ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249143

ผลของจุลภูมิไพโรไลซิสต่อรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำเชิงแห้งต่อกิริยาของการ์อกซีเนชันในแบทช์สอง ขั้นตอน

นางสาวศิวพรรณ เผาสุภาพ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

b00253885

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249143

ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเชิงเร่งปฏิกิริยาของทาร์จากชีวมวลในเบดนิ่งสองขั้นตอน

นางสาวศิวพรรณ มหาสุภาพ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5172581623

EFFECT OF PYROLYSIS TEMPERATURE ON CATALYTIC STEAM REFORMING OF BIOMASS-DERIVED TAR IN TWO-STAGE FIXED BED

Miss Siwapan Mahasuphab

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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำเชิงเร่งปฏิกิริยาของทาร์จากชีวมวลในเบดนิ่งสองขั้นตอน
โดย	นางสาวศิวพรรณ มหาสุภาพ
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.วีรชัย สุนทรรังสรรค์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ดร.วีรชัย สุนทรรังสรรค์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.ธเนศ อุทิศธรรม)

ศิวพรรณ มหาสุภาพ : ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำเชิงเร่งปฏิกิริยาของทาร์จากชีวมวลในเบดนิ่งสองขั้นตอน. (EFFECT OF PYROLYSIS TEMPERATURE ON CATALYTIC STEAM REFORMING OF BIOMASS-DERIVED TAR IN TWO-STAGE FIXED BED) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. ประพันธ์ คูชลธารา, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร. วีรชัย สุนทรรังสรรค์ 127 หน้า.

249143

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำเชิงเร่งปฏิกิริยาของทาร์จากชีวมวล ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสองขั้นตอน ขั้นแรกศึกษาเอกลักษณ์เฉพาะตัวของทาร์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิในช่วง 400 ถึง 800 องศาเซลเซียส ขั้นที่สองศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสในปฏิกิริยารีฟอร์มิงด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทั้งแบบใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยแมกนิเซียมออกไซด์ โดยอิทธิพลที่ทำการตรวจสอบ คือ ชนิดของชีวมวลและอุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สและทาร์ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (GC/TCD) และแก๊สโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโทรเมตรี (GC-MS) ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสสูงขึ้นร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสมีแนวโน้มลดลง ในทางตรงกันข้ามร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์ที่เหลือจากกระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำทั้งในกรณีที่ใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีแนวโน้มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์มีค่าสูงที่สุด นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบระหว่างไม้กระถินยักษ์และขี้เลื่อยในกระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าขี้เลื่อยมีร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นชาร์ที่สูงกว่าแต่มีร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สที่ต่ำกว่าไม้กระถินยักษ์ นอกจากนี้ยังพบว่าขี้เลื่อยมีร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ต่ำกว่าไม้กระถินยักษ์ด้วย จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงมีความว่องไวต่อการสลายตัวด้วยไอน้ำและตัวเร่งปฏิกิริยาต่ำกว่าทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนทาร์ที่เกิดจากขี้เลื่อยนั้นมีความว่องไวต่อการสลายตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาต่ำกว่าทาร์ที่เกิดจากไม้กระถินยักษ์

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อ.....ศิวพรรณ มหาสุภาพ.....

สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา.....2553..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5172581623 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORDS : PYROLYSIS/ GASIFICATION/ BIOMASS-DERIVED TAR/ STEAM REFORMING

SIWAPAN MAHASUPHAB : EFFECT OF PYROLYSIS TEMPERATURE ON CATALYTIC STEAM REFORMING OF BIOMASS-DERIVED TAR IN TWO-STAGE FIXED BED. THESIS ADVISOR : ASST.PROF.PRAPAN KUCHONTHARA, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : WIRACHI SOONTORNRANGSON, Ph.D., [127] pp.

249143

Effect of pyrolysis temperature on catalytic steam reforming of biomass-derived tar was studied in this research. The pyrolysis and steam reforming were conducted in a two-stage fixed bed reactor. The influences of pyrolysis temperature in range of 400 to 800°C and biomass types were investigated on reforming reaction of the released tar at 800°C in terms of composition and conversion. The products including gas and tar were analyzed by GC/TCD and GC/MS, respectively. Results indicated that trend of carbon conversion into tar of pyrolysis was decreased obviously with an increase in pyrolysis temperature. In contrast, trend of carbon conversion into tar of steam reforming with catalyst was slightly increased. It was found that the released tar at 600°C was converted hardly by catalytic steam reforming. Sawdust gave higher carbon conversion into char than giant leucaena wood whereas it exhibited lower carbon conversion into gas. In addition, conversion of sawdust-tar by steam reforming was found to be less than that of giant leucaena-tar. Therefore, it can be concluded that released tar at relatively high pyrolysis temperature was more hardly decomposed than that released at low temperature. Moreover, the released tar of sawdust was more hardly decomposed than that released of giant leucaena wood.

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

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

Academic Year :.....2010.....Co-Advisor's Signature : .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา อาจารย์ที่ปรึกษา และดร.วีรชัย สุนทรรังสรรค์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้กรุณามอบความรู้ แนวคิด และข้อคิดเห็นต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้มอบคำแนะนำและความช่วยเหลือที่ดีตลอดมา

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี และเงินทุนอุดหนุนงานวิจัยภายใต้โครงการสร้างภาคีในการผลิตบัณฑิตระดับปริญญาโท-เอก ของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ร่วมกับภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ และดร.ธเนศ อุทิศธรรม กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ นักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้าง ซ่อมแซมเครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ รวมไปถึงให้ความรู้และคำแนะนำในการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่คอยดูแล ช่วยเหลือ เป็นกำลังใจอย่างดีและให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ชาวเคมีเทคนิคทุกคนที่ให้กำลังใจ ช่วยเหลือและให้คำแนะนำด้วยดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอมอบความดีทั้งหมดของงานวิจัยนี้ให้แก่ทุกท่านที่กล่าวมาแล้วข้างต้น และที่ยังไม่ได้เอ่ยนามมา ณ โอกาสนี้ด้วย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฌ

สารบัญภาพ..... ฎ

บทที่

1. บทนำ..... 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 3

1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย..... 4

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 5

2.1 ชีวมวล..... 5

2.2 เทคโนโลยีในการแปรรูปชีวมวล..... 12

2.3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแกซิฟิเคชัน..... 21

2.4 การทำความสะอาดผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแกซิฟิเคชัน..... 23

2.5 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเคมี..... 27

2.6 วิธีการเก็บทาร์จากกระบวนการแปรรูปทางความร้อนของชีวมวล..... 43

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 46

3. เครื่องมือและวิธีการทดลอง..... 50

3.1 การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์..... 50

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 51

3.3 วิธีการทดลอง..... 55

4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล..... 61

4.1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล..... 62

บทที่ หน้า

4.2 พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล..... 63
4.3 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิส..... 64
4.3.1 กระบวนการไพโรไลซิส..... 64
4.3.2 กระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำ..... 69
4.3.2.1 กระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา..... 69
4.3.2.2 กระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา..... 71
4.3.3 ความว่องไวของการสลายตัวทาร์..... 78
4.4 ผลของชนิดชีวมวล..... 80
4.4.1 กระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำ..... 80
4.4.2 ความว่องไวของการสลายตัวทาร์..... 85
5. สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ..... 87
5.1 สรุปผลการวิจัย..... 87
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 89
รายการอ้างอิง..... 91
ภาคผนวก..... 94
ภาคผนวก ก..... 95
ภาคผนวก ข..... 98
ภาคผนวก ค..... 102
ภาคผนวก ง..... 108
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 127

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 ข้อมูลการใช้ การผลิต การนำเข้า และมูลค่าการนำเข้าพลังงานเชิงพาณิชย์..... 1

2.1 ส่วนประกอบลิกโนเซลลูโลสของพืชพลังงาน..... 7

2.2 องค์ประกอบของทาร์แต่ละกลุ่ม..... 22

2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการรีฟอร์มิงของทาร์..... 26

2.4 ชนิดของตัวดูดซับประเภทต่างๆ..... 45

3.1 สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี..... 54

3.2 สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทรเมตรี..... 55

4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของชีวมวลทั้งสองชนิด..... 62

4.2 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของชีวมวลทั้งสองชนิด..... 62

ค1 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวมาตรฐาน (Standard)..... 105

ค2 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด..... 106

ง1 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์..... 108

ง2 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของไม้กระถินยักษ์..... 108

ง3 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของไม้กระถินยักษ์..... 109

ง4 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์..... 109

ง5 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของไม้กระถินยักษ์..... 110

ง6 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของไม้กระถินยักษ์..... 110

ง7 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการไพโรไลซิสของขี้เลื่อย..... 111

ง8 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของขี้เลื่อย..... 111

ง9 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของขี้เลื่อย..... 112

ตารางที่ หน้า

ง10 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการไพโรไลซิสของขี้เลื่อย..... 112
ง11 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของขี้เลื่อย..... 113
ง12 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของขี้เลื่อย..... 113
ง13 องค์ประกอบของทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส..... 114
ง14 องค์ประกอบของทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส..... 116
ง15 องค์ประกอบของทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส..... 118
ง16 องค์ประกอบของทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส..... 119
ง17 องค์ประกอบของทาร์ที่เหลือจากกระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส..... 120
ง18 องค์ประกอบของทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของขี้เลื่อยที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส..... 121
ง19 องค์ประกอบของทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของขี้เลื่อยที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส..... 123
ง20 องค์ประกอบของทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของขี้เลื่อยที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส..... 125
ง21 องค์ประกอบของทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของขี้เลื่อยที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส..... 126

สารบัญภาพ

ภาพประกอบที่ หน้า

2.1 โครงสร้างของเซลลูโลส..... 5

2.2 โครงสร้างของลิกนิน..... 6

2.3 องค์ประกอบของชีวมวล..... 8

2.4 วัฏจักรคาร์บอน..... 9

2.5 การเก็บและเตรียมชีวมวลก่อนป้อนเข้าเตา..... 13

2.6 การสูญเสียมวลขององค์ประกอบในชีวมวลแต่ละชนิดจากการไพโรไลซิส..... 17

2.7 โซนของการเกิดปฏิกิริยาต่างๆของกระบวนการแกซิฟิเคชัน..... 18

2.8 ขั้นตอนของกระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชัน..... 21

2.9 กระบวนการในการกำจัดน้ำมันทาร์เชิงเคมี..... 24

2.10 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงพลังงานระหว่างมีและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา..... 27

2.11 เส้นทางการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอะลูมินา กรอบสี่เหลี่ยมแสดงช่วงที่เฟสต่างๆ คงอยู่ ส่วนลูกศรแสดงช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลง..... 33

2.12 การเข้าเกาะของโมเลกุลน้ำบนพื้นผิวของอะลูมินา..... 34

2.13 ลักษณะของหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนพื้นผิวของอะลูมินา..... 34

2.14 การคายน้ำออกเมื่อนำเอาอะลูมินาไปอบแห้ง..... 35

2.15 กลไกการเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ ตัวเลขในรูปแทนแต่ละขั้นตอนของกลไกการเร่งปฏิกิริยา ส่วน A แทนสารตั้งต้นชนิด A และ B แทนสารผลิตภัณฑ์ชนิด B..... 39

2.16 การผสมระหว่างสารละลายเกลือของโลหะที่ว่องไวกับตัวรองรับ..... 41

2.17 การเตรียมด้วยวิธีเคลือบฝัง..... 42

2.18 ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีเคลือบฝัง..... 43

2.19 ขั้นตอนในการเก็บและการวิเคราะห์สารตัวอย่าง..... 44

3.1 การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสองขั้นตอน..... 50

3.2 แบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสองขั้นตอน..... 52

3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี..... 53

3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทรเมตรี..... 54

3.5 แผนผังวิธีการดำเนินงานวิจัย..... 60

4.1 พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของไม้กระถินยักษ์และขี้เลื่อยจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TG-DTA..... 63

ภาพประกอบที่ หน้า

4.2 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ของไม้กระถินยักษ์..... 64
4.3 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ของขี้เลื่อย 65
4.4 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สของไม้กระถินยักษ์..... 66
4.5 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สของขี้เลื่อย..... 66
4.6 องค์ประกอบของทาร์จากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่างๆของไม้กระถินยักษ์.... 67
4.7 องค์ประกอบของทาร์จากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่างๆของไม้กระถินยักษ์.... 68
4.8 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบของทาร์ที่อุณหภูมิต่างๆ..... 68
4.9 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซีสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ของไม้กระถินยักษ์..... 69
4.10 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ของขี้เลื่อย..... 70
4.11 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์เปรียบเทียบระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสและรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์และขี้เลื่อย..... 71
4.12 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างกระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำแบบใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของไม้กระถินยักษ์..... 73
4.13 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซีสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ของไม้กระถินยักษ์..... 74
4.14 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซีสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ของขี้เลื่อย 74
4.15 องค์ประกอบของทาร์จากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่างๆของไม้กระถินยักษ์... 75
4.16 หน่วยของ phenyl-propane ซึ่งยึดกันด้วยพันธะต่างๆ ภายในโครงสร้างของลิกนิน.... 76
4.17 การสลายตัวในปฏิกิริยาขั้นที่สองของลีโวกลูโคแซน (levoglucosan) ในกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวล..... 76
4.18 องค์ประกอบของทาร์ก่อนและหลังทำปฏิกิริยาในกระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของไม้กระถินยักษ์ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส..... 77
4.19 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ระหว่างกระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำแบบใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของไม้กระถินยักษ์..... 79
4.20 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ระหว่างกระบวนการรีฟอร์มิง

ภาพประกอบที่ หน้า

ด้วยไอน้ำแบบใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของขี้เลื่อย..... 80
4.21 ผลของชนิดชีวมวลต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นชาร์และแก๊สในกระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา..... 81
4.22 ผลของชนิดชีวมวลต่อองค์ประกอบฟีนอลิก คีโตน และกรดคาร์บอกซิลิกของทาร์ในกระบวนการไพโรไลซิส..... 82
4.23 ผลของชนิดชีวมวลต่อองค์ประกอบอะโรมาติก (aromatic compound) ของทาร์ในกระบวนการไพโรไลซิส..... 83
4.24 ผลของชนิดชีวมวลต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์ในกระบวนไพโรไลซิสและกระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา..... 83
4.25 ผลของชนิดชีวมวลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา..... 84
4.26 ผลของชนิดชีวมวลต่อร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ในกระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา..... 86
4.27 ผลของชนิดชีวมวลต่อร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ในกระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา..... 86
ข 1 องค์ประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโทรเมตรี..... 101
ง 1 โครมาโทแกรมของทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส..... 114
ง 2 โครมาโทแกรมของทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส..... 116
ง 3 โครมาโทแกรมของทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส..... 117
ง 4 โครมาโทแกรมของทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส..... 119
ง 5 โครมาโทแกรมของทาร์ที่เหลือจากกระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส..... 120
ง 6 โครมาโทแกรมของทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของขี้เลื่อยที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส..... 121
ง 7 โครมาโทแกรมของทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของขี้เลื่อยที่อุณหภูมิ 600

ภาพประกอบที่ หน้า

องศาเซลเซียส..... 123
ง 8 โครมาโทแกรมของทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของขี้เลื่อยที่อุณหภูมิ 700
องศาเซลเซียส..... 124
ง 9 โครมาโทแกรมของทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของขี้เลื่อยที่อุณหภูมิ 800
องศาเซลเซียส..... 126