สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบาญตาราง	ญ
สารบาญภาพ	ฏ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ฒ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหางานวิจัย	1
1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	8
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	8
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	8
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 ระบบบำบัดน้ำเสียและกากตะกอนน้ำเสีย	9
2.1.1 แหล่งกำเนิดน้ำเสีย	10
2.1.2 การบำบัดน้ำเสีย	10
2.1.3 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์	11
- หลักการทำงานของระบบ	12
- กลไกในการทำงานของระบบแอตติเวตเตดสลัดจ์	13
2.1.4 การบำบัดกากตะกอนหรือสลัดจ์	14
2.1.5 การกำจัดกากตะกอนหรือสลัดจ์	15
2.1.6 ระบบบำบัดน้ำเสียมหาวิทยาลัยเชียงใหม่	16
- หลักการทำงานของโรงกำจัดน้ำเสียมหาวิทยาลัยเชียงใหม่	19
2.2 การบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชั่น	20

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.1 ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชั่น	20
2.2.2 คุณลักษณะของไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชั่น	21
2.2.3 ปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชั่น	23
2.3 ถ่านกัมมันต์และกระบวนการผลิต	23
2.3.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์	24
2.3.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์	26
2.3.3 สมบัติวัตถุดิบสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์	27
2.3.4 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์	28
- การคาร์บอไนซ์	28
- การกระตุ้น	30
- การกระตุ้นทางเคมี	31
- การกระตุ้นทางกายภาพ	33
2.3.5 โครงสร้างถ่านกัมมันต์	39
- โครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์	40
- โครงสร้างทางกายภาพของถ่านกัมมันต์	43
2.3.6 การฟื้นฟูถ่านกัมมันต์	45
2.3.7 การใช้ประโยชน์ถ่านกัมนต์	47
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย	49
3.1 วัตถุดิบตั้งต้นและสารเคมี	49
3.1.1 วัตถุดิบตั้งต้น	49
3.1.2 สารเคมี	50
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	50
3.3 วิธีดำเนินการทดลอง	54
3.3.1 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชั่นกากตะกอนน้ำเสียเพื่อผลิตไบโอซาร์	54

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.2 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้	55
3.3.3. กระบวนการกระตุ้นถ่านชาร์เพื่อสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์	55
3.4 สรุปแผนผังการทดลอง	56
บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล	58
4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร ค่าความร้อน และปริมาณซัลเฟอร์ของกากตะกอนน้ำเสีย	58
4.2 ผลไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชั่นกากตะกอนน้ำเสีย	60
4.2.1 ผลอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์	60
4.2.2 ผลของระยะเวลาต่อการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชั่นกากตะกอนน้ำเสีย	61
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารของถ่านชาร์	63
4.2.4 ผลการดูดซับไอโอดีนถ่านชาร์	66
4.2.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของผลิตภัณฑ์ของเหลว	67
4.3 ผลการกระตุ้นถ่านชาร์ด้วยไอน้ำ	69
4.3.1 ผลการทดสอบอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง	69
4.3.2 ผลของระยะเวลาในการกระตุ้นด้วยไอน้ำ	70
4.3.3 ผลการดูดซับไอโอดีถ่านกัมมันต์	72
4.3.4 ผลการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูถ่านกัมมันต์	74
4.3.5 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะถ่านกัมมันต์	76
4.3.6 ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวของก่อนและหลังการกระตุ้นด้วยไอน้ำ	77
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	81
5.1 สรุปผลการทดลอง	81
5.1.1 การวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิง	81

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญ (ต่อ)

หน้า

5.1.2 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชั่น 81

5.1.3 กระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ 82

5.2 ข้อเสนอแนะ 82

บรรณานุกรม 84

ภาคผนวก 89

ภาคผนวก ก กราฟมาตรฐานอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ 90

ภาคผนวก ข ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล คาร์บอไนเซชั่นกากตะกอนน้ำเสีย และการกระตุ้นด้วยไอน้ำ 94

ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารของถ่านชาร์ 96

ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ค่าความร้อน และหาปริมาณซัลเฟอร์ 99

ภาคผนวก จ การคำนวณค่าการดูดซับไอโอดีน, เลขไอโอดีน และค่าการดูดซับสารละลายลีนบลู 104

ภาคผนวก ฉ รูปเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่ผิว และพื้นที่ผิวจำเพาะ 110

ภาคผนวก ช วิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุอาหารในผลิตภัณฑ์ของเหลว 111

ภาคผนวก ซ บทความตีพิมพ์เผยแพร่ 113

ประวัติผู้เขียน 114

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญตาราง

ตาราง		หน้า
4.1	ผลการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารแบบประมาณ แบบแยกธาตุ ค่าความร้อนและปริมาณซัลเฟอร์ของกากตะกอนน้ำเสีย	58
4.2	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชั่นกากตะกอนน้ำเสียตามระยะเวลาต่างๆ	62
4.3	ผลการวิเคราะห์ Proximate Analysis ถ่านชาร์ที่ได้ตามระยะเวลาต่างๆ	63
4.4	ผลการวิเคราะห์ Ultimate Analysis ถ่านชาร์ที่ได้ตามระยะเวลาต่างๆ	64
4.5	เลขไอโอดีนของถ่านชาร์ที่ได้ตามระยะเวลาต่างๆ	66
4.6	ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ตามระยะเวลาต่างๆ	68
4.7	ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ได้ตามระยะเวลาต่างๆ	71
4.8	ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ตามระยะเวลาต่างๆ	73
4.9	ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่ได้ตามระยะเวลาต่างๆ	75
4.10	ปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ที่ได้ตามระยะเวลาต่างๆ	76
ก-1	ผลการทดลองตั้งอุณหภูมิเตาปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชั่นที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อนองศาเซลเซียสต่อนาที	90
ก-2	ผลการทดลองการตั้งอุณหภูมิเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที อัตราการไหลของไนโตรเจน 80 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และอัตราการไหลของไอน้ำเท่ากับ 20 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	92
ข-1	ผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชั่นกากตะกอนน้ำเสียที่ระยะเวลา 1, 2, 4 และ 6 ชั่วโมง	94
ข-2	ถ่านชาร์ที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชั่นกากตะกอนน้ำเสียที่ระยะเวลา 1, 2, 4 และ 6 ชั่วโมง	94
ข-3	ของเหลวที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชั่นกากตะกอนน้ำเสียที่ระยะเวลา 1, 2, 4 และ 6 ชั่วโมง	95

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
ข-4	ผลิตภัณฑ์ได้จากกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำเพื่อสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ ที่ระยะเวลา 30, 60 และ 120 นาที	95
จ-1	ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนและเลขไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ ที่ระยะเวลา 30, 60 และ120 นาที	106
จ-2	ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนและเลขไอโอดีนของกากตะกอน และถ่านชาร์ที่ระยะเวลา 30, 60 และ120 นาที	107
จ-3	ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนและเลขไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ ที่ระยะเวลา 30, 60 และ120 นาที	108
จ-4	ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ ระยะเวลา 30, 60 และ120 นาที	109

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ

ภาพ		หน้า
1.1	ภาพลักษณะโครงสร้างอนุภาคคาร์บอน, HTC-5 (a, b) HTC-7 (c, d)	4
2.1	ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอตติเวตเตดสลัดจ์	12
2.2	โรงกำจัดน้ำเสีย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	17
2.3	(ก) ถังตกตะกอน (sedimentation tank)	19
2.3	(ข) ถังเติมอากาศ (aeration tank)	19
2.4	(ก) ลานตากตะกอน	20
2.4	(ข) ถังฆ่าเชื้อโรค (chlorine contact tank)	20
2.5	เฟสของน้ำที่ใช้เป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยา	22
2.6	ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในน้ำที่ความดันและอุณหภูมิสูง	22
2.7	ปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลเบื้องต้น	23
2.8	การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในการคาร์บอไนซ์	28
2.9	การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากการกระตุ้นทางเคมีด้วย $ZnCl_2$	31
2.10	การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากการกระตุ้นด้วยไอน้ำ	34
2.11	การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากการกระตุ้นทางกายภาพโดยกำจัดฟีนอลและน้ำ	34
2.12	หมู่ฟังก์ชั่นที่เป็นกรดบนผิวถ่านกัมมันต์	42
2.13	ปฏิกิริยาของถ่านกัมมันต์ที่ผิวเป็นกรด	42
2.14	การดูดซับโมเลกุลกรดด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผิวเป็นเบส	43
2.15	โครงสร้างแกรไฟต์	44
2.16	การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในโครงสร้างของถ่านและถ่านกัมมันต์	44
2.17	โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ (ก) มุมมองผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	45
2.17	โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ (ข) มุมมองสัญลักษณะของแกรไฟต์	45
2.18	Breakthrough curve ของการดูดซับ	46
3.1	กากตะกอนน้ำเสีย	49
3.2	กรดออกซาลิก ($H_2C_2O_4$)	50
3.3	เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง	50
3.4	เตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชั่น	51

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
3.5	เตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนผลิตถ่านกัมมันต์	52
3.6	ชุดกรองปั๊มสุญญากาศ	53
3.7	ตู้อบลมร้อน	53
3.8	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	54
3.9	แผนผังการทดลอง	57
4.1	แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์	60
4.2	แสดงร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ตามระยะเวลาต่างๆ	62
4.3	ถ่านชาร์ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชั่นกากตะกอนน้ำเสีย ตามระยะเวลาต่างๆ	65
4.4	แสดงค่าดูดซับไอโอดีนของถ่านชาร์ที่ได้ตามระยะเวลาต่างๆ	66
4.5	ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ตามระยะเวลาต่างๆ	68
4.6	แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง	69
4.7	แสดงร้อยละของถ่านกัมมันต์ที่ได้ตามระยะเวลาต่างๆ	71
4.8	ถ่านกัมมันต์ที่ได้ตามระยะเวลาต่างๆ	72
4.9	แสดงค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้ตามระยะเวลาต่างๆ	73
4.10	แสดงค่าการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ ที่ได้ตามระยะเวลาต่างๆ	79
4.11	ลักษณะพื้นผิวของถ่านชาร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	77
4.12	ลักษณะพื้นผิวของ ถ่านถ่านกัมมันต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด	78
ก-1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเตา HTC กับระยะเวลา ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที	97
ก-2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเตา HTC กับระยะเวลาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที อัตราการไหลของไนโตรเจน 80 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และอัตราการไหลของไอน้ำเท่ากับ 20 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	93

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
ค-1	เครื่อง CHNS-O Analyzer รุ่น Flash EA 1112	98
ค-2	เครื่อง CHNS-O Analyzer รุ่น Leco CHNS 932	98
ง-1	เครื่อง Bomb Callorimeter	100
จ-1	แสดงความสัมพันธ์ของสมการ $y = 927.2X^{0.136}$ และ $R^2 = 0.999$ เพื่อหาเลขไอโอดีน	107
ฉ-1	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคปแบบส่องกราด(SEM)	110
ฉ-2	เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ Surface Area and Porosity Analyzer (BET)	110

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

อักษรย่อและสัญลักษณ์

AC	Activated Carbon ถ่านกัมมันต์
C	คาร์บอน
CO	คาร์บอนมอนอกไซด์
DO	ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ
$H_2C_2O_4$	กรดออกซาลิก
H_2	ก๊าซไฮโดรเจน
HTC	Hydrothermal Carbonization กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน
H_2O	น้ำ
H_3PO_4	กรดฟอสฟอริก
ΔH	ปฏิกิริยาทางความร้อน
KOH	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
P	ความดัน
k	ค่าคงที่
$ZnCl_2$	ซิงค์คลอไรด์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved