การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

Preparation and Characterization of Activated Carbon from Cashew Nut Shell

ชิตวรรณ นาคฤทธิ์

Chittawan Nakarit

เลขหมู่ TP935.C4 ช693 2544 ต.2

Bib Key 211268

26 มิ.ย. 2544

วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Master of Engineering Thesis in Chemical Engineering

Prince of Songkla University

2544

ชื่อวิทยานิพนธ์ การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

ผู้เขียน นางสาวชิตวรรณ นาคฤทธิ์

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการที่ปรึกษา

.....ประธานกรรมการ
(ดร.สุธรรม สุขมณี)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต ทองอุไร)

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ
(ดร.สุธรรม สุขมณี)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต ทองอุไร)

.....กรรมการ
(ดร.ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรวรรณ ศิริโชติ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปิติ ทฤษฎิคุณ)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

หอสมุด กุลชาญี่งหลง อรรถการสุนทร
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
วิทยาเขตหาดใหญ่
ได้รับเมื่อ
บัณฑิตวิทยาลัย ๒๐
วันที่ ๑๖ มิ.ย. ๒๕๕๔

ชื่อวิทยานิพนธ์	**การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์**
ผู้เขียน	**นางสาวชิตวรรณ นาคฤทธิ์**
สาขาวิชา	**วิศวกรรมเคมี**
ปีการศึกษา	**2543**

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสภาวะการผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วโดยการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี

การผลิตถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นทางกายภาพแบบ 2 ขั้นตอน ได้ใช้วัตถุดิบขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรในขั้นตอนคาร์บอไนซ์เซชันด้วยอุณหภูมิ 400^{o}C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นจึงทำการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 800^{o}C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สภาวะที่เหมาะสมนี้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าการดูดซับไอโอดีน 537.25 mg/g และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) 416.4 m^2/g สำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นทางกายภาพแบบขั้นตอนเดียว พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นคือ การใช้วัตถุดิบขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ผ่านไอน้ำที่อุณหภูมิ 700^{o}C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าการดูดซับไอโอดีน 443.98 mg/g และ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) 251 m^2/g

การผลิตถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 50 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ เมื่อใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วต่อสารละลายซิงค์คลอไรด์เป็น 1:2 กระตุ้นที่อุณหภูมิ 600^{o}C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีค่าการดูดซับไอโอดีน 881.65 mg/g และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) 1002 m^2/g

Thesis Title	**Preparation and Characterization of Activated Carbon from Cashew Nut Shell**
Auther	**Miss Chittawan Nakarit**
Major Program	**Chemical Engineering**
Academic Year	**2000**

Abstract

This work aimed to study the conditions for preparing activated carbon from oil extracted-cashew nut shell by physical and chemical activation.

The preparation of activated carbon by physical activation was conducted in 2 steps. The cashew nut shell, which range in size from 2.83-4.00 mm, was carbonized in an N_2 atmosphere at 400^{O}C for 1 hour and then activated with steam at 800^{O}C for 1 hour. For these conditions, activated carbon had an iodine number 537.25 mg/g and specific surface area (BET) 416.4 m^2/g. For the single step pyrolysis activation, the optimum condition was to pass steam at 700^{O}C across the 2.83-4.00 mm size material for 1 hour. The activated carbon had an iodine number 443.98 mg/g and specific surface area (BET) 251 m^2/g.

The chemical activation was conducted by using 50% $ZnCl_2$ solution. The suitable condition for chemical activation was 600^{O}C and 1 hour, and the ratio of oil extracted-cashew nut shell to $ZnCl_2$ was 1:2. The properties of activated carbon obtained from this condition were 881.65 of iodine number and 1002 m^2/g of specific surface area (BET).

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาช่วยเหลือ ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นตลอดจนแก้ไขข้อผิดพลาดต่างๆอย่างดียิ่งจาก ดร.สุธรรม สุขมณี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต ทองอุไร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ขอขอบพระคุณ ดร.ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรวรรณ ศิริโชติ และ ดร.ราม แย้มแสงสังข์ ที่ได้ให้คำแนะนำและแก้ไขสิ่งบกพร่องต่างๆทำให้วิทยานิพนธ์เสร็จสิ้นอย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณข้าราชการภาควิชาวิศวกรรมเคมี และวิศวกรรมเหมืองแร่และโลหะวิทยา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องของสถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำการวิจัย ขอขอบคุณพี่ๆเพื่อนๆและน้องๆทุกคนที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือตั้งแต่แรกเริ่มจนกระทั่งวิทยานิพนธ์เสร็จสิ้น

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

และท้ายสุดนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และน้องๆของข้าพเจ้าที่ให้ความช่วยเหลือ ความห่วงใย และเป็นกำลังใจที่สำคัญยิ่งเสมอมา

ชิตวรรณ นาคฤทธิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(8)
รายการภาพประกอบ	(10)
ตัวย่อและสัญลักษณ์	(15)
บทที่	
1. บทนำ	1
บทนำต้นเรื่อง	1
ตรวจเอกสาร	4
วัตถุประสงค์	40
ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำวิทยานิพนธ์	40
2. วิธีการวิจัย	41
วัสดุและอุปกรณ์การวิจัย	41
สารเคมี	41
วิธีการดำเนินการศึกษา	42
3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	47
องค์ประกอบโดยประมาณของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบ ที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้ว (proximate analysis)	47
การผลิตถ่านกัมมันต์แบบ 2 ขั้นตอน	48
การผลิตถ่านกัมมันต์แบบขั้นตอนเดียว	65
การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้สารเคมี	71
4. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	81
บรรณานุกรม	84

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	91
ภาคผนวก ก. สมบัติและลักษณะของถ่านกัมมันต์	92
ภาคผนวก ข. การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis)	95
ภาคผนวก ค. การวิเคราะห์หาค่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์	97
ภาคผนวก ง. การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์	103
ภาคผนวก จ. สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวกระตุ้น	109
ภาคผนวก ฉ. สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นตัวกระตุ้น	118
ภาคผนวก ช. ลักษณะของวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์และอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้	121
ประวัติผู้เขียน	124

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
1. สมบัติของซิงค์คลอไรด์	30
2. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วและวัตถุดิบอื่นๆ	47
3. สมบัติของถ่านคาร์บอไนซ์	48
4. สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่สภาวะต่างๆ	54
5. สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียว	65
6. สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่ใช้อัตราส่วนวัตถุดิบต่อปริมาณซิงค์คลอไรด์ (เข้มข้นร้อยละ 50) 1:1 เวลาในการเผา 1 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิต่างๆ	71
7. สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่ใช้อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ณ อัตราส่วนวัตถุดิบต่อปริมาณซิงค์คลอไรด์ (ร้อยละ 50) ต่างๆ	73
8. สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่ใช้อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราส่วนวัตถุดิบต่อปริมาณซิงค์คลอไรด์ (เข้มข้นร้อยละ 50) 1:2 ณ เวลาต่างๆ	76
9. ตารางเปรียบเทียบสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากกระบวนการต่างๆ	79
10. สมบัติของถ่านกัมมันต์เกรดการค้า	92
11. น้ำหนักประมาณของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน	99
12. การเลือกขนาดตะแกรงร่อนมาตรฐานสำหรับทดสอบการกระจายขนาดของอนุภาคที่ผ่านการทดสอบความแข็งให้สอดคล้องกับขนาดตัวอย่างเริ่มต้นที่ใช้	106
13. สมบัติของถ่านคาร์บอไนซ์	109
14. สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่สภาวะต่างๆ	110
15. สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ขนาด 1.70-2.83 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่สภาวะต่างๆ	112

รายการตาราง(ต่อ)

ตาราง หน้า

16. สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ขนาด 1.17-1.70 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่สภาวะต่างๆ 114
17. สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียว 116
18. สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่ใช้อัตราส่วนวัตถุดิบต่อปริมาณซิงค์คลอไรด์ (เข้มข้นร้อยละ 50) 1:1 เวลาในการเผา 1 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิต่างๆ 118
19. สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่ใช้อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ณ อัตราส่วนวัตถุดิบต่อปริมาณซิงค์คลอไรด์ (ร้อยละ 50) ต่างๆ 119
20. สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่ใช้อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราส่วนวัตถุดิบต่อปริมาณซิงค์คลอไรด์ (เข้มข้นร้อยละ 50) 1:2 ณ เวลาต่างๆ 120

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1. ลักษณะภายในของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	2
2. ส่วนประกอบของเตาหมุน	8
3. ฟลูอิไดซ์เบด	9
4. ฟลูอิไดซ์เบดแบบให้ความร้อนในเบด	10
5. ฟลูอิไดซ์เบดแบบสองชั้น	11
6. โครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์	12
7. การเคลื่อนที่ของไพอิเลคตรอนในโครงสร้างของถ่านและถ่านกัมมันต์	13
8. ตัวอย่างหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวที่เป็นกรดบนผิวถ่านกัมมันต์	13
9. ตัวอย่างปฏิกิริยาของถ่านกัมมันต์ที่ผิวเป็นกรด	14
10. ตัวอย่างปฏิกิริยาการดูดซับโมเลกุลกรดด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีผิวเป็นด่าง	15
11. การวางตัวของรูพรุนขนาดต่างๆ	15
12. ไอโซเทอร์มที่เกิดจากการดูดซับทั้ง 5 ชนิด	17
13. โครงสร้างของเมททิลีนบลู	19
14. การเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของ crystallites ตามอุณหภูมิที่เผา	22
15. ลักษณะโครงสร้างอุดมคติของ crystallites	22
16. ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยก๊าซออกซิไดซ์	26
17. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี	26
18. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์	28
19. เครื่องแอคติเวเตอร์แบบฟลูอิไดซ์เบดของ Kirubakaran	36
20. เครื่องแอคติเวเตอร์แบบเบดนิ่งของ Kirubakaran	36
21. การเตรียมถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดจากแกลบ	37
22. ขั้นตอนการผลิตและสภาวะสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์	39
23. การผลิตถ่านกัมมันต์แบบขั้นตอนเดียวและแบบ 2 ขั้นตอน	46

รายการภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

24. ลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้ว 48
25. ผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์เซชันที่มีต่อค่าร้อยละผลได้ ณ เวลาต่างๆ 49
26. ผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์เซชันที่มีต่อค่าร้อยละผลได้ของคาร์บอนคงตัว ณ เวลาต่างๆ 49
27. ผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์เซชันที่มีต่อค่าร้อยละคาร์บอนคงตัว ณ เวลาต่างๆ 50
28. ผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์เซชันที่มีต่อค่าร้อยละสารระเหย ณ เวลาต่างๆ 50
29. ผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์เซชันที่มีต่อค่าร้อยละเถ้า ณ เวลาต่างๆ 51
30. ลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวของถ่านคาร์บอไนซ์ 51
31. ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อค่าร้อยละผลได้ ณ เวลาต่างๆ 55
32. ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อความเป็นกรด ด่างของถ่านกัมมันต์ ณ เวลาต่างๆ 55
33. ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อความหนาแน่นจริงของถ่านกัมมันต์ ณ เวลาต่างๆ 56
34. ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อความหนาแน่นปรากฏของถ่านกัมมันต์ ณ เวลาต่างๆ 56
35. ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์ ณ เวลาต่างๆ 57
36. ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ ณ เวลาต่างๆ 57
37. ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีต่อการดูดซับเมททิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ ณ เวลาต่างๆ 58
38. ลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นถ่านขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ณ เวลาต่างๆ 58
39. ผลของเวลาที่มีต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นถ่านขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ณ เวลาต่างๆ 60
40. ผลของเวลาที่มีต่อความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นถ่านขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ณ เวลาต่างๆ 61

รายการภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

41. ผลของเวลาที่มีต่อร้อยละผลได้และความเป็นกรด ด่างของถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นถ่านขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ณ เวลาต่างๆ 61
42. ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อค่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 62
43. ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 63
44. ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อร้อยละผลได้และความเป็นกรด ด่างของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 63
45. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียวเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 66
46. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียวเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 66
47. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้และความเป็นกรด ด่างของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียวเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 67
48. ลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นถ่านขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ด้วยไอน้ำแบบขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 67
49. ผลของเวลาที่มีต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส 68
50. ผลของเวลาที่มีต่อความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส 69
51. ผลของเวลาที่มีต่อร้อยละผลได้และความเป็นกรด ด่างของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส 69
52. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ (ร้อยละ 50) ในอัตราส่วน 1:1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 71

รายการภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

53. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ (ร้อยละ 50) ในอัตราส่วน 1:1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 72
54. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้และความเป็นกรด ด่างของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ (ร้อยละ 50) ในอัตราส่วน 1:1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 72
55. ผลของอัตราส่วนที่มีต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ (ร้อยละ 50) ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 74
56. ผลของอัตราส่วนที่มีต่อความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ (ร้อยละ 50) ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 74
57. ผลของอัตราส่วนที่มีต่อร้อยละผลได้และความเป็นกรด ด่างของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ (ร้อยละ 50) ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 75
58. ผลของเวลาที่มีต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ (ร้อยละ 50) ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 1:2 76
59. ผลของเวลาที่มีต่อความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ (ร้อยละ 50) ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 1:2 77
60. ผลของเวลาที่มีต่อร้อยละผลได้และความเป็นกรด ด่างของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ (ร้อยละ 50) ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 1:2 77
61. ลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ (ร้อยละ 50) ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 1:2 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 78

รายการภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
62. กราฟตามสมการบีอีที	108
63. เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้ว	121
64. เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วที่ผ่านการคัดขนาด	121
65. ถ่านคาร์บอไนซ์	122
66. ถ่านกัมมันต์	122
67. เตาเผาที่ใช้ในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์	123

ตัวย่อและสัญลักษณ์

Ads	= การดูดซับ (adsorption)
BD	= ค่าความหนาแน่นปรากฏ (bulk density)
BET	= พื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมด (specific surface area)
cm^3	= ลูกบาศก์เซนติเมตร (cubic centimeter)
CNS	= เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (cashew nut shell)
CNSL	= น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (cashew nut shell liquid)
g	= กรัม (gram)
g/cm^3	= กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (gram / cubic centimeter)
g/l	= กรัมต่อลิตร (gram / liter)
hr	= ชั่วโมง (hour)
IA	= ค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine adsorption)
MA	= ค่าการดูดซับเมททิลีนบลู (methylene blue)
m^2/g	= ตารางเมตรต่อกรัม (square meter / gram)
mg/g	= มิลลิกรัมต่อกรัม (milligram / gram)
mm	= มิลลิเมตร (millimeter)
μm	= ไมโครเมตร (micrometer)
PhA	= ค่าการดูดซับฟีนอล (phenol adsorption)
TD	= ค่าความหนาแน่นจริง (true density)

บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

มะม่วงหิมพานต์เป็นพืชที่น่าสนใจชนิดหนึ่งในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นพืชที่ปลูกง่ายขึ้นได้ในพื้นดินแทบทุกชนิด ปลูกได้ในทุกๆส่วนของประเทศไทย ปัจจุบันรัฐบาลมีนโยบายส่งเสริมการปลูกมะม่วงหิมพานต์ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเพื่อทดแทนการปลูกมันสำปะหลังอีกด้วย

นับตั้งแต่ปีพศ.2523 จนถึงปีพศ.2529 พื้นที่เพาะปลูกมะม่วงหิมพานต์ในประเทศไทยเพิ่มขึ้นถึง 2.5 เท่าคือ เพิ่มจาก 93,610 ไร่เป็น 235,020 ไร่ ผลผลิตเมล็ดดิบเพิ่มขึ้นจาก 14.9 ล้านกิโลกรัมเป็น 34.1 ล้านกิโลกรัม และมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ การเพิ่มขึ้นของผลผลิตทำให้โอกาสการขยายตัวของอุตสาหกรรมกะเทาะเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เพื่อผลิตเมล็ดในเพิ่มขึ้น (ศุภโชค วิริยโกศล และคณะ, 2531)

มะม่วงหิมพานต์ เป็นผลไม้ยืนต้นประเภทไม้ผลัดใบ อยู่ในตระกูลเดียวกันกับมะม่วงมีชื่อตระกูลทางพฤกษศาสตร์ ANACADIACEAE มีชื่อสามัญภาษาอังกฤษว่า CASHEW หรือ CASHEW NUT มีชื่อทางพฤษศาสตร์ว่า ANACARDIUM OCCIDENTALEL สำหรับชื่อสามัญในภาษาไทยนอกจากคำว่ามะม่วงหิมพานต์แล้วก็ยังมีชื่อเรียกตามท้องถิ่นไทยเฉพาะในภาคใต้อีกหลายชื่อ เช่น ยาร่วง เล็ดล่อ ฯลฯ

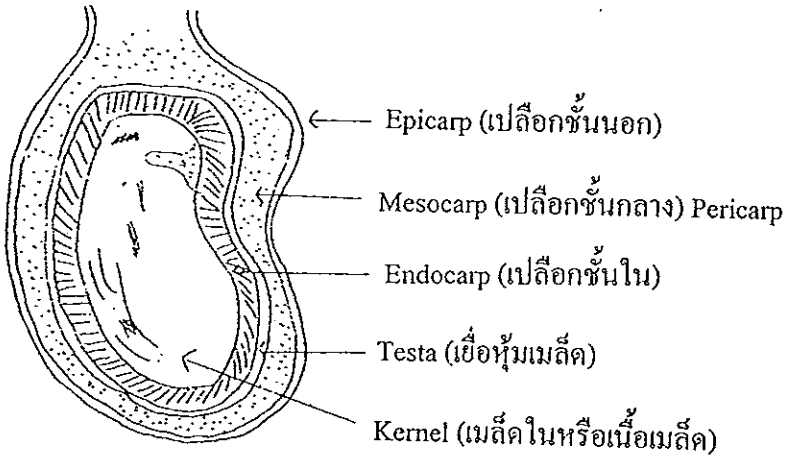
เมล็ดคือส่วนที่เรียกว่าผล ห้อยอยู่ใต้ส่วนของก้านเมล็ด เมื่ออ่อนอยู่จะมีสีชมพูแล้วเปลี่ยนเป็นเขียว เมื่อเจริญเติบโตเต็มที่จะหยุดการขยายตัวจะเปลี่ยนมาเป็นสีเทาแก่หรือสีดำ เมล็ดแบ่งออกเป็น 2 ซีก แต่ละซีกมีรูปคล้ายรูปไตหรือเมล็ดถั่ว เมล็ดจะมีขนาดยาวประมาณ 3 เซนติเมตร กว้างประมาณ 2.5 เซนติเมตร เปลือกเมล็ดจะหนาและแข็งหนาประมาณ 2-3 มิลลิเมตร

เมล็ดใน เมื่อเอาเมล็ดมากะเทาะเปลือกออกจะได้เมล็ดใน เมล็ดในนี้มีคุณค่าทางอาหารโดยเฉพาะโปรตีนสูงใกล้เคียงกับ เนื้อ นมและไข่ อีกทั้งโปรตีนที่ได้ก็ย่อยง่ายและดีกว่าที่ได้จากพืชตระกูลถั่วทั่วๆไปด้วย

น้ำมันในเมล็ด เมื่อนำเอาเมล็ดมาสกัดเอาน้ำมันจะได้น้ำมันสีเหลืองอ่อน มีกลิ่นหอมอ่อนๆ เหมาะสำหรับที่จะนำเอาไปเป็นน้ำมันสลัดและผลิตเนยเทียม มาการีน ทำช็อคโกแลต

เปลือกหุ้มเมล็ดและเยื่อหุ้มเมล็ดใน สามารถนำเอามาใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น เปลือกหุ้มเมล็ดถ้าหากนำมาสกัดจะได้กรดน้ำมันซึ่งมีชื่อทางการค้าว่า CNSL (cashew nut shell

เปลือกหุ้มเมล็ดและเยื่อหุ้มเมล็ดใน สามารถนำเอามาใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น เปลือกหุ้มเมล็ดถ้าหากนำมาสกัดจะได้กรดน้ำมันซึ่งมีชื่อทางการค้าว่า CNSL (cashew nut shell liquid) มีส่วนประกอบของกรดอนาคาร์ดิคร้อยละ 90 และคาร์ดอลร้อยละ 10 มีสีน้ำตาลคล้ำแกมดำ กรดน้ำมันนี้แม้จะเป็นอันตรายต่อผิวหน้าและเนื้อเยื่อต่างๆของมนุษย์ซึ่งถ้าหากไปถูกหรือแตะต้องเข้าแล้วจะทำให้เกิดเป็นแผลพุพองและเน่าเปื่อยได้ เมื่อถูกความร้อนสูงประมาณ 80-100 องศาเซลเซียสสารพิษพวกนี้จะระเหยมีกลิ่นฉุนจัดเป็นอันตรายต่อเยื่อจมูกและนัยน์ตา แต่น้ำมันในเปลือกหุ้มเมล็ดนี้สามารถนำเอาไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น ใช้ทำเป็นสีย้อมและวานิช ใช้ทาผลิตภัณฑ์ไม้หรือเฟอร์นิเจอร์ไม้ต่างๆเพื่อป้องกันมอด ปลวก ฯลฯ (สัมฤทธิ์ เฟื่องจันทร์ และธำรง เปรมปรีดิ์, 2532)



รูปที่ 1 แสดงลักษณะภายในของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
ที่มา: พิชัย สราญรมย์ ,2535

ภาคใต้ของประเทศไทยมีโรงงานกะเทาะเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 15 แห่ง (ทำเนียบโรงงานอุตสาหกรรมในภาคใต้ ธันวาคม, 2539) รวมกำลังการผลิตเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบ 2,715 ตันต่อปี ซึ่งเมื่อกะเทาะเปลือกออกแล้วจะเหลือเปลือกประมาณร้อยละ 80 คือ 2,171 ตันต่อปี

โดยหลังจากสกัดน้ำมันเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ออกจากเปลือกแล้ว จะเหลือของแข็งประมาณร้อยละ 60 นอกจากนี้ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือยังมีการปลูกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์อีกเป็นจำนวนมาก เมื่อการปลูกและการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นวัสดุเหลือทิ้งก็ย่อมสูงขึ้นไปด้วย

การผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปใช้กะลามะพร้าวเป็นวัตถุดิบ แต่ก็สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบหลายชนิด เช่น พวกสารชีวภาพเซลลูโลส เช่น แกลบ ขี้เลื่อย ชานอ้อย พวกถ่านหิน เช่น พีต (peat) ลิกไนต์ วัตถุดิบจากสัตว์ เช่น เลือด กระดูก

ปัจจุบันถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในประเทศส่วนใหญ่เป็นการนำเข้ามาจากต่างประเทศซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากปริมาณเพียง 2,092.15 ตัน มูลค่า 51.48 ล้านบาทในปี 2530 เป็นปริมาณ 2,641.83 ตัน มูลค่า 77.95 ล้านบาทในปี 2534 หรือทั้งปริมาณและมูลค่าเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 26.3 และ 51.4 ตามลำดับ ประเทศที่ไทยสั่งซื้อถ่านกัมมันต์ที่สำคัญ ได้แก่ ญี่ปุ่น เยอรมัน จีน สหรัฐอเมริกาและมาเลเซีย เป็นต้น ขณะเดียวกันเป็นที่น่าสังเกตว่าการส่งออกถ่านกัมมันต์ของไทยไปจำหน่ายต่างประเทศในช่วงระยะเวลาเดียวกันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน จากปริมาณ 358 ตัน มูลค่า 10.13 ล้านบาทในปี 2530 เป็นปริมาณ 1,056.29 ตัน มูลค่า 36.45 ล้านบาท ในปี 2534 หรือทั้งปริมาณและมูลค่าเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 195.1 และ 259.8 ตามลำดับ ในการนี้ประเทศลูกค้าที่สำคัญได้แก่ อิตาลี เยอรมัน สหรัฐอเมริกา สวีเดนและออสเตรเลียเป็นต้น (ธนาคารกสิกรไทย, 2535) จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะดำเนินการวิจัยและพัฒนาเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้และเป็นการลดการนำเข้าจากต่างประเทศและยังได้ผลิตภัณฑ์ใหม่เพื่อใช้ประโยชน์ด้านต่างๆเช่น การบำบัดน้ำเสีย การดูดซับก๊าซพิษ ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงได้นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ผ่านการสกัดน้ำมันแล้วมาศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการแปรรูปเป็นถ่านกัมมันต์

ตรวจเอกสาร

1. ความหมายถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (activated carbon)

เป็นถ่านชนิดหนึ่งที่มีความพรุนและมีพื้นที่ผิวสูงใช้สำหรับดูดกลิ่น ดูดสีหรือสารปนเปื้อนอื่นๆ ถ่านกัมมันต์นั้นไม่ใช่สารบริสุทธิ์แต่เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่สามารถเขียนออกมาเป็นสูตรทางเคมีได้ (คณิต กฤษณังกูรและคณะ, 2527)

2. วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

วัสดุที่นำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์มักมีสมบัติดังต่อไปนี้ (บุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537)

- เป็นของเหลือทิ้งหรือมีราคาถูก
- มีปริมาณคาร์บอนสูง
- มีปริมาณสารอนินทรีย์ต่ำ
- มีความสะดวกในการนำมาใช้งาน เช่น ไม่สลายตัวเมื่อเก็บ ฯลฯ
- สามารถใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูงได้

การผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรงหรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้

วัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์มักจะพิจารณาจากอินทรียวัตถุ (หมายถึงสารที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ) เป็นส่วนใหญ่ อินทรียวัตถุที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ดังกล่าวสามารถแบ่งเป็นชนิดต่างๆได้ดังนี้ (เกศรา นุตาลัยและคณะ, 2531)

- พวกเซลลูโลสที่มาจากพืช เช่น แกลบ กะลามะพร้าว ขี้เลื่อย ชานอ้อย ซังข้าวโพด
- พวกถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ พีต (peat) บิทูมินัส (bituminus)
- วัตถุดิบที่มาจากสัตว์ เช่น กระดูก เลือด

วัตถุดิบที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์นั้นต้องมีองค์ประกอบของคาร์บอนมากมีสารอนินทรีย์เป็นองค์ประกอบในปริมาณน้อย ปริมาณเถ้าที่มีในวัตถุดิบไม่ควรเกินร้อยละ 3 หากเป็นวัตถุดิบจำพวกถ่านหินควรมีเถ้าประมาณร้อยละ 2 และสำหรับถ่านไม้ปริมาณของเถ้าจะอยู่ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 2 (Paruya, 1996)

วัตถุดิบที่มีความหนาแน่นต่ำและสารระเหยสูง เช่น ไม้ ลิกนิน ฯลฯ มักได้ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาตรของรูพรุน (pore volume) สูงและความหนาแน่นต่ำซึ่งใช้ดูดซับก๊าซได้ไม่ดี ส่วนวัสดุที่มี

ความหนาแน่นสูงและมีสารระเหยสูง เช่น กะลามะพร้าว ฯลฯ จะทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็ก (micropore volume) สูง สามารถใช้ดูดซับได้ทั้งในสารละลายและก๊าซ

อย่างไรก็ตามสมบัติของถ่านกัมมันต์ยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆอีก เช่น วิธีการผลิต สภาวะที่ใช้ เป็นต้น ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะระบุให้แน่นอนว่าวัสดุชนิดใดจะใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่เหมาะกับงานแบบใด (บุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537)

3. ชนิดของถ่านกัมมันต์

ชนิดของถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งประเภทได้โดยใช้หลักเกณฑ์ต่างๆมากมายซึ่งขึ้นอยู่กับความสะดวกของผู้ใช้ซึ่งตัวอย่างของการแบ่งประเภทของถ่านกัมมันต์ได้แก่

3.1 แบ่งตามชนิดของตัวกระตุ้น (ข่าวกรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2528 อ้างโดย เกศรา นุตาลัยและคณะ, 2531)

3.1.1 การกระตุ้นเชิงเคมี (chemical activated carbon) คือถ่านกัมมันต์ที่ใช้สารเคมีเป็นตัวกระตุ้น เช่น $ZnCl_2$ H_3PO_4 KOH เป็นต้น ถ่านพวกนี้มักเป็นถ่านที่มีรูพรุนขนาดใหญ่

3.1.2 การกระตุ้นเชิงกายภาพ (physical activated carbon) คือถ่านกัมมันต์ที่ใช้ก๊าซออกซิไดซ์เป็นตัวกระตุ้น เช่น ไอน้ำ CO_2 อากาศ ซึ่งถ่านจำพวกนี้จะมีรูพรุนขนาดเล็กนิยมใช้งานประเภทดูดซับก๊าซและไอระเหย

3.2 แบ่งตามขนาดของรูพรุนบนผิวของถ่านกัมมันต์ (Paruya, 1996)

3.2.1 micropores คือถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนน้อยกว่า 20 อังสตรอม ส่วนมากจะใช้เกี่ยวกับการดูดซับก๊าซและไอระเหย

3.2.2 mesopores คือถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 20 อังสตรอม ถึง 50 อังสตรอม มักจะนำไปใช้ประโยชน์เป็นตัวเร่งของปฏิกิริยาเคมี (catalytic reaction)

3.2.3 macropores คือถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 อังสตรอม มักจะนำไปใช้ประโยชน์ในการฟอกสีหรือบำบัดน้ำเสียเป็นต้น

3.3 แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ (FPRI, 1965 อ้างโดย เกศรา นุตาลัยและคณะ, 2531)

3.3.1 ถ่านกัมมันต์ความหนาแน่นต่ำ ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้งานที่เกี่ยวข้องกับสารละลาย เช่น ฟอกสีน้ำตาล หรือการทำน้ำให้บริสุทธิ์

3.3.2 ถ่านกัมมันต์ความหนาแน่นสูง ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้งานวัฏภาคก๊าซ เช่น ใช้ในการดูดซับก๊าซหรือไอระเหย

3.4 แบ่งตามรูปร่างและขนาด (Paruya, 1996)

3.4.1 ชนิดผง (powder) คือถ่านกัมมันต์ที่มีขนาด 0.015-0.025 มิลลิเมตร มีอัตราการถ่ายโอนมวลและการแพร่ต่ำและมีอัตราการดูดซับสูงเหมาะสำหรับการใช้งานในวัฏภาคของเหลวที่เป็นสารละลายซึ่งจะใช้ในการฟอกสีหรือการผลิตยา

3.4.2 ชนิดเม็ด (granulated) คือถ่านกัมมันต์ที่มีขนาด 1-5 มิลลิเมตร มีพื้นที่ผิวภายในสูงและมีอัตราการแพร่สูงเหมาะสำหรับใช้แยกก๊าซหรือถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดใหญ่มากกว่าก็จะใช้ในวัฏภาคของเหลวซึ่งมีความหนืดต่ำ

3.4.3 ชนิดก้อนกลม (pellets or spherical) คือถ่านกัมมันต์ที่มีขนาด 2-5 มิลลิเมตร มีความแข็งแรงเชิงกลสูงสามารถใช้งานได้เหมือนกับถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดแต่มีความสามารถในการดูดซับก๊าซ SO_2 และ NO_2 ได้ดี

3.5 แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ (Berl, 1938)

3.5.1 ใช้ดูดซับก๊าซ (gas absorbent) คือถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับก๊าซ เช่น ดูดก๊าซพิษกลิ่น ไอของสารอินทรีย์ ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านประเภท hard artificial char

3.5.2 ใช้ฟอกสี (decolourisation) คือถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวฟอกสีส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านประเภท soft artificial char

3.5.3 ใช้ดูดซับพวกโลหะ (metal absorbent) คือถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวแยกพวกโลหะต่างๆ เช่น ใช้ในการแยกทอง เงิน ทองคำขาวจากแร่

3.6 แบ่งตามสภาวะการใช้งาน (Paruya, 1996)

3.6.1 ถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานในวัฏภาคก๊าซ (gas-phase activated carbon) คือถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานสำหรับแยกก๊าซ ดูดซับก๊าซ เป็นต้น ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ใช้ต้องมีรูพรุนมากๆและมีขนาดของรูพรุนในระดับ micropores ซึ่งถ่านกัมมันต์ควรมีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 300 ตารางเมตรต่อกรัม ถึง 3,000 ตารางเมตรต่อกรัม

3.6.2 ถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานในวัฏภาคของเหลว (liquid-phase activated carbon) คือถ่านกัมมันต์ที่ใช้สำหรับกระบวนการของของเหลวซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ใช้จะมีขนาดรูพรุนอยู่ในระดับ macropores ซึ่งจะช่วยให้เกิดการดูดซับได้เร็วสำหรับการดูดซับในปริมาณที่ไม่มากนัก

4. ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

FPRI (1965) ได้แบ่งการใช้ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ออกเป็น 2 ประเภทคือ

4.1 ประเภทใช้กับของเหลว (liquid-phase activated carbon) อุตสาหกรรมที่นำถ่าน

กัมมันต์ไปใช้ในสารละลายหรือในของเหลว ได้แก่

4.1.1 อุตสาหกรรมน้ำตาล ใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อฟอกสีและทำให้น้ำตาลดิบบริสุทธิ์ขึ้น

4.1.2 อุตสาหกรรมน้ำมันและไขมันสำหรับบริโภค ทำให้น้ำมันหรือไขมันปราศจากสีหรือสีอ่อนลง มีรสดีขึ้น นอกจากใช้ในการฟอกสีแล้วยังใช้ในการแยกเอาสบู่และเปอร์ออกไซด์ ออกจากน้ำมันและไขมันด้วย

4.1.3 อุตสาหกรรมอาหาร ใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดกลิ่นและฟอกสีของผลิตภัณฑ์อาหารซึ่งดีกว่าการใช้สารเคมีชนิดอื่นเพราะไม่เป็นอันตรายและไม่เกิดปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์อาหาร

4.1.4 อุตสาหกรรมเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ เช่น ไวน์ วิสกี้ มักใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดกลิ่นที่ไม่ต้องการทำให้เครื่องดื่มที่ได้มีรสชาติดีขึ้น

4.1.5 อุตสาหกรรมเคมีและยา ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการผลิตสารเคมีและยาหลายชนิด เช่น acetanilide, atabrine, cafeine, glyceline, calcium ferrocyanide, sodium acetate, citric acid และ streptomycin

ในต่างประเทศมีการทดลองใช้ถ่านรักษาโรคโดยตรงแล้ว (สมุนไพรชาวบ้าน, 2523-2525 อ้างโดยเกศรา นุตาลัยและคณะ, 2531) เช่น แพทย์ชาวอังกฤษนิยมใช้ถ่านเพื่อรักษาอาการอักเสบจากการติดเชื้อ ในฝรั่งเศสใช้ผงถ่านเพื่อขจัดสารพิษ ส่วนนักวิทยาศาสตร์ของสหรัฐอเมริกาใช้ผงถ่านเพื่อช่วยลดก๊าซในกระเพาะอาหารหรือใช้ดูดเชื้อแบคทีเรียดูดเชื้อแบคทีเรียที่เป็นตัวผลิตก๊าซในลำไส้ตลอดจนบรรเทาอาการท้องเดินจากการรับประทานอาหารที่เป็นพิษด้วย

4.1.6 อุตสาหกรรมทำน้ำให้บริสุทธิ์ ใช้เป็นตัวดูดกลิ่นและฟอกสี

4.1.7 อุตสาหกรรมการแยกสารที่ต้องการ เช่น การแยกทองหลังการสกัดจากแร่ด้วยวิธีไซยาไนด์ การแยกไอโอดีนออกจาก petroleum oil-well brines (น้ำเกลือที่เกิดในหลุมน้ำมันพบมากในประเทศจีน) ตลอดจนการผลิตวิตามินและฮอร์โมนอีกหลายชนิด

4.1.8 Catalytic process ถ่านจะทำหน้าที่เป็นตัวพาสารเร่ง (catalyst carrier) ในปฏิกิริยาที่มีการใช้สารเร่งหลายชนิดรวมทั้งทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นการทำงานของตัวเร่งให้ดีขึ้นด้วย

4.1.9 การทำเหมืองแร่ทองคำ เพราะเหมืองทองคำมีสารอย่างอื่นปะปนอยู่มาก ใช้ถ่านกัมมันต์แยกทองคำออกมาคือเอาสารที่ปนกันมาในทองคำไปละลายในไซยาไนด์ ส่วนที่เป็นทองคำจะกลายเป็นของเหลวจากนั้นใช้ถ่านกัมมันต์ดูดเอาทองคำออกมาแล้วจึงนำทองคำไปแยกออกจากถ่านกัมมันต์อีกทีเป็นทองคำบริสุทธิ์ (ปานทิพย์ เปลี่ยนโมฬี, 2533)

4.2 ประเภทที่ใช้ในการดูดก๊าซและไอ (gas-phase activated carbon)

4.2.1 อุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันก๊าซพิษทั้งที่ใช้ในการทหารและที่ใช้กันทั่วไปทั้งนี้เพราะถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับก๊าซพิษและไอของสารอินทรีย์ได้

4.2.2 การนำไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ ถ่านกัมมันต์จะดูดซับ ไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้องและจะคายออกที่ความดันของไอระเหยต่ำๆ

4.2.3 อุตสาหกรรมปรับอากาศ โดยถ่านกัมมันต์จะดูดมลพิษในอากาศต่างๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน ไฮโดรเจนและอะเซทิลีน

4.2.4 อุตสาหกรรมบุหรี่ โดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นก้นกรองบุหรี่

4.2.5 รถยนต์ในประเทศที่เจริญแล้วใช้ถ่านกัมมันต์คอยควบคุมสารตะกั่วที่ตัวถังน้ำมันเบนซินเพื่อคอยดูดซับสารตะกั่วที่ระเหยออกมาจากตัวถัง (ปานทิพย์ เปลี่ยนโมพี, 2533)

5. เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

5.1 เครื่องคาร์บอไนซ์เซอร์ (carbonizer) คือเครื่องมือที่ใช้แปรสภาพอินทรียวัตถุให้เป็นถ่านมักมีหลายแบบแต่โดยส่วนมากจะเน้นถึงความสามารถในการกระจายความร้อนให้สม่ำเสมอ มีประสิทธิภาพสูง ประหยัดและปลอดภัย อย่างไรก็ตามอาจแบ่งเครื่องคาร์บอไนซ์เซอร์ออกเป็น 2 แบบ คือ

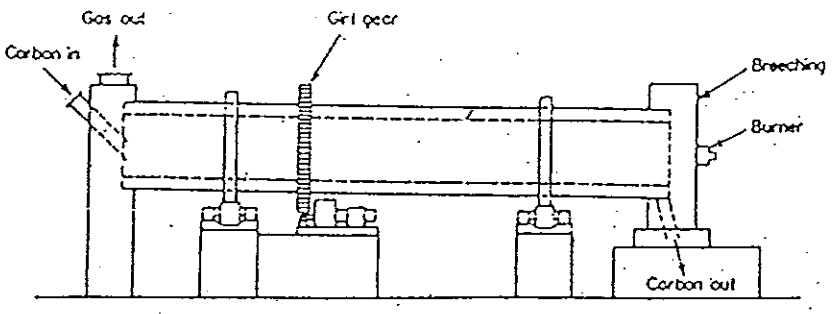
5.1.1 แบบไม่ต่อเนื่อง เช่น แบบหลุมกลบ แบบกองสุม หรือแบบก่ออิฐ ฯลฯ

5.1.2 แบบต่อเนื่อง เช่น แบบเตาหมุน แบบฟลูอิไดซ์เบด ฯลฯ

5.2 เครื่องแอคติเวเตอร์ (activator)

5.2.1 เตาหมุน (rotary kilns)

เป็นเตาที่ใช้กันอย่างแพร่หลายซึ่งจากการที่เราจำเป็นที่จะต้องใช้เตาเผาที่มีขนาดยาวและอุณหภูมิสูงในการกระตุ้นด้วยก๊าซ ดังนั้นการให้ความร้อนโดยตรงแก่เตาเป็นเพียงวิธีเดียวที่สามารถทำได้ ซึ่งเมื่อโครงสร้างและองค์ประกอบของวัตถุดิบถูกนำมาพิจารณาจะเห็นได้ว่าเตาเผาแบบหมุนนี้เป็นเตาเผาที่เหมาะสมในการทำการกระตุ้นด้วยก๊าซ (ภาพประกอบ 2)

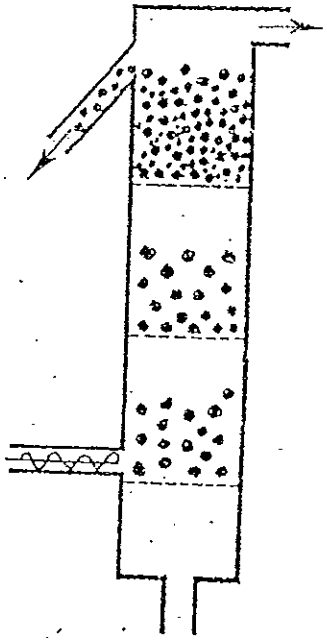


ภาพประกอบ 2 แสดงส่วนประกอบของเตาหมุน

ที่มา: วีระพงศ์ กริชพิพรรธ และคณะ, 2528 อ้างโดย บุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537

5.2.2 ฟลูอิไดซ์เบด (fluidized bed)

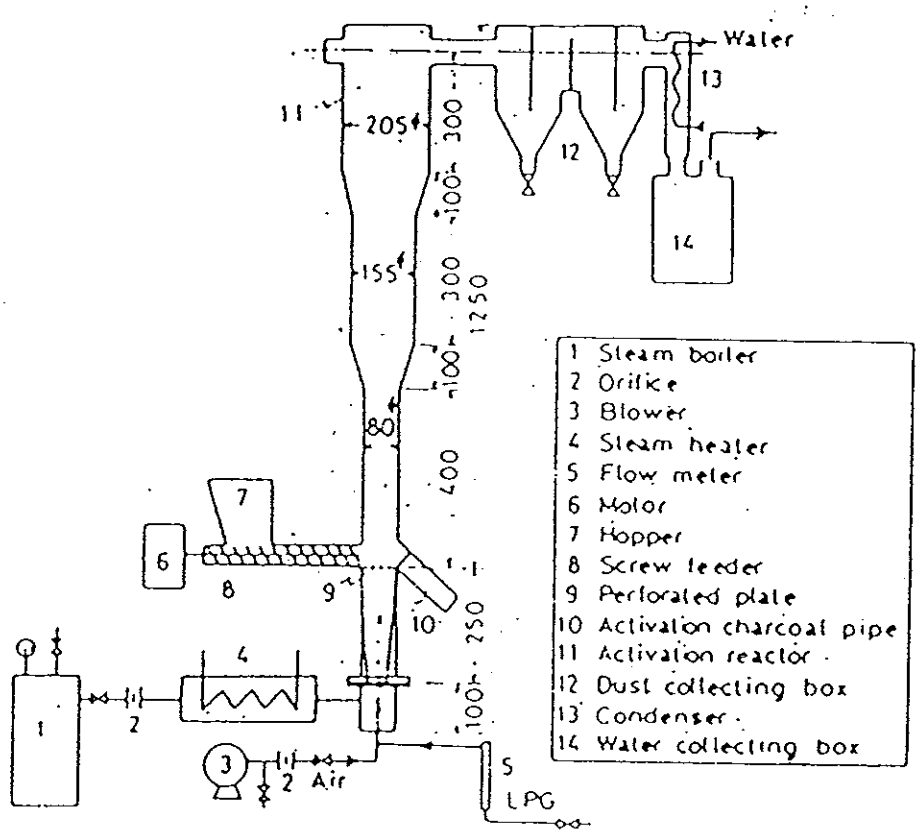
สร้างโดย Jun-Iohi Kawabata และคณะในปีคศ.1972 เพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ชนิดหยาบโดยกระตุ้นด้วยไอน้ำอิ่มตัวยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 600 ถึง 2,000 องศาเซลเซียส ข้อดีของเครื่องกระตุ้นแบบนี้คือ ควบคุมอุณหภูมิได้ง่าย (ภาพประกอบ 3)



ภาพประกอบ 3 แสดงฟลูอิไดซ์เบด
ที่มา: Kawabata, 1975

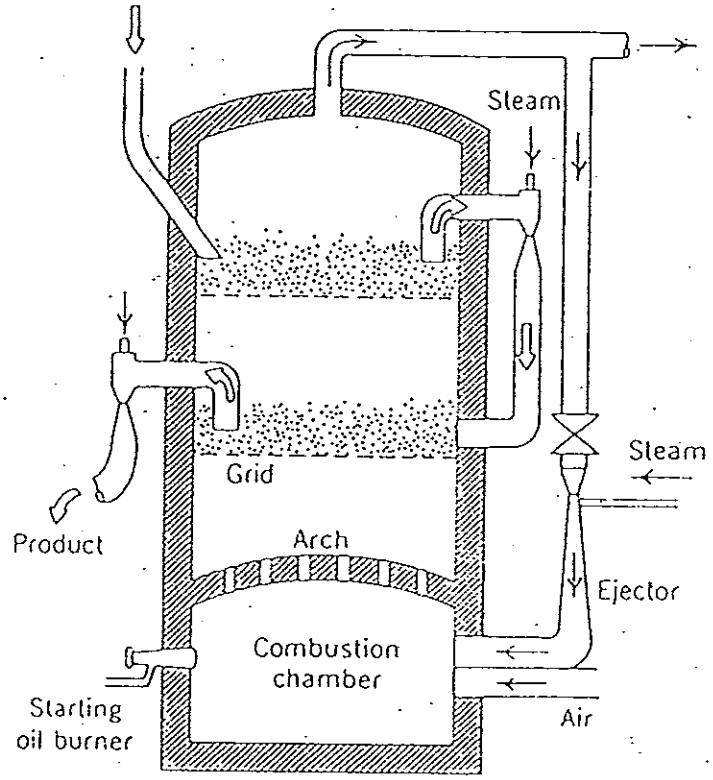
5.2.3 ฟลูอิไดซ์เบดแบบให้ความร้อนในเบด (internal-heat type fluidized bed)

เป็นเครื่องผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยไอน้ำอิ่มตัวยวดยิ่ง ใช้ความร้อนจากการใช้ก๊าซหุงต้ม (LPG) เพื่อให้อุณหภูมิในเบดเท่ากับ 720-790 องศาเซลเซียส (ภาพประกอบ 4) สร้างโดย Government Industrial Development Laboratory, Hokkaido, Agency of Industrial Science & Technology, Ministry of International Trade & Industry ประเทศญี่ปุ่น



ภาพประกอบ 4 แสดงฟลูอิไดซ์เบดแบบให้ความร้อนในเบด
ที่มา: Hosoda *et al*, 1983 อ้างโดยบุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537

5.2.4 ฟลูอิไดซ์เบดแบบสองชั้น (two stage fluidized bed) เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยไอน้ำอิ่มตัวยวดยิ่งใช้ความร้อนจากการเผาไหม้น้ำมันเพื่อให้อุณหภูมิในเบดเท่ากับ 800-900 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากเครื่องแอคติเวเตอร์แบบนี้มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน (ภาพประกอบ 5)



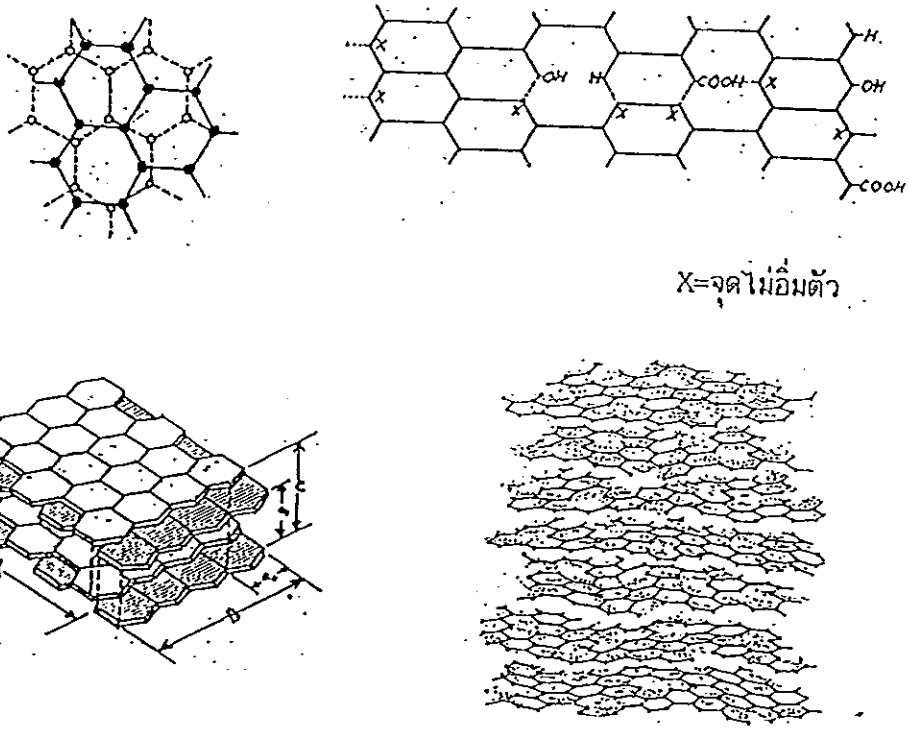
ภาพประกอบ 5 แสดงฟลูอิไดซ์เบดแบบสองชั้น
ที่มา: Kunii *et al*, 1969 อ้างโดยบุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537

6. โครงสร้างทางเคมี

สารจำพวกถ่านหรือถ่านกัมมันต์จัดเป็นสารพวก amorphous carbon แต่มีโครงสร้างซึ่งมีลักษณะของผลึกอยู่บ้างโดยมีโครงสร้างที่คล้ายผลึกของแกรไฟต์จึงมีชื่อเรียกว่า crystallites สารจำพวก amorphous carbon นี้จะประกอบไปด้วยอะตอมซึ่งมีการจัดเรียงอยู่ในรูป hexagonal และ lattice ซึ่งมีการจัดเรียงตัวเป็นชั้นๆดังภาพประกอบ 6 โดยในแต่ละชั้นนั้นจะมีระยะระหว่างกันประมาณ 0.335 นาโนเมตร แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นคือแรงแวนเดอร์วาลส์ซึ่งเป็นแรงที่ไม่แข็งแรงมากนัก แต่ละชั้นของถ่านกัมมันต์จะประกอบไปด้วยกลุ่มอะตอมคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นรูปคล้ายรูปหกเหลี่ยม อะตอมของคาร์บอนแต่ละตัวจะใช้ซิกมาอิเล็กตรอนสร้างพันธะเดี่ยว (single

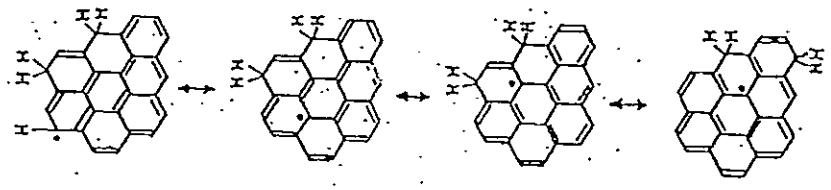
bond) กับอะตอมข้างเคียง 3 อะตอม ความยาวระหว่างอะตอมภายในชั้นประมาณ 0.1442 นาโนเมตร ส่วนของอิเล็กตรอนที่เหลืออีกตัวหนึ่งจะเป็นไพอิเล็กตรอนซึ่งเป็นการสร้างพันธะคู่ (double bond) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วถ่านหรือถ่านกัมมันต์จะมีอะตอมไม่ครบคู่ อะตอมบางตัวจึงต้องรับอิเล็กตรอนดังกล่าวไว้ทำให้เกิดความหนาแน่นของประจุสูง อะตอมดังกล่าวจึงปล่อยให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ ไปยังอะตอมข้างเคียงซึ่งเกิดเป็นเรโซแนนซ์ (resonance) เพื่อลดความหนาแน่นของประจุดังภาพประกอบ 7 และทำให้โครงสร้างดังกล่าวมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น

Riley (1947) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ด้วยรังสีเอกซ์และได้เสนอโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ไว้ 2 แบบ คือ แบบที่ลักษณะคล้ายผลึกแกรไฟต์แต่มีการวางตัวระหว่างชั้นที่ไม่ตั้งฉากกันจึงเกิดช่องว่างระหว่างชั้นมากทำให้ระหว่างผลึกของโครงสร้างมีแรงกระทำน้อยกว่าโครงสร้างที่มีผลึกเป็นแกรไฟต์ สำหรับโครงสร้างอีกแบบหนึ่งเป็นแบบซึ่งมีลักษณะโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ คือ มีการเชื่อมโยงระหว่างอะตอมของคาร์บอนซึ่งไม่อยู่ในตำแหน่งที่ตั้งฉากกัน โครงสร้างลักษณะนี้จะมีความเสถียรมากขึ้นเมื่อมีอะตอมของออกซิเจนเช่นเดียวกับการสร้างเสถียรภาพของถ่านซึ่งไพอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้มากขึ้น ประกอบกับอะตอมออกซิเจนมีแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสูงจึงช่วยลดความหนาแน่นของอิเล็กตรอนได้ดียิ่งขึ้น



ภาพประกอบ 6 แสดงโครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์

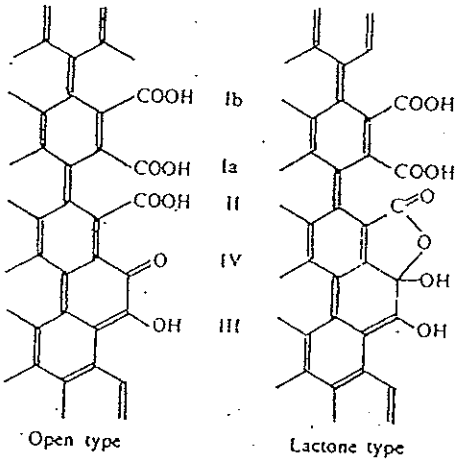
ที่มา: Berl, 1938



ภาพประกอบ 7 แสดงการเคลื่อนที่ของไพอิเล็กตรอนในโครงสร้างของถ่านและถ่านกัมมันต์
ที่มา: Berl, 1938

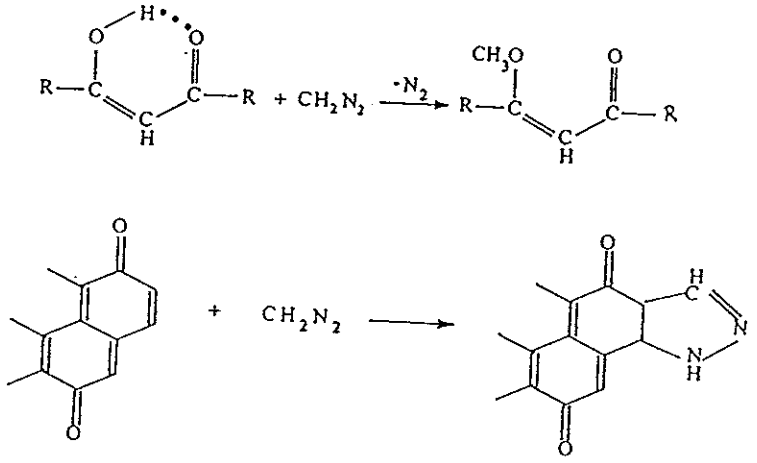
โดยทั่วไปผิวของถ่านกัมมันต์ที่มีหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัว ซึ่งมีอำนาจในการดูดซับซึ่งเกิดจากอะตอมคาร์บอนและออกซิเจนหรือที่เรียกว่า ผิวออกไซด์นั้นมี 2 ชนิดคือ

1. ชนิดที่เป็นกรด มักเกิดในถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นที่อุณหภูมิไม่สูงมาก หมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวที่เกาะอยู่บนผิวของถ่านกัมมันต์จะมีสมบัติคล้ายกรด (ภาพประกอบ 8) คือสามารถดูดซับโมเลกุลที่เป็นด่างได้ (ภาพประกอบ 9) โครงสร้างของถ่านกัมมันต์แบบนี้ค่อนข้างเสถียรแม้อยู่ในสุญญากาศ โดยทั่วไปโครงสร้างเหล่านี้จะเสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้เล็กน้อยจะสลายตัวเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้มากจะเกิดการสลายตัวให้ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน



Surface oxides on carbon surface. I : Carboxyl group, a : Removed by 200°C, b : Removed above 325°C. II : Carboxyl group which exists as lactol group. III : Phenolic hydroxyl group. IV : Carbonyl group.

ภาพประกอบ 8 แสดงตัวอย่างหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัว (functional group) ที่เป็นกรดบนผิวถ่านกัมมันต์
ที่มา: Suzuki, 1990



ภาพประกอบ 9 แสดงตัวอย่างปฏิกิริยาของถ่านกัมมันต์ที่ผิวเป็นกรด
ที่มา: Mattson, 1971 อ้างโดยบุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537

2. ชนิดที่เป็นด่าง มักเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 ถึง 900 องศาเซลเซียส หมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวที่เกาะอยู่บนผิวของถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับโมเลกุลของกรดได้ดีได้แก่ hydroxide, carbonate เป็นต้น ตัวอย่างปฏิกิริยาการดูดซับของถ่านกัมมันต์ประเภทนี้แสดงในภาพประกอบ 10

7. โครงสร้างรูพรุน

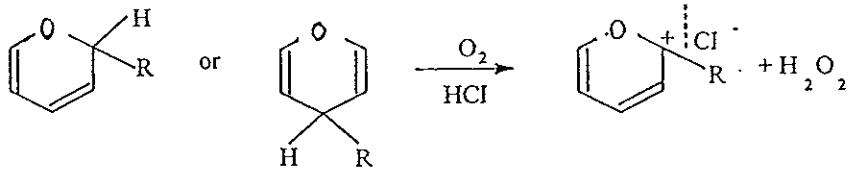
การเปลี่ยนแปลงสมบัติในการดูดซับถ่านกัมมันต์จะเกิดขึ้นในขั้นตอนของการกระตุ้นเนื่องจากมีการสูญเสียสารประกอบคาร์บอนระหว่างช่องว่างผลึกคาร์บอน โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับสภาวะการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อน นอกจากนี้ยังขึ้นกับชนิดและความบริสุทธิ์ของวัตถุดิบที่ใช้ สามารถจำแนกชนิดของรูพรุนออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

7.1 รูพรุนขนาดใหญ่ (macropores) มีรัศมีรูพรุนมากกว่าหรือเท่ากับ 50 อังสตรอม โดยเฉลี่ยถ่านกัมมันต์จะมีปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่อยู่ระหว่าง 0.2-0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัมและมีพื้นที่ผิวจำเพาะไม่เกิน 0.5 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วรูพรุนขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยมาก และเป็นรูพรุนที่ไม่มีความสำคัญต่อการดูดซับ ทำหน้าที่เป็นเพียงทางผ่านของสารเข้าสู่รูพรุนขนาดเล็กเท่านั้นจึงมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ

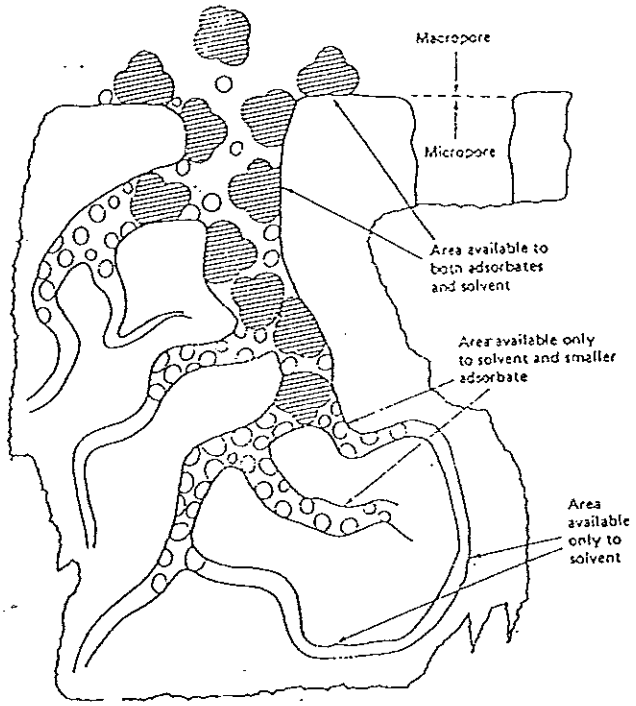
7.2 รูพรุนขนาดกลาง (mesopores หรือ transition pores) มีรัศมีรูพรุนอยู่ในช่วง 20-50 อังสตรอม โดยเฉลี่ยถ่านกัมมันต์จะมีปริมาตรรูพรุนขนาดกลางประมาณ 0.1-0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 20-100 ตารางเมตรต่อกรัม ตัวอย่างสารดูดซับที่มีรูพรุน

ขนาดกลางได้แก่ ซิลิกาเจล (silica gel) อะลูมินาเจล (alumina gel) ตัวเร่งปฏิกิริยาอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate catalyst) เป็นต้น รูพรุนขนาดกลางสามารถดูดซับโมเลกุลของเหลวได้บ้าง

7.3 รูพรุนขนาดเล็ก (micropores) มีรัศมีรูพรุนน้อยกว่า 20 อังสตรอม โดยเฉลี่ยถ่านกัมมันต์จะมีปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กอยู่ประมาณ 0.2-0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม รูพรุนขนาดเล็กจัดเป็นรูพรุนที่มีความสำคัญกับการดูดซับเนื่องจากมีพื้นที่การดูดซับและพลังงานในการดูดซับ (adsorption energy) สูง ทำให้มีการดูดซับเพิ่มขึ้นที่ความดันต่ำๆ



ภาพประกอบ 10 แสดงตัวอย่างปฏิกิริยาการดูดซับโมเลกุลกรดด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีผิวเป็นด่าง
ที่มา: Bansal, 1988



ภาพประกอบ 11 การวางตัวของรูพรุนขนาดต่างๆ
ที่มา: มั่นสิน, 2538

8. ทฤษฎีการดูดซับ

กลไกการดูดซับ (adsorption mechanism)

การดูดซับเป็นการถ่ายโอนมวลสาร (mass transfer) จากก๊าซหรือของเหลวมาที่ผิวของของแข็งหรือของเหลว การดูดติดผิวจะเกิดขึ้นเป็น 3 ขั้นติดต่อกัน

ขั้นที่ 1 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ

ขั้นที่ 2 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะแพร่เข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

ขั้นที่ 3 เกิดการดูดซับในรูพรุนระหว่างตัวถูกดูดซับและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งอาจดูดติดด้วยแรงทางกายภาพหรือเคมีหรือทั้งสองอย่างร่วมกัน

การดูดซับของตัวดูดซับแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ

8.1 การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption)

เนื่องจากแรงดึงดูดกันทางไฟฟ้าสถิตที่เกิดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ซึ่งอาจเป็นการดูดซับระหว่างโมเลกุลมีขั้วทั้งคู่หรือระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว การดูดซับทางกายภาพเป็นการดูดซับโดยที่โมเลกุลของของไหล (ก๊าซหรือของเหลว) กับของแข็งดึงดูดกันที่อุณหภูมิต่ำๆและพลังงานที่คายออกมาจากการดูดซับ (heat of adsorption) ก็ต่ำ โดยลักษณะของการเกิดแรงที่กระทำเป็นแรงของของไหลและผิวของของแข็งคือแรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นการเกิดแบบไม่ขึ้นกับความขรุขระของพื้นที่ผิวของแข็งแต่ขึ้นอยู่กับปริมาณพื้นที่ผิวทั้งหมดของของแข็ง และนอกจากนี้ปริมาณการดูดซับจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของการดูดซับสูงขึ้น

8.2 การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption)

มีลักษณะการเกิดพันธะเคมี (chemical bond) เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือให้อิเล็กตรอนหรือเกิดจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนมีผลทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวมากกว่าแรงดึงดูดทางกายภาพและพลังงานที่คายออกมาจากการดูดซับสูง

ไอโซเทอร์มที่เกิดจากการดูดซับ (adsorption isotherm)

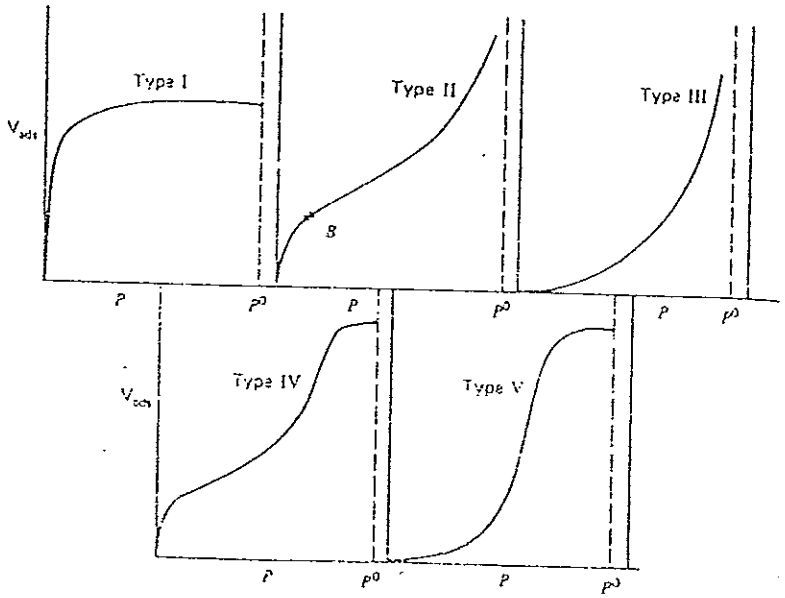
ชนิดที่ 1 เป็นแบบจำลองของแลงมัวร์ (Langmuir) ได้สมมุติว่า

- มีการดูดซับที่ผิวจนเต็มชั้นการดูดซับแรกเท่านั้นไม่มีชั้นต่อไป (monolayer)
- ไม่สนใจปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลในการดูดซับ
- พื้นที่ผิวทั้งหมดมีความไวสำหรับการดูดซับเท่าๆกัน
- การดูดซับของโมเลกุลเกิดกลไกเดียวกันและเมื่อกลายเป็นโครงสร้างก็จะมีโครงสร้างเหมือนกัน

ชนิดที่ 2 เป็นกรณีของการดูดซับทางกายภาพและมีการดูดซับผิวหลายชั้น (multilayer) ที่จุด B เป็นจุดโค้งของกราฟจัดเป็นจุดที่เป็นการดูดซับชั้นเดียว (monolayer) อย่างสมบูรณ์และพื้นที่ผิวของวิธีนี้จะมีลักษณะเหมือนกับตัวถูกดูดซับของไอโซเทอมชนิดที่ 1

ชนิดที่ 3 ไอโซเทอร์มชนิดนี้พบเห็นได้ยากตัวอย่างเช่น การดูดซับของไนโตรเจนบนน้ำแข็งและมีความร้อนของการดูดซับ (heat of adsorption) น้อยกว่าหรือเท่ากับความร้อนของการหลอมละลาย (heat of liquefaction)

ชนิดที่ 4 และ 5 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของการเกิดการควบแน่นภายในรูพรุน (capillary condensation) ก่อนที่ความดันจะคงที่ (saturation pressure)



ภาพประกอบ 12 แสดงไอโซเทอร์มที่เกิดจากการดูดซับทั้ง 5 ชนิด

9. สมบัติโดยทั่วไปของถ่านกัมมันต์

9.1 พื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area)

นิยมใช้เพื่อแสดงคุณภาพของถ่านกัมมันต์มากกว่าการหาปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กซึ่งขึ้นกับกลไกของการดูดซับ แต่การหาพื้นที่ผิวก็มีข้อจำกัดคือโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับต้องเรียงตัวแบบชั้นเดียวในลักษณะที่ปกคลุมผิวของสารดูดซับหรือถ่านกัมมันต์พอดี (บุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537)

โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนเชื่อมโยงกันด้วยรูพรุนลักษณะเหมือนตาข่ายมีรูปร่างแตกต่างกันออกไป พบว่าเมื่อใช้เวลากระตุ้นเพิ่มขึ้นพื้นที่ผิวจะสูงขึ้นถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีความสามารถในการดูดซับ (adsorption power) เพิ่มมากขึ้น (ภัทรา ปัญญวัฒนกิจ, 2540)

9.2 เถ้า (ash content)

หมายถึง การหาปริมาณสารอนินทรีย์ที่ทนความร้อนได้สูงและปนเปื้อนอยู่ในถ่านกัมมันต์ เถ้าจะทำให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ลดลง เนื่องจากมีเถ้าอุดตันอยู่ในรูพรุน โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์มีค่าเถ้าได้ไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ถ้ามีปริมาณเถ้าสูงควรนำไปล้างเอาเถ้าออกด้วยน้ำหรือสารละลายกรดซึ่งจะช่วยให้สามารถดูดซับได้ดีขึ้น (บุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537)

9.3 ความเป็นกรด ด่าง (pH)

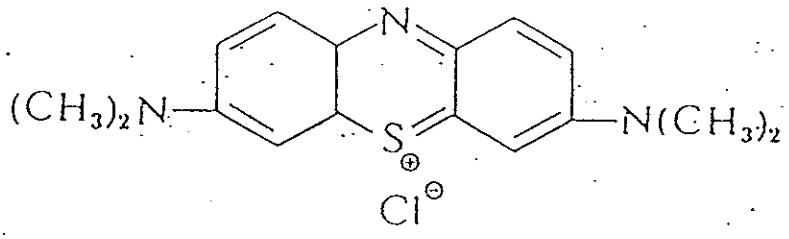
ความเป็นกรด ด่างของถ่านกัมมันต์อาจจำกัดความเหมือนกับความเป็นกรด ด่างของสารแขวนลอยของถ่านกัมมันต์ในน้ำกลั่น ในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับสารละลายที่ใช้น้ำ ความเป็นกรดด่างของถ่านกัมมันต์จะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนความเป็นกรด ด่างของผลิตภัณฑ์เป็นอันมากซึ่งผู้ใช้สามารถปรับเปลี่ยนโดยลดผลกระทบของกรดหรือเบสลงได้โดยการเติมสารที่มีความเป็นกรด ด่างตรงกันข้ามเพื่อปรับให้ถ่านกัมมันต์มีความเป็นกรด ด่างตามต้องการ (กฤษณะ กฤษณภักดิ์และคณะ, 2541)

9.4 ความหนาแน่นปรากฏ (bulk density)

หมายถึงการหาน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ต่อปริมาตร ปริมาตรในที่นี้หมายถึงปริมาตรรวมทั้งหมดของอนุภาค ช่องว่างระหว่างอนุภาคและปริมาตรของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ดังนั้นค่านี้จึงขึ้นกับขนาดและความพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เกรดการค้ามีความหนาแน่นปรากฏ 0.3 ถึง 0.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นปรากฏยังขึ้นกับความชื้นของอนุภาคด้วย กล่าวคือ อนุภาคที่มีความชื้นเพิ่มขึ้นจะมีค่าความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้น (บุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537)

9.5 การดูดซับเมททิลีนบลู

เป็นการทดสอบการดูดสีออกจากน้ำของถ่านกัมมันต์โดยใช้สารละลายสีน้ำเงินที่เกิดจากสารเมททิลีนบลู ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ประเภทด่างและมีประจุบวก (ภาพประกอบ 13) เชื่อว่ารูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15 อังสตรอม (Hassler, 1974) จะเป็นบริเวณที่ใช้ในการดูดซับโมเลกุลของเมททิลีนบลูได้ดีที่สุด (บุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537)



ภาพประกอบ 13 โครงสร้างของเมททิลีนบลู
ที่มา: Graham, 1955 อ้างโดยบุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537

9.6 การดูดซับไอโอดีน

เป็นการทดสอบสมบัติการดูดซับสารพิษออกจากน้ำของถ่านกัมมันต์ โดยใช้ไอโอดีนเป็นสารถูกดูดซับเนื่องจากเป็นสารพิษที่มีความสามารถในการกัดกร่อนสูง โดยเฉพาะเมื่ออยู่ในสภาพที่เป็นก๊าซ เชื่อว่ารูพรุนที่ใช้ในการดูดซับไอโอดีนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 อังสตรอม (Hassler, 1974)

9.7 การดูดซับฟีนอล

เป็นการทดสอบความสามารถในการกำจัดกลิ่นในน้ำใช้ ปริมาณคาร์บอนที่ต้องใช้ในการลดความเข้มข้นในน้ำให้เหลือ 0.1-0.001 ส่วนในล้านส่วน (ppm) เรียกว่า phenol number (บุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537)

9.8 ความแข็งแรงและความต้านทานต่อการขัดสี

ตลอดการปฏิบัติการของกระบวนการผลิต ถ่านกัมมันต์จะถูกใช้งานอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการขัดสีกันเองระหว่างอนุภาคถ่านและกับอนุภาคอื่นๆซึ่งอาจปนมากับกระแสของของไหล ผลคือการแตกหักของถ่านกัมมันต์บางส่วนและหลุดออกมากับกระแสไหลออกของของไหล

CENTRAL LIBRARY
PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY

ปัญหานี้ป้องกันได้โดยการกำหนดค่าความต้านทานต่อการขัดสีต่ำสุดของถ่านกัมมันต์เอาไว้สำหรับถ่านกัมมันต์แบบเม็ด (Hassler, 1974)

ส่วนความแข็งแรงของถ่านกัมมันต์นั้นจะวัดและเปรียบเทียบจากขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เริ่มใช้และเมื่อใช้งานเสร็จ ถ่านกัมมันต์บางส่วนจะมีการแตกออกเป็นอนุภาคที่เล็กลงซึ่งจะนำมาคำนวณและเปรียบเทียบออกมาเป็นความแข็งแรงอีกขั้นตอนหนึ่ง

10. กระบวนการผลิต

ปัจจุบันกรรมวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมายหลายวิธีขึ้นอยู่กับว่าวัตถุดิบที่ใช้เป็นอะไรและต้องการถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติอย่างไร กรรมวิธีโดยทั่วไปประกอบด้วยการเตรียมวัตถุดิบ การเผาที่อุณหภูมิต่ำ (carbonization) จากนั้นจึงนำไปกระตุ้น (activation) ด้วยสารเคมีหรือสารออกซิไดซ์ต่างๆ

10.1 การเตรียมวัตถุดิบ

วัตถุดิบที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์นั้นต้องมีองค์ประกอบของคาร์บอนเป็นจำนวนมาก มีสารอนินทรีย์เป็นองค์ประกอบน้อย ปริมาณเถ้าที่มีในวัตถุดิบไม่ควรเกินร้อยละ 3 หากเป็นวัตถุจำพวกถ่านหินควรมีเถ้าประมาณร้อยละ 2 และสำหรับถ่านไม้ปริมาณของเถ้าจะอยู่ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 2 (Paruya, 1996) การผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรงหรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้แต่โดยทั่วไปมักนำวัตถุดิบมาบดและคัดขนาดก่อนที่จะนำมาคาร์บอไนซ์เซชันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคาร์บอไนซ์เซชัน (บุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537)

10.2 การคาร์บอไนซ์เซชัน (carbonization)

เป็นการนำวัตถุดิบมาเผา (pyrolysis) ในสภาวะที่มีออกซิเจนอยู่น้อย สารที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจนและออกซิเจนจะถูกไล่ออกในรูปของก๊าซ คาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันเป็นผลึกทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของชาร์ (char) ขนาดของผลึกจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเผา องค์ประกอบและโครงสร้างของวัตถุดิบ ถ่านที่ได้จากขั้นตอนนี้จะมีความสามารถในการดูดซับต่ำมากเพราะว่าการทำให้เป็นถ่านโดยใช้อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส จะยังคงมีน้ำมันดิน (tar) ตกค้างอยู่ภายในรูพรุนหรือเกาะอยู่ตามผิวจึงจำเป็นต้องนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ (ธีระโชติ ศรีธีระวิโรจน์และคณะ, 2542)

ปฏิกิริยาไพโรไลซิสต้องการความร้อนทั้งโดยทางตรงและทางอ้อมที่ได้จากการออกซิเดชันเพียงบางส่วนหรือเกิดจากปฏิกิริยาอื่นๆที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์

ภายใต้กระบวนการคาร์บอไนซ์เซชันจะผ่าน 2 ขั้นตอนคือ วัตถุดิบจะถูกทำให้อ่อนตัวลงและหดตัวลงโดยความร้อน ในขณะที่วัตถุดิบอ่อนตัวการควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมสำหรับ

วัตถุดิบแต่ละชนิดเป็นสิ่งที่สำคัญมาก ถ่านคาร์บอนที่มีความแข็งต่ำจะต้องให้ความร้อนในอัตราต่ำ เพื่อที่จะสามารถไล่ก๊าซที่อยู่ภายในผ่านรูพรุนออกมาแล้วไม่ส่งผลกระทบต่อขนาดของรูพรุน

<u>กระบวนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในขั้นตอนการคาร์บอไนซ์เซชัน</u>

ในขั้นตอนของการคาร์บอไนซ์เซชัน ขนาดของผลึก (crystallite) นั้นจะขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและองค์ประกอบตลอดจนทั้งโครงสร้างของวัตถุดิบ

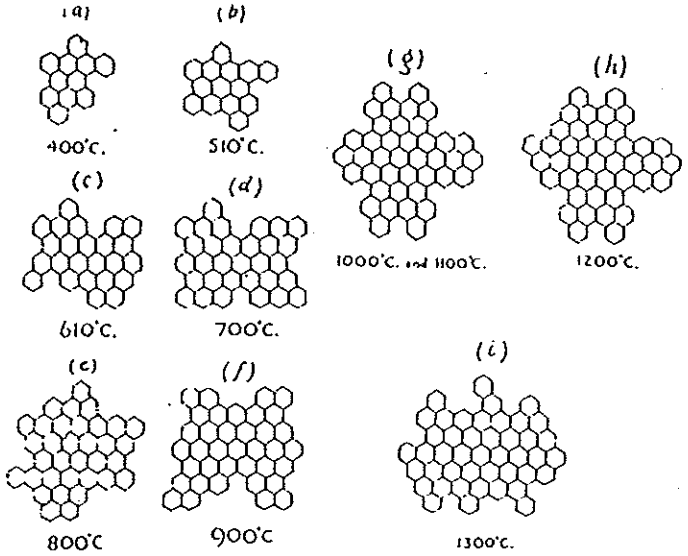
การคาร์บอไนซ์เซชันเป็นกระบวนการที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์เพราะเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของโครงสร้างที่เป็นรูพรุน ถ่านชาร์ (char) ที่ได้จากการคาร์บอไนซ์เซชันควรมีลักษณะดังนี้ (Hassler, 1974)

- มีสีดำตลอด (uniformly black)
- เมื่อหักดู ส่วนที่หักจะมีผิวมันเงา
- ปลายที่หักจะแหลมคม (sharp)
- ปราศจากผงฝุ่นและขี้เถ้า

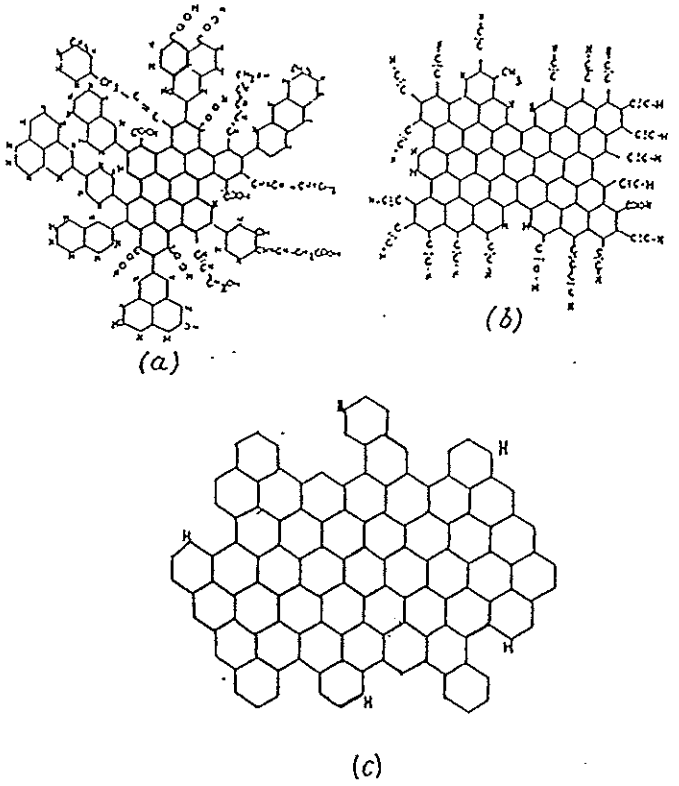
วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยเฉพาะวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำนั้นต้องการสมบัติที่สำคัญดังนี้

- มีปริมาณสารระเหยต่ำ
- ค่าคาร์บอนคงตัวสูง
- มีความพรุนสูง
- มีความแข็งเพียงพอต่อการขัดสี

สำหรับการเกิดโครงสร้างผลึก (crystallite) ต้องอาศัยกลไกหลายอย่าง ซึ่งในขั้นตอนของการเผาในสภาวะอับอากาศนั้น โครงสร้างของวัตถุดิบซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ เช่น เซลลูโลส ลิกนิน จะเกิดการแตกออกเป็นโมเลกุลเล็กๆเมื่อได้รับความร้อน หลังจากนั้นโมเลกุลดังกล่าวก็จะรวมตัวกันเกิดเป็นโครงสร้างอะโรมาติกแบบหกเหลี่ยม (hexagonal) ขึ้น เพื่อให้เกิดโครงสร้างที่เสถียร พวกสารไฮโดรคาร์บอนและหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัว (functional group) ต่างๆที่ไม่ได้เปลี่ยนเป็นโครงสร้างแบบหกเหลี่ยมจะจับกับอะตอมของคาร์บอนในโครงสร้างดังกล่าว ซึ่งหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวที่มาจับเหล่านี้จะทำให้โครงสร้างมีความเสถียรซึ่งไม่สามารถสกัดออกด้วยตัวทำละลายหรือใช้ก๊าซกำจัดออกได้ซึ่งมีโครงสร้างดังภาพประกอบ 15 ซึ่งชนิดและขนาดของหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวตลอดจนการจัดเรียงตัวของโครงสร้าง crystallites มีผลต่อสมบัติการดูดซับของถ่าน



ภาพประกอบ 14 แสดงการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของ crystallites ตามอุณหภูมิที่เผา
ที่มา: Hassler, 1974



ภาพประกอบ 15 แสดงลักษณะโครงสร้างอุดมคติของ crystallites
ที่มา: Hassler, 1974

10.3 การกระตุ้น (activation)

เป็นขั้นตอนที่ทำให้ความพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นโดยการกำจัดให้น้ำมันดินหลุดออกมา ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น

Mukherjee (1974) ได้พิจารณาความหมายของการกระตุ้นไว้เป็น 3 ความหมาย คือ

- เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวที่ว่องไว (active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไปและเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน

- เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้ผิวที่มีอยู่แล้ว ซึ่งหมายถึง ทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้นโดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น

- เป็นการกำจัดอินทรียวัตถุหรืออนินทรียวัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ (active centers)

<u>การกระตุ้นทำได้ 2 วิธี คือ</u>

10.3.1 การกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation) (อุไรวรรณ ธรรมรัตนพคุณ, 2523)

การกระตุ้นทางกายภาพเป็นวิธีการที่นำเอาถ่านมากระตุ้นด้วยสารที่เหมาะสมซึ่งก๊าซที่ใช้ได้แก่ ออกซิเจน (O_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (superheated steam) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ก๊าซคลอรีน (Cl_2) และไอของกำมะถัน (ก๊าซ 3 ชนิดหลังไม่เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากเป็นก๊าซที่มีพิษเป็นอันตราย) การกระตุ้นด้วยวิธีนี้มักจะใช้ความร้อนที่สูงกว่าวิธีการกระตุ้นด้วยสารเคมี

ปัจจัยที่มีผลในการออกซิไดซ์ด้วยก๊าซเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์มีดังนี้ (Hassler, 1974)

- สมบัติทางเคมีและความเข้มข้นของก๊าซที่ใช้ออกซิไดซ์
- อุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยา
- เวลาที่ใช้ในการกระตุ้น
- ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบของวัตถุดิบที่ใช้

อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซและวัตถุดิบ แต่มักไม่เกิน 1000 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดการออกซิไดซ์ที่บริเวณผิวของถ่านและจะไม่เกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุน ทำให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านที่ได้มีน้อย อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 800-900 องศาเซลเซียส หรือบางกรณีอาจใช้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์มีดังนี้ (Hassler, 1974)

$$H_2O + C_X \longrightarrow H_2 + CO + C_{X-1} \quad \text{(ที่ 800-900 องศาเซลเซียส)} \quad (1)$$

หรือ $$CO_2 + C_X \longrightarrow 2CO + C_{X-1} \quad \text{(ที่ 800-900 องศาเซลเซียส)} \quad (2)$$

หรือ $O_2 + C_X \longrightarrow 2CO + C_{X-2}$ (ที่ 800-900 องศาเซลเซียส) (3)

หรือ $O_2 + C_X \longrightarrow CO_2 + C_{X-1}$ (ที่ต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส) (4)

การกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์สามารถแบ่งตามการใช้งานได้ 2 วิธีคือ (เกศรา นุตาลัยและคณะ, 2531)

10.3.1.1. การกระตุ้นโดยตรงจากก๊าซที่ใช้

หมายถึงการใช้ก๊าซออกซิไดซ์ผ่านเข้าไปยังวัตถุดิบโดยตรง ก๊าซที่ใช้มากได้แก่ ไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอากาศ

ก. การกระตุ้นด้วยไอน้ำ

การใช้ไอน้ำในที่นี้คือไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (superheated steam) ปฏิกิริยาพื้นฐานกับคาร์บอนที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (endothermic) (อุไรวรรณ ธรรมรัตนพคุณ, 2523) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$C + H_2O \longrightarrow H_2 + CO \qquad \Delta H = +130\ kJmol^{-1} \quad (5)$$

ในระบบนี้ไม่เพียงแต่เกิดปฏิกิริยาของการกระตุ้นเท่านั้น แต่ยังเกิดผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยาของน้ำและก๊าซ ซึ่งจะเกิดก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ขึ้น ความดันส่วน (partial pressure) ก๊าซจะส่งผลให้ความดันไอของน้ำในระบบลดลงในขณะที่ความดันส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ส่งผลกระทบต่อความดันของระบบ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนสามารถแสดงได้ในรูปของความดันไอของน้ำดังสมการที่ (6)

$$r = \frac{k_1 p_{H_2O}}{1 + k_2 p_{H_2O} + k_3 p_{H_2}} \qquad (6)$$

p_{H_2O} = ความดันส่วนของน้ำ

p_{H_2} = ความดันส่วนของไฮโดรเจน

k_1, k_2, k_3 = ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา

สำหรับกลไกของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับไอน้ำตามสมการที่ 5 สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ (Helena, 1991)

$$C + H_2O \Longleftrightarrow C(H_2O) \qquad (7)$$

$$C(H_2O) \longrightarrow H_2 + C(O) \qquad (8)$$

$$C(O) \longrightarrow CO \qquad (9)$$

ผลกระทบจากก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในระบบจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดต่ำลงเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจนตามสมการที่ 10

$$C + H_2 \Longleftrightarrow C(H_2) \qquad (10)$$

ระหว่างกลไกของปฏิกิริยาตามสมการที่ 7 ในขั้นตอนแรกจะเกิดการดูดซึมโมเลกุลของน้ำ ทำให้โมเลกุลของน้ำสลายไปดังสมการต่อไปนี้

$$2C + H_2O \longrightarrow C(H) + C(OH) \qquad (11)$$

$$C(H) + C(OH) \longrightarrow C(H_2) + C(O) \qquad (12)$$

ไฮโดรเจนและออกซิเจนจะถูกดูดซับจากคาร์บอนซึ่งคิดเป็นประมาณร้อยละ 2 ของพื้นที่ผิวทั้งหมดของถ่าน

สำหรับปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับไอน้ำในขั้นตอนที่สองนั้นจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนมอนนอกไซด์กับไอน้ำหรือสามารถเรียกได้ว่าเป็นปฏิกิริยาเอกพันธุ์วอเตอร์ก๊าซ (homogeneous water-gas reaction) ซึ่งมีผิวหน้าของคาร์บอนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst)

$$CO + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2 \qquad \Delta H = -42\ kJmol^{-1} \qquad (13)$$

Reif ได้อธิบายว่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการที่มีผิวหน้าของคาร์บอนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นเป็นไปตามสมการ

$$CO + C(O) \longrightarrow CO_2 + C \qquad (14)$$

การใช้ไอน้ำเป็นตัวกระตุ้นจะดำเนินการที่ช่วงอุณหภูมิ 750-950 องศาเซลเซียส (Helena, 1991) ซึ่งสามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเช่น พวกโลหะแอลคาไล (alkali metals) เหล็ก (iron) ทองแดง (copper) สารประกอบของออกไซด์และคาร์บอเนตเป็นต้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของไอน้ำสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$r = \frac{k_1 p_{CO_2}}{1 + k_2 p_{CO} + k_3 p_{CO_2}} \qquad (15)$$

เมื่อ p_{CO_2} = ความดันส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์

p_{CO} = ความดันส่วนของคาร์บอนมอนนอกไซด์

k_1, k_2, k_3 = ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา

การกระตุ้นด้วยไอน้ำมีข้อดีคือราคาถูกและไม่มีสารตกค้างแต่อุณหภูมิต้องสูงพอที่จะทำให้อัตราการออกซิไดซ์เกิดอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส อำนาจการดูดซับก็จะลดลง จากการศึกษาพบว่าอำนาจการดูดซับไอโอดีน ฟีนอล สามารถพัฒนาให้มากขึ้นโดยการเพิ่มอุณหภูมิได้ดี แต่การดูดซับพวกกากน้ำตาล (molasses) การเพิ่มอุณหภูมิจะมีผลต่อการดูดซับกากน้ำตาลไม่มากนัก (เกศรา นุตาลัยและคณะ, 2531)

ขั้นตอนการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์แสดงดังภาพประกอบ 16

วัตถุดิบ

↓

คาร์บอไนซ์เซชัน

↓

คัดขนาด

↓

เม็ดถ่าน

↓

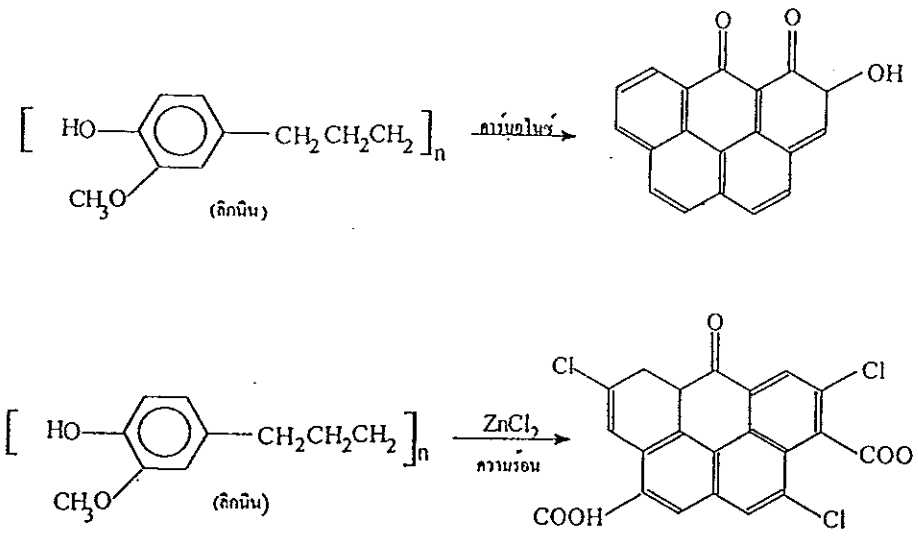
กระตุ้นด้วยไอน้ำ

↓

ถ่านกัมมันต์

ภาพประกอบ 16 แสดงขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยก๊าซออกซิไดซ์

ที่มา: บุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537



ภาพประกอบ 17 แสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี

(ก)บน การเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุทางการเกษตร

(ข)ล่าง การเตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยซิงค์คลอไรด์

ที่มา: บุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537

ภาพประกอบ 17(ก) การเกิดวงแหวนเบนซินจากลิกนินซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโซ่ยาวมาก และมักพบในส่วนต่างๆของวัสดุทางการเกษตรที่มีความแข็งและเหนียว ในการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยซิงค์คลอไรด์จะป้องกันไม่ให้ถ่านที่เพิ่งเตรียมได้เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนโดยการห่อหุ้มโครงสร้างของวัตถุดิบด้วยซิงค์คลอไรด์ตั้งแต่ก่อนนำไปคาร์บอไนซ์เซชัน ผลก็คือไม่เกิดน้ำมันทาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาการคาร์บอไนซ์เซชัน และเกิดหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวที่เป็นกรดและมีความสามารถในการดูดซับสูง เช่น Cl, COOH ฯลฯ ดังภาพประกอบ 17(ข) ทำให้ถ่านมีความไวในการดูดซับสูงขึ้น เรียกว่าถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ปัจจุบันยังไม่ทราบกลไกหรือขั้นตอนที่แน่นอนของการเกิดปฏิกิริยา

ภาพประกอบ 18(ก) เป็นภาพจำลองการเกิดปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์ก่อนเกิดปฏิกิริยาการกระตุ้น อะตอมออกซิเจนของหมู่ไฮดรอกซีจะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนน้อยเนื่องจากคาร์บอนที่ตำแหน่งที่ 1 มีความเป็นบวกจากผลของแรงดึงทางไฟฟ้าของออกซิเจน เมื่อเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำโดยใช้ความร้อนเป็นตัวเร่ง จะมีการกำจัดอะตอมไฮโดรเจนออกจากโครงสร้างเพื่อสร้างพันธะไพอีกหนึ่งพันธะทำให้เกิดวงแหวนเบนซิน ซึ่งเป็นที่ทราบดีแล้วว่าวงแหวนเบนซินมีความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูง จึงช่วยเพิ่มความหนาแน่นอิเล็กตรอนของอะตอมออกซิเจน เมื่อเกิดการดูดซับกับไอออนหรือโมเลกุลที่มีขั้วเป็นบวกจึงเกิดได้ดีขึ้น ปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์ ยังหมายถึงการล้างโมเลกุลแปลกปลอมต่างๆ เช่น ทาร์ (tar) ฯลฯ ออกจากบริเวณที่ใช้ในการดูดซับซึ่งเกิดในช่วงคาร์บอไนซ์เซชัน ดังภาพประกอบ 18(ข) เป็นภาพจำลองการกำจัดโมเลกุลฟีนอลออกจากโครงสร้างของถ่าน ฟีนอลเป็นสารชนิดหนึ่งในน้ำมันทาร์ หมู่ไฮดรอกซีของฟีนอลจะทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในวงแหวนเบนซินของฟีนอลลดลงเนื่องจากผลของแรงดึงทางไฟฟ้าของออกซิเจน ทำให้ออกซิเจนตำแหน่งที่ 1 มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนน้อยลง ปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยไอน้ำและความร้อนจะช่วยทำให้ฟีนอลหลุดออก ออกซิเจนตำแหน่งที่ 1 จะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น อำนาจการดูดซับสูงขึ้น

ข. การกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 800-900 องศาเซลเซียส วัตถุดิบจะผ่านกระบวนการคาร์บอไนซ์เซชันโดยการเผาให้เป็นถ่านเสียก่อน กลไกของปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้ถูกเสนอใน 2 รูปแบบที่แตกต่างกัน (Helene, 1991) ดังนี้

(1) $C + CO_2 \longrightarrow C(O) + CO$ (16)

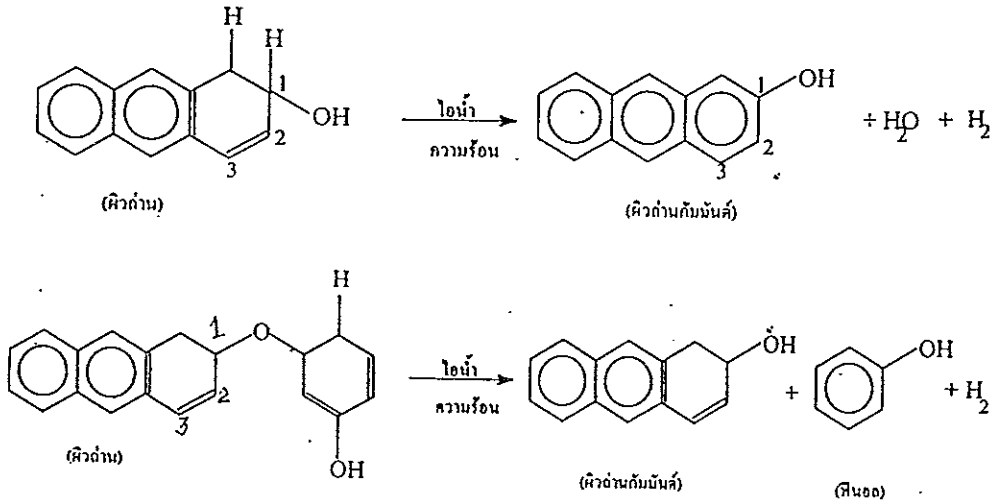
$C(O) \longrightarrow CO$ (17)

$CO + C \longrightarrow C(CO)$ (18)

(2) $C + CO_2 \longrightarrow C(O) + CO$ (19)

$$C(O) \longrightarrow CO \qquad (20)$$

ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ส่วนใหญ่จะหลุดออกไปทำให้เกิดรูพรุนขึ้น สำหรับวิธีการผลิตนั้นก็คล้ายกับวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำ



ภาพประกอบ 18 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์

(ก) บน การจัดเรียงโครงสร้าง

(ข) ล่าง การกำจัดโมเลกุลแปลกปลอม

ที่มา: Mukherjee, 1947

ปฏิกิริยาก๊าซซิฟิเคชันของถ่านที่เกิดขึ้นในการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ซึ่งแสดงดังสมการที่ 21

$$C + CO_2 \Longleftrightarrow 2CO \qquad \Delta H = +159\ kJmol^{-1} \qquad (21)$$

$$r = \frac{kP_{CO_2}}{1 + K_1 P_{CO} + K_2 P_{CO_2}} \qquad (22)$$

P_{CO_2} = ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

P_{CO} = ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์

k = ค่าคงที่อัตรา

K_1, K_2 = ค่าคงที่ของการดูดซับ

ค. การกระตุ้นด้วยออกซิเจนหรืออากาศ

ในการกระตุ้นด้วยออกซิเจนหรืออากาศ ปฏิกิริยาก๊าซซิฟิเคชันที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนที่เกิดง่ายและเร็วกว่าไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ ขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาเป็นดังสมการที่ 23 และ 24

$$C + O_2 \leftrightarrow CO_2 \qquad \Delta H = -406\ kJmol^{-1} \qquad (23)$$

$$2C + O_2 \leftrightarrow 2CO \qquad \Delta H = -123\ kJmol^{-1} \qquad (24)$$

ปฏิกิริยาทั้ง 2 แบบเป็นแบบคายความร้อน กลไกของปฏิกิริยายังไม่ทราบแน่ชัดว่าคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นต้นของคาร์บอนออกซิเดชันหรือคาร์บอนมอนนอกไซด์เกิดขึ้นก่อนแล้วทำปฏิกิริยาเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ปัจจุบันมองว่าทั้งคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนนอกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นต้นและอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนมอนนอกไซด์กับคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ถ่านที่ถูกกระตุ้นด้วยอากาศที่มีออกซิเจนปนอยู่จะเกิดหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบขึ้นที่ผิวของถ่านเป็นจำนวนมากแต่อากาศไม่ค่อยนิยมที่จะใช้เป็นตัวกระตุ้นเพราะควบคุมได้ยากและเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนทำให้ไม่สามารถรักษาอุณหภูมิในเตาให้คงที่ไว้ได้ ดังนั้นออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงเกินไป

10.3.2 การกระตุ้นทางเคมี (chemical activation)

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคมีที่นิยมใช้ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) นอกจากนั้นยังมีแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นต้น ข้อดีของวิธีนี้คือใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก (400-600 องศาเซลเซียส) แต่มีข้อเสียคือ มีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีดังกล่าวออกเพิ่มขึ้นรวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ก็ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้

10.3.2.1 การกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$

$ZnCl_2$ ที่ใช้อยู่ในรูปของสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง อัตราส่วนที่ใช้คือสารละลาย $ZnCl_2$ เข้มข้นประมาณ 0.5 ถึง 4 ส่วน ต่อน้ำหนักของวัตถุดิบที่แห้ง 1 ส่วน บางครั้งอาจมีการเติมกรด HCl หรือกรด H_3PO_4 ลงไปเล็กน้อย จากนั้นนำไปเผาในที่อับอากาศซึ่งมีอุณหภูมิสูงประมาณ 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส แต่ก็เคยมีผู้ใช้อุณหภูมิต่ำเพียง 400 องศาเซลเซียส และอาจสูงถึง 900 องศาเซลเซียส

ถ่านที่ได้จำเป็นต้องนำไปล้างด้วยน้ำและกรด HCl เจือจาง เพื่อเอา $ZnCl_2$ ที่เหลือและสาร basic zinc chlorides ที่เกิดในปฏิกิริยาออกไป $ZnCl_2$ ที่ใช้แล้วสามารถนำมาใช้ใหม่ได้อีก จากการศึกษาพบว่าการใช้ปริมาณ $ZnCl_2$ เพิ่มขึ้น จะช่วยเพิ่มคุณภาพของถ่านกัมมันต์ให้ดีขึ้น

ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วย $ZnCl_2$ มีดังนี้

- ผสมวัตถุดิบที่แห้งกับสารละลาย $ZnCl_2$ เข้มข้นด้วยปริมาณที่เหมาะสม
- คลุกเคล้าให้เข้ากัน
- นำไปอบที่ 110 องศาเซลเซียส เพื่อทำให้ของผสมแห้ง

- นำไปเผาที่อุณหภูมิสูงและอับอากาศ
- นำถ่านที่ได้ไปล้างด้วยน้ำร้อนและกรด HCl เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
- นำถ่านที่ได้ไปอบให้แห้ง

อุปกรณ์ที่มีปัญหาในการผลิตคือ ภาชนะที่ใช้ทำปฏิกิริยาเพราะจะต้องใช้ภาชนะที่ทนความร้อนได้สูงและต้องทนต่อการกัดกร่อนของ $ZnCl_2$ ได้ดี

ตาราง 1 แสดงสมบัติของซิงค์คลอไรด์

สมบัติ	ค่าประมาณ
น้ำหนักโมเลกุล	136.28
จำนวนโมเลกุลของน้ำที่เกิดไฮเดรต	4,3,2.5,1.5,1,0
สี	ขาว
ความหนาแน่น	2.91
จุดเดือด,องศาเซลเซียส	275
จุดหลอมเหลว,องศาเซลเซียส	756
ความร้อนในการหลอมเหลว,แคลอรีต่อกรัมโมล	5540
ความร้อนในการระเหย,แคลอรีต่อกรัมโมล	28700
ความจุความร้อน (C_p)ที่ 25 องศาเซลเซียส,แคลอรีต่อกรัมโมลต่อองศาเซลเซียส	18.3
ความสามารถในการละลาย 25 องศาเซลเซียส,กรัมต่อ 100 มิลลิลิตรน้ำ	432
ความสามารถในการละลาย 100 องศาเซลเซียส,กรัมต่อ 100 มิลลิลิตรน้ำ	614

ที่มา: Farnsworth, 1968 อ้างโดยบุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537

10.3.2.2 กระบวนการกระตุ้นโดยใช้กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)

กระบวนการผลิตนี้อาจใช้กรด H_2SO_4 แทนได้แต่คุณภาพของถ่านจะด้อยกว่า ตัวอย่างวัตถุดิบที่เหมาะสมสำหรับผลิตถ่านกัมมันต์ด้วย H_3PO_4 เช่น ขี้เลื่อย เปลือกถั่ว เป็นต้น ซึ่งสารละลายกรดฟอสฟอริกที่ใช้มีความเข้มข้น 25^o-30^o Be´ วิธีการคือนำสารละลายกรดฟอสฟอริกผสมกับวัตถุดิบแห้งในอัตราส่วนที่เหมาะสมแล้วนำไปอบให้แห้ง หลังจากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส กระบวนการกระตุ้นจะเกิดจากการดูดน้ำของกรดฟอสฟอริกซึ่งคล้ายกับกระบวนการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ถ่านที่ได้จะถูกนำไปเผาต่อทันทีที่อุณหภูมิ 800-1000

องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-8 ชั่วโมง ในขั้นตอนนี้จะเกิดการออกซิไดซ์ของคาร์บอนโดยกรดฟอสฟอริกซึ่งจะสลายตัวเป็นฟอสฟอรัสและสารประกอบไฮไดรด์ (hydrides) ผลผลิตที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะมีสภาพเป็นก๊าซซึ่งจะถูกออกซิไดซ์กลับเป็นกรดฟอสฟอริกในทันทีทันใดกลับไปมาเป็นวัฏจักร

นอกจากนี้กรดฟอสฟอริกยังใช้เป็นสารช่วยในการกระตุ้นได้อีกด้วย เช่น หลังจากการกระตุ้นด้วยไอน้ำแล้วจะนำถ่านที่ได้ไปแช่กรดฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 2 ถึงร้อยละ 25 เพื่อช่วยให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติดีขึ้นนอกจากนี้ยังสามารถใช้สารเคมีพวกโซเดียม โพแตสเซียมและแคลเซียมฟอสเฟตแทนกรดฟอสฟอริกได้

11. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อุไรวรรณ ธรรมรัตนพคุณ (2523)

ศึกษาการทำถ่านกัมมันต์เม็ดจากจากถ่านกะลามะพร้าวโดยทำการคาร์บอไนซ์เซชันในถังน้ำมันขนาด 200 ลิตรแล้วนำไปกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในเตาหมุน ท่อหมุนในแนวนอนด้วยอัตราเร็ว 4 รอบต่อนาที

ถ่านที่ใช้ทดลองมีขนาด 4-10 เมช (4.76-2.00 มิลลิเมตร)

อุณหภูมิตั้งแต่ 700-1075 องศาเซลเซียส

เวลาตั้งแต่ 30, 40, 45 ....130 นาที

น้ำหนักที่หายไปคิดเป็นร้อยละ 17 ถึง 80

การดูดซับไอโอดีนมีค่าสูงสุด 1540 มิลลิกรัมต่อกรัม

ค่าความแข็ง (hardness number) คิดเป็นร้อยละ 30 ถึง 92

การทดสอบการดูดซับเมทิลีนบลู มีค่าตั้งแต่ 0.005 ถึง 0.371 กรัมต่อมิลลิกรัม

ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density) ตั้งแต่ 0.31 ถึง 0.59 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

นราพร หาญวจนวงศ์และคณะ (2529)

งานวิจัยนี้เป็นการหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำถ่านกัมมันต์จากซังข้าวโพดโดยการกระตุ้นด้วยสารเคมี คือ $ZnCl_2$ ซึ่งทำการเผา (carbonization) ที่อุณหภูมิ 300 และ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำผงถ่านมากระตุ้น (activation) โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ

อัตราส่วน $ZnCl_2$ ต่อผงถ่านเป็น 1.5:1.0, 2.0:1.0, 2.5:1.0 และ 3.0:1.0

อุณหภูมิในการกระตุ้น 700 และ 800 องศาเซลเซียส

เวลาในการกระตุ้น 2, 3 และ 4 ชั่วโมง

จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการเผาซังข้าวโพดเป็นผลึกถ่านที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง และทำการกระตุ้นผลึกถ่านเป็นถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมงโดยใช้ปริมาณ $ZnCl_2$:ถ่าน เป็น 2.0:1.0 โดยน้ำหนัก จะได้ถ่านกัมมันต์จากซังข้าวโพดซึ่งมีค่าไอโอดีนเป็น 777 มิลลิกรัมไอโอดีนต่อกรัมถ่านกัมมันต์

เกศรา นุตาลัยและคณะ (2531)

ได้ทดลองนำดินพรุจากจังหวัดนราธิวาสมาผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้วิธีการกระตุ้นด้วยสารเคมี $ZnCl_2$ หรือวิธีกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

ในการทดลองการกระตุ้นด้วยสารเคมีกำหนดตัวแปรในการผลิตถ่านกัมมันต์คือ

อัตราส่วนของน้ำหนักดินพรุแห้งต่อน้ำหนักสารละลาย $ZnCl_2$ (ร้อยละ 60) โดยกำหนดเป็น 1.0:2.5 และ 1.0:4.0

อุณหภูมิการเผาที่ 400 และ 600 องศาเซลเซียส

เวลาการเผาที่ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 3.0 ชั่วโมง

จากผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ใช้อุณหภูมิเมื่อกระตุ้นด้วยสารเคมีอัตราส่วน 1:4 ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสและเวลามากกว่า 0.5 ชั่วโมง ค่าการดูดซับไอโอดีน 1200-กว่า 1300 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมททิลีนบลู 200-กว่า 300 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิวอนุภาค 1200-กว่า1500 ตารางเมตรต่อกรัม

สำหรับถ่านกัมมันต์ซึ่งผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งโดยต้องอัดเป็นเม็ดก่อนการกระตุ้น ถ่านกัมมันต์ซึ่งกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะมีค่าการดูดซับไอโอดีนประมาณ 1200 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมททิลีนบลู 295 มิลลิกรัมต่อกรัม และพื้นที่ผิวอนุภาค 881 ตารางเมตรต่อกรัม

บุญชัย ตระกูลมหชัยและคณะ(2537)

ทำการทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาตาลโตนดได้ดำเนินงาน 2 วิธี คือวิธีทางเคมีและวิธีทางกายภาพ

จากการทดลองพบว่าการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาตาลโตนดด้วยวิธีทางเคมีควรคาร์บอไนซ์เซชันกะลาตาลโตนดที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสนาน 2 ชั่วโมง สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตคือใช้ถ่านที่มีขนาด 1.68 ถึง 2.38 มิลลิเมตร ผสมกับสารละลายซิงค์คลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนของสารละลายซิงค์คลอไรด์ต่อถ่านเท่ากับ 3 ต่อ 2 เขย่าเป็นเวลานาน 72 ชั่วโมง แล้วนำไปกระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง

จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว 1600 ถึง 1700 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าการดูดซับไอโอดีน 1100 ถึง 1200 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมททิลีนบลู 350 ถึง 400 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าเถ้าร้อยละ 2 ถึง 5 โดยน้ำหนัก ค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้ 40 ถึง 50

สำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีทางกายภาพ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือใช้ถ่านกะลาตาลโตนดซึ่งคาร์บอไนซ์เซชันที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ขนาด 1.19 ถึง 1.68 มิลลิเมตร กระตุ้นด้วยก๊าซผสมระหว่างก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้น้ำมันดีเซลกับไอน้ำอิ่มตัวยวดยิ่งที่มีความเร็ว 6.44 เมตรต่อวินาที ในฟลูอิไดซ์เบด ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว 1800 ถึง 1900 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าการดูดซับไอโอดีน 1000 ถึง 1300 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมททิลีนบลู 250 ถึง 350 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าเถ้าร้อยละ 10 ถึง 15 โดยน้ำหนัก ค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้ 30 ถึง 40

รติกร อิสระเสนีย์ (2538)

ทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ใช้แล้ว ได้ดำเนินการ 2 ขั้นตอนคือการคาร์บอไนซ์เซชันยางรถยนต์ และกระตุ้นถ่านที่ได้ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง การคาร์บอไนซ์เซชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ตัวแปรที่ศึกษา คือ

อุณหภูมิ 400, 450, 500 และ 550 องศาเซลเซียส

เวลา 30, 60 และ 90 นาที

พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการคาร์บอไนซ์เซชันยางรถยนต์ตัด คือ ที่อุณหภูมิ 450 เป็นเวลา 30 นาที ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน

ขั้นตอนการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งทำในเครื่องแอคติเวเตอร์แบบเบดนิ่ง ตัวแปรที่ศึกษา คือ

อุณหภูมิ 800, 850, 900 และ 940 องศาเซลเซียส

เวลา 15, 30 และ 45 นาที

ขนาดถ่านที่ใช้กระตุ้น 0.35-1.18, 1.18-2.36 และ 2.36-4.75 มิลลิเมตร

อัตราการป้อนไอน้ำ 1.51, 1.88, 2.92 และ 4.18 กรัมต่อนาที

พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นถ่านที่ได้จากการคาร์บอไนซ์เซชัน 50 กรัม คือ ใช้ถ่านขนาด 1.18-2.36 มิลลิเมตร กระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 30 นาที โดยมีอัตราการป้อนไอน้ำ 1.88 กรัมต่อนาที และอัตราการป้อนอากาศ 43 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านกัมมันต์ร้อยละ 17.35 ของน้ำหนักยางรถยนต์ใช้แล้ว มีพื้นที่ผิว 691.51 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าไอโอดีน 891.11 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าเมททิลีนบลู 172.03 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าความหนาแน่นปรากฏ 0.110 กรัมต่อซีซี และค่าเถ้าร้อยละ 29.05

ภัทรา ปัญญวัฒนกิจ (2540)

ดำเนินการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมันโดยกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

ผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์เซชัน คือที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงส่วนสภาวะที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านกะลาปาล์มน้ำมันให้เป็นถ่านกัมมันต์ คือที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีสมบัติดังนี้ ปริมาณเถ้าร้อยละ 5.49 ความหนาแน่นปรากฏ 0.45 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าการดูดซับไอโอดีน 326.24 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมททิลีนบลู 10.54 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด 378.1 ตารางเมตรต่อกรัม

จากสภาวะที่เหมาะสมคือที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำมาศึกษาเพื่อหาขนาดของถ่านที่เหมาะสมในการกระตุ้นด้วยไอน้ำอิ่มตัวยวดยิ่ง คือ ถ่านขนาด 0.35-0.85 มิลลิเมตร ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติดังนี้ ร้อยละของปริมาณผลิตภัณฑ์ 19.31 ปริมาณเถ้าร้อยละ 7.37 ความหนาแน่นปรากฏ 0.53 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าการดูดซับไอโอดีน 779 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมททิลีนบลู 136.96 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด 670.1 ตารางเมตรต่อกรัม

Kirubakaran, C. J. *et al* (1991)

ได้ทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยใช้ $ZnCl_2$ หรือ H_3PO_4 เป็นสารกระตุ้นในเครื่องแอคติเวเตอร์แบบฟลูอิไดซ์เบดและแบบเบดนิ่ง (ภาพประกอบ 19 และ20) ขั้นตอนการทดลองคือ แช่กะลามะพร้าวขนาดที่ต้องการในสารกระตุ้น นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส แล้วนำไปกระตุ้นในเครื่องแอคติเวเตอร์โดยใช้ความเร็วของตัวกลาง 1 ถึง 2 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิไดซ์ สำหรับเครื่องแอคติเวเตอร์แบบเบดนิ่งใช้อัตราการไหลของตัวกลาง 200 ลิตรต่อชั่วโมง

จากผลการทดลองพบว่า การกระตุ้นในฟลูอิไดซ์เบดจะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติในการดูดซับไอโอดีนการดูดซับฟีนอลสูงขึ้นอย่างรวดเร็วใน 30 นาทีแรกจากนั้นจะค่อยๆสูงขึ้นอย่างช้าๆ และลดลงเมื่อใช้เวลาในการกระตุ้นมากกว่า 120 นาที สำหรับการกระตุ้นในเบดนิ่งพบว่าสมบัติในการดูดซับไอโอดีนการดูดซับฟีนอลจะค่อยๆสูงขึ้นอย่างช้าๆ

ผลของขนาดอนุภาค

ในเครื่องแอคติเวเตอร์แบบฟลูอิไดซ์เบด สามารถกระตุ้นวัตถุดิบขนาดใหญ่ได้ดีกว่าในเบดนิ่ง ทั้งนี้เพราะทุกๆส่วนของวัตถุดิบสามารถใช้ในการเกิดปฏิกิริยาได้ จากการทดลองพบว่าในเครื่องแอคติเวเตอร์แบบฟลูอิไดซ์ควรใช้วัตถุดิบที่มีขนาด 0.515 มิลลิเมตร

ผลของอุณหภูมิ

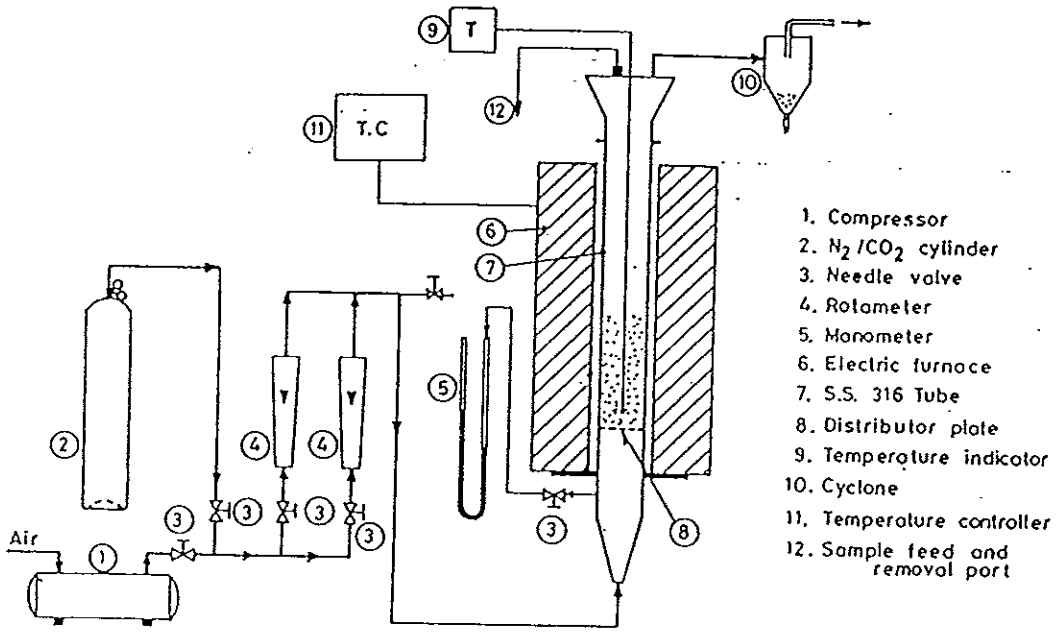
การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้การดูดซับไอโอดีนและฟีนอลเพิ่มขึ้น ในกระบวนการแบบฟลูอิไดซ์เบดจะให้ผลการกระตุ้นดีกว่า สามารถใช้อุณหภูมิต่ำกว่ากระบวนการแบบเบดนิ่ง เนื่องจากในฟลูอิไดซ์เบดมีการถ่ายโอนความร้อนและมวลสารได้สูงกว่าในเบดนิ่ง การใช้อุณหภูมิสูงๆจะทำให้ค่าการดูดซับฟีนอลมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากเกิดการยุบตัวของรูพรุนขนาดเล็ก

ผลของชนิดและปริมาณสารกระตุ้น

ปริมาณสารกระตุ้นเพิ่มขึ้น ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีสมบัติในการดูดซับเพิ่มขึ้นทั้งในเครื่องแอคติเวเตอร์แบบฟลูอิไดซ์เบดและเบดนิ่งทั้งนี้ สมบัติในการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นไม่เกินร้อยละ 25 จากนั้นสมบัติเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆเมื่อปริมาณสารกระตุ้นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วย H_3PO_4 ประมาณ 2 เท่า

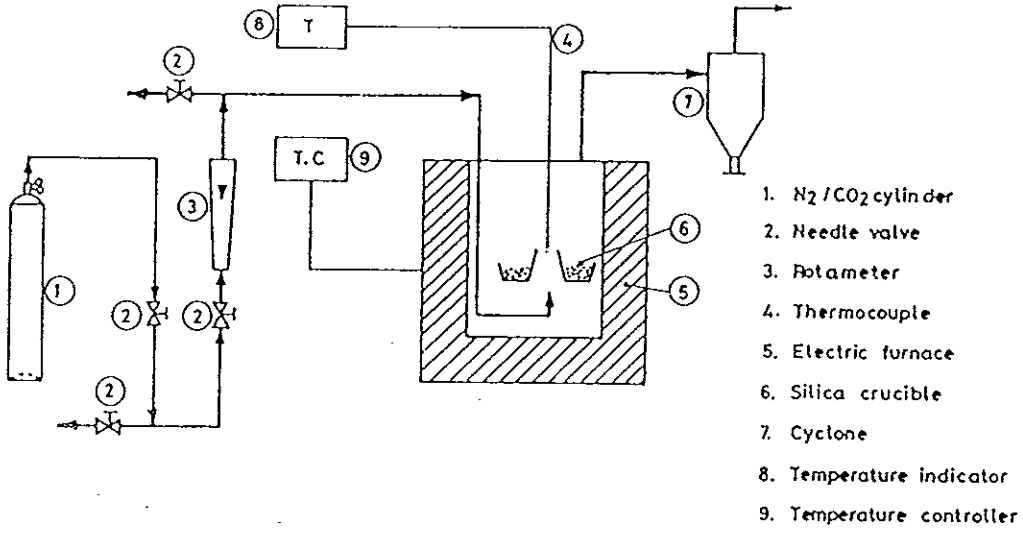
ผลของตัวกลางที่ใช้ในการฟลูอิไดซ์

พบว่าการใช้ก๊าซไนโตรเจนหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวกลางจะช่วยให้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีสมบัติในการดูดซับสูงกว่าการใช้อากาศเป็นตัวกลาง เช่นเมื่อใช้ $ZnCl_2$ เป็นสารกระตุ้น พบว่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์เมื่อใช้ก๊าซไนโตรเจนมีค่า 1100 เมื่อใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่า 1000 และเมื่อใช้อากาศเท่ากับ 800 มิลลิกรัมต่อกรัม



Schematic of the fluidized bed experimental setup.

ภาพประกอบ 19 แสดงเครื่องแอคติเวเตอร์แบบฟลูอิไดซ์เบดของ Kirubakaran, C.J(1974)

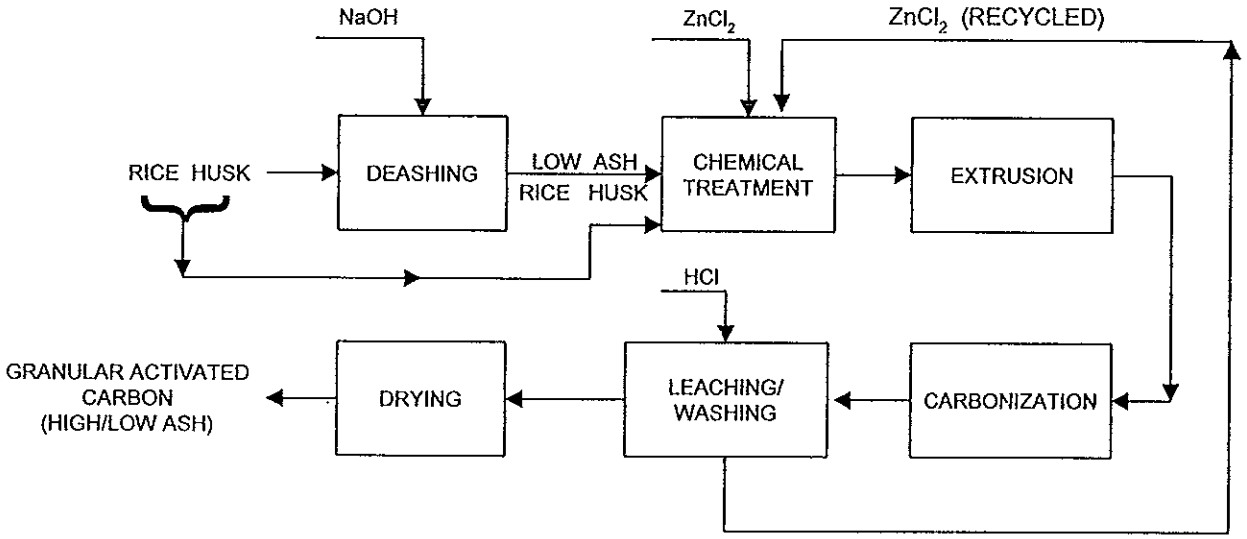


Schematic of the static bed experimental setup.

ภาพประกอบ 20 แสดงเครื่องแอคติเวเตอร์แบบเบดนิ่งของ Kirubakaran, C.J(1974)

Tanzil, H. U. *et al.* (1994)

ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์แบบเม็ดจากแกลบ โดยการนำแกลบที่ผ่านการชะล้างเถ้าออกด้วย NaOH ในอัตราส่วนร้อยละ 0.1-7.5 และที่ไม่ทำการชะล้างมาทำการกระตุ้นโดยใช้ $ZnCl_2$ เป็นตัวกระตุ้นซึ่งมีความเข้มข้นร้อยละ 25 50 75 และ 100 จากนั้นนำมาผ่านการเอ็กซ์ทรูชันเพื่ออัดเม็ด ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจึงทำการคาร์บอไนซ์เซชันแล้วล้างเอาสารเคมีออก ทำให้แห้งก็จะได้ถ่านกัมมันต์ แสดงดังภาพประกอบ 21



ภาพประกอบ 21 แสดงการเตรียมถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดจากแกลบ

จากการทดลองพบว่าถ่านที่มีค่าเถ้าต่ำ (low ash) สามารถให้ค่าไอโอดีนสูงถึง 1232 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมททิลีนบลู 375 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิวที่มีขนาดรูพรุนมากกว่า 10 อังสตรอม มี 1136 ตารางเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวที่มีขนาดรูพรุนมากกว่า 15 อังสตรอม มีค่า 1073 ตารางเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวที่มีขนาดรูพรุนมากกว่า 28 อังสตรอม มีค่า 265 ตารางเมตรต่อกรัม

Suna, B. *et al.* (1994)

ศึกษาลักษณะของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกอัลมอนด์ (almond) และ เฮซึลนัท (hazelnut shell) โดยทำการคาร์บอไนซ์เซชันเปลือกอัลมอนด์ เฮซึลนัท และเปลือกอัลมอนด์ เฮซึลนัท ที่แช่ในแอมโมเนียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงหลังจากนั้น

ก็ทำให้แห้งเพื่อนำมาคาร์บอไนซ์เซชันในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 350 450 และ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากการทดลองพบว่า

- กระตุ้นด้วยสารเคมีคือแอมโมเนียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส มีค่าพื้นที่ผิวมากกว่า 500 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อใช้อุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่าพื้นที่ผิวมากกว่า 700 ตารางเมตรต่อกรัม

- ตัวอย่างที่ไม่ใช้สารเคมีมีค่าพื้นที่ผิวเป็นครึ่งหนึ่งของตัวอย่างที่ใช้สารเคมี

A.Micheal, W. *et al.* (1996)

ทำการผลิตถ่านกัมมันต์จากมะรุมพันธุ์ *Moringa olifera* โดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำโดยมี

- อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที

- ไอน้ำที่ใช้คือ 2 มิลลิลิตรต่อนาที

- อุณหภูมิในการไพโรไลซิสที่ใช้คือ 500 600 700 และ 750 องศาเซลเซียส

- ระยะเวลาในการไพโรไลซิส 30 60 และ 120 นาที

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการปรับปรุงการผลิตโดยทำการไพโรไลซิสด้วยไอน้ำแบบขั้นตอนเดียว โดยทำการไพโรไลซิสด้วยไอน้ำที่ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30-120 นาที ทำให้มีปริมาณรูพรุนขนาดเล็กสูง โดยมีผลได้ร้อยละ 11 และ 17 พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที มีค่า 730 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งใกล้เคียงกับการผลิตแบบ 2 ขั้นตอน คือ 734.3 ตารางเมตรต่อกรัม ผลการทดลองครั้งนี้ทำให้เห็นว่าสามารถผลิตถ่านกัมมันต์จากมะรุมพันธ์ *M.olifera* การไพโรไลซิสด้วยไอน้ำแบบขั้นตอนเดียวทำให้มีค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำ

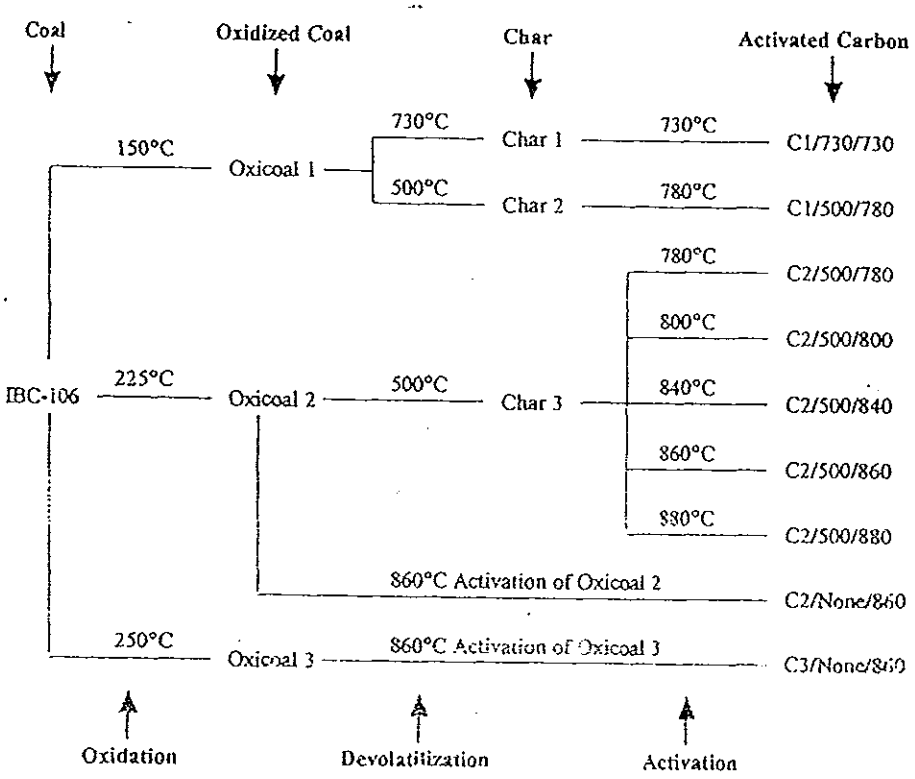
Jian, S. *et al.* (1997)

ผลิตถ่านกัมมันต์จากบิทูมินัสจากที่ราบลุ่มมลรัฐอิลลินอยส์โดยมีกระบวนการ 3 ขั้นตอน

- ทำการออกซิไดซ์ในอากาศที่อุณหภูมิ 150, 225 และ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 6 และ 40 ชั่วโมง

-ไล่สารระเหย (devolatile) coalที่ผ่านการออกซิไดซ์แล้วในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 500 และ 730 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

- กระตุ้น (activation) ในไอน้ำเข้มข้นร้อยละ 45 และไนโตรเจนที่มีออกซิเจนเข้มข้นร้อยละ 4 ที่อุณหภูมิ 730-880 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3.5-96 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 22 แสดงขั้นตอนการผลิตและสภาวะสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์

จากการทดลองพบว่า 7 ใน 9 ของตัวอย่างทำการทดลองที่สภาวะต่างๆสามารถให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวกว่า 1000 ตารางเมตรต่อกรัม และให้ค่าการดูดซับโทลูอีนดีกว่าถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปจากบริษัท ดาร์โค

Aik, C. L. *et al.* (1998)

ได้ทำการเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากเปลือกปาล์มโดยการไพโรไลซิสซึ่งมีตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ

- ขนาดวัตถุดิบ <0.3, 0.3-0.5, 0.5-1.0 และ 1.0-2.0 มิลลิเมตร
- อัตราการไหลของก๊าซเฉื่อย 100, 150, 200, 250 มิลลิลิตรต่อนาที
- อัตราการให้ความร้อน 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 องศาเซลเซียสต่อนาที
- อุณหภูมิและเวลาในการไพโรไลซิส 450, 550, 650, 750, 850 และ 950 องศาเซลเซียส

สภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสสำหรับวัตถุดิบที่มีขนาด 0.5-1.0 มิลลิเมตร โดยใช้อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3.5 ชั่วโมง อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และอัตราการไหลของไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ค่า BET สูงสุด 521 ตารางเมตรต่อกรัม และมีพื้นที่ของไมโครพอร์ 366 ตารางเมตรต่อกรัม

จากนั้นจึงนำมาทำการกระตุ้น (activation) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของเปลือกปาล์มที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วอีกต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษากระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้ว
2. เพื่อศึกษาข้อมูลพื้นฐานและปัจจัยต่างๆที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้ว
3. เพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาการผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้ว

ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำวิทยานิพนธ์

1. ได้ข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาการผลิตถ่านกัมมันต์โดยการนำวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรอย่างมีประสิทธิภาพ
2. ให้มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์เป็นแหล่งทางวิชาการทางด้านถ่านกัมมันต์

บทที่ 2

วิธีการวิจัย

วัสดุและอุปกรณ์การวิจัย

1. เตาไฟฟ้าของ carbolite 0-1200 องศาเซลเซียส
2. เครื่องบดละเอียด (ball mill)
3. เครื่องบด Super Blender ของ National
4. เตาอบ (oven) ของ Eyela NDO-600 N
5. ชุดเครื่องกรองสุญญากาศ ซึ่งใช้ปั๊มสุญญากาศแบบ Aspirator รุ่น A-3S ของ Eyela,Tokyo Rikakikai Co.,Ltd
6. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 และ เบอร์ 42
7. ตะแกรงร่อนมาตรฐาน (sieve)
8. เครื่องเขย่าตะแกรงร่อนของ Eyela รุ่น SS-8
9. เครื่องชั่งละเอียด 2 ตำแหน่งของ OHAUS และ 3 ตำแหน่งของ Shinko Denshi
10. สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ของ Shimadzu รุ่น UV-120-01
11. pH meter ORION Model 420
12. เทอร์โมคอปเปิล ชนิด J
13. Micro tube pump MP-3 ของ Eyela
14. เครื่องวัดความหนาแน่นจริง (multipycnometer) ของ Quanta Chrome
15. ลูกเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 และ 9.5 มิลลิเมตร
16. อุปกรณ์เครื่องแก้วพื้นฐาน

สารเคมี

1. สารละลาย $ZnCl_2$ เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก
2. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
3. สารละลายน้ำแป้ง
4. สารละลายมาตรฐานไอโอดีน (I_2) เข้มข้น 0.1 นอร์มัล

5. สารละลายเมททิลีนบลู ($C_{16}H_{18}ClN_3S$) เข้มข้นร้อยละ 0.04
6. สารละลายฟีนอล (C_6H_5OH) เข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร
7. สารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) เข้มข้น 0.1 นอร์มัล
8. สารละลายโบรเมท-โบรไมด์ ($KBrO_3$-Br) เข้มข้น 0.1 นอร์มัล
9. สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) เข้มข้นร้อยละ 12.5 โดยน้ำหนัก
10. กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl)
11. สารละลายซิลเวอร์ไนเตรตเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
12. ก๊าซไนโตรเจน
13. ก๊าซฮีเลียม

วิธีการดำเนินการศึกษา

1. การเตรียมวัตถุดิบ

1.1 นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วไปอบที่ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

1.2 นำเปลือกที่อบแล้วมาบดด้วยเครื่องบดละเอียดแบบ ball mill

1.3 นำเปลือกที่ผ่านการบดแล้วไปคัดแยกขนาดด้วยชุดตะแกรงร่อน โดยแยกเป็น 3 ขนาด คือ 1.18-1.70, 1.7-2.83 และ 2.83-4.00 มิลลิเมตร

1.4 วิเคราะห์สมบัติเบื้องต้น (proximate analysis) ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วดังนี้

- ปริมาณเถ้า
- ปริมาณสารระเหย
- ปริมาณความชื้น
- ปริมาณคาร์บอนคงตัว

2. การผลิตถ่านกัมมันต์

2.1 กระบวนการ 2 ขั้นตอน

คือการแยกการคาร์บอไนซ์เซชันและการกระตุ้นออกจากกัน โดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกระตุ้น มีขั้นตอนดังนี้

2.1.1 การคาร์บอไนซ์เซชัน

2.1.1.1 นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วบรรจุลงในท่อซึ่งทำด้วยลวดทนไฟแล้วนำไปใส่ในเตาเผาคาร์โบไลต์ (carbolite)

2.1.1.2 ให้ความร้อนและป้อนก๊าซไนโตรเจนเริ่มจับเวลาเมื่ออุณหภูมิถึงจุดที่ต้องการ

2.1.1.3 เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด หยุดการให้ความร้อนแล้วปล่อยให้เย็นภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนแล้วจึงนำถ่านออกจากเตา

2.1.1.4 ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอุณหภูมิในการคาร์บอไนซ์เซชันเป็น 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30, 60 และ 120 นาที

2.1.1.5 นำถ่านที่ได้ไปทำการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (proximate analysis) ของถ่านคาร์บอไนซ์เซชันเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

2.1.1.6 ทำการคาร์บอไนซ์เซชันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วจากสภาวะที่เหมาะสมให้ได้ถ่านคาร์บอไนซ์ปริมาณมากพอ เพื่อนำไปหาสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นต่อไป

2.2.2 กระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

คัดขนาดถ่านที่เหมาะสมจากการคาร์บอไนซ์เซชัน ให้มีขนาด 2.83-4.00 1.70-2.83 และ 1.17-1.70 มิลลิเมตร

2.2.2.1 นำถ่านที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ที่สภาวะซึ่งให้สมบัติดีที่สุดบรรจุในเบดแล้วนำไปใส่ในท่อปฏิกรณ์ ผ่านก๊าซไนโตรเจนในเบด

2.2.2.2 ให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่กำหนดแล้วปิดวาล์วไนโตรเจน ปล่อยไอน้ำเข้าท่อปฏิกรณ์ด้วยอัตรา 4 กรัมต่อนาที เริ่มจับเวลา

2.2.2.3 เมื่อถึงเวลาตามกำหนด ทำการปิดไอน้ำ แล้วปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าแทนที่จนกระทั่งถ่านเย็น จึงเอาออกจากท่อปฏิกรณ์

2.2.2.4 ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอุณหภูมิในการกระตุ้นเป็น 500 600 700 และ800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ

2.2.2.5 นำถ่านที่กระตุ้นแล้วไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ

2.2 กระบวนการขั้นตอนเดียว

เป็นการนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วมาเผาให้เป็นถ่านภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนแล้วกระตุ้นด้วยไอน้ำต่อเนื่องกันไป มีขั้นตอนดังนี้

2.2.1 นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วบรรจุในเบดแล้วนำไปใส่ในท่อปฏิกรณ์

2.2.2 ให้ความร้อนกับเตาเผาและให้ก๊าซไนโตรเจนผ่านเบด

2.2.3 เมื่ออุณหภูมิถึงจุดที่ต้องการแล้วปิดวาล์วไนโตรเจน ปล่อยไอน้ำเข้าท่อปฏิกรณ์ด้วยอัตรา 4 กรัมต่อนาที เริ่มจับเวลา

2.2.4 เมื่อถึงเวลาตามกำหนดทำการปิดไอน้ำแล้วปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าแทนที่จนกระทั่งถ่านเย็น จึงเอาออกจากท่อปฏิกรณ์

2.2.5 ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอุณหภูมิในการกระตุ้นเป็น 500 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ

2.2.6 นำถ่านที่กระตุ้นแล้วไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ

2.3 การกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์

เป็นการกระตุ้นด้วยการใช้สารเคมี $ZnCl_2$ โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ อุณหภูมิ เวลา และ อัตราส่วนของวัตถุดิบต่อสารเคมี

2.3.1 หาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้ว

2.3.1.1 นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วแช่ในสารละลาย $ZnCl_2$ เข้มข้นร้อยละ 50ในอัตราส่วน 1:1 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

2.3.1.2 นำของผสมไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

2.3.1.3 บรรจุของผสมในท่อสแตนเลส นำไปเผาในเตาคาร์โบไลต์

2.3.1.4 อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง คือ 400, 500, 600 และ 700 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2.3.1.5 นำถ่านที่ได้มาล้างเอาสารเคมีออก โดยการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 และน้ำร้อนหลายๆครั้ง จนหมด

2.3.1.6 นำถ่านที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

2.3.1.7 วิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้

2.3.2 หาอัตราส่วนของซิงค์คลอไรด์ที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้ว

2.3.2.1 นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วแช่ในสารละลาย $ZnCl_2$ เข้มข้นร้อยละ 50ในอัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

2.3.2.2 นำของผสมไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

2.3.2.3 บรรจุของผสมในท่อสแตนเลส นำไปเผาในเตาคาร์โบไลต์

2.3.2.4 โดยใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมจาก 2.3.1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2.3.2.5 นำถ่านที่ได้มาล้างเอาสารเคมีออกโดยการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 และน้ำร้อนหลายๆครั้ง จนหมด

2.3.2.6 นำถ่านที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

2.3.2.7 วิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้

2.3.3 หาเวลาที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้ว

2.3.1.1 นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วแช่ในสารละลาย $ZnCl_2$ เข้มข้นร้อยละ 50ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจาก 2.3.2 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

2.3.1.2 นำของผสมไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

2.3.1.3 บรรจุของผสมในท่อสแตนเลส นำไปเผาในเตาคาร์โบไลต์

2.3.1.4 โดยใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมจาก 2.3.1 คือ เป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง

2.3.1.5 นำถ่านที่ได้มาล้างเอาสารเคมีออก โดยการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 และน้ำร้อนหลายๆครั้ง จนหมด

2.3.1.6 นำถ่านที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

2.3.1.7 วิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้

3. การทดสอบสมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์

3.1 วิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (proximate analysis)

3.1.1 ความชื้นตาม ASTM D 3838-80 (1982)

3.1.2 ปริมาณเถ้าตาม ASTM 3174-93 (1982)

3.1.3 ปริมาณสารระเหยตาม ASTM 3172-73 (1982)

3.2 วิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์

3.2.1 การดูดซับไอโอดีนตาม ASTM D 4607-86

3.2.2 การดูดซับเมททิลีนบลู ตาม Hassler (1974)

3.2.3 การดูดซับฟีนอลตาม AWWA, Standard of Granular Activated Carbon (1997)

3.2.4 ความหนาแน่นจริง ตามคู่มือการใช้เครื่อง Multipycnometer ของ Quanta Chrome

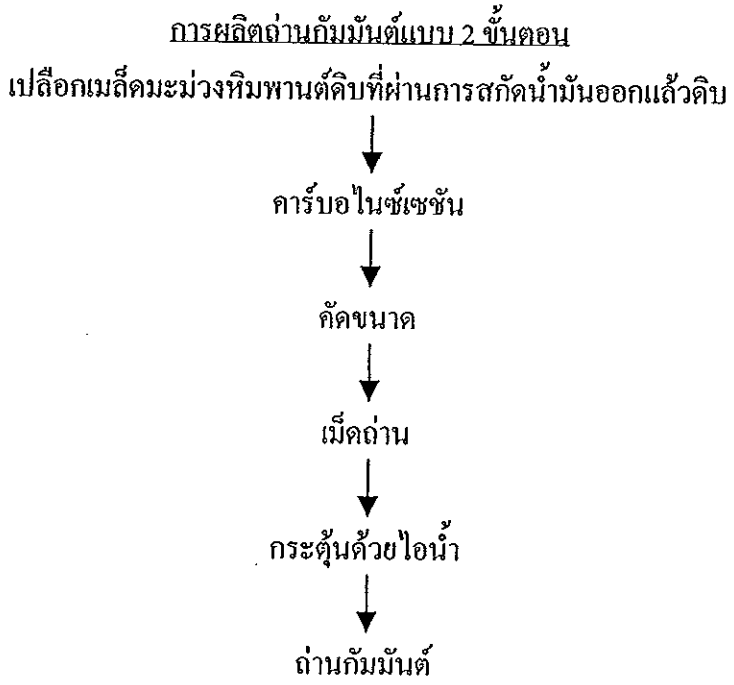
3.2.5 ความหนาแน่นปรากฏตาม JIS 1474-1975

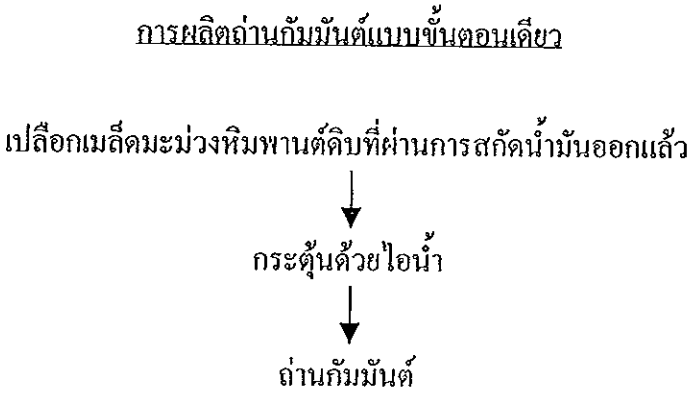
3.2.6 ความแข็งตาม ASTM D3802-73 (1982)

3.2.7 พื้นที่ผิวจำเพาะตาม ASTM C 819-77 (1977)

3.2.8 ความเป็นกรด ด่าง (Hassler,1974)

3.2.9 Scanning Electron Microscope ตามคู่มือการใช้เครื่อง SEM JSM-5800





ภาพประกอบ 23 แสดงการผลิตถ่านกัมมันต์แบบขั้นตอนเดียวและแบบ 2 ขั้นตอน

บทที่ 3

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. องค์ประกอบโดยประมาณของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้ว

ตาราง 2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันแล้วและวัตถุดิบอื่นๆ

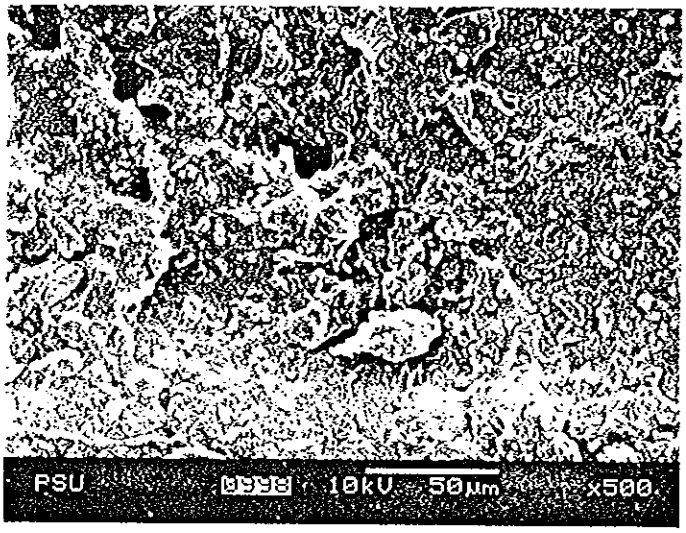
วัตถุดิบ	% dry basis		
	เถ้า	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว
เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	1.90	92.45	5.65
กะลาปาล์ม*	2.20	69.87	16.06
กะลาตาลโตนด**	1.90	80.10	18.00

* งานวิจัยของภัทรา ปัญญวัฒนกิจ, 2540

** งานวิจัยของบุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันแล้วจะสังเกตได้ว่าปริมาณของเถ้ามีค่าร้อยละ 1.90 ซึ่งใกล้เคียงกับวัตถุดิบชนิดอื่น ปริมาณคาร์บอนคงตัวมีค่าร้อยละ 5.65 และปริมาณสารระเหยร้อยละ 92.45 ส่วนลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบแสดงดังภาพประกอบ 24

สำหรับปริมาณขององค์ประกอบโดยประมาณของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น สายพันธุ์ สภาพภูมิอากาศ การสกัดน้ำมันออกจากเปลือก เป็นต้น โดยเฉพาะสารระเหยจะมีมากหรือน้อยขึ้นกับปริมาณของน้ำมัน (CNSL) ที่เหลืออยู่ภายในเปลือกที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้ว



ภาพประกอบ 24 ลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้ว

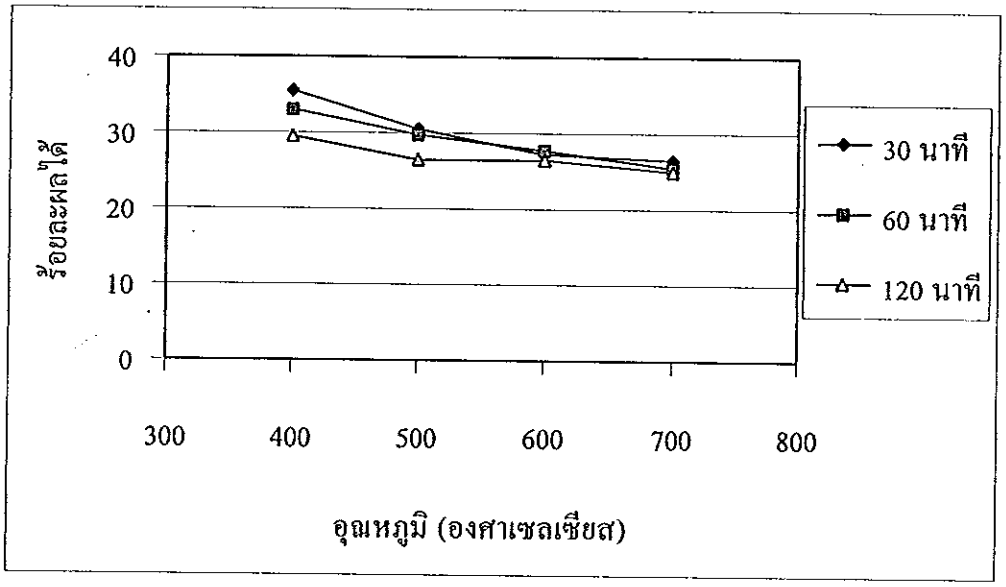
2. การผลิตถ่านกัมมันต์แบบ 2 ขั้นตอน

2.1 การคาร์บอไนซ์เซชันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบ

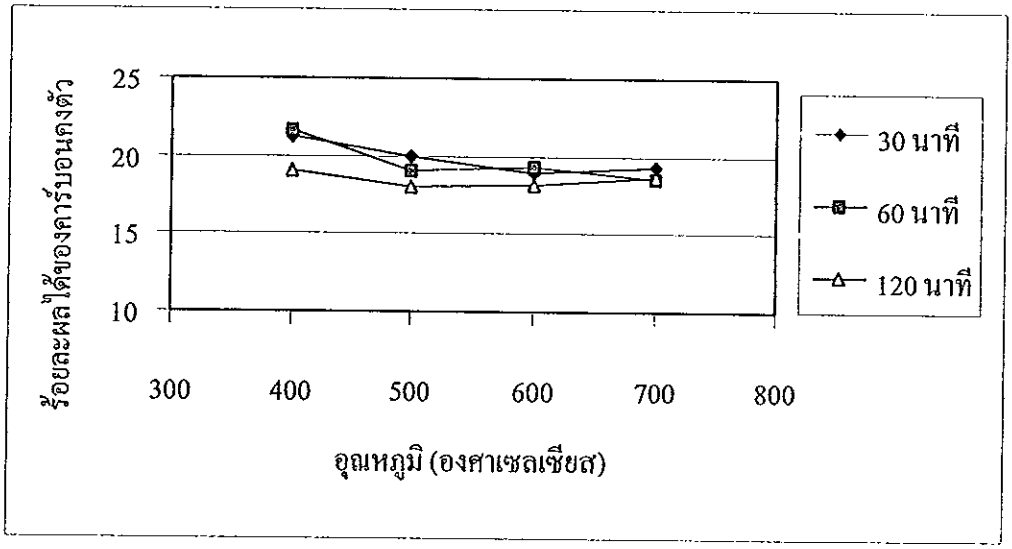
จากการคาร์บอไนซ์เซชันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 400 500 600 และ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 60 และ 120 นาที ผลผลิตที่ได้จากการคาร์บอไนซ์เซชันเรียกว่าถ่านชาร์ (carbonized char) หรือถ่านคาร์บอไนซ์หลังจากนั้นนำถ่านที่ได้มาวิเคราะห์หาองค์ประกอบโดยประมาณ ได้แก่ ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัวและ ร้อยละผลได้ นอกจากนี้ยังได้แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติของถ่านที่ได้ ณ เวลาต่างๆ และ ผลของเวลาที่มีต่อสมบัติของถ่านที่ได้ ณ เวลาต่างๆดังตาราง 3 และภาพประกอบ 25 ถึง 30

ตาราง 3 แสดงสมบัติของถ่านคาร์บอไนซ์

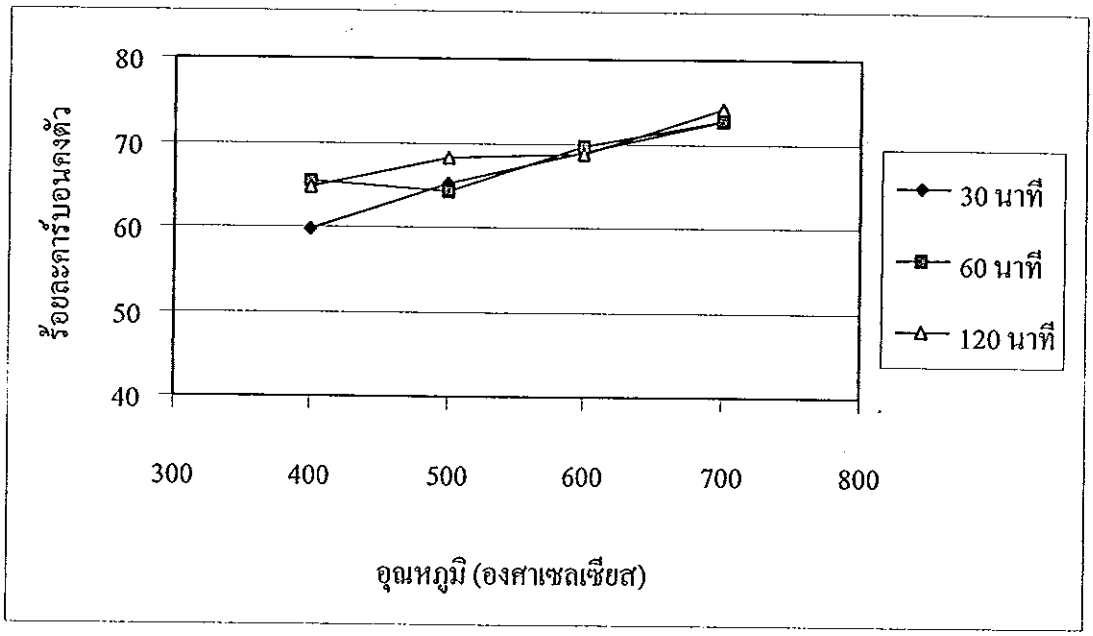
อุณหภูมิ (^{o}C)	400			500			600			700		
เวลา (นาที)	30	60	120	30	60	120	30	60	120	30	60	120
ผลได้ (%)	35.6	33.1	29.5	30.5	29.6	26.4	27.4	27.8	26.5	26.5	25.4	25.1
ผลได้ของคาร์บอนคงตัว (%)	21.3	21.6	19.1	19.9	19.0	18.0	18.9	19.3	18.2	19.3	18.5	18.6
คาร์บอนคงตัว (%)	59.7	65.4	64.8	65.2	64.3	68.3	69.1	69.6	68.8	72.6	72.7	74.1
สารระเหย (%)	35.0	29.6	29.0	28.0	29.3	24.6	24.5	23.4	24.0	20.4	19.7	18.1
เถ้า (%)	5.39	5.02	6.22	6.78	6.50	7.13	6.48	6.97	7.18	7.01	7.64	7.78



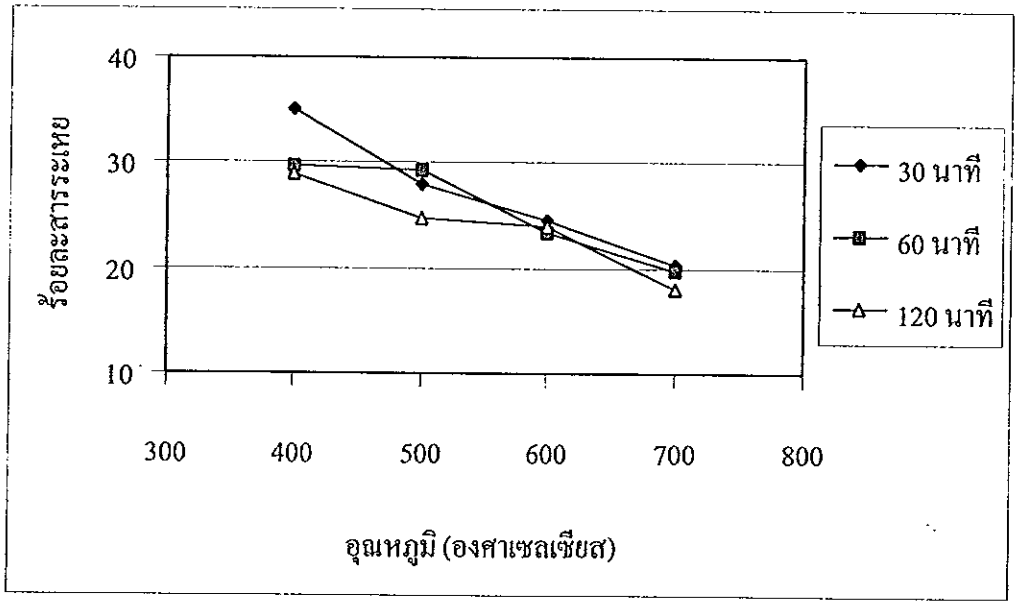
ภาพประกอบ 25 แสดงผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์เซชันที่มีต่อค่าร้อยละผลได้ ณ เวลาต่างๆ



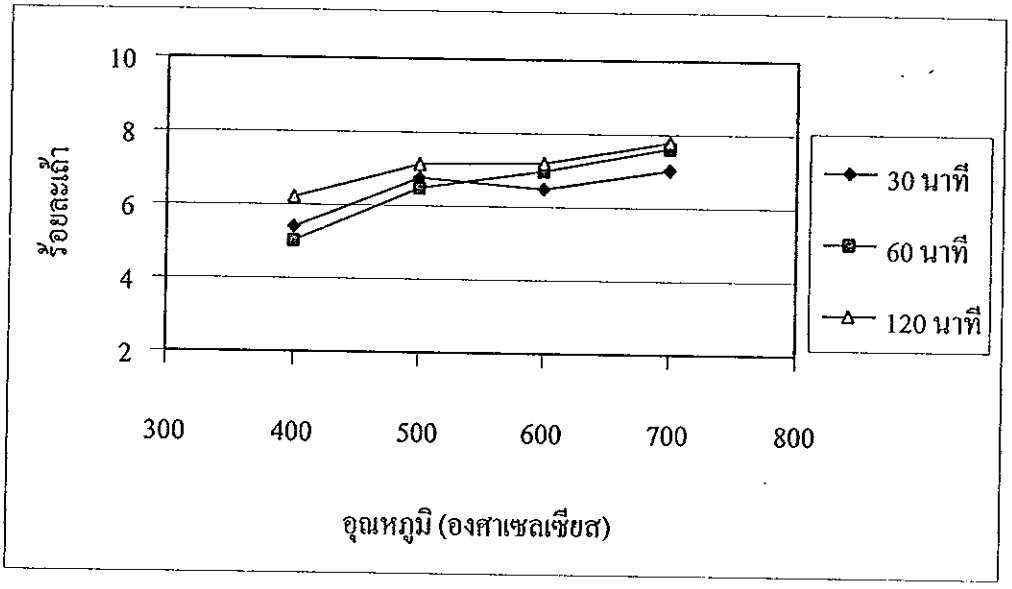
ภาพประกอบ 26 แสดงผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์เซชันที่มีต่อค่าร้อยละผลได้ของคาร์บอนคงตัว ณ เวลาต่างๆ



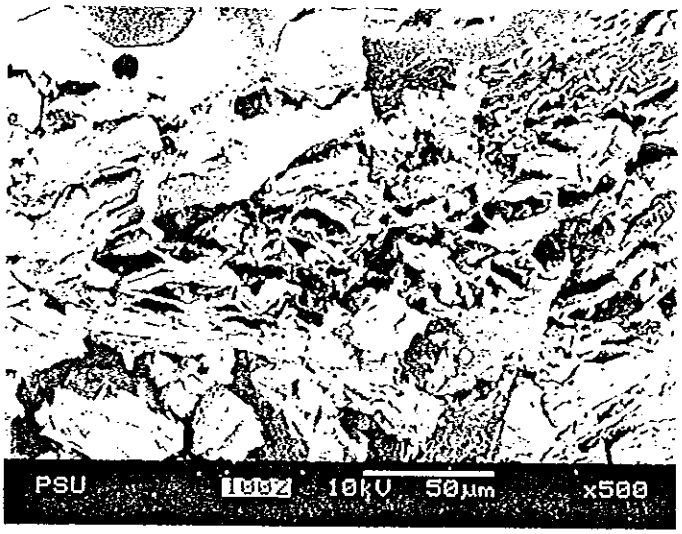
ภาพประกอบ 27 แสดงผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์เซชันที่มีต่อค่าร้อยละคาร์บอนคงตัว ณ เวลาต่างๆ



ภาพประกอบ 28 แสดงผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์เซชันที่มีต่อค่าร้อยละสารระเหย ณ เวลาต่างๆ



ภาพประกอบ 29 แสดงผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์เซชันที่มีต่อค่าร้อยละเถ้า ณ เวลาต่างๆ



ภาพประกอบ 30 ลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวของถ่านคาร์บอไนซ์

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ในการคาร์บอไนซ์เซชันจะมีตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคืออุณหภูมิและเวลาพบว่าควรใช้วัตถุดิบที่เตรียมจากการคาร์บอไนซ์เซชันที่มีอุณหภูมิไม่สูงและระยะเวลาไม่นานนัก เนื่องจากมีผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ คือ ร้อยละผลได้ ร้อยละผลได้ของคาร์บอนคงตัว ร้อยละคาร์บอนคงตัว ร้อยละสารระเหยและปริมาณเถ้า

<u>ผลของอุณหภูมิ</u>

ร้อยละผลได้ซึ่งเป็นร้อยละของมวลของถ่านคาร์บอไนซ์ต่อมวลของวัตถุดิบเริ่มต้นได้ถูกเสนอผลในตาราง 3 และภาพประกอบ 25 จะเห็นได้ว่าร้อยละผลได้มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในการคาร์บอไนซ์เซชันเพิ่มขึ้น โดยร้อยละผลได้ของถ่านเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มีค่าลดลงจาก 35.6 ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็น 26.5 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เมื่อทำการคาร์บอไนซ์เซชันที่เวลา 30 นาที จาก 33.1 เป็น 25.4 ที่เวลา 60 นาที และจาก 29.5 เป็น 25.1 ที่เวลา 120 นาที สังเกตได้ว่าร้อยละของผลได้จะลดลงอย่างต่อเนื่องสำหรับการเพิ่มอุณหภูมิในช่วง 400-600 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิคาร์บอไนซ์เซชันเข้าใกล้ 700 องศาเซลเซียส ร้อยละของผลได้มีแนวโน้มเข้าสู่การคงที่ การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้คาร์บอนคงตัวในวัตถุดิบเกิดการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างอะโรแมติก จากภาพประกอบ 28 ปริมาณสารระเหยมีค่าลดลงจาก 35 ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็น 20.4 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเมื่อทำการคาร์บอไนซ์เซชันที่เวลา 30 นาที เนื่องจากสารระเหยภายในเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์สลายตัวและถูกไล่ออกไปโดยความร้อนจึงส่งผลให้ร้อยละผลได้ของถ่านคาร์บอไนซ์เซชันลดลงด้วย ส่วนที่เหลือคือทาร์และคาร์บอนคงตัว และจากเหตุผลเดียวกันนี้ทำให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นจาก 59.7 เป็น 72.6 ที่เวลา 30 นาที จาก 65.4 เป็น 72.7 ที่เวลา 60 นาทีและจาก 64.8 เป็น 74.1 ที่เวลา 120 นาที ส่วนปริมาณเถ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิในการคาร์บอไนซ์เซชันเพิ่มขึ้น

<u>ผลของเวลา</u>

จากตาราง 3 พบว่าร้อยละผลได้มีค่าลดลงเมื่อเวลาในการคาร์บอไนซ์เซชันเพิ่มขึ้น โดยร้อยละผลได้ของถ่านเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มีค่าลดลงจาก 35.6 เป็น 29.5 ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จาก 30.5 เป็น 26.4 ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จาก 27.4 เป็น 26.5 ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสและจาก 26.5 เป็น 25.1 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้จะลดลงเมื่อเพิ่มเวลาในการคาร์บอไนซ์เซชัน ปริมาณสารระเหยลดลงจาก 35 เป็น 29 ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จาก 28 เป็น 24.6 ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จาก 24.5 เป็น 24 ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และจาก 20.4 เป็น 18.1 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าสารระเหยที่อยู่บริเวณผิวหรือมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าจะแพร่ผ่านออกจากถ่านได้ง่าย ส่วนที่อยู่ในถ่านหรือมีโมเลกุลสูงกว่าจะออกได้ยากจึงต้องใช้เวลาในการไล่สารระเหยนาน จากเหตุผลนี้ทำให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น

จาก 59.7 เป็น 64.8 ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จาก 65.2 เป็น 68.3 ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จาก 69.1 เป็น 68.8 ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสและจาก 72.6 เป็น 74.1 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ส่วนปริมาณเถ้ามีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

ในการสรุปการเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์เซชันนั้น จากการสำรวจเอกสาร พบว่าถ่านที่จะนำมากระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติที่ดี ควรมีค่าสารระเหยอยู่ระหว่างร้อยละ 20-30 (จักริน นิธีจันทร์, 2536) มีปริมาณร้อยละคาร์บอนคงตัวสูงและปริมาณเถ้าต่ำ แต่ปริมาณผลิตภัณฑ์ก็ควรมีปริมาณสูงด้วย (ภัทรา ปัญญวัฒนกิจ, 2541) ดังนั้น อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมคือที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาทีซึ่งมีปริมาณสารระเหยร้อยละ 29.6 ปริมาณเถ้าร้อยละ 5.02 ปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 65.4 และปริมาณผลได้ร้อยละ 33.1 ซึ่งมีปริมาณสารระเหยอยู่ในช่วงที่ต้องการ มีปริมาณร้อยละคาร์บอนคงตัวและผลได้สูงทั้งยังมีค่าเถ้าต่ำอีกด้วย

หลังจากได้สภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์เซชันแล้วจึงนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มาทำการคาร์บอไนซ์เซชันเพื่อให้มีปริมาณมากพอในการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง แล้วนำมาคัดขนาดคือ 2.83-4.00, 1.70-2.83 และ 1.17-1.70 มิลลิเมตร จากนั้นจึงนำมากระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งโดยมีตัวแปรคือ อุณหภูมิและเวลา อุณหภูมิที่ใช้คือ 500, 600, 700และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง

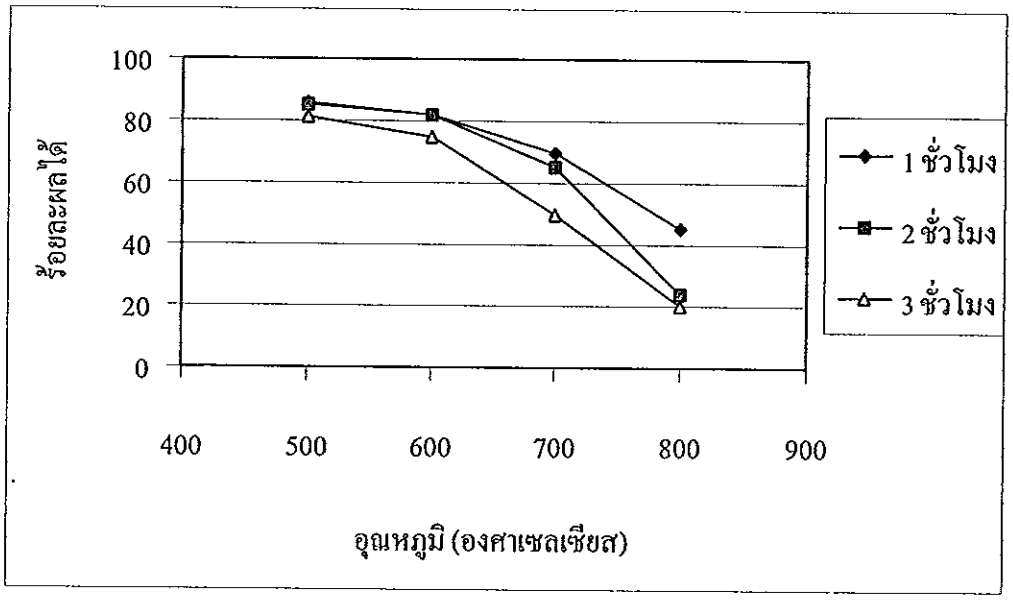
2.2 การกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

นำถ่านคาร์บอไนซ์ซึ่งได้จากการเตรียมที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ที่มีขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร มากระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งโดยมีอัตราการป้อนไอน้ำ 4 กรัมต่อนาที ที่อุณหภูมิ 500, 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ ณ เวลาต่างๆ แสดงดังตาราง 4 และภาพประกอบ 31 ถึง 38

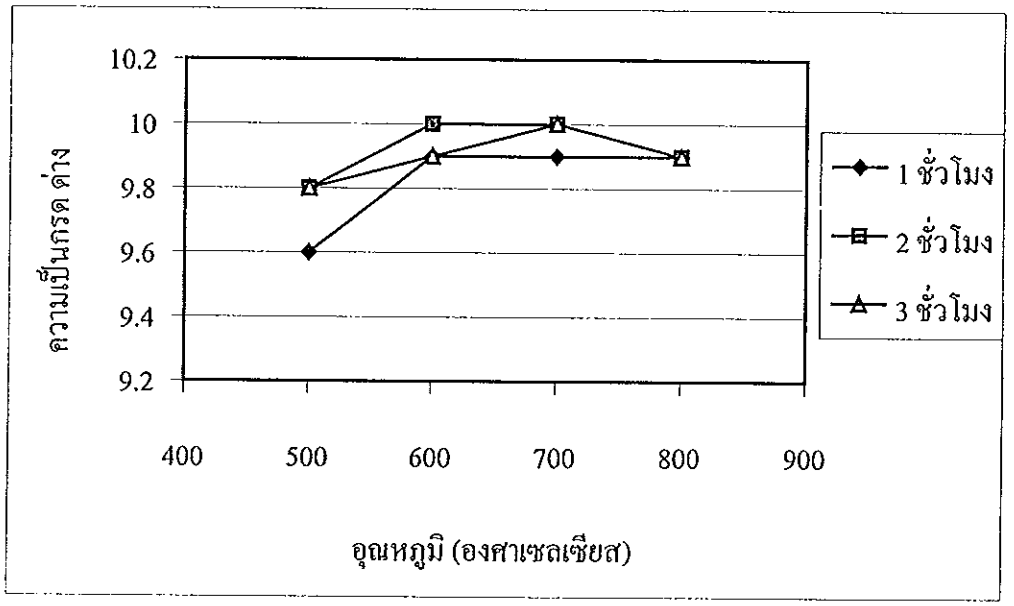
ตาราง 4 แสดงสมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.0 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ที่สภาวะต่างๆ

สภาวะ		สมบัติ						
Temp. (°C)	Time (hr)	Iodine Ads. (mg/g)	MB Ads. (mg/g)	Phenol Ads. (mg/g)	Bulk Density (g/cm^3)	True Density (g/cm^3)	pH	%Yield*
500	1	102.37	26.57	27.57	0.688	1.478	9.6	86
	2	205.23	26.43	37.85	0.681	1.486	9.8	85
	3	221.75	26.38	39.83	0.681	1.490	9.8	81
600	1	216.34	27.77	41.84	0.686	1.539	9.9	82
	2	227.81	29.28	43.47	0.676	1.596	10.0	82
	3	278.91	28.58	60.69	0.670	1.595	9.9	75
700	1	393.39	27.75	101.09	0.685	1.623	9.9	70
	2	414.33	28.81	116.47	0.673	1.643	10.0	65
	3	454.42	28.70	116.91	0.644	1.658	10.0	50
800	1	537.25	55.79	125.90	0.682	1.700	9.9	45
	2	416.79	41.72	100.00	0.660	1.646	9.9	24
	3	370.10	27.96	95.25	0.641	1.627	9.9	20

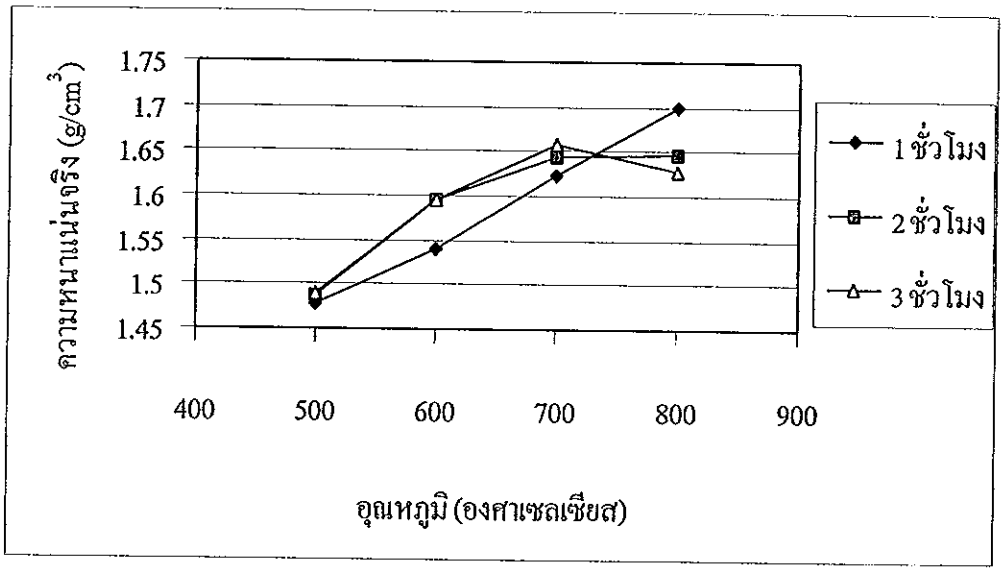
%Yield* เป็นผลได้ที่เทียบจากถ่านคาร์บอไนซ์



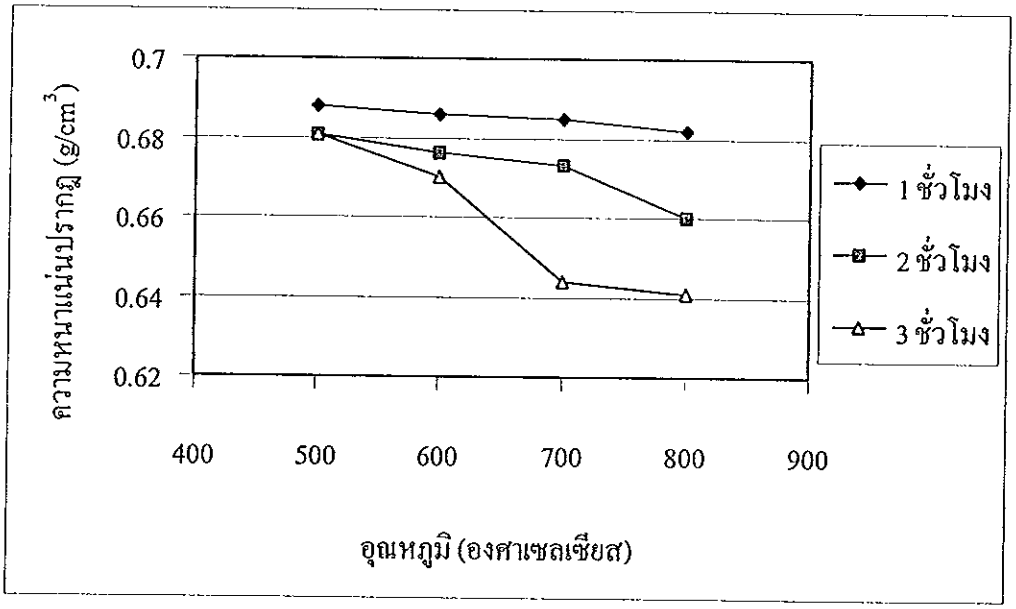
ภาพประกอบ 31 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ ณ เวลาต่างๆ



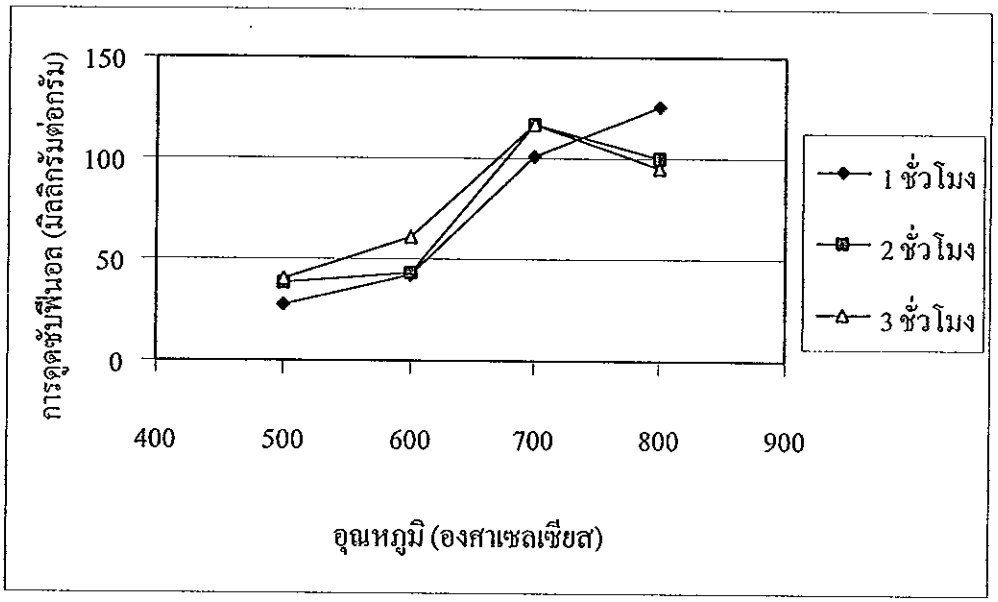
ภาพประกอบ 32 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อความเป็นกรด ด่างของถ่านกัมมันต์ ณ เวลาต่างๆ



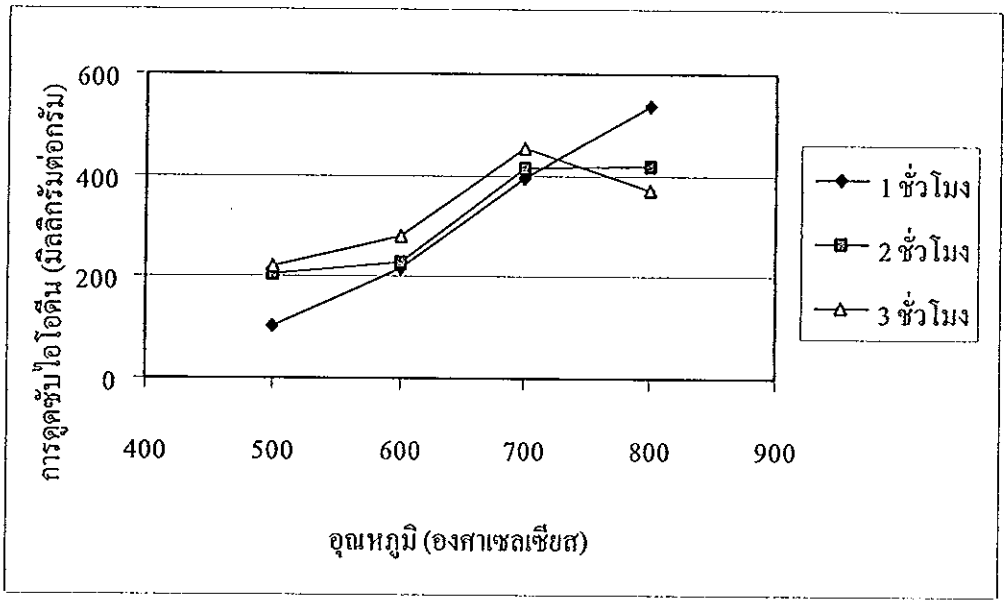
ภาพประกอบ 33 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาแน่นจริงของถ่านกัมมันต์ ณ เวลาต่างๆ



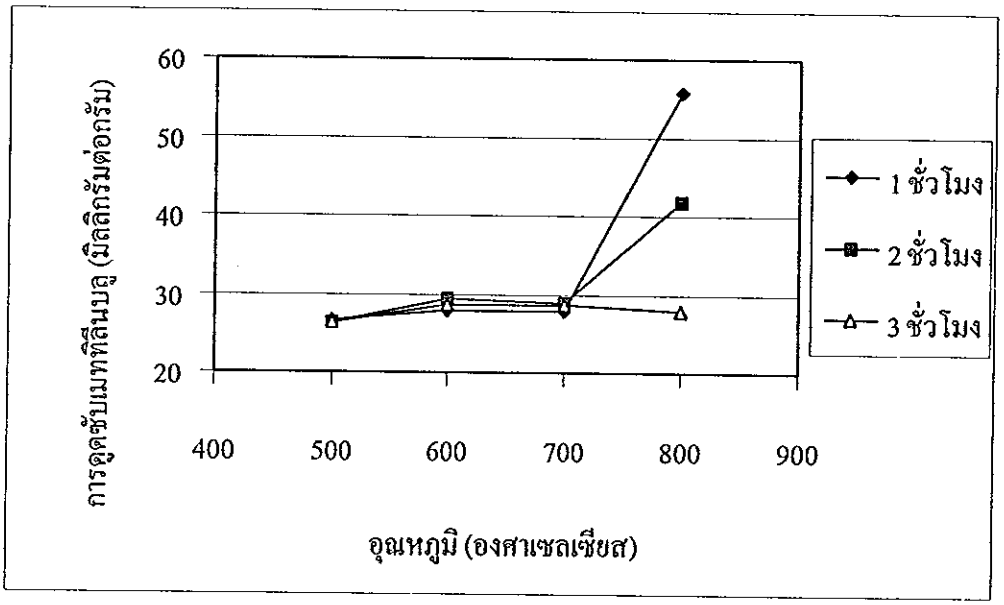
ภาพประกอบ 34 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาแน่นปรากฏของถ่านกัมมันต์ ณ เวลาต่างๆ



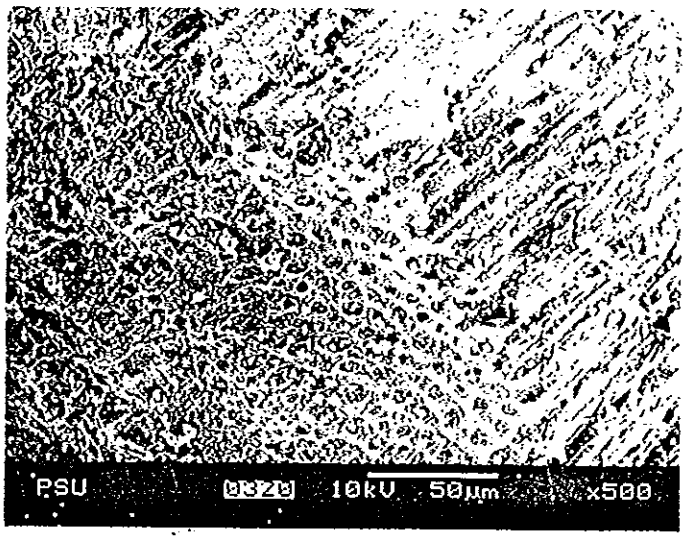
ภาพประกอบ 35 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์ ณ เวลาต่างๆ



ภาพประกอบ 36 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ ณ เวลาต่างๆ



ภาพประกอบ 37 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ ณ เวลาต่างๆ



ภาพประกอบ 38 ลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นถ่านขนาด 2.83-4.00 มม. ด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

สภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ อุณหภูมิและเวลา ซึ่งตัวแปรดังกล่าวมีผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ดังนี้

<u>ผลของอุณหภูมิ</u>

จากตาราง 4 และภาพประกอบ 31 ถึง 38 การดูดซับเมททิลีนบลูจะมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในช่วงแรก คือ ช่วงอุณหภูมิ 500-700 องศาเซลเซียส และเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มถึง 800 องศาเซลเซียส โดยมีค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 26.57 เป็น 55.79 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่เวลา 1 ชั่วโมง เพิ่มขึ้นจาก 26.43 เป็น 41.72 มิลลิกรัมต่อกรัมที่เวลา 2 ชั่วโมง ส่วนที่ 3 ชั่วโมงค่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่งแล้วลดต่ำลง นั่นคือ เพิ่มขึ้นจาก 26.38 เป็น 28.7 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส แล้วจะลดต่ำลงเหลือ 27.96 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

การดูดซับไอโอดีนที่ 3 ชั่วโมง มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 221.75 เป็น 454.42 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และลดลงเหลือ 370.1 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ส่วนที่ 1 ชั่วโมง ค่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตลอดช่วงอุณหภูมิ 500-800 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มจาก 102.37 เป็น 537.25 และที่ 2 ชั่วโมงค่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตลอดช่วงอุณหภูมิ 500-800 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มจาก 205.23 เป็น 416.79

การดูดซับฟีนอลที่ 2 ชั่วโมงมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 37.85 ถึง 116.47 มิลลิกรัมต่อกรัม ในช่วงอุณหภูมิ 500-700 องศาเซลเซียส และลดลงเป็น 100 มิลลิกรัมต่อกรัมที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ที่ 3 ชั่วโมง มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 39.83 เป็น 116.91 ในช่วงอุณหภูมิ 500-700 องศาเซลเซียสและลดลงเหลือ 95.25 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ส่วนที่ 1 ชั่วโมง ค่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตลอดช่วงอุณหภูมิ 500-800 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มจาก 27.57 เป็น 125.9

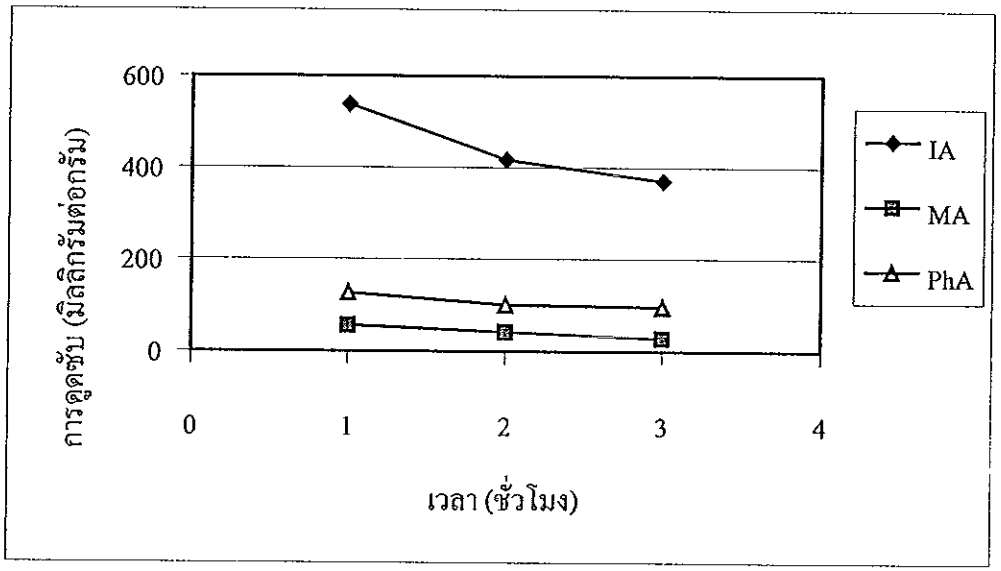
ความหนาแน่นปรากฏและร้อยละผลได้

ความหนาแน่นปรากฏลดลงจาก 0.688 เป็น 0.682 g/cm^3 ที่เวลา 1 ชั่วโมง ลดลงจาก 0.681 เป็น 0.66 g/cm^3 ที่เวลา 2 ชั่วโมงและลดลงจาก 0.681 เป็น 0.641 g/cm^3 ที่เวลา 3 ชั่วโมง ความหนาแน่นปรากฏลดลงเนื่องจากเกิดการไล่ทาร์ สารระเหยและสารปนเปื้อนอื่นๆออกอีกครั้งหนึ่งซึ่งที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้สารระเหยถูกไล่ออกได้มากขึ้น ถ่านมีความพรุนสูงขึ้นทำให้น้ำหนักถ่านลดลง ส่วนร้อยละผลได้มีค่าลดลงจาก 86 เป็น 45 ที่เวลา 1 ชั่วโมง ลดลงจาก 85 เป็น 24 ที่เวลา 2 ชั่วโมงและลดลงจาก 81 เป็น 20 ที่เวลา 3 ชั่วโมง

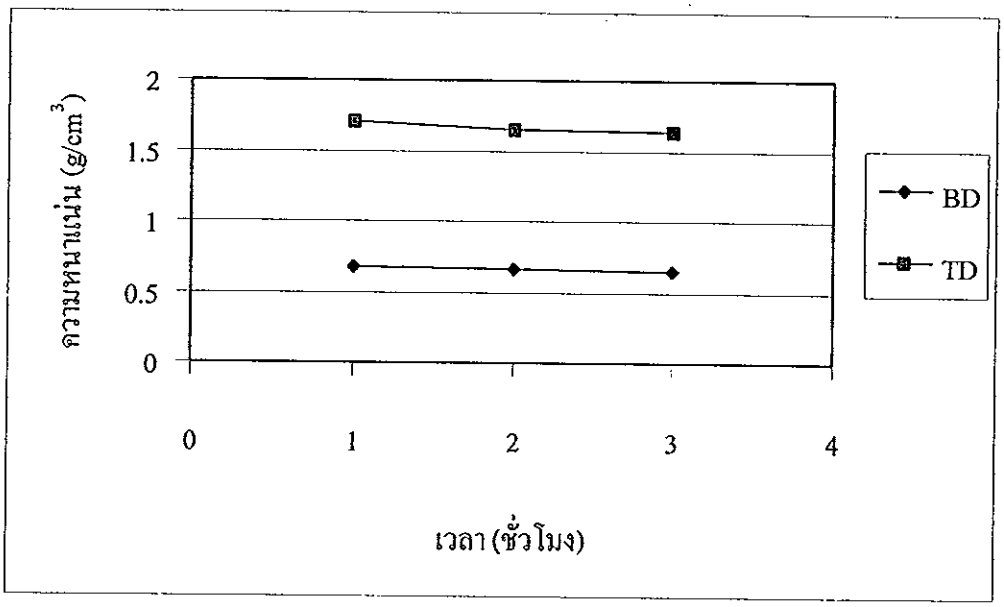
ความหนาแน่นจริง ในการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้สามารถไล่ทาร์และสารปนเปื้อนต่างๆออกจากรูพรุนของถ่านได้มากขึ้น ทำให้ความหนาแน่นจริงของถ่านมีค่าเพิ่มขึ้นรวมทั้งความเป็นกรดด่างของถ่านก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเช่นกัน

จากการทดลองจะเห็นว่า อุณหภูมิที่ทำการกระตุ้นแล้วได้ถ่านกัมมันต์ที่มีการดูดซับมากที่สุดคือ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีค่าการดูดซับไอโอดีน 537 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับฟีนอล 125.9 มิลลิกรัมต่อกรัมและการดูดซับเมททิลีนบลู 55.79 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์แสดงดังภาพประกอบ 38

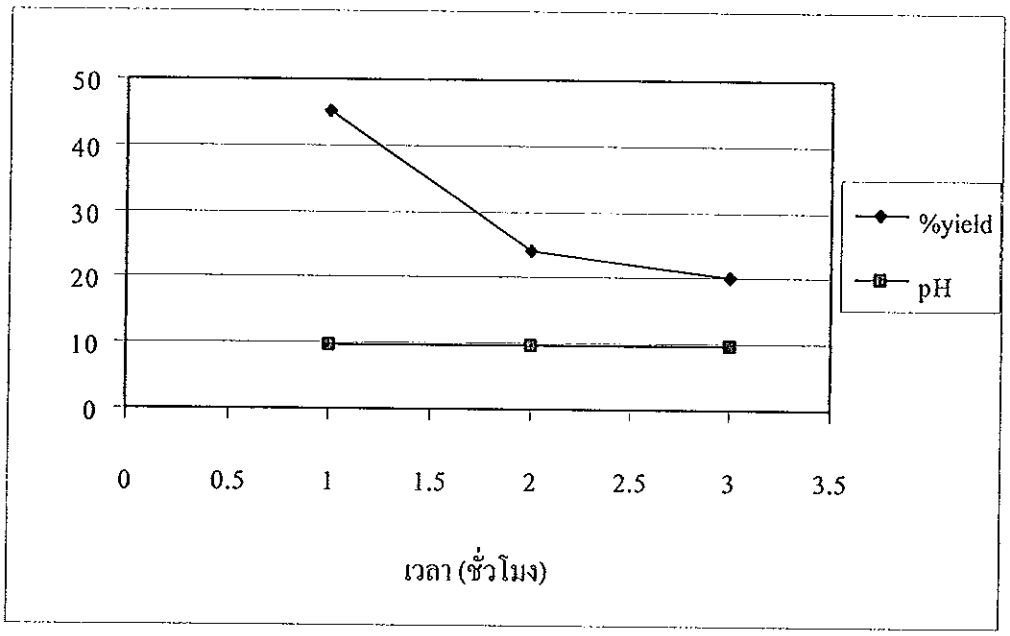
ผลของเวลา



ภาพประกอบ 39 แสดงผลของเวลาที่มีต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นถ่านขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ณ เวลาต่างๆ



ภาพประกอบ 40 แสดงผลของเวลาที่มีต่อความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นถ่านขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ณ เวลาต่างๆ

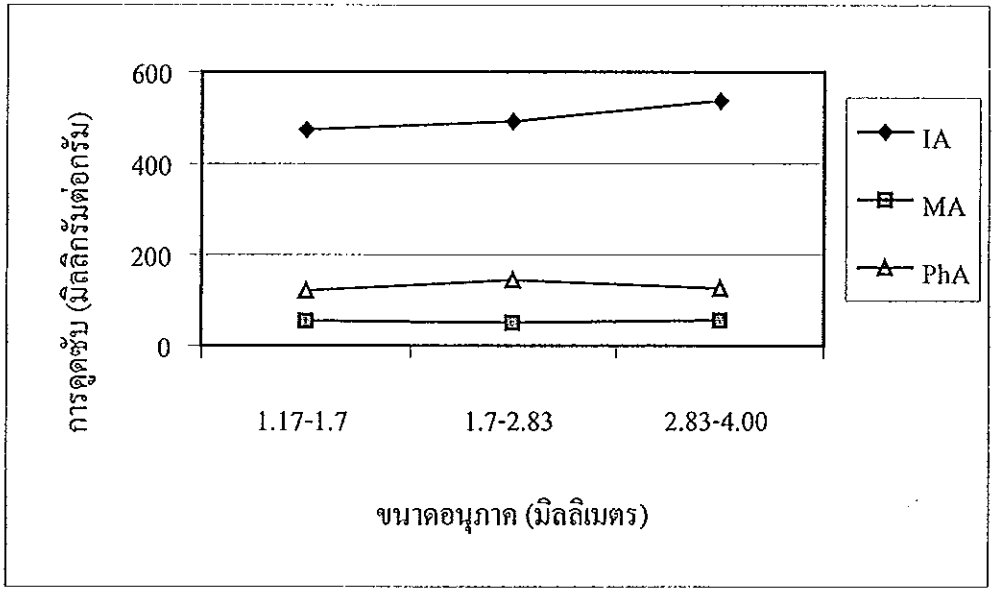


ภาพประกอบ 41 แสดงผลของเวลาที่มีต่อร้อยละผลได้และความเป็นกรด ด่างของถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นถ่านขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ณ เวลาต่างๆ

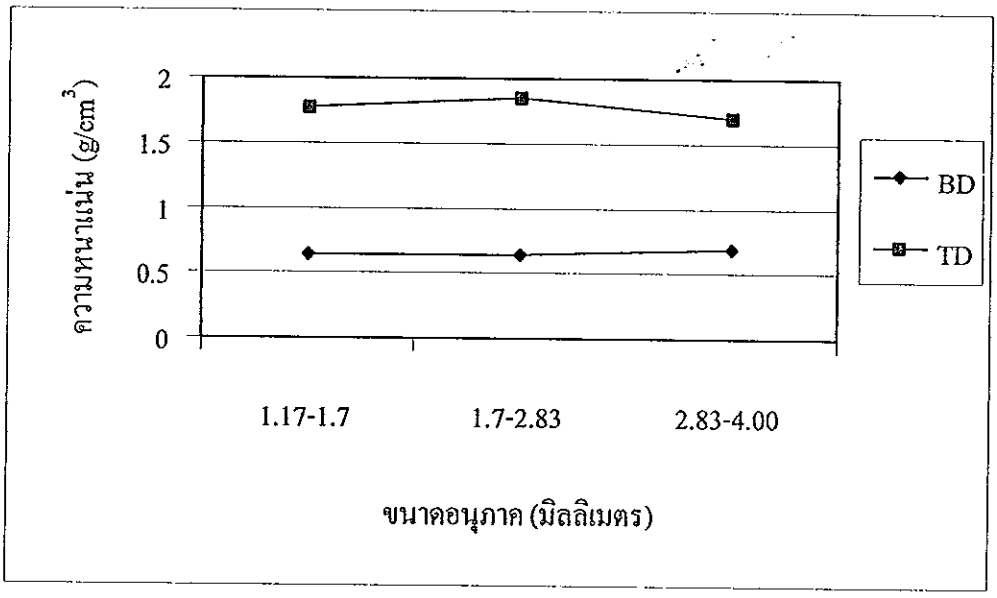
จากภาพประกอบ 39 ถึง 41 เป็นการกระตุ้นถ่านขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อเวลาในการกระตุ้นเปลี่ยนจาก 1 เป็น 3 ชั่วโมง ค่าการดูดซับไอโอดีนลดลงจาก 537.25 เป็น 370.10 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับเมททิลีนบลูลดลงจาก 55.79 เป็น 27.96 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมททิลีนบลูมีค่าค่อนข้างน้อยอาจเนื่องมาจากเมททิลีนบลูมีสมบัติเป็นด่างและถ่านที่ผลิตได้ก็เป็นด่างด้วยเช่นกัน การดูดซับฟีนอลลดลงจาก 125.90 เป็น 95.25 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับต่างๆมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากถ่านถูกออกซิไดซ์เป็นเวลานานทำให้เกิดการยุบตัวของผนังรูพรุนส่งผลให้รูพรุนขนาดเล็กเกิดการขยายตัว นอกจากนี้ยังทำให้ความหนาแน่นปรากฏและผลได้ของถ่านกัมมันต์ลดลงเช่นเดียวกันกับการเพิ่มอุณหภูมิ สำหรับค่าความเป็นกรด ด่างและความหนาแน่นจริงมีการเปลี่ยนแปลงน้อย

จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้นคือ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งให้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติดังนี้ ความหนาแน่นปรากฏ 0.682 g/cm^3 ความหนาแน่นจริง 1.70 g/cm^3 การดูดซับไอโอดีน 537.25 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับเมททิลีนบลู 55.79 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับฟีนอล 125.9 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าความเป็นกรด ด่าง 9.9 ผลได้ร้อยละ 45

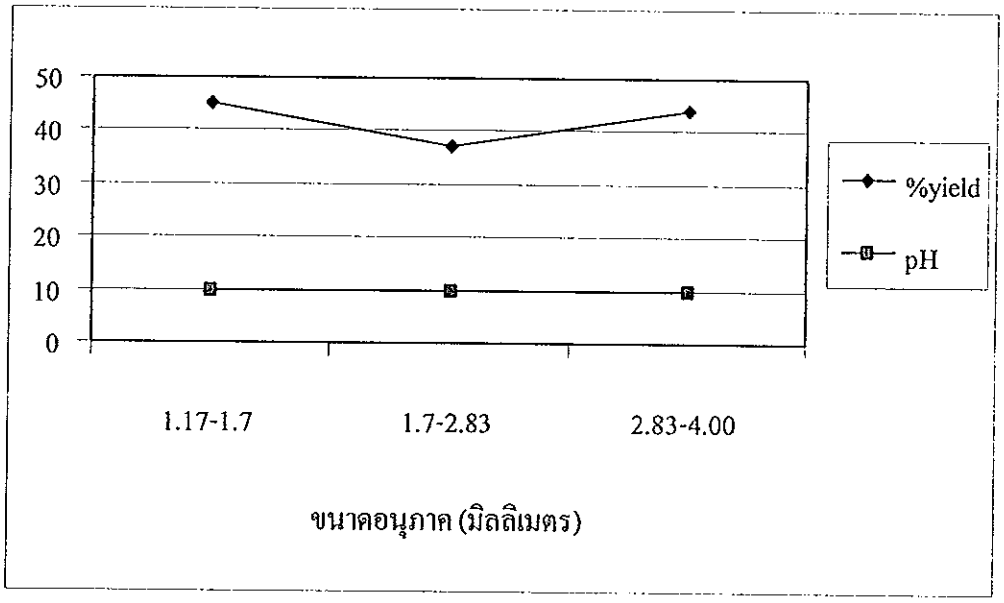
<u>ผลของขนาดอนุภาค</u>



ภาพประกอบ 42 แสดงผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อค่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 43 แสดงผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 44 แสดงผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อร้อยละผลได้และความเป็นกรด ด่างของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

จากการทดลองการกระตุ้นถ่านคาร์บอไนซ์โดยแปรขนาดของถ่าน 3 ขนาด คือ 1.17-1.70, 1.70-2.83, 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีการป้อนก๊าซไนโตรเจนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 4 กรัมต่อนาที พบว่าถ่านขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่ถูกกระตุ้นทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ซึ่งมีสมบัติที่ดีกว่าถ่านขนาดอื่น โดยมีค่าการดูดซับไอโอดีน 537.25 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับเมททิลีนบลู 55.79 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับฟีนอล 125.9 มิลลิกรัมต่อกรัม ความหนาแน่นปรากฏ 0.682 g/cm^3 ความหนาแน่นจริง 1.70 g/cm^3 ผลได้ร้อยละ 45 และ ความเป็นกรด ด่าง 9.9

จากการศึกษาสมบัติของถ่านกัมมันต์พบว่า ถ่านกัมมันต์ตัวใดที่ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงจะเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติที่ดีที่สุด เพราะว่าไอโอดีนเปรียบเสมือนเป็นสารพิษในน้ำ (Hassler , 1974) และถ่านขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนและเมททิลีนบลูสูงกว่าถ่านขนาดอื่นๆ ที่เป็นเช่นนี้เพราะถ่านขนาดเล็กและขนาดกลางสามารถบรรจุลงในเบดปฏิกรณ์ได้แน่นกว่าทำให้มีช่องว่างระหว่างอนุภาคถ่านน้อยกว่า ไอน้ำจึงผ่านเข้าไปเกิดปฏิกิริยาได้ยากกว่า ส่วนถ่านขนาดใหญ่ซึ่งมีช่องว่างระหว่างอนุภาคมากกว่าทำให้ไอน้ำผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่ายกว่า สำหรับค่าความหนาแน่นจริง ความหนาแน่นปรากฏ ร้อยละผลได้และความเป็นกรด ด่างมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ยังได้ทดสอบความแข็ง (hardness) ของถ่านกัมมันต์ พบว่ามีค่าความแข็ง 88.69 เพื่อใช้ในการพิจารณานำถ่านกัมมันต์ไปใช้ให้เหมาะสมกับการใช้งาน

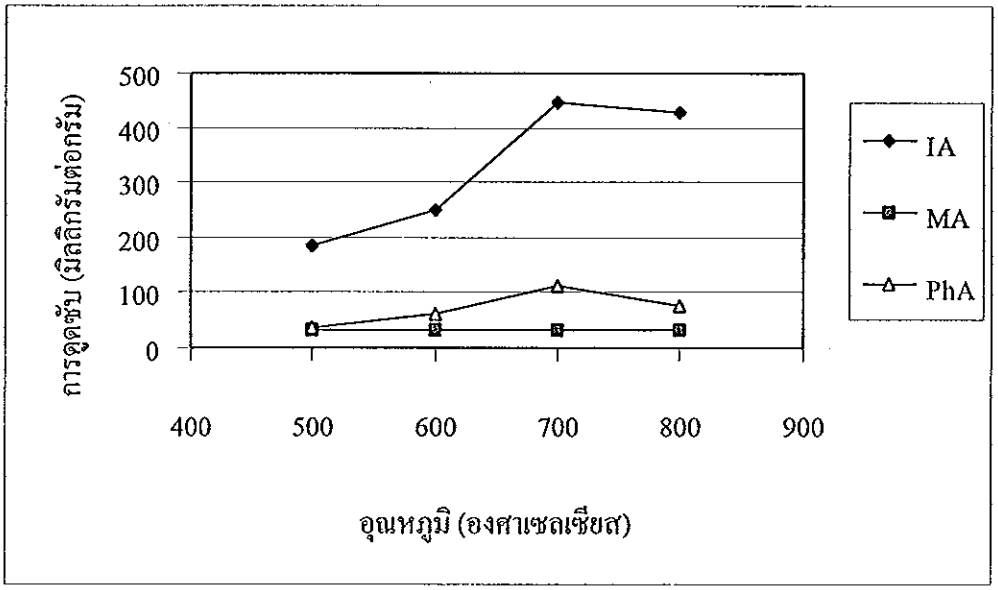
3. การผลิตถ่านกัมมันต์แบบขั้นตอนเดียว

ตาราง 5 แสดงสมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียว

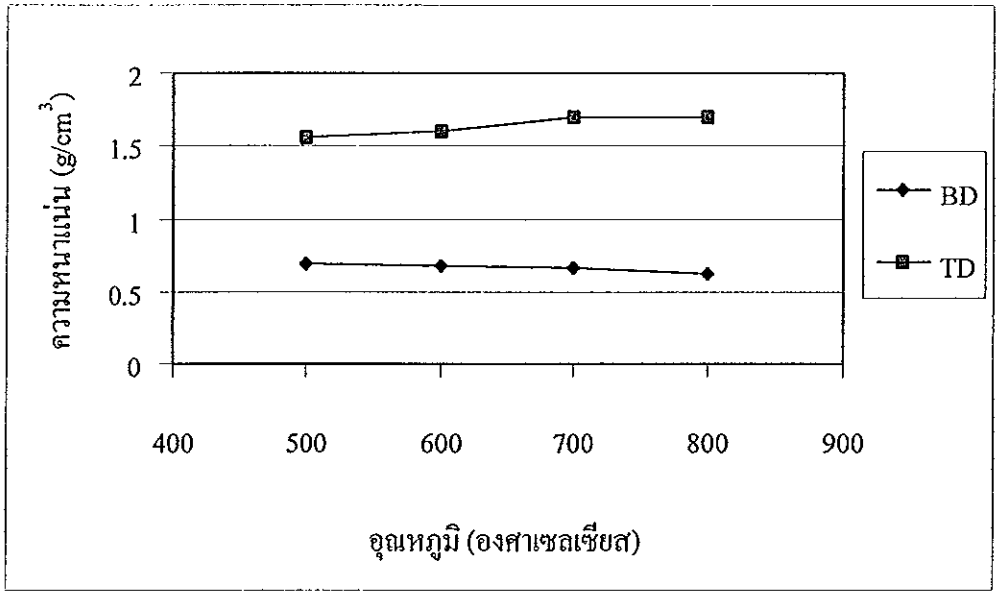
สภาวะ		สมบัติ						
Temp. (°C)	Time (hr)	Iodine Ads. (mg/g)	MB Ads. (mg/g)	Phenol Ads. (mg/g)	Bulk Density (g/cm^3)	True Density (g/cm^3)	pH	%Yield*
500	1	186.51	32.47	37.57	0.695	1.552	8.0	31
	2	221.91	32.58	28.92	0.677	1.561	7.8	29
	3	300.28	32.91	55.35	0.674	1.565	8.2	29
600	1	248.22	33.39	62.90	0.672	1.606	8.4	27
	2	306.16	33.91	64.75	0.666	1.608	8.5	27
	3	331.33	33.38	86.53	0.662	1.621	8.3	26
700	1	443.98	33.97	112.58	0.660	1.697	8.9	16
	2	330.20	34.90	85.08	0.654	1.698	8.6	15
	3	333.25	34.52	67.90	0.634	1.659	8.5	14
800	1	427.47	34.16	77.34	0.614	1.703	8.9	12
	2	328.47	34.23	59.64	0.611	1.616	8.9	12
	3	360.70	33.14	43.02	0.601	1.608	9.0	10

% Yield* เป็นผลได้ที่เทียบจากถ่านคาร์บอไนซ์

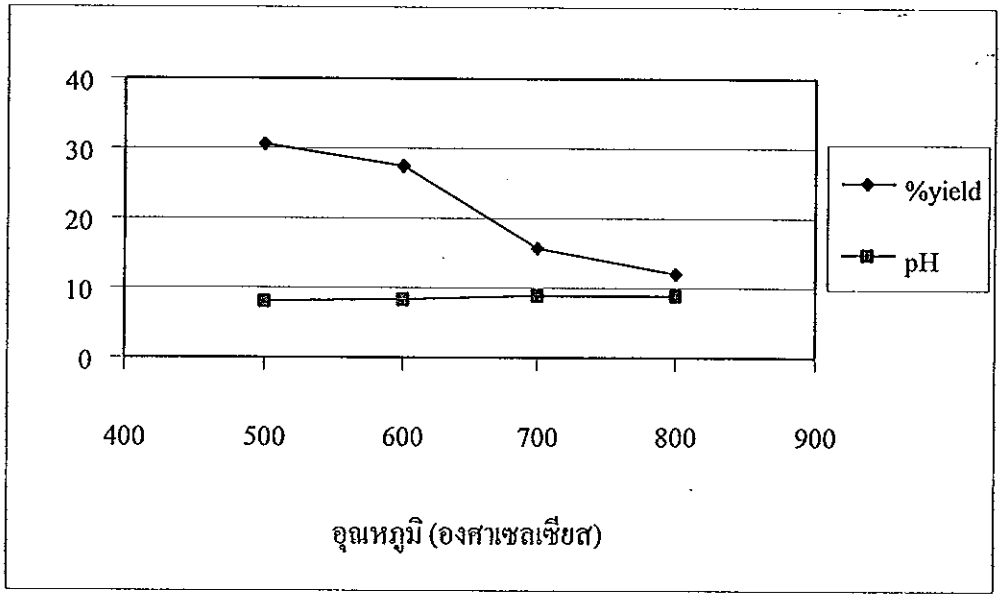
ผลของอุณหภูมิ



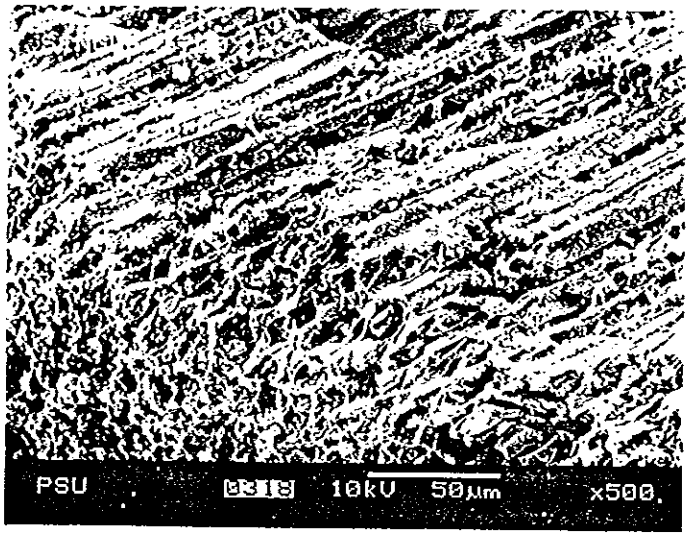
ภาพประกอบ 45 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียวเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 46 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียวเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 47 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้และความเป็นกรด ด่างของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียวเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

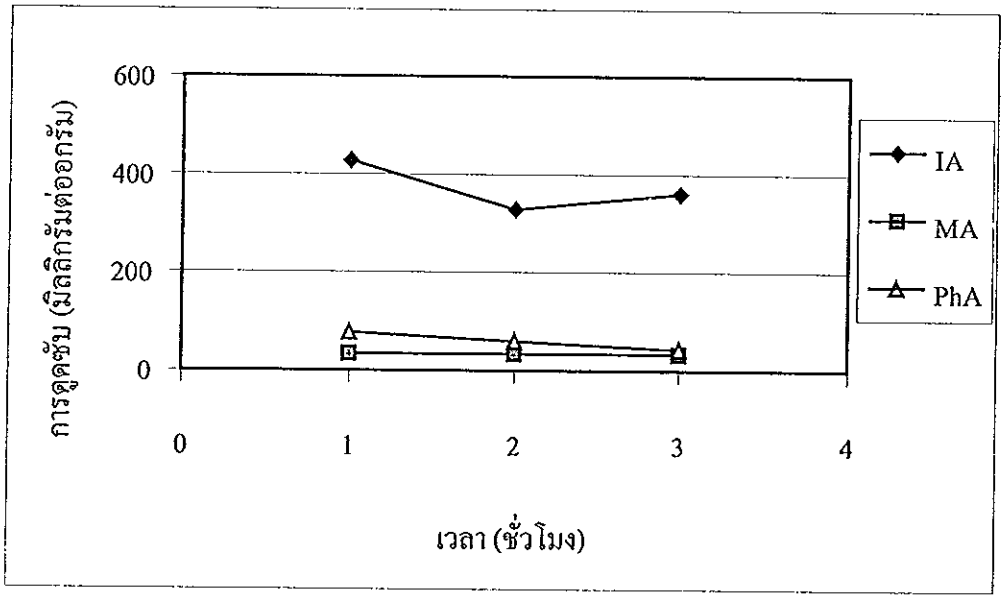


ภาพประกอบ 48 ลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นถ่านขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ด้วยไอน้ำแบบขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

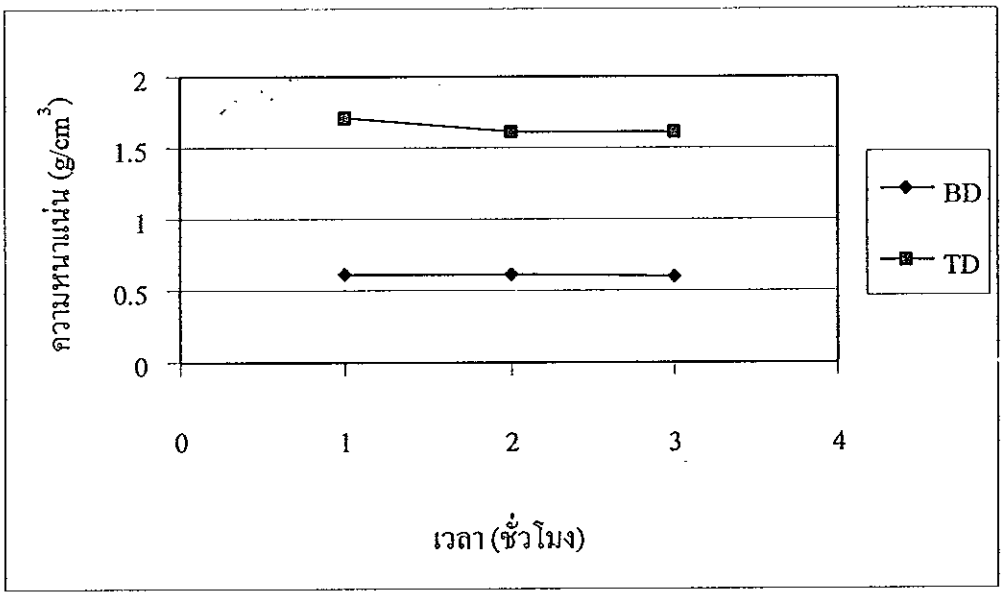
ได้ทำการทดลองผลิตถ่านกัมมันต์โดยนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่มีขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร มาเผาให้เป็นถ่านภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนแล้วกระตุ้นด้วยไอน้ำ 4 กรัมต่อนาที ต่อเนื่องกันไป จากตารางที่ 5 และภาพประกอบ 45 ถึง 48 พบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนและฟีนอลเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 500-700 องศาเซลเซียส และจะมีค่าลดลงเมื่อถึงอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงผนังที่กั้นระหว่างรูพรุนเกิดการยุบตัวทำให้รูพรุนเกิดการขยายตัวเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ค่าการดูดซับสารต่างๆของถ่านกัมมันต์จึงมีค่าลดลง ส่วนการดูดซับเมททิลีนบลูของถ่านมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 500-800 องศาเซลเซียส

ความหนาแน่นปรากฏและผลได้ของถ่านกัมมันต์มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ เนื่องมาจากถ่านเมื่อถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงช่วยให้สามารถไล่สารระเหย ทาร์และสารปนเปื้อนอื่นๆออกมาได้มากยิ่งขึ้น ตัวถ่านจึงมีความพรุนเพิ่มมากขึ้น ถ่านจึงมีน้ำหนักลดลงจึงส่งผลให้ความหนาแน่นปรากฏลดลงและความหนาแน่นจริงเพิ่มขึ้นรวมทั้งความเป็นกรด ด่างของถ่านก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเช่นกัน

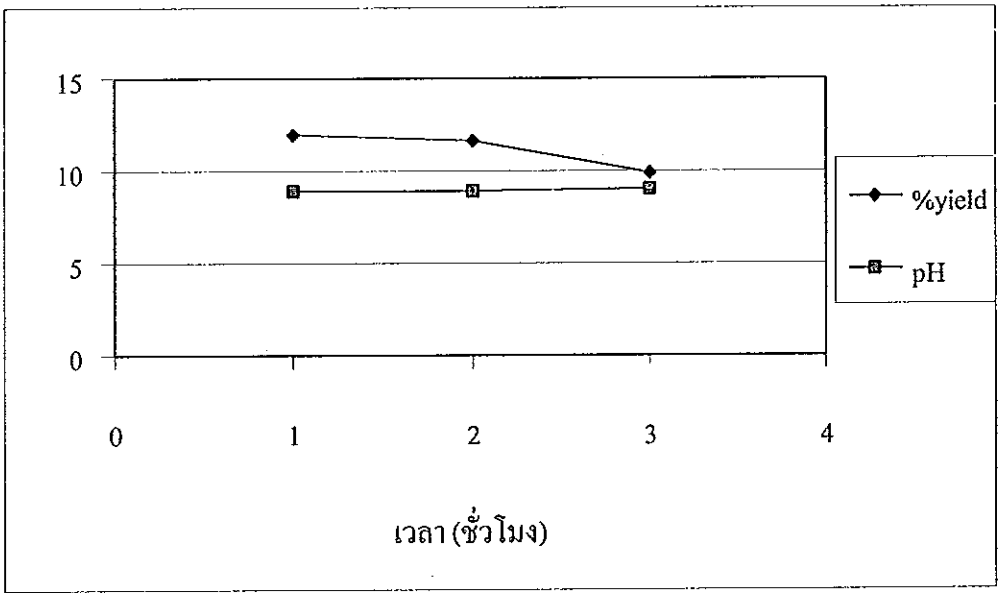
<u>ผลของเวลา</u>



ภาพประกอบ 49 แสดงผลของเวลาที่มีต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบ 50 แสดงผลของเวลาที่มีต่อความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบ 51 แสดงผลของเวลาที่มีต่อร้อยละผลได้และความเป็นกรด ด่างของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

จากภาพประกอบ 49 ถึง 51 เป็นการกระตุ้นถ่านที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาของการกระตุ้นเปลี่ยนจาก 1 ชั่วโมง เป็น 3 ชั่วโมง พบว่า ค่าการดูดซับไอโอดีนลดลงจาก 443.98 เป็น 333.25 การดูดซับฟีนอลลดลงจาก 112.58 เป็น 67.9 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจากถูกออกซิไดซ์เป็นเวลานานทำให้ผนังรูพรุนยุบตัวทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น การดูดซับของเมททิลีนบลูจึงเพิ่มขึ้นจาก 33.97 เป็น 34.52 มิลลิกรัมต่อกรัม นอกจากนี้การเพิ่มเวลาในการกระตุ้นยังส่งผลให้ความหนาแน่นปรากฏและผลได้ของถ่านกัมมันต์มีค่าลดลงเช่นเดียวกับผลของการเพิ่มอุณหภูมิ ส่วนค่าความหนาแน่นจริงและความเป็นกรด ด่างมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

จากผลการทดลองจะพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์แบบขั้นตอนเดียวคือที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยให้ค่าสมบัติต่างๆดังนี้ การดูดซับไอโอดีน 443.98 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับเมททิลีนบลู 33.97 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับฟีนอล 112.58 มิลลิกรัมต่อกรัม ความหนาแน่นจริง 1.697 g/cm^3 ความหนาแน่นปรากฏ 0.660 g/cm^3 ความเป็นกรด ด่าง 8.9 และผลได้ร้อยละ 16 ส่วนลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์แสดงดังภาพประกอบ 48

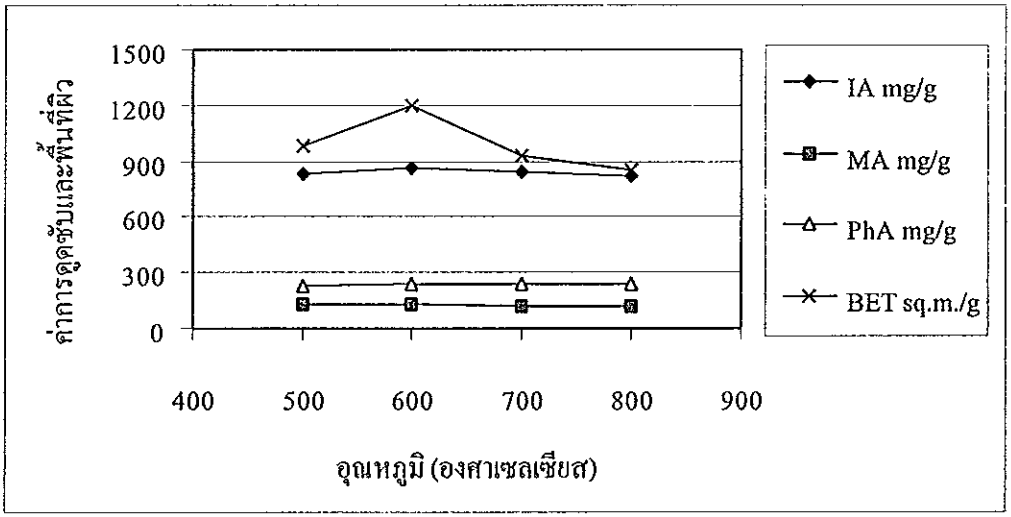
4. การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้สารเคมี

ตาราง 6 สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่ใช้อัตราส่วนวัตถุดิบต่อปริมาณซิงค์คลอไรด์ (เข้มข้นร้อยละ 50) 1:1 เวลาในการเผา 1 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิต่างๆ

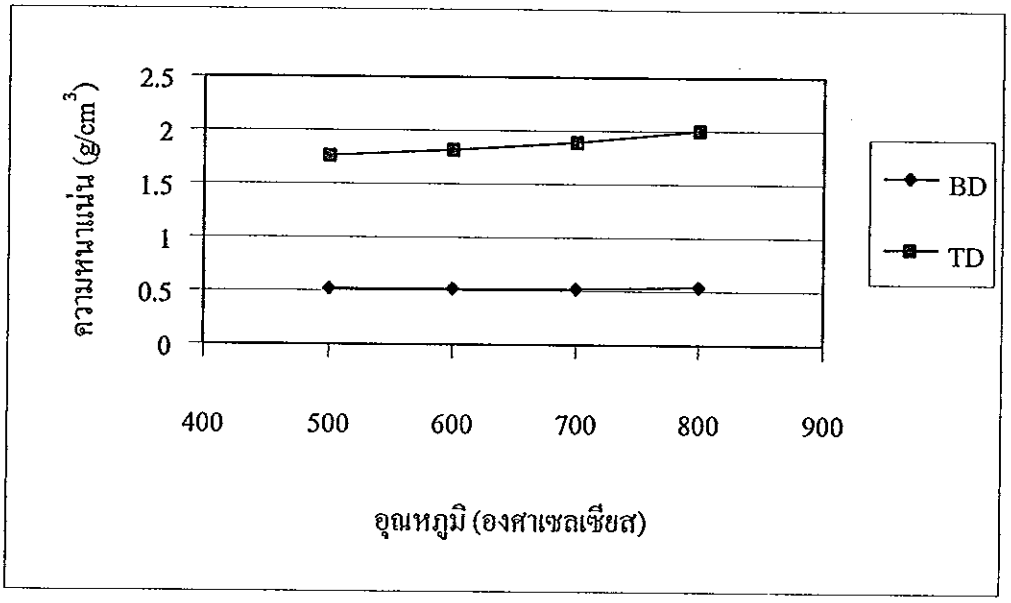
สภาวะ	สมบัติ								
Temp. (°C)	BET (m^2/g)	Iodine Ads. (mg/g)	MB Ads. (mg/g)	Phenol Ads. (mg/g)	Bulk Density (g/cm^3)	True Density (g/cm^3)	pH	hardness	%Yield*
500	987.4	825.58	126.02	224.42	0.515	1.758	5.3	85.85	39.2
600	1201	863.12	131.98	238.67	0.515	1.808	4.7	84.83	38.4
700	924.5	842.64	122.02	234.24	0.515	1.896	4.2	83.99	31.7
800	855.3	816.06	117.30	233.78	0.510	1.999	3.9	82.78	20.3

%Yield* เป็นผลได้ที่เทียบจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบ

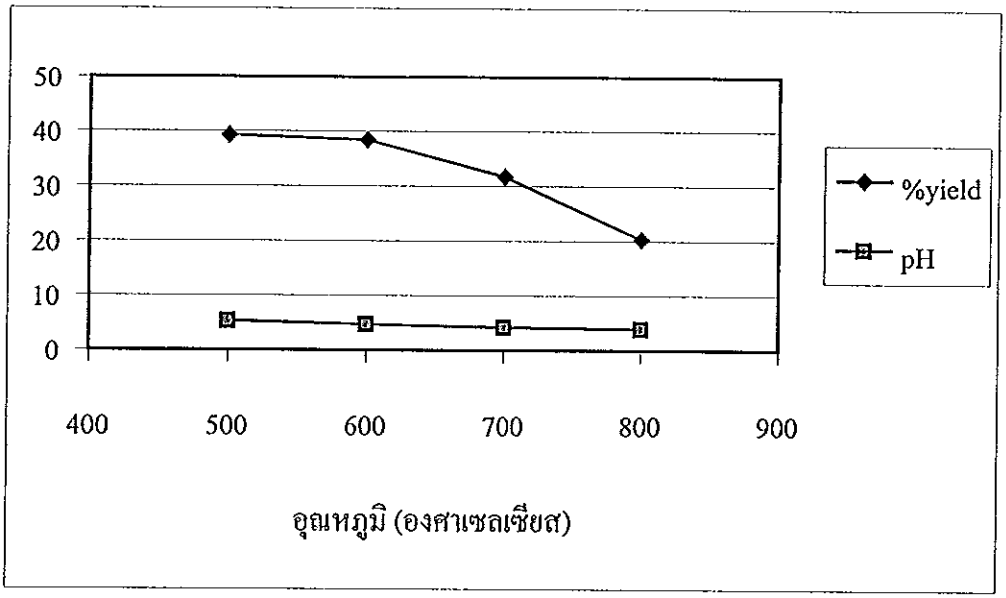
<u>ผลของอุณหภูมิ</u>



ภาพประกอบ 52 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์(ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก)ในอัตราส่วน 1:1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 53 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ (ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก)ในอัตราส่วน 1:1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 54 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้และความเป็นกรด ด่างของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ (ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก)ในอัตราส่วน 1:1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เมื่อทำการทดลองนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มาผสมกับสารละลาย $ZnCl_2$ (ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก)ในอัตราส่วน 1:1 นำมาเผาเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 500, 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียสได้ผลการทดลองดังตาราง 6 และภาพประกอบ 52 ถึง 54 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นจนถึง 600 องศาเซลเซียสจะทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีน เมททิลีนบลูและฟีนอลเพิ่มสูงขึ้นช่วยให้ไล่ทาร์ สารระเหยและสารปนเปื้อนอื่นๆได้ดีจึงทำให้ผลได้และความหนาแน่นปรากฏลดลงส่วนความหนาแน่นจริงเพิ่มสูงขึ้นแต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 800 องศาเซลเซียส ค่าการดูดซับกลับค่อยๆลดต่ำลงเนื่องจากอุณหภูมิสูงเร่งให้เกิดการออกซิไดซ์ทำให้รูพรุนเกิดการขยายขนาด ค่าการดูดซับเมททิลีนบลูจากการผลิตโดยใช้สารเคมีมีค่าสูงกว่าการผลิตโดยใช้ไอน้ำเนื่องจากเมททิลีนบลูมีสมบัติเป็นด่างส่วนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เป็นกรด จึงช่วยให้มีการดูดซับกันได้ดียิ่งขึ้น

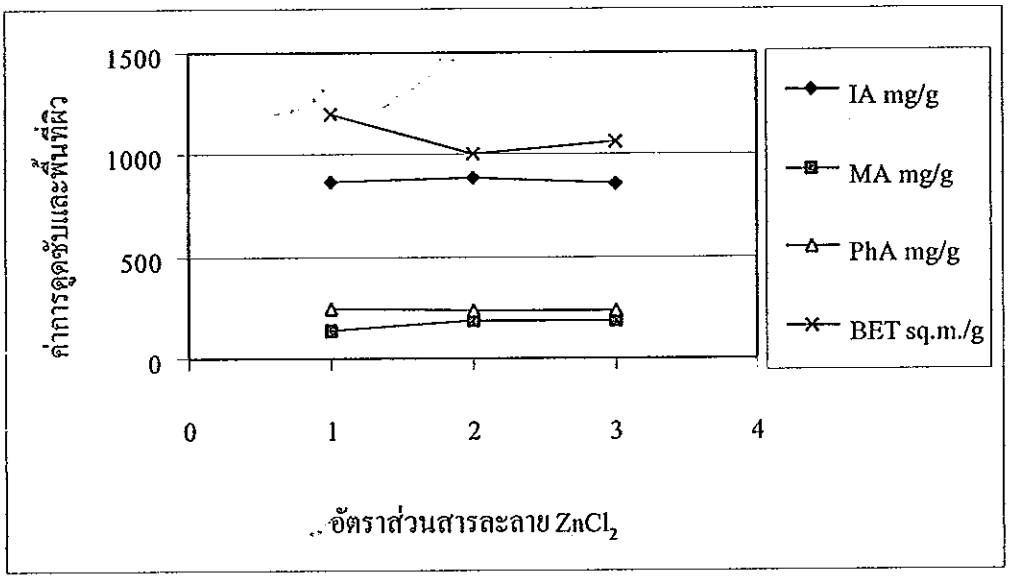
สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้สารละลาย $ZnCl_2$ (เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก) ในอัตราส่วน 1:1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง คือที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสโดยให้ค่าการดูดซับไอโอดีน 863.12 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับเมททิลีนบลู 131.98 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับฟีนอล 238.67 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ(BET) 1201 m^2/g ความหนาแน่นปรากฏ 0.515 g/cm^3 ความหนาแน่นจริง 1.808 g/cm^3 ความเป็นกรด ด่าง 4.7 และร้อยละผลได้ 38.4 และความแข็ง 84.83

<u>ผลของอัตราส่วน</u>

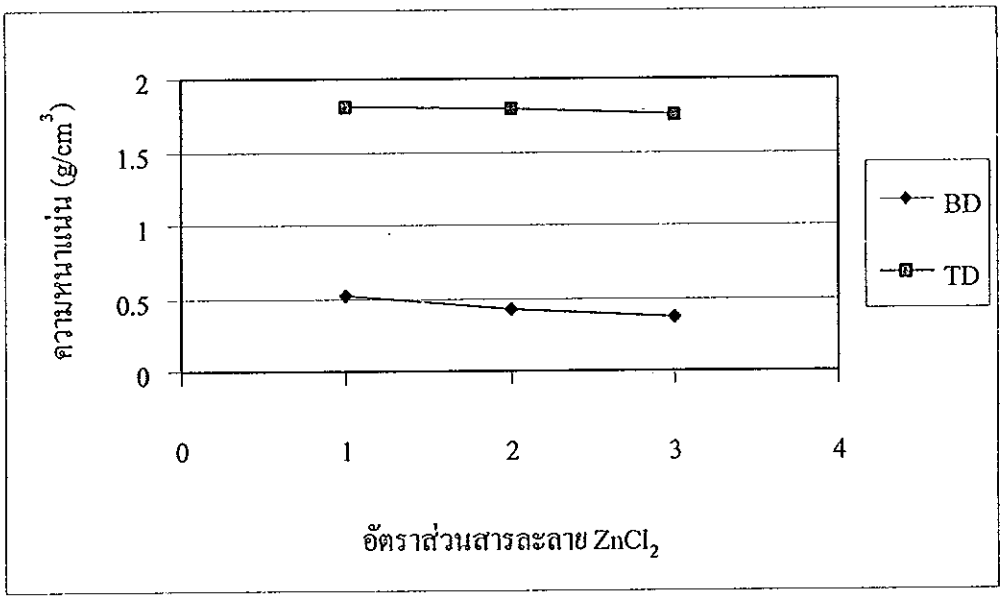
ตาราง 7 สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่ใช้อุณหภูมิ 600 ^oC เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ณ อัตราส่วนวัตถุดิบต่อปริมาณซิงค์คลอไรด์ (เข้มข้นร้อยละ 50) ต่างๆ

สภาวะ	สมบัติ								
Ratio	BET (m^2/g)	Iodine Ads. (mg/g)	MB Ads. (mg/g)	Phenol Ads. (mg/g)	Bulk Density (g/cm^3)	True Density (g/cm^3)	pH	hardness	%Yield*
1:1	1201	863.12	131.98	238.67	0.515	1.808	4.7	84.83	38.4
1:2	1002	881.65	183.68	234.18	0.424	1.796	4.7	81.95	37.54
1:3	1061	857.46	184.5	233.80	0.367	1.754	4.8	70.61	26.84

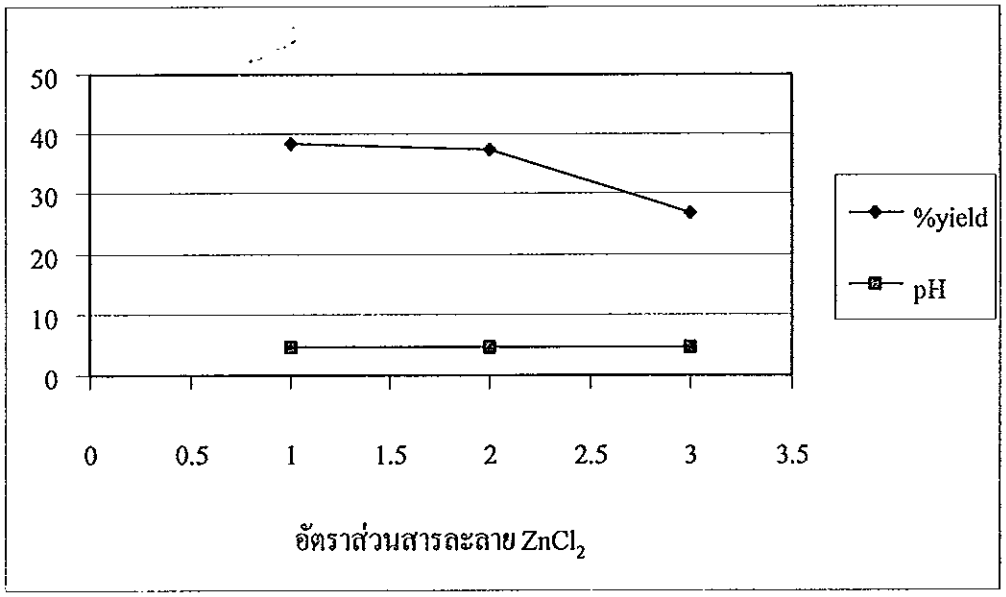
%Yield* เป็นผลได้ที่เทียบจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบ



ภาพประกอบ 55 แสดงผลของอัตราส่วนที่มีต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ (ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก)ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 56 แสดงผลของอัตราส่วนที่มีต่อความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ (ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก)ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 57 แสดงผลของอัตราส่วนที่มีต่อร้อยละผลได้และความเป็นกรด ด่างของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์(ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก)ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

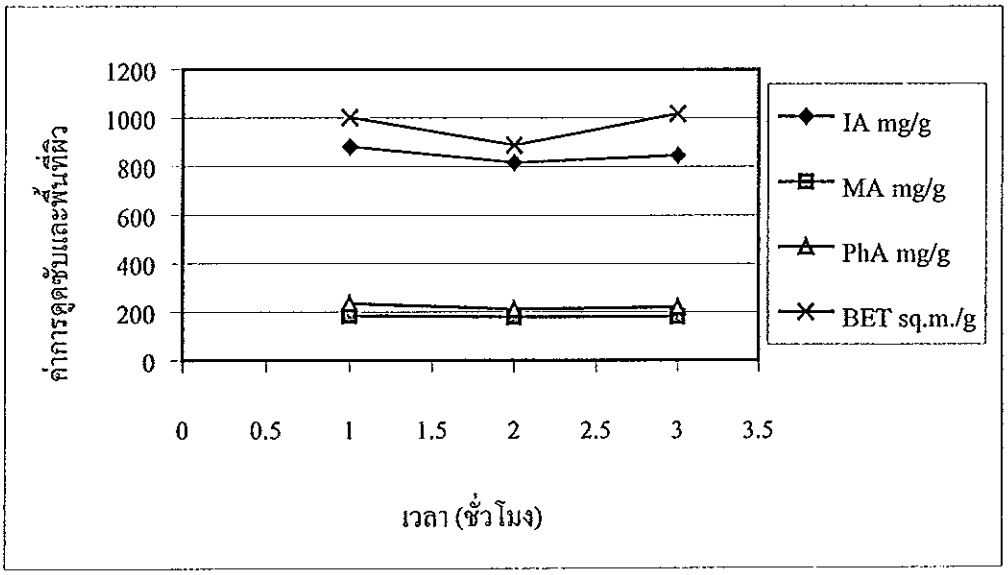
จากตาราง 7 และภาพประกอบ 55 ถึง 57 ซึ่งเป็นการนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรมาผสมกับสารละลาย $ZnCl_2$ (ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก)ในอัตราส่วน 1:1 1:2 และ 1:3 แล้วนำมาทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของสารละลาย $ZnCl_2$ มีผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูอย่างเห็นได้ชัด คือเมื่ออัตราส่วนของสารละลาย $ZnCl_2$ เพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับก็สูงขึ้นด้วย การดูดซับฟีนอลมีค่าการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยจะมีค่าการดูดซับลดลงเมื่อมีอัตราส่วนของสารละลาย $ZnCl_2$ เพิ่มขึ้น ส่วนการดูดซับไอโอดีนจะมีค่าสูงสุดเมื่อมีอัตราส่วนของสารละลาย $ZnCl_2$ ในอัตราส่วน 1:2 และเมื่ออัตราส่วนเพิ่มขึ้น $ZnCl_2$ สามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อถ่านได้มากทำให้ร้อยละผลได้ ค่าความแข็งและความหนาแน่นปรากฏลดน้อยลงด้วย ส่วนความเป็นกรด ด่างมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย อัตราส่วนของสารละลาย $ZnCl_2$ ที่เหมาะสมในการกระตุ้นแบบสารเคมีที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง คือ 1:2 โดยให้ค่าการดูดซับไอโอดีน 881.65 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับเมทิลีนบลู 183.68 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับฟีนอล 234.18 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ(BET) 1002 m^2/g ความหนาแน่นปรากฏ 0.424 g/cm^3 ความหนาแน่นจริง 1.796 g/cm^3 ร้อยละผลได้ 37.54 ค่าความเป็นกรด ด่าง 4.7 และค่าความแข็ง 82

ผลของเวลา

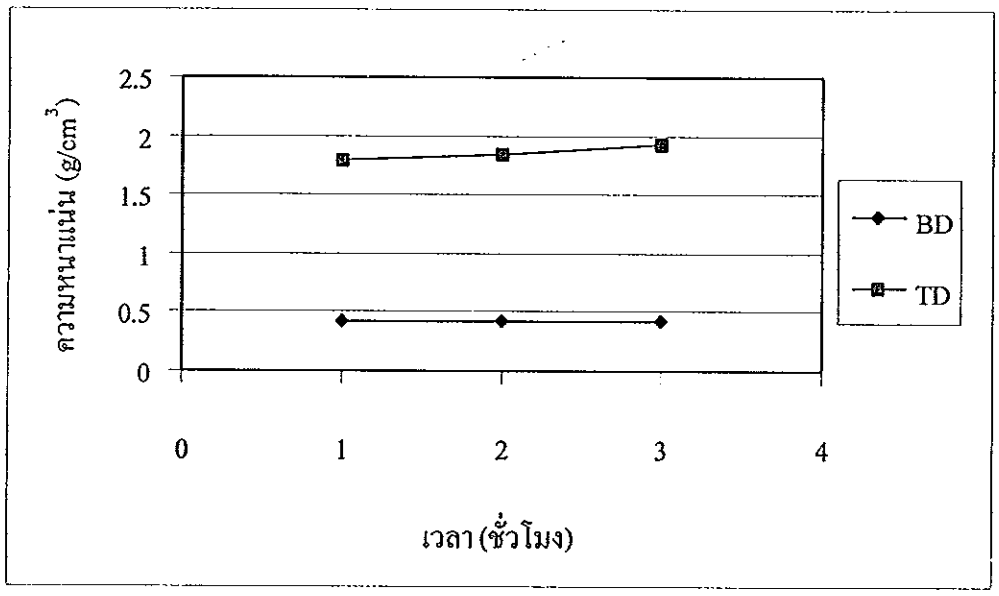
ตาราง 8 สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่ใช้อุณหภูมิ 600 ^{o}C อัตราส่วนวัตถุดิบต่อปริมาณซิงค์คลอไรด์ (เข้มข้นร้อยละ 50) ณ เวลาต่างๆ

สภาวะ	สมบัติ								
Hour	BET (m^2/g)	Iodine Ads. (mg/g)	MB Ads. (mg/g)	Phenol Ads. (mg/g)	Bulk Density (g/cm^3)	True Density (g/cm^3)	pH	hardness	%Yield*
1	1002	881.65	183.68	234.18	0.424	1.796	4.6	81.95	37.54
2	888.3	816.02	179.00	210.00	0.417	1.837	4.2	80.08	35.19
3	1017	845.00	181.00	220.00	0.415	1.930	4.5	78.89	35.29

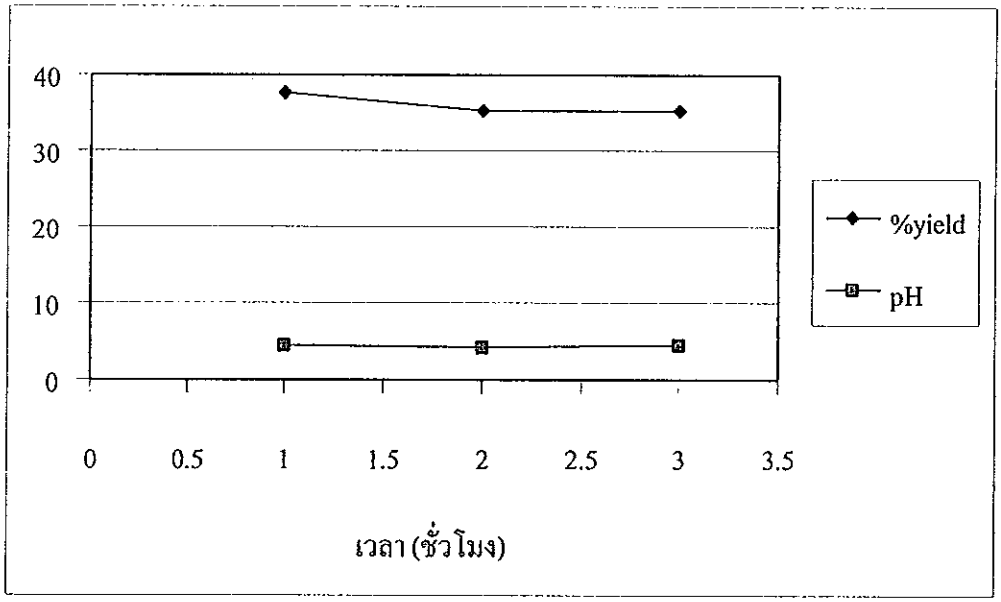
%Yield* เป็นผลได้ที่เทียบจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบ



ภาพประกอบ 58 แสดงผลของเวลาที่มีต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ (ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก) ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 1:2



ภาพประกอบ 59 แสดงผลของเวลาที่มีต่อความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ (ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก) ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 1:2



ภาพประกอบ 60 แสดงผลของเวลาที่มีต่อร้อยละผลได้และความเป็นกรด ด่างของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตรที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ (ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก) ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 1:2

ภาพประกอบ 61 ลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ (ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก) ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 1:2 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

จากตาราง 8 และภาพประกอบ 58 ถึง 61 เป็นการกระตุ้นแบบใช้สารเคมี นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มาผสมกับสารละลาย $ZnCl_2$ (ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก) ในอัตราส่วน 1:2 ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง พบว่าการใช้เวลาที่มากกว่าเวลาที่เหมาะสมไม่ทำให้สมบัติของถ่านกัมมันต์ดีขึ้นหรือมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย สำหรับค่าการดูดซับไอโอดีน เมททิลีนบลูและฟีนอลมีค่าที่ดีที่สุดเมื่อใช้เวลาในการกระตุ้น 1 ชั่วโมง ส่วนค่าร้อยละผลได้ ความหนาแน่นปรากฏและค่าความแข็งมีค่าลดน้อยลงส่งผลให้ ความหนาแน่นจริงเพิ่มขึ้น นั่นคือเมื่อเพิ่มเวลาในการกระตุ้นจะทำให้รูพรุนเกิดการออกซิไดซ์มากขึ้นจึงเกิดการขยายตัวส่งผลให้พื้นที่ผิวลดลง ส่วนความเป็นกรด ด่างมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย สภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นโดยใช้สารละลาย $ZnCl_2$ ในอัตราส่วน 1:2 ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส คือ 1 ชั่วโมง โดยให้ค่าการดูดซับไอโอดีน 882 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับเมททิลีนบลู 184 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับฟีนอล 234 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) 1002 m^2/g ค่าความหนาแน่นปรากฏ 0.4239 g/cm^3 ค่าความหนาแน่นจริง 1.7964 ผลได้ร้อยละ37.54 ความเป็นกรด ด่าง 4.6 และค่าความแข็ง 81.95

ตาราง 9 เปรียบเทียบสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากกระบวนการต่างๆ

The optimum condition	1 step	2 steps	$ZnCl_2$
	700/1	800/1, 2.83-4.00 mm.	600/1, 1:2
BET (m^2/g)	251	416.4	1002
IA (mg/g)	443.98	537.25	881.65
MA (mg/g)	33.97	55.79	183.68
PhA (mg/g)	112.58	125.9	234.18
BD (g/cm^3)	0.66	0.682	0.424
TD (g/cm^3)	1.697	1.7	1.796
pH	8.9	9.9	4.6
%Yield*	16	14.9	37
Hardness	82.35	88.69	81.95

%Yield* เป็นผลได้ที่เทียบจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบ

เมื่อเปรียบเทียบกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์แบบสองขั้นตอนและขั้นตอนเดียว พบว่ากระบวนการสองขั้นตอนผ่านขั้นตอนการให้ความร้อนถึง 2 ขั้นตอน นั่นคือ ขั้นตอนการคาร์บอไนซ์เซชันและขั้นตอนการกระตุ้นจึงสามารถไล่ทาร์ สารระเหยและสิ่งปนเปื้อนอื่นๆออกจากถ่านกัมมันต์ได้ดีกว่าการผลิตถ่านกัมมันต์แบบขั้นตอนเดียวที่มีการให้ความร้อนเพียงครั้งเดียว ทำให้ไล่ทาร์ สารระเหย และสิ่งปนเปื้อนอื่นๆได้เพียงบางส่วนและมีบางส่วนที่อาจยังคงหลงเหลืออยู่และอุดตันอยู่ตามรูพรุนต่างๆ ทำให้ค่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตแบบ 2 ขั้นตอนมีค่าสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตแบบขั้นตอนเดียว

เมื่อเปรียบเทียบกระบวนการทั้ง 2 แบบ คือการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง(แบบขั้นตอนเดียวและแบบ 2 ขั้นตอน) และการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ พบว่าการผลิตถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์จะได้ถ่านที่มีสมบัติดีกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เนื่องจากถ่านที่ได้มีค่าการดูดซับสูงกว่าโดยเฉพาะค่าเมททิลีนบลู อาจเนื่องมาจากเมททิลีนบลูมีสมบัติเป็นด่าง ส่วนถ่านที่ได้จากการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นถ่านที่มีหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวเป็นกรด จึงทำให้การดูดซับของเมททิลีนบลูบนผิวถ่านกัมมันต์เกิดได้ดียิ่งขึ้น

ในกระบวนกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ พบว่ามีค่าร้อยละผลได้สูง เนื่องมาจากซิงค์คลอไรด์เป็นสารที่ส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน (polymerization) ระหว่างคาร์บอนในวงแหวนอะโรแมติกกับทาร์ เกิดเป็นโพลิไซคลิกอะโรแมติกส์ (polycyclic aromatics) ภายในโครงสร้างของถ่าน ค่าร้อยละผลได้ของถ่านที่กระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์จึงสูงกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Almadpour, 1977)

บทที่ 4

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการศึกษา

1. สมบัติเบื้องต้นของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้ว จากการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (proximate analysis) แสดงดังต่อไปนี้

   ปริมาณเถ้า (ash) ร้อยละ 1.9

   ปริมาณสารระเหย (volatile matter) ร้อยละ 92.45

   ปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) ร้อยละ 5.65

2. สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์

   2.1 กระบวนการกระตุ้นแบบ 2 ขั้นตอน

   2.1.1 การคาร์บอไนซ์เซชัน

   การคาร์บอไนซ์เซชันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วให้เป็นถ่านกัมมันต์ในเครื่องคาร์โบไลท์แบบเบดนิ่ง สภาวะที่เหมาะสม คือ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งให้ถ่านคาร์บอไนซ์ที่มีสมบัติดังนี้

   ปริมาณผลได้ร้อยละ 33.1

   ปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) ร้อยละ 65.4

   ปริมาณผลได้ของคาร์บอนคงตัว (fixed carbon yield) ร้อยละ 21.6

   ปริมาณเถ้า (ash) ร้อยละ 5.02

   ปริมาณสารระเหย (volatile matter) ร้อยละ 29.6

   2.1.2 การกระตุ้น

   การศึกษาครั้งนี้ทำการกระตุ้นถ่านเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วจากสภาวะที่เหมาะสมใน 2.1.1 ในเครื่องคาร์โบไลท์แบบเบดนิ่ง กระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง พบว่าขนาดและสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์คือถ่านที่มีขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีอัตราการป้อนไอน้ำ 4 กรัมต่อนาที ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติดังต่อไปนี้

   ค่าการดูดซับไอโอดีน 537.25 มิลลิกรัมต่อกรัม

   ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 55.79 มิลลิกรัมต่อกรัม

ค่าการดูดซับฟีนอล 125.9 มิลลิกรัมต่อกรัม

ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) 416.4 m^2/g

ความหนาแน่นปรากฏ 0.682 g/cm^3

ความหนาแน่นจริง 1.7 g/cm^3

ความเป็นกรด ด่าง 9.9

ปริมาณผลได้ร้อยละ 45

ค่าความแข็ง 88.69

2.2 กระบวนการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียว

ทำการกระตุ้นเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วขนาด 2.83-4.00 มิลลิเมตร ให้เป็นถ่านกัมมันต์ในเครื่องคาร์โบไลต์แบบเบดนิ่ง กระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง โดยมีอัตราการป้อนไอน้ำ 4 กรัมต่อนาที พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์แบบขั้นตอนเดียวคือที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติดังต่อไปนี้

การดูดซับไอโอดีน 443.98 มิลลิกรัมต่อกรัม

ค่าการดูดซับเมททิลีนบลู 33.97 มิลลิกรัมต่อกรัม

ค่าการดูดซับฟีนอล 112.58 มิลลิกรัมต่อกรัม

ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) 251 m^2/g

ความหนาแน่นปรากฏ 0.6596 g/cm^3

ความหนาแน่นจริง 1.6996 g/cm^3

ความเป็นกรด ด่าง 8.88

ปริมาณผลได้ร้อยละ 15.7

ค่าความแข็ง 82.35

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า การผลิตถ่านกัมมันต์โดยการใช้กระบวนการ 2 ขั้นตอนให้ถ่านกัมมันต์ที่ดีกว่ากระบวนการขั้นตอนเดียวและมีค่าการดูดซับสูงกว่ามาตรฐานที่ AWWA กำหนด คือมีค่าการดูดซับไอโอดีนมากกว่า 500 มิลลิกรัมต่อกรัม

2.3 การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ $ZnCl_2$ เป็นตัวกระตุ้น

โดยนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วมาผสมกับสารละลาย $ZnCl_2$ (เข้มข้นร้อยละ 50) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง นำไปอบให้แห้งแล้วนำมาเผาที่สภาวะต่างๆ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ $ZnCl_2$ เป็นตัวกระตุ้นคือ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราส่วนของ เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ต่อสารละลาย $ZnCl_2$ คือ 1:2 เป็นเวลา 1 ชั่วโมงได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติดังต่อไปนี้

การดูดซับไอโอดีน 881.65 มิลลิกรัมต่อกรัม

ค่าการดูดซับเมททิลีนบลู 183.68 มิลลิกรัมต่อกรัม

ค่าการดูดซับฟีนอล 234.18 มิลลิกรัมต่อกรัม

ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) 1002 m^2/g

ความหนาแน่นปรากฏ 0.4239 g/cm^3

ความหนาแน่นจริง 1.7964 g/cm^3

ความเป็นกรด ด่าง 4.6

ปริมาณผลได้ร้อยละ 37.54

ค่าความแข็ง 81.95

ข้อเสนอแนะ

1. เตาเผาที่ใช้ควรรักษาระดับของอุณหภูมิได้คงที่ตลอดความยาวของปฏิกรณ์ที่บรรจุวัตถุดิบ
2. ควรมีการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์โดยให้ไอน้ำไหลผ่านจากด้านล่างไปสู่ด้านบนเพื่อให้ไอน้ำสัมผัสกับวัตถุดิบได้ทั่วถึงมากยิ่งขึ้น
3. ควรมีการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้สารกระตุ้นตัวอื่น เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
4. ในการผลิตโดยใช้สารเคมีมักก่อให้เกิดการกัดกร่อนจึงต้องมีการป้องกันวัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

บรรณานุกรม

กฤษณะ กฤษณภักดิ์ และ ประจักษ์ รักห่วง. 2540. "การผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เบื้องต้น", โครงงานนักศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

เกศรา นุตาลัย และคณะ. 2531. "รายงานการวิจัยถ่านกัมมันต์จากดินพรุในห้องปฏิบัติการ", รายงานฉบับที่ 1 โครงการวิจัยที่ ภ. 30-14 โครงการวิจัยและพัฒนาดินพรุเพื่อประโยชน์ทางอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.

คณิต กฤษณังกูร และจงจินต์ หิรัญลาภ. 2527. "การทำถ่านกัมมันต์จากแกลบ", วารสารวิทยาศาสตร์. 38 (พฤษภาคม-มิถุนายน 2527), 276-284.

ชนิกา โสภณสิริ และคณะ. 2540. "การศึกษาขั้นต้นสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกปาล์ม", การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7. ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 99-103.

ดำรง ชุมมงคล และ อภิสิทธิ์ เจริญกุล. 2533. "การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ NaCl เป็นตัวกระตุ้น", วิศวกรรมสาร. 43(พฤศจิกายน-ธันวาคม 2533), 96-99.

ธนาคารกสิกรไทย. 2535. "การเกษตรและอุตสาหกรรม", วารสารสรุปข่าวธุรกิจ. ฝ่ายวิชาการธนาคารกสิกรไทย ปีที่ 23 ฉบับที่ 12, 3-5.

ธีระโชติ ศรีธีระวิโรจน์ และ อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ. 2542. "การผลิตคาร์บอนกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยใช้สารละลายซิงค์คลอไรด์ โซเดียมคลอไรด์ และสารละลายผสมระหว่างซิงค์คลอไรด์กับโซเดียมคลอไรด์เป็นตัวกระตุ้น" การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทยครั้งที่ 9. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 1-7.

นราพร หาญวจนวงศ์ และคณะ. 2529. "การทำถ่านกัมมันต์จากซังข้าวโพด", วารสารคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและวิทยาศาสตร์. 5(ตุลาคม 2529), 291-303.

บุญชัย ตระกูลมหชัย. 2537. "การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาตาลโตนดในฟลูอิไดซ์เบด", วิทยานิพนธ์ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (สำเนา)

ปานทิพย์ เปลี่ยนโมพี. 2533. โรงงานผลิตถ่านกะลาส่งนอก. อุตสาหกรรมสาร. 33(4) : 48-60.

ผาสุก คงชาตรี และคณะ. 2535. "การศึกษาขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากดินพีต, กะลามะพร้าว, เนื้อเมล็ดตาลโตนดและเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์". รายงานการวิจัยสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.

พิชัย สราญรมย์. 2535. "พันธ์มะม่วงหิมพานต์ที่เหมาะสมในดินทรายชายฝั่งทะเลภาคตะวันออกของประเทศไทย". โครงการศูนย์ศึกษาปฏิบัติการอุดมศึกษาเพื่อพัฒนาท้องถิ่น.

ภัทรา ปัญญวัฒนกิจ. 2540. "การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมัน : กระตุ้นด้วยไอน้ำอิ่มตัวยวดยิ่ง" วิทยานิพนธ์ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากร มหาวิทยาลัยมหิดล. (สำเนา)

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. 2538. วิศวกรรมการประปา เล่ม 2. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, สำนักงาน. 2532. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ มอก.900-2532. กรุงเทพฯ : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

รติกร อิสระเสนีย์. 2538. "การผลิตถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ใช้แล้วโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง", วิทยานิพนธ์ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (สำเนา)

วิจิตต์ วรรณชิต. 2531. มะม่วงหิมพานต์. คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ศุภโชค วิริยโกศล และคณะ. 2531. การกะเทาะเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้เครื่องเหวี่ยง. วารสารสงขลานครินทร์. 10(2) : 213-219.

สัมฤทธิ์ เฟื่องจันทร์ และธำรงค์ เปรมปรีดิ์. 2532. การผลิตมะม่วงหิมพานต์. สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

อุไรวรรณ ธรรมรัตนพคุณ. 2523. "การทำถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ". งานวิจัยเพื่อบริการอุตสาหกรรม กองการวิจัย กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 16, 6-13.

Ahmadpour, A. and Do, D.D. 1997. "The Preparation of Activated Carbon from Macadamia Nutshell by Chemical Activation", Carbon. 35(1997), 1723-1732.

American Standard of Testing Material. 1982. "Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke" Annual Book of ASTM Standard Sec.15 Vol.01. D3838-80.

American Standard of Testing Material. 1982. "Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke" Annual Book of ASTM Standard Sec.15 Vol.01. D3172-93.

American Standard of Testing Material. 1982. "Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke" Annual Book of ASTM Standard Sec.15 Vol.04. D3172-73.

American Standard of Testing Material. 1982. "Standard Test Method for Ball-Pan Hardness " Annual Book of ASTM Standard Sec.15 Vol.04. D3802-79.

American Standard of Testing Material. 1982. "Standard Test Method for Apparent Density of Activated Carbon" Annual Book of ASTM Standard Sec.15 Vol.15.01. D4607-86.

American Standard of Testing Material. 1982. "Standard Test Method for Iodine Number of Activated Carbon" Annual Book of ASTM Standard Sec.15 Vol.01. D2854-70.

American Standard of Testing Material. 1977. "Standard Test Method for Specific Surface Area of Carbon or Graphite" Annual Book of ASTM Standard Sec.15 Vol.01. C919-77.

AWWA. 1996. AWWA. Standard for Powdered Activated Carbon. American Water Work Association.

AWWA. 1997. AWWA. Standard for Granular Activated Carbon. American Water Work Association.

Bansal, R.C. and coworker. 1988. Active Carbon. New York : Marcel Dekker.

Balci S., et al. 1994. "Characterization of Activated Carbon Produced from Almond Shell and Hazelnut Shell", Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 60(1994), 419-426.

Berl, E. 1983. "Formation and Properties of Activated Carbon", Transaction of the Faraday Society. 34(1938), 1040-1056.

Brasquet, C. et al. 2000. "Observation of Activated Carbon Fibres with SEM and AFM Correlation with Adsorption Data in Aqueous Solution", Carbon. 38(2000), 407-422.

Evans, M. J. B. et al. 1999. "The Preparation of Chemically-Activated Carbon", Carbon. 37(1999), 269-274.

Hashimoto, K. et al. "Change in Pore Structure of Carbonaceous Materials during Activation and Adsorption Performance of Activated Carbon", Industrial Engineering Chemical Research. 18(1979), 72-80.

Hassler, J.W. 1974. Purification with Activated Carbon. New York : Chemical Publishing Company, Inc.

Hsieh, C.T. et al. 2000. "Influence of Mesopore Volume and Adsorbate Size on Adsorption Capacities of Activated Carbons in Aqueous Solution", Carbon. 38(2000), 863-869.

Hsisheng, T. et al. 1996. "Preparation of Activated Carbons from Bituminous Coals with CO_2 Activation. 1. Effects of Oxygen Content in Raw Coals", Industrial Engineering Chemical Research. 35(1996), 4043-4049.

_____. and Tien, S.Y. 1998. "Preparation of Activated Carbons from Bituminous Coal with Zinc Chloride Activation". Industrial Chemical Engineering Research. 37(1998), 58-65.

Jiaan, X. et al. 1998. "Production of Activated Carbon from Bagasse(Waste) of Sugarcane Grown in Brazil", Journal of Chemical Engineering of Japan. 31(1998), 987-990.

Japanese Standard Association. Japanese Industrial Standard Testing Method for Granular Activated Carbon JIS K 1474-75. 1975.

Johnson, B.C. 1977. "Manufacture of Activated Carbon from sized Coal". US Patent No.4,014,817 Mar. 29, 1977.

Kawabata et al. 1975. "Method for Manufacture of Activated Carbon and Apparatus Therefor". US patent No.3,910,849 Oct. 7, 1975.

Kirubakaran, C. J. et al. 1997. "Experimental Study of the Production of Activated Carbon from Shells in a Fluidized Bed Reactor". Industrial Engineering Chemical Research. 30(1991), 2411-2416.

Lau, A.C. and Guo J. 1998. "Preparation and Characterization of Chars from Oil Palm Waste", Carbon. 36(1998),1663-1670.

Mukherjee, S. and Bhattacharya S. 1949. Effect of Chemical Treatments on the Properties of Activated Charcoal.

Ninomiya and coworker. 1974. "Process for Production Coarse Particles of Activated Carbon in a Fluidized Bed with Added Inert Particles". US Patent No.3,852,216 Dec. 3, 1974.

Paruya, S.K., Sarkar, S.C. and Bose,A. 1996. "Activated Carbon from Coconut Shell for Cryogenic Application – a Review", Journal of Mines Metals and Fuels. 3(1996), 117-124.

Pastor, A. C. et al. 1999. "Preparation of Activated Carbon Cloths from Viscous Rayon. Part I. Carbonization Procedures", Carbon. 37(1999), 1275-1283.

Satya Sai, P. M. and Ahmed, J. 1997. "Production of Activated Carbon from Coconut Shell Char in a Fluidized Bed Reactor". Industrial Engineering Chemical Research. 36(1997), 3625-3630.

Sheng, L.T.S., Chuang, K.Y. 1942. "Coconut shell Charcoal : Effect of Concentration of Zinc Chloride and Hydrochloric Acid on Activity", Industrial and Engineering Chemistry. 34 (1942), 812-813.

Sun J. et al. 1997. "Activated Carbon from an Illinois Basin Coal", Carbon. 35(1997), 1341-1352.

Tanzil, H.U. et al. 1977. "Preparation and Liquid-Phase Characterization of Granular Activated-Carbon from Rice Husk", Bioresource Technology. 48(1994), 31-35.

Warhurst, A.M., Fowler, G.D., McConnachie, G.L. and Pollard, S.J.T. 1997. "Pore Structure and Adsorption Characterization of Steam Pyrolysis Carbons from *Moringa Olifera*", Carbon. 35(1997), 1039-1045.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

สมบัติและลักษณะของถ่านกัมมันต์

1. สมบัติของถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

ตาราง 10 สมบัติของถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

ถ่านกัมมันต์ชนิดผง

ชื่อตัวอย่าง	วัตถุดิบ	ASH %นน.	BD ก./ซีซี	S_{BET} $ม^2$/ก.	MA มก./ก.	IA มก./ก.
UDP Chemical (Thailand)						
MDP 1-7325	กะลามะพร้าว	3	0.40-0.55	1200-1300	230	1050
PN3	ขี้เลื่อย	8	0.46	-	-	800
Taiko PKW	ขี้เลื่อย	2	-	-	-	-
Shirasagi	-	3	-	-	-	-
900	-	3-5	0.37-0.40	-	-	900
Nucha SN	-	3-5	0.37-0.40	-	-	900
Pittsburge Activated Carbon						
RB	บิทูมินัส	23	-	1250-1400	-	1200
RC	บิทูมินัส	21	-	1100-1300	-	1100
BL	บิทูมินัส	8.5	-	1000-1100	300	1000
C	บิทูมินัส	14	-	1000-1100	-	900
GW	บิทูมินัส	12	-	100-1100	180	700

ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด

ชื่อตัวอย่าง	วัตถุดิบ	ASH %นน.	BD ก./ซีซี	S_{BET} ม^2./ก.	MB มก./ก.	IA มก./ก.
UDP Chemical(Thailand)						
MDG 7746	กะลามะพร้าว	3	0.4-0.45	1100-1200	200	1050
MD-W 7830	กะลามะพร้าว					
SUTCLIFFE SPEAKMAN(Eng.)						
	ถ่านหิน	6-16	0.4-0.56	600-1250		
	กะลามะพร้าว	1-4	0.4-0.59	700-1500		
Norit Activated Carbon						
PK 1-3	พีท	6		800	-	800
Nucha 681	บิทูมินัส	-	0.43-0.46	1100	-	-
AG-5	-	6	0.38-0.45	900-1000	-	-
PJAC(Japan)						
CG-4X10	กะลามะพร้าว	5	0.42-0.47	1200-1300	170	1050
CG-6X8	กะลามะพร้าว	5	0.42-0.47	1200-1300	170	1100
CW-8X30	กะลามะพร้าว	5	0.45-0.5	1050-1150	170	1050
SYBRON	บิทูมินัส	-	0.5-0.55	900	220	900
IONAC P-50(USA)						
	บิทูมินัส	-	-	850-900	-	850
Calgon Filtrasorb 100-200						
CALGON SGL	บิทูมินัส	10	0.48	950-1050	-	900
Pittsburgh Activated Carbon Vapor phase						
PCB	บิทูมินัส	4	0.44	-	-	1200
BPL	บิทูมินัส	8	0.48	-	-	1050

ชื่อตัวอย่าง	วัตถุดิบ	ASH %นน.	BD ก./ซีซี	S_{BET} ม^2./ก.	MB มก./ก.	IA มก./ก.
Liquid phase						
CAL	บิทูมินัส	8.5	0.44	-	-	1000
OL	บิทูมินัส	8	0.44	-	-	1000
SGL	บิทูมินัส	8	0.48	-	-	900
Nuchar WV-G	-	-	0.43-0.46	1100	1100	1050

ที่มา: เอกสารประกอบการประชุมคณะกรรมการร่างมาตรฐาน"ถ่านกัมมันต์"สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม

2. ลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ชนิดผง

ให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อกับผู้ขาย แต่ปริมาณที่ผ่านแร่งขนาด 150 ไมโครเมตร แต่ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก

ลักษณะ	เกณฑ์กำหนด
ค่าไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม) ไม่น้อยกว่า	600
ความหนาแน่นปรากฏ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.20-0.75

ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด

ให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อกับผู้ขาย แต่ปริมาณที่ผ่านแร่งขนาด 150 ไมโครเมตร ต้องไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ลักษณะ	เกณฑ์กำหนด
ค่าไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม) ไม่น้อยกว่า	600
ความชื้นร้อยละไม่เกิน	8
ความหนาแน่นปรากฏ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)ไม่น้อยกว่า	0.36
ความแข็ง ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	70

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม "ถ่านกัมมันต์" มอก.900-2532

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (proximate analysis)

1. การหาปริมาณความชื้น (moisture)

1.1 บดและคัดขนาดตัวอย่างให้มีขนาดเล็กกว่า 60 เมช (0.25 มิลลิเมตร) ปริมาณ 1 กรัม (ชั่งน้ำหนักให้ละเอียด 0.1 มิลลิกรัม)

1.2 นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

1.3 นำตัวอย่างที่อบแล้วไปวางใน เดสิเคเตอร์จนเย็น

1.4 ชั่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนัก สามารถหาร้อยละของความชื้นโดยอาศัยความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \left[\frac{A-B}{A}\right]*100$$

เมื่อ A = น้ำหนักของตัวอย่างก่อนอบ

B = น้ำหนักของตัวอย่างหลังอบ

2. การหาปริมาณเถ้า (ash content)

2.1 นำวัตถุดิบที่เตรียมไว้ขนาด 60 เมช (ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้ว) 1 กรัม ใส่ครูซิเบิล (ชั่งน้ำหนักให้ละเอียด 0.1 มิลลิกรัม)

2.2 นำไปใส่ในเตาเผาแล้วตั้งอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

2.3 เมื่อครบเวลา นำครูซิเบิลออกมาและนำไปวางในเดสิเคเตอร์จนเย็น

2.4 ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล สามารถหาร้อยละเถ้าโดยอาศัยความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\text{ร้อยละเถ้า} = \left[\frac{A-B}{C}\right]*100$$

เมื่อ A = น้ำหนักรวมของภาชนะบรรจุและเถ้าที่เหลือ

B = น้ำหนักภาชนะเปล่า

C = น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้

3. การหาปริมาณของสารระเหย (volatile matter)

3.1 บดและคัดขนาดตัวอย่างที่มีขนาดเล็กกว่า 60 เมช (0.25 มิลลิเมตร) ปริมาณ 1 กรัม ใส่ในครูซิเบิล (ชั่งน้ำหนักให้ละเอียด 0.1 มิลลิกรัม)

3.2 นำครูซิเบิลไปใส่ในเตาเผาซึ่งมีอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที

3.3 เมื่อครบเวลา นำครูซิเบิลออกมาและปล่อยให้เย็นใน เดสิเคเตอร์

3.4 ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล คำนวณโดยอาศัยความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\text{ร้อยละน้ำหนักส่วนเสีย} = \left[\frac{A-B}{A}\right]*100$$

เมื่อ A = น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้

B = น้ำหนักของตัวอย่างหลังจากให้ความร้อน

$$\text{ร้อยละสารระเหย} = [C-D]$$

เมื่อ C = ร้อยละน้ำหนักส่วนเสีย

D = ร้อยละความชื้น

4. การหาปริมาณของคาร์บอนคงตัว (fixed carbon)

การหาปริมาณของคาร์บอนคงตัวสามารถคำนวณได้จากค่าต่างๆที่ได้ทดลองไว้ตามหัวข้อ 1 2 และ 3 โดยคาร์บอนคงตัวที่คำนวณได้

ร้อยละคาร์บอนคงตัว = 100 - A - B - C

เมื่อ A = ร้อยละของความชื้น

B = ร้อยละของเถ้า

C = ร้อยละของสารระเหย

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์หาค่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์

1. การวิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

วิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับไอโอดีนตาม ASTM D 4607-86 สำหรับในการวิเคราะห์กำหนดให้ความเข้มข้นของไอโอดีนที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 0.02 นอร์มัล ซึ่งสามารถควบคุมได้โดยการแปรน้ำหนักที่ใช้ในการวิเคราะห์ ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพที่ดีควรใช้น้ำหนักในการวิเคราะห์ต่ำ ดังนั้นในทางปฏิบัติทำการวิเคราะห์น้ำหนักโดยใช้น้ำหนัก 3 ค่า เพื่อให้มีความเข้มข้นของไอโอดีนที่สภาวะสมดุล มากกว่าและน้อยกว่า 0.02 นอร์มัล

สารเคมีที่ใช้

- สารละลายไอโอดีน (I_2)มาตรฐาน เข้มข้น 0.1 นอร์มัล
- สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) เข้มข้น 0.1 นอร์มัล
- สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
- น้ำแป้งเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

วิธีวิเคราะห์

1. บดและคัดขนาดตัวอย่างให้ละเอียดน้อยกว่า 60 เมช (0.25 มิลลิเมตร) อบตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
2. ชั่งและบันทึกน้ำหนักตัวอย่างเท่ากับ M ให้มีความละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร (ชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง 3 ค่าต่อ 1 ตัวอย่าง เพื่อให้ได้ค่า C ที่มีค่าน้อยกว่า เท่ากับและมากกว่า 0.02 น้ำหนักประมาณของตัวอย่างดูจากตาราง 11)
3. ปิเปตสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักปริมาณ 10 มิลลิลิตร ต้มให้เดือดประมาณ 10 วินาที แกว่งขวดเบาๆเพื่อให้ผงถ่านกัมมันต์ทุกส่วนชุ่มด้วยสารละลายเพื่อกำจัดเถ้าหรือซัลเฟอร์ออกจากผิวของถ่านกัมมันต์
4. เติมสารละลายไอโอดีน 0.1 นอร์มัล ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ปิดฝา คนด้วยเครื่องคนไฟฟ้านาน 30 นาที
5. กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ทิ้งสารละลายที่กรองได้ 20 มิลลิลิตรแรก

6. ปิเปตสารละลายที่กรองได้ 50 มิลลิลิตร นำไปไตเตรตกับสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 นอร์มัล โดยใช้น้ำแป้งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติของปฏิกิริยาคือ สารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้เป็นมิลลิลิตร
7. คำนวณค่าการดูดซับจำเพาะ (X/M) และความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายไอโอดีน (C) ได้จาก

$$X / M \text{ (มิลลิกรัมต่อกรัม)} = \frac{1269.3 - (2.2)(12.693)S}{M}$$

เมื่อ $C = 0.1S/50$

S = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้

M = น้ำหนักของตัวอย่าง (g)

8. นำค่า X/M ที่ได้ทั้ง 3 ค่า มาสร้างกราฟระหว่างแกนราบ คือ log C กับแกนตั้งฉาก คือ log (X/M) จะได้เส้นความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง
9. จากเส้นความสัมพันธ์ที่ตำแหน่ง C = 0.02 หรือ log C = -1.699 จะทราบค่าบนแกนตั้งฉากสมมุติเท่ากับ Y นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าการดูดซับไอโอดีนดังนี้

ค่าการดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม) = 10^{Y}

ตาราง 11 น้ำหนักประมาณของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน

น้ำหนักตัวอย่าง(กรัม)				น้ำหนักตัวอย่าง(กรัม)			
Iodine no.	C=0.01	C=0.02	C=0.03	Iodine no.	C=0.01	C=0.02	C=0.03
300	3.766	3.300	2.835	1550	0.729	0.693	0.549
350	3.228	2.829	2.430	1600	0.706	0.619	0.531
400	2.824	2.475	2.126	1650	0.684	0.600	0.515
450	2.510	2.200	1.890	1700	0.664	0.582	0.500
500	2.259	1.980	1.701	1750	0.645	0.566	0.486
550	2.054	1.800	1.546	1800	0.628	0.550	0.472
600	1.883	1.650	1.417	1850	0.610	0.535	0.460
650	1.738	1.523	1.308	1900	0.594	0.521	0.447
700	1.614	1.414	1.215	1950	0.579	0.508	0.436
750	1.506	1.320	1.134	2000	0.565	0.495	0.425
800	1.412	1.237	1.063	2050	0.554	0.483	0.415
850	1.329	1.164	1.000	2100	0.538	0.471	0.405
900	1.255	1.100	0.945	2150	0.525	0.460	0.396
950	1.189	1.042	0.895	2200	0.513	0.450	0.386
1000	1.130	0.990	0.850	2250	0.502	0.440	0.378
1050	1.076	0.943	0.810	2300	0.491	0.430	0.370
1100	1.027	0.900	0.773	2350	0.481	0.421	0.362
1150	0.982	0.861	0.739	2400	0.471	0.412	0.354
1200	0.941	0.825	0.709	2450	0.461	0.404	0.347
1250	0.904	0.792	0.680	2500	0.452	0.396	0.340
1300	0.869	0.761	0.654	2550	0.443	0.388	0.333
1350	0.837	0.733	0.630	2600	0.434	0.381	0.327
1400	0.807	0.707	0.607	2650	0.426	0.374	0.321
1450	0.779	0.683	0.586	2700	0.418	0.367	0.315
1500	0.753	0.660	0.567	2750	0.411	0.360	0.309

2. การวิเคราะห์หาค่าการดูดซับเมททิลีนบลู

สารเคมีที่ใช้

สารละลายเมททิลีนบลูเข้มข้นร้อยละ 0.04

วิธีวิเคราะห์

1. เตรียมสารละลายเมททิลีนบลูที่มีความเข้มข้นต่างๆกันโดยใช้สารละลายเมททิลีนบลูเข้มข้นร้อยละ 0.04 นำไปวัดสีด้วยสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 790 นาโนเมตร อ่านค่าการดูดกลืนแสงกับค่าความเข้มข้นของสารละลายเมททิลีนบลู
2. อบตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในเดสิเคเตอร์
3. ชั่งน้ำหนัก 0.5 กรัมใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
4. เติมสารละลายเมททิลีนบลูเข้มข้นร้อยละ 0.04 ปริมาณ 100 มิลลิลิตร
5. คนด้วยเครื่องคนแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเวลา 30 นาที
6. กรองของผสมผ่านกรวยกรองโดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
7. นำสารละลายที่กรองได้ไปวัดการดูดกลืนแสงด้วยสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 790 นาโนเมตร อ่านค่าการดูดกลืนแสง แล้วนำค่าไปหาค่าความเข้มข้นของเมททิลีนบลูที่เหลือจากการฟอกสี โดยใช้กราฟสอบเทียบ

ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม) = (A - B)/m

เมื่อ A = ความเข้มข้นของสารละลายเมททิลีนบลูก่อนถูกฟอกสี มีค่า 0.4 mg/ml

B = ความเข้มข้นของสารละลายเมททิลีนบลูที่เหลือจากการฟอกสี อ่านค่าจากกราฟสอบเทียบ

m = น้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่ใช้ทดสอบ (g)

3. การทดสอบการดูดซับฟีนอล

สารเคมีที่ใช้

- กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น

- สารละลายน้ำแป้ง
- สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 นอร์มัล
- สารละลายฟีนอลเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร
- สารละลายโพแทสเซียมโบรเมต-โบรไมด์ 0.1 นอร์มัล
- สารละลายโพแตสเซียมไอโอไดด์ ร้อยละ 12.5

วิธีวิเคราะห์

การ standardize สารละลายฟีนอล

1. ปิเปตสารละลายฟีนอล 25 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 500 มิลลิลิตร
2. เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ปริมาณ 15 มิลลิลิตร ลงในสารละลายฟีนอล
3. ไตเตรตด้วย $KBrO_3$-Br จนเป็นสีเหลืองทิ้งไว้ 3 นาที
4. เติมสารละลายโพแตสเซียมไอโอไดด์ร้อยละ 12.5 ปริมาณ 8 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 3 นาที
5. ไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 นอร์มัล โดยใช้น้ำแป้งเป็นอินดิเคเตอร์

การหาค่าการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์

1. ชั่งน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายฟีนอลเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร ปริมาณ 100 มิลลิลิตร
3. คนด้วยเครื่องคนแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเวลา 30 นาที
4. กรองของผสมผ่านกรวยกรองโดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
5. ปิเปตสารละลายที่ผ่านกระดาษกรองมา 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร
6. เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 15 มิลลิลิตร
7. ไตเตรตด้วยสารละลายโพแตสเซียมโบรเมต โบรไมด์ 0.1 นอร์มัล จนเป็นสีเหลือง ตั้งทิ้งไว้ 3 นาที เติมสารละลายโพแตสเซียมไอโอไดด์เข้มข้นร้อยละ 12.5 ปริมาณ 8 มิลลิลิตร ทิ้งไว้อีก 3 นาที
8. ไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตเข้มข้น 0.1 นอร์มัลโดยใช้น้ำแป้งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติของปฏิกิริยาคือ สารละลายเปลี่ยนจากสีแดงอิฐเป็นไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้เป็นมิลลิลิตร

ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล (g/l) = $\left((NV)_{KBrO_3-Br} - (NV)_{Na_2S_2O_3}\right) \times 15.68/25$

% phenol adsorbed (X) = 100 (1 - B/A)

phenol adsorbed (mg/g) = 100 X*A*V / m

เมื่อ A = ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล (g/l)

B = ความเข้มข้นของฟีนอลหลังถูกดูดซับ (g/l)

V = ปริมาตรของสารละลายฟีนอลที่ใช้เท่ากับ 0.1 l

m = น้ำหนักถ่านกัมมันต์ (g)

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์

1. การวิเคราะห์ความหนาแน่นปรากฏของถ่านกัมมันต์

วิธีวิเคราะห์

1. อบตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเดสิเคเตอร์
2. ชั่งน้ำหนักกระบอกตวงที่มีปริมาตร 10 มิลลิลิตร (ให้มีความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม) บันทึกค่าเป็น X_0
3. ใส่ตัวอย่างถ่านกัมมันต์ลงในกระบอกตวงจนเกือบเต็ม กระแทกก้นกระบอกตวงบนแผ่นยางจนกระทั่งระดับของตัวอย่างในกระบอกตวงคงที่ที่ขีดปริมาตรเท่ากับ 10 มิลลิลิตร
4. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างพร้อมกระบอกตวง บันทึกค่าเป็น X_1 คำนวณหาความหนาแน่นปรากฏ (BD) ได้จากสูตร

$$\text{ความหนาแน่นปรากฏ } (g/cm^3) = (X_1-X_0)/10$$

2. การวิเคราะห์ความหนาแน่นจริงของถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์ความหนาแน่นจริงของถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่อง Multipycnometer

การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์

1. เลือกเซลล์ใส่ตัวอย่างที่เหมาะสม
2. ชั่งน้ำหนักเซลล์เปล่า
3. ใส่ตัวอย่างผงถ่านกัมมันต์ลงในเซลล์ประมาณ 3 ใน 4 ของปริมาตรเซลล์ และชั่งน้ำหนัก
4. ปิดวาล์วแบบสับของก๊าซขาเข้า
5. ปิดวาล์วแบบเข็มที่ควบคุมก๊าซขาเข้าตามเข็มนาฬิกาจนสุด
6. ปรับปุ่มเลือกการวัดไปที่ตำแหน่ง “REF”
7. เปิดวาล์วแบบสับของก๊าซขาออก
8. เปิดวาล์วแบบเข็มที่ควบคุมก๊าซขาออกในทิศทวนเข็มนาฬิกาจนสุด
9. ปรับปุ่ม “ZERO” เพื่อให้ค่าที่อ่านได้เป็นศูนย์หรือใกล้เคียงศูนย์

10. เปิดถังก๊าซฮีเลียมและปรับความดันสำหรับใช้งานที่ถังให้มากกว่า 20 PSIG เล็กน้อยแต่ต้องไม่เกิน 25 PSIG
11. วางเซลล์ใส่ตัวอย่างลงในช่องว่างเซลล์ ปิดฝาให้แน่น

การไล่ก๊าซหรือไอที่ปนเปื้อนในตัวอย่าง

1. ต่อสายยางจากตำแหน่ง "VENT" ของเครื่องโดยให้ปลายสายยางอีกด้านจุ่มอยู่ในบีกเกอร์ใส่น้ำ
2. ปรับปุ่มเลือกการวัดไปที่ตำแหน่ง "CELL"
3. เปิดวาล์วแบบสับของก๊าซขาเข้า
4. ปรับวาล์วแบบเข็มที่ควบคุมการไหลเข้าของก๊าซให้เหมาะสมโดยสังเกตุจากฟองอากาศที่พ่นออกช้าๆและสม่ำเสมอ เมื่อได้อัตราการไหลเข้าที่เหมาะสมแล้วให้ยกปลายสายยางออกจากบีกเกอร์
5. ปล่อยก๊าซฮีเลียมให้ไหลผ่านตัวอย่างประมาณ 10-20 นาที
6. เมื่อครบเวลาให้ปิดวาล์วแบบสับของก๊าซขาเข้า

การวัดความหนาแน่นจริง

1. หมุนวาล์วแบบเข็มที่ควบคุมก๊าซขาออกตามเข็มนาฬิกาจนสุดแล้วหมุนกลับประมาณครึ่งรอบ
2. ปรับปุ่ม "ZERO" อีกครั้ง
3. หมุนปุ่มเลือกการวัดไปที่ "REF"
4. ปิดวาล์วแบบสับของก๊าซขาออก
5. เปิดวาล์วแบบสับของก๊าซขาเข้า และใช้วาล์วแบบเข็มควบคุมการไหลเข้าของก๊าซ ปรับอัตราการไหลเข้าของก๊าซฮีเลียมและเพิ่มความดันให้กับระบบให้น้อยกว่า 20 PSIG เล็กน้อย หยุดการปล่อยก๊าซฮีเลียมโดยการปิดวาล์วแบบสับเมื่อความดันมีค่าคงที่
6. บันทึกความดันที่อ่านได้เป็น "P_2"
7. ปรับปุ่มเลือกการวัดไปที่ "CELL"
8. อ่านค่าความดันใหม่เป็น "P_3"
9. ลดความดันของระบบโดยการเปิดวาล์วแบบสับของก๊าซขาออก
10. คำนวณปริมาตรของผงถ่านกัมมันต์และความหนาแน่นจริงจากสมการ

$$V_p = V_c + V_a(1-P_2/P_3)\ cm^3$$

$$V_c = 223.989\ cm^3$$

$$V_a = 13.988\ cm^3$$

ความหนาแน่นจริง (g/cm^3) = น้ำหนักตัวอย่าง (g) / Vp (cm^3)

3. การวัดความเป็นกรด ด่างของถ่านกัมมันต์

วิธีวิเคราะห์

1. อบตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเดสิเคเตอร์
2. ชั่งตัวอย่างถ่านกัมมันต์ 10 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
3. ต้มให้เดือดเบาๆเป็นเวลา 15 นาที
4. กรองผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 โดยทิ้งสารละลาย 20 มิลลิลิตร แรกไป
5. ทิ้งให้สารละลายเย็นที่อุณหภูมิ 55-45 องศาเซลเซียส แล้ววัดหาค่าความเป็นกรด ด่างด้วยเครื่อง pH meter

4. การวิเคราะห์ค่าความแข็งของถ่านกัมมันต์ตาม ASTM D 3802-79

วิธีวิเคราะห์

1. คัดขนาดถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดให้มีปริมาณร้อยละ 90 มีขนาดโตกว่า 180 ไมครอน โดยใช้ปริมาณตัวอย่างสำหรับทดสอบประมาณ 100 มิลลิลิตร
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างให้ละเอียด 0.1 กรัม จำนวน 50 กรัม
3. เทตัวอย่างลงในถาดรองรับสำหรับการทดสอบความแข็งของอนุภาค พร้อมกับใส่ลูกบอลแสตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 และ 9.5 มิลลิเมตร อย่างละ 15 ลูกลงไป
4. วางถาดดังกล่าวลงบนถาดรองรับสำหรับการกระจายขนาดอนุภาคและช้อนด้วยตะแกรงเปล่าปิดฝา แล้วนำถาดไปวางบนเครื่องเขย่า ใช้เวลาเขย่าเป็นเวลา 30 นาที
5. เมื่อครบเวลาให้แยกลูกบอลแสตนเลสออกแล้วนำตัวอย่างที่ได้ไปร่อนคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนมาตรฐานอีก 10 นาที โดยเลือกใช้ตะแกรงร่อนมาตรฐานดังตาราง 12
6. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่ค้างบนตะแกรง คำนวณค่าความแข็งของถ่านกัมมันต์จากสมการ

$$H = 100B/A$$

H = ค่าความแข็งของถ่าน

B = น้ำหนักตัวอย่างที่ค้างบนตะแกรง (กรัม)

A = น้ำหนักตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ทดสอบ (กรัม)

ตาราง 12 การเลือกขนาดตะแกรงร่อนมาตรฐานสำหรับทดสอบการกระจายขนาดอนุภาคที่ผ่านการทดสอบความแข็งให้สอดคล้องกับขนาดตัวอย่างเริ่มต้นที่ใช้

SNPS		HTS	
Opening (mm)	E 11 Mesh	Opening (μm)	E 11 Mesh
2.36	8	1180	16
2.00	10	1000	18
1.70	12	850	20
1.40	14	710	25
1.18	16	600	30
1.00	18	500	35
0.850	20	425	40
0.710	25	355	45
0.600	30	300	50
0.500	35	250	60
0.425	40	212	70
0.355	45	180	80
0.300	50	150	100
0.25	60	125	120
0.212	70	106	140
0.180	80	90	170

SNPS = Sieves Defining Small-End Nominal Particle

HTS = Hardness Test Sieve

5. การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์

พื้นที่ผิวจำเพาะ เป็นค่าที่นิยมใช้เพื่อแสดงถึงคุณภาพของถ่านกัมมันต์มากกว่าการหาปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งขึ้นอยู่กับกลไกการดูดซับ แต่การหาพื้นที่ผิวก็มีข้อจำกัด คือ โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับต้องเรียงตัวแบบชั้นเดียวบนผิวของสารดูดซับ สมการที่ใช้คำนวณหาพื้นที่ผิว (S) คือ

$S = (n_m A_m N_A)10^{-18}$ m^2/g

n_m = จำนวนโมเลกุลของสารถูกดูดซับชั้นเดียว (โมลต่อกรัม)

A_m = พื้นที่ผิวของโมเลกุลของสารถูกดูดซับ (ตารางนาโนเมตรต่อโมเลกุล)

N_A = เลขอาโวกาโดร (Avogado's number)

การหาค่า n_m สามารถใช้สมการต่างๆ เช่น สมการแลงเมียร์ (Langmuir equation) ซึ่งสมมุติว่าความร้อนของการดูดซับคงที่ สมการดีอาร์เค (Dubinin-Radushkevich-Kaganer,DRK) ซึ่งใช้ได้กับถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวไม่สูง และสมการบีอีที (Brunauer-Emmett-Teller,BET) ซึ่งเป็นสมการที่นิยมใช้มากที่สุด

สมการบีอีทีเป็นสมการเส้นตรงดังสมการ จะเห็นว่าเมื่อสร้าง กราฟระหว่างแกนราบ คือ P/P_o กับแกนตั้งฉากคือ $P[W(P_o/P)]$ (ภาพประกอบ 56) จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $(C-1)/W_mC$ และจุดตัดแกนตั้งฉากคือ $1/W_mC$ ซึ่งนำไปคำนวณหาพื้นที่ผิวได้

$$\frac{P}{W(P_0 - P)} = \frac{1}{W_m C} + \frac{C-1}{W_m C}\frac{P}{P_0}$$

โดย W = ปริมาณสารถูกดูดซับทั้งหมด

W_m = ปริมาณสารถูกดูดซับชั้นเดียวและปกคลุมผิวทั้งหมดของการดูดซับ

P/P_0 = ความดันสัมพัทธ์ที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ

C = ค่าคงที่ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพลังงานการดูดซับ

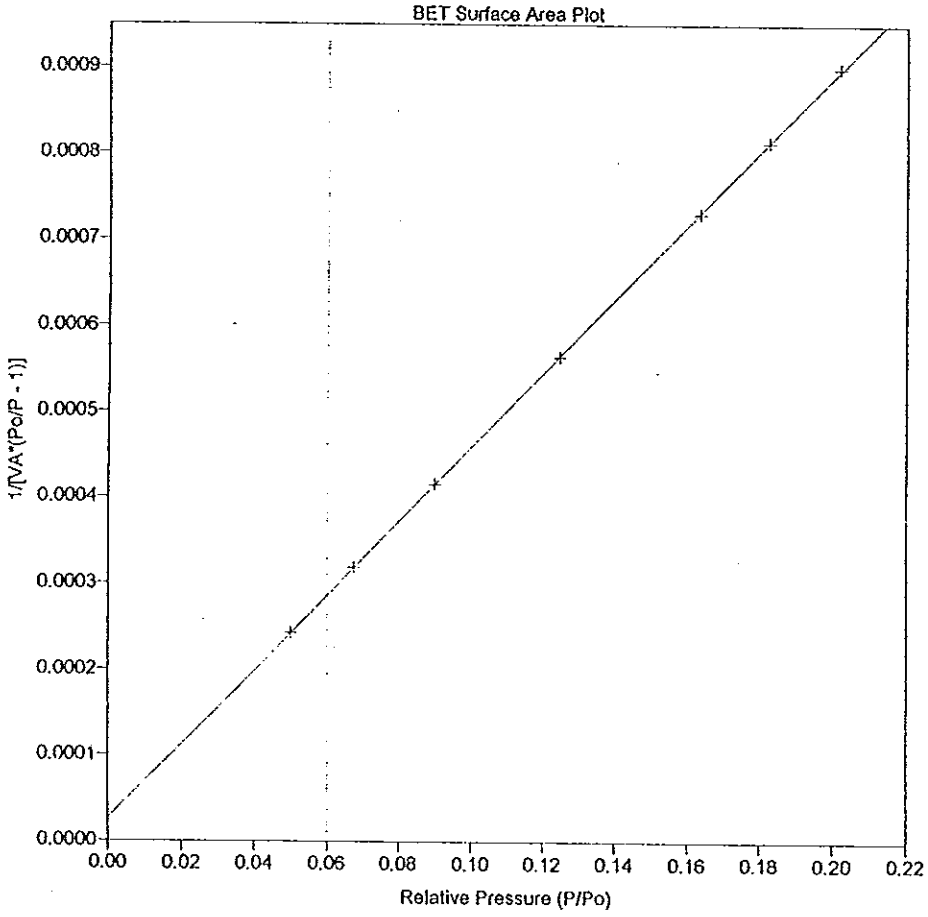
$= \exp[(q_1 - q_L)/RT]$

q_1 = ความร้อนที่เกิดจากการดูดซับแบบชั้นเดียว

q_L = ความร้อนที่เกิดจากการดูดซับแบบหลายชั้น

```
        Sample: 1:2
      Operator: Chem Eng
    Submitter:ll Chem Eng
     File Name: C:\...\ARTHIT\847.SMP

       Started: 08/12/00 12:47:12    Analysis Adsorptive: N2
     Completed: 08/12/00 15:22:28          Analysis Bath: 77.35 K
   Report Time: 10/01/01 17:17:30     Thermal Correction: No
 Sample Weight: 0.2064 g              Smoothed Pressures: No
Warm Freespace: 17.6429 cm³              Cold Freespace: 53.5601 cm³
Equil. Interval: 10 secs              Low Pressure Dose: None
```



ภาพประกอบ 62 กราฟตามสมการบีอีที

ภาคผนวก จ

สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวกระตุ้น

1. สมบัติของถ่านคาร์บอไนซ์

ตาราง 13 แสดงสมบัติของถ่านคาร์บอไนซ์

อุณหภูมิ (°C)	400			500			600			700		
เวลา (นาที)	30	60	120	30	60	120	30	60	120	30	60	120
ผลได้ (%)	35.6	33.1	29.5	30.5	29.6	26.4	27.4	27.8	26.5	26.5	25.4	25.1
ผลได้ของคาร์บอนคงตัว (%)	21.3	21.6	19.1	19.9	19.0	18.0	18.9	19.3	18.2	19.3	18.5	18.6
คาร์บอนคงตัว (%)	59.7	65.4	64.8	65.2	64.3	68.3	69.1	69.6	68.8	72.6	72.7	74.1
สารระเหย (%)	35.0	29.6	29.0	28.0	29.3	24.6	24.5	23.4	24.0	20.4	19.7	18.1
เถ้า (%)	5.39	5.02	6.22	6.78	6.50	7.13	6.48	6.97	7.18	7.01	7.64	7.78

2. สมบัติของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.0 มิลลิเมตร

ตาราง 14 แสดงสมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ขนาด 2.83-4.0 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ที่สภาวะต่างๆ

สภาวะ		สมบัติ						
Temp. (°C)	Time (hr)	Iodine Ads. (mg/g)	MB Ads. (mg/g)	Phenol Ads. (mg/g)	Bulk Density (g/cm^3)	True Density (g/cm^3)	pH	%Yield*
500	1	102.37	26.57	27.57	0.688	1.478	9.6	86
	2	205.23	26.43	37.85	0.681	1.486	9.8	85
	3	221.75	26.38	39.83	0.681	1.490	9.8	81
600	1	216.34	27.77	41.84	0.686	1.539	9.9	82
	2	227.81	29.28	43.47	0.676	1.596	10.0	82
	3	278.91	28.58	60.69	0.670	1.595	9.9	75
700	1	393.39	27.75	101.09	0.685	1.623	9.9	70
	2	414.33	28.81	116.47	0.673	1.643	10.0	65
	3	454.42	28.70	116.91	0.644	1.658	10.0	50
800	1	537.25	55.79	125.90	0.682	1.700	9.9	45
	2	416.79	41.72	100.00	0.660	1.646	9.9	24
	3	370.10	27.96	95.25	0.641	1.627	9.9	20

%Yield* เป็นผลได้ที่เทียบจากถ่านคาร์บอไนซ์

สภาวะ		สมบัติ				
Temp. (°C)	Time (hr)	Iodine Ads. (mmol/g)	MB Ads. (mmol/g)	Phenol Ads. (mmol/g)	Hardness	BET (m^2/g)
500	1	0.403	0.083	0.293	-	-
	2	0.809	0.083	0.402	-	-
	3	0.874	0.082	0.423	-	-
600	1	0.852	0.087	0.445	-	-
	2	0.898	0.092	0.462	-	-
	3	1.099	0.089	0.645	-	-
700	1	1.550	0.087	1.074	-	-
	2	1.633	0.090	1.238	-	-
	3	1.791	0.090	1.242	-	-
800	1	2.117	0.174	1.338	88.69	416.4
	2	1.642	0.130	1.063	-	-
	3	1.458	0.087	1.012	-	-

3. สมบัติของถ่านกัมมันต์ขนาด 1.7-2.83 มิลลิเมตร

ตาราง 15 แสดงสมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ขนาด 1.7-2.83 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ที่สภาวะต่างๆ

สภาวะ		สมบัติ						
Temp. (°C)	Time (hr)	Iodine Ads. (mg/g)	MB Ads. (mg/g)	Phenol Ads. (mg/g)	Bulk ฎ Density (g/cm^3)	True Density (g/cm^3)	pH	%Yield*
500	1	87.96	31.59	40.97	0.659	1.555	9.2	80.8
	2	72.69	31.61	45.05	0.636	1.531	9.3	78.9
	3	84.57	32.9	51.85	0.636	1.556	9.3	78.3
600	1	57.64	33.01	56.65	0.649	1.715	9.4	78.9
	2	146.28	32.53	70.91	0.635	1.667	9.5	75.8
	3	262.41	32.76	65.85	0.633	1.559	9.5	75.6
700	1	450.75	34.61	126.95	0.650	1.845	9.7	67.1
	2	470.96	33.64	128.70	0.635	1.772	9.8	52.6
	3	435.81	32.83	131.20	0.631	1.741	9.8	55.5
800	1	492.56	50.02	144.50	0.644	1.852	9.8	37.2
	2	403.16	32.58	123.33	0.634	1.764	9.7	20.9
	3	300.01	33.02	112.25	0.629	1.763	9.7	16.7

%Yield* เป็นผลได้ที่เทียบจากถ่านคาร์บอไนซ์

สภาวะ		สมบัติ				
Temp. (°C)	Time (hr)	Iodine Ads. (mmol/g)	MB Ads. (mmol/g)	Phenol Ads. (mmol/g)	Hardness	BET (m^2/g)
500	1	0.347	0.099	0.435	-	-
	2	0.286	0.099	0.479	-	-
	3	0.333	0.103	0.551	-	-
600	1	0.227	0.103	0.602	-	-
	2	0.576	0.102	0.754	-	-
	3	1.034	0.102	0.700	-	-
700	1	1.776	0.108	1.349	-	-
	2	1.856	0.105	1.368	-	-
	3	1.717	0.103	1.394	-	-
800	1	1.941	0.156	1.535	88.17	435.7
	2	1.589	0.102	1.311	-	-
	3	1.182	0.103	1.193	-	-

4. สมบัติของถ่านกัมมันต์ขนาด 1.17-1.70 มิลลิเมตร

ตาราง 16 แสดงสมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ขนาด 1.17-1.70 มิลลิเมตร ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่สภาวะต่างๆ

สภาวะ		สมบัติ						
Temp. (°C)	Time (hr)	Iodine Ads. (mg/g)	MB Ads. (mg/g)	Phenol Ads. (mg/g)	Bulk Density (g/cm^3)	True Density (g/cm^3)	pH	%Yield*
500	1	240.05	34.49	34.75	0.700	1.550	9.1	75
	2	212.40	34.05	45.00	0.681	1.597	8.9	75
	3	212.50	34.73	46.38	0.681	1.619	9.5	73
600	1	243.69	34.68	48.74	0.658	1.649	9.7	72
	2	243.53	34.39	58.78	0.657	1.689	9.6	72
	3	373.72	34.75	103.64	0.639	1.739	10.1	67
700	1	434.42	34.70	114.93	0.653	1.760	10.1	63
	2	477.56	34.50	113.82	0.656	1.767	10.0	51
	3	447.05	52.29	120.20	0.639	1.773	10.1	49
800	1	473.96	54.07	121.25	0.635	1.778	9.7	44
	2	288.13	51.74	92.90	0.639	1.683	9.9	29
	3	442.71	51.67	110.80	0.624	1.737	10.0	29

%Yield* เป็นผลได้ที่เทียบจากถ่านคาร์บอไนซ์

สภาวะ		สมบัติ				
Temp. (°C)	Time (hr)	Iodine Ads. (mmol/g)	MB Ads. (mmol/g)	Phenol Ads. (mmol/g)	Hardness	BET (m^2/g)
500	1	0.946	0.108	0.369	-	-
	2	0.837	0.107	0.478	-	-
	3	0.837	0.109	0.493	-	-
600	1	0.960	0.108	0.518	-	-
	2	0.960	0.108	0.625	-	-
	3	1.473	0.109	1.101	-	-
700	1	1.712	0.109	1.221	-	-
	2	1.882	0.108	1.209	-	-
	3	1.761	0.164	1.277	-	-
800	1	1.868	0.169	1.288	72.22	325.1
	2	1.135	0.162	0.987	-	-
	3	1.744	0.162	1.177	-	-

5. สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียว

ตาราง 17 แสดงสมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียว

สภาวะ		สมบัติ						
Temp. (°C)	Time (hr)	Iodine Ads. (mg/g)	MB Ads. (mg/g)	Phenol Ads. (mg/g)	Bulk Density (g/cm^3)	True Density (g/cm^3)	pH	%Yield*
500	1	186.51	32.47	37.57	0.695	1.552	8.0	31
	2	221.91	32.58	28.92	0.677	1.561	7.8	29
	3	300.28	32.91	55.35	0.674	1.565	8.2	29
600	1	248.22	33.39	62.90	0.672	1.606	8.4	27
	2	306.16	33.91	64.75	0.666	1.608	8.5	27
	3	331.33	33.38	86.53	0.662	1.621	8.3	26
700	1	443.98	33.97	112.58	0.660	1.697	8.9	16
	2	330.20	34.90	85.08	0.654	1.698	8.6	15
	3	333.25	34.52	67.90	0.634	1.659	8.5	14
800	1	427.47	34.16	77.34	0.614	1.703	8.9	12
	2	328.47	34.23	59.64	0.611	1.616	8.9	12
	3	360.70	33.14	43.02	0.601	1.608	9.0	10

%Yield* เป็นผลได้ที่เทียบจากถ่านคาร์บอไนซ์

สภาวะ		สมบัติ				
Temp. (°C)	Time (hr)	Iodine Ads. (mmol/g)	MB Ads. (mmol/g)	Phenol Ads. (mmol/g)	Hardness	BET (m^2/g)
500	1	0.735	0.102	0.399	-	-
	2	0.874	0.102	0.307	-	-
	3	1.183	0.103	0.588	-	-
600	1	0.978	0.104	0.668	-	-
	2	1.206	0.106	0.688	-	-
	3	1.306	0.104	0.920	-	-
700	1	1.749	0.106	1.196	82.35	251
	2	1.301	0.109	0.904	-	-
	3	1.313	0.108	0.722	-	-
800	1	1.684	0.107	0.822	-	-
	2	1.294	0.107	0.634	-	-
	3	1.421	0.104	0.457	-	-

ภาคผนวก ฉ

สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นตัวกระตุ้น

1. ผลของอุณหภูมิ

ตาราง 18 สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่ใช้อัตราส่วนวัตถุดิบต่อปริมาณซิงค์คลอไรด์ (เข้มข้นร้อยละ 50) 1:1 เวลาในการเผา 1 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิต่างๆ

สภาวะ	สมบัติ							
Temp. (°C)	Iodine Ads. (mg/g)	MB Ads. (mg/g)	Phenol Ads. (mg/g)	Bulk Density (g/cm^3)	True Density (g/cm^3)	pH	Hardness	%Yield*
500	825.58	126.02	224.42	0.515	1.758	5.3	85.85	39.2
600	863.12	131.98	238.67	0.515	1.808	4.7	84.83	38.4
700	842.64	122.02	234.24	0.515	1.896	4.2	83.99	31.7
800	816.06	117.30	233.78	0.510	1.999	3.9	82.78	20.3

%Yield* เป็นผลได้ที่เทียบจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบ

สภาวะ	สมบัติ			
Temp. (°C)	Iodine Ads. (mmol/g)	MB Ads. (mmol/g)	Phenol Ads. (mmol/g)	BET (m^2/g)
500	3.253	0.394	2.385	987.4
600	3.401	0.413	2.536	1201
700	3.320	0.382	2.489	924.5
800	3.215	0.367	2.484	855.3

2. ผลของอัตราส่วน

ตาราง 19 สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่ใช้อุณหภูมิ 600 ^{o}C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ณ อัตราส่วนวัตถุดิบต่อปริมาณซิงค์คลอไรด์ (เข้มข้นร้อยละ 50) ต่างๆ

สภาวะ	สมบัติ							
Ratio	Iodine Ads. (mg/g)	MB Ads. (mg/g)	Phenol Ads. (mg/g)	Bulk Density (g/cm^3)	True Density (g/cm^3)	pH	hardness	%Yield*
1:1	863.12	131.98	238.67	0.515	1.808	4.7	84.83	38.4
1:2	881.65	183.68	234.18	0.424	1.796	4.7	81.95	37.54
1:3	857.46	184.5	233.80	0.367	1.754	4.8	70.61	26.84

%Yield* เป็นผลได้ที่เทียบจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบ

สภาวะ	สมบัติ			
Ratio	Iodine Ads. (mmol/g)	MB Ads. (mmol/g)	Phenol Ads. (mmol/g)	BET (m^2/g)
1:1	3.401	0.413	2.536	1201
1:2	3.474	0.574	2.488	1002
1:3	3.378	0.577	2.484	1061

3. ผลของเวลา

ตาราง 20 สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ที่ใช้อุณหภูมิ 600 ^{o}C อัตราส่วนวัตถุดิบต่อปริมาณซิงค์คลอไรด์ (เข้มข้นร้อยละ 50) ณ เวลาต่างๆ

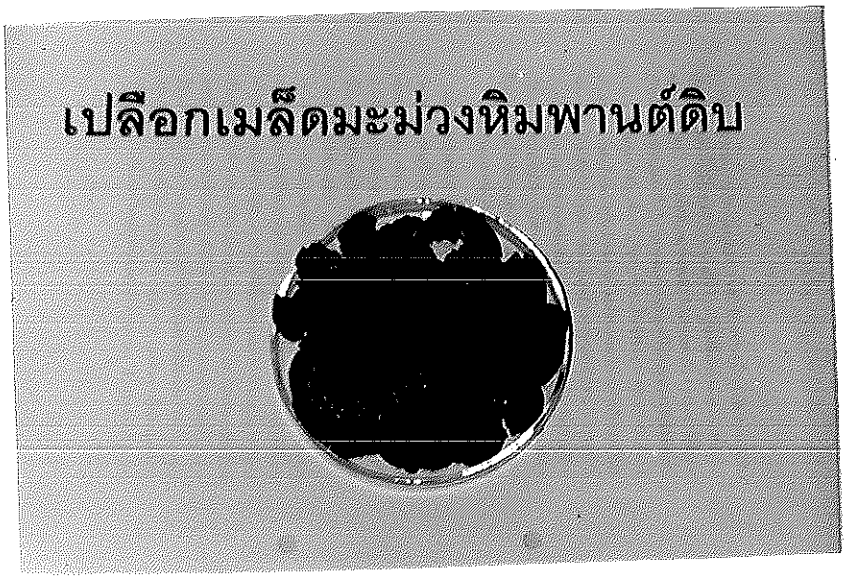
สภาวะ	สมบัติ							
Hour	Iodine Ads. (mg/g)	MB Ads. (mg/g)	Phenol Ads. (mg/g)	Bulk Density (g/cm^3)	True Density (g/cm^3)	pH	hardness	%Yield*
1	881.65	183.68	234.18	0.424	1.796	4.6	81.95	37.54
2	816.02	179.00	210.00	0.417	1.837	4.2	80.08	35.19
3	845.00	181.00	220.00	0.415	1.930	4.5	78.89	35.29

%Yield* เป็นผลได้ที่เทียบจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบ

สภาวะ	สมบัติ			
Hour	Phenol Ads. (mmol/g)	Iodine Ads. (mmol/g)	MB Ads. (mmol/g)	BET (m^2/g)
1	2.488	3.474	0.574	1002
2	2.231	3.215	0.560	888.3
3	2.338	3.329	0.566	1017

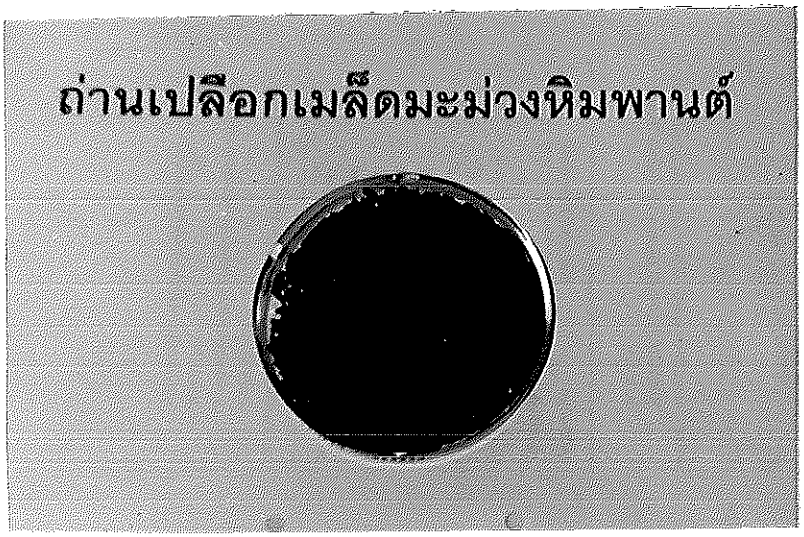
ภาคผนวก ช

ลักษณะของวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์และอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้



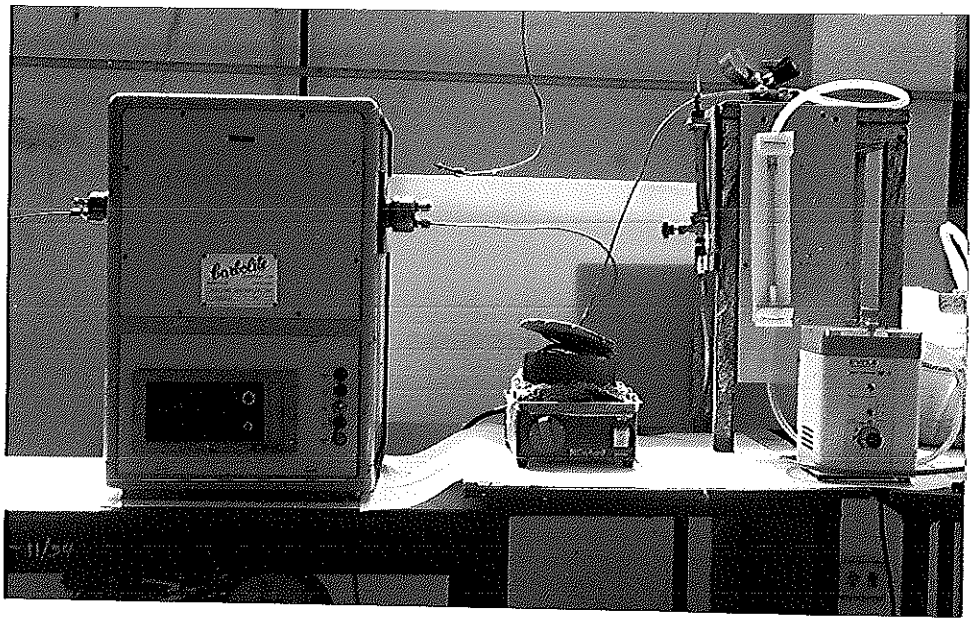
ภาพประกอบ 63 เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้ว

ภาพประกอบ 64 เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดิบที่ผ่านการสกัดน้ำมันออกแล้วที่ผ่านการคัดขนาด



ภาพประกอบ 65 ถ่านคาร์บอไนซ์

ภาพประกอบ 66 ถ่านกัมมันต์



ภาพประกอบ 67 เตาเผาที่ใช้ในกระบวนการผลิต

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวชิตวรรณ นาคฤทธิ์
วัน เดือน ปีเกิด	26 ธันวาคม 2519

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล นครศรีธรรมราช	พ.ศ. 2540