การคาร์บอไนซ์แกลบในฟลูอิไดซ์เบด

นาย ชูศักดิ์ โกกะนุทรานนท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาเคมีเทคนิค
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ.2536

ISBN 974-583-074-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

019501
i17868494

CARBONIZATION OF RICE HUSK IN FLUIDIZED BED

Mr. Choosak Kokanutranont

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements
for the degree of Master of Science
Department of Chemical Technology
Graduate school
Chulalongkorn University
1993

ISBN 974-583-074-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การคาร์บอไนซ์แกลบในฟลูอิไดซ์เบด

โดย นายชูศักดิ์ โกกะนุทรานนท์

ภาควิชา เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษา ศ.ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เลอสรวง เมฆสุต)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

ชูศักดิ์ ไกกะนุทรานนท์ : การคาร์บอไนซ์แกลบในฟลูอิไดซ์เบด (CARBONIZATION OF RICE HUSK IN FLUIDIZED BED) อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, 125 หน้า. ISBN 974-583-074-7

การคาร์บอไนซ์เป็นกระบวนการเคมีทางความร้อน ที่สลายไล่สารอินทรีย์ภายในแกลบโดยนำเทคนิคฟลูอิไดเซชันมาประยุกต์ใช้ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นคาร์บอน และซิลิกา ที่สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตอัลฐานซิลิกา และสารประกอบซิลิกาอื่นๆ อันเป็นการแปรรูปแกลบไปสู่ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่า ในงานวิจัยครั้งนี้จะศึกษาถึงผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการคาร์บอไนซ์แกลบในฟลูอิไดซ์เบด ได้แก่ ปริมาณแกลบ, อัตราการป้อนก๊าซ, อุณหภูมิ และเวลา

จากการศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรต่อคุณสมบัติจากการวิเคราะห์โดยประมาณ ได้แก่ ค่าความชื้น สารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว พบว่า ปริมาณแกลบมีผลกระทบต่อคุณสมบัติต่างๆเพียงเล็กน้อย ส่วนอัตราการป้อนก๊าซ อุณหภูมิ และเวลา จะมีผลต่อแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด โดยเปอร์เซ็นต์ความชื้น และสารระเหยมีแนวโน้มลดลงแปรผกผันกับตัวแปรต่างๆ ส่วนเปอร์เซ็นต์เถ้า และคาร์บอนคงตัว จะแปรผันตามค่าตัวแปรต่างๆที่เพิ่มขึ้น และความสัมพันธ์ของตัวแปรต่อคุณสมบัติของแกลบที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ ในรูปฟังก์ชันสามตัวแปรสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$M/M_o = 0.963 + 1.024\, e^{-0.087U/Umf}\; e^{-0.031(T-T_o)/T_o}\; e^{-0.006t/t_o}$$

$$VM/VM_o = 0.124 + 5.595V' - 11.493V'^2 + 6.775V'^3$$

$$A/A_o = 0.999 - 1.228A' + 2.790A'^2$$

$$FC/FC_o = 0.822 \exp\left[9.804 \frac{U/U_{mf}}{0.483+U/U_{mf}} \frac{(T-T_o)/T_o}{78.355+(T-T_o)/T_o} \frac{t/t_o}{7.928+t/t_o} \right]$$

เมื่อ

$$V' = e^{-0.098U/Umf}\; e^{-0.116(T-T_o)/T_o}\; e^{-0.007t/t_o}$$

$$A' = \frac{U/U_{mf}}{0.224+U/U_{mf}} \frac{(T-T_o)/T_o}{4.332+(T-T_o)/T_o} \frac{t/t_o}{2.650+t/t_o}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2535 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

บทคัดย่อและบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้พิมพ์ทับจากต้นฉบับ

C425556 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY
KEY WORD : RICE HUSK/CARBONIZATION/PYROLYSIS/FLUIDIZATION
CHOOSAK KOKANUTRANONT : CARBONIZATION OF RICE HUSK IN FLUDIZED BED. THESIS ADVISOR : PROF.SOMSAK DAMRONGLERD,Dr.Ing. 125 pp.
ISBN 974-583-074-7

Carbonization, thermochemical conversion, is organic decomposition process that convert rice husk, agricultural wastes, to value product. Fluidization technique, applied to carbonization, give product mainly composed of carbon and silica that can be used to precusor in silica compound production. In this research, effect of variable to carbonization of rice husk in fluidized was investigated such as husk weight, gas velocity, temperature and time.

Husk char from carbonization process was examined moisture, volatile matter, ash and fixed carbon content by proximate analysis. The results showed that husk weight had little effect to char properties whereas gas velociy, temperature and time were significant factors.Percent moisture and volatile matter decreased with increasing of those variables but percent ash and fixed carbon had inversely effect. Relation of factors to proximate analysis properties of husk char in three variable function was showed in below equations.

$$M/M_o = 0.963 + 1.024\, e^{-0.087U/Umf}\, e^{-0.031(T-T_o)/T_o}\, e^{-0.006t/t_o}$$

$$VM/VM_o = 0.124 + 5.595V' - 11.493V'^2 + 6.775V'^3$$

$$A/A_o = 0.999 - 1.228A' + 2.790A'^2$$

$$FC/FC_o = 0.822 \exp\left[9.804 \frac{U/U_{mf}}{0.483+U/U_{mf}} \frac{(T-T_o)/T_o}{78.355+(T-T_o)/T_o} \frac{t/t_o}{7.928+t/t_o} \right]$$

when

$$V' = e^{-0.098U/Umf}\, e^{-0.116(T-T_o)/T_o}\, e^{-0.007t/t_o}$$

$$A' = \frac{U/U_{mf}}{0.224+U/U_{mf}} \frac{(T-T_o)/T_o}{4.332+(T-T_o)/T_o} \frac{t/t_o}{2.650+t/t_o}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2535 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ศ.ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำตักเตือน และช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้ให้ลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำ และช่วยเหลือ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ บุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ ช่วยซ่อมแซมอุปกรณ์ในในการทำงานวิจัยครั้งนี้จนสามารถดำเนินการวิจัยได้ดีมาตลอด และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้การสนับสนุนช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ทุนในงานวิจัยครั้งนี้บางส่วนได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัยจึงขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายสุดของกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญตาราง ..... ฌ
สารบัญภาพ ..... ญ
สัญลักษณ์ ..... ฒ

บทที่

1. บทนำ 1
2. วารสารปริทัศน์ 4
   2.1 แกลบ 4
      2.1.1 สัณฐานวิทยา 4
      2.1.2 ลักษณะทางกายภาพ 5
      2.1.3 องค์ประกอบ 5
   2.2 การแปรรูปชีวมวล 10
   2.3 กระบวนการเปลี่ยนแปลงเคมีทางความร้อน 12
      2.3.1 กลไกการไพโรไลซิส 14
      2.3.2 ผลกระทบของตัวแปรต่างๆต่อการไพโรไลซิส 19
      2.3.3 ผลิตภัณฑ์ที่ปลดปล่อยระหว่างการไพโรไลซิส 20
   2.4 การถ่ายเทความร้อนในฟลูอิไดซ์เบด 23
   2.5 ผลงานวิจัยในอดีต 24
3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง 38
   3.1 อุปกรณ์การทดลอง 38
      3.1.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดแกลบ 38
      3.1.2 ขั้นตอนการสกัดสารอินทรีย์ และอนินทรีย์ 38
      3.1.3 ขั้นตอนการคาร์บอไนซ์ 38
      3.1.4 อุปกรณ์การชัก และวิเคราะห์ตัวอย่าง 39

สารบัญ(ต่อ)

บทที่		หน้า
	3.2 การเตรียมวัตถุดิบ	40
	3.3 วิธีดำเนินการทดลอง	45
	3.4 วัตถุดิบ	46
4.	ผลการทดลอง	47
	4.1 การคาร์บอไนซ์ในฟลูอิไดซ์เบด	47
	4.2 อิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อคุณสมบัติ และลักษณะของผลิตภัณฑ์	50
	4.2.1 อิทธิพลของปริมาณแกลบต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์	51
	4.2.2 อิทธิพลของอัตราการป้อนก๊าซต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์	56
	4.2.3 อิทธิพลของเวลาต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์	61
	4.2.4 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์	66
	4.3 ผลของปริมาณแกลบ อัตราการไหลก๊าซ อุณหภูมิ และเวลาต่อผลิตภัณฑ์ก๊าซ	71
5.	วิจารณ์ผลการทดลอง	72
	5.1 การควบคุมสภาวะของระบบในช่วงแรก	72
	5.1.1 อัตราการป้อนก๊าซ	72
	5.1.2 อัตราการให้ความร้อน และปริมาณออกซิเจน	73
	5.2 ผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์	73
	5.2.1 ความชื้น	74
	5.2.2 สารระเหย	81
	5.2.3 เถ้า	89
	5.2.4 คาร์บอนคงตัว	96
	5.2.5 อัตราส่วนระหว่างซิลิกาต่อคาร์บอน	104
	5.3 ผลของตัวแปรต่างๆ กับผลิตภัณฑ์แกลบที่ได้จากการคาร์บอไนซ์	105
	5.4 ผลของตัวแปรต่างๆ กับผลิตภัณฑ์ก๊าซที่เกิดขึ้น	105
6.	สรุป และข้อเสนอแนะ	107
รายการอ้างอิง		110
ภาคผนวก		113
ประวัติผู้เขียน		125

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 ปริมาณและรายได้จากการส่งออกขี้เถ้าแกลบดำ 2

2.1 องค์ประกอบของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในแกลบ 6

2.2 ส่วนประกอบพวกแซคคาไลและลิกนิน 7

2.3 ปริมาณเถ้าและซิลิกาในส่วนต่างๆของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว 10

2.4 องค์ประกอบของเถ้าในพืชชนิดอื่นๆเปรียบเทียบกับเถ้าแกลบ 10

2.5 ปริมาณสิ่งเจือปนที่มีอยู่ในแกลบจากแหล่งต่างๆ 11

2.6 ผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสเซลลูโลส 20

2.7 ผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสไฮโลเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส 21

2.8 ผลิตภัณฑ์สารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิสลิกนิน 22

2.9 ปริมาณสิ่งเจือปนที่เหลืออยู่หลังการต้มกรดไฮโดรคลอริกที่สภาวะต่างๆ 31

2.10 ผลของการชะล้างแกลบด้วยกรดต่อการกำจัดโลหะที่มีอยู่ 34

2.11 ผลของการชะล้างแกลบด้วยกรด และอุณหภูมิในการเผาไหม้ต่อเวลาที่ต้องการให้ได้เถ้าสีขาว 34

4.1 ผลการวิเคราะห์โดยประมาณของแกลบที่ใช้เป็นวัตถุดิบ 48

ค.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของแกลบที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ 116

ค.2 ตัวอย่างผลวิเคราะห์ก๊าซที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ 119

จ.1 ค่าความชัน และจุดตัดแกน ของกราฟที่ปรับเป็นเส้นตรง 123

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 โครงสร้างของเซลลูโลส 6
2.2 โครงสร้างของน้ำตาลต่างๆที่ประกอบเป็นเฮมิเซลลูโลส 8
2.3 โครงสร้างของลิกนิน 8
2.4 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของชีวมวล 12
2.5 อุณหภูมิของปฏิกิริยาแบบอะเดียบาติกของชีวมวล 13
2.6 สายทางของปฏิกิริยาไพโรไลซิสเซลลูโลสที่อุณหภูมิต่ำ 15
2.7 สายทางของปฏิกิริยาไพโรไลซิสเซลลูโลสที่เกิดแข่งกัน 16
2.8 สายทางของปฏิกิริยาไพโรไลซิสเซลลูโลสที่อุณหภูมิสูง 17
2.9 ปรากฏการณ์ในการไพโรไลซิสลิกนิน 18
2.10 ปริมาณคาร์บอนในแกลบที่ผ่านการไพโรไลซิส กับเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 26
2.11 ปริมาณสารระเหยที่สลายตัวออกมาที่อุณหภูมิต่างๆ ที่แต่ละอุณหภูมิใช้เวลาในการไพโรไลซิส 15 นาที 26
2.12 ปริมาณสารระเหยที่สลายตัวออกมาที่เวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิการไพโรไลซิส 400 องศาเซลเซียส 27
2.13 เปอร์เซนต์ของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่างๆ 28
2.14 กราฟ TG, DTG และ DTA ของแกลบในสภาวะบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนและอากาศนิ่ง 29
2.15 กราฟ DTA ของแกลบที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนต่างๆ 30
2.16 กราฟดิฟแฟรกโตแกรมของเถ้าที่ได้จากการเผาไหม้แกลบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 32
2.17 เวลาที่มีผลกระทบต่อปริมาณผลึกซิลิกาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ... 33
2.18 เปอร์เซนต์การสูญเสียน้ำหนักของแกลบที่อุณหภูมิต่างๆ ที่อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 6.6 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที 35
3.1 การต้มแกลบด้วยกรดไฮโดรคลอริกโดยการรีฟลักซ์ในอ่างน้ำมัน 39
3.2 สัดส่วนของไซโคลนที่ต่อกับเตาคาร์บอไนซ์ 39

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.3 สัดส่วนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 40

3.4 แผนผังการทำงานของกระบวนการคาร์บอไนซ์ 40

3.5 เตาคาร์บอไนซ์แบบฟลูอิไดซ์เบด 41

3.6 เครื่องป้อนก๊าซ และถังเก็บก๊าซไหลเวียน 41

3.7 สัดส่วนของเตาคาร์บอไนซ์แบบฟลูอิไดซ์เบด 42

3.8 ลักษณะของแกลบที่ผ่านการปรับสภาพจากขั้นตอนต่างๆ 44

4.1 อุณหภูมิในเบดกรณีไม่มีการควบคุมอัตราการเพิ่มความร้อน 45

4.2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคาร์บอไนซ์กรณีที่ไม่มีการควบคุมการให้ความร้อน และปริมาณออกซิเจน 46

4.3 อุณหภูมิภายในเตากับเวลาที่มีการควบคุมการให้ความร้อน และปริมาณออกซิเจนต่ำกว่า 12 เปอร์เซนต์ 47

4.4 อุณหภูมิภายในเตากับเวลาที่มีการควบคุมการให้ความร้อน และปริมาณออกซิเจนต่ำกว่า 8 เปอร์เซนต์ 47

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับปริมาณแกลบ 49

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์สารระเหยกับปริมาณแกลบ 50

4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เถ้ากับปริมาณแกลบ 50

4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงตัวกับปริมาณแกลบ 51

4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนซิลิกาต่อคาร์บอนกับปริมาณแกลบ 51

4.12 ลักษณะของผลิตภัณฑ์จากการคาร์บอไนซ์ ที่อัตราการไหลก๊าซ 2.4 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที ที่ปริมาณแกลบต่างๆ 52

4.13 ลักษณะของผลิตภัณฑ์จากการคาร์บอไนซ์ ที่อัตราการไหลก๊าซ 2.4 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที ที่ปริมาณแกลบต่างๆ 53

4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับอัตราการไหลก๊าซ 54

4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์สารระเหยกับอัตราการไหลก๊าซ 55

4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เถ้ากับอัตราการไหลก๊าซ 55

4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงตัวกับอัตราการไหลก๊าซ 56

4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนซิลิกาต่อคาร์บอนกับอัตราการไหลก๊าซ 56

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.19 ลักษณะของผลิตภัณฑ์จากการคาร์บอไนซ์ ที่ปริมาณแกลบ 40 กรัม อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที ที่อัตราการไหลก๊าซต่างๆ 57
4.20 ลักษณะของผลิตภัณฑ์จากการคาร์บอไนซ์ ที่ปริมาณแกลบ 40 กรัม อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที ที่อัตราการไหลก๊าซต่างๆ 58
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลา 59
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์สารระเหยกับเวลา 60
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เถ้ากับเวลา 60
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงตัวกับเวลา 61
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนซิลิกาต่อคาร์บอนกับเวลา 61
4.26 ลักษณะของผลิตภัณฑ์จากการคาร์บอไนซ์ ที่ปริมาณแกลบ 60 กรัม อัตราการไหลก๊าซ 2.4 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่เวลาต่างๆ 62
4.27 ลักษณะของผลิตภัณฑ์จากการคาร์บอไนซ์ ที่ปริมาณแกลบ 60 กรัม อัตราการไหลก๊าซ 2.4 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่เวลาต่างๆ 63
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับอุณหภูมิ 64
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์สารระเหยกับอุณหภูมิ 65
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เถ้ากับอุณหภูมิ 65
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงตัวกับอุณหภูมิ 66
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนซิลิกาต่อคาร์บอนกับอุณหภูมิ 66
4.33 ลักษณะของผลิตภัณฑ์จากการคาร์บอไนซ์ ที่ปริมาณแกลบ 60 กรัม อัตราการไหลก๊าซ 2.4 เมตรต่อวินาที ใช้เวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ 67
4.34 ลักษณะของผลิตภัณฑ์จากการคาร์บอไนซ์ ที่ปริมาณแกลบ 60 กรัม อัตราการไหลก๊าซ 2.4 เมตรต่อวินาที ใช้เวลา 45 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ 68
4.35 เปอร์เซ็นต์ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับปริมาณแกลบที่อัตราการไหลก๊าซ 1.6 เมตรต่อวินาที เป็นเวลา 45 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ 69
4.36 เปอร์เซ็นต์ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับอัตราการไหลก๊าซ ที่ปริมาณแกลบ 40 กรัม เป็นเวลานาน 30 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ 70
4.37 เปอร์เซ็นต์ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กับเวลาที่ปริมาณแกลบ 60 กรัม อัตราการไหลก๊าซ 2.4 เมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิต่างๆ .. 70

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.38 เปอร์เซ็นต์ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับอุณหภูมิที่ปริมาณแกลบ 60 กรัม อัตราการไหลก๊าซ 2.4 เมตรต่อวินาที ที่เวลาต่างๆ ... 71

5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับอัตราส่วนความเร็วก๊าซที่เวลาต่างๆ และความสัมพันธ์ที่ปรับเป็นสมการเส้นตรง 76

5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับอัตราส่วนเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ และความสัมพันธ์ที่ปรับเป็นสมการเส้นตรง 77

5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับอัตราอุณหภูมิที่อัตราการป้อนก๊าซต่างๆ และความสัมพันธ์ที่ปรับเป็นสมการเส้นตรง 78

5.4 อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการคำนวณสมการติดค่าคงที่ และจากผลการทดลอง .. 80

5.5 อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง 81

5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสารระเหยกับอัตราส่วนความเร็วก๊าซที่เวลาต่างๆ และความสัมพันธ์ที่ปรับเป็นสมการเส้นตรง 84

5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสารระเหยกับอัตราส่วนเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ และความสัมพันธ์ที่ปรับเป็นสมการเส้นตรง 85

5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสารระเหยกับอัตราอุณหภูมิที่อัตราการป้อนก๊าซต่างๆ และความสัมพันธ์ที่ปรับเป็นสมการเส้นตรง 86

5.9 อัตราส่วนสารระเหยที่ได้จากการคำนวณสมการติดค่าคงที่และจากผลการทดลอง . 88

5.10 อัตราส่วนสารระเหยที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง 88

5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้ากับอัตราส่วนความเร็วก๊าซที่เวลาต่างๆ และ ความสัมพันธ์ที่ปรับเป็นสมการเส้นตรง 91

5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้ากับอัตราส่วนเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ และความสัมพันธ์ที่ปรับเป็นสมการเส้นตรง 92

5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้ากับอัตราอุณหภูมิที่อัตราการป้อนก๊าซต่างๆ และ ความสัมพันธ์ที่ปรับเป็นสมการเส้นตรง 93

5.14 อัตราส่วนเถ้าที่ได้จากการคำนวณสมการติดค่าคงที่ และจากผลการทดลอง 95

5.15 อัตราส่วนเถ้าที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง 95

5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคาร์บอนกับอัตราส่วนความเร็วก๊าซที่เวลาต่างๆ และความสัมพันธ์ที่ปรับเป็นสมการเส้นตรง 99

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคาร์บอนกับอัตราส่วนเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ และความสัมพันธ์ที่ปรับเป็นสมการเส้นตรง 100
5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคาร์บอนกับอัตราอุณหภูมิที่อัตราการป้อนก๊าซต่างๆ และ ความสัมพันธ์ที่ปรับเป็นสมการเส้นตรง 101
5.19 อัตราส่วนคาร์บอนที่ได้จากการคำนวณสมการติดค่าคงที่ และจากผลการทดลอง . 103
5.20 อัตราส่วนคาร์บอนที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง 104
ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วก๊าซที่ความดันมานอมิเตอร์ของออริฟิสต่างๆ ในสภาวะอุณหภูมิต่างกัน 113
ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันลด และความเร็วก๊าซ 114
ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วต่ำสุดที่เกิดสภาวะฟลูอิไดซ์กับอุณหภูมิ 115

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์

A = ปริมาณเถ้า (เปอร์เซ็นต์)

A_o = ปริมาณเถ้าเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์)

dP = ความดันลด (เซนติเมตรน้ำ)

e,exp = เอ็กซ์โปเนนเชียล

$f()$ = ฟังก์ชันของตัวแปร

FC = ปริมาณคาร์บอนคงตัว (เปอร์เซ็นต์)

FC_o = ปริมาณคาร์บอนคงตัวเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์)

ΔH° = เอนทาลปีของปฏิกิริยา (กิโลจูลต่อโมล)

M = ปริมาณความชื้น (เปอร์เซ็นต์)

M_o = ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์)

VM = ปริมาณสารระเหย (เปอร์เซ็นต์)

VM_o = ปริมาณสารระเหยเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์)

SiO_2 = ปริมาณซิลิกา (เปอร์เซ็นต์)

t = เวลา (นาที)

t_o = เวลาอ้างอิง 1 นาที

T = อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

T_o = อุณหภูมิอ้างอิง 30 องศาเซลเซียส

T_b = อุณหภูมิภายในเบด (องศาเซลเซียส)

U = อัตราการไหลก๊าซ (เมตรต่อวินาที)

U_{mf} = อัตราเร็วต่ำสุดที่เกิดสภาวะฟลูอิไดเซชัน (เมตรต่อวินาที)

$wt.$ = น้ำหนัก (กรัม)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย