การผลิตดีไฟน์ซิลิกาจากแกลบในขนาดขยายส่วน

นางสาว นริศรา อัจฉริยาเพ็ชร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาเคมีเทคนิค
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2538

ISBN 974-584-802-6

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16758204

LARGE-SCALE PRODUCTION OF DEFINED SILICA FROM RICE HUSK

Miss Narissara Adchariyapetch

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree or Master of Science
Department of Chemical Technology
Graduate School
Chulalongkorn University
1995

ISBN 974-584-802-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตดีไฟน์ซิลิกาจากแกลบในขนาดขยายส่วน
โดย	นางสาวนริศรา อัจฉริยาเพ็ชร
ภาควิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สันติ ถุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ กัญจนา บุณยเกียรติ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ปรีดา พิมพ์ขาวขำ)

..... กรรมการ
(Dr. Reinhard Conradt)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นริศรา อัจฉริยาเพ็ชร : การผลิตดีไฟน์ซิลิกาจากแกลบในขนาดขยายส่วน
(LARGE-SCALE PRODUCTION OF DEFINED SILICA FROM RICE HUSK)
อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ดร.ธราพงษ์ วิฑิตศานต์,
137 หน้า. ISBN 974-584-802-6

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงวิธีการผลิตดีไฟน์ซิลิกาคุณภาพสูงจากแกลบ ในเตาเผาแบบฟลูอิไดเซชันขนาดขยายส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูงประมาณ 130 เซนติเมตร โดยนำแกลบต้มกับกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร เป็นเวลา 3 ชั่วโมงเพื่อสกัดสิ่งเจือปนที่มีอยู่ในแกลบออก จากนั้นทำการไพโรไลซ์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 6.6 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที เพื่อลดปริมาณสารระเหย แล้วร่อนแยกแกลบที่มีขนาดใหญ่กว่า 60 เมช มาเผาในเตาฟลูอิไดซ์เบดเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ได้เถ้าซึ่งมี ซิลิกาอยู่สูง

จากการศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ปริมาณแกลบ, อัตราการป้อนอากาศ, อุณหภูมิ และเวลาในการเผา ปรากฏว่าภาวะที่เหมาะสมคือ ปริมาณแกลบ 100-150 กรัม, อัตราการป้อนอากาศ 0.15-0.27 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที, อุณหภูมิเบด 700 องศาเซลเซียส และเวลาในการเผา 3 ชั่วโมง เถ้าที่ได้มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET, N_2) อยู่ในช่วง 400 ถึง 490 ตารางเมตรต่อกรัม มีความบริสุทธิ์ของซิลิกา 99.6±0.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตรวจสอบรูปของซิลิกาด้วยเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์พบว่าเป็นอสัณฐานซิลิกามีขนาดอนุภาคของซิลิกาไม่เกิน 2 นาโนเมตร สิ่งเจือปนที่พบส่วนใหญ่คือแคลเซียมมีพวกอัลคาไลน์และธาตุอื่นปนอยู่เล็กน้อย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

C525565 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY
KEY WORD: AMORPHOUS SILICA / RICE HUSK / DEFINED SILICA
NARISSARA ADCHARIYAPETCH : LARGE-SCALE PRODUCTION OF DEFINED SILICA FROM RICE HUSK. THESIS ADVISOR : PROF.SOMSAK DAMRONGLERD, Dr.Ing. ASSIST.PROF.THARAPONG VITIDSANT, Dr.Ing. 137 pp. ISBN 974-584-802-6

High quality defined silica from rice husk was produced in large-scale fluidization furnace, 15 centimeter in diameter, 130 centimeter high. Rice husk was boiled in 1 molar hydrochloric acid for 3 hours to demineralize, and then pyrolysed in nitrogen at 6.6 lit/min, 550 degree celcius, and about 15 minutes to remove the volatile matters. The pyrolysed rice husk (PRH) with sizes larger than 60 mesh was sieved and used for combustion in constructed furnace. The silica rich ash was the product of this experiment.

The operating parameters were studied, they were, quantity of PRH, air flow rate, bed temperature and combustion time. The suitable conditions of this furnace are found to be; 100 to 150 grams of PRH, air flow rate of 0.15 to 0.27 cubic meter per minute, temperature 700 degree celcius and 3 hours combustion time, the silica ash obtained has a specific surface area (BET,N_2) of 400 to 490 m^2/g, and 99.6±0.2 wt.% purity. The silica in the rice husk ash was analysed by X-ray diffractometer and found to be amorphous with the size of silica particles smaller than 2 nanometer. The main cationic impurity was calcium, together with some alkali and other elements.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไป ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อ. เก็จวลี พฤษาทร และ ผศ.ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการวิจัยมาด้วยดีตลอด รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาสนับสนุนทุนวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่และบุคลากรทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณสังข์ ชมชื่น ที่ช่วยสร้างและซ่อมแซมอุปกรณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้จนสามารถดำเนินการวิจัยได้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ และบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ และห้องปฏิบัติการ และขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

และเนื่องจากทุนการวิจัยครั้งนี้บางส่วนได้รับมาจากทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายสุดนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา และพี่ ๆของผู้วิจัย ซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญภาพ ..... ฐ

สัญญลักษณ์ ..... ท

บทที่

1. บทนำ 1
2. วารสารปริทัศน์ 4

ลักษณะทางกายภาพของแกลบ 4

สัณฐานวิทยาของแกลบ 4

องค์ประกอบของแกลบ 5

1. เซลลูโลส 5
2. เฮมิเซลลูโลส 7
3. ลิกนิน 7
4. สารอนินทรีย์ 8

ลักษณะทางกายภาพของซิลิกา 10

1. ซิลิกาที่เป็นรูปผลึก 11
2. อสัณฐานซิลิกา 11
3. การสังเคราะห์อสัณฐานซิลิกาในทางการค้า 12
4. การนำซิลิกามาใช้ในงานอุตสาหกรรม 13

กระบวนการไพโรไลซิส 14

กระบวนการแกสิฟิเคชัน 16

1. ปฏิกิริยาออกซิจิโนไลซิส 16
2. ปฏิกิริยาไฮโดรจิโนไลซิส 17

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
2.	3. ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	17
	การเผาไหม้ของแกลบ	17
	การถ่ายเทความร้อนในฟลูอิไดซ์เบด	19
	ผลงานวิจัยในอดีต	20
3.	อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	40
	อุปกรณ์การทดลอง	40
	1. ขั้นตอนการทำความสะอาดแกลบ	40
	2. ขั้นตอนการสกัดสารอินทรีย์และอนินทรีย์	40
	3. ขั้นตอนการไพโรไลซิส	41
	4. ขั้นตอนการร่อนแยกขนาด	43
	5. ขั้นตอนการเผาด้วยระบบฟลูอิไดเซชัน	43
	6. อุปกรณ์ชักและวิเคราะห์ตัวอย่าง	49
	การเตรียมวัตถุดิบ	50
	1. ขั้นตอนการทำความสะอาดแกลบ	50
	2. ขั้นตอนการสกัดสารอินทรีย์และอนินทรีย์	50
	3. ขั้นตอนการไพโรไลซิส	51
	4. ขั้นตอนการร่อนแยกขนาด	51
	วิธีดำเนินการทดลอง	51
	1. การเผาด้วยระบบฟลูอิไดเซชัน	51
	2. ตัวแปรที่ทำการศึกษา	52
	วัตถุดิบ	53
4.	ผลการทดลอง	54
	ผลการวิเคราะห์หาคุณสมบัติของแกลบที่ใช้ในการทดลอง	54
	การเผาด้วยระบบฟลูอิไดเซชัน	55
	1. ผลกระทบของอัตราการป้อนอากาศและอัตราการให้ความร้อนที่มีต่ออุณหภูมิภายในเตา	55
	2. ลักษณะของเถ้า	57

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
4.	3. พื้นที่ผิวจำเพาะและความบริสุทธิ์ของซิลิกา	63
	4. รูปของซิลิกา	76
	5. องค์ประกอบของซิลิกา	86
	ผลการทดลองการเผาไหม้	87
5.	วิจารณ์ผลการทดลอง	88
	การคัดขนาดของเม็ดแกลบ	88
	1. จุดประสงค์	88
	2. วิธีคัดขนาดของแกลบ	89
	อัตราการให้ความร้อน	89
	การป้อนแกลบ	91
	ผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์	92
	1. ปริมาณแกลบในเตา	92
	2. อัตราการป้อนอากาศ	93
	3. อุณหภูมิภายในเบด	95
	4. เวลาเผาไหม้	97
	โครงสร้างและขนาดของอนุภาคซิลิกา	98
	สิ่งเจือปนที่มีอยู่ในซิลิกา	99
	สมดุลมวลสาร	99
	สภาวะที่เหมาะสม	100
6.	สรุปและข้อเสนอแนะ	103
รายการอ้างอิง		105
ภาคผนวก		108
ประวัติผู้เขียน		137

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	สถิติปริมาณและข้อมูลการนำเข้าซิลิกา	2
2.1	องค์ประกอบของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ในแกลบ	5
2.2	ส่วนประกอบพวกแซคคาไรด์และลิกนิน	6
2.3	ปริมาณเถ้าและซิลิกา ในส่วนต่าง ๆ ของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว	9
2.4	องค์ประกอบของเถ้าในพืชชนิดอื่น ๆ เปรียบเทียบกับเถ้าแกลบ	9
2.5	ปริมาณสิ่งเจือปนที่มีอยู่ในแกลบจากแหล่งต่าง ๆ	10
2.6	ชนิดของซิลิกาที่มีโครงสร้างรูปผลึก	11
2.7	ปริมาณสิ่งเจือปนที่เหลืออยู่หลังการต้มกรดไฮโดรคลอริกที่สภาวะต่าง ๆ	27
2.8	ผลของการชะล้างแกลบด้วยกรดต่อการกำจัดโลหะที่มีอยู่	32
2.9	ผลของการชะล้างแกลบด้วยกรด และอุณหภูมิในการเผาไหม้ต่อเวลาที่ต้องการให้ได้เถ้าอสัณฐานสีขาว	33
2.10	คุณสมบัติของเถ้าที่เตรียมจากการเผาแกลบที่ผ่านการไพโรไลซิส ที่อัตราการไหลอากาศ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	34
2.11	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าที่เตรียมจากการเผาแกลบที่ผ่านการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	35
4.1	ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของแกลบ	54
4.2	ปริมาณของแกลบที่มีผลต่อพื้นที่ผิวจำเพาะและความบริสุทธิ์ของซิลิกา ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.15 ลูกบาศก์เมตร/นาที เวลาเผาไหม้ 3 ชั่วโมง อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส	63
4.3	อัตราการป้อนอากาศที่มีผลต่อพื้นที่ผิวจำเพาะและความบริสุทธิ์ของซิลิกา ที่สภาวะ ปริมาณแกลบ 100 กรัม เวลาเผาไหม้ 3 ชั่วโมง อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส	63
4.4	อุณหภูมิภายในเตาที่มีผลต่อพื้นที่ผิวจำเพาะและความบริสุทธิ์ของซิลิกา ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.15 ลูกบาศก์เมตร/นาที ปริมาณแกลบ 100 กรัม เวลาเผาไหม้ 3 ชั่วโมง	64

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.5 เวลาเผาไหม้ที่มีผลต่อพื้นที่ผิวจำเพาะและความบริสุทธิ์ของซิลิกา ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.15 ลูกบาศก์เมตร/นาที ปริมาณแกลบ 100 กรัม อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส..... 64

4.6 อุณหภูมิภายในเตาที่มีผลต่อพื้นที่ผิวจำเพาะและความบริสุทธิ์ของซิลิกา ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.32 ลูกบาศก์เมตร/นาที ปริมาณแกลบ 100 กรัม เวลาเผาไหม้ 3 ชั่วโมง..... 65

4.7 เวลาเผาไหม้ที่มีผลต่อพื้นที่ผิวจำเพาะและความบริสุทธิ์ของซิลิกา ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.27 ลูกบาศก์เมตร/นาที ปริมาณแกลบ 100 กรัม อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส..... 65

4.8 องค์ประกอบของซิลิกาในรูปของสารประกอบออกไซด์ จากการเผาที่เวลาต่าง ๆ กัน ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.15 ลูกบาศก์เมตร/นาที ปริมาณแกลบ 100 กรัม อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส..... 86

4.9 แสดงผลการทดลองการเผาไหม้แกลบที่ผ่านการไพโรไลซิสแล้ว ที่สภาวะต่าง ๆ 87

ก.1 ข้อมูลการทดลองหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดสภาวะฟลูอิไดเซชันของแกลบ ที่ผ่านการเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส..... 109

ก.2 ข้อมูลการทดลองหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดสภาวะฟลูอิไดเซชันของแกลบ ที่ผ่านการเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส..... 110

ข.1 ข้อมูลการทดลองระหว่างค่าความดันที่อ่านได้จาก flow meter กับความเร็วของอากาศ ปรับเทียบเป็นอัตราการป้อนอากาศ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส..... 112

ฉ.1 อุณหภูมิในเตาฟลูอิไดเซชันที่ส่วนกระจายอากาศ ที่บริเวณกลางเตา และที่ส่วนขยายปากเตา..... 121

ช.1 แสดงสภาวะที่ทำการทดลอง..... 122

ช.2 ข้อมูลการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ 123

ช.3 แสดงผลวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Utimate analysis) และการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของแกลบที่ผ่านการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 6.6 ลิตร/นาที เป็นเวลา 15 นาที..... 124

ช.1 สมดุลมวลสารของการทดลอง..... 135

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ข.2 สมดุลพลังงานของการทดลอง..... 136

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างของเซลลูโลส	6
2.2	โครงสร้างของน้ำตาลต่าง ๆ ที่ประกอบเป็นเฮมิเซลลูโลส	7
2.3	โครงสร้างของพวกลิกนิน	8
2.4	การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของชีวมวล	14
2.5	อุณหภูมิของปฏิกิริยาแบบอะเดียบาติกของชีวมวล	15
2.6	ปริมาณคาร์บอนในแกลบที่ผ่านการไพโรไลซิสกับเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	21
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความว่องไวของปฏิกิริยาของเถ้าที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ	22
2.8	ผลของการดูดซับไอน้ำของแกลบ	23
2.9	ปริมาณสารระเหยที่สลายตัวออกมาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่แต่ละอุณหภูมิใช้เวลาในการไพโรไลซิส 15 นาที	24
2.10	ปริมาณสารระเหยที่สลายตัวออกมาที่เวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิการไพโรไลซิส 400 องศาเซลเซียส	24
2.11	ปริมาณของคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ที่อุณหภูมิของการไพโรไลซิสต่าง ๆ	25
2.12	กราฟดิฟแฟรกโตแกรมของเถ้าที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ	26
2.13	กราฟ TG, DTG และ DTA ของแกลบในสภาวะ บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนและอากาศนิ่ง	28
2.14	กราฟ DTA ของแกลบที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน	29
2.15	กราฟดิฟแฟรกโตแกรมของเถ้าที่ทำการเปาไหม้แกลบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง	30
2.16	เวลาที่มีผลกระทบต่อปริมาณผลึกซิลิกาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส	30
2.17	เตาเผาไหม้ในระบบฟลูอิไดซ์เบด	36
2.18	การกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเตาฟลูอิไดซ์เบดของการเผาไหม้แกลบ	37

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.19 การกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเตาฟลูอิไดซ์เบดของการเผาไหม้แกลบผสมกับถ่านหิน 38

2.20 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักของแกลบที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 6.6 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที 39

3.1 การต้มแกลบด้วยกรดไฮโดรคลอริกโดยการรีฟลักซ์ 40

3.2 แผนผังการทำงานของเตาเผาไพโรไลซิส 41

3.3 อุปกรณ์การสกัดสารอินทรีย์และอนินทรีย์โดรการรีฟลักซ์ 42

3.4 เตาเผาไพโรไลซิส 42

3.5 เครื่องร่อนแยก 43

3.6 สัดส่วนของเตาเผาฟลูอิไดเซชัน 44

3.7 แผนผังการทำงานของเตาเผาฟลูอิไดเซชัน 45

3.8 เตาเผาฟลูอิไดเซชัน 46

3.9 เครื่องป้อนอากาศแรงดันสูง 48

3.10 เครื่องวัดอัตราการป้อนอากาศ 48

3.11 เครื่องเก็บผลิตภัณฑ์ 49

3.12 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซออกซิเจน, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 50

3.13 ลักษณะของแกลบที่ผ่านการปรับสภาพจากขั้นตอนต่าง ๆ 53

4.1 อุณหภูมิภายในเตากับการอุ่นเตา ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.15 ลูกบาศก์เมตร/นาที โดยมีการหยุดให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ปริมาณแกลบ 100 กรัม 56

4.2 ลักษณะของเถ้า เมื่อปริมาณแกลบเท่ากับ 100, 150, 200 และ 300 กรัม ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.15 ลูกบาศก์เมตร/นาที เวลาเผาไหม้ 3 ชั่วโมง อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส 57

4.3 ลักษณะของเถ้า เมื่ออัตราการป้อนอากาศเท่ากับ0.10, 0.15, 0.27 และ 0.32 ลูกบาศก์เมตร/นาที ที่สภาวะ ปริมาณแกลบ 100 กรัม เวลาเผาไหม้ 3 ชั่วโมง อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส 58

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.4 ลักษณะของเถ้า เมื่ออุณหภูมิเตาเผาเท่ากับ 600, 650, 700 และ 750 องศาเซลเซียส ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.15 ลูกบาศก์เมตร/นาที ปริมาณแกลบ 100 กรัม เวลาเผาไหม้ 3 ชั่วโมง 59

4.5 ลักษณะของเถ้า เมื่อเวลาเผาไหม้เท่ากับ 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.15 ลูกบาศก์เมตร/นาที ปริมาณแกลบ 100 กรัม อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส..... 60

4.6 ลักษณะของเถ้า เมื่ออุณหภูมิเตาเผาเท่ากับ 600, 650, 700 และ 750 องศาเซลเซียส ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.32 ลูกบาศก์เมตร/นาที ปริมาณแกลบ 100 กรัม เวลาเผาไหม้ 3 ชั่วโมง..... 61

4.7 ลักษณะของเถ้า เมื่อเวลาเผาไหม้เท่ากับ 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.27 ลูกบาศก์เมตร/นาที ปริมาณแกลบ 100 กรัม อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส..... 62

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะกับปริมาณแกลบที่ป้อนลงในเตา ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.15 ลูกบาศก์เมตร/นาที เวลาเผาไหม้ 3 ชั่วโมง อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส..... 66

4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะกับอัตราการป้อนอากาศ ที่สภาวะ ปริมาณแกลบ 100 กรัม เวลาเผาไหม้ 3 ชั่วโมง อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส..... 67

4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะกับอุณหภูมิภายในเตา ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.15 และ 0.32 ลูกบาศก์เมตร/นาที ปริมาณแกลบ 100 กรัม เวลาเผาไหม้ 3 ชั่วโมง..... 68

4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะกับเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.15 และ 0.27 ลูกบาศก์เมตร/นาที ปริมาณแกลบ 100 กรัม อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส..... 69

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.12 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 500 เท่า ของตัวอย่างที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 489.7 ตารางเมตร/กรัม ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.15 ลูกบาศก์เมตร/นาที ปริมาณแกลบ 100 กรัม อุณหภูมิเบด 700 องศาเซลเซียส เวลาเผาไหม้ 3 ชั่วโมง..... 70

4.13 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 500 เท่า ของตัวอย่างที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 402.1 ตารางเมตร/กรัม ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.15 ลูกบาศก์เมตร/นาที ปริมาณแกลบ 100 กรัม อุณหภูมิเบด 700 องศาเซลเซียส เวลาเผาไหม้ 4 ชั่วโมง..... 71

4.14 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 500 เท่า ของตัวอย่างที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 340.2 ตารางเมตร/กรัม ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.15 ลูกบาศก์เมตร/นาที ปริมาณแกลบ 100 กรัม อุณหภูมิเบด 750 องศาเซลเซียส เวลาเผาไหม้ 3 ชั่วโมง..... 72

4.15 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 1000 เท่า ของตัวอย่างที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 489.7 ตารางเมตร/กรัม ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.15 ลูกบาศก์เมตร/นาที ปริมาณแกลบ 100 กรัม อุณหภูมิเบด 700 องศาเซลเซียส เวลาเผาไหม้ 3 ชั่วโมง..... 73

4.16 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 1000 เท่า ของตัวอย่างที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 402.1 ตารางเมตร/กรัม ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.15 ลูกบาศก์เมตร/นาที ปริมาณแกลบ 100 กรัม อุณหภูมิเบด 700 องศาเซลเซียส เวลาเผาไหม้ 4 ชั่วโมง..... 74

4.17 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 1000 เท่า ของตัวอย่างที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 340.2 ตารางเมตร/กรัม ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.15 ลูกบาศก์เมตร/นาที ปริมาณแกลบ 100 กรัม อุณหภูมิเบด 750 องศาเซลเซียส เวลาเผาไหม้ 3 ชั่วโมง..... 75

4.18 กราฟดิฟแฟรกโตแกรมของเถ้า ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.15 ลูกบาศก์เมตร/นาที เวลาเผาไหม้ 3 ชั่วโมง ปริมาณแกลบ 100 กรัม อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส..... 76

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.19 กราฟดิฟแฟรกโตแกรมของเถ้า
ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.15 ลูกบาศก์เมตร/นาที เวลาเผาไหม้
3 ชั่วโมง ปริมาณแกลบ 150 กรัม อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส..... 76
4.20 กราฟดิฟแฟรกโตแกรมของเถ้า
ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.15 ลูกบาศก์เมตร/นาที เวลาเผาไหม้
3 ชั่วโมง ปริมาณแกลบ 200 กรัม อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส..... 77
4.21 กราฟดิฟแฟรกโตแกรมของเถ้า
ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.15 ลูกบาศก์เมตร/นาที เวลาเผาไหม้
3 ชั่วโมง ปริมาณแกลบ 300 กรัม อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส..... 77
4.22 กราฟดิฟแฟรกโตแกรมของเถ้า
ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.15 ลูกบาศก์เมตร/นาที เวลาเผาไหม้
3 ชั่วโมง ปริมาณแกลบ 100 กรัม อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส..... 78
4.23 กราฟดิฟแฟรกโตแกรมของเถ้า
ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.15 ลูกบาศก์เมตร/นาที เวลาเผาไหม้
3 ชั่วโมง ปริมาณแกลบ 100 กรัม อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส..... 78
4.24 กราฟดิฟแฟรกโตแกรมของเถ้า
ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.15 ลูกบาศก์เมตร/นาที เวลาเผาไหม้
3 ชั่วโมง ปริมาณแกลบ 100 กรัม อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส..... 79
4.25 กราฟดิฟแฟรกโตแกรมของเถ้า
ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.10 ลูกบาศก์เมตร/นาที เวลาเผาไหม้
3 ชั่วโมง ปริมาณแกลบ 100 กรัม อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส..... 79
4.26 กราฟดิฟแฟรกโตแกรมของเถ้า
ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.27 ลูกบาศก์เมตร/นาที เวลาเผาไหม้
3 ชั่วโมง ปริมาณแกลบ 100 กรัม อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส..... 80
4.27 กราฟดิฟแฟรกโตแกรมของเถ้า
ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.32 ลูกบาศก์เมตร/นาที เวลาเผาไหม้
3 ชั่วโมง ปริมาณแกลบ 100 กรัม อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส..... 80

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.28 กราฟดิฟแฟรกโตแกรมของเถ้า
ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.15 ลูกบาศก์เมตร/นาที เวลาเผาไหม้
1 ชั่วโมง ปริมาณแกลบ 100 กรัม อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส..... 81
4.29 กราฟดิฟแฟรกโตแกรมของเถ้า
ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.15 ลูกบาศก์เมตร/นาที เวลาเผาไหม้
2 ชั่วโมง ปริมาณแกลบ 100 กรัม อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส..... 81
4.30 กราฟดิฟแฟรกโตแกรมของเถ้า
ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.15 ลูกบาศก์เมตร/นาที เวลาเผาไหม้
4 ชั่วโมง ปริมาณแกลบ 100 กรัม อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส..... 82
4.31 กราฟดิฟแฟรกโตแกรมของเถ้า
ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.32 ลูกบาศก์เมตร/นาที เวลาเผาไหม้
3 ชั่วโมง ปริมาณแกลบ 100 กรัม อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส..... 82
4.32 กราฟดิฟแฟรกโตแกรมของเถ้า
ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.32 ลูกบาศก์เมตร/นาที เวลาเผาไหม้
3 ชั่วโมง ปริมาณแกลบ 100 กรัม อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส..... 83
4.33 กราฟดิฟแฟรกโตแกรมของเถ้า
ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.32 ลูกบาศก์เมตร/นาที เวลาเผาไหม้
3 ชั่วโมง ปริมาณแกลบ 100 กรัม อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส..... 83
4.34 กราฟดิฟแฟรกโตแกรมของเถ้า
ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.27 ลูกบาศก์เมตร/นาที เวลาเผาไหม้
1 ชั่วโมง ปริมาณแกลบ 100 กรัม อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส..... 84
4.35 กราฟดิฟแฟรกโตแกรมของเถ้า
ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.27 ลูกบาศก์เมตร/นาที เวลาเผาไหม้
2 ชั่วโมง ปริมาณแกลบ 100 กรัม อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส..... 84
4.36 กราฟดิฟแฟรกโตแกรมของเถ้า
ที่สภาวะ อัตราการป้อนอากาศ 0.27 ลูกบาศก์เมตร/นาที เวลาเผาไหม้
4 ชั่วโมง ปริมาณแกลบ 100 กรัม อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส..... 85

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.1 ลักษณะของเถ้าที่เกิดจากอัตราการป้อนอากาศและอัตราการให้ความร้อนไม่เหมาะสม..... 90

5.2 ลักษณะการจับตัวกันของแกลบที่เป็นอุปสรรคต่อการเกิดสภาวะฟลูอิไดเซชัน..... 90

ก.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับความดันลด เพื่อหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดสภาวะฟลูอิไดเซชันของแกลบที่ผ่านการเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 300 และ 600 องศาเซลเซียส..... 111

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญญลักษณ์

Cp_{mean} = ความจุความร้อนของสาร, กิโลแคลอรี่/กิโลกรัมโมล . เคลวิน

ΔH = เอนทาลปีของปฏิกิริยา

Hm = ความชื้นโมลแลล, โมลของน้ำ/โมลของอากาศแห้ง

I = ปริมาณกระแสไฟฟ้า, แอมแปร์

T = เวลา, ชั่วโมง

Td = อุณหภูมิกระเปาะแห้ง, องศาเซลเซียส

w = อุณหภูมิกระเปาะเปียก, องศาเซลเซียส

Temp. = อุณหภูมิ, องศาเซลเซียส

V = ความต่างศักย์, โวลท์ (จูล/วินาที . แอมแปร์)

Wt. = น้ำหนัก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย