



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

ปริญญา

วิศวกรรมเคมี

สาขา

วิศวกรรมเคมี

ภาควิชา

เรื่อง อัตราการกระตุ้นถ่านชาร์จากกะลาปาล์มเป็นถ่านกัมมันต์

Activation Rate of Char from Palm Oil Shell to Activated Carbon

นามผู้วิจัย นางสาวรุจิเรศ ขวัญข้าว

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์เทอดไทย วัฒนธรรม, Ph.D.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์สุนันท์ ลิ้มตระกูล, D.Sc.)

กรรมการ

(อาจารย์พิพัฒน์ ฤทธิปัญญาคณ, M.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรารัตน์ มุ่งเจริญ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อากงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 4 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2549

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

อัตราการกระตุ้นถ่านชาร์จากกะลาปาล์มเป็นถ่านกัมมันต์

Activation Rate of Char from Palm Oil Shell to Activated Carbon

โดย

นางสาวรุจิเรศ ขวัญข้าว

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2549

ISBN 974-16-2572-3

รุจจิเรศ ขวัญข้าว 2549: อัตราการกระตุ้นถ่านชาร์จากกะลาปาล์มเป็นถ่านกัมมันต์
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชา
วิศวกรรมเคมี ประธานกรรมการที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์
เทอดไทย วัฒนธรรม, Ph.D. 124 หน้า
ISBN 974-16-2572-3

การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม ที่ใช้การกระตุ้นทางกายภาพ ซึ่งขั้นแรกจะทำการ
คาร์บอนในเซชันโดยใช้แก๊สไนโตรเจน ขั้นที่สองเป็นกระบวนการกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำร้อนยังยวด
งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการคาร์บอนในเซชันและกระบวนการ
กระตุ้น โดยตัวแปรที่ใช้ศึกษาคืออุณหภูมิและเวลา จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมใน
กระบวนการคาร์บอนในเซชันคือที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ณ เวลา 30 นาที โดยมีคุณสมบัติดังนี้
ร้อยละของผลได้เท่ากับ 33.78 ร้อยละของความชื้นเท่ากับ 5.19 ร้อยละของสารระเหยเท่ากับ
22.01 ร้อยละปริมาณเถ้าเท่ากับ 3.67 ร้อยละคาร์บอนคงตัวเท่ากับ 74.32 สำหรับสภาวะที่เหมาะสม
ในกระบวนการกระตุ้นคือที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ณ เวลา 150 นาที โดยมีสมบัติดังนี้
ร้อยละของผลได้เท่ากับ 27.61 ร้อยละของความชื้นเท่ากับ 1.26 ร้อยละของสารระเหยเท่ากับ
13.06 ร้อยละปริมาณเถ้าเท่ากับ 6.89 ค่าความหนาแน่นปรากฏเท่ากับ 0.5108 กรัมต่อลูกบาศก์
เซนติเมตร ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 741.8 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 721.8 ตาราง
เมตรต่อกรัม อัตราการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างคาร์บอนเมื่อพิจารณาจากค่าพื้นที่ผิวที่ขึ้นกับ
อุณหภูมิ ได้เป็น $dS/dt = 0.088e^{-19,925/RT} S$ ตารางเมตรต่อกรัม.นาที่ ที่อุณหภูมิ 600 ถึง 800
องศาเซลเซียส ณ ช่วงเวลา 0 ถึง 150 นาที และสำหรับอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส อัตรานี้จะใช้
ได้ในช่วงเวลา 0 ถึง 120 นาที ของการกระตุ้น

รุจจิเรศ ขวัญข้าว
ลายมือชื่อนิสิต

พณิภา วัฒนธรรม
ลายมือชื่อประธานกรรมการ

๒๖ / ๑๔ / ๕๙

Rujjirase Kwankhao 2006: Activation Rate of Char from Palm Oil Shell to Activated Carbon. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Terdthai Vatanatham, Ph.D. 124 pages.
ISBN 974-16-2572-3

Activated carbons were prepared from palm-oil shell. In this work two physical steps were used. The first step was carbonization to produce char under N₂ atmosphere. The second step was activation to produce activated carbon using superheated steam. Under the experimental conditions the effects of carbonization and activation temperatures and times on the properties of char and activated carbon were studied to find an optimum condition for the carbonization and activation. The result shows that optimum carbonization condition is at a temperature of 450°C for 30 min. The char product yield is 33.78% with 5.19% moisture, 3.67% ash, 22.01% volatile matter, and 74.32% fixed carbon. For superheated steam activation, the maximum surface area and iodine number can be obtained using a temperature of 800°C for 150 min. The product yield is 27.01% based on raw palm-oil shell with 1.26% moisture, 6.89% ash, 13.06% volatile matter, 0.5108 g/cm³ bulk density, 741.8 mg/g iodine number, and 721.8 m²/g BET surface area. The rate of structure change of carbon based on surface area at 600 to 800°C of activation temperature and 0 to 150 minutes of activation time can be expressed as $dS/dt = 0.088e^{-19,925/RT} S$ m²/g.min. This expression is also applicable to an activation temperature of 900°C with an activation time of 0 to 120 minutes.

Rujjirase Kwankhao
Student's signature

Terdthai Vatanatham 23 June / 2006
Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทอดไทย วัฒนธรรม ประธานกรรมการที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์สุนันท์ ลิ้มตระกูล กรรมการวิชาเอก อาจารย์พิพัฒน์ ฐิริปัญญาคุณ กรรมการวิชาการ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิศวกรรมเคมี ในโครงการพัฒนาของธนาคารพัฒนาแห่งเอเชีย และทบวงมหาวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับทุนสนับสนุนการศึกษาและการวิจัย บริษัทชมพอรูดสาหกรรมน้ำมันปาล์มจำกัด ที่ให้การสนับสนุนวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย คุณปริญา บุญทัน และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การช่วยเหลือด้านเทคนิค อุปกรณ์และเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คุณภกวัต ชัยเสนา ในการช่วยเหลือสร้างและปรับปรุงแก้ไขอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองจนสามารถปฏิบัติงานได้ตามเป้าหมาย

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ญาติพี่น้องและเพื่อนทุกท่าน ที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

รุจิเรศ ขวัญข้าว

มิถุนายน 2549

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(3)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
ขอบเขตของงานวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
การตรวจเอกสาร	4
ความหมายของถ่านกัมมันต์	4
วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์	4
ชนิดของถ่านกัมมันต์	5
คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์	7
โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์	8
โครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์	10
กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์	14
เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์	23
หลักการวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์	26
ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์	30
ข้อมูลเกี่ยวกับกะลาปาล์ม	32
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา	41
อุปกรณ์และวิธีการ	43
อุปกรณ์	43
วิธีการ	45
ผลและวิจารณ์	48

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในกระบวนการคาร์บอนในเซชัน	48
การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในกระบวนการกระตุ้น	55
การหาอัตราการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคาร์บอนในการผลิตถ่านกัมมันต์	66
การเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น	78
สรุปและข้อเสนอแนะ	82
สรุป	82
ข้อเสนอแนะ	84
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	85
ภาคผนวก	89
ภาคผนวก ก สถิติการนำเข้าและส่งออกถ่านกัมมันต์	90
ภาคผนวก ข วิธีการวิเคราะห์ถ่านกัมมันต์	93
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณหาค่าต่างๆ	99
ภาคผนวก ง ข้อมูลการทดลอง	105
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	124

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	วัตถุดิบต่างๆ ที่เคยทำการศึกษาและใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์	5
2	คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์	8
3	คุณสมบัติของวัตถุดิบต่างๆ	14
4	ลักษณะทางกายภาพของกะลาปาล์มน้ำมัน	32
5	องค์ประกอบของกะลาปาล์ม	32
6	แสดงคุณสมบัติของถ่านชาร์จากกระบวนการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	48
7	แสดงคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้นที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	56
8	การเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นในประเทศ	78
9	การเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นในต่างประเทศ	79
10	การเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับเกรดทางการค้า	80
ตารางผนวกที่		
ก1	สถิติการนำเข้าถ่านกัมมันต์ในประเทศ	91
ก2	สถิติการส่งออกถ่านกัมมันต์ในประเทศ	92
ง1	ผลได้ของถ่านชาร์จากกระบวนการคาร์บอนในเซชัน ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	106
ง2	ค่าความชื้นในถ่านชาร์จากกระบวนการคาร์บอนในเซชัน ณ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	107
ง3	น้ำหนักที่หายไปจากถ่านชาร์ในถ่านชาร์จากกระบวนการคาร์บอนในเซชัน ณ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	108
ง4	ถ่านชาร์จากกระบวนการคาร์บอนในเซชัน ณ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	109
ง5	ค่าคาร์บอนคงตัวในถ่านชาร์จากกระบวนการคาร์บอนในเซชัน ณ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	110

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ง6 ค่าผลได้ในถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้น ณ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	111
ง7 ค่าความชื้นในถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้น ณ ที่อุณหภูมิและเวลา ต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 1	112
ง8 ค่าความชื้นในถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้น ณ ที่อุณหภูมิและเวลา ต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 2	113
ง9 ค่าความชื้นในถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้น ณ ที่อุณหภูมิและเวลา ต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 3	114
ง10 ค่าสารระเหยในถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้น ณ ที่อุณหภูมิและเวลา ต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 1	115
ง11 ค่าสารระเหยในถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้น ณ ที่อุณหภูมิและเวลา ต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 2	116
ง12 ค่าสารระเหยในถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้น ณ ที่อุณหภูมิและเวลา ต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 3	117
ง13 ปริมาณเถ้าถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้น ณ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 1	118
ง14 ปริมาณเถ้าถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้น ณ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 2	119
ง15 ปริมาณเถ้าถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้น ณ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 3	120
ง16 ค่าความหนาแน่นปรากฏในถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้น ณ ที่ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 1	121
ง17 ค่าความหนาแน่นปรากฏในถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้น ณ ที่ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 2	122
ง18 ค่าความหนาแน่นปรากฏในถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้น ณ ที่ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 3	123

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กลุ่มฟังก์ชันนัลบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์	7
2	แสดงตำแหน่งของอิเล็กตรอนของคาร์บอนที่เกิดจาก sp^2 Hybridization	11
3	การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์	12
4	การเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงของคาร์บอนอะตอมตามอุณหภูมิที่เผา	16
5	แสดงขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีทางกายภาพ	22
6	เครื่องแอกติเวเตอร์แบบฟลูอิดไคซ์เบด	25
7	เครื่องแอกติเวเตอร์แบบเตาหมุน	25
8	ฟลูอิดไคซ์เบดแบบสองชั้น	26
9	แสดงส่วนต่างๆ ของปาล์ม	32
10	แสดงเครื่องมือในการผลิตถ่านกัมมันต์	38
11	แสดงภาพขยายโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือก pistachio-nut	38
12	แสดงภาพขยายโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ bambool	40
13	แผนผังแสดงระบบปฏิกรณ์	44
14	ผลได้ของถ่านชาร์ที่ได้ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	49
15	ค่าความชื้นในถ่านชาร์ที่ได้ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	49
16	ปริมาณสารระเหยของถ่านชาร์ที่ได้ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	50
17	ปริมาณเถ้าของถ่านชาร์ที่ได้ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	50
18	คาร์บอนคงตัวในถ่านชาร์ที่ได้ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	51
19	ผลได้ของถ่านกัมมันต์ที่ได้ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	55
20	ความชื้นในถ่านกัมมันต์ที่ได้ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	57
21	สารระเหยในถ่านกัมมันต์ที่ได้ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	57
22	ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์ที่ได้ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	58
23	ปริมาณเถ้าในถ่านกัมมันต์ที่ได้ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	58
24	ค่าพื้นที่ผิว (S_{BET}) ของถ่านกัมมันต์ที่ได้ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	59
25	ขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	61
27	ค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (S) กับเวลา (t) ที่กระตุ้นโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่เวลา และอุณหภูมิต่างๆ	68
28	ค่า $\ln ds/dt$ กับค่า $\ln S$ ที่กระตุ้นโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ณ เวลาระหว่าง 0 ถึง 150 นาที	70
29	ค่า $\ln ds/dt$ กับค่า $\ln S$ ที่กระตุ้นโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ณ เวลาระหว่าง 0 ถึง 150 นาที	71
30	ค่า $\ln ds/dt$ กับค่า $\ln S$ ที่กระตุ้นโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ณ เวลาระหว่าง 0 ถึง 150 นาที	71
31	ค่า $\ln ds/dt$ กับค่า $\ln S$ ที่กระตุ้นโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ณ เวลาระหว่าง 0 ถึง 120 นาที	72
32	ค่า $\ln k$ กับค่า $1/T$ ของการกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ กรณี $n \neq 1$	74
33	ค่า $\ln S/S_0$ กับเวลา t ที่กระตุ้นโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ณ เวลาระหว่าง 0 ถึง 150 นาที	75
34	ค่า $\ln S/S_0$ กับเวลา t ที่กระตุ้นโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ณ เวลาระหว่าง 0 ถึง 150 นาที	75
35	ค่า $\ln S/S_0$ กับเวลา t ที่กระตุ้นโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ณ เวลาระหว่าง 0 ถึง 150 นาที	76
36	ค่า $\ln S/S_0$ กับเวลา t ที่กระตุ้นโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ณ เวลาระหว่าง 0 ถึง 120 นาที	76
37	ค่า $\ln S/S_0$ กับเวลา t ที่กระตุ้นโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ	77
38	ค่า $\ln k$ กับค่า $1/T$ ของการกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ กรณี $n = 1$	78

อัตราการกระตุ้นถ่านชาร์จากกะลาปาล์มเป็นถ่านกัมมันต์

Activation Rate of Char from Palm Oil Shell to Activated Carbon

คำนำ

ในปัจจุบันมีการใช้ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีคุณสมบัติโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนและมีพื้นที่ผิวสูง ทำให้มีพื้นที่ในการดูดซับสารได้มาก ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ต่างๆ ในทางอุตสาหกรรม เช่น ใช้ในการดูดซับสิ่งเจือปน ใช้ในการกรอง การทำสารให้บริสุทธิ์ การกำจัดสีและกลิ่น เป็นต้น (Sainz Diaz *et al.*, 2000) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าตลาดของถ่านกัมมันต์มีอยู่กว้างขวาง และมีแนวโน้มในการใช้งานอย่างสม่ำเสมอในประเทศ อย่างไรก็ตามยังต้องมีการนำเข้าถ่านกัมมันต์เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการคุณภาพของถ่านกัมมันต์ระดับสูง (ศูนย์ธุรกิจอุตสาหกรรม, 2546) ซึ่งในปัจจุบันทั่วโลกได้มีการนำเข้าถ่านกัมมันต์ไปใช้ประโยชน์มากกว่า 840,000 ตันต่อปี และมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้น ซึ่งจากสถิติการนำเข้าและส่งออกถ่านกัมมันต์ประเทศไทยก็มีการนำเข้าและส่งออกถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังแสดงในตารางผนวกที่ ก1 และตารางผนวกที่ ก2 (กรมศุลกากร, 2548)

การผลิตถ่านกัมมันต์มีอยู่หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ การคาร์บอนไนเซชัน (carbonization) คือ การนำวัตถุดิบมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงๆ ซึ่งเมื่อทำการคาร์บอนไนซ์แล้วจะได้ถ่านชาร์ (char) ออกมา ขั้นตอนต่อมา คือ การกระตุ้น (activation) เป็นการนำถ่านที่ได้จากขั้นตอนแรกมากระตุ้นโดยทางเคมี เช่น ซิงค์คลอไรด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Lozano Castello *et al.*, 2001) หรือทางกายภาพโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวด แก๊สผสมระหว่างไนโตรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Alejandro *et al.*, 2001; Carrasco Marin *et al.*, 1996) เป็นต้น จะได้ถ่านกัมมันต์ออกมา ซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ เนื่องจากการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี มีข้อเสียคือมีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีออก อีกทั้งอุปกรณ์ที่ใช้จำเป็นต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถทนทานการกัดกร่อนได้

ถ่านกัมมันต์ผลิตจากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนใหญ่มักพิจารณาจากวัตถุดิบที่หาง่ายและมีราคาถูก เช่น ถ่านไม้ กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม ชังข้าวโพด ชานอ้อย พลาสติก ขากรถยนต์ เป็นต้น และจากการที่ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ทำให้มีวัสดุเหลือ

ใช้ทางการเกษตรอีกจำนวนมากที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้ จึงมีความสนใจที่จะผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม เนื่องจากกะลาปาล์มมีคุณสมบัติความเป็นรูพรุนและพื้นที่ผิวสูงเมื่อเป็นถ่านกัมมันต์ และเป็นวัตถุดิบที่มีมากในทางภาคใต้ของประเทศไทย ซึ่งมีการผลิตเป็นน้ำมันปาล์มจึงมีกะลาปาล์มเป็นจำนวนมากแต่มีการนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้ในปริมาณที่น้อยและคุณภาพต่ำ และการผลิตถ่านกัมมันต์ในประเทศไทยยังขาดทฤษฎีและหลักการทางวิศวกรรมที่เฉพาะเจาะจงมาช่วย ซึ่งอาจทำให้การควบคุมคุณภาพของถ่านกัมมันต์ไม่ได้ตามต้องการและมีการลงทุนสูงกว่าความเป็นจริง

ซึ่งในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์สำหรับผลิตถ่านกัมมันต์จะต้องอาศัยหลักการทางจลนศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างคาร์บอนจะพิจารณาจากพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในทางการค้า ในปัจจุบันมีความต้องการถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงและมีการพัฒนาพื้นที่ผิวให้เป็นไปตามต้องการ ในงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอัตราการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคาร์บอน จากพื้นที่ผิวในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมัน

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาตัวแปรต่างๆในการผลิตถ่านกัมมันต์ ที่มีผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์
2. หาอัตราการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคาร์บอนจากถ่านชาร์เป็นถ่านกัมมันต์

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มจากการตรวจเอกสารและการทดสอบในห้องปฏิบัติการ
2. ศึกษาสถานะที่เหมาะสมจากการตรวจเอกสารและการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อนำมาใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์
3. ศึกษาตัวแปรในการผลิตถ่านชาร์จากกระบวนการคาร์บอไนเซชันโดยใช้แก๊สไนโตรเจน

3.1 อุณหภูมิในกระบวนการคาร์บอไนเซชัน คือ 250, 350, 450, และ 550 องศาเซลเซียส

3.2 เวลาที่ใช้ในกระบวนการคาร์บอไนเซชัน คือ 30, 60, 90, 120, 150, และ 180 นาที

3.3 วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านชาร์จากกระบวนการคาร์บอไนเซชัน จากค่าความชื้น ปริมาณเถ้า ค่าปริมาณสารระเหย และค่าคาร์บอนคงตัว

4. ศึกษาตัวแปรในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวด

4.1 อุณหภูมิในกระบวนการกระตุ้น คือ 600, 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส

4.2 เวลาที่ใช้ในกระบวนการกระตุ้น คือ 30, 60, 90, 120, 150, และ 180 นาที

4.3 วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการกระตุ้นจากค่าความชื้น ค่าปริมาณสารระเหย ค่าความหนาแน่นปรากฏ ปริมาณเถ้า ค่าการดูดซับไอโอดีน และค่าพื้นที่ผิว

5. หาอัตราการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคาร์บอนในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มโดยพิจารณาจากค่าพื้นที่ผิว

6. เปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นทั้งในประเทศและต่างประเทศ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ข้อมูลอัตราการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคาร์บอนในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ทำให้สามารถออกแบบขนาดและสภาวะการเดินเครื่องปฏิกรณ์ผลิตถ่านกัมมันต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. สามารถควบคุมคุณภาพของถ่านกัมมันต์ในกระบวนการผลิตได้ เพื่อให้ได้คุณภาพที่เหมาะสมกับการใช้งานต่างๆ

3. มีข้อมูลเชิงปริมาณสำหรับกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม

การตรวจเอกสาร

ความหมายของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกรรมวิธีก่อกัมมันต์ จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีสมบัติในการดูดซับสารต่างๆ ได้อย่างดี (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2532)

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

วัสดุที่นำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์มีคุณสมบัติคือ มีปริมาณสารระเหยต่ำ มีปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง ราคาถูก หาได้ง่ายและมีความสะดวกในการใช้งาน เช่น ไม่สลายตัวเมื่อเก็บ หากเป็นวัตถุดิบที่หาง่ายหรือวัสดุเหลือทิ้งก็จะเป็นการเพิ่มมูลค่า ลดขยะ และเป็นวัสดุที่เหมาะสมที่จะสามารถผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูงได้ การผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรง หรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้เช่นกัน วัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์มักเป็นพวกอินทรีย์วัตถุ (James *et al.*, 1971) ดังตารางที่ 1 เป็นสารที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบเป็นส่วนใหญ่

1. วัตถุดิบที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์

สามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้

- 1.1 พวกเซลลูโลสที่มาจากพืช เช่น แกลบ กะลามะพร้าว ขี้เลื่อย ชานอ้อย หรือซังข้าวโพด
- 1.2 พวกถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ พีท
- 1.3 ส่วนต่างๆ ของสัตว์ เช่น กระดูก

สำหรับวัตถุดิบที่ใช้เป็นวัตถุดิบในรูปถ่าน มักเป็นถ่านที่ใช้จากการคาร์บอนในชั้นอินทรีย์วัตถุ หรือที่เรียกว่าถ่านสังเคราะห์ (artificial char) หรืออาจเป็นถ่านที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (natural

char) เช่น ถ่านหินก็ได้ (เกศรา, 2531) คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ วัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำและปริมาณสารระเหยสูง เช่น ไม้ เมื่อใช้เป็นวัตถุดิบมักได้ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาตรของรูพรุน (pore volume) สูง และความหนาแน่นต่ำ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการดูดซับสารละลายได้ดีแต่ดูดซับแก๊สได้ไม่ดี ส่วนวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงและมีปริมาณสารระเหยสูง เช่น กะลามะพร้าว กะลาตาลโตนด (บุญชัย, 2536) ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็ก (micropore volume) สูง สามารถใช้ดูดซับได้ดีทั้งในสารละลายและแก๊ส อย่างไรก็ตามสมบัติของถ่านกัมมันต์ยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ อีก เช่น วิธีการผลิต ภาวะที่ใช้ เป็นต้น ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะระบุให้แน่นอนว่าวัสดุชนิดใด จะใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมกับงานใด

ตารางที่ 1 วัตถุดิบต่างๆ ที่เคยทำการศึกษาและใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์	วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์
ขานอ้อย (bagases)	ถ่านลิกไนต์ (lignite)
เมล็ดพืช (cereals)	ไม้ (wood)
ถ่านหิน (coal)	เปลือกลูกนัท (nut shell)
กะลาปาล์ม (palm shells)	หิมน้ำมัน (oil shell)
กะลามะพร้าว (coconut shells)	พีท (peat)
เมล็ดกาแฟ (coffee beans)	ถ่านหินน้ำมัน (petroleum coke)
ซังข้าวโพด (corn cobs and corn stalks)	ของเสียจากเยื่อกระดาษ (pulp-mill waste)
เปลือกเมล็ดฝ้าย (cotton seed hulls)	เมล็ดของผลไม้ (fruit pits)

ที่มา: รติกร (2538)

ชนิดของถ่านกัมมันต์

ชนิดของถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งออกได้โดยใช้หลักต่างๆ ได้หลายอย่างตามแต่ความสะดวกในการใช้งาน สามารถแบ่งชนิดของถ่านกัมมันต์ได้ดังนี้

1. แบ่งตามลักษณะของรูปร่าง

แบ่งตามลักษณะของรูปร่างได้เป็น 2 ประเภท (ศูนย์ธุรกิจอุตสาหกรรม, 2545)

1.1 ประเภทผง (power activated carbon , PAC) มีขนาดประมาณ 10-50 ไมครอนหรือน้อยกว่า นำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารละลายหรือของเหลว เช่น การฟอกสีในของเหลว ดูดกลิ่นและสีของสารละลายได้หลายชนิด ใช้ในการทำให้น้ำตาลบริสุทธิ์ ใช้ในอุตสาหกรรมไขมันและน้ำมัน ทำให้ไขมันหรือน้ำมันปราศจากสีหรือสีอ่อนลง ช่วยในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ไม่ต้องการออกจากสารละลายในกระบวนการชุบโลหะ ใช้ในการกำจัดกลิ่นของน้ำประปา ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำอัดลมหรือน้ำหวานบรรจุขวด เป็นต้น

1.2 ประเภทเม็ดและเกล็ด (granular activated carbon) มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของเม็ดทรายกรองน้ำ แข็งแต่เปราะและเบากว่าทราย อาจทำเป็นเกล็ด ใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการทำให้แก๊สบริสุทธิ์ หรือการทำให้ตัวทำละลายที่ใช้แล้วให้บริสุทธิ์ขึ้นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ใช้สำหรับอุตสาหกรรมการพิมพ์ อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ นอกจากนี้ยังใช้เป็นวัสดุทำหน้ากากป้องกันแก๊สและไอพิษต่าง เป็นต้น

2. แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์

แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ (เกศรา, 2531) ซึ่งแบ่งได้เป็น

2.1 ถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นต่ำ ซึ่งถ่านกัมมันต์ประเภทนี้ มักใช้ในภาวะที่เป็นสารละลาย เช่น การฟอกสีน้ำตาลหรือการทำน้ำให้บริสุทธิ์

2.2 ถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นสูง ซึ่งถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ดูดแก๊สพิษหรือไอระเหย

3. แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูด

แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูด สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ (Phaengkham *et al.*, 1998)

3.1 ชนิดดูดแก๊ส หมายถึงถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดแก๊สพิษ กลิ่น และไอของสารอินทรีย์ ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านประเภท hard artificial char

3.2 ชนิดคูดสี หมายถึงถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวฟอกสี ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่เกิดจากการเผาถ่านประเภท soft artificial char

3.3 ชนิดคูดโลหะ หมายถึงถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวแยกพวกโลหะต่างๆ เช่น ถ่านที่ใช้ในการแยกทอง เงิน แพลตตินัมจากแร่

4. ถ่านสังเคราะห์สามารถแบ่งตามอินทรีย์วัตถุที่ใช้

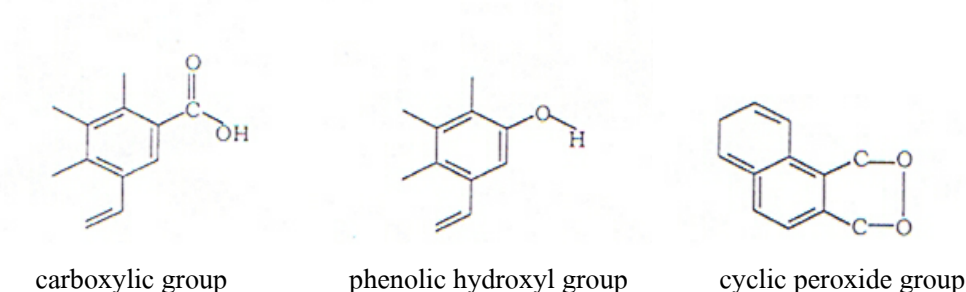
ถ่านสังเคราะห์สามารถแบ่งตามอินทรีย์วัตถุที่ใช้ เป็น 2 ประเภทคือ

4.1 ถ่านสังเคราะห์เนื้อแข็ง เช่น ถ่านหินน้ำตาล ถ่านไม้ที่ได้จากการคาร์บอนไนเซชันที่ความดันสูง

4.2 ถ่านสังเคราะห์เนื้ออ่อน เช่น ถ่านไม้ ถ่านขาน้อย ถ่านกลบ ถ่านหินน้ำมัน และกากน้ำตาล

คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

โดยทั่วไปคุณสมบัติที่ใช้พิจารณาเลือกใช้งานถ่านกัมมันต์ ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมี โดยคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญบางประการของถ่านกัมมันต์แสดงในตารางที่ 2 และคุณสมบัติทางเคมี ที่ทำให้ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดติดผิวสารแต่ละชนิดแตกต่างกันออกไป ได้แก่ กลุ่มฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่าน ซึ่งประกอบด้วยกลุ่ม Carboxyl, Phenolic Hydroxyl, Quinone Type Carbonyl, Normal Lactones, Fluorescein Type Lactones, Carboxylic Acid Anhydrides และ Cyclic Peroxide ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กลุ่มฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

ที่มา: วรพจน์ (2544)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

	มอก. 900 2532	Atlas Darco 300	Calgon Filtrasorb	Westvaco 8x10
<u>Physical Properties</u>				
surface area, m ² /g	-	600-650	950-1,050	850
Apparent density, g/cc	> 0.36	0.38	0.48	-
Real density, g/cc	-	-	2.1	-
Partical density, g/cc	-	0.67	1.3-1.4	1.4
Effective size	-	-	0.8-0.9	0.9
Uniformity coefficient	-	-	< 1.9	1.8
Pore volume, cc/g	-	0.98	0.85	-
Mean particle size, mm	-	1.05	1.5-1.7	-
<u>Specification</u>				
Sieve size(U.S.Std.Series)				
Larger than NO.8-Max%	-	-	8	2
Larger than NO.12-Max%	-	5	-	-
Smaller than NO.30-Max%	-	-	5	1
Smaller than NO.40-Max%	-	5	-	-
Iodine number (mg/g)	> 600	650	900	850
Abrasion NO.,minimum	> 70	-	70	70
Ash, %	-	-	8	7
Moisture as packed, max, %	< 8	-	2	2

ที่มา: Environmental Protection Agency (1973)

โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์

โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์เกิดขึ้นในกระบวนการกระตุ้นซึ่งจะทำให้ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์มีความพรุนมากขึ้นเนื่องจากการสูญเสียสารประกอบระหว่างช่องว่างผลึกคาร์บอน ทำให้เกิดรูพรุนที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้นและเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ การกระตุ้นที่เหมาะสมคือ การทำให้มีความพรุนไม่ใช่เป็นการกระตุ้นให้ขนาดของรูใหญ่ขึ้น เมื่อพิจารณา

ลักษณะผิวของถ่านกัมมันต์ จะพบว่ามีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมาก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้จะลึกเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์อย่างไม่เป็นระเบียบและความลึกไม่สม่ำเสมอ ลักษณะรูพรุนเหล่านี้เปรียบได้กับหลอดแก้วขนาดเล็ก

1. จำแนกชนิดของรูพรุนตามขนาดรัศมีรูพรุน

ซึ่งจัดแบ่งโดย The International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) แบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้ (Jankowska *et al.*, 1991)

1.1 รูพรุนขนาดใหญ่ (macropores)

มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนมากกว่าหรือเท่ากับ 50 นาโนเมตร โดยเฉลี่ยถ่านกัมมันต์มีปริมาตรของรูพรุนขนาดใหญ่อยู่ระหว่าง 0.2-0.8 ลบ.ซม.ต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวจำเพาะไม่เกิน 20 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับรูพรุนประเภทอื่นแล้วรูพรุนขนาดใหญ่มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยมาก ดังนั้นรูพรุนประเภทนี้จึงไม่มีความสำคัญต่อการดูดซับเพียงแต่ทำหน้าที่เป็นทางผ่านอนุภาคเข้าไปในรูที่เล็กกว่า

1.2 รูพรุนขนาดกลาง (mesopores)

มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนอยู่ในช่วงระหว่าง 2.0-50 นาโนเมตร โดยเฉลี่ยถ่านกัมมันต์มีปริมาตรของรูพรุนขนาดกลางประมาณ 0.1-0.5 ลบ.ซม.ต่อกรัม และพื้นที่ผิวจำเพาะระหว่าง 20-100 ตารางเมตรต่อกรัม ตัวอย่างสารดูดซับที่รูพรุนขนาดกลางได้แก่ ซิลิกา อะลูมินาเจล อะมิโนซิลิเกต และอะครีลิก

1.3 รูพรุนขนาดเล็ก (micropores)

ปกตินิยามเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนน้อยกว่า 2.0 นาโนเมตร โดยเฉลี่ยถ่านกัมมันต์มีปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็กอยู่ระหว่าง 0.2-0.6 ลบ.ซม.ต่อกรัม มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า 100 ตารางเมตรต่อกรัม รูพรุนขนาดเล็กมีความสำคัญที่สุดในการดูดซับเพิ่มพื้นที่การดูดซับและพลังงานดูดซับ (adsorption energy) มากที่สุด ทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นมากที่ความดันต่ำๆ รูพรุน

ขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวจำเพาะ เชื่อว่าปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาดหรือที่เรียกว่าการกระจายขนาดของรูพรุน จะขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบและวิธีการกระตุ้น

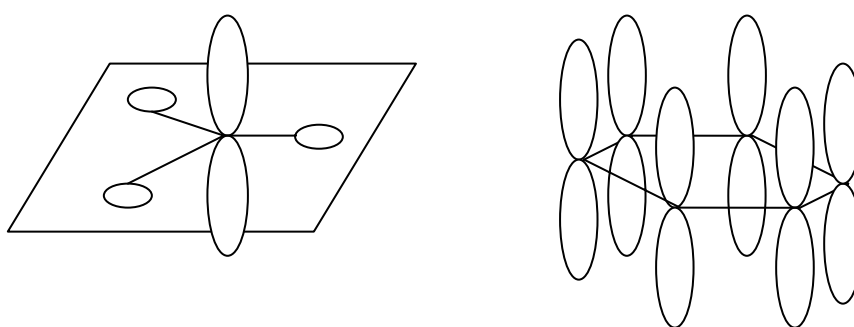
รูพรุนส่วนใหญ่จะเกิดในช่วงการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ ซึ่งเป็นการกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ ออกจากช่องว่างของถ่านที่ใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้น รวมทั้งเกิดการจัดเรียงอะตอมและเคลื่อนย้ายอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเพื่อทำให้เกิดช่องว่างที่มีอำนาจในการดูดซับ รูพรุนที่มีขนาดใหญ่จะทำหน้าที่เป็นเพียงทางผ่านของสารถูกดูดซับเข้าไปยังรูพรุนขนาดเล็ก (Rodriguez-Reinoso *et al.*, 1965) จึงไม่มีผลต่อความจุในการดูดซับ สำหรับรูพรุนขนาดกลางนั้นสามารถดูดซับโมเลกุลของเหลวได้บ้างและมีความสำคัญมากขึ้น โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เกรดการค้าจะมีรูพรุนขนาดกลางประมาณ 200-300 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับรูพรุนขนาดเล็กจะมีหน้าที่ในการดูดซับ จึงมีผลต่อความจุในการดูดซับ โดยเฉพาะการดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ ถ่านกัมมันต์จะมีรูพรุนขนาดเล็กประมาณร้อยละ 90-95 ของพื้นที่ผิวทั้งหมด นอกจากนี้ยังพบว่า ความจุในการดูดซับยังขึ้นกับลักษณะและธรรมชาติของผิวถ่านด้วย ถ้าผิวของถ่านเป็นเพียงระนาบพื้นฐาน ซึ่งไม่มีหมู่ฟังก์ชันนัลอื่นๆ การดูดซับจะเกิดจากแรงวานเดอร์วาลส์ หรืออาจเกิดจากไฟอิลิกตรอน แรงยึดเหนี่ยวทั้งสองเป็นแรงที่ค่อนข้างอ่อน แม้ว่าจะดูดซับได้แต่ก็มีโอกาสที่จะหลุดออกได้ง่าย แต่ถ้าเป็นผิวบริเวณที่มีหมู่ฟังก์ชันนัล การดูดซับจะเกิดจากแรงที่แข็งแรง โอกาสของสารถูกดูดซับจะหลุดออกจึงมีน้อยกว่า หมู่ฟังก์ชันบนผิวของถ่านกัมมันต์มี 2 ชนิด คือ พวกออกไซด์ของกรด ซึ่งพบมากในถ่านกัมมันต์ที่ผลิตที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400-500 องศาเซลเซียส และพวกออกไซด์ของด่างซึ่งพบมากในถ่านกัมมันต์ที่ผลิตที่อุณหภูมิประมาณ 800-1,000 องศาเซลเซียส

โครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านชาร์ที่ได้จากการสลายสารอินทรีย์ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,000 องศาเซลเซียสนั้น อะตอมต่างๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน ได้แก่ ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน จะถูกกำจัดออกในรูปของแก๊ส อะตอมคาร์บอนที่เหลือจะจัดเรียงเป็นชั้นๆ โดยที่แต่ละชั้นจะประกอบไปด้วยวงแหวนอะโรมาติก เชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ทำให้เกิดช่องว่างหรือโพรงซึ่งเป็นที่อยู่ของพวกน้ำมัน สารอื่นๆ ที่ได้จากการเผาผลาญ ช่องว่างรูพรุนเหล่านี้จะกลายเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดซับโดยการกระตุ้น ซึ่งจะเป็นการไล่พวกน้ำมัน สารต่างๆ ที่ได้จากการเผาผลาญออกจากช่องว่างหรือโพรงแล้วจะสร้างหมู่ฟังก์ชันนัลขึ้นมาแทน ดังนั้นโครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์จึงมีผลต่อความสามารถในการดูดซับด้วย

วัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่เป็นวัสดุทางการเกษตร คือ เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนทั้งที่เป็นโซ่ยาวและที่เป็นวง เช่น ลิกกิน เซลลูโลส เป็นต้น เมื่อนำมาคาร์บอนในเข-
 ชั้นสร้างวงอะโรมาติก (aromatization) โดยอะตอมคาร์บอนซึ่งเดิมสร้างพันธะโดยใช้อเล็กตรอน
 จากชั้น 2s จำนวน 1 ตัว และชั้น 2p จำนวน 3 ตัว จะเปลี่ยนมาใช้จากอเล็กตรอนจากชั้น 2s จำนวน 1
 ตัว และชั้น 2p จำนวน 2 ตัว และมีอเล็กตรอนจากชั้น 2p อีก 1 ตัว (sp^2 hybridization) จึงเกิดพันธะ
 แบบซิกมา (sigma bond) กับคาร์บอนอะตอมที่อยู่ข้างเคียง 3 ตัวเรียงกันเป็นรูปสามเหลี่ยมใน
 ระนาบเดียวกันและอเล็กตรอนอิสระที่เหลือจะโคจรอยู่บนและล่างระนาบ พร้อมทั้งจะเกิดพันธะไพ
 (Pi bond) ดังแสดงในภาพที่ 2 ในที่สุดจะเกิดเป็นวงหกเหลี่ยมที่มีอเล็กตรอนเคลื่อนที่ (resonance)
 ได้ทั่วโครงสร้างซึ่งเรียกว่าวงเบนซินหรือวงอะโรมาติก วงเบนซินแต่ละวงจะเชื่อมติดกันจนมี
 ลักษณะเป็นแผ่นสำหรับโครงสร้างถ่านจะมีแผ่นของวงเบนซินนี้อยู่หลายแผ่นเรียงตัวกันเป็นชั้นๆ
 อย่างไม่เป็นระเบียบ

ซึ่งการเรียงตัวในลักษณะนี้จะเกิดแรงผลักระหว่างชั้นจากไพออิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อยู่บน
 และล่างของแต่ละชั้น ถ่านจะสร้างเสถียรภาพด้วยการใช้ไพออิเล็กตรอนสร้างพันธะโดยการดึงอะ
 ตอมแปลกปลอมอื่นเข้าสู่โครงสร้าง เช่น ไนโตรเจน ออกซิเจน หรือฟอสฟอรัส ฯ แต่การดึงอะตอม
 ออกซิเจนจากบรรยากาศจะง่ายที่สุด ดังนั้นจึงมักพบออกซิเจนในโครงสร้างถ่านเสมอ (นิชชรี,
 2540)

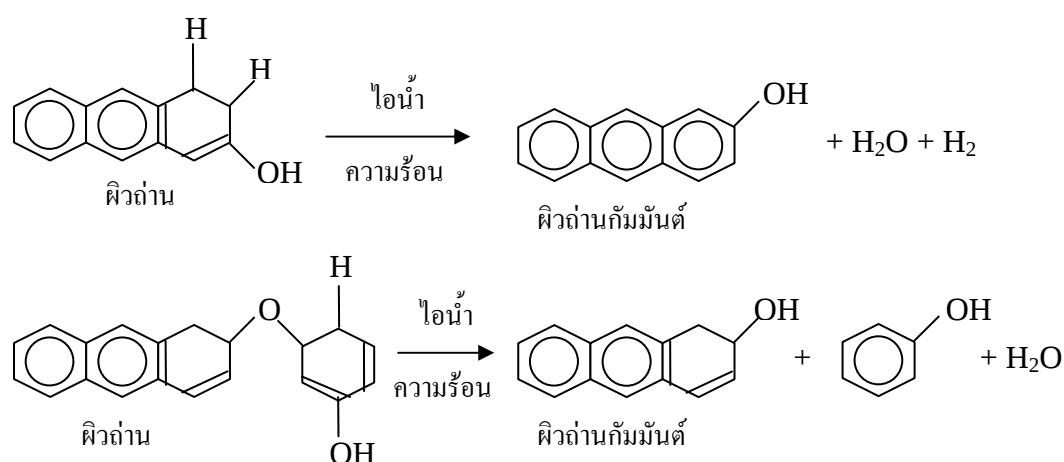


ภาพที่ 2 แสดงตำแหน่งของอเล็กตรอนของคาร์บอนที่เกิดจาก sp^2 Hybridization

ที่มา: นิชชรี (2540)

สำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยแก๊สออกซิไดซ์ เป็นการจัดเรียงโครงสร้างถ่านที่มีเสถียร
 ภาพแล้ว แต่อำนาจในการดูดซับต่ำดังแสดงในภาพที่ 3 เป็นภาพจำลองการเกิดปฏิกิริยาการกระตุ้น

ด้วยแก๊สออกซิไดซ์ ก่อนเกิดปฏิกิริยาการกระตุ้น อะตอมออกซิเจนของหมู่ไฮดรอกซีจะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนน้อย เนื่องจากคาร์บอนที่ตำแหน่งที่ 1 มีความเป็นบวกจากผลของแรงดึงดูดทางไฟฟ้าของออกซิเจน เมื่อเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำโดยใช้ความร้อนเป็นตัวเร่ง จะมีการกำจัดอะตอมไฮโดรเจนออกจากโครงสร้างเพื่อสร้างพันธะไพอิกหนึ่งพันธะ ทำให้เกิดวงเบนซีน ซึ่งเป็นที่ทราบดีแล้วว่าวงเบนซีนมีความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูง จึงช่วยเพิ่มความหนาแน่นอิเล็กตรอนของอะตอมออกซิเจน เมื่อเกิดการดูดซับกับอ็อกซิดหรือโมเลกุลที่มีขั้วเป็นบวกจึงเกิดได้ดีขึ้น ปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ยังหมายถึงการล้างโมเลกุลแปลกปลอมต่างๆ เช่น ทาร์ ออกจากบริเวณที่ใช้ในการดูดซับซึ่งเกิดในช่วงคาร์บอนไนซ์ ดังภาพที่ 3 เป็นภาพจำลองการกำจัดโมเลกุลฟีนอลออกจากโครงสร้างของถ่าน ฟีนอลเป็นสารชนิดหนึ่งในน้ำมันทาร์ หมู่ไฮดรอกซีของฟีนอลจะทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในวงเบนซีนของฟีนอลลดลง เนื่องจากผลของแรงดึงดูดทางไฟฟ้าของออกซิเจน ทำให้ออกซิเจนตำแหน่งที่ 1 มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนน้อยลง เมื่อเกิดปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยไอน้ำและความร้อน จะทำให้ฟีนอลหลุดออกทำให้ออกซิเจนตำแหน่งที่ 1 มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น อันจากการดูดซับจึงสูงขึ้น



ภาพที่ 3 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์

(บน) การเรียงโครงสร้าง

(ล่าง) การกำจัดโมเลกุลแปลกปลอม

ที่มา: รติกร (2539)

ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระซึ่งอยู่ในสภาพที่ไม่เสถียรคือ วาเลนซ์ไม่อิ่มตัว (unsaturated valencies) พยายามที่จะเกาะกับอะตอม หรือโมเลกุลอื่นๆ ออกซิเจนในอากาศ หรืออะตอมต่างๆ ที่อยู่ในสารตั้งต้น กระบวนการกระตุ้นจะช่วยทำให้การเกาะกัน

ของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมอื่น กลายเป็นพันธะทางเคมีที่แข็งแรง มักเกิดกับอะตอมคาร์บอนที่อยู่ขอบของวงหกเหลี่ยม ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับแบบเคมีกับออกซิเจนที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส และกลายสภาพเป็นออกไซด์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่ายังสามารถสร้างพันธะที่แข็งแรงกับอะตอมไฮโดรเจน ซึ่งจะไม่หลุดออกแม้จะใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียส และสามารถดึงอะตอมไนโตรเจนออกจากโมเลกุลแอมโมเนีย ดึงอะตอมซัลไฟด์ และดึงอะตอมกลุ่มแฮโลเจนออกจากโมเลกุลแฮโลเจน ทั้งที่อยู่ในสภาพแก๊สหรือของเหลวก็ได้ จึงเกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันนัลต่างๆ บนผิวของถ่านกัมมันต์ แต่โดยทั่วไปแล้วผิวของถ่านกัมมันต์ที่เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันนัลต่างๆ นั้นเกิดจากอะตอมของคาร์บอนกับออกซิเจน ที่เรียกว่า ผิวออกไซด์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะมีอยู่ 2 ชนิดคือ (Hassler and W. John, 1974)

1. หมู่ฟังก์ชันชนิดที่เป็นกรด

มักเกิดในถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิที่ไม่สูงมาก หมู่ฟังก์ชันที่เกาะอยู่บนผิวของถ่านกัมมันต์จะมีสมบัติคล้ายกรด คือ สามารถดูดซับโมเลกุลที่เป็นด่างได้ หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ ได้แก่ Carbonyls, Lactones, Aldehydes, Ketones, Quinones, Hydroquinone เป็นต้น โครงสร้างของถ่านกัมมันต์แบบนี้ค่อนข้างจะเสถียรแม้จะอยู่ในสุญญากาศ โดยทั่วไปโครงสร้างเหล่านี้จะเสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้มากจะเกิดการสลายตัวให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน

2. หมู่ฟังก์ชันชนิดที่เป็นด่าง

เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800-900 องศาเซลเซียส หมู่ฟังก์ชันนัลเกาะอยู่บนผิวของถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับโมเลกุลของกรดได้ดี ได้แก่ Hydroxide, Carbonate เป็นต้น เมื่อถ่านกัมมันต์ประเภทนี้เกิดปฏิกิริยาดูดซับกับออกซิเจนและกรดไฮโดรคลอริกจะเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ขึ้นด้วย แต่เชื่อว่าโมเลกุลของกรดจะถูกดูดซับด้วยแรงทางฟิสิกส์ โปรตอนและอออนลบจะดูดซับด้วยแรงดูดซับจากผิวของถ่านกัมมันต์ แต่โปรตรอนจะถูกแรงกระทำมากกว่า จึงอยู่ใกล้ผิวของถ่านกัมมันต์แล้วจึงเกิดการดูดซับอออนลบ เมื่อนำถ่านที่เตรียมจากกากน้ำตาลมาทำการกระตุ้น พบว่าเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงร้อยละ 10 ของปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ในถ่านจึงคาดว่าอะตอมที่อยู่บนถ่านจะมี 2 ชนิด คือ แบบที่สลายตัวกลายเป็นแก๊ส

คาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และแบบที่สลายตัว กลายเป็นสารอื่นที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส

กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

ในการผลิตถ่านกัมมันต์มีหลายวิธีซึ่งขึ้นกับวัตถุดิบ คุณสมบัติ และลักษณะของถ่านกัมมันต์ที่เราต้องการ โดยทั่วไปกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยขั้นตอน 3 ขั้นตอน คือ การเตรียมวัตถุดิบ การคาร์บอนไนเซชัน (carbonization) และการกระตุ้น (activated carbon)

1. การเตรียมวัตถุดิบ

ถ่านกัมมันต์ผลิตได้จากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ จี๊เลื้อย กะลาปาล์ม น้ำมัน กะลามะพร้าว แกลบ เปลือกถั่ว ขากรถยนต์ ถ่านหิน ฟิท์ เป็นต้น ซึ่งการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรงหรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านชาร์แล้วก็ได้ ซึ่งคุณสมบัติของวัตถุดิบเป็นส่วนสำคัญที่ต้องพิจารณาเพราะวัตถุดิบที่มีปริมาณคาร์บอนสูง ปริมาณสารระเหยสูงจะสามารถพัฒนาให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนเล็กและมีพื้นที่ผิวสูง โดยทั่วไปมักนำวัตถุดิบมาบดและคัดขนาดก่อนการคาร์บอนไนเซชันและนำไปกระตุ้นต่อไป

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของวัตถุดิบต่างๆ

วัตถุดิบ	ค่าความชื้น %	ค่าสารระเหย %	ค่าคาร์บอนคงตัว %	ปริมาณเถ้า %
pistachio-nut	4.04	73.37	21.60	0.99
palm oil shell	5.3	76.5	16.4	1.8
Cassava peel	11.4	59.4	28.9	0.3
Bituminous coal	2.7	26.7	61.8	8.9
Eucalyptus	-	85.7	14	0.3
Biomass waste	7.4	75.2	15.6	1.8

2. กระบวนการคาร์บอนในเซชัน

เป็นกระบวนการไพโรไลซิสรูปแบบหนึ่ง ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปของถ่านชาร์ (char) ที่เป็นของแข็งมากกว่าในรูปของน้ำมันทาร์ (tar) หรือแก๊ส การคาร์บอนในเซชันเป็นการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้สูงขึ้น โดยการเผาในที่อับอากาศที่อุณหภูมิประมาณ 200-500 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ ปฏิกิริยาไพโรไลซิสต้องการความร้อนทั้งทางตรงและทางอ้อม ที่ได้จากการออกซิเดชันเพียงบางส่วน หรือได้จากปฏิกิริยาอื่นๆ ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ ในปัจจุบันกระบวนการสลายตัวทางความร้อนในภาวะที่มีออกซิเจนน้อยหรือในที่มีการถ่ายเทความร้อนทำให้เกิดการไพโรไลซิสโดยตรงจากการเผาไหม้บางส่วนของถ่านชาร์และแก๊สเรียกได้ว่าเป็นกระบวนการไพโรไลซิส

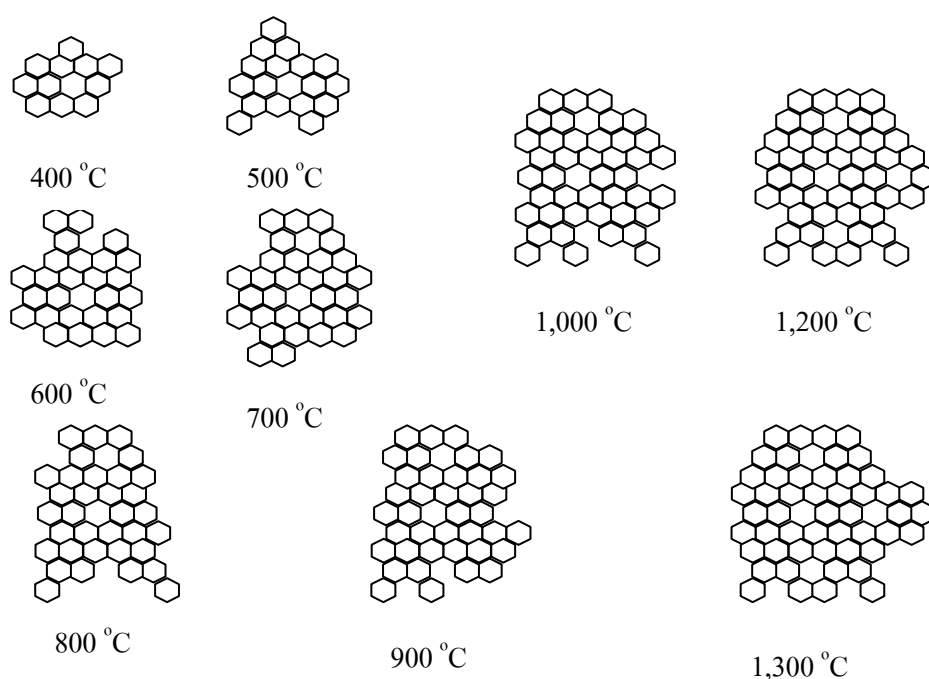
ความแตกต่างของเทอมไพโรไลซิส แก๊สซิฟิเคชันและการเผาไหม้ เปรียบเทียบได้จากปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ คือ ปริมาณอากาศที่ใช้มีส่วนสัมพันธ์กับปริมาณเชื้อเพลิง ไพโรไลซิสเป็นส่วนของอากาศน้อยกว่าร้อยละ 20 ของอากาศที่ใช้เผาไหม้ทางทฤษฎี แก๊สซิฟิเคชันเป็นส่วนของอากาศระหว่างร้อยละ 25-50 ของอากาศที่ใช้เผาไหม้ทางทฤษฎี และส่วนของการเผาไหม้ใช้อากาศมากกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ ของอากาศที่ใช้เผาไหม้ทางทฤษฎีขึ้นไป

กระบวนการคาร์บอนในเซชันเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ เพราะเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของโครงสร้างที่เป็นรูพรุน โดยเกิดการสลายตัวของโครงสร้างในส่วนที่ระเหยง่ายออกมาในรูปของแก๊ส เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรคาร์บอนเบา ส่วนคาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันในรูปของถ่านชาร์ ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนในเซชันมีความสามารถในการดูดซับต่ำ เนื่องมาจากการผลิตถ่านชาร์โดยทั่วไปจะใช้อุณหภูมิประมาณ 400-500 องศาเซลเซียส ซึ่งยังคงมีน้ำมันทาร์ตกค้างอยู่ภายในช่องว่างหรือเกาะอยู่บริเวณผิว ดังนั้นการกระตุ้นจึงเป็นเพียงการพัฒนาโครงสร้างให้เป็นไปทางเดียวกับการคาร์บอนในเซชันเท่านั้น ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนในเซชันควรมีลักษณะ มีสีดำตลอด เมื่อหักดูส่วนที่หักจะมีผิวมันเงา ปลายที่หักจะแหลมคม ปราศจากผงฝุ่นและขี้เถ้า โดยทั่วไปวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยไอน้ำควรมีสมบัติดังต่อไปนี้ สารระเหยต่ำ ปริมาณคาร์บอนสูง มีความพรุนสูง มีความหนาแน่นสูง จึงจำเป็นต้องนำถ่านชาร์นี้ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ (Hassler and W. John, 1974)

2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการคาร์บอนในเซชัน

2.1.1 อุณหภูมิ กระบวนการคาร์บอนในเซชัน

เป็นการกลั่นสลายของสารอินทรีย์เพื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์คาร์บอนในสารอินทรีย์ โดยจะเกิดการหักออกตรงบริเวณที่มีพันธะอ่อนหรือมีหมู่โมเลกุลที่หลุดออกง่ายทำให้กลุ่มโมเลกุลที่เป็นวงแหวนแตกออกจากกันเป็นกลุ่มๆ จำนวนมากโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกหลักที่เหลือกลายเป็นโครงสร้างของถ่านชาร์ ซึ่งการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่ใช้ ส่วนโครงสร้างโมเลกุลขนาดเล็กจะกลั่นสลายตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง ได้แก่ น้ำ แอมโมเนีย น้ำมันทาร์ และแก๊สต่างๆ



ภาพที่ 4 การเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงของคาร์บอนอะตอมตามอุณหภูมิที่เผา

ที่มา: Hassler and W. John (1974)

เมื่ออุณหภูมิการคาร์บอนในเซชันเพิ่มขึ้น พบว่าค่าร้อยละผลิตภัณฑ์และค่าร้อยละสารระเหยลดลง เนื่องจากการปลดปล่อยสารระเหยออกจากกะลาปาล์มมีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะ ชนิดของสารระเหยที่ถูกปลดปล่อย น้ำหนักโมเลกุล และจุดเดือดของสารระเหยที่ปล่อยออกมา แต่ในทางกลับกันร้อยละคาร์บอนคงตัวมีค่ามากขึ้น (สุรชัย, 2542)

2.1.2 ระยะเวลาในการคาร์บอนในเซชัน

พบว่าระยะเวลาในการคาร์บอนในเซชันมีผลต่อการปลดปล่อยปริมาณสารระเหยออกจากกะลาปาล์ม เมื่อใช้เวลาในการคาร์บอนในเซชันนานขึ้นร้อยละของปริมาณสารระเหยจะลดลง ปริมาณร้อยละของคาร์บอนคงตัวและปริมาณร้อยละของเถ้าสูงขึ้น เนื่อง จากเวลาที่มากขึ้นสามารถปลดปล่อยความชื้น ปริมาณสารระเหย และสารระเหยส่วนที่เหลือในกะลาปาล์มที่อยู่ลึกเข้าไปภายในรู ซึ่งยากต่อการแพร่ออกมาสู่ภายนอก อีกทั้งยังเกิดการอุดตันของรูพรุนจากเถ้าทำให้มีเถ้าสีขาวติดอยู่ที่ผิวของชาร์ กระบวนการคาร์บอนในเซชันเป็นเพียงการสร้างรูพรุนเบื้องต้น ฉะนั้นระยะเวลาในการคาร์บอนในเซชันจึงไม่ควรนานเกินไปเนื่องจากจะต้องนำถ่านชาร์ที่ได้ไปทำการกระตุ้นต่อในกระบวนการกระตุ้น

2.1.3 อัตราการให้ความร้อน

เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อปริมาณสารระเหยจากการคาร์บอนในเซชัน กล่าวคือ ถ้าอัตราการให้ความร้อนสูงปริมาณสารระเหยจะถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว ถ่านที่ได้จะมีรูพรุนใหญ่ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าถ่านที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำกว่าเพราะว่าถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนในเซชันด้วยการเพิ่มอุณหภูมิสูง คาร์บอนจะเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่าทำให้เกิดช่องว่างเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ เมื่อทำการกระตุ้นสารที่ใช้ในการกระตุ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย (นิชชรี, 2540)

2.1.4 ตัวกลางของปฏิกิริยา

จะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยาถ้าแก๊สและไอที่เกิดขึ้นระหว่างการคาร์บอนในเซชันถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว โดยแก๊สที่เป็นตัวกลาง เช่น แก๊สไนโตรเจน (เฉื่อยต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอน) หรือแก๊สจากการเผาไหม้ ถ้าตัวกลางเป็นแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ ปริมาณถ่านที่ได้จะน้อยกว่าตัวกลางที่เป็นแก๊สไนโตรเจน แต่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นสูงกว่าเนื่องจากการเผาไหม้มีส่วนช่วยสร้างรูพรุนให้ขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อนำไปกระตุ้นจึงมีผลทำให้แก๊สกระตุ้นสามารถแทรกตัวเข้าไปในอนุภาคถ่านชาร์ได้ง่าย

2.1.5 ขนาดของอนุภาคที่ใช้ในกระบวนการคาร์บอนในเซชัน

อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะอัดตัวกันแน่นทำให้แก๊สออกซิไดซ์แทรกตัวเข้าไปทำปฏิกิริยากับถ่านได้อีก ส่วนอนุภาคที่ขนาดใหญ่จะมีช่องว่างระหว่างอนุภาคมากกว่าอนุภาคขนาดเล็ก ทำให้แก๊สออกซิไดซ์แทรกตัวเข้าไปทำปฏิกิริยากับถ่านได้ทั่วถึงกว่า แต่ถ้าอนุภาคขนาดใหญ่เกินไปแม้จะมีเวลาในการเกิดปฏิกิริยานาน แต่โครงสร้างของคาร์บอนอาจเกิดการแตกของโครงสร้างรูพรุนได้ จึงควรใช้อนุภาคที่เหมาะสมในการคาร์บอนในเซชัน

การพิจารณาคุณสมบัติของกระบวนการคาร์บอนในเซชันที่เหมาะสม คือ มีร้อยละปริมาณสารระเหยอยู่ในช่วง 20 – 25% (บุญชัย, 2536) และมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมในการนำถ่านชาร์ไปทำการกระตุ้นต่อไป โดยทั่วไปการคาร์บอนในเซชันจะมีการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ 2 ช่วง คือ ช่วงอ่อนตัว (softening period) และช่วงหลังการอ่อนตัว (after softening period) ในช่วงการอ่อนตัวควรให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำเพื่อให้แก๊สหลุดออกจากโพรงภายในได้ โดยไม่สลายตัวหรือเปลี่ยนรูปเป็นของแข็งอัดแน่นภายในโพรงซึ่งถ่านชาร์ที่ได้จะแน่นและแข็งตัว

3. กระบวนการกระตุ้น

3.1 ความหมายของการกระตุ้น ได้พิจารณาความหมายของการกระตุ้นไว้ 3 ลักษณะ คือ (Hassler and W. John, 1974)

3.1.1 เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวว่องไว (active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้โมเลกุลบางโมเลกุลหลุดออกไปทำให้เกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน

3.1.2 เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้กับผิวที่มีอยู่แล้ว หมายถึง ทำให้อะตอมของคาร์บอนจัดเรียงเปลี่ยนแปลงโครงสร้างใหม่เพื่อให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น

3.1.3 เป็นการกำจัดสารอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ดูดซับ (active center)

3.2 วิธีการกระตุ้น

การกระตุ้นถ่านกัมมันต์สามารถทำได้ 2 วิธีดังนี้

3.2.1 วิธีกระตุ้นทางเคมี

เป็นวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์โดยให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคมีที่นิยมใช้ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นต้น วิธีการกระตุ้นทางเคมีโดยทั่วไปจะใช้สำหรับการกระตุ้นวัตถุดิบประเภทไม้ และพีท โดยจะนำวัตถุดิบเหล่านี้ไปแช่สารเคมีประเภท กรดฟอสฟอริก (P_2O_5) ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) และคลอไรด์ (CaCl_2) แล้วผสมให้ทั่ว และก็นำไปให้ความร้อนเพื่อทำการกระตุ้น โดยใช้อุณหภูมิอยู่ในช่วง 500-800 องศาเซลเซียส จากนั้นจะนำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปล้างให้สารเคมีที่ตกค้างอยู่หลุดออกไป แล้วก็ทำให้แห้ง สำหรับถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีนั้น จะมีโครงสร้างของรูพรุนเป็นแบบเปิดหรืออีกนัยหนึ่งคือ รูพรุนที่ได้มีขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับใช้เพื่อการดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ข้อดี การกระตุ้นด้วยวิธีนี้คือ ใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก (400-600 องศาเซลเซียส) ข้อเสีย การกระตุ้นด้วยวิธีนี้คือ มีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ทำให้ต้องเสียเวลา และค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีออก อีกทั้งอุปกรณ์ที่ใช้จำเป็นต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถทนทานการกัดกร่อนได้

3.2.2 วิธีกระตุ้นทางกายภาพ

เป็นวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่วไป ที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ โดยทั่วไปนิยมใช้สำหรับกระตุ้นวัตถุดิบประเภท ถ่านหินและกะลาปาล์ม วิธีนี้เป็นการปรับปรุงผิวของคาร์บอนให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับให้สูงขึ้น โดยสามารถทำได้โดยการนำถ่านชาร์ที่ได้จากกระบวนการคาร์บอนไนเซชันมากระตุ้นด้วยแก๊สหรือไอ โดยจะเรียกแก๊สที่ใช้กระตุ้นว่า แก๊สออกซิไดซ์ (oxidizing gas) แก๊สพวกนี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำมันที่ยังเหลืออยู่และคาร์บอนอะตอมในถ่านเกิดเป็นแก๊สออกไซด์ของคาร์บอนแพร่ออกจากผิวของคาร์บอน เกิดแก๊สซิฟิเคชันบางส่วนของเม็ดถ่านชาร์เป็นรูพรุนขึ้นในโครงสร้างของถ่าน ถ่านชาร์ประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมาก ซึ่งเกิดการสลายตัวด้วยความร้อน และถูกขัดขวางด้วยอะมอร์ฟัสคาร์บอน ดังนั้นการกระตุ้นจึงเป็นการเปิดรูพรุนที่ถูกปิด พร้อมทั้งสร้างรูพรุนขึ้นมาใหม่ด้วยทำให้ถ่านมีรูพรุนและมีพื้นที่ผิวที่สูงขึ้น จึงส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับมากขึ้น ส่วนแก๊สที่นิยมใช้ในการออกซิไดซ์ได้แก่ ให้น้ำอัมมวีย่งยวด แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สออกซิเจน โดยใช้ร่วมกับความร้อน ปฏิกิริยาการกระตุ้นอาจเกิดจากการใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียวแต่ต้องใช้อุณหภูมิสูงมากถึง 1,200 องศาเซลเซียส แต่ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีคุณภาพต่ำกว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้โดย การกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ อุณหภูมิที่ใช้ไม่สามารถกำหนดได้แน่นอน แต่มักไม่เกิน 1,000 องศาเซลเซียส เพราะว่าถ้าใช้อุณหภูมิสูงกว่า

1,000 องศาเซลเซียส จะทำให้อำนาจการดูดซับถ่านกัมมันต์ลดลง อุณหภูมิที่ใช้ทั่วไปอยู่ในช่วง 800-900 องศาเซลเซียส ข้อดี การกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ ไม่มีสารเคมีตกค้าง ข้อเสีย การกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าการกระตุ้นด้วยสารเคมี (วรารุณ, 2541)

ปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยวิธีนี้ คือ ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบสมบัติทางเคมีและอัตราส่วนของแก๊สที่ใช้ อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา และระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยา (Hassler and W. John, 1974) ปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวออกซิไดซ์และอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิต่ำอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างคาร์บอนกับตัวออกซิไดซ์ เป็นผลให้ได้เกิดรูพรุนที่ต้องการช้า แต่ที่อุณหภูมิสูงเกินไปปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดที่ผิวนอกของอนุภาค ทำให้เกิดการสูญเสียคาร์บอนแต่ไม่ทำให้เกิดรูพรุนขึ้น แก๊สที่นิยมใช้ในการกระตุ้นทางกายภาพ (Rodriguez-Reinoro *et al.*, 1965) มีดังนี้

ก. การกระตุ้นด้วยไอน้ำ

การใช้ไอน้ำในที่นี้หมายถึง การใช้ไอน้ำยิ่งยวด (superheated steam) ถือได้ว่าเป็นสารกระตุ้นทางกายภาพที่มีการใช้กันมาก เนื่องจากโมเลกุลของน้ำนั้นมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และในการกระตุ้นด้วยไอน้ำมีข้อดีคือ

- 1) โมเลกุลของน้ำจะแพร่เข้าไปได้อย่างรวดเร็วในโครงสร้างรูพรุน
- 2) เนื่องจากโมเลกุลที่เล็กจึงสามารถเข้าไปในรูพรุนขนาดเล็กได้
- 3) มีการเกิดปฏิกิริยาที่รวดเร็ว ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถึงสามเท่า ที่สภาวะความดัน 10 กิโลพาสคัล ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

การใช้ไอน้ำยิ่งยวดในการกระตุ้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบดูดความร้อน และเป็นปฏิกิริยาเคมีที่ซับซ้อน โดยทั่วไปจะสมมุติเป็นปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (gasification) ของถ่านชาร์ ปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านที่เกิดขึ้นในการกระตุ้นด้วยไอน้ำ แสดงดังสมการที่ 1 และ 2 (Rodriguez-Reinoro *et al.*, 1965)



อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี (r) สามารถเขียนแบบ Langmuir-Hinshelwood ได้ดังนี้

$$r = \frac{kP_{H_2O}}{1 + K_1P_{CO_2} + K_2PH_{H_2}} \quad (3)$$

โดยที่ P_{H_2O} และ P_{H_2} คือ ความดันย่อยของแก๊ส H_2O และ H_2

k คือ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา

K_1 และ K_2 คือ ค่าคงที่ของการดูดซับ

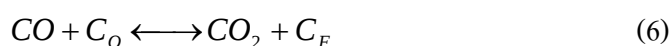
ในสร้างสมการและทำการทดลองเกี่ยวกับการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยสมมุติว่าบริเวณที่กลายเป็นจุดว่องไวในการดูดซับเกิดจากโมเลกุลของไอน้ำทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่อิสระ (C_F) ผลที่ได้คือ แก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนที่เกาะกับออกซิเจน (C_O) ดังสมการที่ 4



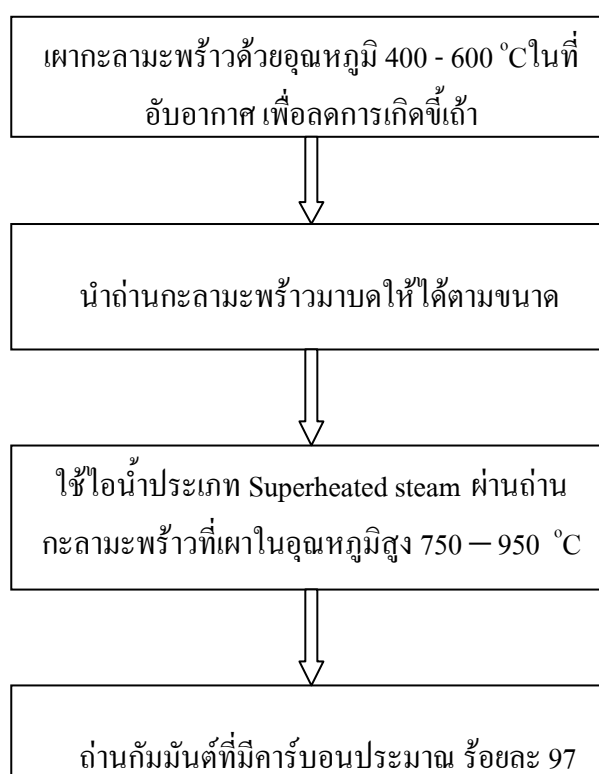
การที่มี C_O มาก แสดงว่าปฏิกิริยาการกระตุ้นเกิดได้ดี อย่างไรก็ตาม C_O สามารถเกิดการสลายตัวได้ดังนี้



โดย $n = 0, 1, 2$ ถ้า $n = 2$ หมายความว่าปฏิกิริยาดังกล่าวจะเพิ่มจุดที่เกิดปฏิกิริยาในสมการที่ 4 มีผลให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น ถ้า $n = 1$ แสดงว่าปฏิกิริยาการสลายตัวดังกล่าวไม่มีผลต่อถ่านกัมมันต์ที่ได้ แต่ถ้า $n = 0$ แสดงว่าถ่านกัมมันต์จะมีความว่องไวน้อยลงแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดในสมการที่ 5 สามารถดึงอะตอมออกซิเจนจาก C_O ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และ C_F ในทางย้อนกลับ C_F ก็สามารถดึงอะตอมออกซิเจนออกจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แล้วเกิด C_O ได้ดังสมการที่ 6 ซึ่งก็เป็นปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั่นเอง



จากการทดลองของ พบว่าค่าคงที่สมดุลขึ้นกับอุณหภูมิไม่ขึ้นกับชนิดของคาร์บอน และที่อุณหภูมิ 1000, 1100, และ 1200 องศาเซลเซียส พบว่าขนาดอนุภาคไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งในประเทศไทยได้มีโรงงานที่ผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว โดยแสดงขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีทางกายภาพโดยใช้การกระตุ้นด้วยไอน้ำของกะลามะพร้าวแสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แสดงขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีทางกายภาพ

ที่มา: อุไรวรรณ (2523)

ข. การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในระหว่าง 800-900 องศาเซลเซียส ในปฏิกิริยานี้มีการยับยั้งปฏิกิริยาอันเกิดจากการรับมอนอกไซด์และไฮโดรเจน โดยคาร์บอนมอนอกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยากว่าการเกิดขึ้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์นั้นจะมีผลดีคือจะมีการกระตุ้นที่ให้อุณหภูมิขนาดเล็กที่ดี แต่ในขณะเดียวกันอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลง จากการ

ทดลองทั่วไปพบว่า การกระตุ้นโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะต้องใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นสูงกว่าการกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำ แต่โดยทั่วไปมักจะใช้แก๊สผสมระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับไอน้ำอิมิตวียังยวด ปฏิกริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านที่เกิดขึ้นในการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งแสดงดังสมการ



ค. การกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิเจน

เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนที่เกิดขึ้นง่ายและเร็วกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำหรือการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แต่อากาศไม่นิยมใช้เป็นตัวกระตุ้น เพราะควบคุมได้ยาก และเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนจึงไม่สามารถรักษาอุณหภูมิในเตาให้คงที่ได้ ทั้งนี้เพราะออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงเกินไปการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิเจนเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนที่เกิดขึ้นง่ายและเร็วกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำ หรือการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปดังสมการ



ปฏิกิริยาทั้งสองเป็นแบบคายความร้อนและอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์กับคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ถ่านชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วยอากาศที่มีออกซิเจนปนอยู่จะเกิดหมู่ฟังก์ชัน ขึ้นที่ผิวถ่านชาร์เป็นจำนวนมาก

เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

1. เครื่องคาร์บอนไนเซอร์

เครื่องคาร์บอนไนเซอร์คือเครื่องมือที่ใช้แปรสภาพอินทรีย์วัตถุให้เป็นถ่านชาร์ มักมีหลายแบบแต่โดยส่วนมากจะเน้นถึงความสามารถในการกระจายความร้อนสม่ำเสมอ มีประสิทธิภาพสูง

ประหยัด และปลอดภัย อย่างไรก็ตามอาจแบ่งเครื่องคาร์โบไนเซอร์ออกเป็น 2 แบบ คือ (บุญชัย, 2536)

1.1 แบบไม่ต่อเนื่อง เช่น แบบหลุมกลบ แบบกองสุม หรือแบบก่ออิฐ ฯลฯ

1.2 แบบต่อเนื่อง เช่น แบบเตาหมุน แบบฟลูอิไดซ์เบด ฯลฯ

2. เครื่องแอกติเวเตอร์

2.1 เตาหมุน (rotary klin) รูปร่างของเตาเป็นทรงกระบอก โดยมีเครื่องจักรกลทำให้หมุนได้ตลอดเวลา ออกแบบโดยวิศวกรชาวญี่ปุ่น ชื่อ Tsutoma Kato ข้อดีของเตาแบบนี้คือ สามารถปรับขนาดของรูพรุนที่เกิดจากการกระตุ้นได้ แบบนี้เป็นแบบที่โรงงานผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวในประเทศไทย ใช้เป็นเครื่องปฏิกรณ์ในการผลิต อุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการผลิตกรณีผลิตด้วยวิธีการกระตุ้นเตาเผาแบบหมุน ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

2.1.1 แหล่งกำเนิด เป็นส่วนที่เปลี่ยนน้ำที่เป็นของเหลวให้กลายเป็นไอน้ำ

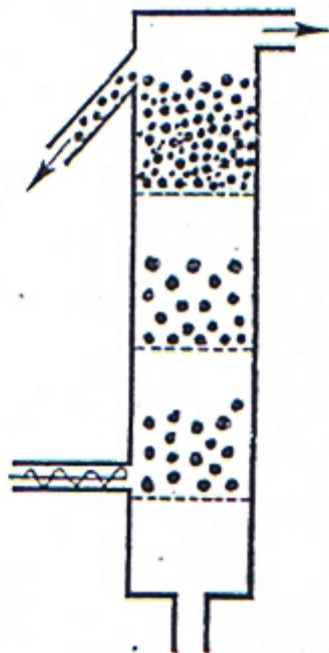
2.1.2 ตัวเครื่อง ประกอบด้วย ท่อบรรจุสาร มอเตอร์หมุน ที่วัดอุณหภูมิและเครื่องควบคุม

2.1.3 แหล่งให้ความร้อน เพื่อให้ไอน้ำผ่านเข้ามาในตัวเครื่องเป็นไอน้ำที่มีอุณหภูมิสูง

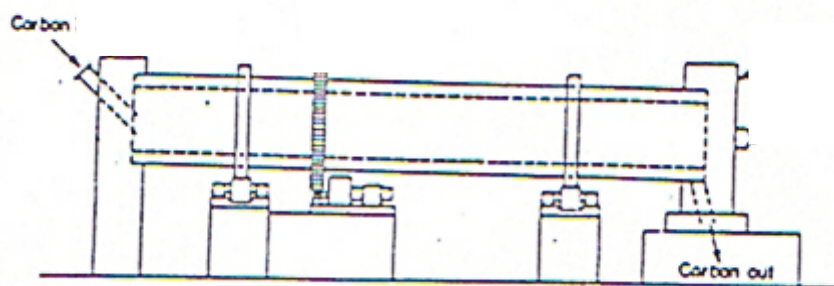
2.2 ฟลูอิไดซ์เบด สร้างโดย Jun-Iohi Kawabata เพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ชนิดหยาบ โดยกระตุ้นด้วยไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 600 ถึง 2000 องศาเซลเซียส ข้อดีของเครื่องกระตุ้นแบบนี้คือ ควบคุมอุณหภูมิได้ง่าย

2.3 ฟลูอิไดซ์เบดแบบให้ความร้อนในเบด (internal-heat type fluidized-bed) เป็นเครื่องผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยไอน้ำร้อนอิ่มตัวยิ่งยวด ใช้ความร้อนจากการเผาไหม้แก๊สหุงต้ม เพื่อให้อุณหภูมิในเบดเท่ากับ 720 ถึง 790 องศาเซลเซียส สร้างโดยวิศวกรชาวญี่ปุ่น

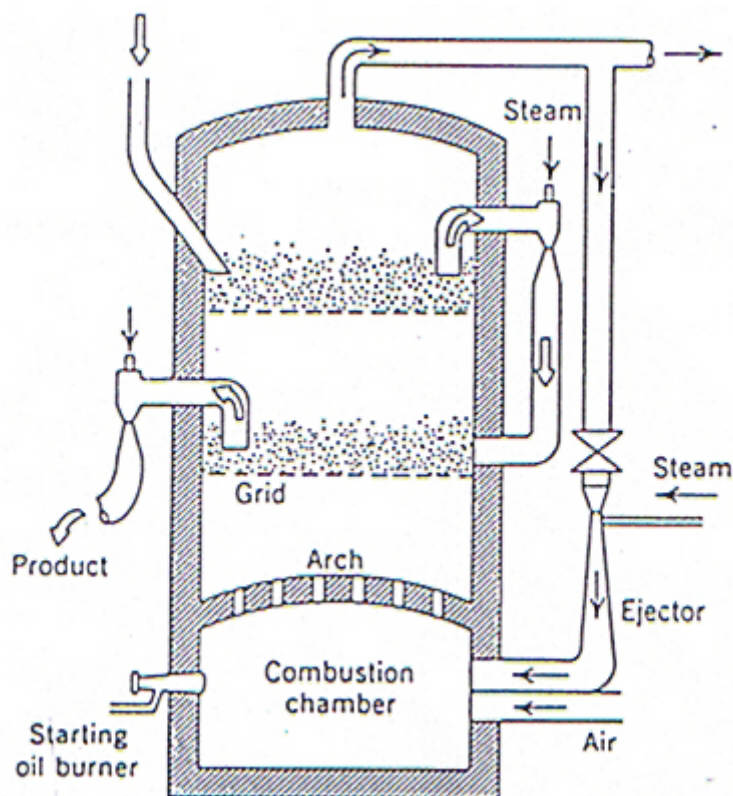
2.4 ฟลูอิไดซ์เบดแบบสองชั้น (two stage fluidized-bed) เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวดโดยใช้ความร้อนจากการเผาไหม้น้ำมัน เพื่อให้อุณหภูมิในเบดเท่ากับ 800 ถึง 900 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากเครื่องแอกติเวเตอร์แบบนี้มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 6 เครื่องแอกติเวเตอร์แบบฟลูอิดไชเบค
ที่มา: Kawabata *et al.* (1975)



ภาพที่ 7 เครื่องแอกติเวเตอร์แบบเตาหมุน
ที่มา: Kawabata *et al.* (1975)



ภาพที่ 8 ฟลูอิดไชเบดแบบสองชั้น

ที่มา: Kunii *et al.* (1969)

หลักการวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

1. การหาพื้นที่ผิว

การหาพื้นที่ผิว BET (Brunauer-Emmett-Teller) เป็นการวิเคราะห์ที่นิยมใช้เพื่อแสดงคุณภาพของถ่านกัมมันต์มากกว่าการหาปริมาณรูพรุน โดยใช้สมการ BET แสดงในสมการที่ 7

$$\frac{1}{W((P_o/P)-1)} = \frac{1}{W_m C} + \frac{C-1}{W_m C} \left(\frac{P}{P_o} \right) \quad (7)$$

โดยที่ W คือ น้ำหนักสารถูกดูดซับทั้งหมด (กรัม)

W_m คือ น้ำหนักสารที่ถูกดูดซับชั้นเดียวและปกคลุมผิวทั้งหมดของสารที่ถูกดูดซับ (กรัม)

P/P_0 คือ ความดันสัมพัทธ์ที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ

C คือ ค่าคงที่ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพลังงานการดูดซับ

หลักการในการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวคือ วัดปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่เข้าไปแทนที่รูพรุนของถ่านกัมมันต์ รวมทั้งเคลือบส่วนที่เป็นรูพรุน แล้วนำไปคำนวณหาปริมาตร และพื้นที่ผิวของรูพรุนในอนุภาคของสารนั้น

1.1 การวิเคราะห์แบบ Multipoint BET

จากสมการที่ 7 เป็นสมการเส้นตรง เมื่อนำมาพลอตกราฟระหว่างแกนราบคือ P/P_0 กับแกนตั้งฉาก $1/[W(P_0/P)-1]$ และจุดตัดบนแกนตั้งฉากคือ $1/W_m C$ ซึ่งนำไปใช้ในการคำนวณ หาค่าพื้นที่ผิวได้โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นตัวดูดซับ ข้อจำกัดในการใช้การวิเคราะห์แบบ Multipoint BET คือใช้ P/P_0 อยู่ระหว่าง 0.05 ถึง 0.35

ในการวิเคราะห์แบบ Multipoint BET จะต้องกำหนดจุดในการวิเคราะห์อย่างน้อย 3 จุด ซึ่งค่าต่างๆ สามารถหาได้ดังสมการ

$$C = \exp\left(\frac{q_1 - q_2}{RT}\right) \quad (8)$$

$$s = \frac{C - 1}{W_m C} \quad (9)$$

$$i = \frac{1}{W_m C} \quad (10)$$

$$W_m = \frac{1}{s + i} \quad (11)$$

โดยที่ q_1 คือ ความร้อนที่เกิดจากการดูดซับแบบชั้นเดียว (จุลต่อโมล)

q_2 คือ ความร้อนที่เกิดจากการดูดซับแบบหลายชั้น (จุลต่อโมล)

s คือ ความชันของกราฟ (slope)

i คือ จุดตัดแกนตั้ง (intercept)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 จูลต่อโมล.เคลวิน)

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

เมื่อได้ค่า W_m จากการคำนวณโดยใช้สมการ BET แล้ว นำค่าที่ได้มาคำนวณหาพื้นที่ผิวทั้งหมดจากสมการที่ 12 และ สมการที่ 13

$$S_t = \frac{W_m N A_{cs}}{M} \quad (12)$$

$$S = \frac{S_t}{w} \quad (13)$$

โดยที่ S คือ พื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) หน่วยเป็นตารางเมตรต่อกรัม

S_t คือ ค่าพื้นที่ผิวทั้งหมด (the total surface area) หน่วยเป็นตารางเมตร

N คือ เลขอาโวกาโด (Avogadro's number) มีค่าเท่ากับ 6.023×10^{23} โมเลกุลต่อโมล

A_{cs} คือ พื้นที่ผิวของโมเลกุลของสารดูดซับ (the molecular cross-sectional) หน่วยเป็นตารางเมตรต่อโมเลกุล ถ้าการดูดซับใช้ในโตรเจนจะมีค่าเท่ากับ 16.2 ตารางอังสตรอม

M คือ น้ำหนักโมเลกุลของสารดูดซับ (กรัมต่อโมล)

w คือ น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

ค่า C เป็นค่าคงที่ที่มีผลต่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลของสารดูดซับ ถ้าใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นสารดูดซับ สามารถคำนวณพื้นที่ผิวของแก๊สไนโตรเจนจากคุณสมบัติของของเหลวปรากฏ ซึ่งค่าพื้นที่ผิวการดูดซับของแก๊สไนโตรเจน (A_{cs}) จะมีค่าเท่ากับ 16.2 ตารางอังสตรอม

1.2 การวิเคราะห์แบบ Single BET

ในการหาพื้นที่ผิวอาจใช้ค่าเพียงจุดเดียวบนไอโซเทอมการดูดซับจากการพลอตกราฟโดยสมการ BET ซึ่งถ้าใช้แก๊สไนโตรเจน ค่า C ที่ได้จะมีค่ามากจนสมมุติให้เทอมจุดตัดแกนตั้ง (intercept) เป็นศูนย์ ดังนั้นจากสมการที่ 7 เมื่อลดรูปแล้วจะได้ดังสมการที่ 14

$$W_m = W \left(1 - \frac{P}{P_o} \right) \quad (14)$$

$$W_m = \frac{PVM}{RT} \left(1 - \frac{P}{P_o} \right) \quad (15)$$

ซึ่งสามารถหาค่าพื้นที่ผิวทั้งหมดได้โดยใช้สมการที่ 12 และสมการที่ 13 โดยการวัดปริมาณแก๊สในโครเจนที่ถูกดูดซับขึ้นเดียว ณ ที่ความดันสัมพัทธ์ (P/P_o) ใกล้เคียง 0.3 จะได้สมการหาค่าพื้นที่ผิวทั้งหมดดังสมการที่ 16

$$S_t = \frac{PVNA_{cs}(1 - P/P_o)}{RT} \quad (16)$$

การเลือกจุด P/P_o มีความสำคัญมาก พบว่าถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็กควรเลือกค่า P/P_o ต่ำๆ โดยทั่วไปมักใช้ P/P_o น้อยกว่า 0.1 สำหรับถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดกลางควรเลือกค่า P/P_o ระหว่าง 0.1 ถึง 0.3 ทั้งนี้ค่าที่เลือกมาเพื่อใช้ในการคำนวณ ต้องมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงที่มีจุดตัดแกนตั้งฉากมากกว่าศูนย์ โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เกรดการค้ามีค่าไอโอไดน์มากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม

2. การหาค่าการดูดซับไอโอไดน์

เป็นการทดสอบสมบัติการดูดซับสารพิษออกจากรูพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยใช้ไอโอไดน์เป็นสารที่ถูกดูดซับ เนื่องจากเป็นสารพิษที่มีความสามารถในการกัดกร่อนสูง โดยเฉพาะเมื่ออยู่ในสภาพที่เป็นแก๊ส (Hassler, 1974) สำหรับการวิเคราะห์ในการวิจัยนี้เลือกใช้ ASTM (American Associate Testing Method) เพราะ ASTM ได้กำหนดให้ความเข้มข้นของไอโอไดน์ที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 0.02 นอร์มัล ซึ่งสามารถควบคุมได้ด้วยการแปรน้ำหนัของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพที่ดีควรใช้น้ำหนักในการวิเคราะห์ต่ำ ในทางปฏิบัติไม่สามารถทำให้ความเข้มข้นของไอโอไดน์ที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 0.02 นอร์มัลได้พอดี จึงต้องทำการวิเคราะห์โดยใช้น้ำหนัก 3 ค่า เพื่อให้มีความเข้มข้นของไอโอไดน์ที่สภาวะสมดุลมากกว่า ใกล้เคียง และน้อยกว่า 0.02 นอร์มัล แล้วใช้วิธีเฉลี่ยแบบลอการิทึม ทำให้ค่าที่ได้มีความถูกต้องยิ่งขึ้น

3. การหาปริมาณเถ้า

หมายถึงการหาปริมาณสารอินทรีย์ที่ทนความร้อนได้สูง และปนเปื้อนอยู่ในถ่านกัมมันต์ เถ้าจะทำให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านลดลง เนื่องจากมีเถ้าอุดตันอยู่ในรูพรุน ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณเถ้าสูงจะมีราคาต่ำลง เพราะน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่ซื้อขายกันนั้นไม่ใช่ น้ำหนักจริง แต่มีน้ำหนักของเถ้าผสมอยู่ด้วย โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณเถ้าได้ไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ถ้ามีปริมาณเถ้าสูงควรนำไปล้างเอาเถ้าออกด้วยน้ำหรือสารละลายกรด ซึ่งจะช่วยให้สามารถดูดซับได้ดีขึ้น (บุญชัย, 2534)

4. การหาความหนาแน่นปรากฏ

หมายถึงการหาน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ต่อหน่วยปริมาตร ปริมาตรในที่นี้หมายถึง ปริมาตรของช่องว่างระหว่างอนุภาคและปริมาตรของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นค่านี้จึงขึ้นกับ ขนาดและความพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เกรดการค้ามีความหนาแน่นปรากฏ ระหว่าง 0.3 ถึง 0.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ในการวิเคราะห์ที่กำหนดให้ขนาดของอนุภาคคงที่ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่มีค่าความหนาแน่นปรากฏต่ำ จะมีปริมาณรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากจะเป็น ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดี นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นปรากฏยังขึ้นกับความชื้นของอนุภาคด้วย กล่าวคือ อนุภาคที่มีความชื้นเพิ่มขึ้น จะมีความหนาแน่นปรากฏลดลง (บุญชัย, 2534)

ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

ในอุตสาหกรรมมีการใช้ถ่านกัมมันต์อย่างแพร่หลาย น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ในแต่ละโรงงานจะแตกต่างกันไป ดังนี้

1. ถ่านกัมมันต์ประเภทที่ใช้ในการดูดซับแก๊สหรือไอ

1.1 ใช้ในอุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันแก๊สพิษ ทั้งที่ใช้ในการทหารและที่ใช้กันทั่วไป ทั้งนี้เพราะถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับแก๊สพิษและไอของสารอินทรีย์ได้

1.2 ใช้แยกแก๊สไอระเหยของของตัวทำละลายที่ใช้แล้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยถ่านกัมมันต์จะดูดซับไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้องและคายออกมาที่ความดันของไอดำๆ เช่น การสกัด

สารด้วยตัวทำละลาย การหมัก อุตสาหกรรมพลาสติก ผลิตภัณฑ์ยาง เป็นต้น

1.3 ใช้กำจัดสิ่งเจือปนออกจากแก๊ส เช่น ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ฮีเลียม อะเซทิลีน แอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น

1.4 ใช้กำจัดสารประกอบออร์แกนิกซัลเฟอร์ เช่น ไฮโดรซัลไฟด์ และสิ่งเจือปนอื่นๆ จากโรงงาน อุตสาหกรรม ใช้กำจัดกลิ่นจากอากาศในเครื่องปรับอากาศ ทำให้กลิ่นเหม็นลดน้อยลง

1.5 ใช้ดูดซับกัมมันตรังสีที่ออกมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ สำหรับหน่วยปฏิบัติการให้การสลายตัวเกิดขึ้นสมบูรณ์ขณะที่ยังถูกจับไว้ในแอคติเวเต็ดคาร์บอนเบด

2. ถ่านกัมมันต์ประเภทที่ใช้ในการดูดซับของเหลว

2.1 การฟอกสีและทำให้ของเหลวบริสุทธิ์ ซึ่งในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาล เพื่อฟอกสีและทำให้น้ำตาลดิบบริสุทธิ์ขึ้น

2.2 ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันและไขมันสำหรับบริโภค นอกจากจะใช้ในการฟอกสีแล้วยังใช้ในการเอาสบู่และเปอร็อกไซด์ออกจากร้ำมันและไขมันด้วย

2.3 ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่มน้ำแอลกอฮอล์ เช่น ไวน์ วิสกี้ มักใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อกำจัดกลิ่นที่ไม่ต้องการ เช่น เอสเทอร์ ทำให้เครื่องดื่มที่ได้มีรสชาติขึ้น

2.4 ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีและยา เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนในยาและเคมีภัณฑ์อื่นๆ เช่น สเตรปโตมัยซิน (streptomycin) คาเฟอีน โซเดียมอะซิเตท รวมทั้งกรดต่างๆ

2.5 ใช้ทำน้ำดื่มให้บริสุทธิ์ เป็นการกำจัดรส สี และกลิ่น นอกจากนี้ยังใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ใช้แยกโลหะจากสารละลายที่ต้องการ เช่น การแยกทองหลังการสกัดจากแร่ด้วยวิธีไซยาไนด์ เป็นต้น

2.6 ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือเป็นสารเร่งปฏิกิริยา (catalyst carrier) เช่น เป็นตัวพาสารเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน (hydrogenation) เป็นตัวรองรับสารเร่งปฏิกิริยา (catalyst support) สำหรับซิงค์อะเซเตทในโรงงานผลิตไวนิลอะซิเตท

2.7 ใช้ในทางการแพทย์ เช่น ให้ยาถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ ยาจะค่อยๆ ออกฤทธิ์โดยมีความเข้มข้นสม่ำเสมอ เช่น ไฮดรอกซีอะมิโนฟีนีลาโซนิกแอซี สำหรับรักษาโรคที่เกิดการติดเชื้ออะมิบาและพาราไซต์ และยังใช้ดูดสารพิษจากผู้ที่ได้รับยาเกินขนาด หรือกินยาพิษ นอกจากนี้ยังใช้รักษาอาการมีแก๊สมากในกระเพาะ

ข้อมูลเกี่ยวกับกะลาปาล์ม

กะลาปาล์มนั้นมีมากในประเทศไทย ซึ่งคุณสมบัติของกะลาปาล์มที่เหมาะสมจะนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ มีลักษณะทางกายภาพที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 4 และตารางที่ 5

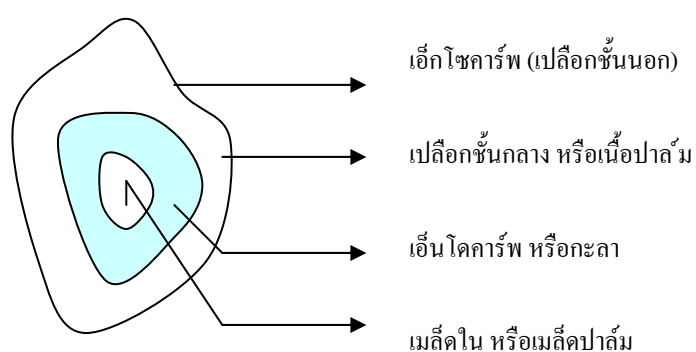
ตารางที่ 4 ลักษณะทางกายภาพของกะลาปาล์มน้ำมัน

Sample	% Volatial	% Fixed Carbon	% Ash	surface area (m ² /g)
Palm Oil Shell	80.12	17.68	2.2	0.451

ตารางที่ 5 องค์ประกอบของกะลาปาล์ม

Sample	C(wt%)	H(wt%)	N(wt%)	O(wt%)
Palm shell	50.10	6.85	1.9	41.15

ที่มา: Wan Daud *et al.* (2000)



ภาพที่ 9 แสดงส่วนต่างๆ ของปาล์ม

ที่มา: กรมกสิกรรม (2539)

ได้มีการวิจัยการใช้วัตถุดิบส่วนที่เป็นกะลาปาล์มมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ จากคุณสมบัติทางธรรมชาติของกะลาปาล์มเองคือ มีความพรุนสูง มีพื้นที่ผิวมาก ขนาดรูพรุนที่เหมาะสม มีโครงสร้างที่แข็งแรง ความไม่บริสุทธิ์ต่ำ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีมากในประเทศไทย จึงได้มีการเลือกกะลาปาล์มมาใช้ในการทำการวิจัยหลายแห่ง แต่การศึกษาอัตราการเกิดถ่านกัมมันต์ยังมีน้อย จึงมีความสนใจในการหาอัตราการเกิดถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ได้มีการศึกษาจลนศาสตร์ของกระบวนการไพโรไลซิสจากวัสดุเหลือทิ้งโดยใช้กะลาปาล์มน้ำมัน ซึ่งใช้การเตรียมถ่านชาร์โดยวิธีทางกายภาพ คือการไพโรไลซิสหรือการคาร์บอนเซชัน (pyrolysis or carbonization) โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ TGA (thermogravimetric analysis) ในกระบวนการคาร์บอนเซชัน วัสดุจะถูกทำให้เป็นถ่านคาร์บอนภายใต้ความดันบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 373 เคลวิน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปไว้ในเคซิเคเตอร์เพื่อกำจัดความชื้นออก จากนั้นทำการคัดขนาด 1-2 มิลลิเมตร เพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพสำหรับถ่านชาร์ โดยศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในการไพโรไลซิส ผลกระทบของอัตราการให้ความร้อนต่อการผลิตถ่านชาร์ และค่าพารามิเตอร์จลนศาสตร์ของกระบวนการไพโรไลซิส โดยมีอัตราการให้ความร้อน 5-30 เคลวินต่อนาที ภายใต้ความดันบรรยากาศของแก๊สเฉื่อย หรือแก๊สไนโตรเจนที่บริสุทธิ์ 99.9995% ที่อัตราการไหลคงที่ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบด โดยมีอันดับของปฏิกิริยาเท่ากับ 1 และเมื่อทำการเพิ่มอัตราการให้ความร้อน พบว่าค่าพลังงานการกระตุ้นโดยรวมมีค่าคงที่ แต่ค่า Frequency factor มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทราบพารามิเตอร์แทนลงในสมการ

$$\frac{d\alpha}{dt} = Ae^{-E/RT} (1-\alpha)^n \quad (17)$$

จะได้อัตราการสลายตัวของกะลาปาล์มในรูปจลนศาสตร์ ดังสมการ

$$-r_B = 9.74 \cdot 103e^{-6591.29/T} (1-\alpha_B) \quad (18)$$

โดยที่ α_B คือ น้ำหนักของถ่าน (กรัม)

t คือ เวลา (นาทีย)

n คือ อันดับของปฏิกิริยา

A คือ ค่า frequency หรือ pre-exponential factor ของกระบวนการกระตุ้น (นาที่⁻¹)

E คือ ค่าพลังงานที่ใช้สำหรับกระบวนการกระตุ้น (จูลต่อโมล)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 จูลต่อโมล.เคลวิน)

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ได้นี้นำไปออกแบบเครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระตุ้นถ่านชาร์ได้ (ภท-รา, 2540)

ได้ศึกษาการทำนายกระบวนการกระตุ้นของถ่านชาร์จากสมการคณิตศาสตร์แบบใหม่ โดยใช้สมการ differential conservation ในการอธิบายปฏิกิริยาระหว่างแก๊สกับของแข็ง เช่น กระบวนการกระตุ้นถ่านชาร์ สามารถเขียนสมการการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้



ซึ่งการใช้ QM (quantize method) เป็นระบบที่ประยุกต์กับ differential mass conservation ในกระบวนการกระตุ้นของถ่านชาร์เมื่อพิจารณาทอมการแพร่ในรูพรุนถ่านชาร์และจลนศาสตร์ แล้วนำการทำนายแบบ QM มาเปรียบเทียบกับการทำนายแบบ RPM(random pore model) และ SPM(simple particle model) ซึ่ง RPM และ SPM เลือกพิจารณาทอมการแพร่ในรูพรุนถ่านชาร์และจลนศาสตร์เพียงทอมเดียว สมการของ QM , RPM และ SPM ที่ใช้ในการแก้ปัญหาแสดงในสมการที่ 20, 21 และ 22 ตามลำดับ

$$\ln\left(1 + \frac{x}{\varepsilon_0(1-x)}\right) = (1 - \varepsilon_0)C\tau \quad (20)$$

$$\ln\left(1 + \frac{x}{\varepsilon_0(1-x)}\right) = (1 - \varepsilon_0)\tau \quad (21)$$

$$X = 1 - \exp\left[-\tau\left(1 + \frac{\psi\tau}{4}\right)\right] \quad (22)$$

$$\psi = 1 / \ln \left(\frac{1}{1 - \varepsilon_0} \right) \quad (23)$$

โดยที่ X คือ ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด

x คือ ปริมาณคาร์บอน

ε_0 คือ ความพรุนเริ่มต้น

C คือ ความเข้มข้นของแก๊ส

τ คือ เวลา (เทอมไร้หน่วย)

จากการแก้สมการทั้ง 3 พบว่าในการทำนายการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนโดย QM ตรงกับข้อมูลการทดลองกว่าการใช้การทำนายโดยใช้ RPM และ SPM (Hassan *et al.*, 1999)

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านชาร์ในกระบวนการไพโรไลซิส โดยใช้กะลาปาล์มเป็นวัตถุดิบ ได้แบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นการหาสภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิส โดยใช้อุณหภูมิในการทดลอง 400 ถึง 900 องศาเซลเซียส เวลา 0.5 ถึง 3 ชั่วโมง อัตราการไหลไนโตรเจน 50 ถึง 300 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที อัตราความร้อน 5 ถึง 30 องศาเซลเซียสต่อนาที ส่วนที่สองนำทุกผลการทดลองในกระบวนการไพโรไลซิสมาทำการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ ที่สภาวะเดียวกัน คือ อุณหภูมิในการกระตุ้น 900 องศาเซลเซียส เวลาในการกระตุ้น 30 นาที อัตราการไหลของไนโตรเจน 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที นำผลที่ได้มาวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านชาร์ในกระบวนการไพโรไลซิส โดยพิจารณาจากค่าร้อยละผลได้จากถ่านกัมมันต์กับค่าพื้นที่ผิวที่สูงที่สุด พบว่าเมื่ออุณหภูมิและเวลาในช่วงแรกของการคาร์บอนไนเซชันเพิ่มขึ้นค่าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ณ เวลาการคาร์บอนไนเซชัน 2 ชั่วโมง ค่าพื้นที่ผิวมีค่าเท่ากับ 519 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่ออุณหภูมิมากกว่า 600 องศาเซลเซียส และเวลามากกว่า 2 ชั่วโมง ค่าพื้นที่ผิวจึงลดลงที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอุณหภูมิขนาดกลางเกิดการรวมตัวกันเป็นรูพรุนขนาดใหญ่

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน คือ ที่อุณหภูมิการคาร์บอนไนเซชัน 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการไหลของไนโตรเจน 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที มีค่าพื้นที่ผิว 519 ตารางเมตร

ต่อกรัม ซึ่งจากการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการที่สำคัญในการพัฒนาโครงสร้างของรูพรุนเบื้องต้นของถ่านชาร์ซึ่งเป็นผลในการพัฒนารูพรุนต่อไปในกระบวนการกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์ (Aik *et al.*, 2005)

ในการศึกษาจลนศาสตร์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์ม โดยใช้วิธีทางกายภาพ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นแรกเป็นกระบวนการคาร์บอนไนเซชันโดยใช้แก๊สไนโตรเจน ใช้อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ณ เวลา 3 ชั่วโมง ขั้นตอนที่ 2 เป็นกระบวนการกระตุ้นโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิที่ศึกษาในช่วง 500-900 องศาเซลเซียส สำหรับเวลาช่วง 10-60 นาที โดยใช้คุณสมบัติค่าพื้นที่ผิวในการศึกษา จากการศึกษาพบว่าที่เวลามากขึ้นและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าพื้นที่ผิวมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ที่อุณหภูมิ มากกว่า 700 องศาเซลเซียส ช่วงเวลาการกระตุ้นมากกว่า 45 นาที พบว่าค่าพื้นที่ผิวมีค่าลดลง เนื่องจากรูพรุนขนาดเกิดการรวมตัวกันเป็นรูพรุนใหญ่จึงเป็นผลให้ค่าพื้นที่ผิวลดลง สภาวะที่เหมาะสมคือที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที (Jia *et al.*, 2001)

จากการศึกษาจลนศาสตร์ของถ่านกัมมันต์เป็นการศึกษาปฏิกิริยาของแข็งกับแก๊สโดยใช้เครื่อง TGA แสดงในสมการที่ 24

$$\frac{dX_c}{dt} = K(1 - X_c)[1 - \psi \ln(1 - X_c)]^{1/2} \quad (24)$$

$$\psi = \frac{2(1 - \varepsilon_0)}{\bar{r}_o S_o} \quad (25)$$

$$\text{สภาวะเริ่มต้น ณ} \quad X_c = 0 \quad \text{at} \quad t = 0$$

โดยที่ X_c คือ ปริมาณของแข็ง

K คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยา

ε_0 คือ ความพรุน

$\bar{r}_o$ คือ รัศมีของรูพรุนเฉลี่ย

S_o คือ พื้นที่ผิว

โดยใช้ Runge-Kutta algorithm ในการแก้สมการที่ 24 ในการทำนายโมเดลให้อันดับของปฏิกิริยาเป็น 1 โดยใช้สมการของอาร์เรเนียสช่วยซึ่งสามารถแสดงดังสมการที่ 26

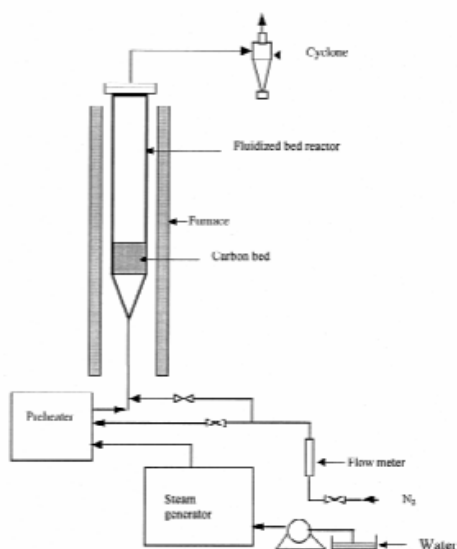
$$\frac{d(1-X_c)}{dt} = KX_c^n = Ae^{-E/RT} X_c^n \quad (26)$$

ค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นเท่ากับ 38.7 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งอันดับของปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 0.66-0.71

จากการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือก pistachio-nut โดยใช้การกระตุ้นทางกายภาพ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบที่ 1 เป็นการกระตุ้นช่วงแรกจะใช้แก๊สไนโตรเจน และเมื่อถึงอุณหภูมิที่ต้องการกระตุ้นจึงเปลี่ยนมาใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนแบบที่ 2 เป็นการใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับแก๊สไนโตรเจนตั้งแต่เริ่มให้ความร้อน โดยอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จากการศึกษาอุณหภูมิและเวลา โดยพิจารณาจากค่าพื้นที่ผิวเป็นหลัก ซึ่งจากการกระตุ้นทั้ง 2 แบบ พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วงแรกค่าพื้นที่ผิวมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดค่าหนึ่งแล้วเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นอีกและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอีกค่าพื้นที่ผิวจึงลดลง เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นอีกและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นแก๊สไนโตรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปไล่ความชื้นและสารระเหยที่อยู่ในวัตถุดิบออกมามากขึ้นในช่วงแรก เป็นผลให้ค่าความชื้นและค่าสารระเหยในถ่านกัมมันต์ลดลง เป็นผลให้เกิดรูพรุนในถ่าน กัมมันต์มากขึ้น ทำให้เกิดพื้นที่ผิวมากขึ้น แต่ที่พื้นที่ผิวลดลงในช่วงปลายที่เวลาและอุณหภูมิมากขึ้นเนื่องจากสารระเหยได้ระเหยไปอุดตันในรูพรุนทำให้สารระเหยไม่สามารถระเหยออกไปได้ เป็นผลให้รูพรุนน้อยลงค่าพื้นที่ผิวจึงลดลงด้วย และจากการทดลองพบว่าค่าพื้นที่ผิวของแบบที่ 2 มีค่ามากกว่าแบบที่ 1 ซึ่งแบบที่ 1 ใช้อุณหภูมิต่ำกว่าและเวลาในการกระตุ้นน้อยกว่าแบบที่ 2 ก่อนที่ค่าพื้นที่ผิวจะลดลง เนื่องจากแบบที่ 1 ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตั้งแต่ขั้นตอนแรกจึงสามารถแทรกผ่านเข้าไปในรูพรุนได้มากกว่าแบบที่ 2 (Ting *et al.*, 2003) โดยภาพที่ 11 แสดงโครงสร้างของรูพรุน

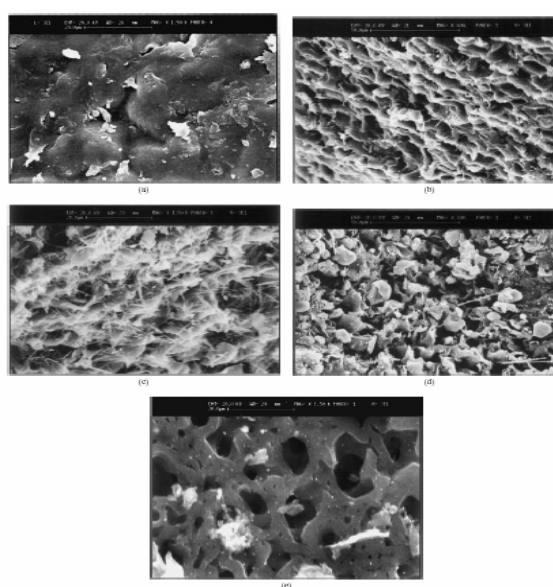
ได้ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม โดยการเตรียมถ่านกัมมันต์ได้ดำเนินการเป็น 2 ขั้นตอน คือ กระบวนการคาร์บอนเซชัน ตัวแปรที่ศึกษา คือ อุณหภูมิในการคาร์บอนเซชัน 200, 250, 300, 350, และ 400 องศาเซลเซียส และเวลาในการคาร์บอนเซชัน 30, 45, 60 นาที แล้วทำการวิเคราะห์สมบัติของถ่านชาร์ที่ได้ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนเซชัน อุณหภูมิ 300

องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ในการพิจารณาสถานะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนเซชัน พิจารณาจากสมบัติของถ่านชาร์ โดยพิจารณาจากถ่านชาร์ที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง และมีปริมาณร้อยละสารระเหยอยู่ในช่วง 20-25 ซึ่งเป็นสถานะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านชาร์ในกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน



ภาพที่ 10 แสดงเครื่องมือในการผลิตถ่านกัมมันต์

ที่มา: Wan Daud *et al.* (2000)



ภาพที่ 11 แสดงภาพขยายโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือก pistachio-nut

ที่มา: Ting *et al.* (2003)

นำถ่านชาร์ที่ได้จากกระบวนการบอไนเซชันมาทำการกระตุ้นต่อในกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในฟลูอิดไคซ์เบด ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา เวลาที่ใช้ในการกระตุ้น 3, 6, และ 9 นาที อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น 650, 750, และ 850 องศาเซลเซียส ความเร็วแก๊สตัวกลาง 1, 1.5, และ 2.0 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคซ์เบด ขนาดอนุภาคถ่านชาร์ 0.85-1.18, 1.18-2.36, และ 2.36-4.75 มิลลิเมตร ซึ่งผลของตัวแปรที่นิยมใช้ในการศึกษามีดังนี้ เวลา อุณหภูมิ และขนาดของถ่านที่ใช้ในการกระตุ้น โดยพิจารณาจากค่าการดูดซับไอโอดีน จากการศึกษาพบว่าเมื่ออุณหภูมิมากขึ้นค่าการดูดซับไอโอดีนมีค่ามากขึ้น และเวลานานขึ้นค่าการดูดซับไอโอดีนมีค่ามากขึ้นแต่เมื่อมากกว่า 6 นาที พบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนมีค่าน้อยลงที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นทำให้รูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลางเกิดการขยายตัวและรวมตัวกันเป็นรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อพิจารณาขนาดของของกะลาปาล์ม พบว่ากะลาปาล์มขนาดเล็กมีค่าไอโอดีนต่ำเนื่องจากมีขนาดเล็กจะถูกบรรจุแน่นในปฏิกรณ์ เป็นผลให้อากาศและไอน้ำผ่านเข้าไปภายในรูพรุนยาก การระเหยไม่ดีสารระเหยจึงไม่สามารถระเหยออกมาได้ ฉะนั้นถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีความหนาแน่นสูง ค่าการดูดซับต่ำ และพื้นที่ผิวน้อย สำหรับกะลาปาล์มที่ใหญ่ทำให้สารประกอบระเหยออกไปได้ง่ายจึงเกิดการแตกของรูพรุนในเนื้อถ่านกัมมันต์ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าขนาดที่เหมาะสมคือ 1.18-2.36 มิลลิเมตร ได้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงและค่าพื้นที่ผิวมาก (สุระชัย, 2542) แต่ถ้าเปลี่ยนวัสดุเป็นไม้โกงกางพบว่าขนาดที่เหมาะสมคือ 0.6-1.18 มิลลิเมตร ซึ่งให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงเช่นเดียวกัน ซึ่งมีนักวิชาการหลายกลุ่มได้ศึกษาถึงการแสดงความสัมพันธ์ของถ่านกัมมันต์กับค่าต่าง โดยใช้ค่าการดูดซับไอโอดีน ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูและค่าพื้นที่ผิว ในการพิจารณาดังนี้ (ธีระชัย, 2541)

$$I = 0.696T + 6.153t - 313.318 \quad (27)$$

$$I = 0.9898S + 126.34 \quad (28)$$

$$M = 0.0605S + 144.58 \quad (29)$$

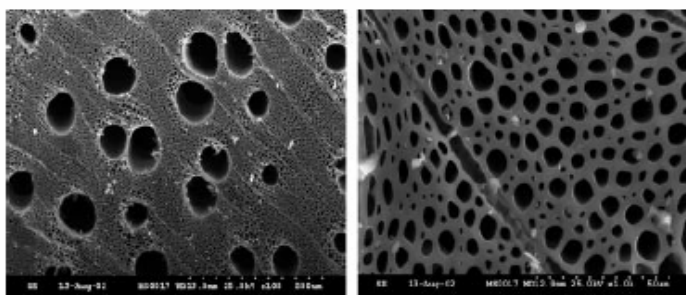
$$S = 0.687I + 131.8 \quad (30)$$

$$S = -0.0958M^2 - 3517.7 \quad (31)$$

โดย I คือ ค่าการดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 T คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
 t คือ เวลา (นาที)
 M คือ ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 S คือ ค่าพื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)

ในประเทศไทยได้มีนักวิชาการหลายกลุ่มศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม แต่สถานะที่เหมาะสมในการผลิตก็แตกต่างกัน ซึ่งแล้วแต่สถานะที่กำหนดว่าใช้ช่วงในการศึกษาเท่าใด แต่ผลที่ได้เป็นไปในทางเดียวกัน และการศึกษาจนศาสตร์เป็นเพียงการแสดงความสัมพันธ์เท่านั้น ไม่ได้เป็นการแสดงอัตราการเกิดของปฏิกิริยา ซึ่งการผลิตถ่านกัมมันต์มีพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในทางการค้าหลายอย่าง พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ก็เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญค่าหนึ่ง จึงมีผู้สนใจทดลองหาสถานะที่เหมาะสมในการทำให้อ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงและมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการดูดซับสารที่มีโมเลกุลเล็กได้ และการศึกษาจนศาสตร์ซึ่งช่วยในการออกแบบปฏิกิริยาให้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูงได้

ในการผลิตถ่านกัมมันต์ส่วนที่สำคัญคือค่าพื้นที่ผิว ค่าการดูดซับไอโอดีน และรูพรุนที่เกิดเนื่องจากการมีพื้นที่ผิวสูงจะสามารถดูดซับสารต่างๆ ได้มาก และรูพรุนก็เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญเนื่องจากเป็นตัวกำหนดสารที่สามารถถูกดูดซับได้ รูพรุนที่มีขนาดใหญ่และขนาดกลางจะสามารถดูดซับสารบางชนิดได้แต่ไม่สามารถดูดซับแก๊สได้ และรูพรุนขนาดเล็กสามารถดูดซับสารบางชนิดที่เล็กได้และยังสามารถดูดซับแก๊สได้อีกด้วย ดังภาพที่ 12 แสดงโครงสร้างขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ bamboo



ภาพที่ 12 แสดงภาพขยายโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ bamboo

ที่มา: Manocha *et al.* (2002)

จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา

ในการวิเคราะห์หาอัตราการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคาร์บอนในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม โดยใช้กระบวนการคาร์บอนในเซชันและกระบวนการกระตุ้นถ่านชาร์ สามารถเขียนสมการการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้



สมมติให้ถ่านชาร์มีอนุภาคเป็นทรงกลม ซึ่งเขียนสมการอัตราการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคาร์บอนโดยพิจารณาจากพื้นที่ผิวได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{dS}{dt} = kS^n \quad (33)$$

เมื่อ $n \neq 1$

$$\ln \frac{dS}{dt} = \ln k + n \ln S \quad , \quad n \neq 1 \quad (34)$$

พลอตกราฟระหว่าง $\ln \frac{dS}{dt}$ กับ $\ln S$ ที่อุณหภูมิต่างๆ จะสามารถหาค่า n จากค่าความชันได้แล้วนำค่า $\ln k$ จากจุดตัดแกนแทนในสมการที่ 36 ซึ่งเป็นแบบจำลองโมเดลที่ใช้ในการอธิบายจลนศาสตร์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ เป็นไปตามกฎของอาร์เรเนียส (Arrhenius) สามารถหาค่า E และ A ได้

ถ้าสมมติให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นอันดับหนึ่งได้ดังนี้

$$\ln \frac{S}{S_0} = kt \quad , \quad n = 1 \quad (35)$$

เขียนกราฟระหว่าง $\ln \frac{S}{S_0}$ กับ t ที่อุณหภูมิต่างๆ จะสามารถหาค่าคงที่ของ k จากค่าความชันได้แล้วนำค่า k แทนในสมการที่ 36 ซึ่งเป็นแบบจำลองโมเดลที่ใช้ในการอธิบายจลนศาสตร์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ เป็นไปตามกฎของอาร์เรเนียส (Arrhenius) สามารถหาค่า E และ A ได้

$$k = Ae^{-E/RT} \quad (36)$$

$$\ln k = \ln A - \frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} \right) \quad (37)$$

แทนสมการ 36 ในสมการ 33 ได้สมการจลนศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคาร์บอนดังต่อไปนี้

$$\frac{dS}{dt} = kS^n = Ae^{-E/RT} S^n \quad (38)$$

- เมื่อ
- S คือ พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)
 - t คือ เวลา (นาทีก)
 - k คือ ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (นาทีก⁻¹)
 - n คือ อันดับของปฏิกิริยา
 - A คือ ค่า frequency หรือ pre-exponential factor ของกระบวนการกระตุ้น (นาทีก⁻¹)
 - E คือ ค่าพลังงานที่ใช้สำหรับกระบวนการกระตุ้น (จูลต่อโมล)
 - R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 จูลต่อโมล.เคลวิน)
 - T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆมาแทนในสมการที่ 38 จะได้สมการจลนศาสตร์ของ อัตราการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคาร์บอนในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มซึ่งพิจารณาจากพื้นที่ผิว นำสมการจลนพลศาสตร์ที่ได้มาออกแบบขนาดและสภาวะที่เหมาะสมในการเดินเครื่องปฏิกรณ์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 1.1 เครื่องบดหยาบ(Hammer Mill) ของ MATTER
- 1.2 เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน(Sieve Shaker) ของ Setsch
- 1.3 ตะแกรงร่อนแยกขนาด(Sieve)No.8 และ No.14 ของ Cole Parmer บริษัท เคโมไซ เอนซ์ (ประเทศไทย) จำกัด
- 1.4 เครื่องชั่งละเอียด 0.0001 กรัม รุ่น MATTler AT 400 ของ MATTler
- 1.5 เตาเผาไฟฟ้า(Muffle furnace) ของ Carbolite 0-1,200°F
- 1.6 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว รุ่น AUTOSORB-1 ของ Quantachrome Instrument
- 1.7 ครุฑibel 101/35 ขนาด 24 ml พร้อมฝา บริษัท แล็บซิสเต็มส์ จำกัด
- 1.8 กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
- 1.9 ชุดเครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
- 1.10 เครื่องผลิตไอน้ำอิมมัวยังยวด (Boiler) ของ Fulton บริษัท Fulton Boiler Works (G.B.) Ltd.,
- 1.11 ชุดเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการผลิตถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ชนิดเบดนิ่ง

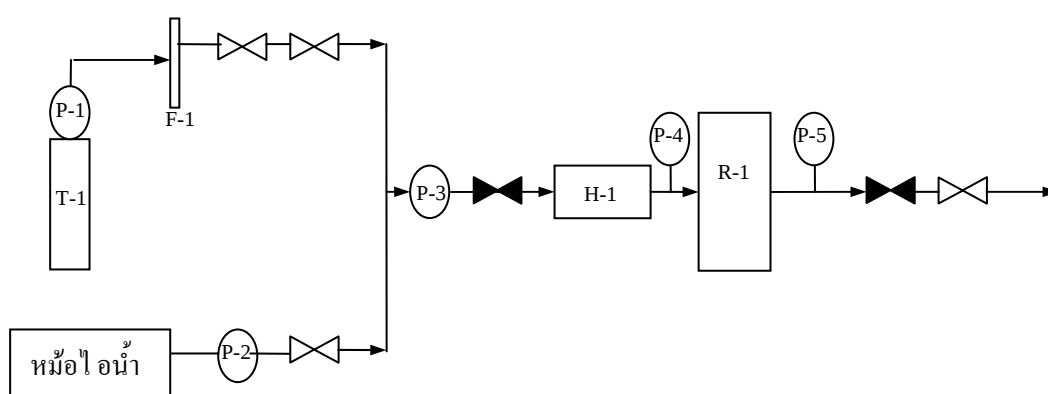
ส่วนของเครื่องมีส่วนของท่อนำแก๊สไนโตรเจน ซึ่งจะผ่านเครื่องควบคุมความดันมาตรวัดความดันและเครื่องวัดค่าอัตราการไหล อีกส่วนคือท่อนำไอน้ำร้อนยิ่งยวดจะผ่านเครื่องควบคุมความดันมาตรวัดความดัน ผ่านต่อไปยังสเคคเตอร์สำหรับควบคุมไอน้ำร้อนยิ่งยวด แก๊สไนโตรเจนและไอน้ำร้อนยิ่งยวดจะผ่านมาตรวัดความดัน ก่อนผ่านเข้าไปในส่วนเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนของเครื่องปฏิกรณ์แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนหนึ่งเป็นส่วนเครื่องทำความร้อน (Heater) ประกอบด้วยท่อปฏิกรณ์เพื่อให้ความร้อนกับแก๊สไนโตรเจนหรือไอน้ำร้อนยิ่งยวด โดยให้ความร้อนผ่านขดลวดนำความร้อน ซึ่งอยู่ภายในอิฐทนไฟ ท่อปฏิกรณ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 นิ้ว ยาว 22 นิ้ว ผ่านมาตรวัดความดัน ส่วนที่สองเป็นส่วนท่อปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการคาร์บอนเซชันและกระบวนการกระตุ้น เป็นส่วนที่ใส่กะลาปาล์ม โดยมีขดลวดนำความร้อนบรรจุอยู่

ในอิฐทนไฟ ท่อปฏิกิริยามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว ยาว 22 นิ้ว แก๊สจะผ่านเครื่องดักจับไอน้ำเพื่อปล่อยน้ำที่ควบคุมภายในระบบออกมา

2. สารที่ใช้ในการทดลอง

- 2.1 แก๊สไนโตรเจน (N_2) IND. บริษัท ไทยอินดัสเทรียลแก๊ส จำกัด (มหาชน)
- 2.2 สารละลายไอโอดีน (I_2) ของ Fisher Scientific บริษัท เอส. อาร์. แลป. จำกัด
- 2.3 สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) ของ Ajax Finechem บริษัท เอส. อาร์. แลป. จำกัด
- 2.4 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ของ J.T.Baker บริษัท เอส.อาร์.แลป. จำกัด
- 2.5 สารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (KIO_3) ของ AnalaR บริษัท เอส.อาร์. แลป. จำกัด
- 2.6 น้ำแป้งใช้แป้งมันจากพืช (Starch powder)
- 2.7 กะลาปาล์ม บริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน)
- 2.8 ไอน้ำ (steam)

3. เครื่องมือการทดลอง



T-1 N_2 tank

P-2 Steam regulator

R-1 Fixed bed reactor

P-1 N_2 regulator

P-3 Pressure regulator

P-4 Pressure gauge

F-1 Flow meter

H-1 Heater

P-5 Pressure gauge

ภาพที่ 13 แผนผังแสดงระบบปฏิกิริยา

วิธีการ

1. วิธีการทดลอง

กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

1.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ในการศึกษาทดลองจะใช้กะลาปาล์มเป็นวัตถุดิบสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์ ซึ่ง
ต้องเตรียมวัตถุดิบให้มีขนาดที่เหมาะสม

1.1.3 นำวัตถุดิบที่ได้อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

1.1.1 บดกะลาปาล์มด้วยเครื่องบดหยาบ

1.1.2 นำไปผ่านตะแกรงร่อนขนาด 1.4-2.36 มิลลิเมตร

1.2 กระบวนการคาร์บอนในเซชัน

1.2.1 ชั่งกะลาปาล์ม 180 กรัม ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์

1.2.2 ตั้งค่าความดันไนโตรเจนที่ 1.5 บาร์

1.2.3 ป้อนแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ที่ความดัน
ในเครื่องปฏิกรณ์ 1.5 บาร์ เพื่อไล่แก๊สออกซิเจนในระบบ

1.2.4 ตั้งค่าอุณหภูมิที่ 250, 350, 450 และ 550 องศาเซลเซียส แล้วเริ่มจับเวลา 30 และ
60 นาที

1.2.5 เมื่อถึงเวลาที่กำหนดปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ ทั้งเครื่องปฏิกรณ์ไว้จนถึง
อุณหภูมิห้อง แล้วปิดแก๊สไนโตรเจน

1.2.6 นำถ่านชาร์ที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหยและ
คาร์บอนคงตัว เพื่อหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนในเซชัน

1.2.7 ใช้ค่าอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่ได้ในกระบวนการคาร์บอนในเซชันทุกครั้ง
ก่อนการกระตุ้น

1.3 กระบวนการกระตุ้น

1.3.1 นำถ่านชาร์ที่ได้จากกระบวนการคาร์บอนในเซชัน ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์

1.3.2 ตั้งค่าความดันไนโตรเจนในเครื่องปฏิกรณ์ 1.5 บาร์

1.3.3 ป้อนแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที

1.3.4 ตั้งค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น ทำการทดลองโดยทำการแปรอุณหภูมิที่ 600, 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส

1.3.5 เมื่อถึงอุณหภูมิที่ต้องการ ปล่อยไอน้ำที่ควบแน่นอยู่ในท่อทิ้งไปเพื่อป้องกันสิ่งสกปรก แล้วจึงปล่อยไอน้ำจากหม้อไอน้ำเข้าสู่ระบบที่ความดัน 2 บาร์ อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส (ณ จุด P-4) ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (H-1) เพื่อให้เป็นไอน้ำยิ่งยวดแล้วป้อนเข้าปฏิกรณ์ (R-1) มีอัตราการไหลเป็น 0.88 ลิตร/นาที่ ณ จุดออกจากปฏิกรณ์ แล้วเริ่มจับเวลาที่ต้องการในการกระตุ้นคือ 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที

1.3.6 เมื่อถึงเวลาที่กำหนด ปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิและระบบไอน้ำ แล้วทิ้งเครื่องปฏิกรณ์ไว้จนเย็นที่อุณหภูมิห้อง

1.3.7 ปิดแก๊สไนโตรเจน

1.3.8 นำถ่านกัมมันต์ที่ได้มาวิเคราะห์

1.4 หาอัตราการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคาร์บอนในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มโดยพิจารณาจากค่าพื้นที่ผิว

2. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

วิธีการวิเคราะห์ถ่านกัมมันต์ใช้วิธีตามมาตรฐาน ASTM (American Standard Testing Method) รายละเอียดในภาคผนวก ข ประกอบด้วย (Jennifer, 1995)

2.1 ค่าความชื้น (D 2867-95) การหาปริมาณความชื้นที่เหลืออยู่ในถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์

2.2 ปริมาณเถ้า (D 2866-94) เป็นปริมาณสารอินทรีย์ที่ทนความร้อนได้สูงและปนเปื้อนอยู่ในถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์

2.3 ปริมาณสารระเหย (D 5832-95) การหาปริมาณสารระเหยที่เหลืออยู่ในถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์

2.3 ค่าความหนาแน่นปรากฏ (D 2854-96) เป็นการหาน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ต่อหน่วยปริมาตร

2.4 ค่าไอโอดีน (D 4607-94) เป็นการหาความสามารถในการดูดซับโมเลกุลที่เป็นพิษออกจากน้ำของถ่านกัมมันต์ โดยใช้ไอโอดีน

2.5 พื้นที่ผิว หลักการคือให้ถ่านกัมมันต์ดูดซับแก๊สไนโตรเจนบนผิวฟิล์มบางๆ คำนวณพื้นที่ผิวโดยอาศัยความแตกต่างของความดัน เมื่อมีการดูดซับแก๊สไนโตรเจนบนผิวของถ่านกัมมันต์ หน่วยคือ ตารางเมตรต่อกรัม

2.6 ผลได้ของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์คือ ผลผลิตที่ได้จากการทดลองในกระบวนการคาร์บอนในเซชันและกระบวนการกระตุ้น

2.7 คาร์บอนคงตัว การหาคาร์บอนคงตัวที่อยู่ในถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์

ผลและวิจารณ์

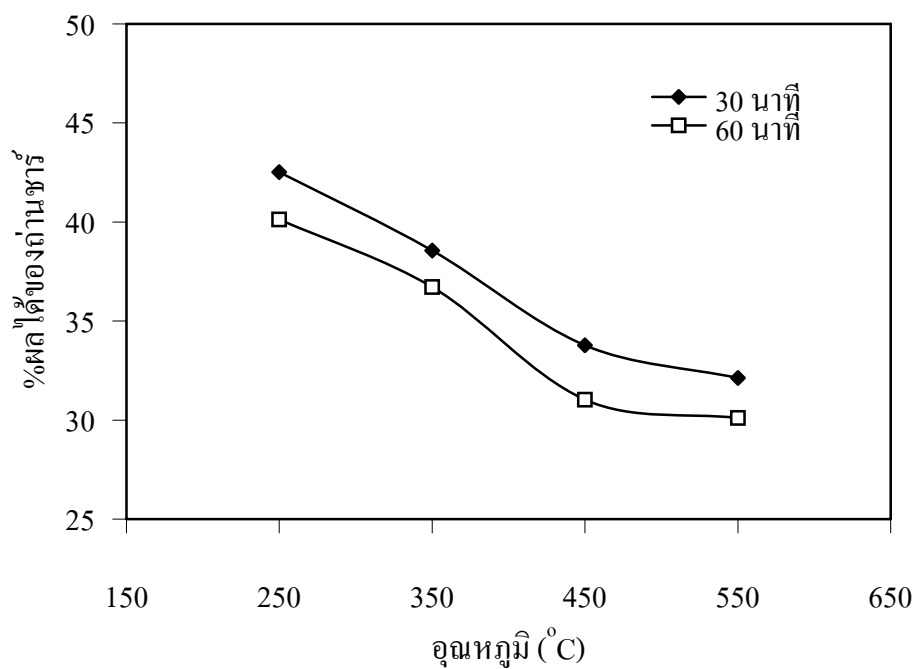
เมื่อนำกะลาปาล์มมาผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชันโดยใช้แก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 250-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 และ 60 นาที จะได้ถ่านชาร์ ซึ่งจะนำถ่านชาร์ที่ได้มาวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านชาร์ แล้วนำถ่านชาร์จากสภาวะที่เหมาะสมมาผ่านกระบวนการกระตุ้นต่อไปที่อุณหภูมิ 600-900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30-180 นาที โดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดจะได้ถ่านกัมมันต์ แล้วนำถ่านกัมมันต์มาทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์และหาอัตราการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคาร์บอนในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มโดยพิจารณาจากค่าพื้นที่ผิวซึ่งจากการวิเคราะห์สามารถแสดงผลได้ดังนี้

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการคาร์บอนในเซชันในการผลิตถ่านชาร์

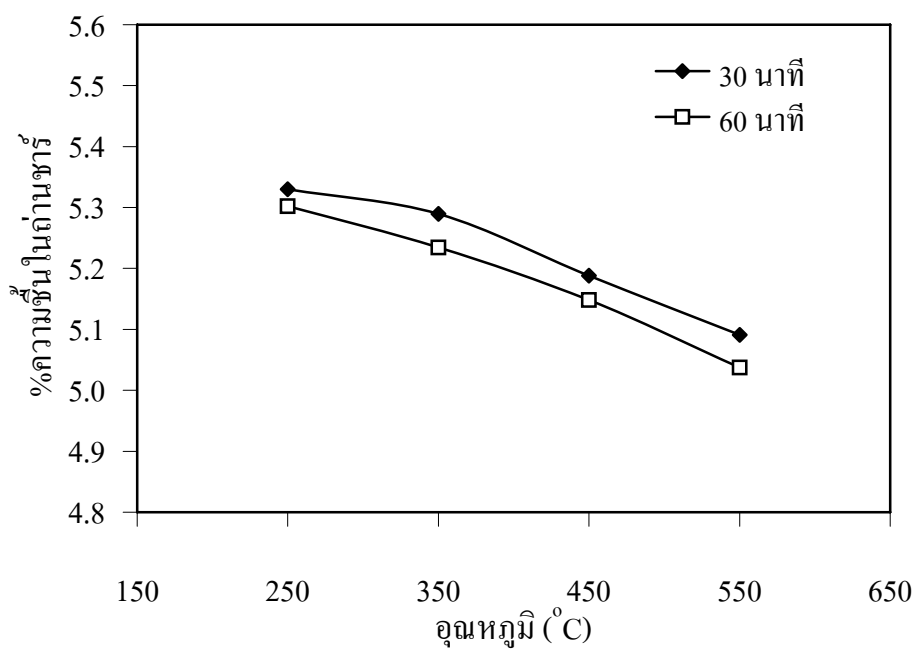
ตัวแปรที่ใช้ศึกษาในกระบวนการคาร์บอนในเซชัน คือ อุณหภูมิและเวลา ซึ่งมีผลต่อสมบัติของถ่านชาร์ที่ได้ คือ ร้อยละผลได้ ร้อยละความชื้น ร้อยละปริมาณเถ้า ร้อยละปริมาณสารระเหย และร้อยละคาร์บอนคงตัว สามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 6 และภาพที่ 14 ถึง 18

ตารางที่ 6 แสดงคุณสมบัติถ่านชาร์จากกระบวนการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

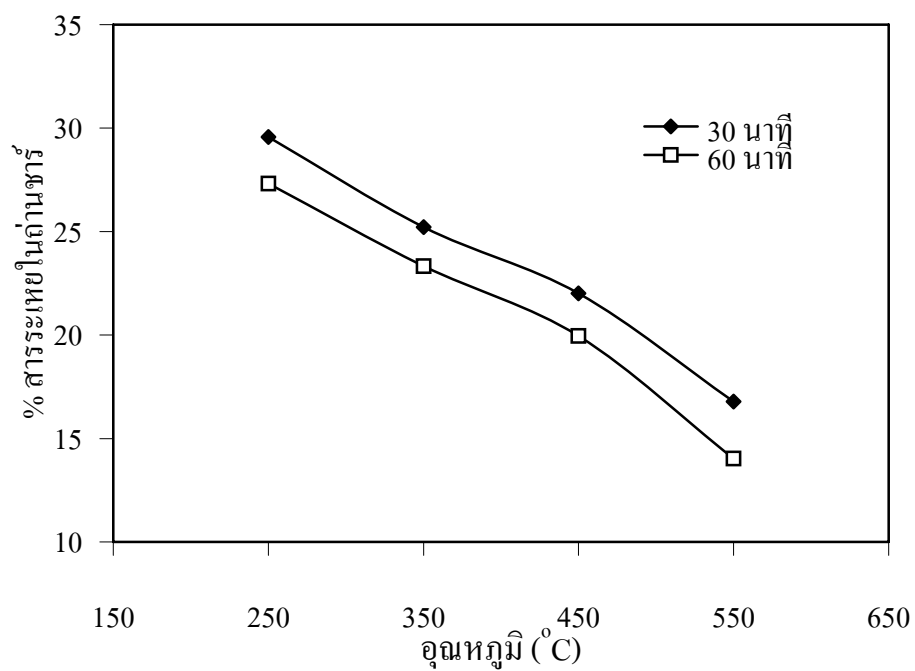
อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	ผลได้ของถ่าน ชาร์ (%)	ค่าความชื้น (%)	ปริมาณ เถ้า (%)	ปริมาณสาร ระเหย (%)	คาร์บอนคง ตัว (%)
250	30	42.51	5.33	3.42	29.58	67.00
	60	40.12	5.30	3.46	27.31	69.23
350	30	38.56	5.29	3.52	25.22	71.26
	60	36.71	5.23	3.61	23.32	73.07
450	30	33.78	5.19	3.67	22.01	74.32
	60	31.03	5.15	3.83	18.96	77.21
550	30	32.12	5.09	3.96	16.78	79.26
	60	30.11	5.04	4.17	14.03	81.80



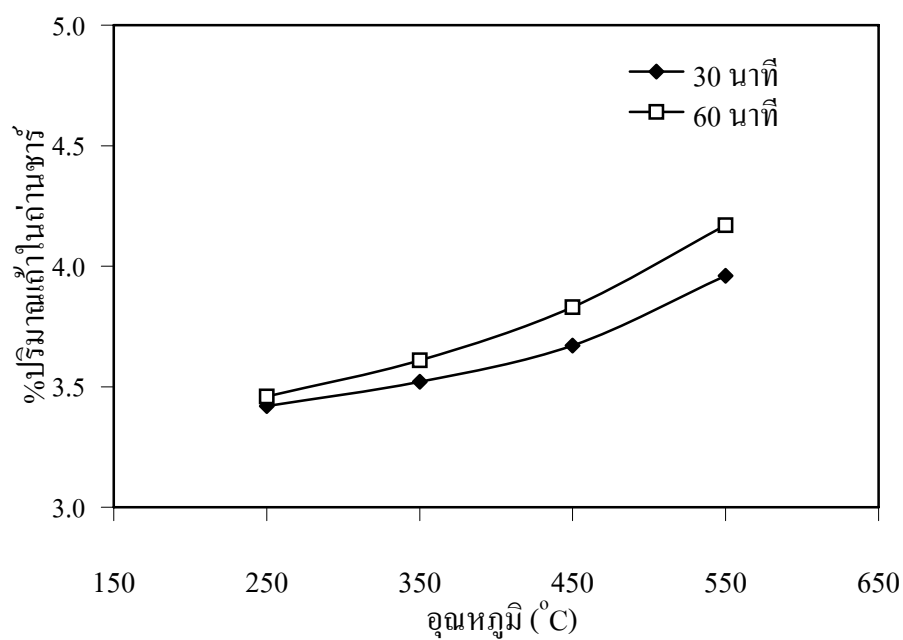
ภาพที่ 14 ผลได้ของถ่านชาร์ที่ได้ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ



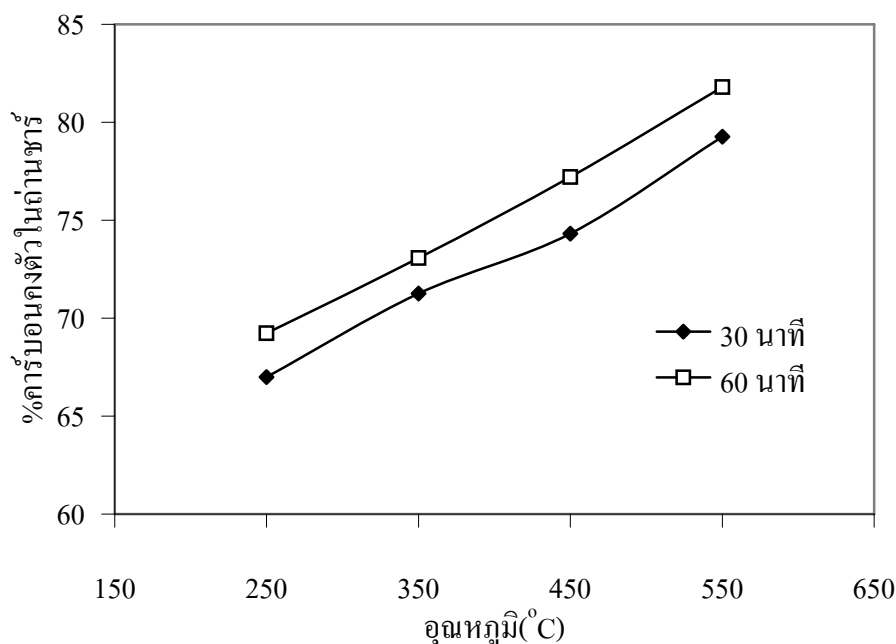
ภาพที่ 15 ค่าความชื้นในถ่านชาร์ที่ได้ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ



ภาพที่ 16 ปริมาณสารระเหยในถ่านชาร์ที่ได้ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ



ภาพที่ 17 ปริมาณเถ้าในถ่านชาร์ที่ได้ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ



ภาพที่ 18 คาร์บอนคงตัวในถ่านชาร์ที่ได้ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

1. ผลของอุณหภูมิจากกระบวนการคาร์บอนในเซชัน

จากตารางที่ 6 และภาพที่ 14 เมื่อพิจารณาอุณหภูมิในการคาร์บอนในเซชันที่เพิ่มขึ้นจาก 250 ถึง 550 องศาเซลเซียส พบว่าร้อยละผลได้ในถ่านชาร์ลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำความชื้นและปริมาณสารระเหยในกะลาปาล์มระเหยออกจากกะลาปาล์มได้น้อย เป็นผลให้ร้อยละผลได้ในถ่านชาร์สูง ส่วนที่อุณหภูมิสูงขึ้นความชื้นและปริมาณสารระเหยในกะลาปาล์มระเหยออกไปมากขึ้น ทำให้ร้อยละผลได้ในถ่านชาร์ลดลง ดังข้อมูลที่แสดงในภาพที่ 14 ถึง 18

ภาพที่ 15 แสดงร้อยละของความชื้นในถ่านชาร์กับอุณหภูมิในการคาร์บอนในเซชันต่างๆ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 250 ถึง 550 องศาเซลเซียส ร้อยละของความชื้นมีค่าลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำความชื้นระเหยออกจากกะลาปาล์มได้น้อย เป็นผลให้ร้อยละของความชื้นในถ่านชาร์มาก สำหรับที่อุณหภูมิสูงขึ้นความชื้นได้ระเหยออกจากกะลาปาล์มมากขึ้น ทำให้ร้อยละของความชื้นในถ่านชาร์ลดลง

ภาพที่ 16 แสดงร้อยละของสารระเหยในถ่านชาร์ที่ได้รับจากอุณหภูมิในการคาร์บอนในเซชันต่างๆ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 250 ถึง 550 องศาเซลเซียส ร้อยละของสารระเหยมีค่าลดลง

เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำปริมาณสารระเหยได้ระเหยออกจากกะลาปาล์มได้น้อย เป็นผลให้ร้อยละของสารระเหยในถ่านชาร์สูง ส่วนที่อุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณสารระเหยได้ระเหยออกจากกะลาปาล์มมากขึ้น ทำให้ร้อยละของความชื้นในถ่านชาร์ลดลง

ภาพที่ 17 แสดงร้อยละปริมาณเถ้าในถ่านชาร์ ณ อุณหภูมิในการคาร์บอนไนเซชันต่างๆ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 250 ถึง 550 องศาเซลเซียส พบว่าร้อยละปริมาณเถ้ามีค่าสูงขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำปริมาณสารระเหยในกะลาปาล์มระเหยออกไปได้น้อย แต่ยังคงเหลือสารระเหยในถ่านชาร์อีกมาก เมื่อนำมาวิเคราะห์โดยอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นออก แล้วนำมาเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อหาปริมาณเถ้าที่เหลือ สารที่ระเหยได้ที่เหลือจึงระเหยออกไปอีกมาก เป็นผลให้น้ำหนักของแข็งที่เหลือ(เถ้า)น้อยลง ฉะนั้นร้อยละของเถ้าถ่านชาร์จึงน้อยที่อุณหภูมิการคาร์บอนไนเซชันต่ำ ส่วนที่อุณหภูมิกระบวนการสูงขึ้น ปริมาณสารระเหยในกะลาปาล์มระเหยออกไปได้มาก และยังคงเหลือสารระเหยในถ่านชาร์น้อย เมื่อนำมาวิเคราะห์โดยอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นออก แล้วนำมาเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อหาปริมาณเถ้าที่เหลือ สารที่ระเหยได้ที่เหลือจึงระเหยออกไปอีกในปริมาณที่น้อย เป็นผลให้น้ำหนักของแข็งที่เหลือ(เถ้า)มีมาก ฉะนั้นร้อยละของเถ้าถ่านชาร์จึงมีค่ามากที่อุณหภูมิการคาร์บอนไนเซชันสูงขึ้น

ภาพที่ 18 แสดงร้อยละคาร์บอนคงตัวในถ่านชาร์กับอุณหภูมิในการคาร์บอนไนเซชันต่างๆ พบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 250 ถึง 550 องศาเซลเซียส ร้อยละคาร์บอนคงตัวมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำปริมาณสารระเหยในกะลาปาล์มระเหยออกไปได้น้อย ทำให้เหลือสารระเหยในถ่านชาร์มาก และปริมาณเถ้าในถ่านชาร์เล็กน้อย ดังนั้นปริมาณคาร์บอนในถ่านชาร์จึงมีน้อย เป็นผลให้ร้อยละคาร์บอนคงตัวของถ่านชาร์ต่ำ ส่วนที่อุณหภูมิกระบวนการสูงขึ้นปริมาณสารระเหยในกะลาปาล์มระเหยออกไปได้มาก ทำให้เหลือสารระเหยในถ่านชาร์น้อย และปริมาณเถ้าในถ่านชาร์อีกเล็กน้อย ดังนั้นปริมาณคาร์บอนในถ่านชาร์จึงมีมากกว่า เป็นผลให้ร้อยละคาร์บอนคงตัวของถ่านชาร์มากขึ้นด้วย

2. ผลของเวลาจากกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน

จากตารางที่ 6 และภาพที่ 14 เมื่อพิจารณาเวลาในการคาร์บอนไนเซชันที่มากขึ้นจาก 30 เป็น 60 นาที พบว่าร้อยละผลได้ในถ่านชาร์มีค่าลดลง เนื่องจากที่เวลา 30 นาที แก๊สไนโตรเจนมีเวลาน้อยในการเข้าไปไล่สารประกอบต่างๆ ในรูพรุนของกะลาปาล์ม เป็นผลให้ความชื้นและปริมาณ

สารระเหยในกะลาปาล์มระเหยออกไปได้น้อยทำให้ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์สูง ส่วนที่เวลา 60 นาที แก๊สไนโตรเจนมีเวลามากขึ้นในการเข้าไปไล่สารประกอบต่างๆในรูพรุนของกะลาปาล์มเป็นผลให้ความชื้นและปริมาณสารระเหยในกะลาปาล์มระเหยออกไปมากทำให้ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ลดลง

ภาพที่ 15 แสดงร้อยละของความชื้นในถ่านชาร์กับอุณหภูมิในการคาร์บอนเซชัน ที่เวลาต่างๆ พบว่าเมื่อเวลาสูงขึ้นจาก 30 เป็น 60 นาที ร้อยละของความชื้นมีค่าลดลง เนื่องจากที่เวลา 30 นาที แก๊สไนโตรเจนมีเวลาน้อยในการเข้าไปไล่สารประกอบต่างๆ ในรูพรุนของกะลาปาล์มทำให้ความชื้นระเหยออกจากกะลาปาล์มได้น้อย เป็นผลให้ร้อยละของความชื้นในถ่านชาร์มาก สำหรับที่เวลา 60 นาที แก๊สไนโตรเจนมีเวลามากในการเข้าไปไล่สารประกอบต่างๆ ในรูพรุนของกะลาปาล์มทำให้ความชื้นระเหยออกจากกะลาปาล์มได้มาก เป็นผลให้ร้อยละของความชื้นในถ่านชาร์ลดลง

ภาพที่ 16 แสดงร้อยละของสารระเหยในถ่านชาร์ ณ ที่เวลาต่างๆ พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 60 นาที ร้อยละของสารระเหยมีค่าลดลง เนื่องจากที่เวลาน้อยแก๊สไนโตรเจนมีเวลาน้อยในการเข้าไปไล่สารประกอบต่างๆในรูพรุนของกะลาปาล์มทำให้ปริมาณสารระเหยหลุดออกจากกะลาปาล์มได้น้อย เป็นผลให้ร้อยละของสารระเหยที่มีอยู่ในถ่านชาร์สูง ส่วนที่เวลาสูงขึ้นแก๊สไนโตรเจนมีเวลามากขึ้นในการเข้าไปไล่สารประกอบต่างๆในรูพรุนของกะลาปาล์มทำให้ปริมาณสารระเหยหลุดออกจากกะลาปาล์มมากขึ้น เป็นผลให้ร้อยละของสารระเหยที่มีอยู่ในถ่านชาร์ลดลง

ภาพที่ 17 แสดงร้อยละปริมาณเถ้าในถ่านชาร์ ณ เวลาในการคาร์บอนเซชันต่างๆ พบว่าเมื่อเวลามากขึ้นจาก 30 เป็น 60 นาที ร้อยละปริมาณเถ้ามีค่าสูงขึ้น เนื่องจากที่เวลาน้อยแก๊สไนโตรเจนมีเวลาน้อยในการไล่สารประกอบต่างๆออกจากกะลาปาล์มทำให้ปริมาณสารระเหยในกะลาปาล์มระเหยออกไปได้น้อย และยังคงเหลือสารระเหยในถ่านชาร์อีกมาก เมื่อนำมาวิเคราะห์อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นออก แล้วนำมาเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อหาปริมาณเถ้าที่เหลือ สารที่ระเหยได้จะระเหยออกไปอีกมาก เป็นผลให้น้ำหนักของแข็งที่เหลือ(เถ้า)น้อยลง ฉะนั้นร้อยละของเถ้าถ่านชาร์จึงน้อยที่อุณหภูมิการคาร์บอนเซชันต่ำ ส่วนที่เวลามากขึ้น แก๊สไนโตรเจนมีเวลามากในการไล่สารประกอบต่างๆออกจากกะลาปาล์มทำให้ปริมาณสารระเหยในกะลาปาล์มระเหยออกไปได้มาก และยังคงเหลือสารระเหยในถ่านชาร์น้อย เมื่อนำมาวิเคราะห์อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นออก แล้วนำมาเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อหาปริมาณเถ้าที่

เหลือ สารที่ระเหยได้ซึ่งมีอยู่น้อยจะระเหยออกไปอีก เป็นผลให้น้ำหนักของแข็งที่เหลือ(ถ้ำ)มีมาก ฉะนั้นร้อยละของถ้ำถ่านชาร์จึงมีค่ามาก

ภาพที่ 18 แสดงร้อยละคาร์บอนคงตัวในถ่านชาร์กับเวลาในการคาร์บอนในเซชันต่างๆ พบว่าที่เวลามากขึ้นจาก 30 เป็น 60 นาที ร้อยละคาร์บอนคงตัวมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากที่เวลาน้อย ปริมาณสารระเหยในกะลาปาล์มระเหยออกไปได้น้อย ทำให้เหลือสารระเหยในถ่านชาร์มาก ร่วมกับปริมาณถ้ำในถ่านชาร์เล็กน้อย จึงเหลือปริมาณส่วนที่ไม่ระเหยคือคาร์บอนในถ่านชาร์น้อย เป็นผลให้ร้อยละคาร์บอนคงตัวของถ่านชาร์ต่ำ ส่วนที่เวลามากขึ้นปริมาณสารระเหยในกะลาปาล์ม ระเหยออกไปได้มาก ทำให้เหลือสารระเหยในถ่านชาร์น้อย และปริมาณถ้ำในถ่านชาร์อีกเล็กน้อย จึงเหลือปริมาณถ่านชาร์ที่ไม่ระเหย (คือคาร์บอน) มาก เป็นผลให้ร้อยละคาร์บอนคงตัวของถ่านชาร์ มากขึ้นด้วย

3. สถานะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านชาร์จากกระบวนการคาร์บอนในเซชัน

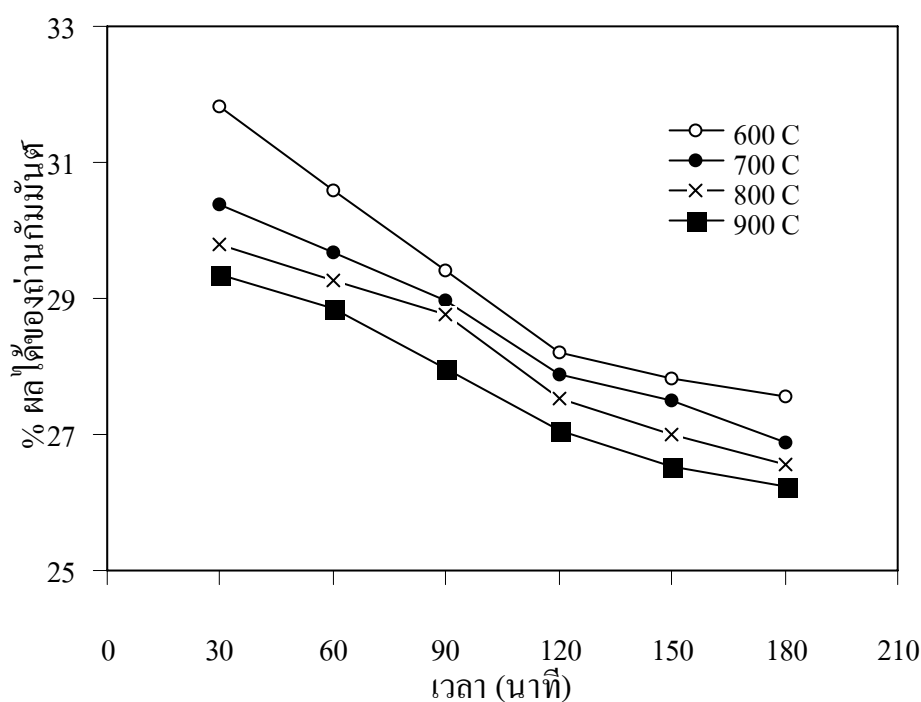
เมื่อพิจารณาถ่านชาร์จากกระบวนการคาร์บอนในเซชัน พบว่าถ่านชาร์ที่เหมาะสมสำหรับการ กระตุ้นควรมีปริมาณสารระเหยไม่มากและไม่น้อยเกินไป ควรอยู่ในช่วงร้อยละ 20-25 (บุญชัย, 2536) นอกจากนี้ยังใช้ปริมาณร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ และค่าร้อยละคาร์บอนคงตัว มาพิจารณา ควบคู่ไปด้วย การผลิตถ่านชาร์ควรประหยัดในด้านพลังงานด้วย เช่น ใช้อุณหภูมิการคาร์บอนใน เซชันไม่สูงมากนักและระยะเวลาในการคาร์บอนในเซชันไม่ควรนานเกินไปเนื่องจากจะต้องนำถ่าน ชาร์ที่ได้ไปทำการกระตุ้นต่อไปในกระบวนการกระตุ้น เพราะกระบวนการคาร์บอนในเซชันเป็น เพียงการสร้างรูพรุนเบื้องต้นเท่านั้น

จากการทดลองพบว่ามีหลายสถานะที่มีปริมาณสารระเหยอยู่ในช่วงร้อยละ 20 ถึง 25 คือที่ สถานะอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ที่เวลา 60 นาที และอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ที่เวลา 30 นาที ซึ่งมีค่าร้อยละของสารระเหย 23.32 และ 22.01 ตามลำดับ และปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 73.07 และ 74.32ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าสถานะที่เหมาะสมในการคาร์บอนในเซชัน คือ ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที เนื่องจากใช้เวลาไม่มากในการคาร์บอนในเซชันและมีปริมาณคาร์บอน คงตัวสูง ดังนั้นสถานะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านชาร์จากกระบวนการคาร์บอนในเซชัน คือ ที่ อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ที่เวลา 30 นาที โดยมีสมบัติดังนี้ ร้อยละของผลได้เท่ากับ 33.78 ร้อยละ ของความชื้นเท่ากับ 5.19 ร้อยละของสารระเหยเท่ากับ 22.01 ร้อยละปริมาณถ้ำเท่ากับ 3.67 และ

ร้อยละคาร์บอนคงตัวเท่ากับ 74.32 โดยถ่านชาร์ที่ได้จากกระบวนการคาร์บอนในเซชันมีลักษณะสีดำมันวาว และมีน้ำมันที่ออกจากกะลาปาล์มขณะทำการทดลองซึ่งมีลักษณะสีน้ำตาลเข้ม เหนียว มีกลิ่นเหม็นไหม้

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการกระตุ้นถ่านชาร์เป็นถ่านกัมมันต์

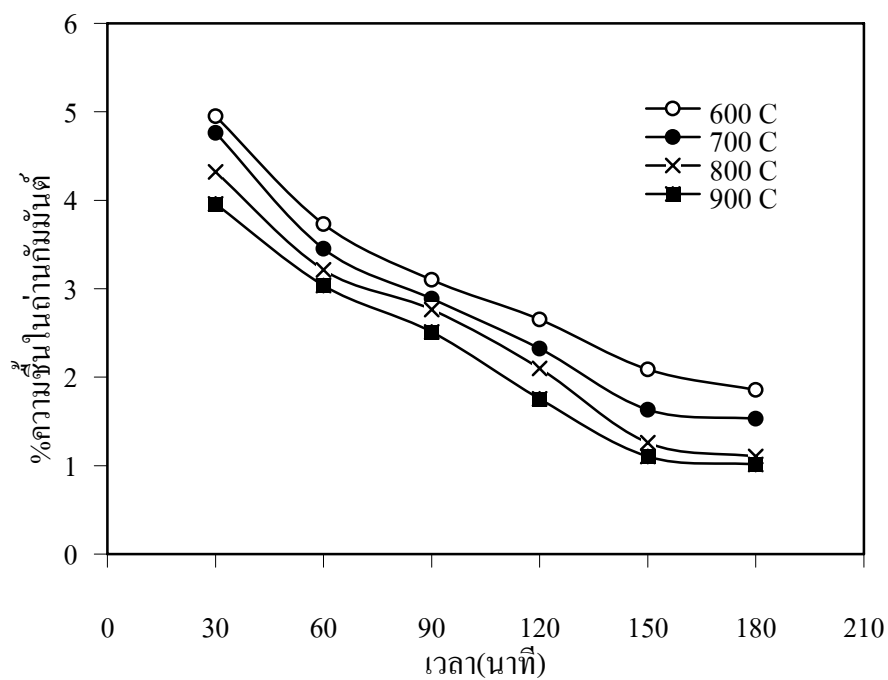
นำถ่านชาร์จากกระบวนการคาร์บอนในเซชันที่ผ่านอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที มาทำการกระตุ้นต่อในกระบวนการกระตุ้น เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้น โดยตัวแปรที่ศึกษาคืออุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น ซึ่งมีผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้ คือ ร้อยละของผลได้ ร้อยละของความชื้น ร้อยละปริมาณเถ้า ร้อยละของสารระเหย ค่าความหนาแน่นปรากฏ ค่าการดูดซับไอโอดีน ขนาดรูพรุน และค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ สามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 7 และภาพที่ 19 ถึงภาพที่ 26



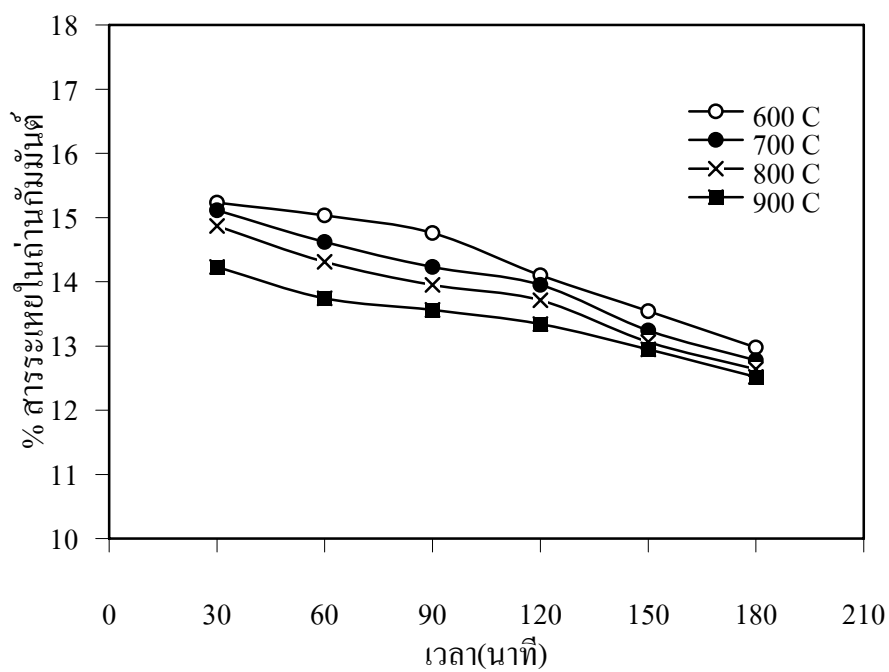
ภาพที่ 19 ผลได้ของถ่านกัมมันต์ที่ได้ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

ตารางที่ 7 แสดงคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้นที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

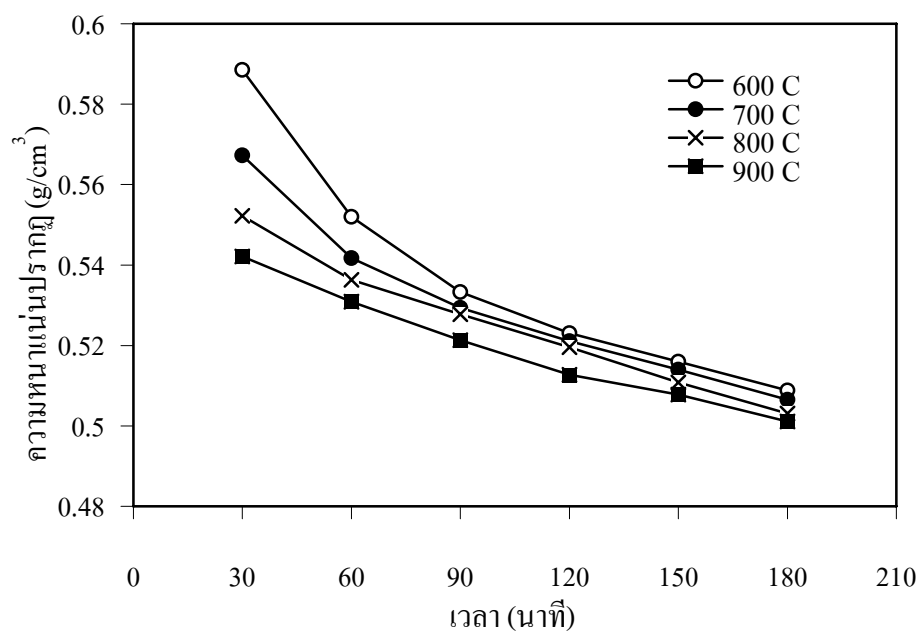
อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	ผลได้ ถ่าน กัมมันต์ (%)	ค่า ความชื้น (%)	ปริมาณ สารระเหย (%)	ปริมาณ เถ้า (%)	ความ หนาแน่น ปรากฏ (g/cm ³)	ค่าการ ดูดซับ ไอโอดีน (mg/g)	ค่าพื้นที่ ผิว (S _{BET}) (m ² /g)
600	30	31.81	4.95	15.23	4.01	0.5885	225.6	201.6
	60	30.58	3.73	15.03	4.23	0.5520	265.3	230.3
	90	29.42	3.10	14.76	4.64	0.5333	345.2	317.3
	120	28.21	2.65	14.10	4.86	0.5231	432.4	398.1
	150	27.81	2.09	13.54	5.49	0.5160	473.1	456.3
	180	27.56	1.86	12.98	5.88	0.5088	481.2	506.7
700	30	30.39	4.76	15.11	4.12	0.5673	274.2	239.6
	60	29.67	3.45	14.62	4.63	0.5417	324.6	304.6
	90	28.96	2.89	14.23	5.23	0.5294	432.1	395.6
	120	27.88	2.32	13.95	5.64	0.5211	521.4	472.7
	150	27.50	1.63	13.24	5.91	0.5140	596.8	553.6
	180	26.89	1.53	12.78	6.23	0.5065	612.3	561.5
800	30	29.79	4.32	14.87	4.58	0.5522	335.7	290.3
	60	29.27	3.21	14.31	5.64	0.5363	421.8	382.6
	90	28.77	2.77	13.95	6.28	0.5278	498.7	469.9
	120	27.53	2.09	13.71	6.57	0.5196	655.1	624.5
	150	27.01	1.26	13.06	6.89	0.5108	741.8	721.8
	180	26.57	1.10	12.64	7.21	0.5031	661.5	623.4
900	30	29.36	3.96	14.23	5.23	0.5421	388.6	346.7
	60	28.84	3.03	13.74	5.81	0.5309	452.6	432.4
	90	27.98	2.51	13.56	6.46	0.5213	536.1	499.7
	120	27.06	1.76	13.34	6.81	0.5127	684.8	655.9
	150	26.53	1.10	12.95	7.01	0.5078	708.9	675.8
	180	26.23	1.01	12.52	7.38	0.5011	632.5	639.1



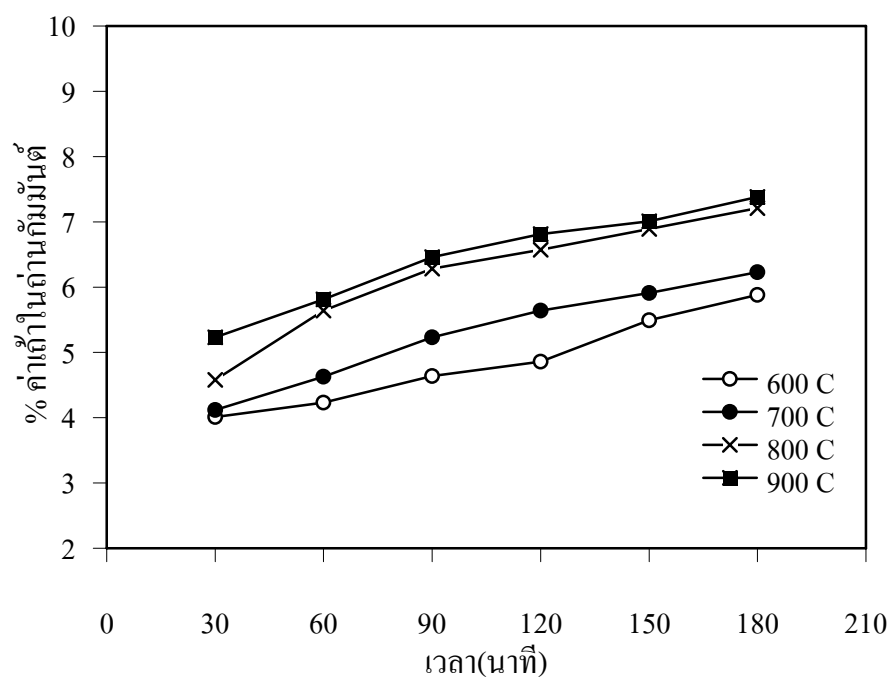
ภาพที่ 20 ความชื้นในถ่านกัมมันต์ที่ได้ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ



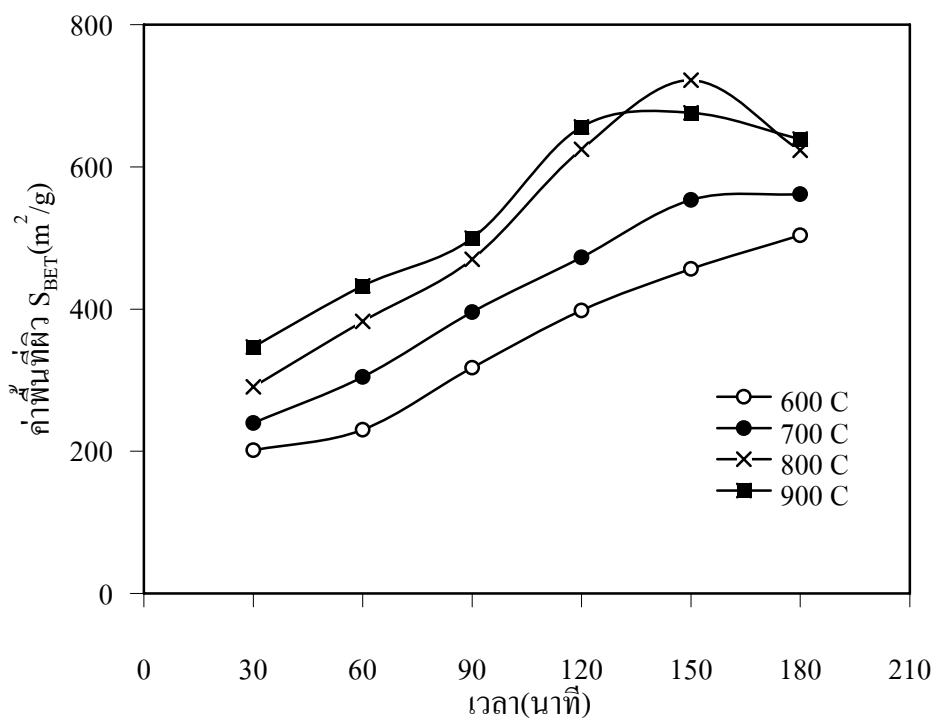
ภาพที่ 21 สารระเหยในถ่านกัมมันต์ที่ได้ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ



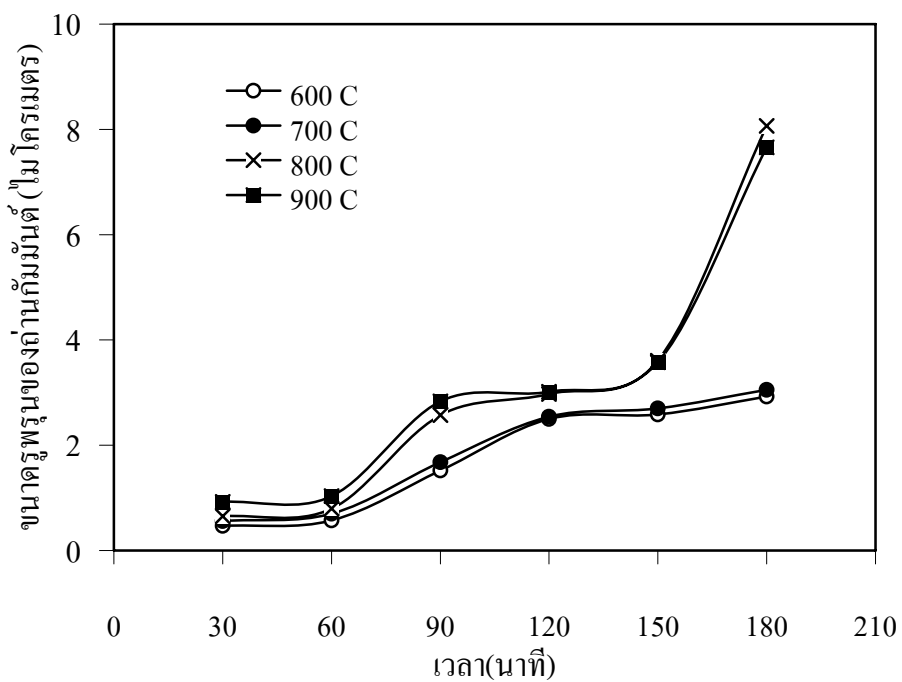
ภาพที่ 22 ความหนืดปรากฏของถ่านกัมมันต์ที่ได้ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ



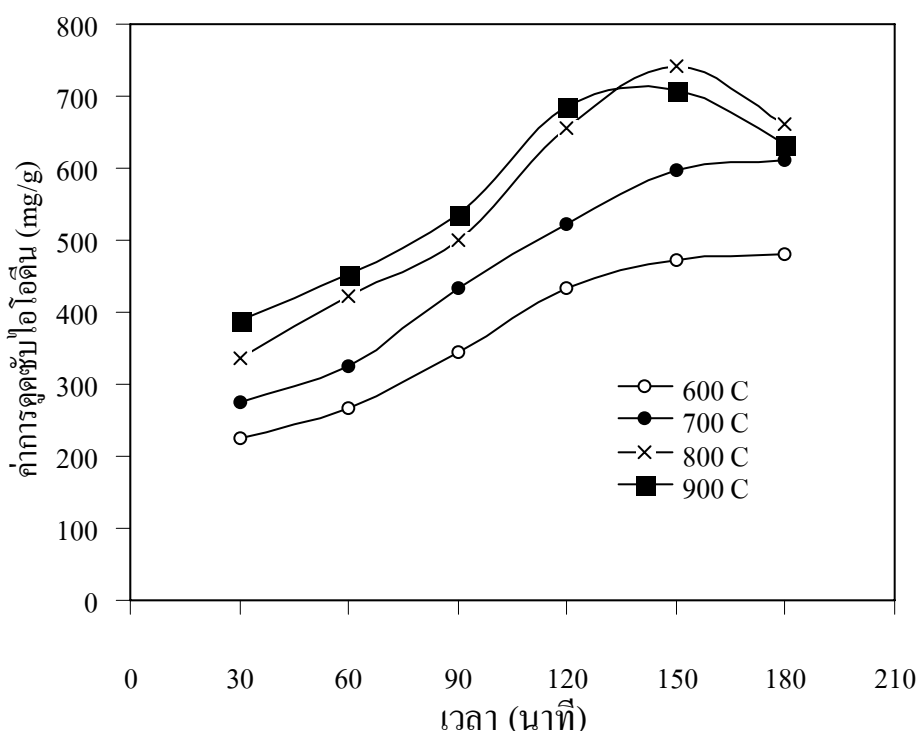
ภาพที่ 23 ปริมาณเฉลี่ยในถ่านกัมมันต์ที่ได้ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ



ภาพที่ 24 ค่าพื้นที่ผิว (S_{BET}) ของถ่านกัมมันต์ที่ได้ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ



ภาพที่ 25 ขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ



ภาพที่ 26 ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

1. ผลของอุณหภูมิจากกระบวนการกระตุ้นถ่านชาร์เป็นถ่านกัมมันต์

ตารางที่ 7 และภาพที่ 19 เมื่อพิจารณาอุณหภูมิในการกระตุ้นที่เพิ่มขึ้นจาก 600 ถึง 900 องศาเซลเซียส พบว่าร้อยละผลได้ในถ่านกัมมันต์ลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำความชื้นและปริมาณสารระเหยในถ่านชาร์ระเหยออกจากถ่านชาร์ได้น้อย เป็นผลให้ร้อยละผลได้ในถ่านกัมมันต์สูง ส่วนที่อุณหภูมิสูงความชื้นและปริมาณสารระเหยในถ่านชาร์ระเหยออกไปมากขึ้น ทำให้ร้อยละผลได้ในถ่านกัมมันต์ลดลง ดังข้อมูลที่แสดงในภาพที่ 19 ถึง 21

ภาพที่ 20 แสดงร้อยละของความชื้นในถ่านกัมมันต์กับอุณหภูมิในการกระตุ้นต่างๆ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 600 ถึง 900 องศาเซลเซียส ร้อยละความชื้นมีค่าลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำความชื้นระเหยออกจากถ่านชาร์ได้น้อย เป็นผลให้ร้อยละของความชื้นในถ่านกัมมันต์มาก ส่วนที่อุณหภูมิสูงความชื้นได้ระเหยออกจากถ่านชาร์มากขึ้น ทำให้ร้อยละของความชื้นในถ่านกัมมันต์ลดลง

ภาพที่ 21 แสดงร้อยละของสารระเหยในถ่านกัมมันต์ที่ได้รับจากอุณหภูมิในการกระตุ้นต่างๆ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 600 ถึง 900 องศาเซลเซียส ร้อยละของสารระเหยมีค่าลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำปริมาณสารระเหยได้ระเหยออกจากถ่านชาร์น้อย เป็นผลให้ร้อยละของสารระเหยในถ่านกัมมันต์สูง ส่วนที่อุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณสารระเหยได้ระเหยออกจากถ่านชาร์มากขึ้น ทำให้ร้อยละของสารระเหยในถ่านกัมมันต์ลดลง

ภาพที่ 22 แสดงค่าความหนาแน่นปรากฏของถ่านกัมมันต์ ณ อุณหภูมิในการกระตุ้นต่างๆ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความหนาแน่นปรากฏลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำความชื้นและสารระเหยระเหยออกจากถ่านชาร์ได้น้อย จึงเกิดรูพรุนภายในถ่านกัมมันต์น้อย ทำให้เหลือน้ำหนักถ่านกัมมันต์มาก เป็นผลให้ค่าความหนาแน่นปรากฏสูง ส่วนที่อุณหภูมิสูงขึ้นความชื้นและสารระเหยระเหยออกจากถ่านชาร์มากขึ้น จึงเกิดรูพรุนภายในถ่านกัมมันต์มากขึ้น ทำให้เหลือน้ำหนักถ่านกัมมันต์น้อยลง เป็นผลให้ค่าความหนาแน่นปรากฏต่ำ

ภาพที่ 23 แสดงร้อยละปริมาณเถ้าในถ่านกัมมันต์ ณ อุณหภูมิในการกระตุ้นต่างๆ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 600 ถึง 900 องศาเซลเซียส ร้อยละปริมาณเถ้ามีค่าสูงขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำปริมาณสารระเหยในถ่านชาร์ระเหยออกไปได้น้อย แต่ยังคงเหลือสารระเหยในถ่านกัมมันต์อีกมาก เมื่อนำมาวิเคราะห์โดยอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นออก แล้วนำมาเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อหาปริมาณเถ้าที่เหลือ สารที่ระเหยได้ที่เหลือจึงระเหยออกไปอีกมาก เป็นผลให้น้ำหนักของแข็งสุดท้ายที่เหลือ(เถ้า)น้อยลงเมื่อเทียบกับน้ำหนักหลังไล่ความชื้น ฉะนั้นร้อยละของเถ้าถ่านกัมมันต์จึงน้อยที่อุณหภูมิการกระตุ้นต่ำ ส่วนที่อุณหภูมิกระบวนการสูงขึ้น ปริมาณสารระเหยในถ่านชาร์ระเหยออกไปได้มาก และยังคงเหลือสารระเหยในถ่านกัมมันต์น้อย เมื่อนำมาวิเคราะห์โดยอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นออก แล้วนำมาเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อหาปริมาณเถ้าที่เหลือ สารที่ระเหยได้ที่เหลือจึงระเหยออกไปอีกในปริมาณที่น้อย เป็นผลให้น้ำหนักของแข็งสุดท้ายที่เหลือ (เถ้า) มีมากเมื่อเทียบกับน้ำหนักหลังไล่ความชื้น ฉะนั้นร้อยละของเถ้าถ่านกัมมันต์จึงมีค่ามากที่อุณหภูมิการกระตุ้นสูงขึ้น

ภาพที่ 24 แสดงค่าพื้นที่ผิวในถ่านกัมมันต์ ณ อุณหภูมิในการกระตุ้นต่างๆ เมื่อพิจารณาอุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิที่ 800 และ 900 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดค่าหนึ่งแล้วค่าพื้นที่ผิวก็ลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำๆ ช่วง 600 และ 700 องศาเซลเซียส ความชื้น

และสารระเหยหลุดออกจากถ่านชาร์น้อย จึงเกิดรูพรุนในถ่านกัมมันต์น้อย เป็นผลให้ค่าพื้นที่ผิวต่ำที่อุณหภูมิต่ำ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในช่วงแรกค่าพื้นที่ผิวยังคงเพิ่มขึ้น เนื่องจากความชื้นและสารระเหยหลุดออกจากถ่านชาร์มากขึ้นจึงเกิดรูพรุนในถ่านกัมมันต์มากขึ้น เป็นผลให้ค่าพื้นที่ผิวสูงขึ้นที่อุณหภูมิมากขึ้น แต่ที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่งแล้วจึงลดลง เนื่องจากรูพรุนขนาดกลางในเนื้อถ่านขยายขนาดจนผนังทะลุถึงกันเกิดการรวมตัวกันเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้นดังแสดงในภาพที่ 25 เป็นผลให้ค่าพื้นที่ผิวลดลงที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียสในช่วงเวลาหลายๆ ดังแสดงในภาพที่ 24

ภาพที่ 25 แสดงขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้ ณ อุณหภูมิการกระตุ้นต่างๆ เมื่อพิจารณาอุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส พบว่าขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์มีขนาดใกล้เคียงกัน ซึ่งขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้คือรูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลาง สำหรับที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส พบว่าขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์มีขนาดใกล้เคียงกัน แต่มีรูพรุนขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นกว่าขนาดจากที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส ซึ่งการกระจายของขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้ ณ อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส นี้เป็นรูพรุนขนาดเล็ก รูพรุนขนาดกลางและรูพรุนขนาดใหญ่

ภาพที่ 26 แสดงค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ ณ อุณหภูมิการกระตุ้นต่างๆ เมื่อพิจารณาอุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นเช่นกันจนถึงค่าหนึ่งแล้วจึงลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำความชื้นและสารระเหยระเหยออกจากถ่านชาร์น้อย จึงเกิดรูพรุนในถ่านกัมมันต์น้อย เป็นผลให้เกิดพื้นที่ผิวในการดูดซับสารต่างๆ ได้น้อย เมื่อนำถ่านกัมมันต์มาทำการวิเคราะห์การดูดซับไอโอดีน จึงได้ค่าการดูดซับไอโอดีนน้อย สำหรับที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งแล้วจึงลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงๆ ความชื้นและสารระเหยระเหยออกจากถ่านชาร์มาก จึงเกิดรูพรุนในถ่านกัมมันต์มาก เป็นผลให้เกิดพื้นที่ผิวในการดูดซับสารต่างๆ ได้มากขึ้น เมื่อนำถ่านกัมมันต์มาทำการวิเคราะห์การดูดซับไอโอดีนจึงได้ค่าการดูดซับไอโอดีนมากขึ้น แต่ที่อุณหภูมิสูงในช่วงปลายมีค่าการดูดซับไอโอดีนที่ต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากความชื้นและสารระเหยระเหยออกไปมาก ทำให้เกิดรูพรุนของถ่านกัมมันต์มากขึ้น เป็นผลให้รูพรุนขนาดกลางขยายขนาดจนผนังทะลุถึงกันเกิดการรวมตัวกันเป็นรูพรุนขนาดใหญ่มากขึ้น จึงเกิดพื้นที่ผิวในการดูดซับสารต่างๆ น้อยลง เมื่อนำถ่านกัมมันต์มาทำการวิเคราะห์การดูดซับไอโอดีนจึงได้ค่าการดูดซับไอโอดีนที่น้อยลง

2. ผลของเวลาจากกระบวนการกระตุ้นถ่านชาร์เป็นถ่านกัมมันต์

จากตารางที่ 7 และภาพที่ 19 เมื่อพิจารณาเวลาในการกระตุ้นที่มากขึ้นจาก 30 เป็น 180 นาที พบว่าร้อยละผลได้ในถ่านกัมมันต์มีค่าลดลง เนื่องจากที่เวลาน้อย แก๊สในโตรเจนมีเวลาไม่มากนักในการเข้าไปไล่สารประกอบต่างๆในรูพรุนของถ่านชาร์ เป็นผลให้ความชื้นและปริมาณสารระเหยในถ่านชาร์ระเหยออกจากถ่านชาร์ได้น้อย เป็นผลให้ร้อยละผลได้ในถ่านกัมมันต์สูง ส่วนที่เวลาเพิ่มขึ้น แก๊สในโตรเจนมีเวลามากขึ้นในการเข้าไปไล่สารประกอบต่างๆในรูพรุนของถ่านชาร์ เป็นผลให้ความชื้นและปริมาณสารระเหยในถ่านชาร์ระเหยออกไปมากขึ้น ทำให้ร้อยละผลได้ในถ่านกัมมันต์ลดลง ดังข้อมูลที่แสดงในรูปที่ 19 ถึง 21

ภาพที่ 20 แสดงร้อยละของความชื้นในถ่านกัมมันต์ ณ ที่เวลาต่างๆ พบว่าเมื่อเวลาสูงขึ้นจาก 30 เป็น 180 นาที ร้อยละความชื้นมีค่าลดลง เนื่องจากที่เวลาน้อยแก๊สในโตรเจนมีเวลาน้อยในการเข้าไปไล่สารประกอบต่างๆ ในรูพรุนของถ่านชาร์ ทำให้ความชื้นระเหยออกจากถ่านชาร์ได้น้อย เป็นผลให้ร้อยละของความชื้นในถ่านกัมมันต์มาก สำหรับที่เวลาเพิ่มขึ้นแก๊สในโตรเจนมีเวลามากขึ้นในการเข้าไปไล่สารประกอบต่างๆในรูพรุนของถ่านชาร์ ทำให้ความชื้นระเหยออกจากถ่านชาร์ได้มาก เป็นผลให้ร้อยละของความชื้นในถ่านกัมมันต์ลดลง

ภาพที่ 21 แสดงร้อยละของสารระเหยในถ่านกัมมันต์ ณ ที่เวลาต่างๆ พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ร้อยละสารระเหยมีค่าลดลง เนื่องจากที่เวลาน้อยแก๊สในโตรเจนมีเวลาน้อยในการเข้าไปไล่สารประกอบต่างๆในรูพรุนของถ่านชาร์ ทำให้ปริมาณสารระเหยหลุดออกจากถ่านชาร์ได้น้อย เป็นผลให้ร้อยละของสารระเหยที่มีอยู่ในถ่านกัมมันต์สูง ส่วนที่เวลาสูงขึ้นแก๊สในโตรเจนมีเวลามากขึ้นในการเข้าไปไล่สารประกอบต่างๆ ในรูพรุนของถ่านชาร์ ทำให้ปริมาณสารระเหยหลุดออกจากถ่านชาร์มากขึ้น เป็นผลให้ร้อยละของสารระเหยที่มีอยู่ในถ่านกัมมันต์ลดลง

ภาพที่ 22 แสดงค่าความหนาแน่นปรากฏของถ่านกัมมันต์ ณ เวลาในการกระตุ้นต่างๆ พบว่าเมื่อเวลามากขึ้นค่าความหนาแน่นปรากฏลดลง เนื่องจากที่เวลาน้อยความชื้นและปริมาณสารระเหยได้ระเหยออกจากถ่านชาร์น้อย จึงเกิดรูพรุนภายในถ่านกัมมันต์น้อย ทำให้เหลือน้ำหนักถ่านกัมมันต์มาก เป็นผลให้ค่าความหนาแน่นปรากฏสูง ส่วนที่เวลามากขึ้นความชื้นและปริมาณสารระเหยได้ระเหยออกจากถ่านชาร์มากขึ้น จึงเกิดรูพรุนภายในถ่านกัมมันต์มากขึ้น ทำให้เหลือน้ำหนักถ่านกัมมันต์น้อยลง เป็นผลให้ค่าความหนาแน่นปรากฏลดลง

ภาพที่ 23 แสดงร้อยละปริมาณไถ่ในถ่านกัมมันต์ ณ เวลาในการกระตุ้นต่างๆ พบว่าเมื่อเวลามากขึ้นจาก 30 เป็น 180 นาที ร้อยละปริมาณไถ่มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากที่เวลาน้อยแก๊สไนโตรเจนมีเวลาน้อยในการไล่สารประกอบต่างๆออกจากถ่านชาร์ ทำให้ปริมาณสารระเหยในถ่านชาร์ระเหยออกไปได้น้อย แต่ยังคงเหลือสารระเหยในถ่านกัมมันต์อีกมาก เมื่อนำมาวิเคราะห์โดยอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นออก แล้วนำมาเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อหาปริมาณไถ่ที่เหลือ สารที่ระเหยได้ที่เหลือจึงระเหยออกไปอีกมาก เป็นผลให้น้ำหนักของแข็งสุดท้ายที่เหลือ (ถ้ำ) น้อยลงเมื่อเทียบกับน้ำหนักหลังไล่ความชื้น ฉะนั้นร้อยละของถ้ำถ่านกัมมันต์จึงน้อยที่เวลาการกระตุ้นน้อย ส่วนที่อุณหภูมิกระบวนการสูงขึ้น แก๊สไนโตรเจนมีเวลามากในการไล่สารประกอบต่างๆ ออกจากถ่านชาร์ ทำให้ปริมาณสารระเหยในถ่านชาร์ระเหยออกไปได้มาก และยังคงเหลือสารระเหยในถ่านกัมมันต์น้อย เมื่อนำมาวิเคราะห์โดยอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นออก แล้วนำมาเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อหาปริมาณไถ่ที่เหลือ สารที่ระเหยได้ซึ่งมีอยู่น้อยจะระเหยออกไปอีก เป็นผลให้น้ำหนักของแข็งสุดท้ายที่เหลือ (ถ้ำ) มีมาก ฉะนั้นร้อยละของถ้ำถ่านกัมมันต์จึงมีค่ามาก

ภาพที่ 24 แสดงค่าพื้นที่ผิวในถ่านกัมมันต์ ณ เวลาในการกระตุ้นต่างๆ เมื่อพิจารณาที่เวลา 30 ถึง 150 นาที พบว่าที่เวลามากขึ้นค่าพื้นที่ผิวมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่เวลา 150 ถึง 180 นาที พบว่าที่เวลาเพิ่มขึ้นค่าพื้นที่ผิวลดลง เป็นเช่นนี้เนื่องจากที่เวลาน้อย ไอน้ำร้อนยังขาดมีเวลาแทรกผ่านเข้าไปในถ่านชาร์ได้น้อยทำให้ความชื้นและสารระเหยหลุดออกจากถ่านชาร์น้อย จึงเกิดรูพรุนในถ่านกัมมันต์น้อย เป็นผลให้ค่าพื้นที่ผิวดำที่เวลาน้อย และเมื่อเวลามากขึ้นถึง 150 นาที ไอน้ำร้อนยังขาดมีเวลาแทรกผ่านเข้าไปในถ่านชาร์ได้นานขึ้น ความชื้นและสารระเหยหลุดออกจากถ่านชาร์มากขึ้นจึงเกิดรูพรุนในถ่านกัมมันต์มากขึ้น เป็นผลให้ค่าพื้นที่ผิวสูงขึ้นที่เวลามากขึ้น แต่เมื่อเวลามากกว่า 150 นาที ค่าพื้นที่ผิวลดลง เนื่องจากรูพรุนขนาดกลางในเนื้อถ่านขยายขนาดจนผนังทะลุถึงกันเกิดการรวมตัวกันเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้นดังแสดงในภาพที่ 25 เป็นผลให้ค่าพื้นที่ผิวดลดลงที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียสในช่วงเวลามากๆ ดังแสดงในภาพที่ 24

ภาพที่ 25 แสดงขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้ ณ เวลาการกระตุ้นต่างๆ เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส ณ เวลา 0 ถึง 180 พบว่าเมื่อเวลามากขึ้นขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากที่เวลามากขึ้นความชื้นและปริมาณสารระเหยได้ระเหยออกจากรูพรุนของถ่านชาร์มากขึ้นเป็นผลให้ถ่านกัมมันต์มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้คือรูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลาง ที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส ณ เวลา 0 ถึง 150 นาที พบว่าเมื่อเวลามากขึ้นขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์มีขนาดใหญ่ขึ้นเช่นกัน เนื่องจากเวลามาก

ขึ้นความชื้นและปริมาณสารระเหยได้ระเหยออกจากรูปของถ่านชาร์มากขึ้นเป็นผลให้ถ่านกัมมันต์มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งขนาดรูปของถ่านกัมมันต์ที่ได้เป็นรูปขนาดเล็กและรูปขนาดกลาง แต่ที่เวลามากกว่า 150 นาที ของอุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส พบว่าในช่วงนี้ขนาดรูปของถ่านกัมมันต์มีขนาดใหญ่ขึ้นมาก เป็นเช่นนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงและเวลามากขึ้น ความชื้นและปริมาณสารระเหยได้ระเหยออกจากถ่านชาร์มากขึ้นเป็นผลให้รูปขนาดกลางขยายขนาดจนผนังทะลุถึงกันเกิดการรวมตัวกันเป็นรูปขนาดใหญ่ขึ้นมากอย่างเห็นได้ชัด

ภาพที่ 26 แสดงค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ ณ เวลาการกระตุ้นต่างๆ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 150 นาที พบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่เวลาจาก 150 เป็น 180 นาที พบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนลดลง เป็นเช่นนี้เนื่องจากที่เวลาน้อยไอน้ำร้อนยิ่งยวดมีเวลาน้อยในการแทรกผ่านเข้าไปในถ่านชาร์ ทำให้ความชื้นและสารระเหยได้ระเหยออกจากถ่านชาร์น้อย จึงเกิดรูปในถ่านกัมมันต์น้อย เป็นผลให้เกิดพื้นที่ผิวในการดูดซับสารต่างๆ ได้น้อย เมื่อนำถ่านกัมมันต์มาทำการวิเคราะห์การดูดซับไอโอดีน จึงได้ค่าการดูดซับไอโอดีนน้อย สำหรับที่เวลามากขึ้นขึ้นค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้น เนื่องจากไอน้ำร้อนยิ่งยวดมีเวลานานขึ้นในการแทรกผ่านเข้าไปในถ่านชาร์ ทำให้ความชื้นและสารระเหยได้ระเหยออกจากถ่านชาร์มาก จึงเกิดรูปในถ่านกัมมันต์มาก เป็นผลให้เกิดพื้นที่ผิวในการดูดซับสารต่างๆ ได้มากขึ้น เมื่อนำถ่านกัมมันต์มาทำการวิเคราะห์การดูดซับไอโอดีนจึงได้ค่าการดูดซับไอโอดีนมากขึ้น แต่ที่เวลามากกว่า 150 นาที มีค่าการดูดซับไอโอดีนที่ต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากไอน้ำร้อนยิ่งยวดมีเวลานานขึ้นในการแทรกผ่านถ่านชาร์ ทำให้ความชื้นและสารระเหยระเหยออกไปมาก ทำให้เกิดรูปของถ่านกัมมันต์มากขึ้น เป็นผลให้รูปขนาดกลางขยายขนาดจนผนังทะลุถึงกันเกิดการรวมตัวกันเป็นรูปขนาดใหญ่มากขึ้น จึงเกิดพื้นที่ผิวในการดูดซับสารต่างๆ น้อยลง เมื่อนำถ่านกัมมันต์มาทำการวิเคราะห์การดูดซับไอโอดีนจึงได้ค่าการดูดซับไอโอดีนที่น้อยลง

3. สถานะที่เหมาะสมของกระบวนการกระตุ้นในการผลิตถ่านกัมมันต์

เมื่อพิจารณาถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดเป็นตัวกระตุ้น พบว่าสถานะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ควรมีค่าการดูดซับไอโอดีนและค่าพื้นที่ผิวที่สูง เนื่องจากค่าการดูดซับไอโอดีนและค่าพื้นที่ผิวเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญทางการค้า ที่เป็นตัวกำหนดคุณภาพและราคาของถ่านกัมมันต์

จากผลการทดลองพบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนและค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการกระตุ้นที่มีค่าสูงสุดคือ ที่สภาวะอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ณ เวลาการกระตุ้น 150 นาที โดยมีสมบัติดังนี้ ร้อยละของผลได้เท่ากับ 27.61 ร้อยละของความชื้นเท่ากับ 1.26 ร้อยละของสารระเหยเท่ากับ 13.06 ร้อยละปริมาณเถ้าเท่ากับ 6.89 ค่าความหนาแน่นปรากฏเท่ากับ 0.5108 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 741.8 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 721.8 ตารางเมตรต่อกรัม โดยถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการกระตุ้นมีลักษณะเป็นสีดำด้าน

การหาอัตราการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคาร์บอนในการผลิตถ่านกัมมันต์

จากการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกระตุ้นในการผลิตถ่านกัมมันต์ ตัวแปรที่สำคัญในการกำหนดสภาวะคือ ค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นจึงนำข้อมูลค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์มาวิเคราะห์และหาอัตราการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคาร์บอนในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม ซึ่งจะพิจารณาจากค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลเชิงปริมาณสำหรับกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มต่อไป

แบบจำลองที่ใช้อธิบายจลนศาสตร์ของระบบสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{dS}{dt} = kS^n = Ae^{-E/RT} S^n \quad (39)$$

$$\ln k = \ln A - \frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} \right) \quad (40)$$

$$n \neq 1 \quad \ln \left(\frac{dS}{dt} \right) = \ln k + n \ln S \quad (41)$$

$$n = 1 \quad \ln \frac{S}{S_0} = kt \quad (42)$$

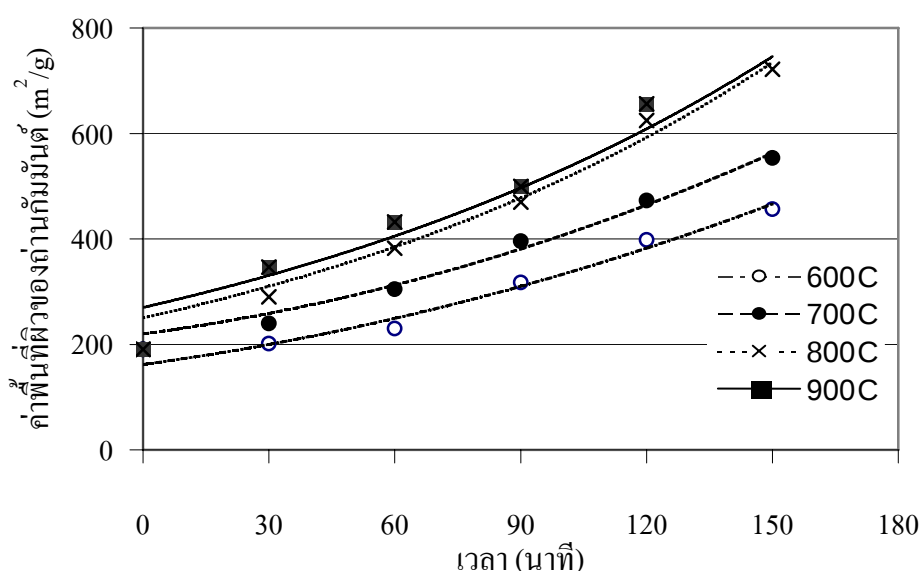
จากตารางที่ 7 และภาพที่ 24 พบว่าที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิ 600 ถึง 900 องศาเซลเซียส ณ ช่วงเวลาเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 180 นาที ค่าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งพบว่าค่าพื้นที่ผิวลดลงที่อุณหภูมิ 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส ณ เวลามากกว่า 150 นาที และที่อุณหภูมิ 900 องศา-

เซลเซียส ณ เวลามากกว่า 120 นาที เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงและเวลามากขึ้นเป็นผลให้รูพรุนขนาดกลางในเนื้อถ่านขยายขนาดจนผนังทะลุถึงกันเกิดการรวมตัวกันเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ ดังแสดงในภาพที่ 25 ทำให้ค่าพื้นที่ผิวลดลง ดังนั้นในการศึกษาจะไม่พิจารณาในช่วงที่พื้นที่ผิวลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างคาร์บอนที่เกิดจากการรวมตัวกันของรูพรุน ซึ่งอยู่นอกเหนือจากการพิจารณาการเพิ่มพื้นที่ผิวตามกลไกของปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียว ดังนั้นในการศึกษาอัตราการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างคาร์บอนโดยพิจารณาจากพื้นที่ผิวจึงจะพิจารณาในช่วงอุณหภูมิ 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส ณ ช่วงเวลา 0 ถึง 150 นาที และที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ณ ช่วงเวลา 0 ถึง 120 นาที ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

1. พิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคาร์บอนที่อุณหภูมิ 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส ณ ช่วงเวลา 0 ถึง 150 นาที และอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ช่วงเวลา 0 ถึง 120 นาที

1.1 กรณี $n \neq 1$

จากข้อมูลการวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิว สามารถนำมาเขียนกราฟระหว่างค่าพื้นที่ผิว (S) และเวลา t เพื่อหา dS/dt ตามสมการที่ 41 ได้ดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 ค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (S) กับเวลา (t) ที่กระตุ้นโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่เวลา และอุณหภูมิต่างๆ

จากภาพที่ 27 จะได้สมการโพลิโนเมียลดังแสดงในสมการที่ 43 ถึงสมการที่ 46 ซึ่งจะสามารถนำไปหาค่า dS/dt (ตารางเมตรต่อกรัม.นาท) ได้

ณ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ณ เวลา 0 ถึง 150 นาที

$$S = 0.0064t^2 + 1.0717t + 162 \quad (\text{ตารางเมตรต่อกรัม}) \quad (43)$$

ณ อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ณ เวลา 0 ถึง 150 นาที

$$S = 0.0083t^2 + 1.0430t + 220 \quad (\text{ตารางเมตรต่อกรัม}) \quad (44)$$

ณ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ณ เวลา 0 ถึง 150 นาที

$$S = 0.0116t^2 + 1.5026t + 250 \quad (\text{ตารางเมตรต่อกรัม}) \quad (45)$$

ณ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ณ เวลา 0 ถึง 120 นาที

$$S = 0.0119t^2 + 1.6294t + 280 \quad (\text{ตารางเมตรต่อกรัม}) \quad (46)$$

จากสมการโพลิโนเมียลนำมาดิฟเฟอเรนเชียลเพื่อหาค่า dS/dt (ตารางเมตรต่อกรัม.นาท) ดังแสดงในสมการที่ 47 ถึงสมการที่ 50 ดังนี้

ณ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ณ เวลา 0 ถึง 150 นาที

$$\frac{dS}{dt} = 0.0128t + 1.0717 \quad (\text{ตารางเมตรต่อกรัม.นาท}) \quad (47)$$

ณ อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ณ เวลา 0 ถึง 150 นาที

$$\frac{dS}{dt} = 0.0166t + 1.0430 \quad (\text{ตารางเมตรต่อกรัม.นาท}) \quad (48)$$

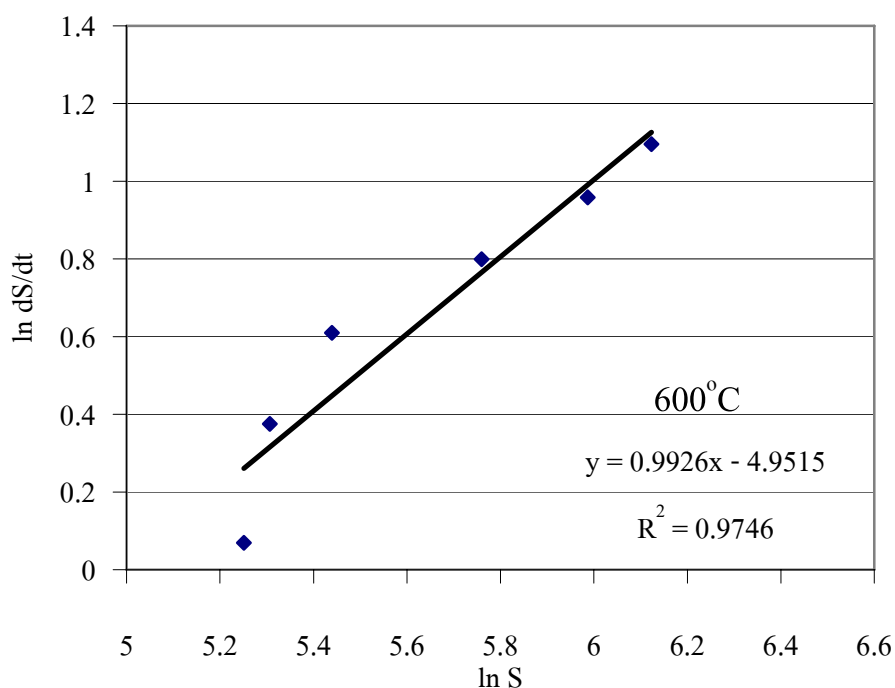
ณ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ณ เวลา 0 ถึง 150 นาที

$$\frac{dS}{dt} = 0.0232t + 1.5026 \quad (\text{ตารางเมตรต่อกรัม.นาทึ่}) \quad (49)$$

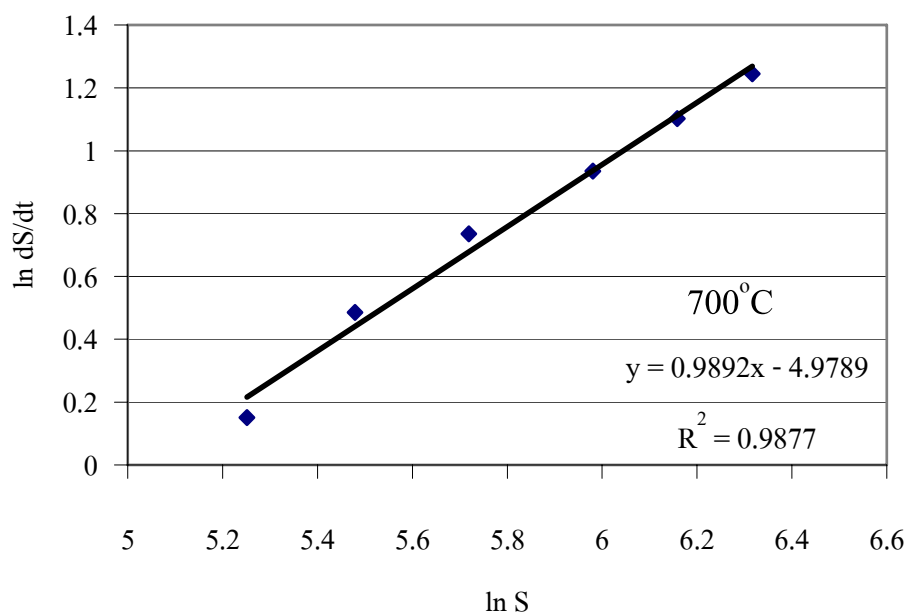
ณ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ณ เวลา 0 ถึง 120 นาที

$$\frac{dS}{dt} = 0.0238t + 1.6294 \quad (\text{ตารางเมตรต่อกรัม.นาทึ่}) \quad (50)$$

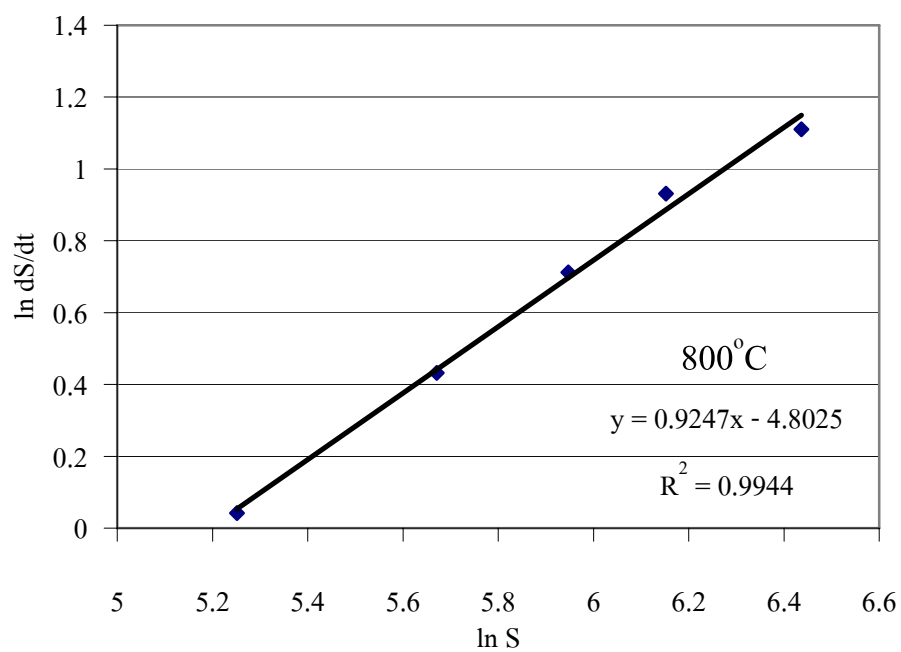
นำสมการที่ 47 ถึงสมการที่ 50 มาหาค่า $\ln dS / dt$ ที่ได้ ณ เวลาต่างๆ แล้วนำมาพลอตกับค่า $\ln S$ โดยใช้สมการที่ 41 ในการพิจารณา ซึ่งความชันคืออันดับของปฏิกิริยา (n) จุดตัดแกนที่ได้คือ $\ln k$ ดังแสดงในภาพที่ 28 ถึงภาพที่ 31



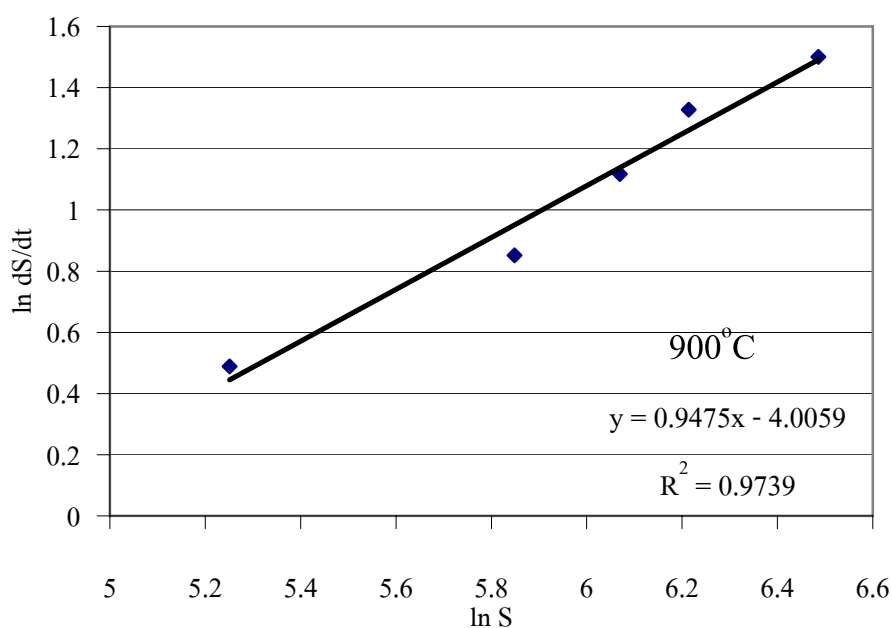
ภาพที่ 28 ค่า $\ln ds / dt$ กับค่า $\ln S$ ที่กระตุ้นโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ณ เวลาระหว่าง 0 ถึง 150 นาที



ภาพที่ 29 ค่า $\ln ds/dt$ กับค่า $\ln S$ ที่กระตุ้นโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ณ เวลาระหว่าง 0 ถึง 150 นาที



ภาพที่ 30 ค่า $\ln ds/dt$ กับค่า $\ln S$ ที่กระตุ้นโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ณ เวลาระหว่าง 0 ถึง 150 นาที



ภาพที่ 31 ค่า $\ln ds/dt$ กับค่า $\ln S$ ที่กระตุ้นโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ณ เวลาระหว่าง 0 ถึง 120 นาที

จากภาพที่ 28 ถึงภาพที่ 31 สามารถอธิบายอันดับของปฏิกิริยาและสมการจลนศาสตร์ได้ดังนี้

ณ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ณ เวลา 0 ถึง 150 นาที	$n = 0.9926$, $k = 0.0071 \text{ นาที}^{-1}$
ณ อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ณ เวลา 0 ถึง 150 นาที	$n = 0.9892$, $k = 0.0069 \text{ นาที}^{-1}$
ณ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ณ เวลา 0 ถึง 150 นาที	$n = 0.9247$, $k = 0.0082 \text{ นาที}^{-1}$
ณ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ณ เวลา 0 ถึง 120 นาที	$n = 0.9475$, $k = 0.0182 \text{ นาที}^{-1}$

เมื่อนำมาเขียนสมการอัตราการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคาร์บอนในการผลิตถ่านกัมมันต์ ซึ่งพิจารณาจากค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ในกระบวนการกระตุ้น ดังแสดงในสมการที่ 51 ถึงสมการที่ 54

ณ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ณ เวลา 0 ถึง 150 นาที

$$\frac{dS}{dt} = 0.0071S^{0.9926} = Ae^{-E/RT}S^{0.9926} \quad (\text{ตารางเมตรต่อกรัม.นาทึ่}) \quad (51)$$

ณ อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ณ เวลา 0 ถึง 150 นาที

$$\frac{dS}{dt} = 0.0069S^{0.9892} = Ae^{-E/RT}S^{0.9892} \quad (\text{ตารางเมตรต่อกรัม.นาทึ่}) \quad (52)$$

ณ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ณ เวลา 0 ถึง 150 นาที

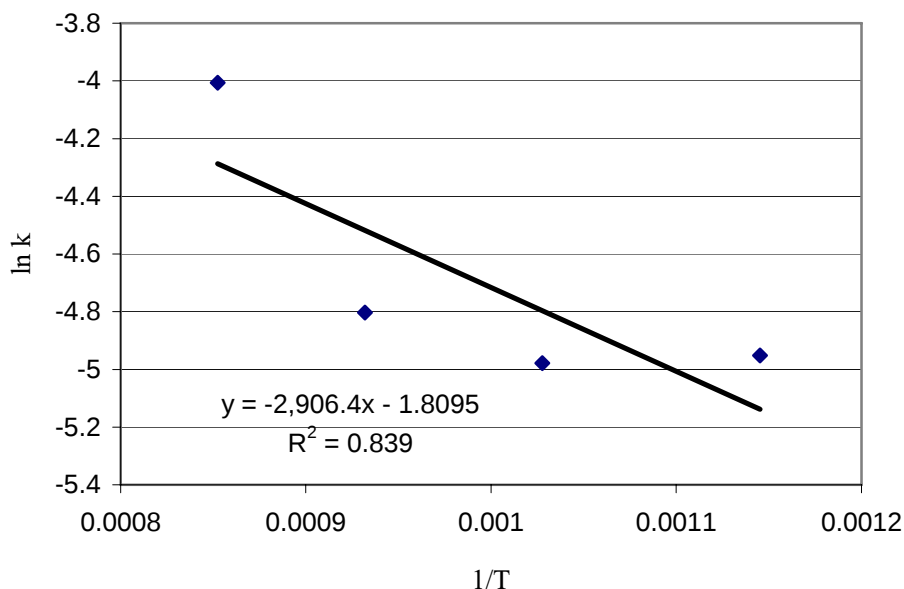
$$\frac{dS}{dt} = 0.0082S^{0.9247} = Ae^{-E/RT}S^{0.9247} \quad (\text{ตารางเมตรต่อกรัม.นาทึ่}) \quad (53)$$

ณ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ณ เวลา 0 ถึง 120 นาที

$$\frac{dS}{dt} = 0.0182S^{0.9475} = Ae^{-E/RT}S^{0.9475} \quad (\text{ตารางเมตรต่อกรัม.นาทึ่}) \quad (54)$$

จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส ณ เวลาการกระตุ้น 0 ถึง 150 นาที และที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ณ เวลาการกระตุ้น 0 ถึง 120 นาที มีอันดับของปฏิกิริยาใกล้เคียง 1 ฉะนั้นจึงสามารถพิจารณาอันดับปฏิกิริยาเป็น 1 ได้ ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปภายหลัง

ในการหาผลของอุณหภูมิต่อค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา จะได้จากการนำค่าใน สมการที่ 51 ถึงสมการที่ 54 มาทำการพลอตกราฟระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ ซึ่งจะได้ค่าความชันคือ $-E/R$ และจุดตัดแกนคือ $\ln A$ โดยใช้สมการที่ 42 ซึ่งเป็นสมการของอาร์เรเนียส ได้ผลดังแสดง ในภาพที่ 32



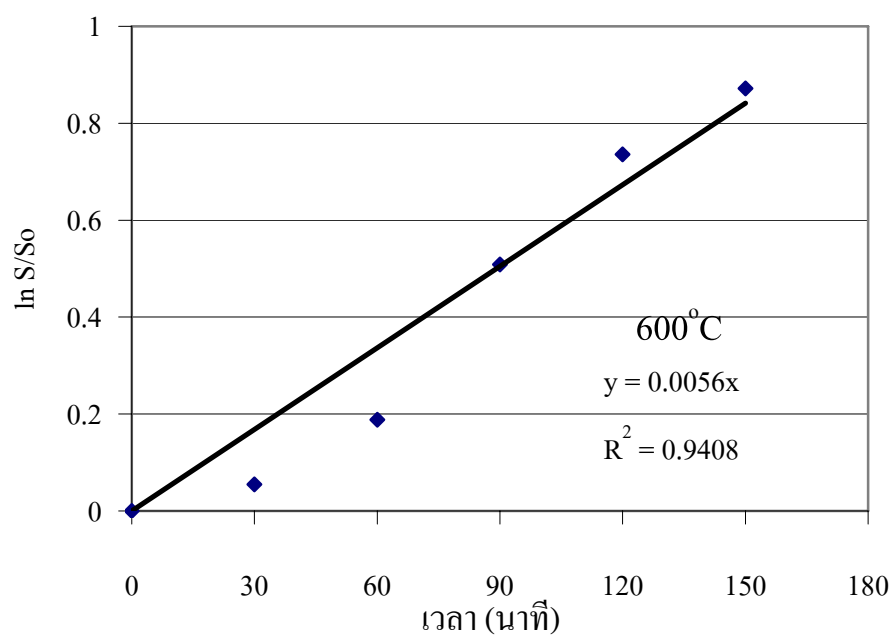
ภาพที่ 32 ค่า $\ln k$ กับค่า $1/T$ ของการกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ กรณี $n \neq 1$

จากภาพที่ 32 สามารถทราบค่าพลังงานการกระตุ้นเท่ากับ $2,906.4R$ หรือ $24,164$ จูลต่อโมล ค่า frequency ของกระบวนการกระตุ้นเท่ากับ $\exp(-1.810)$ หรือ 0.164 นาที⁻¹ ที่อุณหภูมิ 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส ณ ช่วงเวลา 0 ถึง 150 นาที และที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ณ ช่วงเวลา 0 ถึง 120 นาที ได้แสดงดังสมการที่ 55

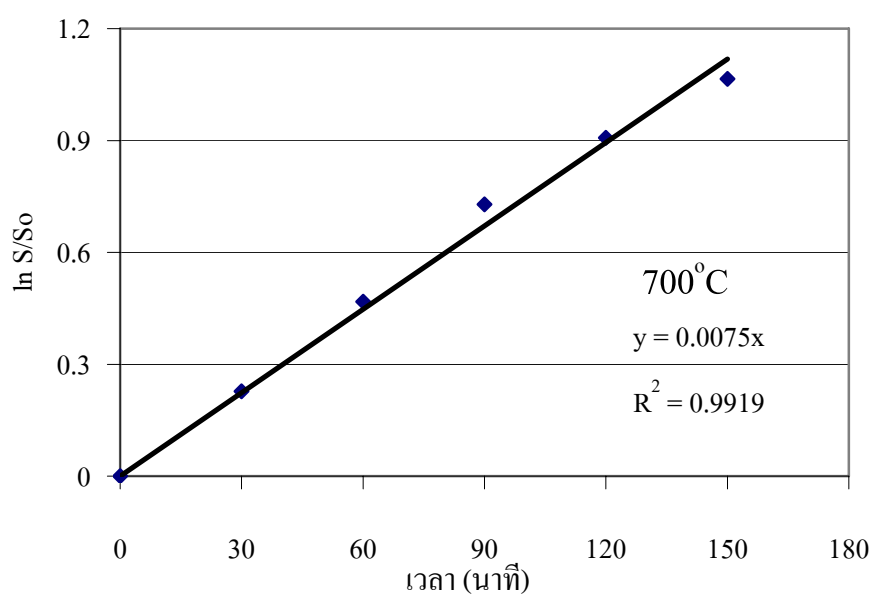
$$k = 0.164e^{-24,164/RT} \quad , \quad n \neq 1 \quad (55)$$

1.2 กรณี $n = 1$

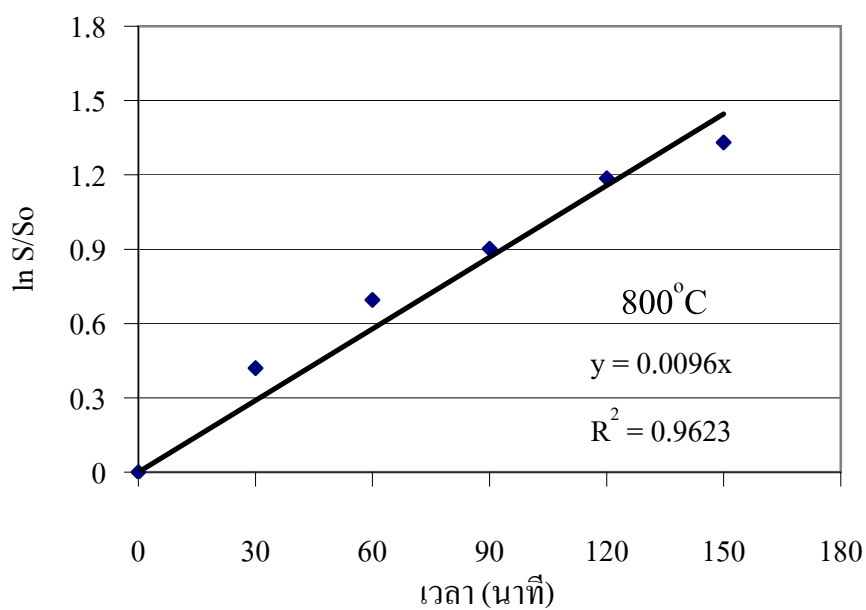
เมื่อพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคาร์บอน ที่อุณหภูมิ 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส ณ เวลาระหว่าง 0 ถึง 150 นาที และที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ณ ช่วงเวลา 0 ถึง 120 นาที ในกรณีที่ $n \neq 1$ พบว่าอันดับของปฏิกิริยาเป็น 1 ± 0.1 ซึ่งใกล้เคียง 1 มาก ฉะนั้นจึงสามารถใช้โมเดล $n = 1$ ได้ โดยใช้สมการที่ 42 ในการพิจารณาเมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\ln S/S_0$ กับเวลา (t) ความชันของกราฟคือ k เมื่อพิจารณาแต่ละอุณหภูมิการทดลองจะได้ผลดังภาพที่ 33 ถึงภาพที่ 36 และเมื่อนำมาเขียนเปรียบเทียบได้ดังภาพที่ 37



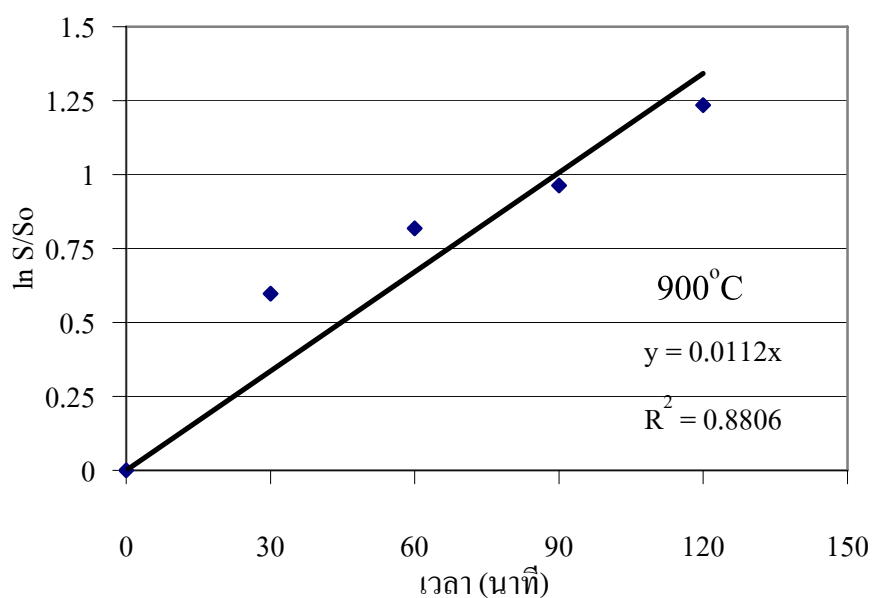
ภาพที่ 33 ค่า $\ln S/S_0$ กับเวลา t ที่กระตุ้นโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ณ เวลาระหว่าง 0 ถึง 150 นาที



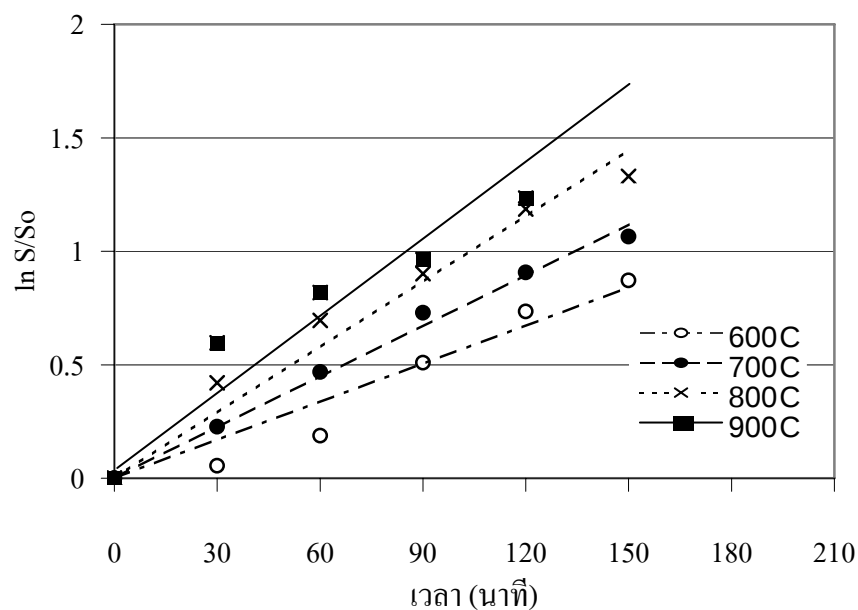
ภาพที่ 34 ค่า $\ln S/S_0$ กับเวลา t ที่กระตุ้นโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ณ เวลาระหว่าง 0 ถึง 150 นาที



ภาพที่ 35 ค่า $\ln S/S_0$ กับเวลา t ที่กระตุ้นโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ณ เวลาระหว่าง 0 ถึง 150 นาที



ภาพที่ 36 ค่า $\ln S/S_0$ กับเวลา t ที่กระตุ้นโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ณ เวลาระหว่าง 0 ถึง 120 นาที



ภาพที่ 37 ค่า $\ln S/S_0$ กับเวลา t ที่กระตุ้นโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ

ภาพที่ 33 ถึงภาพที่ 36 สามารถนำมาเขียนสมการอัตราการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคาร์บอนในการผลิตถ่านกัมมันต์ ซึ่งพิจารณาจากค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ในกระบวนการกระตุ้น ดังแสดงในสมการที่ 56 ถึง สมการที่ 59

ณ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ณ เวลา 0 ถึง 150 นาที

$$\frac{dS}{dt} = 0.0056S = Ae^{-E/RT}S \quad (\text{ตารางเมตรต่อกรัม.นาที}) \quad (56)$$

ณ อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ณ เวลา 0 ถึง 150 นาที

$$\frac{dS}{dt} = 0.0075S = Ae^{-E/RT}S \quad (\text{ตารางเมตรต่อกรัม.นาที}) \quad (57)$$

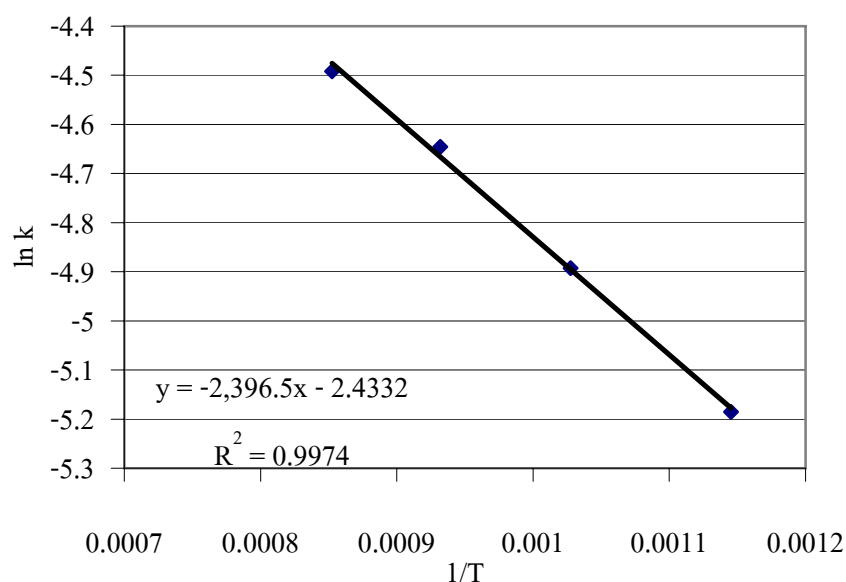
ณ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ณ เวลา 0 ถึง 150 นาที

$$\frac{dS}{dt} = 0.0096S = Ae^{-E/RT}S \quad (\text{ตารางเมตรต่อกรัม.นาที}) \quad (58)$$

ณ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ณ เวลา 0 ถึง 120 นาที

$$\frac{dS}{dt} = 0.0112S = Ae^{-E/RT}S \quad (\text{ตารางเมตรต่อกรัม.นาที}) \quad (59)$$

จากสมการที่ 40 ซึ่งเป็นแบบจำลองโมเดลที่ใช้ในการอธิบายจลนศาสตร์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ เป็นไปตามกฎของอาร์เรเนียส (Arrhenius) สามารถหาค่า E และ A ได้โดยนำค่า k ที่ได้จากสมการ 56 ถึง 59 มาทำการเขียนกราฟระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ ซึ่งจะได้ค่าความชันคือ $-E/R$ และจุดตัดแกนคือ $\ln A$



ภาพที่ 38 ค่า $\ln k$ กับค่า $1/T$ ของการกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ
กรณี $n = 1$

จากภาพที่ 38 สามารถทราบค่าพลังงานการกระตุ้นเท่ากับ $2,396.5R$ หรือ $19,925$ จูลต่อโมล ค่า frequency ของกระบวนการกระตุ้นเท่ากับ $\exp(-2.4332)$ หรือ 0.088 นาที⁻¹ ที่อุณหภูมิ 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส ณ ช่วงเวลา 0 ถึง 150 นาที และที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ณ ช่วงเวลา 0 ถึง 120 นาที ได้แสดงดังสมการที่ 60

$$\frac{dS}{dt} = 0.088e^{-19,925/RT}S \quad (\text{ตารางเมตรต่อกรัม.นาที}) \quad (60)$$

การเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น

ในการวิจัยเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มนั้น ได้มีนักวิจัยทำการศึกษาทั้งในประเทศและต่างประเทศ ซึ่งในการวิจัยก็มีสภาวะและคุณสมบัติต่างๆ ที่ได้แตกต่างกัน ดังนั้นจึงได้ทำการเปรียบเทียบงานวิจัยต่างๆ ที่ได้ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มกับงานวิจัยนี้ ดังแสดงในตารางที่ 8 และตารางที่ 9

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นในประเทศ

	งานวิจัยนี้	ธีระชัย (2541)	วรารุณี (2541)	สุรัชชัย (2542)
การคาร์บอนในเซชัน	N ₂ 1 ลิตร/นาที	air 0.72 ลิตร/นาที	ไมโครเวฟ	air
อุณหภูมิ (°C)	450	750	400	300
เวลา (นาที)	30	30	60	30
คุณสมบัติถ่านชาร์				
%ผลได้	33.78	-	30.06	23.81
%สารระเหย	22.01	-	25.22	21.78
%ปริมาณเถ้า	3.67	-	10.22	3.36
%คาร์บอนคงตัว	72.80	-	63.34	74.86
การกระตุ้น	steam 0.88 ลิตร/นาที	air and steam 0.72 ลิตร/นาที	CO ₂ 0.2 ลิตร/นาที	steam
อุณหภูมิ (°C)	800	750	400	850
เวลา (นาที)	150	120	90	6
คุณสมบัติถ่านกัมมันต์				
%ผลได้	27.01	12.18	81.23	5.63
%ความชื้น	1.26	-	-	-
%สารระเหย	13.06	-	5.90	-
%ปริมาณเถ้า	6.89	7.54	4.28	5.49
ความหนาแน่นปรากฏ (กรัม/ลบ.ซม.)	0.5108	0.5017	0.524	0.548
ค่าการดูดซับไอโอไดีน (มล.กรัม/กรัม)	741.8	766.99	411.27	403.99
พื้นที่ผิว (ตร.ม./กรัม)	721.8	669.75	476.64	284.36

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นในต่างประเทศ

	งานวิจัยนี้	Aik <i>et al.</i> (2005)	Jia <i>et al.</i> (2001)
การคาร์บอนในเซชัน	N ₂ 1 ลิตร/นาที่	N ₂ 0.15 ลิตร/นาที่	N ₂ 0.15 ลิตร/นาที่
อุณหภูมิ (°C)	450	600	600
เวลา (นาที่)	30	120	180
คุณสมบัติด้านสาร			
%ผลได้	33.78	36.61	-
%สารระเหย	22.01	15.99	-
%ปริมาณเถ้า	3.67	2.50	-
%คาร์บอนคงตัว	72.80	73.99	-
การกระตุ้น	steam 0.88 ลิตร/นาที่	CO ₂ 0.1 ลิตร/นาที่	CO ₂ 0.1 ลิตร/นาที่
อุณหภูมิ (°C)	800	900	900
เวลา (นาที่)	150	30	30
คุณสมบัติด้านกัมมันต์			
%ผลได้	27.01	26.88	-
%ความชื้น	1.26	-	-
%สารระเหย	13.06	5.70	-
%ปริมาณเถ้า	6.89	3.56	9.5
ความหนาแน่นปรากฏ (กรัม/ลบ.ซม.)	0.5108	-	-
ค่าการดูดซับไอโอซิน (มล.กรัม/กรัม)	741.8	-	-
พื้นที่ผิว (ตร.ม./กรัม)	721.8	519	1,366

การเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นทั้งในประเทศและต่างประเทศ ดังแสดงในตารางที่ 8 และตารางที่ 9 เมื่อเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของธีระชัย พบว่าในกระบวนการคาร์บอนในเซชันใช้อากาศที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งใช้อุณหภูมิมากกว่างานวิจัยนี้ แต่ใช้เวลาในการคาร์บอนในเซชันเท่ากัน สำหรับกระบวนการกระตุ้นใช้อากาศกับไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที ซึ่งใช้อุณหภูมิและเวลาน้อยกว่างานวิจัยนี้ และค่าพื้นที่ผิวที่ได้มีค่าน้อยกว่างานวิจัยนี้ เมื่อเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของวรารุติ พบว่าทำการคาร์บอนในเซชันในไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ซึ่งใช้อุณหภูมิน้อยกว่างานวิจัยนี้แต่ใช้เวลาในการคาร์บอนในเซชันมากกว่า สำหรับกระบวนการกระตุ้นใช้แก๊สคาร์-

บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ซึ่งใช้อุณหภูมิและเวลาน้อยกว่างานวิจัยนี้ และค่าพื้นที่ผิวที่ได้มีค่าน้อยกว่างานวิจัยนี้ เมื่อเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของสุรัชย์ พบว่าในการคาร์บอนในเซชันใช้อากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งใช้อุณหภูมิน้อยกว่างานวิจัยนี้แต่ใช้เวลาในการคาร์บอนในเซชันเท่ากัน สำหรับกระบวนการกระตุ้นใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที ซึ่งใช้อุณหภูมิมากกว่าแต่เวลาน้อยกว่างานวิจัยนี้มาก ซึ่งค่าพื้นที่ผิวที่ได้มีค่าน้อยกว่างานวิจัยนี้

ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับเกรดทางการค้า

	มอก. 900 2532	Atlas Darco 300	Westvaco 8x10	งานวิจัยนี้
<u>Physical Properties</u>				
surface area, m ² /g	-	600-650	850	721.8
Apparent density, g/cc	> 0.36	0.38	-	0.5108
Partical density, g/cc	-	0.67	1.4	-
Pore volume, cc/g	-	0.98	-	-
Mean particle size, mm	-	1.05	-	1.40-2.36
<u>Specification</u>				
Sieve size(U.S.Std.Series)				
Larger than NO.8-Max%	-	-	2	-
Larger than NO.12-Max%	-	5	-	-
Smaller than NO.30-Max%	-	-	1	-
Smaller than NO.40-Max%	-	5	-	-
Iodine number (mg/g)	> 600	650	850	741.8
Abrasion NO.,minimum	> 70	-	70	-
Ash, %	-	-	7	6.89
Moisture as packed, max, %	< 8	-	2	1.26

เมื่อเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของต่างประเทศ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับงานของ Aik *et al.* พบว่าในกระบวนการคาร์บอนในเซชันใช้ในโตรเจนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที ซึ่งใช้อุณหภูมิและเวลามากกว่างานวิจัยนี้ สำหรับกระบวนการกระตุ้นใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งใช้อุณหภูมิมากกว่าแต่เวลา

น้อยกว่างานวิจัยนี้มาก ซึ่งค่าพื้นที่ผิวที่ได้มีค่าน้อยกว่างานวิจัยนี้ และเมื่อเปรียบเทียบกับงานของ Jia *et al.* พบว่าในกระบวนการคาร์บอนในเซชันใช้ในโตรเจนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที ซึ่งใช้อุณหภูมิและเวลามากกว่างานวิจัยนี้ สำหรับกระบวนการกระตุ้นใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งใช้อุณหภูมิมากกว่าแต่เวลาน้อยกว่างานวิจัยนี้มาก ซึ่งค่าพื้นที่ผิวที่ได้มีค่ามากกว่างานวิจัยนี้ เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุในแต่ละประเทศแตกต่างกันและตัวกระตุ้นที่ใช้ก็แตกต่างกันด้วย เป็นผลให้สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มแตกต่างกันไปตามแต่วัสดุและตัวกระตุ้นที่ใช้ โดยภาพรวมแล้วกระบวนการคาร์บอนในเซชันใช้เวลายาวต่อด้วยการกระตุ้นในเวลาสั้นจะให้พื้นที่ผิวสูงกว่ากระบวนการคาร์บอนในเซชันเวลาสั้นต่อด้วยการกระตุ้นในเวลายาวที่ได้พื้นที่ผิวน้อย

จากตารางที่ 10 เมื่อพิจารณาคุณสมบัติถ่านกัมมันต์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ อยู่ในมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก. 900 2532) และเมื่อเปรียบคุณสมบัติถ่านกัมมันต์กับเกรดการค้าพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีมาตรฐานใกล้เคียงกับเกรดการค้าที่ผลิตจากกะลามะพร้าว ซึ่งในการเลือกเกรดถ่านกัมมันต์นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะที่จะนำไปใช้ประโยชน์ว่าต้องการคุณสมบัติใดบ้าง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. สถานะที่เหมาะสมของกระบวนการคาร์บอนในเขชันในการผลิตถ่านชาร์

สถานะที่เหมาะสมในกระบวนการคาร์บอนในเขชันในการผลิตถ่านชาร์โดยใช้แก๊สไนโตรเจน คือ ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที โดยมีสมบัติดังนี้ ร้อยละของผลได้เท่ากับ 33.78 ร้อยละของความชื้นเท่ากับ 5.19 ร้อยละของสารระเหยเท่ากับ 22.01 ร้อยละปริมาณเถ้าเท่ากับ 3.67 ร้อยละคาร์บอนคงตัวเท่ากับ 74.32

จากการวิเคราะห์พบว่าอุณหภูมิและเวลามีลักษณะเป็นไปในทางเดียวกันคือ เมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้นค่าผลได้ ค่าความชื้น และปริมาณสารระเหยของถ่านชาร์มีค่าลดลง แต่ปริมาณเถ้าและคาร์บอนคงตัวของถ่านชาร์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความชื้นและสารระเหยได้ระเหยออกจากกะลาปาล์มมากขึ้น เป็นผลให้ถ่านชาร์มีค่าผลได้ ความชื้น และปริมาณสารระเหยลดลง ส่วนปริมาณเถ้าและค่าคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น

2. สถานะที่เหมาะสมของกระบวนการกระตุ้นในการผลิตถ่านกัมมันต์

สถานะที่เหมาะสมในกระบวนการกระตุ้นในการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ไอน้ำร้อนยังยวด คือ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที โดยมีสมบัติดังนี้ ร้อยละของผลได้เท่ากับ 27.61 ร้อยละของความชื้นเท่ากับ 1.26 ร้อยละของสารระเหยเท่ากับ 13.06 ร้อยละปริมาณเถ้าเท่ากับ 6.89 ค่าความหนาแน่นปรากฏเท่ากับ 0.5108 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 741.8 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 721.8 ตารางเมตรต่อกรัม

จากการวิเคราะห์พบว่าอุณหภูมิและเวลามีลักษณะเป็นไปในทางเดียวกันคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและเวลาเพิ่มขึ้นค่าผลได้ ค่าความชื้น ปริมาณสารระเหย และความหนาแน่นปรากฏของถ่านกัมมันต์มีค่าลดลง ปริมาณเถ้าและคาร์บอนคงตัวของถ่านกัมมันต์มีค่าเพิ่มขึ้น และค่าพื้นที่ผิว ค่าการดูดซับไอโอดีนมีค่าเพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุดค่าหนึ่งแล้วค่าพื้นที่ผิวและค่าการดูดซับจึงลดลง เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิและเวลาการกระตุ้นเพิ่มขึ้นแก๊สไนโตรเจนผ่านเข้าไปในกะลาปาล์มได้นาน

ขึ้น เป็นผลให้ความชื้นและสารระเหยได้ระเหยออกจากถ่านชาร์มากขึ้น ทำให้ค่าผลได้ ค่าความชื้น ปริมาณสารระเหย และความหนาแน่นปรากฏจึงลดลง ปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้น การที่สารระเหยได้ระเหย ออกไปมากทำให้เกิดรูพรุนในถ่านกัมมันต์มากขึ้น เป็นผลให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น ดังนั้นจึงมีพื้นที่ผิว ในการดูดซับสารไอโอดีนมาก และที่อุณหภูมิมากที่ 800 องศาเซลเซียส ณ เวลามากกว่า 150 นาที และอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ณ เวลาที่มากกว่า 120 นาที ค่าพื้นที่ผิวและค่าการดูดซับไอโอดีน ลดลง เนื่องจากรูพรุนขนาดกลางในเนื้อถ่านขยายขนาดจนผนังทะลุถึงกันเกิดการรวมตัวกันเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น เป็นผลให้ค่าพื้นที่ผิวลดลงและทำให้การดูดซับไอโอดีนลดลง

3. อัตราการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคาร์บอนในการผลิตถ่านกัมมันต์

ในการทดลองหาอัตราการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคาร์บอนในการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยพิจารณาจากค่าพื้นที่ผิว ซึ่งใช้กรณีที่อันดับของปฏิกิริยาเป็น 1 สามารถทราบค่าพลังงานการ กระตุ้นเท่ากับ 2,396.5R หรือ 19,925 จูลต่อโมล ค่า frequency ของกระบวนการกระตุ้นเท่ากับ $\exp(-2.4332)$ หรือ 0.088 นาที⁻¹ ที่อุณหภูมิ 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส ณ ช่วงเวลา 0 ถึง 150 นาที และที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ณ ช่วงเวลา 0 ถึง 120 นาที ได้แสดงดังสมการที่ 61

$$\frac{dS}{dt} = 0.088e^{-19,925/RT} S \quad (\text{ตารางเมตรต่อกรัม.นาที}) \quad (61)$$

4. การเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น

การเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นทั้งในและต่างประเทศ พบว่างานวิจัยนี้ใช้อุณหภูมิ และเวลาที่มากกว่าในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม เนื่องมาจากวิธีการผลิตและตัวกระตุ้นที่ แตกต่างกัน แต่ค่าพื้นที่ผิวของงานวิจัยนี้มีค่ามากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ ต่างประเทศ พบว่างานวิจัยนี้ใช้อุณหภูมิน้อยกว่าและเวลามากกว่า ซึ่งพื้นที่ผิวที่ได้มีค่ามากกว่าของ Aik แต่น้อยกว่า Jia Guo เป็นเช่นนี้เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุในแต่ละประเทศแตกต่างกันและ ตัวกระตุ้นที่ใช้ก็แตกต่างกันด้วย เป็นผลให้สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลา ปาล์มแตกต่างกันไปตามแต่ละวัสดุและตัวกระตุ้นที่ใช้ และถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากงานวิจัยนี้อยู่ใน มาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก. 900 2532) และมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับเกรดทางการค้าที่ผลิตจาก กะลามะพร้าว จึงสามารถพัฒนาการผลิตในเชิงพาณิชย์ได้ต่อไปในอนาคต

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้วัตถุดิบอื่นๆ ที่เป็นของเหลือใช้ เพื่อเป็นการสร้างคุณค่าและเกิดประโยชน์สูงสุด
2. ในกระบวนการคาร์บอนเซชัน จะได้ของเสียออกมาจากกระบวนการ เช่น น้ำมันทาร์ ดังนั้นควรมีการศึกษาถึงการนำของเสียไปใช้ประโยชน์ต่อไป
3. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการหาอัตราการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคาร์บอนในการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์แบบอื่นอธิบายอัตราการเกิดของปฏิกิริยา เช่น การหาอัตราการเปลี่ยนแปลงรูพรุน ค่าไอโอดีน เพื่อนำมาประยุกต์ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ต่อไป
4. ควรมีการศึกษาความแข็งแรงเชิงกลของโครงสร้างรูพรุนในถ่านกัมมันต์ เพื่อจะได้นำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้นำไปใช้ประโยชน์กับงานที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการแตกหักง่าย
5. ควรมีการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในการนำกะลาปาล์มมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มในเชิงพาณิชย์ต่อไป

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กรมกสิกรรม. 2539. ปาล์มน้ำมันโดยกองการค้นคว้าและทดลอง. พิมพ์ที่โรงพิมพ์ส่วนท้องถิ่น, กรุงเทพฯ.
- กรมศุลกากร. 2548. สถิติการนำเข้าและส่งออกของกรมศุลกากร. กรุงเทพฯ.
- เกสร นุตาลัย. 2531. รายงานการวิจัยการผลิตถ่านกัมมันต์จากดินพรุในห้องปฏิบัติการ1.
- ธีระชัย สุรวัดทนสกุล. 2541. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมันโดยไพโรไลซิสและการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นิชชรี นิลนนท์. 2540. การผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้โก้งกางด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวดและคาร์บอนไดออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- บุญชัย ตระกูลมหาชัย. 2536. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มโตลดในฟลูอิดไชด์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ภัทรา ปัญญาวัฒนกิจ. 2540. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมันโดยกระตุ้นด้วยไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยมหิดล.
- รติกร อิศระเสนีย์. 2538. การผลิตถ่านกัมมันต์จากยางยนต์ใช้แล้วโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรารุณี ประชาศิริสกุล. 2541. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมันโดยกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรพจน์ กนกกันหาพงษ์. 2544. การเพิ่มประสิทธิภาพถ่านกัมมันต์ในการดูดซับอูมิเนียมและเหล็กโดยเปอร์แมงกานต์ไอออน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- ศูนย์ธุรกิจอุตสาหกรรม. 2546. ถ่านกัมมันต์. ครั้งที่ 1. กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.
- สุรัชย์ สุวรรณแสงชูโต, ร.ต. 2542. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากต้นปาล์มน้ำมันโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวดในฟลูอิด์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม. 2532. มาตรฐานอุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์. มอก. 900-2532.
- อุไรวรรณ ธรรมรัตน์พคุณ. 2523. การทำถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลามะพร้าวโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ. ครั้งที่ 1. กองวิจัย กองวิทยาศาสตร์บริการ, กรุงเทพฯ.
- Aik, C.L., F.Y. Lua and J. Guo. 2005. Influence of pyrolysis conditions on pore development of oil-palm-shell activated carbons. **Journal analytical applied pyrolysis** 2006 (76): 96-102.
- Aik, C.L. and J. Guo. 1999. Activated carbon prepared from oil palm stone by one-step CO₂ activation for gaseous pollutant removal. **Carbon** 1999 (38): 1089-1097.
- Alejandro, R.S. and A.A. Elguezabal. 2001. CO₂ activation of char from Quercus agrifolia wood waste. **Carbon** 2001 (39): 1367-1377.
- Carrasco-Marin, F., M.A. Alvarez-Marino and C. Moreno-Castilla. Microporous activated carbon from a bituminous coal. **Fuel** 1996 (75): 966-970.
- Environmental Protection Agency. 1973. **Process Design Mannual for Carbon Adsorption**. 1 ed. National Environmental research Center, Cincinnati.
- Hassan, H., H. Rafsanjani , E. Jamshidi and M. Rostam-Abadi. A new mathematical for predicting char activation reaction. **Carbon** 2001(40): 1167-1171.
- Hassler and W. John. 1974. **Purification with activated carbon: Industrial commercial**

environmental. อธิบายที่ 2. Chemical Publishing, New York.

James, S.M. and H.B. Mark, Jr. 1971. **Activated carbon.** 1 ed. Marcel Dekker, New York.

Jankowska, H., A. Swiatkowski and J. Choma. 1991. **Active Carbon.** 1 ed. Ellis Horwood, English.

Jennifer, C.A., N.C. Baldini, E.B., L.B., E.L.B., J.G. Kramer and C.L. 1995. **Annual Book of ASTM Standards.** National Institute of Standard and Technology. (15.01): 607-687.

Jia, G. and A.C. Lua. 2001. Microporous oil-palm-shell activated carbon prepared by physical activation for gas-phase adsorption. **Langmuir** 2001 (17): 7112-7117.

Kawabata, J.I., T. Yonesiro, M. Shigeo and N. Kazuhiko. 1975. **Method for manufacture of activated carbon and apparatus therefor.** 1 ed. United States Patent,

Kunii, D. and O. Levenspiel. 1969. **Fluidization engineering.** 2 ed. Jonh Wiley and Sons Inc, New York.

Lozano-Castello, D., M.A. Lillo-Rodenas, D. Cazorla-Amoros and A. Linares-Solano. 2001. Preparation of activated carbon from Spanish anthracite I. Activation by KOH. **Carbon** 2001 (39): 741-749.

Manocha, S., V.B. Chauham and L.M. Manocha. 2002. Porosity development on activation of char dry and wet babbool wood. **Carbon Science** 2002 (3): 133-141.

Phaengkham, M. and N. Yoshi. 1995. Preparation of high quality power activated carbon from coconut shell char. **Thailand Institute of Scientific and Technological Research.**

Rodriguez-Reinoro, F. and Linares-Solano. 1965. Microporous structure of Activated Carbon

as revealed by Adsorption method. **Chemistry and Physics of Carbon: A Series of Advances**. 1965(21): 1-37 .

Sainz-Diaz, C.I. and A.J. Griffiths. 2000. Activated carbon from solid wastes using a pilot scale batch flaming pyrolyser. **Fuel** 2000 (79): 123-129.

Ting, Y. and A.C. Lua. 2003. Characteristics of activated carbons prepared from pistachio-nut shells by physical activation. **Journal of colloid and Interface Science** 2003 (267): 408-417.

Wan Daud, W.M.A., W.S. Wan Ali, and M.Z. Sulaiman. 2000. The effect of carbonization temperature on pore development in palm-shell-based activated carbon. **Carbon**. (38):1925-1932.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

สถิติการนำเข้าและส่งออกถ่านกัมมันต์

ตารางผนวกที่ ก1 สถิติการนำเข้าถ่านกัมมันต์ในประเทศ

ปี(พ.ศ.)	ปริมาณการนำเข้า(ตัน)	มูลค่าการนำเข้า(ล้านบาท)	ราคาเฉลี่ย(บาท/ตัน)
2530	2092	51.48	24608.03
2531	1932	52.31	27075.57
2532	2650	72.24	27260.38
2533	2322	75.31	32433.25
2534	2642	75.95	28747.16
2535	2707	101.42	37465.83
2536	2908	96.31	33118.98
2537	2816	103.19	36644.18
2538	2883	124.61	43222.34
2539	3047	100.84	33094.85
2540	3598	127.14	35336.30
2541	3141	114.68	36511.09
2542	2646	90.26	34111.48
2543	2854	105.24	36875.64
2544	3056	102.64	33586.67
2545	3208	121.57	37896.23
2546	2987	119.95	40156.78
2547	3198	134.28	41988.56
2548	3325	149.21	44875.23

ที่มา: กรมศุลกากร (2548)

ตารางผนวกที่ ก2 สถิติการส่งออกถ่านกัมมันต์ในประเทศ

ปี(พ.ศ.)	ปริมาณการนำออก(ตัน)	มูลค่าการนำออก(ล้านบาท)	ราคาเฉลี่ย(บาท/ตัน)
2530	358	10.13	28269.09
2531	261	8.12	31111.11
2532	775	27.66	35690.32
2533	664	25.00	37650.60
2534	1056	36.45	34517.05
2535	1027	34.01	33115.87
2536	479	15.89	33173.28
2537	522	18.25	34961.69
2538	1765	48.26	27342.78
2539	2937	75.68	25767.79
2540	2807	99.37	35400.78
2541	2737	120.32	43958.72
2542	2777	98.66	35527.98
2543	2945	110.56	37542.68
2544	2856	101.94	35692.45
2545	2963	111.32	37568.63
2546	3017	115.29	38213.48
2547	3111	126.19	40562.77
2548	3398	148.12	43587.16

ที่มา: กรมศุลกากร (2548)

ภาคผนวก ข
วิธีการวิเคราะห์ถ่านกัมมันต์

วิธีวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์

1. วิธีวิเคราะห์ค่าความชื้น

วิเคราะห์ปริมาณความชื้นในถ่านกัมมันต์ตามวิธี ASTM D 2867-95 มีรายละเอียดการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

1. บดและคัดขนาดตัวอย่างให้ผ่านตะแกรงร่อนขนาด NO.20 mesh
2. ชั่ง crucible พร้อมฝาปิด (B) ที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส และรู้น้ำหนักที่แน่นอนแล้ว
3. ชั่งตัวอย่างถ่าน 1-2 กรัม ให้มีความละเอียดถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง ใส่ใน crucible พร้อมฝาปิด นำมาชั่งน้ำหนัก (C)
4. นำมาอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 145–155 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ (ประมาณ 3 ชั่วโมง) ทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก (D) และคำนวณค่าความชื้นได้จากสูตร

$$\text{ค่าความชื้น, \%} = \left[\frac{(C - D)}{(C - B)} \right] * 100 \quad (62)$$

โดยที่ B คือ น้ำหนักของ crucible พร้อมฝา

C คือ น้ำหนักของ crucible พร้อมฝารวมกับน้ำหนักถ่านก่อนอบ (กรัม)

D คือ น้ำหนักของ crucible พร้อมฝารวมกับน้ำหนักถ่านหลังอบ (กรัม)

2. วิธีวิเคราะห์ค่าสารระเหย

วิเคราะห์ปริมาณความชื้นในถ่านกัมมันต์ตามวิธี ASTM D 5832-95 มีรายละเอียดการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

1. บดและคัดขนาดตัวอย่างให้ผ่านตะแกรงร่อนขนาด NO.20 mesh
2. ชั่ง crucible พร้อมฝาปิด (B) ที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส และรู้น้ำหนักที่แน่นอนแล้ว

3. ชั่งตัวอย่างถ่าน 1 กรัม ให้มีความละเอียดถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง ใส่ในครุชีเบลพร้อมฝาปิด นำมาชั่งน้ำหนัก (C)

4. นำมาเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 950 ± 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที ทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก (D) และคำนวณค่าความชื้นได้จากสูตร

$$\text{น้ำหนักที่หาย, \%} = \left[\frac{(C - D)}{(C - B)} \right] * 100 \quad (63)$$

$$\text{สารระเหย, \%} = \% \text{น้ำหนักที่หาย} - \% \text{ความชื้น} \quad (64)$$

โดยที่ B คือ น้ำหนักของครุชีเบลพร้อมฝา

C คือ น้ำหนักของครุชีเบลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักถ่านก่อนเผา (กรัม)

D คือ น้ำหนักของครุชีเบลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักถ่านหลังเผา (กรัม)

3. วิธีวิเคราะห์ปริมาณเถ้า

วิเคราะห์ปริมาณความชื้นในถ่านกัมมันต์ตามวิธี ASTM D 2866-94 มีรายละเอียดการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

1. บดและคัดขนาดตัวอย่างให้ผ่านตะแกรงร่อนขนาด NO.20 mesh
2. ชั่งครุชีเบลพร้อมฝาปิด (B) ที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และรู้น้ำหนักที่แน่นอนแล้ว
3. ชั่งตัวอย่างถ่านที่อบแห้งแล้วที่ 150 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่ (ประมาณ 3 ชั่วโมง) 0.1 กรัม ให้มีความละเอียดถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง ใส่ในครุชีเบล นำมาชั่งน้ำหนัก (C)
4. นำมาเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 650 ± 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ถึง 16 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก (D) และคำนวณค่าความชื้นได้จากสูตร

$$\text{ปริมาณเถ้า, \%} = \left[\frac{(D - B)}{(C - B)} \right] * 100 \quad (65)$$

โดยที่ B คือ น้ำหนักของครุชีเบล

C คือ น้ำหนักของครุชิวเบลรวมกับน้ำหนักถ่านก่อนเผา (กรัม)

D คือ น้ำหนักของครุชิวเบลรวมกับน้ำหนักถ่านหลังเผา (กรัม)

4. วิธีวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นปรากฏ

วิเคราะห์ปริมาณความชื้นในถ่านกัมมันต์ตามวิธี ASTM D 2854-96 มีรายละเอียดการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

1. อบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 110-120 องศาเซลเซียส ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในหม้อสุญญากาศ
2. ชั่งน้ำหนักกระบอกตวงที่มีความจุ 10 มิลลิเมตร ให้มีความละเอียดถึงทศนิยม 2 ตำแหน่ง (X_0)
3. ใส่ตัวอย่างในกระบอกตวงจนเกือบเต็ม กระแทกกันกระบอกตวงบนแผ่นยางจนกระทั่งระดับของตัวอย่างในกระบอกตวงคงที่ จนกว่าจะได้ระดับที่คงที่เป็น 10 มิลลิเมตร
4. ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างพร้อมกระบอกตวง บันทึกผล (X_1)

$$\text{ความหนาแน่นปรากฏ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)} = \left(\frac{X_1 - X_0}{10} \right) \quad (66)$$

X_0 = น้ำหนักกระบอกตวง (กรัม)

X_1 = น้ำหนักของตัวอย่างพร้อมกระบอกตวง (กรัม)

5. วิธีวิเคราะห์ค่าคาร์บอนคงตัว

$$\text{ค่าคาร์บอนคงตัว, \%} = 100 - \text{ปริมาณเถ้า} - \text{ค่าสารระเหย} \quad (67)$$

6. วิธีวิเคราะห์ค่าผลได้

$$\text{ค่าผลได้, \%} = \left(\frac{A}{B} \right) * 100 \quad (68)$$

โดยที่ A คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่ทดลองหลังเผา

B คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่ทดลองก่อนเผา

7. วิธีวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

วิเคราะห์ปริมาณความชื้นในถ่านกัมมันต์ตามวิธี ASTM D 4607-94 มีรายละเอียดการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

7.1 เตรียมสารละลาย

7.1.1 ไอโอดีนมาตรฐานเข้มข้น 0.1000 นอร์มัล ละลาย 12.7 กรัม ของไอโอดีน และ 19.1 กรัม ของโพแทสเซียมไอโอไดด์ ด้วยน้ำกลั่น 25 มิลลิเมตร จากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 1,000 มิลลิตร ด้วยน้ำกลั่น เก็บสารละลายที่ได้ในขวดสีชา

7.1.2 สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต เข้มข้น 0.1000 นอร์มัล

7.1.3 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยตวงกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 70 มิลลิตร ใส่ในน้ำกลั่นที่มีปริมาตร 550 มิลลิตร

7.1.4 น้ำแป้งเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยชั่งแป้ง 1 กรัม ละลายด้วยน้ำร้อนจนมีน้ำหนักเป็น 10 กรัม น้ำแป้งที่เตรียมได้จะใช้ภายในวันที่เตรียมเท่านั้น

7.2 การวิเคราะห์

7.2.1 บดและคัดขนาดตัวอย่างให้ละเอียดน้อยกว่า 325 เมช

7.2.2 อบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

7.2.3 ชั่งและบันทึกน้ำหนักตัวอย่าง ในขวดรูปชมพูนขนาด 250 มิลลิตร ซึ่งมีจุกปิด โดยน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ประมาณ 1-2 กรัม

7.2.4 ใส่สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 จำนวน 10 มิลลิตร ต้มให้เดือดประมาณ 30 วินาที แกว่งขวดเบาๆ เพื่อให้ผงถ่านกัมมันต์ทุกส่วนชุ่มด้วยสารละลายเพื่อกำจัดเถ้าหรือซัลเฟอร์ออกจากผิวของถ่านกัมมันต์

7.2.5 ใส่สารละลายไอโอดีน 100 มิลลิตร ปิดจุกแล้วเขย่าแรงๆ เป็นเวลา 30 วินาที

7.2.6 กรองสารละลายด้วยกระดาษกรอง ล้างปิเปตที่ใช้ดูดสารละลายด้วยสารละลายที่กรองได้ประมาณ 20 มิลลิตร

7.2.7 ผสมสารละลายที่ได้ให้เข้ากัน ดูดสารละลายที่กรองได้ 50 มิลลิตรด้วยปิเปต

7.2.8 ไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1 นอร์มัล โดยใช้น้ำแป้งเป็นอินดิเคเตอร์จนถึงจุดยุติ คือ สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีใส

7.2.9 คำนวณค่าการดูดซับไอโอดีน และความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายไอโอดีนจากสมการดังนี้

$$N_1 = (P * R) / S \quad (69)$$

$$N_2 = (S * N_1) / I \quad (70)$$

$$\frac{X}{M} = \frac{[A - (2.2 * B * S)]}{W} \quad (71)$$

$$C = \frac{(N_2 * S)}{50} \quad (72)$$

โดยที่ X / M คือ ค่าการดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)

N_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน

N_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต

A คือ $N_1 * 12693.0$

B คือ $N_2 * 126.93$

C คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่กรองได้

W คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้

S คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต

ภาคผนวก ค
ตัวอย่างการคำนวณหาค่าต่างๆ

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าต่างๆ

1. ตัวอย่างการคำนวณหาค่าผลได้

ในการคำนวณจะใช้ค่าต่างๆ จากตัวอย่างของกระบวนการคาร์บอนในเซชันจากกะลาปาล์ม เป็นถ่านชาร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ณ เวลา 30 นาที

$$\text{ค่าผลได้, \%} = \left(\frac{A}{B} \right) * 100 \quad (73)$$

โดยที่ A คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่ทดลองหลังเผา

B คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่ทดลองก่อนเผา

$$\text{ค่าผลได้, \%} = \left(\frac{76.5233}{180.0125} \right) * 100$$

$$\text{ค่าผลได้, \%} = 42.51$$

2. ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความชื้น

ในการคำนวณจะใช้ค่าต่างๆ จากตัวอย่างของกระบวนการคาร์บอนในเซชันจากกะลาปาล์ม เป็นถ่านชาร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ณ เวลา 30 นาที ในการทดลองครั้งที่ 1

$$\text{ค่าความชื้น, \%} = \left[\frac{(C - D)}{(C - B)} \right] * 100 \quad (74)$$

โดยที่ B คือ น้ำหนักของครุชีเบลพร้อมฝา

C คือ น้ำหนักของครุชีเบลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักถ่านก่อนอบ (กรัม)

D คือ น้ำหนักของครุชีเบลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักถ่านหลังอบ (กรัม)

$$\text{ค่าความชื้น, \%} = \left[\frac{(31.8532 - 31.7481)}{(31.8532 - 29.8843)} \right] * 100$$

$$\text{ค่าความชื้น, \%} = 5.34$$

3. ตัวอย่างการคำนวณหาค่าสารระเหย

ในการคำนวณจะใช้ค่าต่างๆ จากตัวอย่างของกระบวนการคาร์บอนในเซชันจากกะลาปาล์ม เป็นถ่านชาร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ณ เวลา 30 นาที ในการทดลองครั้งที่ 1

$$\text{น้ำหนักที่หาย, \%} = \left[\frac{(C - D)}{(C - B)} \right] * 100 \quad (75)$$

โดยที่ B คือ น้ำหนักของครุชเบลพร้อมฝา

C คือ น้ำหนักของครุชเบลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักถ่านก่อนเผา (กรัม)

D คือ น้ำหนักของครุชเบลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักถ่านหลังเผา (กรัม)

$$\text{น้ำหนักที่หาย, \%} = \left[\frac{(30.8561 - 30.5167)}{(30.8561 - 29.8843)} \right] * 100$$

$$\text{น้ำหนักที่หาย, \%} = 34.93$$

$$\text{สารระเหย, \%} = \% \text{น้ำหนักที่หาย} - \% \text{ความชื้น} \quad (76)$$

$$\text{สารระเหย, \%} = 34.93 - 5.34$$

$$\text{สารระเหย, \%} = 29.59$$

4. ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณเถ้า

ในการคำนวณจะใช้ค่าต่างๆ จากตัวอย่างของกระบวนการคาร์บอนในเซชันจากกะลาปาล์ม เป็นถ่านชาร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ณ เวลา 30 นาที ในการทดลองครั้งที่ 1

$$\text{ปริมาณเถ้า, \%} = \left[\frac{(D - B)}{(C - B)} \right] * 100 \quad (77)$$

โดยที่ B คือ น้ำหนักของครุชเชล

C คือ น้ำหนักของครุชเชลรวมกับน้ำหนักถ่านก่อนเผา (กรัม)

D คือ น้ำหนักของครุชเชลรวมกับน้ำหนักถ่านหลังเผา (กรัม)

$$\text{ปริมาณเถ้า, \%} = \left[\frac{(19.0715 - 19.0680)}{(19.1692 - 19.0680)} \right] * 100$$

$$\text{ปริมาณเถ้า, \%} = 3.41$$

5. ตัวอย่างการคำนวณหาค่าคาร์บอนคงตัว

ในการคำนวณจะใช้ค่าต่างๆ จากตัวอย่างของกระบวนการคาร์บอนในเซชันจากกะลาปาล์ม เป็นถ่านชาร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ณ เวลา 30 นาที ในการทดลองครั้งที่ 1

$$\text{ค่าคาร์บอนคงตัว, \%} = 100 - \text{ปริมาณเถ้า} - \text{ค่าสารระเหย} \quad (78)$$

$$\text{ค่าเฉลี่ยปริมาณเถ้า, \%} = 3.42$$

$$\text{ค่าเฉลี่ยค่าสารระเหย, \%} = 29.58$$

$$\text{ค่าคาร์บอนคงตัว, \%} = 100 - 3.42 - 29.58$$

6. ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความหนาแน่นปรากฏ

ในการคำนวณจะใช้ค่าต่างๆ จากตัวอย่างการกระตุ้นจากถ่านชาร์เป็นถ่านกัมมันต์ที่ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ณ เวลาการกระตุ้น 30 นาที ในการทดลองครั้งที่ 1

$$\text{ความหนาแน่นปรากฏ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)} = \left(\frac{X_1 - X_0}{10} \right) \quad (79)$$

$$\text{โดยที่ } X_0 = \text{น้ำหนักกระบอกตวง (กรัม)}$$

X_1 = น้ำหนักของตัวอย่างพร้อมกระบอกตวง (กรัม)

$$\text{ความหนาแน่นปรากฏ(กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)} = \left(\frac{X_1 - X_0}{10} \right)$$

$$\text{ความหนาแน่นปรากฏ(กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)} = \left(\frac{62.5466 - 56.6636}{10} \right)$$

$$\text{ความหนาแน่นปรากฏ(กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)} = 0.5883$$

7. ตัวอย่างการคำนวณหาค่าการดูดซับไอโอดีน

ในการคำนวณจะใช้ค่าต่างๆ จากตัวอย่างการกระตุ้นจากถ่านชาร์เป็นถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ณ เวลาการกระตุ้น 30 นาที ในการทดลองครั้งที่ 1

$$\frac{X}{M} = \frac{[A - (2.2 * B * S)]}{W} \quad (80)$$

$$C = \frac{(N_2 * S)}{50} \quad (81)$$

โดยที่ X / M คือ ค่าการดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)

N_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนเท่ากับ 0.1001

N_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเท่ากับ 0.1000

A คือ $N_1 * 12693.0$ เท่ากับ 1270.5693 มิลลิกรัม

B คือ $N_2 * 126.93$ เท่ากับ 12.693 มิลลิกรัม

C คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่กรองได้

W คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้

S คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต

$$C = \frac{(0.1000 * 12.2)}{50}$$

$$C = 0.0244 \text{ นอร์มัล}$$

$$\frac{X}{M} = \frac{[1270.5693 - (2.2 * 12.693 * 30.1)]}{2.1331}$$

$$\frac{X}{M} = 201.6 \text{ มิลลิกรัมต่อกรัม}$$

ภาคผนวก ง
ข้อมูลการทดลอง

1. ข้อมูลการทดลองในกระบวนการคาร์บอนในเซชัน

ตารางผนวกที่ ง1 ผลได้ของถ่านชาร์จากกระบวนการคาร์บอนในเซชัน ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาทึ)	น้ำหนักกะลา ปาล์มก่อนเผา (กรัม)	น้ำหนักถ่านชาร์ หลังเผา (กรัม)	ผลได้ของ ถ่านชาร์ (%)
250	30	180.0125	76.5233	42.51
	60	180.1142	72.2618	40.12
350	30	180.0975	69.4456	38.56
	60	180.1123	66.1192	36.71
450	30	180.0456	60.8194	33.78
	60	180.1542	55.9018	31.03
550	30	180.1068	57.8503	32.12
	60	180.0123	54.2017	30.11

ตารางผนวกที่ 2 ค่าความชื้นในถ่านชาร์จากระบวนการคาร์บอนในเซชัน ณ ที่อุณหภูมิและเวลา
ต่างๆ

ครั้งที่	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาท)	ถั่ว+ฟา (กรัม)	ถั่ว+ฟา+ตย. ก่อนอบ(กรัม)	ถั่ว+ฟา+ตย. หลังอบ (กรัม)	ความชื้น (%)
1	250	30	29.8843	31.8532	31.7481	5.34
		60	31.5424	33.5114	33.4072	5.29
	350	30	32.1882	34.1789	34.0740	5.27
		60	30.7287	32.7301	32.6258	5.21
	450	30	31.7309	33.6954	33.5940	5.16
		60	29.8711	31.8624	31.7606	5.11
	550	30	29.8843	31.8659	31.7654	5.07
		60	31.5424	33.5365	33.4366	5.01
2	250	30	29.9509	31.8975	31.7939	5.32
		60	32.3567	34.3612	34.2548	5.31
	350	30	30.2787	32.1203	32.0231	5.28
		60	32.914	34.9132	34.8084	5.24
	450	30	32.1613	34.1524	34.0491	5.19
		60	31.111	33.0923	32.9905	5.14
	550	30	32.1882	34.1657	34.0652	5.08
		60	30.7287	32.6945	32.5950	5.06
3	250	30	31.0258	33.0698	32.9609	5.33
		60	30.8506	32.7892	32.6865	5.3
	350	30	31.5907	33.5647	33.4597	5.32
		60	31.6469	33.6358	33.5316	5.24
	450	30	31.4589	33.4689	33.3640	5.22
		60	32.1275	34.2648	34.1537	5.2
	550	30	31.7309	33.7165	33.6148	5.12
		60	29.8711	31.8688	31.7679	5.05

ตารางผนวกที่ 3 ปริมาณสารระเหยในถ่านชาร์จากกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน ณ ที่ อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ

ครั้งที่	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาท)	ถั่ว+ฝ	ถั่ว+ฝ+ตย. ก่อนอบ (กรัม)	ถั่ว+ฝ+ตย. หลังอบ (กรัม)	น้ำหนัก หาย (%)	ความ ชื้น (%)	สาร ระเหย (%)
1	250	30	29.8843	30.8561	30.5167	34.93	5.34	29.59
		60	31.5424	32.5362	32.2115	32.67	5.29	27.38
	350	30	32.1882	33.1802	32.8776	30.5	5.27	25.23
		60	30.7287	31.7065	31.4274	28.54	5.21	23.33
	450	30	31.7309	32.7469	32.4706	27.19	5.16	22.03
		60	29.8711	30.8112	30.5847	24.09	5.11	18.98
	550	30	29.8843	30.8465	30.6366	21.81	5.07	16.74
		60	31.5424	32.5681	32.3725	19.07	5.01	14.06
2	250	30	29.9509	30.9458	30.5988	34.88	5.32	29.56
		60	32.3567	33.3624	33.0340	32.65	5.31	27.34
	350	30	30.2787	31.2987	30.9878	30.48	5.28	25.2
		60	32.914	33.9142	33.6287	28.54	5.24	23.3
	450	30	32.1613	33.1254	32.8635	27.17	5.19	21.98
		60	31.111	32.1365	31.8895	24.09	5.14	18.95
	550	30	32.1882	33.1547	32.9435	21.85	5.08	16.77
		60	30.7287	31.7456	31.5517	19.07	5.06	14.01
3	250	30	31.0258	32.0654	31.7024	34.92	5.33	29.59
		60	30.8506	31.8958	31.5560	32.51	5.3	27.21
	350	30	31.5907	32.5688	32.2700	30.55	5.32	25.23
		60	31.6469	32.6684	32.3766	28.57	5.24	23.33
	450	30	31.4589	32.4156	32.1550	27.24	5.22	22.02
		60	32.1275	33.1945	32.9368	24.15	5.2	18.95
	550	30	31.7309	32.7123	32.4969	21.95	5.12	16.83
		60	29.8711	30.8561	30.6683	19.07	5.05	14.02

ตารางผนวกที่ 4 แก๊สผ่านซาร์จากกระบวนการคาร์บอนในเซชัน ณ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

ครั้งที่	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาท)	ถั่ว (กรัม)	ถั่ว+ตย. ก่อนเผา(กรัม)	ถั่ว+ตย. หลังเผา (กรัม)	ปริมาณถั่ว (%)
1	250	30	19.068	19.1692	19.0715	3.41
		60	20.8465	20.9468	20.8500	3.44
	350	30	21.6033	21.7065	21.6069	3.5
		60	20.4817	20.5826	20.4853	3.59
	450	30	20.5191	20.6236	20.5229	3.64
		60	20.3536	20.4559	20.3575	3.81
	550	30	19.068	19.1688	19.0720	3.92
		60	20.8465	20.9489	20.8507	4.15
2	250	30	19.3536	19.4546	19.3570	3.4
		60	20.8556	20.9582	20.8591	3.43
	350	30	20.6883	20.7889	20.6918	3.51
		60	21.7463	21.8464	21.7499	3.63
	450	30	21.7151	21.8182	21.7189	3.67
		60	21.0572	21.1633	21.0613	3.85
	550	30	21.6033	21.7080	21.6074	3.95
		60	20.4817	20.5843	20.4860	4.18
3	250	30	20.4216	20.5240	20.4251	3.45
		60	20.7716	20.8752	20.7752	3.51
	350	30	21.3703	21.4710	21.3739	3.55
		60	20.9625	21.0659	20.9662	3.61
	450	30	21.1077	21.2142	21.1116	3.7
		60	21.4923	21.5927	21.4961	3.83
	550	30	20.5191	20.6241	20.5233	4.01
		60	20.3536	20.4545	20.3578	4.18

ตารางผนวกที่ 5 ค่าคาร์บอนคงตัวในถ่านชาร์จากระบวนการคาร์บอไนเซชัน ณ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	ปริมาณสาร ระเหย(%)	ถ่านชาร์ (%)	คาร์บอนคงตัว (%)
250	30	3.42	29.58	67.00
	60	3.46	27.31	69.23
350	30	3.52	25.22	71.26
	60	3.61	23.32	73.07
450	30	3.67	22.01	74.32
	60	3.83	18.96	77.21
550	30	3.96	16.78	79.29
	60	4.17	14.03	81.80

2. ข้อมูลการทดลองในกระบวนการกระตุ้น

ตารางผนวกที่ ๖ ค่าผลได้ในถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้น ณ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาท)	น้ำหนักกะลาปาล์ม ก่อนเผา (กรัม)	น้ำหนักถ่านกัม มันต์หลังเผา(กรัม)	ผลได้ของ ถ่านกัมมันต์(%)
600	30	180.01	57.2612	31.81
	60	180.0639	55.0635	30.58
	90	180.0085	52.9585	29.42
	120	180.0038	50.7791	28.21
	150	180.0878	50.0824	27.81
	180	180.0769	49.6292	27.56
700	30	180.0364	54.7131	30.39
	60	180.0111	53.4093	29.67
	90	180.0087	52.1305	28.96
	120	180.0837	50.2073	27.88
	150	180.0272	49.5075	27.50
	180	180.0285	48.4097	26.89
800	30	180.0011	53.6223	29.79
	60	180.0085	52.6885	29.27
	90	180.0055	51.7876	28.77
	120	180.0046	49.5553	27.53
	150	180.0114	48.6211	27.01
	180	180.0279	47.8334	26.57
900	30	180.0519	52.8632	29.36
	60	180.0183	51.9173	28.84
	90	180.0719	50.3841	27.98
	120	180.0245	48.7146	27.06
	150	180.0541	47.7684	26.53
	180	180.0098	47.2166	26.23

ตารางผนวกที่ ๗ ค่าความชื้นในถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้น ณ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ
ในการทดลองครั้งที่ 1

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาทื)	ถ้วย+ฝา (กรัม)	ถ้วย+ฝา+ตย. ก่อนอบ(กรัม)	ถ้วย+ฝา+ตย. หลังอบ (กรัม)	ความชื้น (%)
600	30	29.8843	31.8966	31.7972	4.94
	60	31.5424	33.5438	33.4687	3.75
	90	32.1882	34.1854	34.1237	3.09
	120	30.7287	32.7163	32.6640	2.63
	150	31.7309	33.7294	33.6882	2.06
	180	29.8711	31.9023	31.8653	1.82
700	30	29.8843	31.8855	31.7904	4.75
	60	31.5424	33.5466	33.4781	3.42
	90	32.1882	34.2038	34.1460	2.87
	120	30.7287	32.7274	32.6812	2.31
	150	31.7309	33.7174	33.6846	1.65
	180	29.8711	31.9076	31.8760	1.55
800	30	29.8843	31.8949	31.8076	4.34
	60	31.5424	33.5532	33.4883	3.23
	90	32.1882	34.1972	34.1411	2.79
	120	30.7287	32.726	32.6847	2.07
	150	31.7309	33.7869	33.7612	1.25
	180	29.8711	31.8727	31.8513	1.07
900	30	29.8843	31.8829	31.8042	3.94
	60	31.5424	33.5454	33.4841	3.06
	90	32.1882	34.2191	34.1687	2.48
	120	30.7287	32.7432	32.7079	1.75
	150	31.7309	33.7285	33.7073	1.06
	180	29.8711	31.8609	31.8406	1.02

ตารางผนวกที่ 8 ค่าความชื้นในถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้น ณ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ
ในการทดลองครั้งที่ 2

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาทื)	ถ้วย+ฝา (กรัม)	ถ้วย+ฝา+ตย. ก่อนอบ(กรัม)	ถ้วย+ฝา+ตย. หลังอบ (กรัม)	ความชื้น (%)
600	30	29.9509	31.9825	31.8819	4.95
	60	32.3567	34.3712	34.2963	3.72
	90	30.2787	32.2822	32.2199	3.11
	120	32.9140	34.9208	34.8682	2.62
	150	32.1613	34.1718	34.1300	2.08
	180	31.1110	33.1083	33.0710	1.87
700	30	29.9509	31.949	31.8539	4.76
	60	32.3567	34.3454	34.2770	3.44
	90	30.2787	32.375	32.3140	2.91
	120	32.9140	34.9446	34.8969	2.35
	150	32.1613	34.1778	34.1447	1.64
	180	31.1110	33.0989	33.0683	1.54
800	30	29.9509	32.0416	31.9515	4.31
	60	32.3567	34.3883	34.3229	3.22
	90	30.2787	32.3329	32.2760	2.77
	120	32.9140	34.9141	34.8725	2.08
	150	32.1613	34.1977	34.1729	1.22
	180	31.1110	33.1105	33.0881	1.12
900	30	29.9509	31.9477	31.8684	3.97
	60	32.3567	34.4371	34.3739	3.04
	90	30.2787	32.3101	32.2593	2.50
	120	32.9140	34.9297	34.8942	1.76
	150	32.1613	34.1711	34.1492	1.09
	180	31.1110	33.1166	33.0961	1.02

ตารางผนวกที่ 9 ค่าความชื้นในถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้น ณ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ
ในการทดลองครั้งที่ 3

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาทึ)	ถ้วย+ฝา (กรัม)	ถ้วย+ฝา+ตย. ก่อนอบ(กรัม)	ถ้วย+ฝา+ตย. หลังอบ (กรัม)	ความชื้น (%)
600	30	31.0258	33.0559	32.9552	4.96
	60	30.8506	32.8551	32.7805	3.72
	90	31.5907	33.5975	33.5353	3.10
	120	31.6469	33.6777	33.6229	2.70
	150	31.4589	33.4645	33.4218	2.13
	180	32.1275	34.2043	34.1650	1.89
700	30	31.0258	33.0256	32.9302	4.77
	60	30.8506	32.8404	32.7710	3.49
	90	31.5907	33.6013	33.5432	2.89
	120	31.6469	33.6477	33.6017	2.30
	150	31.4589	33.4603	33.4283	1.60
	180	32.1275	34.2182	34.1868	1.50
800	30	31.0258	33.0774	32.9890	4.31
	60	30.8506	32.8402	32.7769	3.18
	90	31.5907	33.5903	33.5353	2.75
	120	31.6469	33.6575	33.6149	2.12
	150	31.4589	33.4691	33.4428	1.31
	180	32.1275	34.1355	34.1132	1.11
900	30	31.0258	33.0903	33.0083	3.97
	60	30.8506	32.8613	32.8012	2.99
	90	31.5907	33.5971	33.5459	2.55
	120	31.6469	33.6547	33.6192	1.77
	150	31.4589	33.4574	33.4344	1.15
	180	32.1275	34.2094	34.1888	0.99

ตารางผนวกที่ 10 ค่าสารระเหยในถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้น ณ ที่อุณหภูมิและเวลา
ต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 1

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	ถ้วย+ฝา (กรัม)	ถ้วย+ฝา+ตย. ก่อนอบ (กรัม)	ถ้วย+ฝา+ตย. หลังอบ (กรัม)	น้ำหนัก หาย (%)	ความ ชื้น (%)	สาร ระเหย (%)
600	30	29.8843	30.9097	30.7031	20.15	4.94	15.21
	60	31.5424	32.5411	32.3536	18.77	3.75	15.02
	90	32.1882	33.2339	33.0473	17.84	3.09	14.75
	120	30.7287	31.7811	31.6052	16.71	2.63	14.08
	150	31.7309	32.7184	32.5646	15.57	2.06	13.51
	180	29.8711	30.8709	30.7230	14.79	1.82	12.97
700	30	29.8843	30.9096	30.7061	19.85	4.75	15.1
	60	31.5424	32.5789	32.3921	18.02	3.42	14.60
	90	32.1882	33.2360	33.0566	17.12	2.87	14.25
	120	30.7287	31.7946	31.6215	16.24	2.31	13.93
	150	31.7309	32.7851	32.6284	14.86	1.65	13.21
	180	29.8711	30.8947	30.7481	14.32	1.55	12.77
800	30	29.8843	30.9099	30.7128	19.22	4.34	14.88
	60	31.5424	32.5409	32.3657	17.55	3.23	14.32
	90	32.1882	33.1757	33.0105	16.73	2.79	13.94
	120	30.7287	31.7143	31.5586	15.8	2.07	13.73
	150	31.7309	32.7696	32.6212	14.29	1.25	13.04
	180	29.8711	30.9071	30.7650	13.72	1.07	12.65
900	30	29.8843	30.9391	30.7478	18.14	3.94	14.2
	60	31.5424	32.5968	32.4194	16.82	3.06	13.76
	90	32.1882	33.2544	33.0835	16.03	2.48	13.55
	120	30.7287	31.7142	31.5657	15.07	1.75	13.32
	150	31.7309	32.7191	32.5809	13.99	1.06	12.93
	180	29.8711	30.8676	30.7328	13.53	1.02	12.51

ตารางผนวกที่ 11 ค่าสารระเหยในถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้น ณ ที่อุณหภูมิและเวลา
ต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 2

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	ถ้วย+ฝา (กรัม)	ถ้วย+ฝา+ตย. ก่อนอบ (กรัม)	ถ้วย+ฝา+ตย. หลังอบ (กรัม)	น้ำหนัก หาย (%)	ความ ชื้น (%)	สาร ระเหย (%)
600	30	29.9509	30.9451	30.7445	20.18	4.95	15.23
	60	32.3567	33.3931	33.1986	18.77	3.72	15.05
	90	30.2787	31.3774	31.1808	17.89	3.11	14.78
	120	32.9140	33.9591	33.7843	16.73	2.62	14.11
	150	32.1613	33.1977	33.0355	15.65	2.08	13.57
	180	31.1110	32.1807	32.0217	14.86	1.87	12.99
700	30	29.9509	30.9734	30.7701	19.88	4.76	15.12
	60	32.3567	33.3597	33.1783	18.09	3.44	14.65
	90	30.2787	31.2992	31.1242	17.15	2.91	14.24
	120	32.9140	33.9500	33.7810	16.31	2.35	13.96
	150	32.1613	33.2018	33.0469	14.89	1.64	13.25
	180	31.1110	32.1332	31.9868	14.32	1.54	12.78
800	30	29.9509	30.9840	30.7857	19.19	4.31	14.88
	60	32.3567	33.3932	33.2114	17.54	3.22	14.32
	90	30.2787	31.2827	31.1148	16.72	2.77	13.95
	120	32.9140	33.9146	33.7565	15.80	2.08	13.72
	150	32.1613	33.1593	33.0167	14.29	1.22	13.07
	180	31.1110	32.1066	31.9697	13.75	1.12	12.63
900	30	29.9509	31.0169	30.8227	18.22	3.97	14.25
	60	32.3567	33.4023	33.2270	16.77	3.04	13.73
	90	30.2787	31.2827	31.1214	16.07	2.50	13.57
	120	32.9140	33.9492	33.7928	15.11	1.76	13.35
	150	32.1613	33.1936	33.0486	14.05	1.09	12.96
	180	31.1110	32.1322	31.9939	13.54	1.02	12.52

ตารางผนวกที่ 12 ค่าสารระเหยในถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้น ณ ที่อุณหภูมิและเวลา
ต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 3

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	ถ้วย+ฝา (กรัม)	ถ้วย+ฝา+ตย. ก่อนอบ (กรัม)	ถ้วย+ฝา+ตย. หลังอบ (กรัม)	น้ำหนัก หาย (%)	ความ ชื้น (%)	สาร ระเหย (%)
600	30	31.0258	32.0313	31.8281	20.21	4.96	15.25
	60	30.8506	31.8831	31.6896	18.74	3.72	15.02
	90	31.5907	32.5915	32.4129	17.85	3.1	14.75
	120	31.6469	32.6714	32.4992	16.81	2.7	14.11
	150	31.4589	32.4633	32.3059	15.67	2.13	13.54
	180	32.1275	33.1129	32.9664	14.87	1.89	12.98
700	30	31.0258	31.9803	31.7905	19.88	4.77	15.11
	60	30.8506	31.8708	31.6861	18.1	3.49	14.61
	90	31.5907	32.6261	32.4492	17.09	2.89	14.2
	120	31.6469	32.6321	32.4719	16.26	2.3	13.96
	150	31.4589	32.4455	32.2989	14.86	1.6	13.26
	180	32.1275	33.1086	32.9684	14.29	1.5	12.79
800	30	31.0258	32.0379	31.8440	19.16	4.31	14.85
	60	30.8506	31.9049	31.7207	17.47	3.18	14.29
	90	31.5907	32.6328	32.4587	16.71	2.75	13.96
	120	31.6469	32.6690	32.5075	15.8	2.12	13.68
	150	31.4589	32.4722	32.3265	14.38	1.31	13.07
	180	32.1275	33.1107	32.9755	13.75	1.11	12.64
900	30	31.0258	32.0146	31.8345	18.21	3.97	14.24
	60	30.8506	31.9391	31.7571	16.72	2.99	13.73
	90	31.5907	32.6751	32.5004	16.11	2.55	13.56
	120	31.6469	32.6830	32.5263	15.12	1.77	13.35
	150	31.4589	32.5576	32.4026	14.11	1.15	12.96
	180	32.1275	33.2273	33.0786	13.52	0.99	12.53

ตารางผนวกที่ 13 ปริมาณไถ่ถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้น ณ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ใน การทดลองครั้งที่ 1

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาทึ)	ถั่วย (กรัม)	ถั่วย+ตย. ก่อนเผา(กรัม)	ถั่วย+ตย. หลังเผา (กรัม)	ปริมาณไถ่ (%)
600	30	19.0680	19.1703	19.0721	4.00
	60	20.8465	20.9585	20.8512	4.21
	90	21.6033	21.7098	21.6061	2.61
	120	20.4817	20.5841	20.4867	4.85
	150	20.5191	20.6269	20.5250	5.47
	180	20.3536	20.4531	20.3594	5.87
700	30	19.0680	19.1667	19.0720	4.10
	60	20.8465	20.9451	20.8510	4.61
	90	21.6033	21.7065	21.6087	5.22
	120	20.4817	20.5871	20.4876	5.61
	150	20.5191	20.6177	20.5249	5.93
	180	20.3536	20.452	20.3598	6.25
800	30	19.0680	19.1734	19.0728	4.60
	60	20.8465	20.9486	20.8522	5.61
	90	21.6033	21.7044	21.6096	6.25
	120	20.4817	20.5773	20.4880	6.55
	150	20.5191	20.6147	20.5257	6.87
	180	20.3536	20.4518	20.3607	7.23
900	30	19.0680	19.1712	19.0734	5.23
	60	20.8465	20.9488	20.8525	5.82
	90	21.6033	21.7098	21.6102	6.47
	120	20.4817	20.5854	20.4888	6.80
	150	20.5191	20.6167	20.5260	7.02
	180	20.3536	20.4561	20.3612	7.37

ตารางผนวกที่ 14 ปริมาณเถ้าถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้น ณ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ใน การทดลองครั้งที่ 2

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาทึ)	ถั่วย (กรัม)	ถั่วย+ตย. ก่อนเผา(กรัม)	ถั่วย+ตย. หลังเผา (กรัม)	ปริมาณเถ้า (%)
600	30	19.3536	19.4539	19.3576	4.03
	60	20.8556	20.9601	20.8600	4.22
	90	20.6883	20.7948	20.6933	4.65
	120	21.7463	21.8444	21.7511	4.86
	150	21.7151	21.8134	21.7205	5.50
	180	21.0572	21.1628	21.0634	5.88
700	30	19.3536	19.4610	19.3581	4.16
	60	20.8556	20.9625	20.8606	4.64
	90	20.6883	20.7906	20.6936	5.22
	120	21.7463	21.8550	21.7524	5.62
	150	21.7151	21.8135	21.7209	5.92
	180	21.0572	21.1548	21.0633	6.21
800	30	19.3536	19.4507	19.3580	4.57
	60	20.8556	20.9534	20.8611	5.63
	90	20.6883	20.7864	20.6945	6.28
	120	21.7463	21.8488	21.7530	6.58
	150	21.7151	21.8223	21.7225	6.88
	180	21.0572	21.1605	21.0646	7.21
900	30	19.3536	19.4558	19.3589	5.22
	60	20.8556	20.9598	20.8616	5.80
	90	20.6883	20.7871	20.6947	6.45
	120	21.7463	21.8435	21.7529	6.82
	150	21.7151	21.8206	21.7225	7.01
	180	21.0572	21.1546	21.0644	7.37

ตารางผนวกที่ 15 ปริมาณเถ้าถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้น ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ใน การทดลองครั้งที่ 3

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาทึ)	ถั่วย (กรัม)	ถั่วย+ตย. ก่อนเผา(กรัม)	ถั่วย+ตย. หลังเผา (กรัม)	ปริมาณเถ้า (%)
600	30	20.4216	20.5314	20.4260	4.00
	60	20.7716	20.8781	20.7761	4.26
	90	21.3703	21.4726	21.3771	6.66
	120	20.9625	21.0691	20.9677	4.87
	150	21.1077	21.2061	21.1131	5.50
	180	21.4923	21.5904	21.4981	5.89
700	30	20.4216	20.5187	20.4256	4.10
	60	20.7716	20.8698	20.7762	4.64
	90	21.3703	21.4764	21.3759	5.25
	120	20.9625	21.0713	20.9687	5.69
	150	21.1077	21.2146	21.1140	5.88
	180	21.4923	21.598	21.4989	6.23
800	30	20.4216	20.5236	20.4263	4.57
	60	20.7716	20.8747	20.7775	5.68
	90	21.3703	22.3573	21.4326	6.31
	120	20.9625	21.9615	21.0282	6.58
	150	21.1077	21.2086	21.1147	6.92
	180	21.4923	21.5976	21.4999	7.19
900	30	20.4216	20.5284	20.4272	5.24
	60	20.7716	20.8793	20.7779	5.81
	90	21.3703	22.3547	21.4339	6.46
	120	20.9625	21.9414	21.0292	6.81
	150	21.1077	21.2101	21.1149	7.00
	180	21.4923	22.4821	21.5655	7.4

ตารางผนวกที่ 16 ค่าความหนาแน่นปรากฏในถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้น ณ ที่อุณหภูมิ
และเวลาต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 1

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	น้ำหนักกระบอก ตวง (กรัม)	น้ำหนักกระบอก ตวง+ตย. (กรัม)	ความหนาแน่น ปรากฏ (g/cm ³)
600	30	56.6636	62.5396	0.5876
	60	56.6636	62.1926	0.5529
	90	56.6636	61.9996	0.5336
	120	56.6636	61.8636	0.5200
	150	56.6636	61.8176	0.5154
	180	56.6636	61.7416	0.5078
700	30	56.6636	62.3286	0.5665
	60	56.6636	62.0686	0.5405
	90	56.6636	61.9476	0.5284
	120	56.6636	61.8676	0.5204
	150	56.6636	61.7726	0.5109
	180	56.6636	61.7316	0.5068
800	30	56.6636	62.1986	0.5535
	60	56.6636	62.0216	0.5358
	90	56.6636	61.9386	0.5275
	120	56.6636	61.8576	0.5194
	150	56.6636	61.7746	0.5111
	180	56.6636	61.6846	0.5021
900	30	56.6636	62.0936	0.5430
	60	56.6636	61.9786	0.5315
	90	56.6636	61.8886	0.5225
	120	56.6636	61.8026	0.5139
	150	56.6636	61.7476	0.5084
	180	56.6636	61.6836	0.5020

ตารางผนวกที่ 17 ค่าความหนาแน่นปรากฏในถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้น ณ ที่อุณหภูมิ
และเวลาต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 2

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	น้ำหนักกระบอก ตวง (กรัม)	น้ำหนักกระบอก ตวง+ตย. (กรัม)	ความหนาแน่น ปรากฏ (g/cm ³)
600	30	56.6634	62.5474	0.5884
	60	56.6634	62.1734	0.5510
	90	56.6634	61.9974	0.5334
	120	56.6634	61.9204	0.5257
	150	56.6634	61.8254	0.5162
	180	56.6634	61.7604	0.5097
700	30	56.6634	62.3424	0.5679
	60	56.6634	62.0894	0.5426
	90	56.6634	61.9664	0.5303
	120	56.6634	61.8774	0.5214
	150	56.6634	61.7944	0.5131
	180	56.6634	61.7234	0.5060
800	30	56.6634	62.1634	0.5500
	60	56.6634	62.0304	0.5367
	90	56.6634	61.9534	0.5290
	120	56.6634	61.8684	0.5205
	150	56.6634	61.7744	0.5111
	180	56.6634	61.6994	0.5036
900	30	56.6634	62.0734	0.5410
	60	56.6634	61.9714	0.5308
	90	56.6634	61.8674	0.5204
	120	56.6634	61.7744	0.5111
	150	56.6634	61.7384	0.5075
	180	56.6634	61.6614	0.4998

ตารางผนวกที่ 18 ค่าความหนาแน่นปรากฏในถ่านกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้น ณ ที่อุณหภูมิ
และเวลาต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 3

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	น้ำหนักกระบอก ตวง (กรัม)	น้ำหนักกระบอก ตวง+ตย. (กรัม)	ความหนาแน่น ปรากฏ (g/cm ³)
600	30	56.6637	62.5587	0.5895
	60	56.6637	62.1847	0.5521
	90	56.6637	61.9927	0.5329
	120	56.6637	61.8997	0.5236
	150	56.6637	61.8277	0.5164
	180	56.6637	61.7527	0.5089
700	30	56.6637	62.3387	0.5675
	60	56.6637	62.0837	0.5420
	90	56.6637	61.9587	0.5295
	120	56.6637	61.8787	0.5215
	150	56.6637	61.8437	0.5180
	180	56.6637	61.7307	0.5067
800	30	56.6637	62.1947	0.5531
	60	56.6637	62.0277	0.5364
	90	56.6637	61.9327	0.5269
	120	56.6637	61.8527	0.5189
	150	56.6637	61.7657	0.5102
	180	56.6637	61.6997	0.5036
900	30	56.6637	62.0867	0.5423
	60	56.6637	61.9677	0.5304
	90	56.6637	61.8737	0.5210
	120	56.6637	61.7947	0.5131
	150	56.6637	61.7387	0.5075
	180	56.6637	61.6787	0.5015

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวรุจิเรศ ขวัญข้าว
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 16 ธันวาคม 2520
สถานที่เกิด	ชลบุรี
ประวัติการศึกษา	
ระดับประถมศึกษา	โรงเรียนธัมมสิริศึกษา ชลบุรี (พ.ศ. 2533)
ระดับมัธยมต้น	โรงเรียนธัมมสิริศึกษา ชลบุรี (พ.ศ. 2536)
ระดับมัธยมปลาย	โรงเรียนสิงห์สมุทร ชลบุรี (พ.ศ. 2539)
ระดับปริญญาตรี	วศ.บ. (วิศวกรรมศาสตร์) สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2546)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	- โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิศวกรรมเคมี ใน โครงการพัฒนาของธนาคารพัฒนาแห่งเอเชียและ ทบวงมหาวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ - บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ - โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี ประจำปี 2547