จึงทำให้โลหะแอลคาไลทำปฏิกิริยากับพื้นผิว activated alumina ได้มากขึ้น ในขณะที่เมื่อเพิ่มเวลาในการดูดซับจาก 3

ชั่วโมง เป็น 12 ชั่วโมง ทำให้ปริมาณไซเตียมที่เกาะติดมีค่ามากขึ้นจาก 6.20 mg/g เป็น 26 mg/g และที่เวลามากกว่า 12 ชั่วโมง พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงในปริมาณไซเตียมที่เกาะติด แสดงว่าที่เวลา 12 ชั่วโมง ปริมาณไซเตียมมันอิมตัวในการดูดซับด้วย activated alumina

Kosminski และคณะ (2006) ศึกษาปฏิกิริยาระหว่างไซเตียมและเกาลิน โดยนำเกาลินผสมกับไซเตียมแอสซีเตต หรือเกาลินผสมกับไซเตียมคลอไรด์ และคงอัตราส่วนของไซเตียมและเกาลินไว้ที่ 1:10 และได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไซเตียมและเกาลิน เช่น บรรยากาศในการเกิดปฏิกิริยา อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยา จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีชะละลายด้วยน้ำ พบว่า ในบรรยากาศของไอน้ำ ไซเตียมสามารถละลายออกมาได้น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับบรรยากาศของคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจน อีกทั้งยังเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งคาดว่าไอน้ำช่วยให้ไซเตียมเกิดปฏิกิริยากับเกาลินเป็นแบบของเหลว-ของแข็ง และกลายเป็นโครงสร้างไซเตียมอะลูมิเนียมซิลิเกตได้ดีที่สุด ทั้งกรณีของไซเตียมแอสซีเตตและไซเตียมคลอไรด์

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ที่ได้นำเสนอไว้ข้างต้น จะกล่าวถึงหน้าที่ของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่มีผลต่อการเร่งปฏิกิริยาการรีฟอร์มน้ำมันด้วยไอน้ำและแกซิฟิเคชันของถ่านชาร์ โดยการใส่โลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มีอยู่ในหลายรูปแบบ เช่น การผสมเกลือของแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทแบบกายภาพกับชีวมวล การเติมโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทโดยการเคลือบฝังหรือใช้การแลกเปลี่ยนไอออนลงบนชีวมวลหรือถ่านชาร์ และการเติมโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทลงบนวัสดุเบดด้วยเทคนิคการเคลือบฝัง เป็นต้น โดยพบว่าโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทช่วยเร่งปฏิกิริยาการรีฟอร์มน้ำมันด้วยไอน้ำทำให้ปริมาณน้ำมันที่เกิดการสลายตัวได้มากขึ้นและเกิดการแกซิฟิเคชันของถ่านชาร์ได้ดี เป็นผลให้ผลิตภัณฑ์แก๊สเกิดได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนที่มากขึ้น ทำให้โครงสร้างของคาร์บอนสลายตัวได้มากขึ้น เป็นผลให้โลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่ร่องไว้ต่อการเร่งปฏิกิริยาเกิดการปลดปล่อยออกมาได้ นอกจากนั้นโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทอาจเกิดการควบแน่นแล้วไปเกาะตามตำแหน่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ จึงเป็นสาเหตุของการเกิดสแลก การกัดกร่อน และการรวมตัวของเบดในระบบฟลูอิดไดซ์ การกำจัดโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่ระเหยออกมาสามารถทำได้ด้วยการใช้ตัวดูดซับของแข็งหรือวัสดุเบดดักจับไว้บนพื้นผิว ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการดูดซับไอระเหยของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทด้วยวัสดุเบด พร้อมทั้งศึกษาโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์

เอิร์ทที่ดูดซับบนวัสดุเบดต่อการเร่งปฏิกิริยาอีพอกซ์น้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำ โดยจะแสดงค่าความสามารถเชิงเร่งปฏิกิริยาของวัสดุที่ผ่านการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลด์เอิร์ทต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนในชีวมวลไปเป็นทาร์และแก๊ส และแสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

3.1 สารตั้งต้นและสารเคมี

- 1) ฟางข้าวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150-250 ไมโครเมตร
- 2) ไม้กระถินยักษ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150-250 ไมโครเมตร
- 3) เซลลูโลส (Avicel®PH-101) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50 ไมโครเมตรจากบริษัท Fluka
- 4) อะลูมินา (Al_2O_3) ขนาดอนุภาค 150 ไมโครเมตร จากบริษัท Sumitomo Chemical
- 5) ซิลิกาเจล-60 (SiO_2) ขนาดอนุภาค 63-200 ไมโครเมตร จากบริษัท Merck
- 6) ซิลิกาเจล จากบริษัท วิทยาศาสตร์ จำกัด
- 7) แก๊สไนโตรเจน 99.99% จาก บริษัท แพรกแอร์ (ประเทศไทย) จำกัด

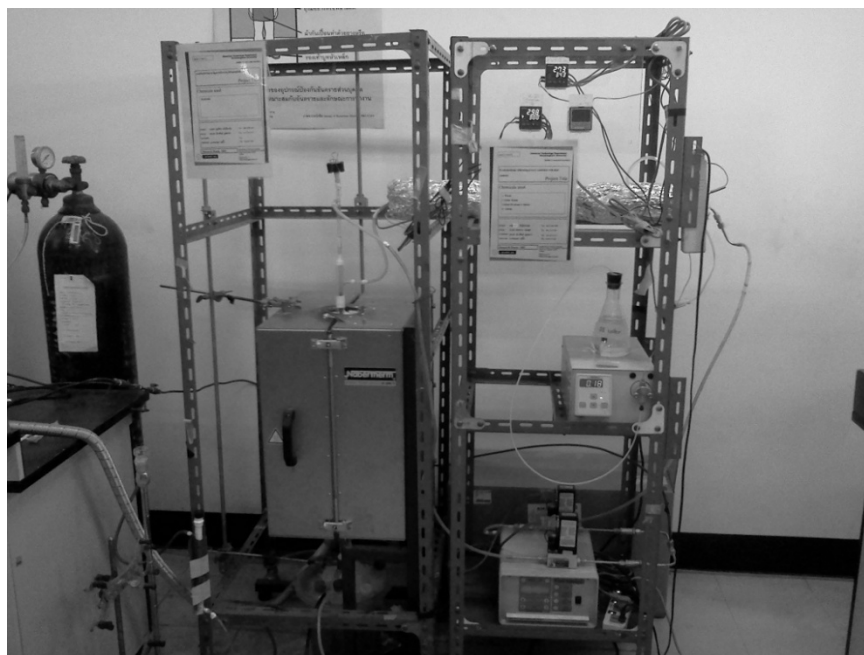
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์

1. เครื่องบดชีวมวลชนิดหยาบ
2. เครื่องบดชีวมวลชนิดละเอียด
3. ตะแกรงร่อนขนาด 150 และ 250 ไมโครเมตร

3.2.2 เครื่องปฏิกรณ์ drop tube/fixed bed แบบสองชั้นตอน

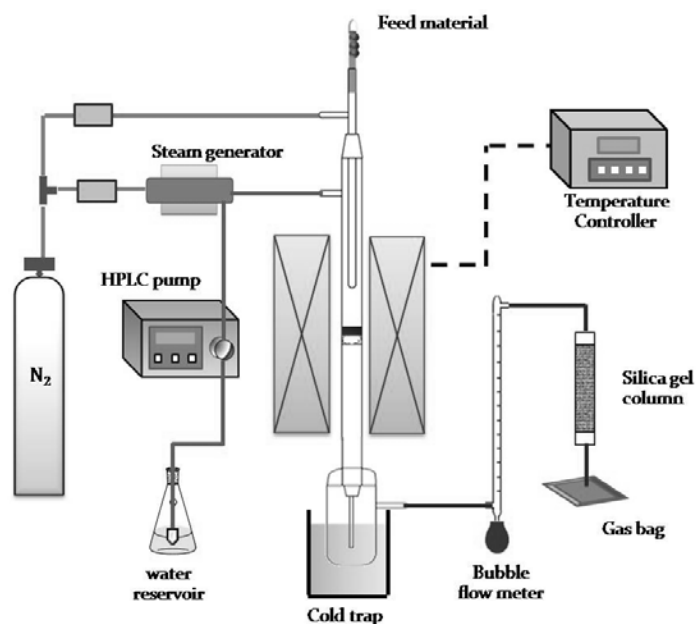
เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้ แสดงดังภาพที่ 3.1 และ 3.2 ดังนี้



ภาพที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ drop tube/fixed bed แบบสองชั้นตอน

- 1) เครื่องปฏิกรณ์ drop-tube fixed-bed แบบสองชั้นตอน ทำจากแก้วควอทซ์ทนความร้อน โดยที่ท่อชั้นนอกมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 มิลลิเมตร สูง 53.5 เซนติเมตร โดยที่บริเวณกึ่งกลางมีการคอดแก้วเพื่อรองรับวัสดุเบด และท่อชั้นในมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 มิลลิเมตร สูง 40 เซนติเมตร โดยที่บริเวณปลายท่อมีการคอดแก้วเพื่อรองรับถ่านชาร์
- 2) อุปกรณ์วัดและควบคุมอัตราการไหล (mass flow controller) ของแก๊สไนโตรเจน โดยควบคุมอัตราการไหลรวมให้คงที่ที่ 120 มิลลิลิตรต่อนาที
- 3) HPLC pump ทำหน้าที่ดูจ่ายน้ำเพื่อผลิตไอน้ำ โดยใช้ร้อยละของไอน้ำ 60 โดยปริมาตร (0.15 มิลลิลิตรต่อนาที)
- 4) เทอร์โมคัพเพิล (thermocouple) ชนิด K
- 5) เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) สำหรับผลิตไอน้ำ
- 6) เครื่องให้ความร้อน (tube furnace) ในการเกิดปฏิกิริยาตามอุณหภูมิที่ต้องการ (600 - 800 องศาเซลเซียส)

- 7) อุปกรณ์ดักจับทาร์ ทำจากแก้ว สูง 30 เซนติเมตร
- 8) อุปกรณ์วัดความชื้น บรจรด้วยซิลิกาเจล
- 9) อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (bubble flow) ของแก๊สขาออก
- 10) ถุงเก็บตัวอย่างแก๊ส (sampling bag) ขนาด 2 ลิตร



ภาพที่ 3.2 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ drop tube/fixed bed แบบสองขั้นต่อน

3.1.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph)

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC- 2014 ดังภาพที่ 3.3 สำหรับใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากเตาปฏิกรณ์ โดยสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊ส แสดงดังตารางที่ 3.1



ภาพที่ 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

แก๊สพา (carrier gas)	แก๊สอาร์กอน (Ar)
ชนิดคอลัมน์	Unibeads C packed column
อุณหภูมิการฉีด (injector temperature)	120 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิคอลัมน์	60, 120 และ 140 องศาเซลเซียส
ระบบตรวจวัด (detector)	ระบบวัดสภาพการนำความร้อน (TCD)

3.3 วิธีการทดลอง

3.2.1 การเตรียมชีวมวล

บดและคัดขนาดฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 ถึง 250 ไมโครเมตร

3.2.2 การวิเคราะห์สมบัติของชีวมวล

1.3.2.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis)

วิเคราะห์แบบประมาณตามวิธีมาตรฐานของ ASTM D3172-3175 ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหยได้ และปริมาณคาร์บอนคงตัว

1.3.2.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis)

วิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และไนโตรเจน (N) ด้วยเครื่อง CHN analyzer

3.2.3 ขั้นตอนในการดูดซับของไอระเหยของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท ด้วยวัสดุเบด

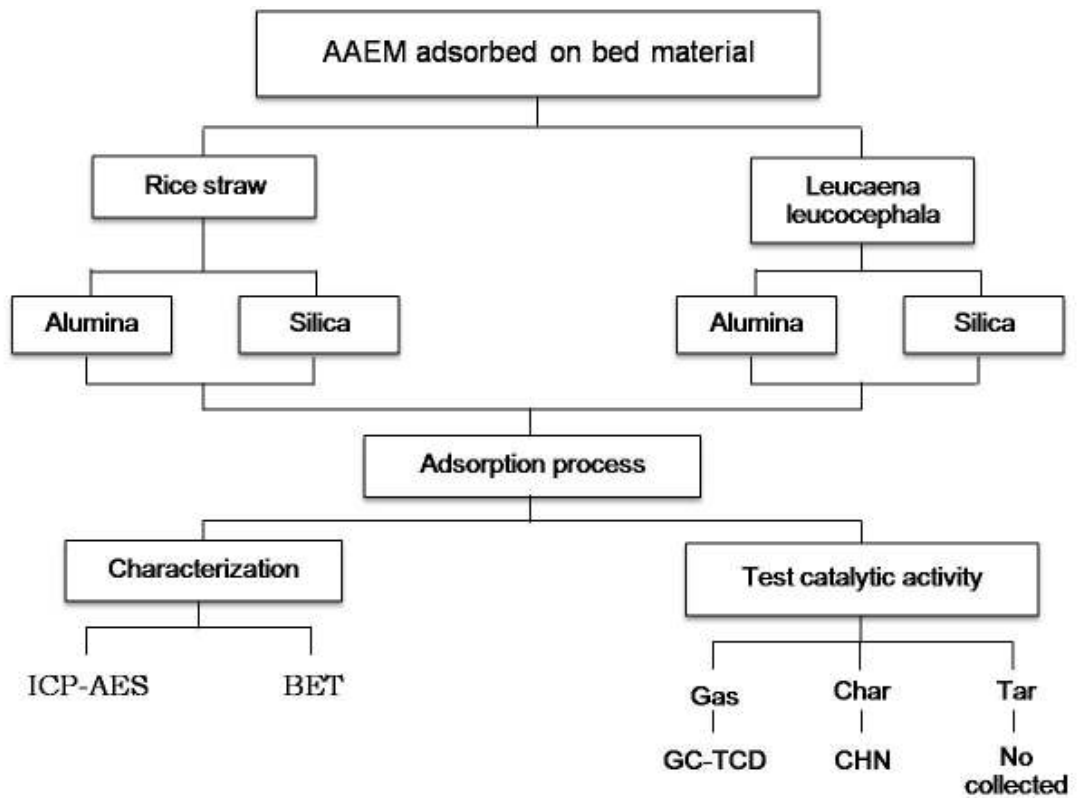
1. เฝ้าวัดดูดเบดในเตาเผาความร้อนสูง Muffle furnace ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
2. นำวัสดุเบดไปวิเคราะห์ปริมาณพื้นที่ผิวด้วยเทคนิค BET (BET surface area) และวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีด้วยเครื่อง Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES)
3. เตรียมฟางข้าวขนาด 150 – 250 ไมโครเมตร
4. ชั่งฟางข้าวหนัก 750 มิลลิกรัม เพื่อเตรียมปล่อยลงในท่อชั้นในของเครื่องปฏิกรณ์ drop tube/fixed bed โดยใส่ quart wool รองบริเวณปลายของท่อชั้นใน เพื่อรองรับสารไว้ไม่ให้ร่วมทำปฏิกิริยา
5. ชั่งวัสดุเบด 0.5 กรัม ใส่ลงในท่อบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาที่รองด้วย quart wool บริเวณปลายท่อ จะได้ความสูงเบดประมาณ 0.5 เซนติเมตร จากนั้นจึงใส่ลงในท่อชั้นนอกของเครื่องปฏิกรณ์ drop tube/fixed bed
6. เปิดปั๊มน้ำเพื่อผลิตไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ตามร้อยละของไอน้ำที่ต้องการ (60 โดยปริมาตร)
7. เปิดแก๊สไนโตรเจนเข้าสู่ระบบด้วยอัตราการไหลเข้าท่อชั้นใน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที และเข้าท่อชั้นนอก 100 มิลลิลิตรต่ออนาที เพื่อไล่อากาศที่อยู่ภายในออก พร้อมทั้งเปิดสวิทช์ขดลวดความร้อน
8. เมื่ออุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ถึงอุณหภูมิที่ต้องการ (600 - 800 องศาเซลเซียส) รอจนเข้าสู่ภาวะคงที่ หลังจากนั้นทำการปล่อยฟางข้าว ปริมาณ 750 มิลลิกรัม ทางด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ เวลาในการทำปฏิกิริยาอยู่ที่ 1 ชั่วโมง

9. เมื่อสิ้นสุดเวลาการทำปฏิกิริยาแล้วให้ปิดเครื่องปั้มน้ำ เครื่องให้ความร้อนสำหรับผลิตไอน้ำ และเครื่องให้ความร้อนในการเกิดปฏิกิริยา
10. เมื่ออุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิต่ำ จึงปิดแก๊สไนโตรเจน และเก็บวัสดุที่ผ่านการดูดซับแล้วและถ่านชาร์ พร้อมกับชั่งน้ำหนัก และเก็บไว้เพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ แสดงดังภาพที่ 3.4
11. ในกรณีของการใช้ไม้กระถินยักษ์เป็นสารป้อนตั้งต้น หรือใช้ซิลิกาเป็นวัสดุเบด ทำตามในขั้นตอนที่ 1-10 เช่นเดียวกัน

3.2.4 การรีฟอร์มน้ำมันนํารถด้วยไอน้ำโดยใช้วัสดุเบดที่ผ่านการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท

1. ชั่งเซลล์ลูโลสหนัก 120 มิลลิกรัม เพื่อเตรียมปล่อยลงในท่อชั้นในของเครื่องปฏิกรณ์ drop tube/fixed bed โดยใส่ quart wool รองบริเวณปลายของท่อชั้นใน เพื่อรองรับชาร์ไว้ไม่ให้รบกวนทำปฏิกิริยา
2. ชั่งวัสดุเบด 0.5 กรัม ใส่ลงในท่อบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาที่รองด้วย quart wool บริเวณปลายท่อ จะได้ความสูงเบดประมาณ 0.5 เซนติเมตร จากนั้นจึงใส่ลงในท่อชั้นนอกของเครื่องปฏิกรณ์ drop tube/fixed bed
3. เปิดปั้มน้ำเพื่อผลิตไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ตามร้อยละของไอน้ำที่ต้องการ (60 โดยปริมาตร)
4. เปิดแก๊สไนโตรเจนเข้าสู่ระบบด้วยอัตราการไหลเข้าท่อชั้นใน 20 มิลลิลิตรต่อนาที และเข้าท่อชั้นนอก 100 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อไล่อากาศที่อยู่ภายในออก พร้อมทั้งเปิดสวิทช์ขดลวดความร้อน
5. เมื่ออุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ถึงอุณหภูมิต้องการ (600 - 800 องศาเซลเซียส) รอจนเข้าสู่ภาวะคงที่ หลังจากนั้นทำการป้อนเซลล์ลูโลส ปริมาณ 120 มิลลิกรัม ทางด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์
6. เก็บแก๊สที่ได้ทุกๆ 15 นาที เป็นเวลา 60 นาที โดยใช้ถุงเก็บแก๊ส ขนาด 2 ลิตรแล้วนำแก๊สที่เก็บได้ไปวิเคราะห์หาชนิดของแก๊สและสัดส่วนของแก๊สแต่ละชนิดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
7. เมื่อสิ้นสุดเวลาการทำปฏิกิริยาแล้วให้ปิดเครื่องปั้มน้ำ เครื่องให้ความร้อนสำหรับผลิตไอน้ำ และเครื่องให้ความร้อนในการเกิดปฏิกิริยา

8. เมื่ออุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิห้อง จึงปิดแก๊สไนโตรเจน และเก็บถ่านชาร์ พร้อมกับ ชั่งน้ำหนัก และเก็บไว้เพื่อนำไปวิเคราะห์ CHN analyzer



ภาพที่ 3.4 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ และการทดสอบต่างๆ

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่ได้รายงานว่าโลหะแอลคาไลและแอลคาไลเอิร์ท (Alkali and alkaline earth metals; AAEMs) มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาอีพอกซ์น้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำและแก๊สฟิเคชันของถ่านชาร์ (Hayashi และคณะ, 2002 และ Wang และคณะ, 2009) แต่โลหะแอลคาไลและแอลคาไลเอิร์ทดังกล่าวเกิดการสูญเสียหรือปลดปล่อยออกมาภายใต้ภาวะอุณหภูมิไพโรไลซิสและแก๊สฟิเคชัน เป็นผลให้ไม่สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาได้อีกทั้งการปลดปล่อยของโลหะเหล่านี้ยังก่อให้เกิดปัญหาในระบบการแปลงสภาพชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการกำจัดโลหะแอลคาไลและแอลคาไลเอิร์ทในวัฏภาคไอที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ด้วยเทคนิคการดูดซับด้วยวัสดุของแข็ง โดยใช้แกมมาอะลูมินาและซิลิกาเจลเป็นวัสดุเบดในการดูดซับ พร้อมทั้งศึกษาผลการเร่งปฏิกิริยาอีพอกซ์น้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลเอิร์ทที่ดูดซับบนวัสดุเบด โดยทำการศึกษาผลของปัจจัยที่มีต่อพฤติกรรมการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลเอิร์ท ได้แก่ ชนิดชีวมวล ชนิดวัสดุเบด ผลของอุณหภูมิในการดูดซับ อัตราการไหลของแก๊สตัวพา และจำนวนครั้งในการดูดซับ และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลเอิร์ทในการเร่งปฏิกิริยาอีพอกซ์น้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำ ได้แก่ อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา อัตราการไหลของแก๊สตัวพาในการดูดซับ และจำนวนครั้งในการดูดซับ

การแสดงผลและวิเคราะห์ผลการทดลองในงานวิจัยนี้ได้กำหนดสัญลักษณ์ของชีวมวลและวัสดุเบดก่อนและหลังการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลเอิร์ทจากฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ที่ดำเนินการในภาวะต่างกัน ไว้ดังตารางที่ 4.1

ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ดังนี้ ส่วนที่ 1 คือ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าว ไม้กระถินยักษ์ และเซลลูโลส ได้แก่ การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ส่วนที่ 2 คือ ผลการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุเบดก่อนใช้ในการทดลองด้วยเครื่อง Surface area and porosity analyzer ส่วนที่ 3 คือ ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อการปลดปล่อยของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลเอิร์ท ส่วนที่ 4 คือ พฤติกรรมการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลเอิร์ทในวัฏภาคไอที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ด้วยเทคนิคดูดซับด้วยวัสดุของแข็ง และส่วนสุดท้าย คือ ผล

ของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่ดูดซับบนวัสดุเบดในการรีฟอร์มน้ำมันนํ้าด้วยไอน้ำต่อการแตกตัวน้ำมันนํ้าและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส โดยเลือกเซลลูโลสเป็นสารตั้งต้นในการศึกษาการเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักในชีวมวลที่ผลิตน้ำมันนํ้าเป็นผลิตภัณฑ์หลักภายใต้กระบวนการไพโรไลซิส อีกทั้งมีปริมาณขององค์ประกอบเถ้าต่ำมาก ทำให้ไม่มีผลกระทบของแร่ธาตุจากสารป้อนในการศึกษาผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท ดังนั้นเซลลูโลสจึงเหมาะสมที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบป้อนในการทดลอง เพื่อศึกษาการเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มน้ำมันนํ้าด้วยไอน้ำของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่ดูดซับบนวัสดุเบด

ตารางที่ 4.1 สัญลักษณ์ของชีวมวลและวัสดุเบดก่อนและหลังการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ที่ดำเนินการในภาวะต่างกัน

สัญลักษณ์	ชีวมวล	วัสดุเบด	อุณหภูมิในการดูดซับ
R	ฟางข้าว	-	-
L	ไม้กระถินยักษ์	-	-
A	-	อะลูมินา	-
S	-	ซิลิกา	-
RA6	ฟางข้าว	อะลูมินา	600 °C
RA7	ฟางข้าว	อะลูมินา	700 °C
RA8	ฟางข้าว	อะลูมินา	800 °C
LA6	ไม้กระถินยักษ์	อะลูมินา	600 °C
LA7	ไม้กระถินยักษ์	อะลูมินา	700 °C
LA8	ไม้กระถินยักษ์	อะลูมินา	800 °C
RS6	ฟางข้าว	ซิลิกา	600 °C
RS7	ฟางข้าว	ซิลิกา	700 °C
RS8	ฟางข้าว	ซิลิกา	800 °C
LS6	ไม้กระถินยักษ์	ซิลิกา	600 °C
LS7	ไม้กระถินยักษ์	ซิลิกา	700 °C
LS8	ไม้กระถินยักษ์	ซิลิกา	800 °C

4.1. องค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าว, ไม้กระถินยักษ์ และเซลลูโลส

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟางข้าว, ไม้กระถินยักษ์ และเซลลูโลส ทั้งแบบประมาณและแบบแยกธาตุ แสดงดังตารางที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 พบว่าฟางข้าวมีปริมาณขององค์ประกอบโดยรวมทั้งโลหะโซเดียมและโพแทสเซียมในปริมาณมาก ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาในเรื่องของการเกิดสแลก การกัดกร่อน และรวมตัวของเบด ในขณะที่เซลลูโลสมีปริมาณสารระเหยเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูงถึงร้อยละ 86.66 ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมา (Hosoya และคณะ, 2008) กล่าวว่า เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักในชีวมวลที่ผลิตน้ำมันทาร์เป็นผลิตภัณฑ์หลักภายใต้กระบวนการไพโรไลซิส อีกทั้งมีปริมาณขององค์ประกอบเถ้าต่ำมาก ทำให้ไม่มีผลกระทบของแร่ธาตุจากสารปนเปื้อนในการศึกษาผลเชิงเร่งปฏิกิริยาของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท ดังนั้นเซลลูโลสจึงเหมาะสมที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบป้อนในการทดลอง เพื่อศึกษาการเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มม่าน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่ดูดซับบนวัสดุเบด

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของฟางข้าว ไม้กระถินยักษ์ และเซลลูโลส

องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ชนิดของเชื้อเพลิง		
	ฟางข้าว	ไม้กระถินยักษ์	เซลลูโลส
ความชื้น	6.43	9.69	3.48
เถ้า	11.22	2.06	0.03
สารระเหย	62.05	79.48	86.66
คาร์บอนคงตัว ¹	20.30	8.77	9.83

¹ คาร์บอนคงตัว = 100 - ความชื้น - เถ้า - สารระเหย

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของฟางข้าว, ไม้กระถินยักษ์ และ เซลลูโลส

ธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนักของชีวมวล)	ชนิดของเชื้อเพลิง		
	ฟางข้าว	ไม้กระถินยักษ์	เซลลูโลส
คาร์บอน ^{1,2}	44.57	50.00	51.96
ไฮโดรเจน ^{1,2}	6.98	6.19	7.99
ไนโตรเจน ^{1,2}	0.90	0.80	0.09
ออกซิเจน ^{1,2,3}	47.55	43.01	39.66

¹ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHN analyzer

² daf = dry ash free basis

³ ออกซิเจน = 100 – คาร์บอน – ไฮโดรเจน – ไนโตรเจน

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์โลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท (AAEM analysis) ของฟางข้าว, ไม้กระถินยักษ์ และเซลลูโลส

ธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนักของชีวมวล)	ชนิดของเชื้อเพลิง		
	ฟางข้าว	ไม้กระถินยักษ์	เซลลูโลส
โซเดียม ^{4,5}	2.63	2.49	n.d. ⁶
โพแทสเซียม ^{4,5}	1.67	1.11	n.d. ⁶
แคลเซียม ^{4,5}	0.68	0.80	n.d. ⁶
แมกนีเซียม ^{4,5}	0.22	0.17	n.d. ⁶

⁴ db = dry basis

⁵ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-AES

⁶ n.d. = not determination (ไม่ได้ทำการวิเคราะห์)

4.2. สมบัติของวัสดุเบดก่อนใช้

การวิเคราะห์ปริมาณพื้นผิวของวัสดุเบดก่อนใช้ ด้วยเทคนิค Brunauer, Emmett, Teller (BET) แสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่าวัสดุเบดอะลูมินาและซิลิกาที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้ภาวะบรรยากาศของอากาศ พบว่า มีพื้นที่ผิว 90.69 และ 170.52 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ การกำจัดโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทด้วยวัสดุเบดอย่างมีประสิทธิภาพ วัสดุเบดต้องมีพื้นที่ผิวสูงและมีโครงสร้างที่มีความเป็นรูพรุน ซึ่งช่วยในการดักจับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท (Dou และคณะ, 2003) อีกทั้งวัสดุเบดทั้งสองนี้มีความแข็งแรงและนิยมใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์เบด ดังนั้นอะลูมินาและซิลิกาจึงเหมาะสมในการนำมาเป็นวัสดุเบดสำหรับการศึกษานางานวิจัยนี้

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวของวัสดุเบดก่อนใช้ ด้วยเทคนิค BET

	วัสดุเบด	
	อะลูมินา	ซิลิกา
พื้นที่ผิว (ตร.ม./กรัม)	90.69	170.52
ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม)	0.238	0.386
ขนาดรูพรุน (อังสตรอม)	80.99	77.64

4.3. การปลดปล่อยของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทภายใต้การไพโรไลซิสของฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์

งานวิจัยนี้ทำการไพโรไลซิสชีวมวลในท่อชั้นในของเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งแบบสองขั้นตอน (two stage drop tube/fixed bed) โดยทำการป้อนชีวมวลปริมาณ 0.75 กรัม และป้อนแก๊สไนโตรเจนด้วยอัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที พร้อมทั้งให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส เพื่อทำการศึกษามวลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อการปลดปล่อยโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากชีวมวล ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสของฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ต่อร้อยละการปลดปล่อยของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท แสดงในภาพที่ 4.1 โดยร้อยละการระเหยคำนวณตามสมการที่ 4.1 จากผลการทดลอง พบว่าร้อยละการปลดปล่อยโลหะแอลคาไล

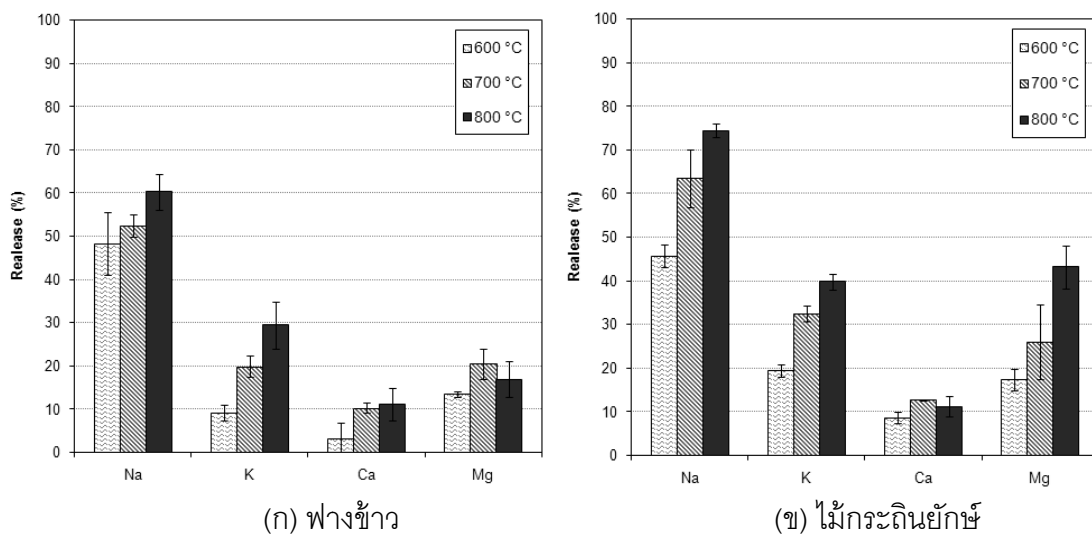
และแอลคาไลน์เอิร์ทที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิไพโรไลซิสที่เพิ่มขึ้นจาก 600 จนถึง 800 องศาเซลเซียส ทั้งในกรณีของฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ จากสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ อุณหภูมิจุดหลอมเหลวและอุณหภูมิจุดเดือดของโลหะหรือสารประกอบเกลือแต่ละตัว แสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส การปลดปล่อยของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทน่าจะเกิดผ่านการสลายตัวของเกลืออะซิเตต ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Quyn และคณะ (2002) ที่กล่าวว่า การปลดปล่อยของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส เป็นผลจากสลายตัวของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่จับกับหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนในโครงสร้างอินทรีย์ เช่น รูปคาร์บอกซิลิก และอะซิเตต เป็นต้น แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส โลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทน่าจะเกิดการสลายตัวของเกลืออนินทรีย์ในแก้ว (Davidsson และคณะ, 2002) อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลว แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิจุดเดือด แสดงให้เห็นว่าโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทถูกปลดปล่อยอยู่ในรูปของอนุภาคขนาดเล็ก (Fine particle) มากกว่าอยู่ในวัฏภาคไอ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าร้อยละการปลดปล่อยของโลหะโซเดียมและโพแทสเซียมในภาพที่ 4.1 พบว่า ค่าร้อยละการปลดปล่อยของโลหะโซเดียมและโพแทสเซียมจากไม้กระถินยักษ์ที่ทุกช่วงอุณหภูมิมีค่าสูงกว่าในกรณีของฟางข้าวอยู่ประมาณ 10 แต่เมื่อพิจารณาถึงปริมาณโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่ปลดปล่อยออกมาจากการไพโรไลซิสชีวมวล แสดงดังตารางที่ 4.7 พบว่าการไพโรไลซิสฟางข้าวที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จะให้ปริมาณโลหะโพแทสเซียมที่ปลดปล่อยออกมา 4.08 มิลลิกรัม ซึ่งมากกว่าโลหะโพแทสเซียมที่ปลดปล่อยจากไม้กระถินยักษ์ ส่วนโลหะแคลเซียมจากฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ และโลหะแมกนีเซียมจากฟางข้าวจะมีแนวโน้มร้อยละการปลดปล่อยไม่เปลี่ยนแปลงกับการเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากอิทธิพลของแร่ธาตุซิลิกา (SiO_2) ในองค์ประกอบแก้วของถ่านชาร์ที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท กลายเป็นสารประกอบซิลิเกต ตารางที่ 4.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ของการเกิดสารประกอบซิลิเกต พบว่า โลหะแคลเซียมและแมกนีเซียมมีค่าพลังงานอิสระของกิบส์ของปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบซิลิเกต มีค่าติดลบแสดงว่าโลหะแคลเซียมและแมกนีเซียมชอบที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิกา ในขณะที่โลหะโพแทสเซียมมีค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ของการเกิดสารประกอบซิลิเกตต่ำกว่าโลหะแคลเซียมและแมกนีเซียม แสดงให้เห็นว่าโลหะโพแทสเซียมชอบที่จะเกิดเป็นสารประกอบซิลิเกตได้น้อยกว่า

สมการในการคำนวณหาร้อยละการปลดปล่อยของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในงานวิจัยนี้คำนวณจากสมการ 4.1 ดังนี้

$$\% \text{ Release} = \left(\frac{\text{AAEM}_{\text{biomass}} - \text{AAEM}_{\text{char}}}{\text{AAEM}_{\text{biomass}}} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

โดยที่ $\text{AAEM}_{\text{biomass}}$ คือ ปริมาณ AAEM ในชีวมวล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

$\text{AAEM}_{\text{char}}$ คือ ปริมาณ AAEM คงอยู่ในถ่านชาร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)



ภาพที่ 4.1 ผลของร้อยละการปลดปล่อยของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจาก (ก) ฟางข้าว และ (ข) ไม้กระถินยักษ์ภายใต้การไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียสภายในท่อชั้นในที่มีการป้อนแก๊สไนโตรเจนด้วยอัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิจุดหลอมเหลวและจุดเดือดของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในรูปแบบธาตุอิสระ, สารประกอบเกลืออะซิเตตและคลอไรด์ (Binnewies and Milke, Thermochemical Data of Elements and Compounds, 2002)

	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ชนิดธาตุ			
		โซเดียม	โพแทสเซียม	แคลเซียม	แมกนีเซียม
ธาตุอิสระ	จุดหลอมเหลว	98	64	842	651
	จุดเดือด	883	774	1501	1097
สารประกอบ เกลือคลอไรด์	จุดหลอมเหลว	802	776	772	712
	จุดเดือด	1413	1500	2006	1412
สารประกอบ เกลืออะซิเตต	จุดหลอมเหลว	324	292	160	80
	จุดเดือด	881	-	สลายตัว	-

ตารางที่ 4.7 ปริมาณโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่ปลดปล่อยออกมาจากการไฟโรไลซิส ฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส

	อุณหภูมิไฟโรไลซิส (องศาเซลเซียส)	ปริมาณโลหะที่ปลดปล่อยจากไฟโรไลซิสทั้งหมด (มิลลิกรัม)	
		ฟางข้าว	ไม้กระถินยักษ์
โซเดียม	600	10.50	7.76
	700	11.25	11.35
	800	12.63	13.54
โพแทสเซียม	600	1.64	1.66
	700	2.92	2.74
	800	4.08	3.35
แคลเซียม	600	0.16	0.53
	700	0.52	0.78
	800	0.56	0.69
แมกนีเซียม	600	0.23	0.24
	700	0.34	0.35
	800	0.28	0.57

ตารางที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ของการเกิดสารประกอบซิลิเกต (Okuno และคณะ, 2005)

reaction	ΔG° , kJ/mol	
	500 °C	800 °C
$K_2O + SiO_2 = K_2SiO_3$	-0.3	-0.3
$MgO + SiO_2 = MgSiO_3$	-35.4	-33.1
$2MgO + SiO_2 = Mg_2SiO_4$	-62.7	-60.9
$CaO + SiO_2 = CaSiO_3 (\alpha)$	-88.7	-88.6
$2CaO + SiO_2 = Ca_2SiO_4$	-130.2	-131.7

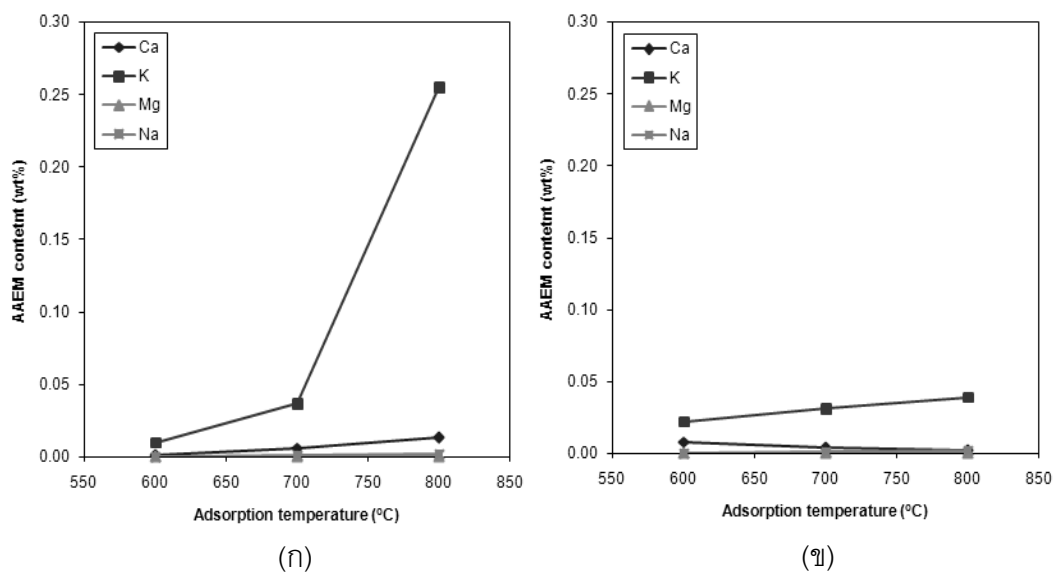
4.4. พฤติกรรมการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในวัสดุภาคไอด้วยเทคนิคการดูดซับด้วยวัสดุเบด

4.4.1. ผลของอุณหภูมิในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในวัสดุภาคไอด้วยเทคนิคการดูดซับด้วยวัสดุเบด

โลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทถูกปลดปล่อยออกจากชีวมวลภายใต้ภาวะไพโรไลซิสในท่อชั้นในของเครื่องปฏิกรณ์ drop tube fixed bed แบบสองชั้นตอน ที่มีการป้อนแก๊สไนโตรเจนด้วยอัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่ออนาที จะถูกกำจัดด้วยเทคนิคการดูดซับ ในงานวิจัยนี้จึงทำการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในวัสดุภาคไอด้วยอะลูมินาและซิลิกา โดยการบรรจุวัสดุเบดปริมาณ 0.5 กรัม ในท่อชั้นนอกของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการป้อนไอน้ำและมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600.700 และ 800 องศาเซลเซียส เพื่อจะศึกษาผลของอุณหภูมิในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในวัสดุภาคไอด้วยอะลูมินา

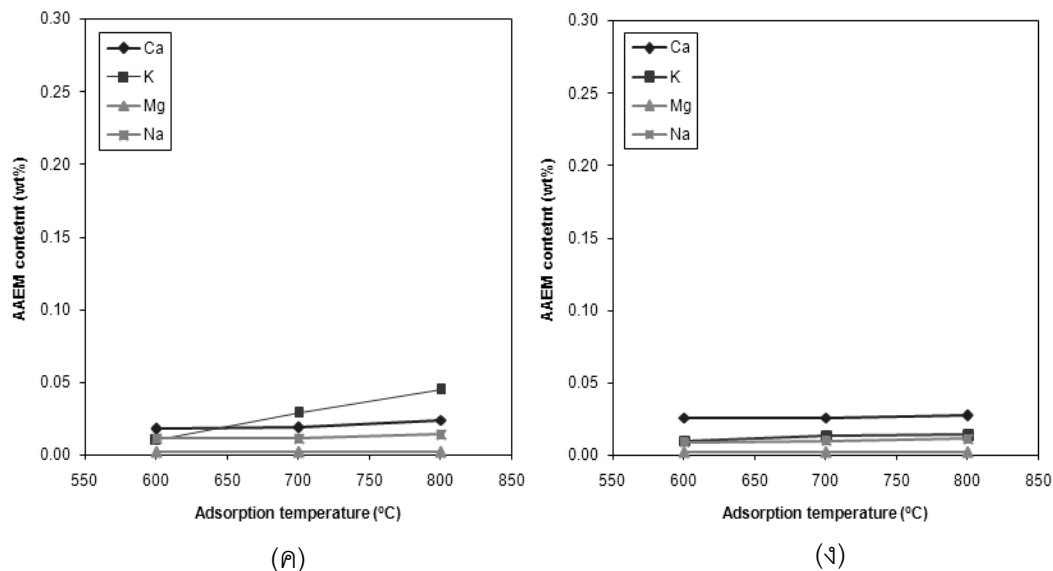
ผลของอุณหภูมิในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในวัสดุภาคไอด้วยอะลูมินาและซิลิกาต่อปริมาณโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่เกาะบนวัสดุเบด แสดงดังภาพที่ 4.2 เมื่อพิจารณาระบบที่ใช้อะลูมินาเป็นวัสดุเบด พบว่าโลหะโพแทสเซียมเท่านั้นที่สามารถถูกดูดซับบนอะลูมินาได้ (ดังภาพที่ 4.2 (ก และ ข)) นอกจากนั้นยังมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.010 เป็นร้อยละ 0.255 โดยน้ำหนัก และเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.022 เป็นร้อยละ 0.039 โดยน้ำหนัก ในกรณีของการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวและไม้กระถิน

ยักษ์ ตามลำดับ ในขณะที่ระบบที่ใช้ซิลิกาเป็นวัสดุเบดสำหรับการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ ดังรูปที่ 4.2 (ค) และ (ง) พบว่า โลหะแคลเซียม แมกนีเซียม และโซเดียมมีปริมาณที่ถูกดูดซับบนวัสดุเบดที่ใกล้เคียงกัน อีกทั้งไม่มีการเปลี่ยนแปลงกับการเพิ่มอุณหภูมิในการดูดซับ อย่างไรก็ตาม พบว่า การดูดซับโลหะโพแทสเซียมจากฟางข้าวด้วยซิลิกามีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการดูดซับจาก 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส ต่างจากในกรณีของการใช้ไม้กระถินยักษ์ที่ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงระหว่างปริมาณโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่ถูกดูดซับบนวัสดุเบดกับอุณหภูมิ เหตุผลที่การดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากการไพโรไลซิสฟางข้าวจะให้ปริมาณโลหะโพแทสเซียมที่ถูกดูดซับบนวัสดุเบดทั้งอะลูมินาและซิลิกาได้มากกว่าการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากการไพโรไลซิสไม้กระถินยักษ์ เป็นผลมาจากปริมาณโพแทสเซียมที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากการไพโรไลซิสฟางข้าวมีมากกว่าไม้กระถินยักษ์ จากที่ได้กล่าวมาแล้วในตารางที่ 4.6 สาเหตุที่แร่ธาตุถูกดูดซับได้เพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิน่าจะเป็นผลจากเพิ่มปริมาณแร่ธาตุที่ถูกปลดปล่อยจากการสลายตัวของชีวมวลมากกว่า เนื่องจากเตาเผาที่ให้ความร้อนแก่ส่วนของการสลายตัวของชีวมวลและส่วนของการดูดซับเป็นส่วนเดียวกัน ดังนั้นควรแยกเตาเผาที่ให้ความร้อนแก่ส่วนของการสลายตัวของชีวมวลและส่วนของการดูดซับแร่ธาตุออกจากกัน เพื่อจะศึกษาผลของอุณหภูมิในการดูดซับได้อย่างชัดเจนมากขึ้น โดยคงอุณหภูมิในการสลายตัวของชีวมวลเอาไว้



ภาพที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในวัสดุเบดจาก (ก) ฟางข้าวด้วยอะลูมินา (ข) ไม้กระถินยักษ์ด้วยอะลูมินา (ค) ฟางข้าวด้วยซิลิกา และ (ง) ไม้กระถิน

ยักซ์ด้วยซิลิกา ต่อปริมาณโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่เกาะบนเบด ที่อุณหภูมิ 600-800 องศาเซลเซียส ใช้น้ำร้อยละ 60 โดยปริมาตร อัตราการไหลของแก๊สตัวพา 120 มิลลิลิตรต่อนาที ในการดูดซับ 1 ครั้ง



ภาพที่ 4.2 (ต่อ) ผลของอุณหภูมิในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในวัฏภาคไอ จาก (ก) ฟางข้าวด้วยอะลูมินา (ข) ไม้กระถินยักซ์ด้วยอะลูมินา (ค) ฟางข้าวด้วยซิลิกา และ (ง) ไม้กระถินยักซ์ด้วยซิลิกา ต่อปริมาณโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่เกาะบนเบด ที่อุณหภูมิ 600-800 องศาเซลเซียส ใช้น้ำร้อยละ 60 โดยปริมาตร อัตราการไหลของแก๊สตัวพา 120 มิลลิลิตรต่อนาที ในการดูดซับ 1 ครั้ง

อิทธิพลของการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทด้วยวัสดุเบดต่อปริมาณพื้นที่ผิวของวัสดุเบด แสดงดังตารางที่ 4.9 พบว่า วัสดุเบดทั้งสองมีแนวโน้มเหมือนกันคือ มีปริมาณพื้นที่ผิวลดลง รูปพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการพังทลายของโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างที่มีรูปพรุนเป็นโครงสร้างที่หนาแน่นขึ้นภายใต้อุณหภูมิสูง อะลูมินาเมื่อผ่านการดูดซับที่อุณหภูมิในการดูดซับ 800 องศาเซลเซียส มีปริมาณพื้นที่ผิวลดลงประมาณร้อยละ 20 ของอะลูมินาที่ไม่ได้ผ่านการดูดซับ ในขณะที่ซิลิกาเมื่อผ่านการดูดซับแล้วธาตุที่ผ่านการดูดซับที่อุณหภูมิเดียวกันจะมีปริมาณพื้นที่ผิวลดลงมากถึงร้อยละ 70 ของซิลิกาที่ไม่ได้ผ่านการดูดซับ จากผลในส่วนนี้สามารถบอกได้ว่าซิลิกาเกิดการพังทลายของโครงสร้างที่มากกว่าอะลูมินา

ตารางที่ 4.9 ผลของการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทด้วยวัสดุเบดต่อปริมาณพื้นที่ผิวของวัสดุเบด

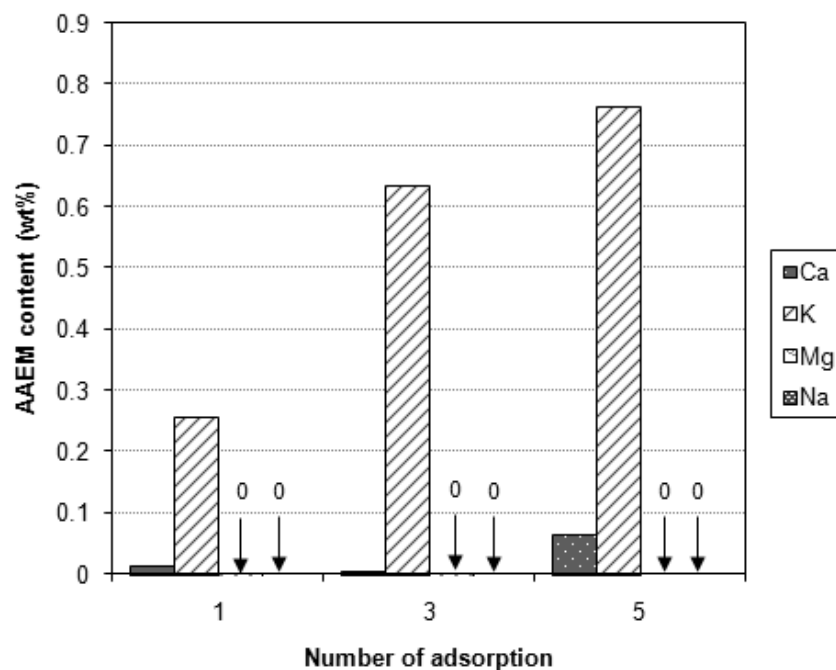
วัสดุเบด	พื้นที่ผิว (ตร.ม./กรัม)	ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม)	ขนาดรูพรุน (อังสตรอม)
A	90.70	0.238	80.99
RA8	73.46	0.268	127.73
LA8	67.92	0.222	113.07
S	170.52	0.386	77.64
RS8	38.46	0.209	237.28
LS8	37.82	0.236	287.80

4.4.2. ผลของจำนวนครั้งในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในวัฏภาคไอด้วยเทคนิคการดูดซับด้วยวัสดุเบด

เวลาในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทด้วยวัสดุเบดมีผลต่อปริมาณโลหะที่ถูกดูดซับไว้ได้เช่นกัน โดยโลหะที่ถูกดูดซับไว้ได้จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นกับเวลาในการดูดซับที่เพิ่มขึ้น (Dou และคณะ, 2003) อย่างไรก็ตามเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบกะ (Batch) ดังนั้นจึงไม่สามารถศึกษาผลของเวลาในการดูดซับได้เหมือนกับเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (Continuous reactor) ทำให้ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การเพิ่มจำนวนครั้งในการดูดซับโดยการนำอะลูมินามาผ่านการดูดซับเพิ่มจาก 1 ครั้ง เป็น 3 ครั้ง และ 5 ครั้งแทน โดยใช้อุณหภูมิในการดูดซับอยู่ที่ 800 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในขั้นตอนการปลดปล่อยโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในท่อนั้นในอยู่ที่ 20 มิลลิลิตร และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในขั้นตอนการดูดซับอยู่ที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

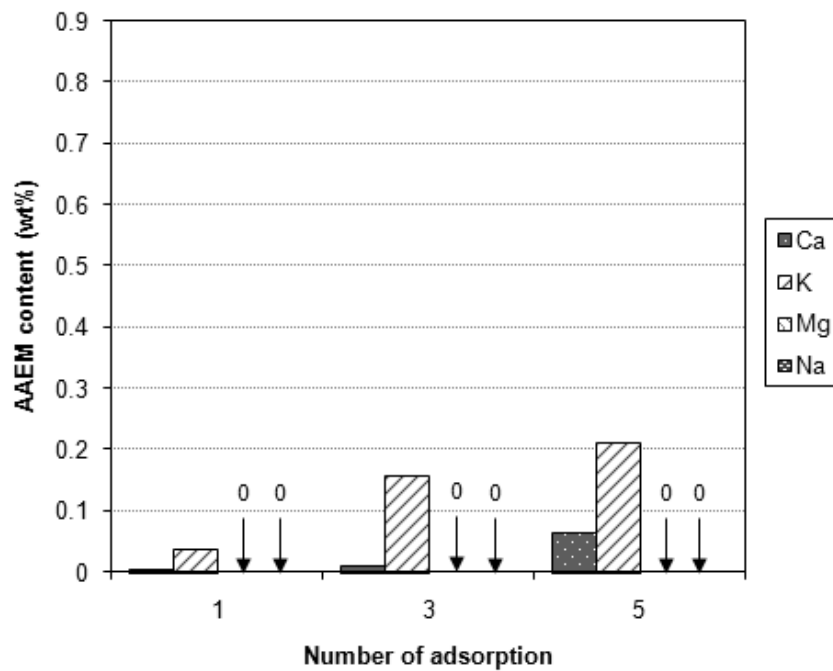
ผลของการเพิ่มจำนวนครั้งในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทด้วยวัสดุเบดต่อปริมาณโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่เกาะบนวัสดุเบด แสดงในภาพที่ 4.3 พบว่าการเพิ่มจำนวนครั้งในการดูดซับด้วยอะลูมินาจาก 1, 3 และ 5 ครั้ง เป็นผลให้ปริมาณโลหะโพแทสเซียมถูกดูดซับได้มากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ในกรณีของฟางข้าว เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.25 เป็น

ร้อยละ 0.76 โดยน้ำหนัก กรณีของไม้กระถินยักษ์ เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.04 เป็นร้อยละ 0.21 โดยน้ำหนัก โดยที่การเพิ่มจำนวนครั้งในการดูดซับในกรณีของฟางข้าวพบว่าไม่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตรง ในขณะที่กรณีของไม้กระถินยักษ์มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นเชิงเส้นที่ใกล้เคียงกับทางทฤษฎี ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจากที่เกิดการเปลี่ยนเป็นโครงสร้างที่หนาแน่นขึ้น (ดังตารางที่ 4.10) ทำให้พื้นที่ผิวที่ว่องไวในการดักจับโลหะโพแทสเซียมไว้น้อยลง แต่ในกรณีของไม้กระถินยักษ์มีแนวโน้มเป็นเชิงเส้น เนื่องจากอะลูมินาดูดซับโลหะโพแทสเซียมจากไม้กระถินยักษ์ได้ต่ำและเมื่อเพิ่มจำนวนครั้งโลหะโพแทสเซียมมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าตำแหน่งว่องไวในการดักจับยังคงมีเพียงพอถึงแม้ว่าการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของวัสดุเบดเกิดได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามกรณีของไม้กระถินยักษ์ก็ให้ปริมาณโลหะโพแทสเซียมที่ถูกดูดซับน้อยกว่ากรณีของฟางข้าวถึงแม้ว่าจะเพิ่มการดูดซับเป็น 5 ครั้ง ส่วนโลหะแคลเซียมถูกดูดซับได้เพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 0.06 ร้อยละโดยน้ำหนัก ทั้งในกรณีของฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ ที่จำนวนการดูดซับ 5 ครั้ง



(ก)

ภาพที่ 4.3 แสดงผลของการเพิ่มจำนวนครั้งในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในวัฏภาคไอจาก (ก) ฟางข้าวด้วยอะลูมินา และ (ข) ไม้กระถินยักษ์ด้วยอะลูมินา ต่อปริมาณโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่เกาะบนเบด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ใต้น้ำร้อยละ 60 โดยปริมาตร อัตราการไหลของแก๊สตัวพา 120 มิลลิลิตรต่ออนาที



(ข)

ภาพที่ 4.3 (ต่อ) ผลของการเพิ่มจำนวนครั้งในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในวัสดุภาคไอจาก (ก) ฟางข้าวด้วยอะลูมินา และ (ข) ไม้กระถินยักษ์ด้วยอะลูมินา ต่อปริมาณโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่เกาะบนเบด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ใช้น้ำร้อยละ 60 โดยปริมาตร อัตราการไหลของแก๊สดำพา 120 มิลลิลิตรต่อนาที

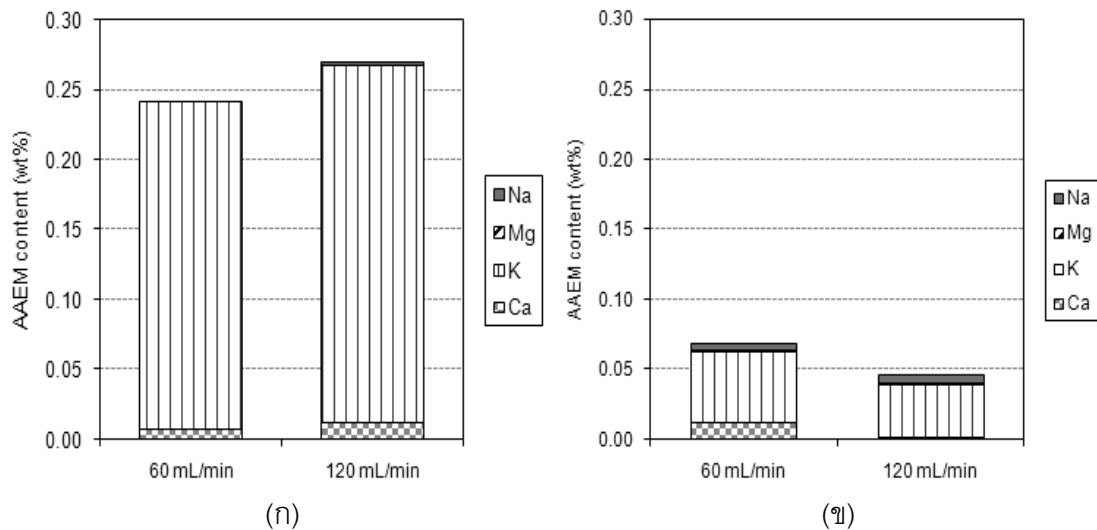
ตารางที่ 4.10 ผลของจำนวนครั้งในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทต่อปริมาณพื้นที่ผิวของวัสดุเบด

วัสดุเบด	จำนวนครั้งในการดูดซับ	พื้นที่ผิว (ตร.ม./กรัม)	ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม)	ขนาดรูพรุน (อังสตรอม)
RA8	1	73.46	0.268	127.73
	3	54.00	0.213	157.50
LA8	1	67.92	0.222	113.07
	3	42.58	0.223	200.53

4.4.3. ผลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพาในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในวัฏภาคไอด้วยเทคนิคการดูดซับด้วยวัสดุเบด

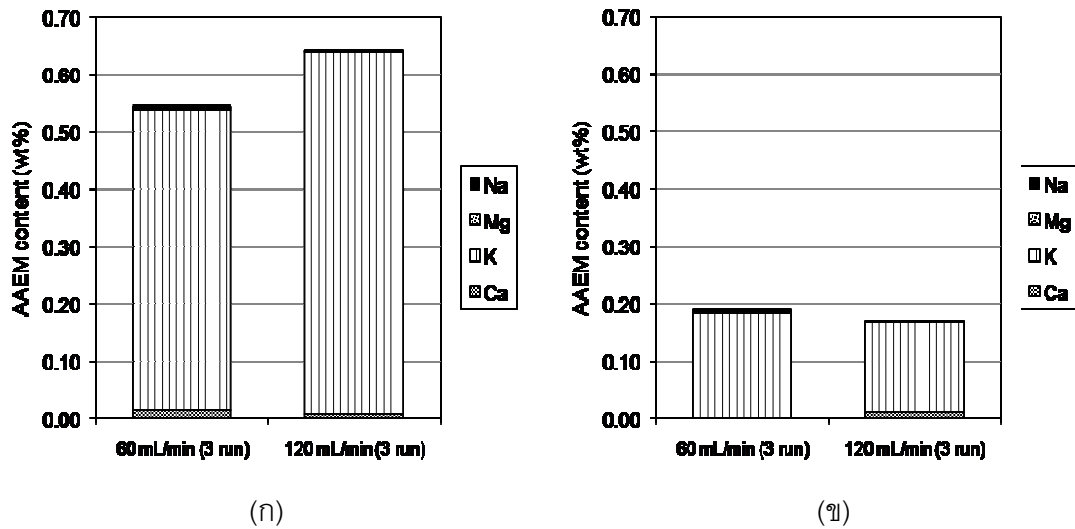
เวลาสัมผัส (Contact time) ถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของตัวทำปฏิกิริยาในหลายๆ กระบวนการ รวมถึงกระบวนการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทด้วยเช่นเดียวกัน (Tran และคณะ, 2005) เวลาสัมผัสในการเกิดปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดหนึ่งสามารถปรับได้โดยการเปลี่ยนความสูงของเบดหรืออัตราการไหลของแก๊สตัวพา อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้การเพิ่มความสูงของเบดหรือการเพิ่มปริมาณของเบดทำให้ต้องเพิ่มปริมาณชีวมวลที่ใช้ด้วยเพื่อคงอัตราส่วนระหว่างชีวมวลต่อวัสดุเบด ซึ่งการเพิ่มปริมาณชีวมวลมากเกินไป อาจทำให้ชีวมวลได้รับความร้อนจากเตาเผาไฟฟ้า (Electrical furnace) ไม่เพียงพอต่อการสลายตัวทางความร้อน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกอัตราการไหลของแก๊สตัวพาเป็นตัวแปรที่ถูกนำมาศึกษาผลต่อพฤติกรรมของการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทด้วยวัสดุเบดแทน การศึกษาในส่วนนี้ดำเนินการโดยการลดอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในท่อชั้นนอกลงจาก 100 มิลลิลิตรต่อนาที เป็น 40 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อพฤติกรรมในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทด้วยอะลูมินา และคงอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในท่อชั้นในอยู่ที่ 20 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อให้ปริมาณของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่ถูกปลดปล่อยออกจากชีวมวลที่สลายตัวภายใต้ภาวะไพโรไลซิสไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นอัตราการไหลรวมของแก๊สไนโตรเจนในระบบจะลดลงจาก 120 มิลลิลิตรต่อนาที เป็น 60 มิลลิลิตรต่อนาที

ผลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพาในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในวัฏภาคไอด้วยอะลูมินาต่อปริมาณโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่เกาะบนวัสดุเบดเป็นจำนวน 1 ครั้ง แสดงดังภาพที่ 4.4 พบว่า อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่แตกต่างกันไม่ส่งผลหรือส่งผลกระทบต่อปริมาณของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท (โดยเฉพาะโลหะโพแทสเซียม) ที่ถูกดูดซับบนอะลูมินา ทั้งในกรณีของฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Luthra และคณะ (1984) ที่ได้รายงานผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 300 – 1200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซับโลหะซีเดียมด้วยแร่ Bauxite ($88\% \text{Al}_2\text{O}_3$)



ภาพที่ 4.4 ผลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพาในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในวัฏภาคไอจาก (ก) ฟางข้าวด้วยอะลูมินา และ (ข) ไม้กระถินยักษ์ด้วยอะลูมินา ต่อปริมาณโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่เกาะบนเบด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ไอน้ำร้อยละ 60 โดยปริมาตร ในการดูดซับ 1 ครั้ง

ผลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพาในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในวัฏภาคไอด้วยอะลูมินาต่อปริมาณโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่เกาะบนวัสดุเบดเป็นจำนวน 3 ครั้ง แสดงดังภาพที่ 4.5 พบว่า ในกรณีของฟางข้าว การเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนจาก 60 เป็น 120 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นผลให้โลหะโพแทสเซียมถูกดูดซับบนอะลูมินาได้เพิ่มขึ้นจาก 0.531 เป็น 0.640 ร้อยละโดยน้ำหนัก ในขณะที่การใช้ไม้กระถินยักษ์ พบว่า ไม่ส่งผลกระทบหรือส่งผลน้อยมากต่อปริมาณของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่ถูกดูดซับเช่นเดียวกับจำนวนการดูดซับ 1 ครั้ง



ภาพที่ 4.5 แสดงผลของอัตราการไหลของแก๊สดำพาในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในวัสดุภาคไอจาก (ก) ฟางข้าวด้วยอะลูมินา และ (ข) ไม้กระถินยักษ์ด้วยอะลูมินา ต่อปริมาณโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่เกาะบนเบด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ไอน้ำร้อยละ 60 โดยปริมาตร ในการดูดซับ 3 ครั้ง

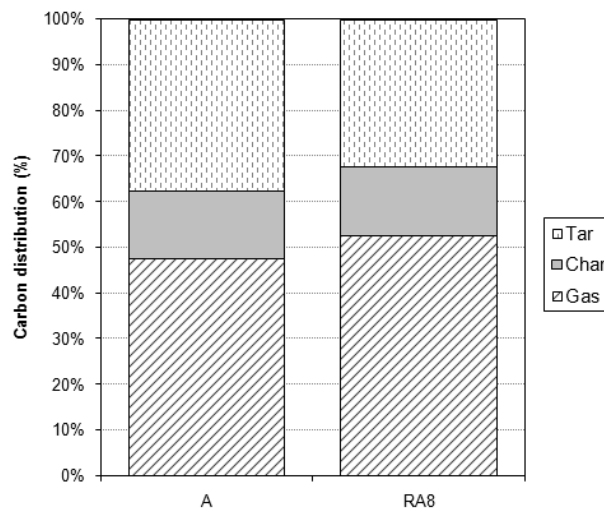
ดังนั้นสรุปได้ว่าการลดอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเป็น 60 มิลลิลิตรต่ออนาที เพื่อเพิ่มเวลาสัมผัสในการดูดซับส่งผลต่อปริมาณโลหะที่ถูกดูดซับน้อยมาก ในขณะที่การเพิ่มจำนวนการดูดซับส่งผลต่อปริมาณโลหะที่ถูกดูดซับโดยเฉพาะโลหะโพแทสเซียมที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัย แสดงให้เห็นว่าการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทด้วยอะลูมินาขึ้นอยู่กับปริมาณโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่ป้อนเข้าระบบมากกว่าการเพิ่มเวลาสัมผัสในการดูดซับ

4.5. พฤติกรรมการเร่งปฏิกิริยาฟอรัมน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่ดูดซับบนวัสดุเบด

4.5.1. ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาฟอรัมน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำ

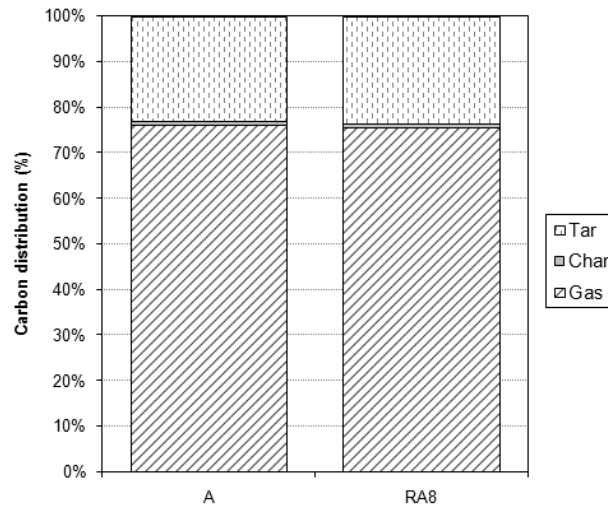
4.5.1.1. อะลูมินาเป็นวัสดุเบด

ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาฟอรัมน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ แสดงดังรูปที่ 4.6 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอะลูมินาที่ผ่านและไม่ได้ผ่านการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท พบว่า อะลูมินาที่ผ่านการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าว แสดงผลเชิงบวกในการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเป็นน้ำมันทาร์ลดลง แสดงว่า อะลูมินาที่ผ่านการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันทาร์และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ดังสมการที่ (4.2) ได้ดีมากกว่าอะลูมินาที่ไม่ได้ผ่านการดูดซับ ทำให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์เกิดการสลายตัวเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์มากขึ้น

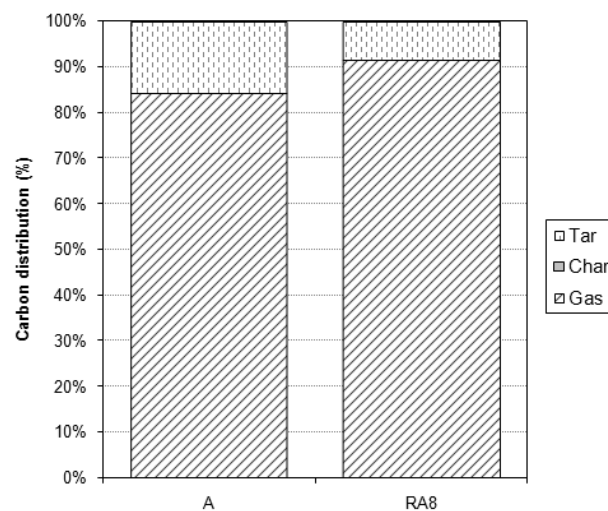


(ก) 600 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาฟอรัมน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวที่ดูดซับบนอะลูมินาต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 600-800 องศาเซลเซียส



(ข) 700 องศาเซลเซียส

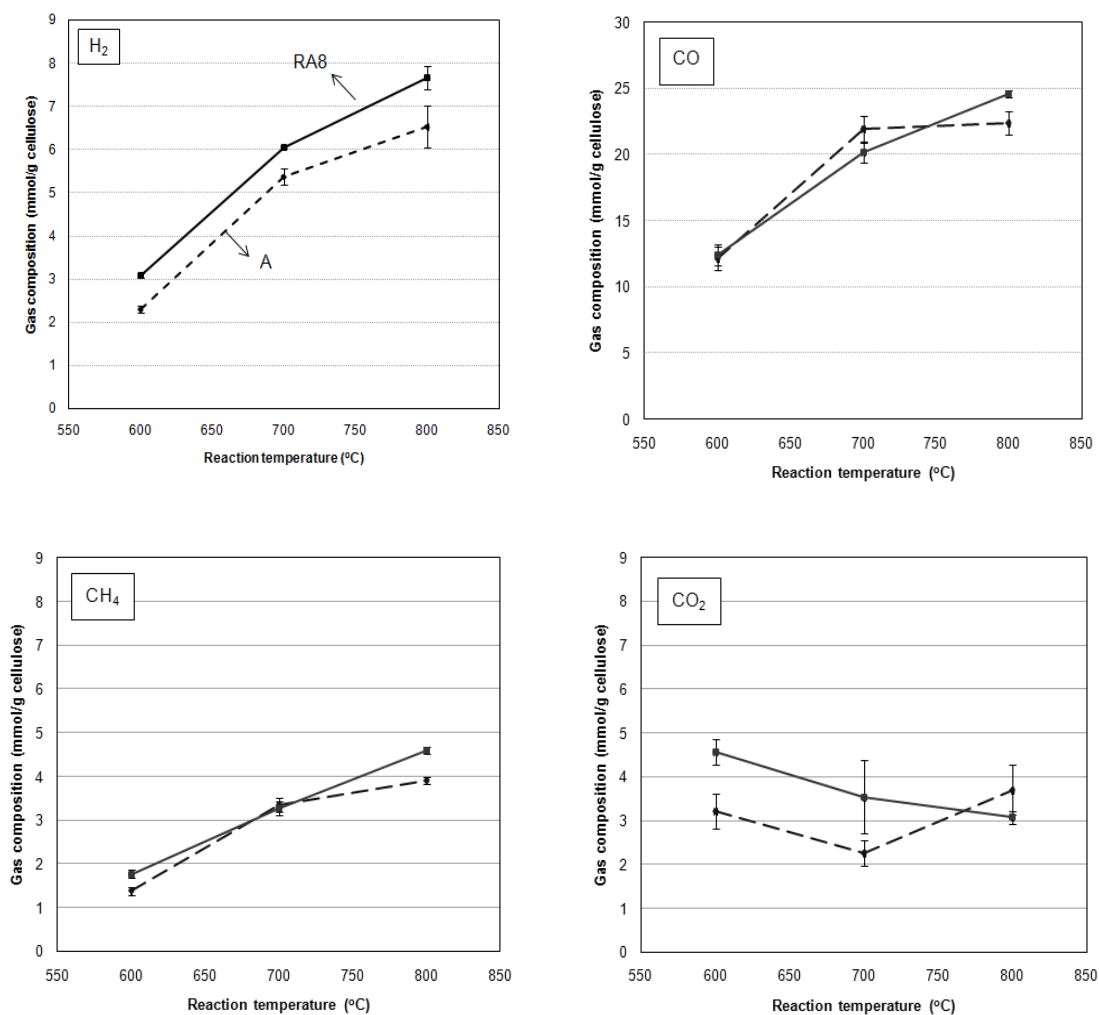


(ค) 800 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 4.6 (ต่อ) ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวที่ดูดซับบนอะลูมินาต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 600-800 องศาเซลเซียส

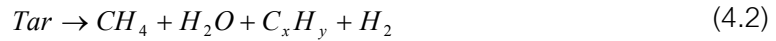
เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น แสดงดังภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบระหว่างอะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าว พบว่า การดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวบนอะลูมินาช่วยสนับสนุนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนและ

คาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าโลหะโพแทสเซียมที่ถูกดูดซับบนอะลูมินาสนับสนุนการเร่งปฏิกิริยาออกเทอร์ซิฟท์ (Wu และคณะ, 2011) ดังสมการที่ 4.3 แต่ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พบว่าปฏิกิริยา Boudouard ดังสมการที่ 4.4 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนเกิดได้ดีมากขึ้น เป็นผลให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์สูงขึ้น ในขณะที่ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผลิตได้ต่ำลง แสดงให้เห็นว่าโลหะโพแทสเซียมที่ถูกดูดซับบนอะลูมินาเป็นตำแหน่งว่างในการเร่งปฏิกิริยา Boudouard (Yokoyama และคณะ, 1983)



ภาพที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มน้ำมันนําทารด้วยไอน้ำของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวที่ดูดซับบนอะลูมินาต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 600-800 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบระหว่างอะลูมินาที่ไม่ได้ผ่านการดูดซับ (เส้นปะ) และอะลูมินาที่ผ่านการดูดซับแร่ธาตุจากฟางข้าว (เส้นทึบ)

Tar cracking:



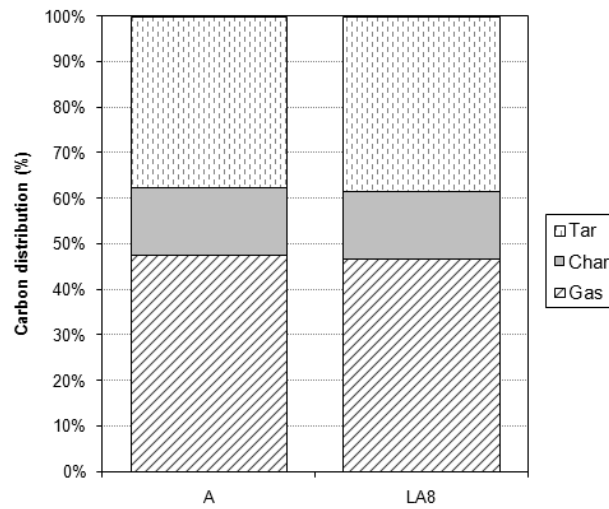
Water gas shift:



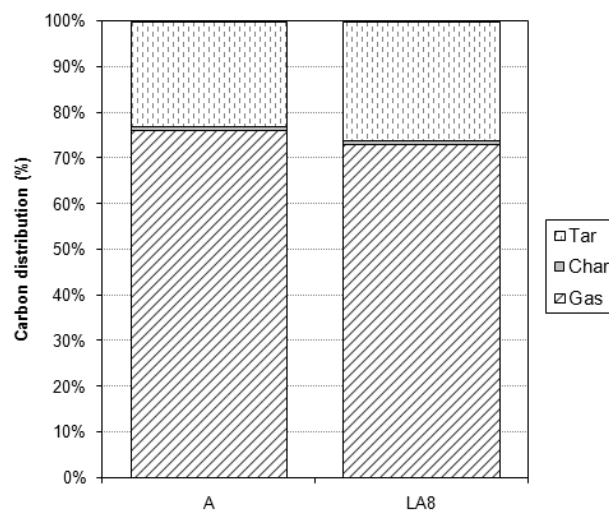
Boudouard:



ต่อมาเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบอะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากไม้กระถินยักษ์ โดยศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพที่ 4.8 พบว่า อะลูมินาที่ผ่านการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากไม้กระถินยักษ์ไม่แสดงอันตรกิริยาใดๆ ต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ที่แก๊สเมื่อเทียบกับอะลูมินาที่ไม่ผ่านการดูดซับ แสดงให้เห็นว่าผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยามีอิทธิพลมากกว่าการมีแร่ธาตุอยู่บนวัสดุเบด อีกทั้งอะลูมินาที่ผ่านการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากไม้กระถินยักษ์มีปริมาณโลหะโพแทสเซียมที่เกาะติดอยู่ในปริมาณที่น้อยกว่าการใช้ฟางข้าว ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.4.1

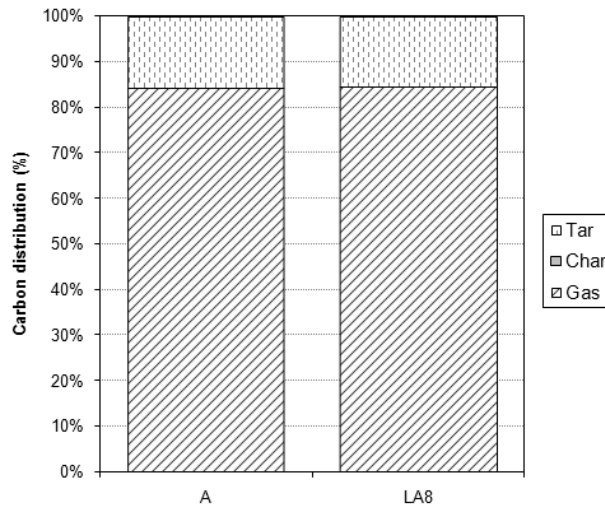


(ก) 600 องศาเซลเซียส



(ข) 700 องศาเซลเซียส

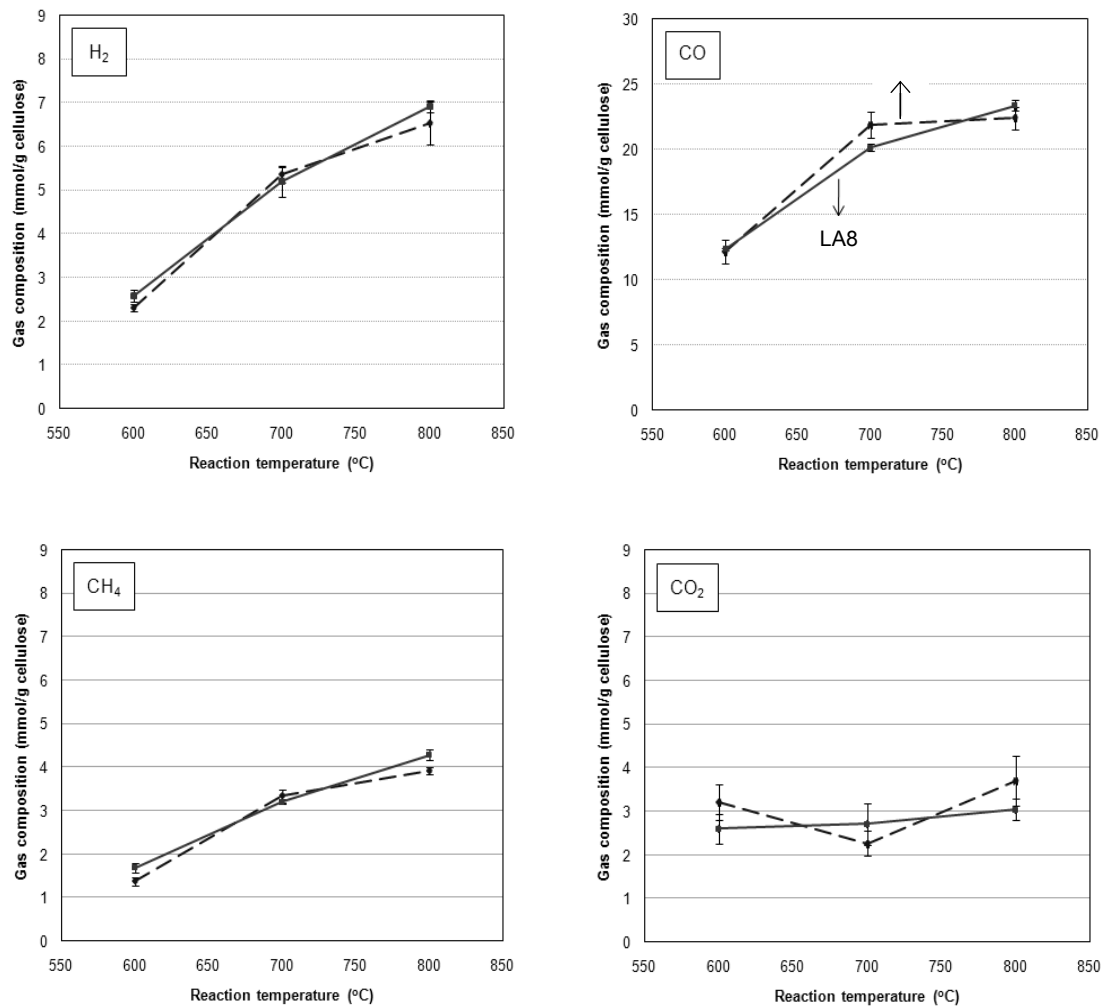
ภาพที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากไม้กระถินยักษ์ที่ดูดซับบนอะลูมินาต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 600-800 องศาเซลเซียส



(ค) 800 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 4.8 (ต่อ) ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากไม้กระถินยักษ์ที่ดูดซับบนอะลูมินาต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 600-800 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส แสดงดังภาพที่ 4.9 พบว่า อะลูมินาที่ผ่านการดูดซับจากไม้กระถินยักษ์ไม่แสดงอันตรกิริยาใดๆ ต่อองค์ประกอบแก๊สผลิตภัณฑ์ เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ผ่านการดูดซับ เหตุผลน่าจะเป็นไปในแนวทางเดียวกับผลของอะลูมินาที่ดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากไม้กระถินยักษ์ต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นสันนิษฐานได้ว่าความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มด้วยไอน้ำขึ้นกับปริมาณของโลหะโพแทสเซียม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kaczorowski และคณะ (2007)

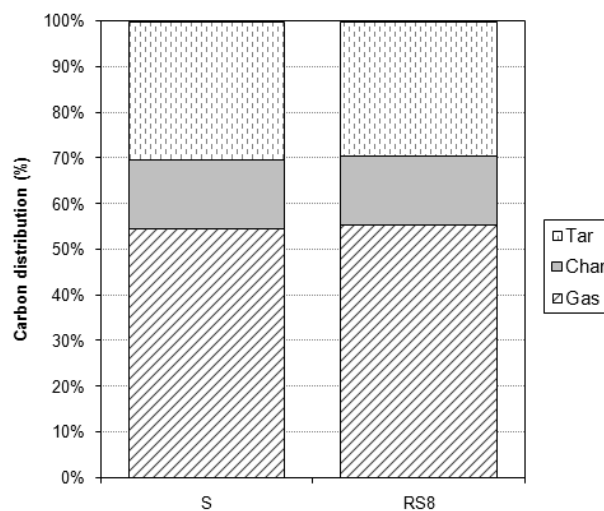


ภาพที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากไม้กระถินยักษ์ที่ดูดซับบนอะลูมินาต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 600-800 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบระหว่างอะลูมินาที่ไม่ได้ผ่านการดูดซับ (เส้นปะ) และอะลูมินาที่ผ่านการดูดซับแร่ธาตุจากไม้กระถินยักษ์ (เส้นทึบ)

4.5.1.2. ซิลิกาเป็นวัสดุเบด

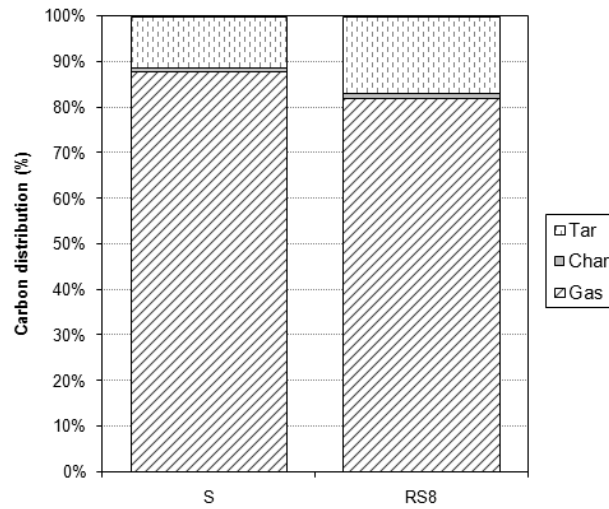
ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพที่ 4.10 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างซิลิกาที่ผ่านและไม่ได้ผ่านการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าว พบว่า ซิลิกาที่ผ่านการ

ดูดซับจากฟางข้าวแสดงอันตรกิริยาเชิงลบต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส เป็นผลให้ร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นน้ำมันทาร์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากซิลิกาที่ผ่านการดูดซับจากฟางข้าวมีปริมาณพื้นที่ผิวลดลงจาก 170.52 เป็น 38.46 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อเทียบกับซิลิกาที่ไม่ได้ผ่านการดูดซับ อีกทั้งปริมาณโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่ถูกดูดซับมีปริมาณน้อย (ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.4.1) ทำให้มีตำแหน่งว่องไวและพื้นที่ผิวที่ว่องไวที่ต่ำกว่าการเกิดปฏิกิริยาเมื่อเทียบระบบที่ใช้อะลูมินาเป็นวัสดุเบด ในขณะที่การใช้ซิลิกาที่ผ่านการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากไม้กระถินยักษ์ต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ ดังภาพที่ 4.11 อันตรกิริยาเชิงลบต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเช่นเดียวกัน และอธิบายในแนวทางเดียวกับซิลิกาที่ผ่านการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าว

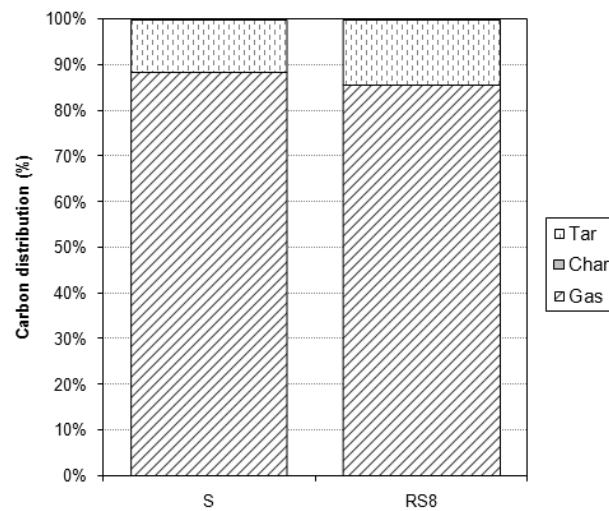


(ก) 600 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวที่ดูดซับบนซิลิกาต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 600-800 องศาเซลเซียส

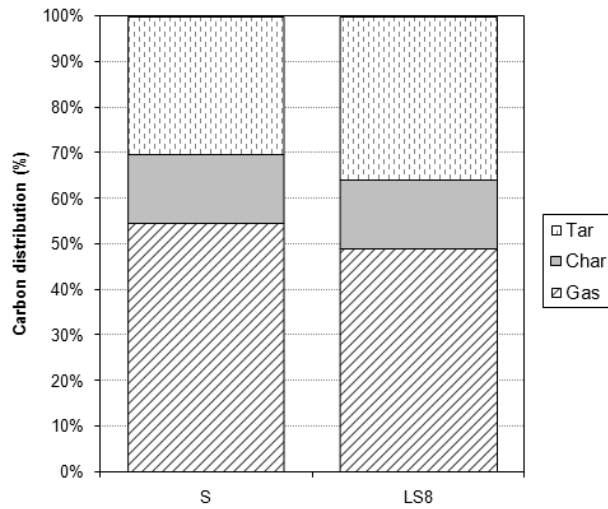


(ข) 700 องศาเซลเซียส

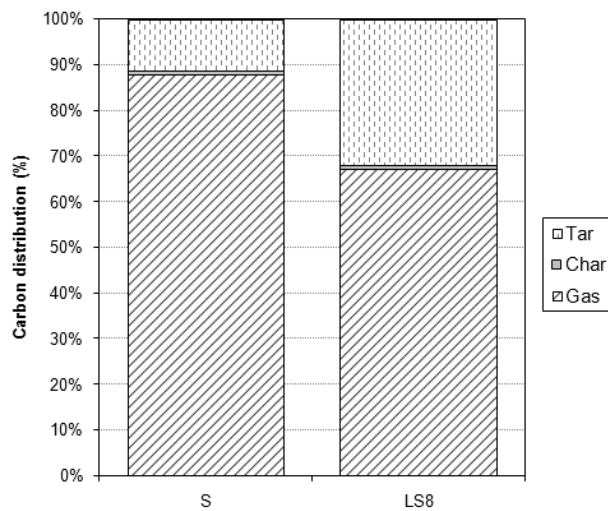


(ค) 800 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 4.10 (ต่อ) ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวที่ดูดซับบนซีลิกาต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 600-800 องศาเซลเซียส

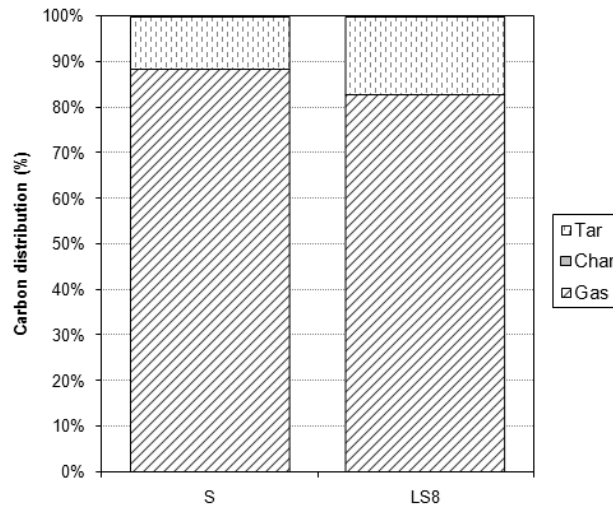


(ก) 600 องศาเซลเซียส



(ข) 700 องศาเซลเซียส

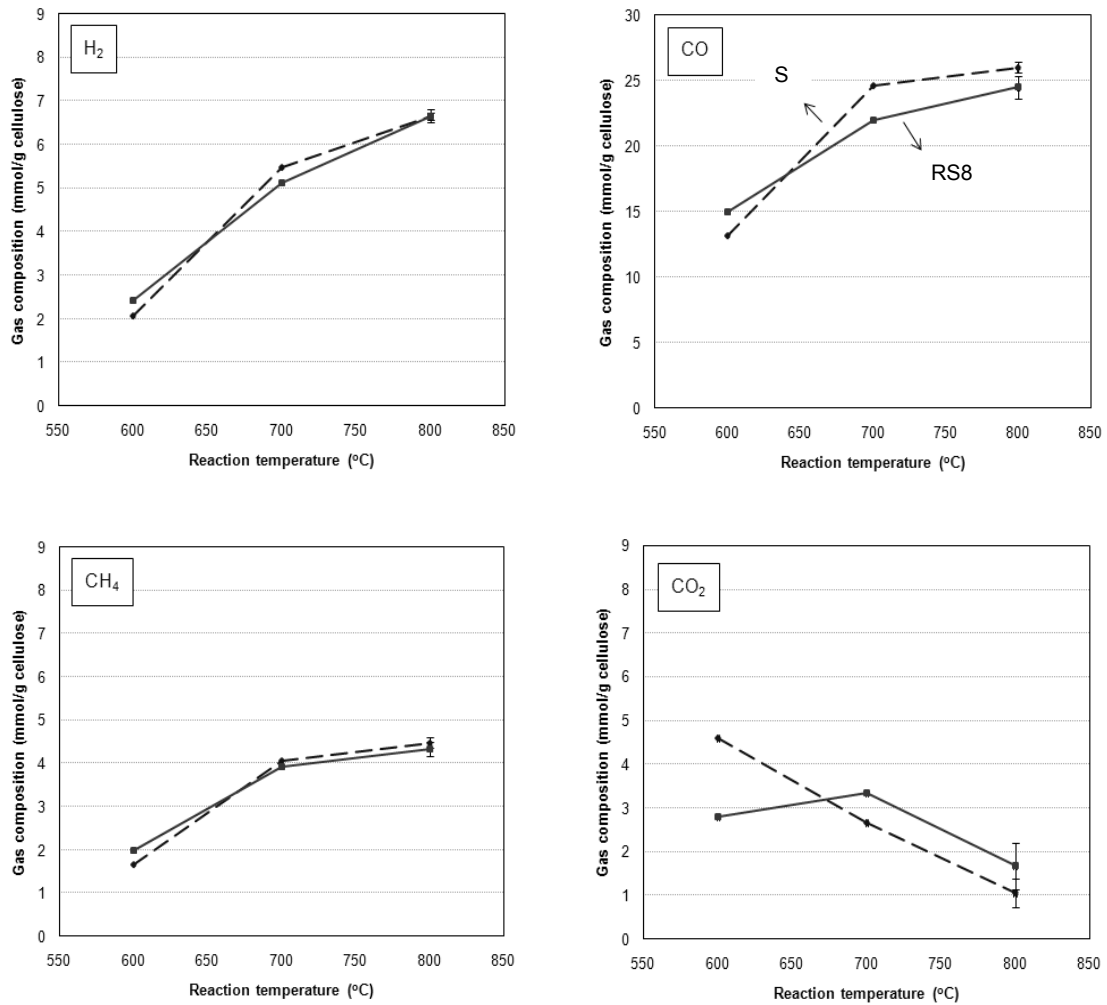
ภาพที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากไม้กระถินยักษ์ที่ดูดซับบนซิลิกาต่ออัตราการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 600-800 องศาเซลเซียส



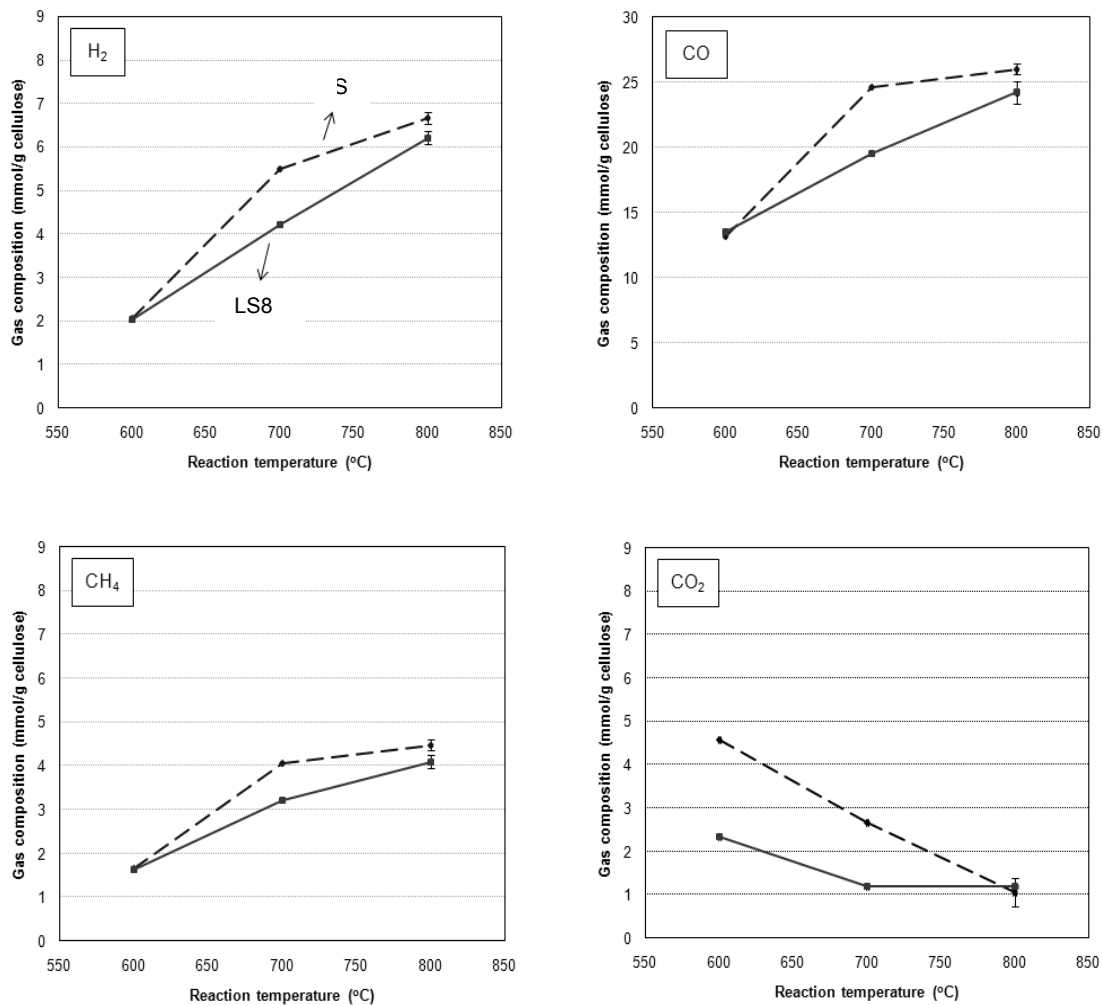
(ค) 800 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 4.11 (ต่อ) ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากไม้กระถินยักษ์ที่ดูดซับบนซิลิกาต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 600-800 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส แสดงดังภาพที่ 4.12 พบว่า ซิลิกาที่ผ่านการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวไม่แสดงอันตรกิริยาใดๆ ต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส เนื่องจากซิลิกาที่ผ่านการดูดซับจากฟางข้าวมีปริมาณพื้นที่ผิวลดลงจาก 170.52 เป็น 38.46 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อเทียบกับซิลิกาที่ไม่ได้ผ่านการดูดซับ อีกทั้งปริมาณโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่ถูกดูดซับมีปริมาณน้อย (ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.4.1) ทำให้มีตำแหน่งวงวอวและพื้นที่ผิวที่วอวไวต่อการเกิดปฏิกิริยาต่ำกว่าเมื่อเทียบระบบที่ใช้อะลูมินาเป็นวัสดุเบด ในขณะที่การใช้ซิลิกาที่ผ่านการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากไม้กระถินยักษ์ต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส ดังภาพที่ 4.13 แสดงอันตรกิริยาเชิงลบต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส และอธิบายได้ในแนวทางเดียวกับซิลิกาที่ผ่านการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าว



ภาพที่ 4.12 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวที่ดูดซับบนซิลิกาต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 600-800 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบระหว่างซิลิกาที่ไม่ได้ผ่านการดูดซับ (เส้นปะ) และซิลิกาที่ผ่านการดูดซับแร่ธาตุจากฟางข้าว (เส้นทึบ)



ภาพที่ 4.13 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากไม้กระถินยักษ์ที่ดูดซับบนซิลิกาต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 600-800 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบระหว่างซิลิกาที่ไม่ได้ผ่านการดูดซับ (เส้นปะ) และซิลิกาที่ผ่านการดูดซับแร่ธาตุจากไม้กระถินยักษ์ (เส้นทึบ)

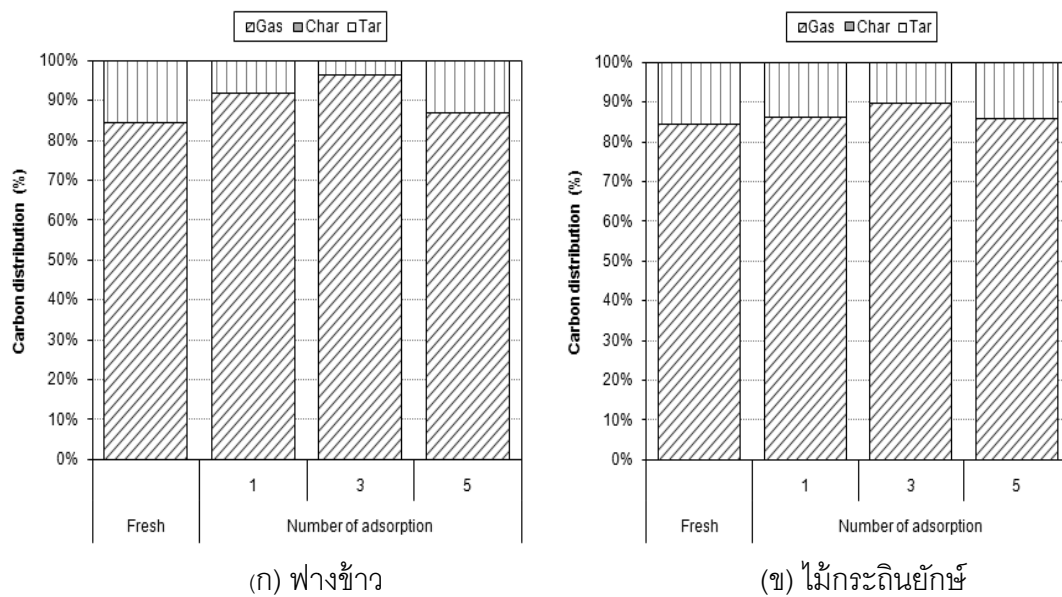
จากผลการทดลองอิทธิพลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำสามารถสรุปได้ว่าระบบที่ใช้อะลูมินาเป็นวัสดุเบดในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทแสดงอันตรกิริยาเชิงบวกต่ออัตราการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สและองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส และที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ เนื่องจากให้ร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สได้สูงสุด อีกทั้งผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก เพราะโลหะโพแทสเซียมที่ถูกดูดซับได้บนอะลูมินาสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา

4.5.2. ผลของจำนวนครั้งในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทต่อการทำปฏิกิริยาฟอรัมน้ำมันนํารถด้วยไอน้ำ

ผลของการเพิ่มจำนวนครั้งในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวด้วยอะลูมินาต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในปฏิกิริยาฟอรัมน้ำมันนํารถด้วยไอน้ำ แสดงในภาพที่ 4.14 (ก) พบว่าการเพิ่มจำนวนครั้งในการดูดซับจาก 1 ครั้ง เป็น 3 ครั้ง ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นจาก 91.58 เป็น 96.47 ในขณะที่ร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นน้ำมันนํารถลดลงจาก 8.42 เป็น 3.53 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนครั้งในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทสนับสนุนในการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันนํารถและสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ดังสมการที่ (4.2) ได้ดีขึ้น ทำให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันนํารถเกิดการสลายตัวเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์มากขึ้น อันตรกิริยาเชิงบวกต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สน่าเป็นผลจากปริมาณโลหะโพแทสเซียมที่ถูกดูดซับบนอะลูมินาที่เพิ่มมากขึ้น ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.4.4 ส่วนกรณีการเพิ่มจำนวนครั้งการดูดซับเป็น 5 ครั้ง พบว่า แสดงอันตรกิริยาเชิงลบต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส โดยที่ร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สลดลงจาก 96.47 เป็น 86.79 ถึงแม้ว่าปริมาณโพแทสเซียมที่ถูกดูดซับมีมากกว่าการดูดซับที่ 3 ครั้ง ก็ตาม น่าจะเป็นผลมาจากอะลูมินาที่ผ่านการดูดซับเป็นจำนวน 5 ครั้ง มีการสะสมของคาร์บอนบนอะลูมินาที่เพิ่มขึ้น เป็นผลให้ตำแหน่งในการเร่งปฏิกิริยาลดลง

ผลของการเพิ่มจำนวนครั้งในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากไม้กระถินยักษ์ด้วยอะลูมินาต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในปฏิกิริยาฟอรัมน้ำมันนํารถด้วยไอน้ำ แสดงในภาพที่ 4.14 (ข) พบว่าการเพิ่มจำนวนครั้งในการดูดซับจาก 1 ครั้ง เป็น 3 ครั้ง ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นจาก 86.09 เป็น 89.54 ในขณะที่ร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นน้ำมันนํารถลดลงจาก 13.91 เป็น 10.46 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนครั้งในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทสนับสนุนในการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันนํารถและสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ดังสมการที่ (4.2) ได้ดีขึ้น จากผลการทดลองในภาพที่ 4.14 (ข) แสดงให้เห็นว่าปริมาณโลหะโพแทสเซียมจากไม้กระถินยักษ์ที่ถูกดูดซับบนอะลูมินาที่เพิ่มขึ้น (ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.4.4) ส่งผลต่อความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาฟอรัมน้ำมันนํารถด้วยไอน้ำอย่างเห็นได้ชัด ในกรณีการเพิ่มจำนวนครั้งการดูดซับเป็น 5 ครั้ง พบว่า

แสดงอันตรกิริยาเชิงลบต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส โดยที่ร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สลดลงจาก 89.54 เป็น 85.59 ถึงแม้ว่าปริมาณโพแทสเซียมที่ถูกดูดซับมีมากกว่าการดูดซับที่ 3 ครั้ง ก็ตาม น่าจะเป็นผลมาจากอะลูมินาที่ผ่านการดูดซับเป็นจำนวน 5 ครั้ง มีการสะสมของคาร์บอนบนอะลูมินาที่เพิ่มขึ้น เป็นผลให้ตำแหน่งในการเร่งปฏิกิริยาลดลง



ภาพที่ 4.14 ผลของจำนวนครั้งในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจาก (ก) ฟางข้าวและ (ข) ไม้กระถินยักษ์ด้วยอะลูมินาต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ ในปฏิกิริยารีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 800 องศาเซลเซียส

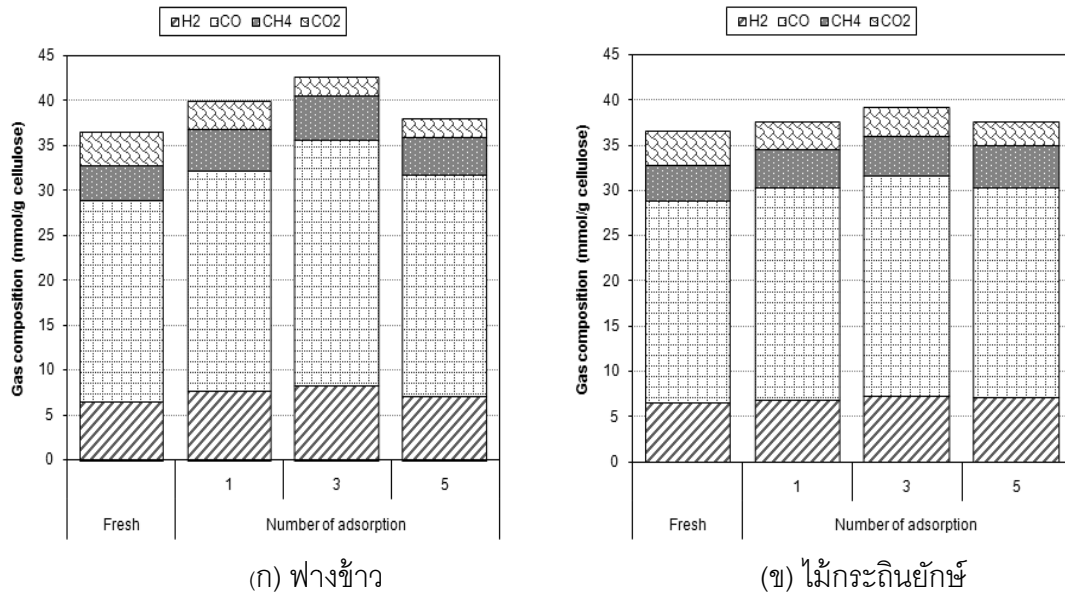
เมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มจำนวนครั้งในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวด้วยอะลูมินาต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส ในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำ แสดงในภาพที่ 4.15 (ก) พบว่าการเพิ่มจำนวนครั้งในการดูดซับจาก 1 ครั้ง เป็น 3 ครั้ง ทำให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจาก 7.663 เป็น 8.278 มิลลิโมลต่อกรัม และปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 24.610 เป็น 27.367 มิลลิโมลต่อกรัม ในขณะที่ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจาก 3.074 เป็น 2.017 มิลลิโมลต่อกรัม แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนครั้งในการดูดซับเป็น 3 ครั้ง ช่วยเพิ่มปริมาณแก๊สไฮโดรเจนผ่านการเร่งปฏิกิริยาออกเตอรซิฟท์ (สมการที่ 4.3) นอกจากนั้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกเตอรซิฟท์ จะเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนผ่านปฏิกิริยา Boudouard (สมการที่ 4.4) เกิดเป็นแก๊ส

คาร์บอนมอนอกไซด์ สาเหตุที่การเพิ่มจำนวนครั้งในการดูดซับเป็น 3 ครั้งส่งผลอันตรกิริยาเชิงบวกต่อองค์ประกอบแก๊สน่าจะเป็นผลจากปริมาณโพแทสเซียมที่ถูกดูดซับบนอะลูมินาเพิ่มขึ้น จึงทำให้มีตำแหน่งว่างไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มจำนวนครั้งในการดูดซับเป็น 5 ครั้ง ทำให้องค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สไม่ต่างจากอะลูมินาที่ไม่ได้ผ่านการดูดซับ สันนิษฐานได้ว่าเป็นผลมาจากอะลูมินาที่ผ่านการดูดซับเป็นจำนวน 5 ครั้ง มีการสะสมของคาร์บอนบนอะลูมินาที่เพิ่มขึ้น เป็นผลให้ตำแหน่งในการเร่งปฏิกิริยาลดลง

ผลของการเพิ่มจำนวนครั้งในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากไม้กระถินยักษ์ด้วยอะลูมินาต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส ในการทำปฏิกิริยาวิฟฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำ แสดงในภาพที่ 4.15 (ข) พบว่าการเพิ่มจำนวนครั้งในการดูดซับจาก 1 ครั้ง เป็น 3 ครั้ง ทำให้ปริมาณปริมาณแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 6.913 เป็น 7.316 มิลลิโมลต่อกรัม และ 23.374 เป็น 24.405 มิลลิโมลต่อกรัม ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไม่เปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนครั้งในการดูดซับเป็น 3 ครั้ง ช่วยเพิ่มปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ผ่านการเร่งปฏิกิริยา Water gas (สมการที่ 4.5) สาเหตุที่การเพิ่มจำนวนครั้งในการดูดซับเป็น 3 ครั้งส่งผลอันตรกิริยาเชิงบวกต่อองค์ประกอบแก๊ส น่าจะเป็นผลจากปริมาณโพแทสเซียมที่ถูกดูดซับบนอะลูมินาเพิ่มขึ้น จึงทำให้มีตำแหน่งว่างไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มจำนวนครั้งในการดูดซับเป็น 5 ครั้ง ทำให้องค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สไม่ต่างจากอะลูมินาที่ไม่ได้ผ่านการดูดซับ สันนิษฐานได้ว่าเป็นผลมาจากอะลูมินาที่ผ่านการดูดซับเป็นจำนวน 5 ครั้ง มีการสะสมของคาร์บอนบนอะลูมินาที่เพิ่มขึ้น เป็นผลให้ตำแหน่งในการเร่งปฏิกิริยาลดลง

Water gas reaction:





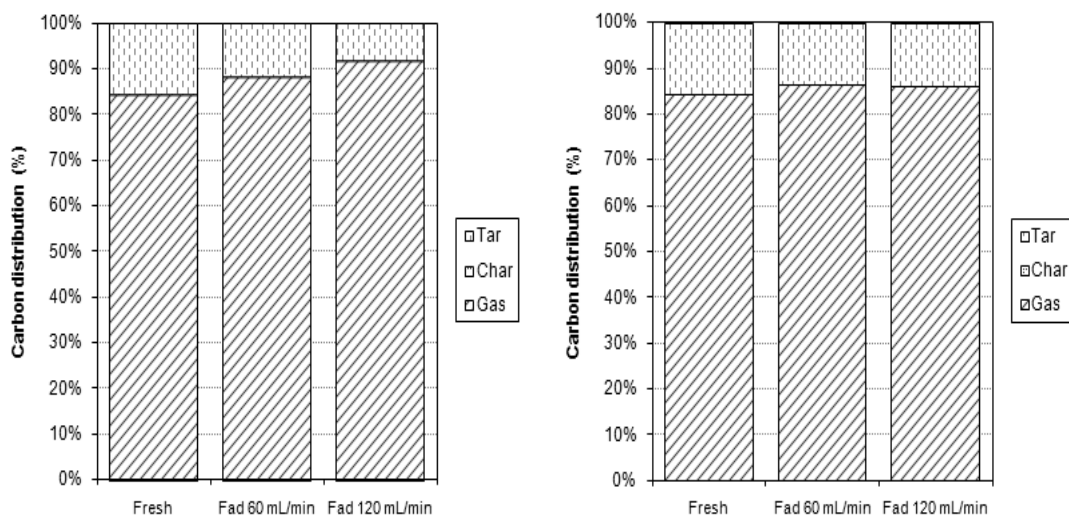
ภาพที่ 4.15 ผลของจำนวนครั้งในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจาก (ก) ฟางข้าว และ (ข) ไม้กระถินยักษ์ด้วยอะลูมินาต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส ในปฏิกิริยารีฟอร์มน้ำมันนํ้าด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 800 องศาเซลเซียส

4.5.3. ผลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพาในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทต่อการทำปฏิกิริยารีฟอร์มน้ำมันนํ้าด้วยไอน้ำ

ผลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพาในการดูดซับจำนวน 1 ครั้ง ของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์ เอิร์ทจากฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ด้วยอะลูมินาต่ออัตราการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในปฏิกิริยารีฟอร์มน้ำมันนํ้าด้วยไอน้ำ แสดงในรูปที่ 4.16 พบว่า ในกรณีของฟางข้าว อะลูมินาที่ผ่านการดูดซับด้วยอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 60 มิลลิลิตรต่ออนาที แสดงอันตรกิริยาเชิงบวกต่ออัตราการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สที่เพิ่มขึ้นจาก 84.18 เป็น 88.13 เมื่อเปรียบเทียบกับอะลูมินาที่ไม่ได้ผ่านการดูดซับ ในขณะที่อะลูมินาที่ผ่านการดูดซับด้วยอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 120 มิลลิลิตรต่ออนาที แสดงอันตรกิริยาเชิงบวกเช่นเดียวกัน เนื่องจากโลหะโพแทสเซียมที่ถูกดูดซับไว้จะช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันนํ้า (สมการที่ 4.2) ส่วนกรณีการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากไม้กระถินยักษ์ด้วยอะลูมินา พบว่า อะลูมินาที่ผ่านดูดซับด้วยอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 60 และ 120 มิลลิลิตรต่ออนาที ไม่แสดงอันตรกิริยาใดๆ ต่ออัตราการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส น่าจะเป็นผล

มาจากโลหะโพแทสเซียมที่ถูกดูดซับไว้มีปริมาณน้อยกว่ากรณีของฟางข้าวจึงทำให้ไม่แสดงผลเชิงบวกต่อการสลายตัวของน้ำมันทาร์

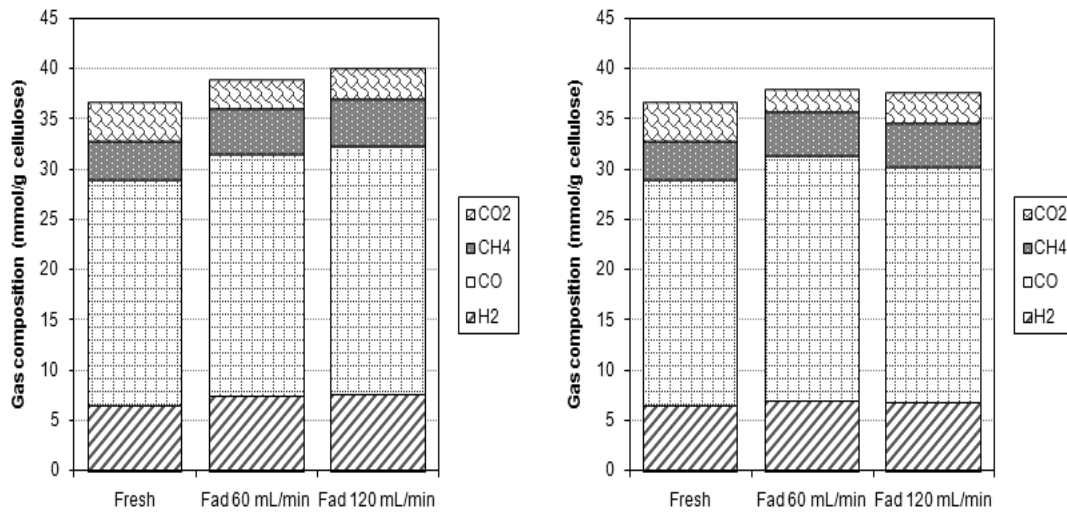
ผลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพาในการดูดซับจำนวน 1 ครั้ง ของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์ เอิร์ทจากฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ด้วยอะลูมินาต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส แสดงในภาพที่ 4.17 (ก) พบว่า การใช้อะลูมินาที่ผ่านการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวด้วยอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 60 และ 120 มิลลิลิตรต่อนาที แสดงอันตรกิริยาเชิงบวกต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สเช่นเดียวกันทั้งสองกรณี โดยที่ผลิตภัณฑ์แก๊สมีแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ผ่านการเร่งปฏิกิริยารีดอกซ์ (สมการที่ 4.3) และ Boudouard (สมการที่ 4.4) ของโลหะโพแทสเซียม ในกรณีของไม้กระถินยักษ์ พบว่า อะลูมินาที่ผ่านการดูดซับไม่แสดงผลอันตรกิริยาเชิงบวกต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส ทั้งในกรณีที่ผ่านการดูดซับด้วยอัตราการไหล 60 และ 120 มิลลิลิตรต่อนาที เนื่องจากมีโลหะโพแทสเซียมที่ถูกดูดซับในปริมาณน้อย



(ก) ฟางข้าว

(ข) ไม้กระถินยักษ์

รูปที่ 4.16 ผลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพาในการดูดซับ 1 ครั้ง ของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจาก (ก) ฟางข้าวและ (ข) ไม้กระถินยักษ์ด้วยอะลูมินาต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในปฏิกิริยารีดอกซ์น้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 800 องศาเซลเซียส



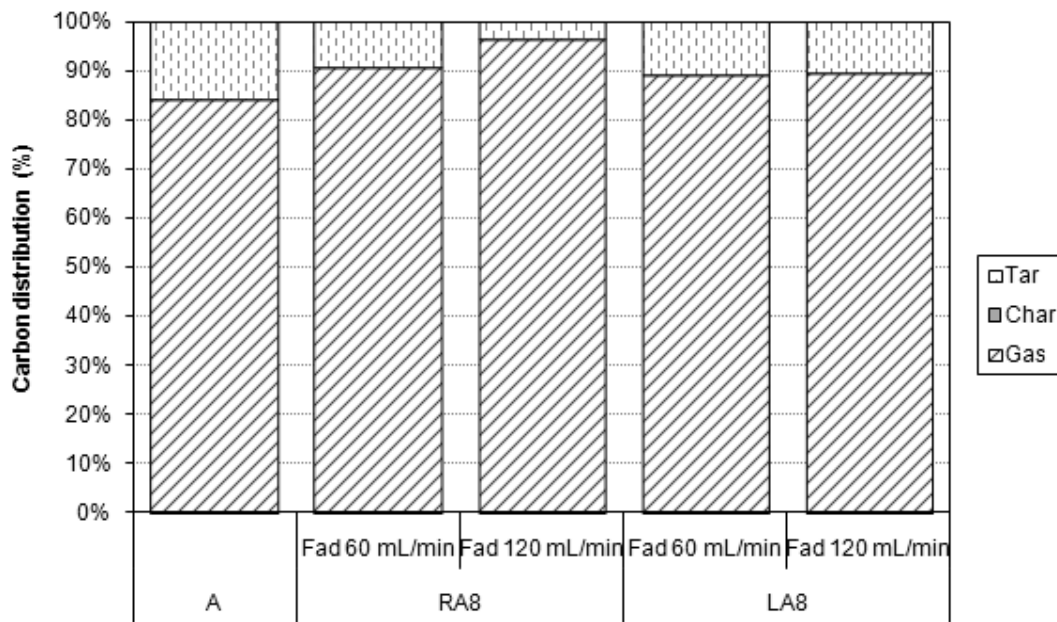
(ก) ฟางข้าว

(ข) ไม้กระถินยักษ์

ภาพที่ 4.17 ผลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพาในการดูดซับ 1 ครั้ง ของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจาก (ก) ฟางข้าวและ (ข) ไม้กระถินยักษ์ด้วยอะลูมินาต์ออร์ยละลายคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในปฏิริยารีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิทำปฏิริยา 800 องศาเซลเซียส

ผลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพาในการดูดซับจำนวน 3 ครั้ง ของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์ เอิร์ทจากฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ด้วยอะลูมินาต์ออร์ยละลายคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในปฏิริยารีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำ แสดงในภาพที่ 4.18 พบว่า อะลูมินาต์ที่ผ่านการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวแสดงอันตรกิริยาเชิงบวกต่อออร์ยละลายคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส โดยที่เพิ่มขึ้นจาก 84.18 เป็น 90.55 และ 96.47 ในกรณีของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในการดูดซับที่ 60 และ 120 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ ในกรณีของไม้กระถินยักษ์ ไม่ว่าอะลูมินาต์ที่ผ่านการดูดซับแร่ธาตุที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 60 และ 120 มิลลิลิตรต่อนาที จะแสดงอันตรกิริยาเชิงบวกต่อออร์ยละลายคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเช่นเดียวกัน โดยที่เพิ่มขึ้นจาก 84.18 เป็น 89.19 และ 89.54 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการดูดซับปริมาณโลหะโพแทสเซียมที่เพิ่มขึ้นจากการดูดซับ 3 ครั้ง จะแสดงความสามารถในการแตกตัวของน้ำมันทาร์ให้เป็นผลิตภัณฑ์แก๊สที่เพิ่มขึ้นผ่านการเร่งปฏิริยาแตกตัวของน้ำมันทาร์ (สมการที่ 4.2) โดยเฉพาะในกรณีของไม้กระถินยักษ์พบว่าต้องผ่านการดูดซับแร่ธาตุเป็นจำนวน 3 ครั้ง จึงจะทำให้ปริมาณโลหะโพแทสเซียมถูกดูดซับได้เพิ่มขึ้นและเป็นผลให้มี

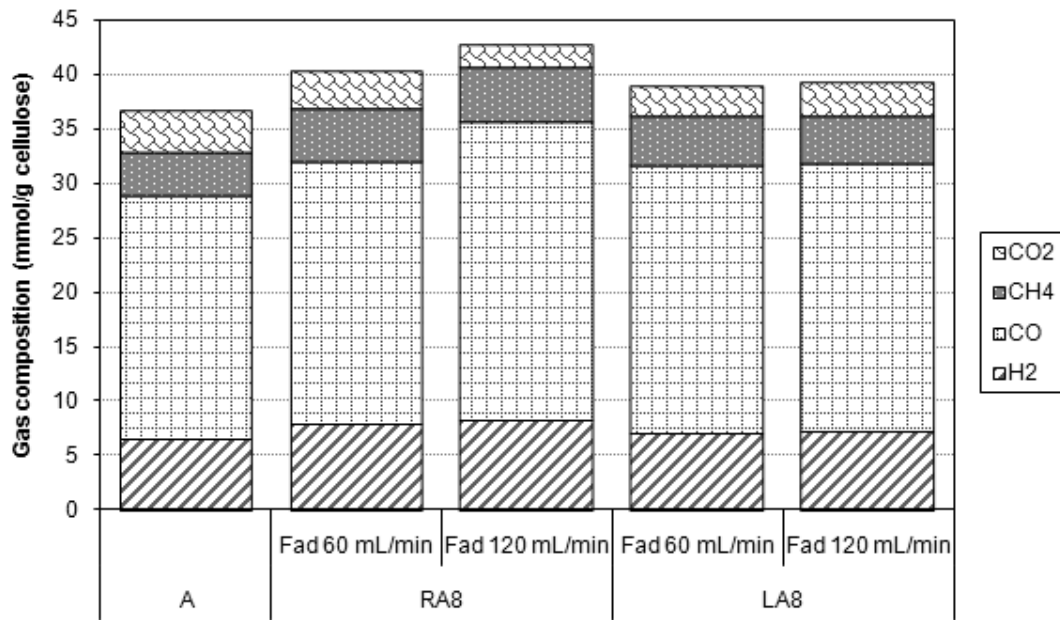
ความสามารถในการแตกตัวของน้ำมันทาร์ได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับการดูดซับแร่ธาตุจากไม้กระถินยักษ์เพียงครั้งเดียว



ภาพที่ 4.18 ผลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพาในการดูดซับ 3 ครั้ง ของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ด้วยอะลูมินาต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในปฏิกริยารีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิทำปฏิกริยา 800 องศาเซลเซียส

ผลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพาในการดูดซับจำนวน 3 ครั้ง ของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์ เอิร์ทจากฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ด้วยอะลูมินาต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส แสดงในภาพที่ 4.19 เมื่อเปรียบเทียบกับอะลูมินาที่ไม่ได้ผ่านการดูดซับ พบว่า การใช้อะลูมินาที่ผ่านการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวด้วยอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 60 และ 120 มิลลิลิตรต่อนาที ช่วยสนับสนุนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณลดลง แสดงให้เห็นว่าโลหะโพแทสเซียมที่ถูกดูดซับช่วยเร่งปฏิกริยาออกเทอร์ซิฟต์และ Boudouard ได้ดีขึ้น เช่นเดียวกับกรณีของอะลูมินาที่ผ่านการดูดซับแร่ธาตุจากไม้กระถินยักษ์เป็นจำนวน 3 ครั้ง ด้วยอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 60 และ 120 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถช่วยเพิ่มองค์ประกอบของแก๊สไฮโดรเจน

และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ เนื่องจากโลหะโพแทสเซียมที่ถูกดูดซับในอะลูมินาที่เพิ่มขึ้นช่วยในการเร่งปฏิกิริยาปฏิกิริยา Water gas (สมการที่ 4.5)



ภาพที่ 4.19 ผลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพาในการดูดซับ 3 ครั้ง ของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ด้วยอะลูมินาต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สในปฏิกิริยารีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 800 องศาเซลเซียส

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษากการปลดปล่อยและการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทในวัสดุภาคไอด้วยวัสดุเบด สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- 5.1.1 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการปลดปล่อยโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท พบว่า ร้อยละการปลดปล่อยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิไพโรไลซิส โดยเฉพาะโลหะแอลคาไลเกิดการปลดปล่อยตัวได้ง่ายกว่าโลหะแอลคาไลน์เอิร์ท เนื่องจากโลหะแอลคาไลชอบที่จะเกิดอันตรกิริยากับแร่ธาตุซิลิกาในถ่านชาร์ได้น้อยกว่า
- 5.1.2 ผลของชนิดวัสดุเบดต่อพฤติกรรมการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทด้วยวัสดุเบด พบว่า อะลูมินาสนับสนุนการดูดซับโลหะโพแทสเซียมได้มากกว่าการใช้ซิลิกาเป็นวัสดุเบด ทั้งในกรณีของฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์
- 5.1.3 ผลของอุณหภูมิในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทด้วยวัสดุเบด พบว่า โลหะโพแทสเซียมที่ถูกดูดซับและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ยกเว้นในกรณีของการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากไม้กระถินยักษ์ด้วยซิลิกาที่ไม่สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ
- 5.1.4 ผลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพาในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทด้วยอะลูมินาเป็นวัสดุเบด พบว่า อัตราการไหลของแก๊สตัวพาที่แตกต่างกันไม่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท
- 5.1.5 ผลของจำนวนครั้งในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทด้วยอะลูมินาเป็นวัสดุเบด พบว่า การเพิ่มจำนวนครั้งในการดูดซับทำให้ปริมาณโลหะโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ทั้งในกรณีของฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์

การศึกษาพฤติกรรมการณ์เร่งปฏิกิริยาที่ฟอร์มน้ำมันด้วยไอน้ำของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่ดูดซับบนวัสดุเบด สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- 5.1.6 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและชนิดของวัสดุเบดที่ผ่านการดูดซับต่อความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยา พบว่า ระบบที่ใช้อะลูมินาเป็นวัสดุเบดในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทแสดงอันตรกิริยาเชิงบวกต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สและองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ เนื่องจากให้ร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สได้สูงสุด อีกทั้งผลิตแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ได้เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับอะลูมินาที่ไม่ได้ผ่านการดูดซับ
- 5.1.7 ผลของจำนวนครั้งในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทด้วยอะลูมินา พบว่า การเพิ่มจำนวนครั้งในการดูดซับที่เพิ่มขึ้นเป็น 3 ครั้ง ช่วยเพิ่มร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส อีกทั้งยังเพิ่มปริมาณแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ ผ่านการเร่งปฏิกิริยาของเทอร์แก๊สซิฟท์และ Boudouard ที่เพิ่มมากขึ้นตามปริมาณโลหะโพแทสเซียมที่ถูกดูดซับไว้บนอะลูมินา อย่างไรก็ตามการเพิ่มจำนวนครั้งในการดูดซับเป็น 5 ครั้ง ไม่มีอันตรกิริยาใดๆ ต่อการเร่งปฏิกิริยา
- 5.1.8 ผลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพาในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทด้วยอะลูมินา พบว่า ในกรณีของฟางข้าว อะลูมินาที่ผ่านการดูดซับด้วยอัตราการไหลของแก๊สตัวพาที่ 60 หรือ 120 มิลลิลิตรต่อนาที แสดงอันตรกิริยาเชิงบวกต่อการเร่งปฏิกิริยาได้เช่นเดียวกัน แต่ในกรณีของไม้กระถินยักษ์ อะลูมินาต้องผ่านการดูดซับ 3 ครั้ง ถึงจะเห็นอันตรกิริยาเชิงบวกต่อการเร่งปฏิกิริยา

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการใช้อะลูมินาเป็นวัสดุเบตสำหรับการดูดซับแร่ธาตุจากฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส แล้วพบว่า การดูดซับแร่ธาตุจากฟางข้าวจะให้ปริมาณโลหะโพแทสเซียมที่ถูกดูดซับบนอะลูมินามากกว่าการดูดซับแร่ธาตุจากไม้กระถินยักษ์ อย่างไรก็ตาม เมื่อวิเคราะห์หาปริมาณพื้นที่ผิวของอะลูมินาที่ผ่านการดูดซับแร่ธาตุแล้วพบว่า อะลูมินาที่ผ่านการดูดซับแร่ธาตุจากฟางข้าวมีพื้นที่ผิวสูงกว่าการดูดซับแร่ธาตุจากไม้กระถินยักษ์ แสดงให้เห็นว่าอะลูมินาที่ดูดซับโลหะโพแทสเซียมได้มากกว่าไม่ได้ไปบดบังพื้นที่ผิวของอะลูมินาให้ลดลง แต่ น่าจะเป็นผลของคาร์บอนที่เกาะตัวบนอะลูมินามากกว่าที่ทำให้พื้นที่ผิวของอะลูมินานั้นลดลง และเมื่อพิจารณาปริมาณของสารระเหยของชีวมวลทั้งสองพบว่า ไม้กระถินยักษ์มีปริมาณที่มากกว่าฟางข้าว จึงทำให้มีโอกาสที่จะเกิดการฝังตัวของคาร์บอนบนพื้นที่ผิวอะลูมินา ดังนั้นควรศึกษาเพิ่มเติมถึงผลของปริมาณสารระเหยในชีวมวลต่อพฤติกรรมของการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทด้วยวัสดุเบต

การให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์ในงานวิจัยนี้เป็นการให้ความร้อนทั้งในส่วนการปลดปล่อยโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทจากการสลายตัวของชีวมวลและส่วนของการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทด้วยวัสดุเบตด้วยอุณหภูมิเดียวกัน จึงทำให้การให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงถึง 800 องศาเซลเซียส โลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทถูกปลดปล่อยและถูกดูดซับบนวัสดุเบตได้มากขึ้น ซึ่งทำให้พฤติกรรมในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทด้วยวัสดุเบตขึ้นอยู่กับปริมาณของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่ถูกปลดปล่อยมากกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ ดังนั้นควรทำการปรับแต่งเตาเผาที่ให้ความร้อนสำหรับให้ความร้อนแก่ส่วนของการสลายตัวของชีวมวลและส่วนของการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทแยกจากกันเพื่อจะศึกษาผลของอุณหภูมิในการดูดซับได้อย่างชัดเจนมากขึ้น โดยคงอุณหภูมิในการสลายตัวของชีวมวลเอาไว้

จากความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในเตาผลิตแก๊สแบบพลูอิโดซ์เบตแบบหมุนเวียนและเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ แต่อย่างไรก็ตามควรศึกษาอิทธิพลของบรรยากาศในการสลายตัวของชีวมวลต่อการปลดปล่อยของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท และบรรยากาศในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทด้วยวัสดุเบตเพิ่มเติมอีกเช่นกัน

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- จุฑาภรณ์ สิงห์สุ่ถ้ำ. ผลของแร่ธาตุต่อการสลายตัวด้วยความร้อนของชีวมวล. วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- นคร ทิพยาวงศ์. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., 2552.
- วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ. ปฏิกิริยาเร่ง เคมีเกี่ยวกับผิวและปิโตรเคมี. สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., 2548
- วงศต วงศ์ภักย์. ชีวมวล:อีกทางเลือกหนึ่งของพลังงานไทย. มติชนสุดสัปดาห์ (7 พ.ค. 2547) : 31
- ศิวพรรณ มหาสุภาพ. ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำเชิงเร่งปฏิกิริยาของทาร์จาก
ชีวมวลในเบดนิ่งสองชั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- สุภชิตา เกริกไกววัล. แก๊สสังเคราะห์จากแก๊สไพเคชันด้วยไอน้ำของทะเลลายปาล์มน้ำมัน. วิทยานิพนธ์
ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
2551.
- เอกพร แจ่มกระจ่าง. แก๊สไพเคชันด้วยไอน้ำและออกซิเจนของพลาสติกผสมในเครื่องปฏิกรณ์เบด
นิ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- เอกสิทธิ์ สกุลการคำ. ผลของแร่ธาตุต่อแก๊สไพเคชันร่วมของถ่านหินและชีวมวล. วิทยานิพนธ์
ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.

ภาษาอังกฤษ

- Bartels, M., Weigang, L., Nijenhuis, J., Kapteijn, F. and Ommen, J. Agglomeration in
fluidized beds at high temperatures: Mechanisms, detection and prevention.
Progress in Energy and Combustion Science 34 (2008):633-666.
- Binnewies, and Milke. Thermochemical data of elements and compounds. 2nd ed.
Weinheim: Wiley-VCH, 2002.

- Cummer, K., and Brown, R. Ancillary equipment for biomass gasification. Biomass and Bioenergy 23 (2002):113-128.
- Dahlin, Robert S., Johnny R. Dorminey, WanWang Peng, Roxann F. Leonard, and Pannalal Vimalchand. Preventing Ash Agglomeration during Gasification of High-Sodium Lignite. Energy & Fuels 23 (2009):785-793.
- Davidsson, K. O., B. J. Stojkova, and J. B. C. Pettersson. Alkali Emission from Birchwood Particles during Rapid Pyrolysis. Energy & Fuels 16(2002):1033-1039.
- Dou, Binlin, Wenqin Shen, Jinsheng Gao, and Xingzhong Sha. Adsorption of alkali metal vapor from high-temperature coal-derived gas by solid sorbents. Fuel Processing Technology 82(2003):51-60.
- Ergudenler, A., and A.E. Ghaly. Agglomeration of alumina sand in a fluidized bed straw gasifier at elevated temperatures. Bioresource Technology 43(1993):259-268.
- Iwatsuki, M., Morishita, K., Tsutsumi, A., Li, C.Z. and Chiba, T. Roles of inherent metallic species in secondary reactions of tar and char during rapid pyrolysis of brown coals in a drop-tube reactor. Fuel 81(2002):1977-1987.
- Hosoya, T., Kawamoto, H. and Saka, S. Pyrolysis gasification reactivities of primary tar and char fractions from cellulose and lignin as studied with a closed ampoule reactor. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 83(2008):71-77.
- Kaczorowski, J., Lindstad, T. and Syvertsen, M. The Influence of Potassium on the Boudouard Reaction in Manganese Production. ISIJ International 47(2007):1599-1604.
- Keown, D., Favas, G., Hayashi, J. and Li, C.Z. Volatilisation of alkali and alkaline earth metallic species during the pyrolysis of biomass: differences between sugar cane bagasse and cane trash. Bioresource Technology 96(2005):1570-1577.

- Kosminski, A., Ross, D.P. and Agnew, J.B. Reactions between sodium and kaolin during gasification of a low-rank coal. Fuel Processing Technology 87(2006):1051-1062.
- Luthra, K., and LeBlanc, Oliver H.. Adsorption of sodium chloride and potassium chloride on alumina at 800-900 °C. The Journal of Physical Chemistry 88(1984):1896-1901.
- Lv, D., Xu, M., Liu, X., Zhan, Z., Li, Z. and Yao, H. Effect of cellulose, lignin, alkali and alkaline earth metallic species on biomass pyrolysis and gasification. Fuel Processing Technology 91(2010):903-909.
- Mašek, O., Sonoyama, N., Ohtsubo, E., Hosokai, S., Li, C., Chiba, T. and Hayashi, J. Examination of catalytic roles of inherent metallic species in steam reforming of nascent volatiles from the rapid pyrolysis of a brown coal. Fuel Processing Technology 88(2007):179-185.
- Nishimura, M., Iwasaki, S. and Horio, M. The role of potassium carbonate on cellulose pyrolysis. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 40(2009):630-637.
- Okuno, T., Sonoyama, N., Hayashi, J., Li, C., Sathe, C. and Chiba, T. Primary Release of Alkali and Alkaline Earth Metallic Species during the Pyrolysis of Pulverized Biomass. Energy & Fuels 19(2005):2164-2171.
- Quyn, D., Wu, H. and Li, C. Volatilisation and catalytic effects of alkali and alkaline earth metallic species during the pyrolysis and gasification of Victorian brown coal. Part I. Volatilisation of Na and Cl from a set of NaCl-loaded samples. Fuel 81(2002):143-149.
- Shimizu, T., Han, J., Choi, S., Kim, L. and Kim, H. Fluidized-Bed Combustion Characteristics of Cedar Pellets by Using an Alternative Bed Material. Energy & Fuels 20(2006):2737-2742.

- Tran, K., Lisa, K., Steenari, B. and Lindqvist, O. A kinetic study of gaseous alkali capture by kaolin in the fixed bed reactor equipped with an alkali detector. Fuel 84(2005):169-175.
- Wang, J., Jiang, M., Yao, Y., Zhang, Y. and Cao, J. Steam gasification of coal char catalyzed by K_2CO_3 for enhanced production of hydrogen without formation of methane. Fuel 88(2009):1572-1579.
- Wu, Y., Wang, J., Wu, S., Huang, S. and Gao, J. Potassium-catalyzed steam gasification of petroleum coke for H_2 production: Reactivity, selectivity and gas release. Fuel Processing Technology 92(2011):523-530.
- Yip, K., Tian, F., Hayashi, J. and Wu, H. Effect of Alkali and Alkaline Earth Metallic Species on Biochar Reactivity and Syngas Compositions during Steam Gasification. Energy & Fuels 24(2011):173-181.
- Yokoyama, S., Miyahara, K., Tanaka, K. and Tashiro, J. Alkali metal carbonate catalyzed carbon-carbon dioxide reaction. I. Reaction mechanism. Journal of The Japan Petroleum Institute 26(1983):455-461.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวล

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis): ASTM D3172

1.1 ความชื้น (Moisture): ASTM D3173

1.1.1 วิธีการทดลอง

- 1) อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (drying oven) 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข้าเดสิเคเตอร์ (desiccator) ที่ไว้ประมาณ 15 นาที นำไปชั่งแล้วบันทึกน้ำหนัก
- 2) ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ลงในถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่ทราบน้ำหนักแล้ว บันทึกน้ำหนักตัวอย่าง
- 3) นำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักตัวอย่างคงที่
- 4) นำถาดอลูมิเนียมออกมาทิ้งไว้ให้เย็นลง แล้วนำเข้าเดสิเคเตอร์ ประมาณ 15 นาที แล้วชั่งถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่มีตัวอย่างอบแล้วอยู่ภายในบันทึกผล

1.1.2 สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$M = 100(W_1 - W_2) / W$$

เมื่อ M = ร้อยละของความชื้น

W_1 = น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นก่อนอบ (กรัม)

W_2 = น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นหลังอบ (กรัม)

W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

1.2 เถ้า (Ash): ASTM D3174

1.2.1 วิธีการทดลอง

- 1) เเผาครุชชีเบลพร้อมฝาในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ (desicator) ซึ่งน้ำหนักครุชชีเบล (crucible) พร้อมฝา
- 2) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างใส่ครุชชีเบล ประมาณ 1 กรัม
- 3) นำไปเผาบนตะเกียงบนเซนจนควันระเหยหมด
- 4) ใส่ครุชชีเบลพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักคงที่
- 5) นำครุชชีเบลออกจากเตาเผาวางทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในเดสิเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกผล

1.2.2 สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$A = 100(W_3 - W_4) / W$$

เมื่อ	A	=	ร้อยละของเถ้า
	W_3	=	น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝาที่มีเถ้า (กรัม)
	W_4	=	น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝา (กรัม)
	W	=	น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

1.3 ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter): ASTM D3175

1.3.1 วิธีการทดลอง

- 1) เเผาครุชชีเบล (crucible) พร้อมฝาในเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที นำออกจากเตาเผา ทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ (desicator) แล้วชั่งน้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝา บันทึกผล

- 2) ชั่งตัวอย่างใส่ในครุชชีเบลประมาณ 1 กรัม แล้วปิดฝาให้เรียบร้อย
- 3) นำไปให้ความร้อนโดยอยู่เหนือปากเตาเผา (Tubular Furnace) อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
- 4) หย่อนครุชชีเบลให้อยู่บริเวณปากเตา ที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
- 5) หย่อนครุชชีเบลให้อยู่กึ่งกลางเตา อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที
- 6) นำครุชชีเบลออกมาทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในเคสิเคเตอร์ประมาณ 15 นาที นำไปชั่งและบันทึกผล

1.1.1 สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$V = [100(W_5 - W_6) / W] - M$$

เมื่อ V	=	ร้อยละของสารระเหย
W_5	=	น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)
W_6	=	น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)
W	=	น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)
M	=	ร้อยละของความชื้น

1.2 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

1.2.1 สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} = 100 - M - A - V$$

ภาคผนวก ข

วิธีการวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟียี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC - 2014 Gas chromatograph (GC) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสารผสมที่ระเหยง่าย โดยสารผสมจะถูกฉีดเข้าไปในคอลัมน์ (Column) ที่บรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดจับที่เรียกว่า Stationary phase และมีแก๊สพา (Carrier gas) เป็นเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) เคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์เข้าสู่เครื่องวัด (Detector) สัญญาณที่เครื่องตรวจวัดได้รับนั้นจะถูกส่งไปบันทึกเป็นโครมาโตแกรม (Chromatogram) โดยเครื่องบันทึก (Recorder)

โดยแก๊สโครมาโตกราฟีมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

1. แก๊สพา (Carrier gas)
2. ตัวควบคุมการไหล (Flow controller)
3. ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่าง (Injector port)
4. คอลัมน์ (Column)
5. ดีเทคเตอร์ (Detector)
6. เครื่องบันทึก (Recorder)

รายละเอียดของส่วนประกอบที่สำคัญมีดังนี้

1. แก๊สพา

แก๊สพาเป็นแก๊สที่ใช้สำหรับพาสารตัวอย่าง ที่ถูกทำให้เป็นไอหรือแก๊สเฟสแล้วที่ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่างให้เข้าสู่คอลัมน์ต่อไป แก๊สพานี้ต้องมีการควบคุมอัตราการไหล (Flow rate) ให้คงที่เสมอ โดยสามารถเลือกใช้อัตราการไหลให้เหมาะสมได้ตามต้องการ อัตราการไหลของแก๊สพามีส่วนสำคัญต่อการวิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมให้คงที่

แก๊สพาโดยทั่วไปควรมีคุณสมบัติคือ มีสมบัติเฉื่อย ไม่เกิดปฏิกิริยากับสารตัวอย่าง มีมวลโมเลกุลต่ำและมีการแพร่กระจาย มีความบริสุทธิ์สูงและราคาไม่แพง แก๊สพาที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ แก๊สไนโตรเจน ฮีเลียม และแก๊สไฮโดรเจน

2. คอลัมน์

คอลัมน์เป็นส่วนสำคัญของการแยกสารด้วยเทคนิคทาง GC เมื่อแก๊สหรือไอของสารผสมในสารตัวอย่างผ่านคอลัมน์ สารที่บรรจุในคอลัมน์เปลาจะทำหน้าที่เป็นตัวแยกแก๊สหรือไอของสารผสมเหล่านั้นออกจากกันเป็นส่วน ๆ ดังนั้นโครมาโทแกรมที่ได้จะดีหรือไม่จึงขึ้นอยู่กับชนิดของคอลัมน์มาก

3. ดีเทคเตอร์

ดีเทคเตอร์คือเครื่องที่สามารถบ่งบอกว่ามีสารที่ต้องการวิเคราะห์หรือมีสารอื่นที่แตกต่างไปจากแก๊สพาออกมาจากคอลัมน์หรือไม่ ถ้ามีก็จะสามารถวัดได้ว่ามีปริมาณเท่าใดได้ด้วย ดังนั้นเครื่องตรวจวัดจึงต้องเป็นเครื่องที่มีลักษณะเฉพาะ สามารถให้สัญญาณกับสารต่าง ๆ ได้ ให้สภาพไวที่สูงพอ มีการตอบสนองที่ดีในช่วงความเข้มข้นของสารที่กว้างพอ และมีหลากหลายชนิด ตามความเหมาะสมของงานก็ได้

ลักษณะเฉพาะที่ต้องการของดีเทคเตอร์นั้น ควรจะมีลักษณะเฉพาะในการตอบสนองต่อสารเคมีที่ต้องการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

- ให้สภาพความไวสูง (High sensitivity)
- มีความเฉพาะต่อการตรวจหาสาร (Selectivity)
- ให้ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณในช่วงความเข้มข้นที่กว้างพอที่จะวัดได้อย่างถูกต้อง
- มีเสถียรภาพ (Stability) และความเที่ยง (Reproducibility)

ดีเทคเตอร์ที่นิยมใช้มี 2 ชนิดคือ ทอร์มอลคอนดักติวิตีดีเทคเตอร์ (TCD) และเฟลมไอออนไนเซชันดีเทคเตอร์ (FID) โดยในงานวิจัยนี้ใช้ดีเทคเตอร์แบบ TCD

ดีเทคเตอร์แบบ TCD

วิเคราะห์สารที่ออกมาจากแก๊สพา โดยใช้หลักการทำงานดังนี้ แก๊สพาบริสุทธิ์ (Reference gas) กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างอยู่ด้วยจะมีคุณสมบัติในการนำความร้อน (Thermal conductivity) ที่ต่างกัน เมื่อสารตัวอย่างที่ถูกแยกจากคอลัมน์พร้อมด้วยแก๊สพาผ่านเข้าไปในเครื่องตรวจวัดและผ่านขดลวด (Filament) ซึ่งทำให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าปริมาณหนึ่งขดลวดจะเสียความร้อนให้กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างที่เข้ามาในดีเทคเตอร์แล้ว ดีเทคเตอร์ก็จะทำการปรับ

กระแสไฟฟ้าเพื่อให้ขดลวดมีความร้อนเท่าเดิม กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการปรับความร้อนนี้จะเป็น
สัญญาณส่งเข้าเครื่องบันทึกออกมาเป็นโครมาโทแกรม

ภาคผนวก ค

การคำนวณ

1. หาอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเข้าท่อชั้นในและชั้นนอก

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อชั้นใน 8 มิลลิเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อชั้นใน 10 มิลลิเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อชั้นนอก 20 มิลลิเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อชั้นนอก 22 มิลลิเมตร

$$\text{ความเร็ว/พื้นที่หน้าตัด} = \text{flow}_{\text{ท่อชั้นใน}} / A_{\text{ท่อชั้นใน}} = \text{flow}_{\text{ท่อชั้นนอก}} / A_{\text{ท่อชั้นนอก}}$$

$$\text{เพราะฉะนั้น} \quad \text{flow}_{\text{ท่อชั้นใน}} / \text{flow}_{\text{ท่อชั้นนอก}} = A_{\text{ท่อชั้นใน}} / A_{\text{ท่อชั้นนอก}}$$

$$\text{flow}_{\text{ท่อชั้นใน}} / \text{flow}_{\text{ท่อชั้นนอก}} = \pi r_{\text{ท่อชั้นใน}}^2 / \pi r_{\text{ท่อชั้นนอก}}^2$$

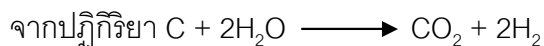
$$\text{flow}_{\text{ท่อชั้นใน}} / \text{flow}_{\text{ท่อชั้นนอก}} = \pi (4)^2 / \pi [(10)^2 - (5)^2]$$

$$\text{จะได้} \quad \text{flow}_{\text{ท่อชั้นใน}} = 0.213 \text{ flow}_{\text{ท่อชั้นนอก}}$$

2. หาอัตราการป้อนไอน้ำ

น้ำหนักเซลลูโลส 0.12 กรัม

ร้อยละคาร์บอนในเซลลูโลส 42.79



$$C = 0.12 * (42.79/100) = 0.0513 \text{ กรัม} = 0.0513/12 = 0.00428 \text{ โมล}$$

$$H_2O = 0.00428 * 2 = 0.00856 \text{ โมล} = 0.00856 * 18 = 0.1370 \text{ กรัม} = 0.1370 \text{ มิลลิลิตร}$$

จะได้ อัตราการป้อนไอน้ำ 0.1370 มิลลิลิตร/นาที

3. หากร้อยละโดยปริมาตรของไอน้ำ

เปิดตารางไอน้ำ (Steam Table) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ได้ specific volume 4.952

ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม

อัตราการไหลของไอน้ำ 0.14 มิลลิลิตร/นาที่ = 0.14 กรัม/นาที่

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น Specific Volume} &= 4.952 \text{ ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม} * 0.14 \text{ กรัม/นาที่} * \\ & (1 \text{ กิโลกรัม/1000 กรัม}) * (1000 \text{ ลิตร/1 ลูกบาศก์เมตร}) * \\ & (1000 \text{ มิลลิลิตร/1 ลิตร}) \\ & = 693.28 \text{ มิลลิลิตร/นาที่} \end{aligned}$$

อัตราการไหลของไนโตรเจน 120 มิลลิลิตร/นาที่

$$\text{จาก } V_1/N_2 = T_1/T_2$$

$$120/N_2 = 298/1073$$

$$\text{จะได้ } V_2 = 438.08 \text{ มิลลิลิตร/นาที่}$$

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น ร้อยละโดยปริมาตรของไอน้ำ (\%Vol)} &= 693.28 / (438.08 + 693.28) * 100 \\ & = 61.7 \end{aligned}$$

4. Carbon Balance ในกระบวนการแกซีฟิเคชัน

กรณี เซลลูโลส + อะลูมินาที่ผ่านการดูดซับโลหะจากฟางข้าว ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 800 องศาเซลเซียส

(ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 800 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำ 0.14 มิลลิลิตรต่อนาที่)

น้ำหนักเซลลูโลส 0.12 กรัม

คาร์บอนในเซลลูโลส เท่ากับ 42.79 wt%

$$\text{เพราะฉะนั้น น้ำหนักคาร์บอนในเซลลูโลส} = 0.12 * 42.79 / 100 = 0.0513 \text{ กรัม}$$

น้ำหนักซาร์ที่ได้จากการทดลอง เท่ากับ 0.00 กรัม

คาร์บอนในซาร์ (C, Char) เท่ากับ 40.0 wt%

$$\text{เพราะฉะนั้น น้ำหนักคาร์บอนในซาร์} = 0.00 * 40.0 / 100 = 0.00 \text{ กรัม}$$

คาร์บอนในแก๊สที่ได้จากการทดลอง ($\text{CO} + \text{CH}_4 + \text{CO}_2$) เท่ากับ 0.0467 กรัม

$$\begin{aligned}\text{ดังนั้น น้ำหนักคาร์บอนในน้ำมันทาร์} &= \text{น้ำหนักคาร์บอนในเซลลูโลส} - (\text{น้ำหนัก} \\ &\quad \text{คาร์บอนในซาร์} + \text{น้ำหนักคาร์บอนในแก๊ส}) \\ &= 0.0513 - (0.0000 + 0.0467) \\ &= 0.0046 \text{ กรัม}\end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น คิดเป็นร้อยละ จะได้

$$\text{คาร์บอนในซาร์} = (0.0000/0.0513) * 100 = 0.00 \text{ wt\%}$$

$$\text{คาร์บอนในน้ำมันทาร์} = (0.0046/0.0513) * 100 = 8.97 \text{ \%wt}$$

$$\text{คาร์บอนในแก๊ส} = (0.0467/0.0513) * 100 = 91.03 \text{ wt\%}$$

ภาคผนวก ง

การหาความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด

ตาราง ง1 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวมาตรฐาน (Standard)

ชนิดแก๊ส	area	% balance in N ₂
H ₂	40312.2	1.00
CO	19593	1.00
CH ₄	7534.5	1.00
CO ₂	3202.7	1.00

อัตราการไหลแก๊สรวม 120 มิลลิลิตรต่อนาที

เวลาที่เก็บแก๊สทุก 15 นาที บรรจุในถุงเก็บแก๊ส เป็นเวลา 60 นาที

ปริมาตรแก๊สในถุงเก็บแก๊ส 1 ถุง เท่ากับ 1800 มิลลิลิตร

ตัวอย่างเช่น เซลลูโลส + อะลูมินาที่ผ่านการดูดซับโลหะจากฟางข้าวที่อุณหภูมิ 800 องศา

เซลเซียส และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 800 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำ

0.14 มิลลิลิตรต่อนาที น้ำหนักเซลลูโลส 0.12 กรัม

ตาราง ง2 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวอย่าง

1) ถุงที่ 1 (15 นาทีแรก)

ชนิดแก๊ส	area	% เทียบกับ std	ปริมาตรแก๊ส ในถุง (mL)	จำนวนโมล (mmol)
H ₂	51438.3	1.2576	22.9679	0.9392
CO	7831.6	3.9971	71.9485	2.9422
CH ₄	5809.6	0.7710	13.8791	0.5676
CO ₂	1161.7	0.3627	6.5290	0.2670

2) ถังที่ 2

ชนิดแก๊ส	area	% เทียบกับ std	ปริมาตรแก๊ส ในถัง (mL)	จำนวนโมล (mmol)
H ₂	381.7	0.0095	0.1704	0.0070
CO	0.0	0.0000	0.0000	0.0000
CH ₄	0.0	0.0000	0.0000	0.0000
CO ₂	501.8	0.1567	2.8202	0.1153

3) ถังที่ 3

ชนิดแก๊ส	area	% เทียบกับ std	ปริมาตรแก๊ส ในถัง (mL)	จำนวนโมล (mmol)
H ₂	27.0	0.0000	0.0120	0.0005
CO	0.0	0.0000	0.0000	0.0000
CH ₄	0.0	0.0000	0.0000	0.0000
CO ₂	0.0	0.0000	0.0000	0.0000

4) ถังที่ 4

ชนิดแก๊ส	area	% เทียบกับ std	ปริมาตรแก๊ส ในถัง (mL)	จำนวนโมล (mmol)
H ₂	0.0	0.0000	0.0000	0.0000
CO	0.0	0.0000	0.0000	0.0000
CH ₄	0.0	0.0000	0.0000	0.0000
CO ₂	0.0	0.0000	0.0000	0.0000

ดังนั้นผลิตภัณฑ์แก๊สที่เก็บได้ในเวลา 60 นาที

ชนิดแก๊ส	จำนวนโมล (mmol)	จำนวนโมล/น้ำหนักชีวมวล (mmol/g biomass)
H ₂	0.9467	7.856
CO	2.9422	24.416
CH ₄	0.5676	4.710
CO ₂	0.3823	3.173

ภาคผนวก จ

ข้อมูลการทดลอง

ตาราง จ1 ข้อมูลการทดลองของร้อยละการระเหยตัวของโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท ภายใต้การไพโรไลซิสของฟางข้าวและไม้กระถินยักษ์

ชนิดชีวมวล	อุณหภูมิในการไพโรไลซิส	ครั้งที่	ร้อยละการระเหยตัว			
			Ca	K	Mg	Na
ฟางข้าว	600°C	1	5.621	11.776	14.400	48.685
		2	0.646	14.287	13.432	57.889
		เฉลี่ย	3.134	13.031	13.916	53.287
		SD	3.518	1.776	0.685	6.509
	700°C	1	11.101	24.683	23.351	58.693
		2	9.367	21.909	18.417	55.484
		เฉลี่ย	10.234	23.296	20.884	57.088
		SD	1.226	1.962	3.489	2.269
	800°C	1	8.393	28.799	14.434	61.462
		2	13.622	36.195	20.301	66.706
		เฉลี่ย	11.007	32.497	17.368	64.084
		SD	3.698	5.230	4.149	3.708
ไม้กระถินยักษ์	600°C	1	9.888	20.883	16.444	43.451
		2	7.942	18.870	19.750	39.589
		เฉลี่ย	8.915	19.876	18.097	41.520
		SD	1.376	1.423	2.338	2.731
	700°C	1	13.028	34.096	32.587	65.745
		2	12.922	31.321	20.729	55.692
		เฉลี่ย	12.975	32.858	26.658	60.718
		SD	0.075	1.750	8.385	7.108
	800°C	1	9.825	38.852	40.277	71.264
		2	13.074	41.393	47.163	73.623
		เฉลี่ย	11.450	40.123	43.720	72.443
		SD	2.297	1.797	4.869	1.688

ตาราง ๑2 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท
ในวัฏภาคไอจากชีวมวลด้วยวัสดุเบต

วัสดุเบต	ชนิดชีวมวล	อุณหภูมิในการดูดซับ	ปริมาณของโลหะ AAEM (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
			Ca	K	Mg	Na
อะลูมินา	ฟางข้าว	600 °C	0.001	0.010	0.000	0.000
		700 °C	0.006	0.037	0.000	0.001
		800 °C	0.013	0.255	0.000	0.002
	ไม้กระถินยักษ์	600 °C	0.008	0.022	0.000	0.000
		700 °C	0.004	0.031	0.000	0.001
		800 °C	0.002	0.039	0.000	0.002
ซิลิกา	ฟางข้าว	600 °C	0.018	0.010	0.002	0.011
		700 °C	0.019	0.029	0.002	0.011
		800 °C	0.024	0.045	0.002	0.014
	ไม้กระถินยักษ์	600 °C	0.026	0.010	0.002	0.009
		700 °C	0.026	0.013	0.002	0.010
		800 °C	0.027	0.014	0.002	0.011

ตาราง ๑3 ข้อมูลการทดลองของอัตราการใช้ของแก๊สตัวพาในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอล
คาไลน์เอิร์ทในวัฏภาคไอจากชีวมวลด้วยวัสดุเบต ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 800 องศาเซลเซียส

วัสดุเบต	อัตราการไหล ของแก๊สตัวพา ในการดูดซับ	ชนิดชีวมวล	ปริมาณของโลหะ AAEM (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
			Ca	K	Mg	Na
อะลูมินา	60 มิลลิลิตร ต่อนาที	ฟางข้าว	0.008	0.234	0.000	0.000
		ไม้กระถินยักษ์	0.013	0.051	0.001	0.005
	120 มิลลิลิตร ต่อนาที	ฟางข้าว	0.013	0.255	0.000	0.002
		ไม้กระถินยักษ์	0.002	0.039	0.000	0.002

ตาราง ๑4 ข้อมูลการทดลองของผลจำนวนครั้งในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท
ในวัฏภาคโตะจากชีวมวลด้วยวัสดุเบด ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 800 องศาเซลเซียส

วัสดุเบด	อัตราการไหล ของแก๊สตัว พาในการดูด ซับ	ชนิดชีวมวล	จำนวน ครั้งในการ ดูดซับ	ปริมาณของโลหะ AAEM (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
				Ca	K	Mg	Na
อะลูมินา	60 มิลลิลิตร ต่อนาที	ฟางข้าว	1	0.008	0.234	0.000	0.000
			3	0.013	0.524	0.002	0.005
			5	-	-	-	-
		ไม้กระถิน ยักษ์	1	0.013	0.051	0.001	0.005
			3	0.003	0.180	0.001	0.005
			5	-	-	-	-
	120 มิลลิลิตร ต่อนาที	ฟางข้าว	1	0.013	0.255	0.000	0.002
			3	0.001	0.633	0.000	0.002
			5	0.064	0.763	0.000	0.000
		ไม้กระถิน ยักษ์	1	0.002	0.039	0.000	0.002
			3	0.010	0.156	0.001	0.002
			5	0.065	0.212	0.000	0.000

ตาราง ๑5 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำของวัสดุเบดก่อนและหลังดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 800 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊สตัวพา 120 มิลลิลิตรต่อนาที

วัสดุเบด	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	ครั้งที่	ร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์			องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส (มิลลิโมลต่อกรัม)			
			แก๊ส	ถ่านชาร์	น้ำมันทาร์	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂
อะลูมินาก่อนการดูดซับ	600	1	45.87	14.98	39.15	2.28	12.03	1.29	3.04
		2	49.08	14.77	36.15	2.40	13.10	1.47	2.93
		3	46.12	14.73	39.15	2.26	11.38	1.39	3.67
		เฉลี่ย	47.48	14.88	39.15	2.31	12.17	1.38	3.21
		SD	2.27	0.15	1.73	0.08	0.87	0.09	0.40
	700	1	74.45	0.89	24.66	5.17	20.77	3.19	2.59
		2	77.84	0.93	21.24	5.55	22.27	3.37	2.11
		3	79.28	0.88	19.84	5.41	22.69	3.48	2.09
		เฉลี่ย	76.14	0.91	19.84	5.38	21.91	3.35	2.26
		SD	2.39	0.02	2.48	0.19	1.01	0.15	0.28
	800	1	83.85	0.00	16.15	6.24	21.74	3.82	4.34
		2	82.82	0.00	17.18	6.25	22.08	3.97	3.48
		3	85.88	0.00	14.12	7.09	23.41	3.94	3.27
		เฉลี่ย	84.18	0.00	16.66	6.53	22.41	3.91	3.70
		SD	1.56	0.00	0.73	0.49	0.88	0.08	0.57
อะลูมินาหลังการดูดซับโลหะจากฟางข้าว	600	1	50.80	15.54	33.66	3.13	11.82	1.93	4.37
		2	54.35	14.55	31.10	3.06	13.00	1.61	4.77
		3	-	-	-	-	-	-	-
		เฉลี่ย	52.58	15.05	32.38	3.09	12.41	1.77	4.57
		SD	2.51	0.70	1.81	0.05	0.83	0.22	0.29
	700	1	75.18	0.89	23.93	6.04	19.57	3.11	4.13
		2	75.99	0.90	23.11	6.07	20.71	3.44	2.95
		3	-	-	-	-	-	-	-
		เฉลี่ย	75.59	0.89	23.52	6.05	20.14	3.27	3.54
		SD	0.57	0.01	0.58	0.02	0.80	0.24	0.84
	800	1	90.45	0.00	9.55	7.47	24.80	4.47	2.97
		2	92.72	0.00	7.28	7.86	24.42	4.71	3.17
		3	-	-	-	-	-	-	-
		เฉลี่ย	91.58	0.00	7.28	7.66	24.61	4.59	3.07
		SD	1.61	0.00	1.61	0.27	0.27	0.17	0.14

ตาราง ๑5 (ต่อ) ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำของวัสดุเบดก่อนและหลังดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 800 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊สตัวพา 120 มิลลิลิตรต่อนาที

วัสดุเบด	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	ครั้งที่	ร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์			องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส (มิลลิโมลต่อกรัม)			
			แก๊ส	ถ่านชาร์	น้ำมันทาร์	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂
อะลูมินา หลังการดูดซับโลหะจากไม้กระถินยักษ์	600	1	46.16	14.64	39.20	2.49	12.32	1.78	2.37
		2	47.39	14.86	37.75	2.68	12.45	1.61	2.84
		3	-	-	-	-	-	-	-
		เฉลี่ย	46.77	14.75	38.48	2.58	12.38	1.69	2.60
		SD	0.87	0.16	1.03	0.14	0.09	0.12	0.33
	700	1	72.72	0.88	26.39	5.43	20.31	3.24	2.38
		2	73.31	0.91	25.78	4.96	19.92	3.17	3.04
		3	-	-	-	-	-	-	-
		เฉลี่ย	73.02	0.90	26.09	5.19	20.12	3.21	2.71
		SD	0.42	0.02	0.43	0.33	0.27	0.05	0.47
	800	1	85.87	0.00	14.13	6.85	23.45	4.41	2.76
		2	84.74	0.00	15.26	7.07	22.92	4.16	3.14
		3	87.65	0.00	12.35	6.82	23.75	4.28	3.22
		เฉลี่ย	86.09	0.00	13.91	6.91	23.37	4.28	3.04
		SD	1.47	0.00	1.47	0.14	0.42	0.12	0.24
ซิลิกา ก่อนการดูดซับ	600	1	54.45	15.13	30.42	2.06	13.18	1.65	4.59
		2	-	-	-	-	-	-	-
		3	-	-	-	-	-	-	-
		เฉลี่ย	54.45	15.13	30.42	2.06	13.18	1.65	4.59
		SD	-	-	-	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
	700	1	87.76	0.91	11.33	5.48	24.57	4.06	2.66
		2	-	-	-	-	-	-	-
		3	-	-	-	-	-	-	-
		เฉลี่ย	87.76	0.91	11.33	5.48	24.57	4.06	2.66
		SD	-	-	-	-	-	-	-
	800	1	88.55	0.00	11.45	6.56	25.74	4.56	1.28
		2	88.35	0.00	11.65	6.76	26.29	4.38	0.83
		3	-	-	-	-	-	-	-
		เฉลี่ย	88.45	0.00	11.55	6.66	26.01	4.47	1.06
		SD	0.14	0.00	0.14	0.14	0.39	0.12	0.32

ตาราง ๑5 (ต่อ) ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มน้ำมันนํ้าด้วยไอน้ำของวัสดุเบดก่อนและหลังดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 800 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊สตัวพา 120 มิลลิลิตรต่อนาที

วัสดุเบด	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	ครั้งที่	ร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์			องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส (มิลลิโมลต่อกรัม)			
			แก๊ส	ถ่านชาร์	น้ำมันนํ้า	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂
ซีลิกา หลังการ ดูดซับ โลหะจาก ฟางข้าว	600	1	55.50	14.93	29.57	2.42	15.02	1.98	2.79
		2	-	-	-	-	-	-	-
		3	-	-	-	-	-	-	-
		เฉลี่ย	55.50	14.93	29.57	2.42	15.02	1.98	2.79
		SD	-	-	-	-	-	-	-
	700	1	82.10	0.93	16.97	5.13	22.02	3.92	3.33
		2	-	-	-	-	-	-	-
		3	-	-	-	-	-	-	-
		เฉลี่ย	82.10	0.93	16.97	5.13	22.02	3.92	3.33
		SD	-	-	-	-	-	-	-
	800	1	84.72	0.00	15.28	6.60	24.18	4.16	1.87
		2	87.45	0.00	12.55	6.80	25.72	4.38	1.08
		3	84.38	0.00	15.62	6.51	23.54	4.49	2.06
		เฉลี่ย	85.52	0.00	14.48	6.64	24.48	4.34	1.67
		SD	1.68	0.00	1.68	0.15	1.12	0.16	0.52
ซีลิกา หลังการ ดูดซับ โลหะจาก ไม้กระถิน ยักษ์	600	1	49.10	14.93	35.96	2.03	13.55	1.63	2.33
		2	-	-	-	-	-	-	-
		3	-	-	-	-	-	-	-
		เฉลี่ย	49.10	14.93	35.96	2.03	13.55	1.63	2.33
		SD	-	-	-	-	-	-	-
	700	1	67.18	0.90	31.91	4.22	19.55	3.20	1.20
		2	-	-	-	-	-	-	-
		3	-	-	-	-	-	-	-
		เฉลี่ย	67.18	0.90	31.91	4.22	19.55	3.20	1.20
		SD	-	-	-	-	-	-	-
	800	1	80.76	0.00	19.24	6.11	23.60	3.99	1.21
		2	84.75	0.00	#REF!	6.32	24.84	4.21	1.18
		3	-	-	-	-	-	-	-
		เฉลี่ย	82.76	0.00	#REF!	6.22	24.22	4.10	1.19
		SD	2.82	0.00	#REF!	0.15	0.88	0.16	0.02

ตาราง ๑6 ข้อมูลการทดลองของผลอัตราการไหลของแก๊สตัวพาในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทต่อการทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 800 องศาเซลเซียส

วัสดุเบด	อัตราการไหลของแก๊สตัวพาในการดูดซับ	ร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์			องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส (มิลลิโมลต่อกรัม)			
		แก๊ส	ถ่านชาร์	น้ำมันทาร์	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂
อะลูมินาก่อนการดูดซับโลหะ	-	84.18	0.00	15.82	6.53	22.41	3.91	3.70
อะลูมินาหลังการดูดซับโลหะจากฟางข้าว	60 มิลลิลิตรต่อนาที	88.13	0.00	11.87	7.45	23.99	4.52	2.91
	120 มิลลิลิตรต่อนาที	91.58	0.00	8.42	7.66	24.61	4.59	3.07
อะลูมินาหลังการดูดซับโลหะจากไม้กระถินยักษ์	60 มิลลิลิตรต่อนาที	86.48	0.00	13.52	7.03	24.23	4.36	2.25
	120 มิลลิลิตรต่อนาที	86.09	0.00	13.91	6.91	23.37	4.28	3.04

ตาราง ๗7 ข้อมูลการทดลองของจำนวนครั้งในการดูดซับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทต่อ
การทำปฏิกิริยารีฟอร์มม่าน้ำมันทาร์ด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 800 องศาเซลเซียส

วัสดุเบด	อัตราการไหลของแก๊สตัวพาในการดูดซับ	จำนวนครั้งในการดูดซับ	ร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์			องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส (มิลลิโมลต่อกรัม)			
			แก๊ส	ถ่านชาร์	น้ำมันทาร์	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂
อะลูมินาก่อนการดูดซับโลหะ	-	-	84.18	0.00	15.82	6.53	22.41	3.91	3.70
อะลูมินาหลังการดูดซับโลหะจากฟางข้าว	60 มิลลิลิตร ต่อนาที	1	88.13	0.00	11.87	7.45	23.99	4.52	2.91
		3	90.55	0.00	9.45	8.01	23.99	4.77	3.53
	120 มิลลิลิตร ต่อนาที	1	91.58	0.00	8.42	7.66	24.61	4.59	3.07
		3	96.47	0.00	3.53	8.28	27.37	5.02	2.02
อะลูมินาหลังการดูดซับโลหะจากไม้กระถินยักษ์	60 มิลลิลิตร ต่อนาที	1	86.48	0.00	13.52	7.03	24.23	4.36	2.25
		3	89.19	0.00	10.81	7.05	24.53	4.54	2.74
	120 มิลลิลิตร ต่อนาที	1	86.09	0.00	13.91	6.91	23.37	4.28	3.04
		3	89.54	0.00	10.46	7.32	24.41	4.31	3.21
		5	85.59	0.00	14.41	7.09	23.28	4.57	2.67

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชัชวาล ธีรฐิตยางกูร เกิดเมื่อวันที่ 23 กรกฎาคม พ.ศ.2530 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2552